

Vliv povrchu formy na zatékavost polymeru

Bc. Petr Fluxa

Diplomová práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Fluxa**
Osobní číslo: **T16587**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv povrchu formy na zatékavost polymeru**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Připravte experiment s využitím simulací vstřikovacího procesu.
3. Připravte testovací tělesa a proveďte měření.
4. Vyhodnoťte získané výsledky a proveďte statistické zpracování dat.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

dle zadání vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Michal Staněk, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2018

Termín odevzdání diplomové práce:

18. května 2018

Ve Zlíně dne 5. února 2018

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 24. 4. 2018


.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem drsnosti povrchu dutiny formy a technologických parametrů vstřikovacího procesu na zatékavost vybraných termoplastických materiálů.

Teoretická část obsahuje základy technologie vstřikování, poznatky z oblasti reologie polymerních materiálů, charakteristiku drsnosti povrchu a technologické možnosti výroby dutiny formy v požadované jakosti.

V praktické části byl sledován vliv drsnosti povrchu zkušebních desek a vliv vstřikovacího tlaku na tok vybraných termoplastů v dutině formy.

Klíčová slova: vstřikování, zatékavost polymeru, drsnost povrchu, reologie

ABSTRACT

Master's thesis deals with the influence of the mold cavity surface roughness and technological parameters of the injection molding process on polymer fluidity of chosen thermoplastics.

The theoretical part contains basics of the injection molding process, knowledge from the area of polymer rheology, surface roughness characteristics and technological possibilities of mold cavity production in required surface quality.

Influence of testing plates surface roughness and influence of injection pressure on thermoplastics fluidity in mold cavity, was monitored in the practical part.

Keywords: injection molding, polymer fluidity, surface roughness, rheology

Poděkování:

Tato diplomová práce vznikla za podpory Interní grantové agentury UTB ve Zlíně, projektu č. IGA/FT/2018/12. A také za podpory projektu Regionálního výzkumného centra Centrum bezpečnostních, informačních a pokročilých technologií (CEBIA-Tech) č. CZ.1.05/2.1.00/19.0376 a projektu Podpora udržitelnosti a rozvoje CEBIA-Tech č. MSMT-7778/2014 (LO1303). Dále bych velmi rád poděkoval vedoucímu mé práce doc. Ing. Michalu Staňkovi, PhD., za jeho cenné rady a především za čas, který mi věnoval v celém průběhu tvorby mé práce.

Čestně prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

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

Ve Zlíně dne.....

.....

Podpis autora

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ	12
1.1 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	12
1.1.1 Vstřikovací jednotka	13
1.1.2 Uzavírací jednotka	14
1.2 VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	14
1.2.1 Konstrukce vstřikovací formy.....	14
1.2.2 Materiály forem.....	15
1.2.3 Povrch dutiny formy	16
1.3 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	17
1.4 VSTŘIKOVANÉ MATERIÁLY	18
1.4.1 Vstřikování termoplastů	18
2 HODNOCENÍ INTEGRITY POVRCHU	19
2.1 JAKOST POVRCHU	20
2.2 DRSNOST POVRCHU	21
2.3 ROZDĚLENÍ PARAMETRŮ PROFILŮ POVRCHU	21
2.3.1 Výškové parametry profilu povrchu	24
2.4 METODY MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU	25
2.4.1 Kontaktní přístroje	25
2.4.2 Bezkontaktní přístroje	26
2.5 DOSAHOVANÁ DRSNOST POVRCHU V TVAROVÉ DUTINĚ FORMY	27
3 TECHNOLOGIE VYUŽÍVANÉ PŘI VÝROBĚ DUTINY FORMY	29
3.1 FRÉZOVÁNÍ	29
3.1.1 Nástroje	31
3.2 HSC OBRÁBĚNÍ	31
3.2.1 Řezné materiály.....	32
3.2.2 Výhody a nevýhody	32
3.3 BROUŠENÍ	33
3.3.1 Nástroje	33
3.3.2 Metody broušení.....	33
3.4 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ (EDM).....	34
3.4.1 Princip	34
3.4.2 Dielektrické kapaliny	35
3.4.3 Materiály elektrod	35
3.5 DALŠÍ METODY VÝROBY TVAROVÝCH DUTIN	36
3.5.1 Vtlačování za studena	36
3.5.2 Galvanoplastická výroba tvarových částí forem	36
3.5.3 Laser sintering.....	37

3.6	DOKONČOVACÍ OPERACE	38
3.6.1	Leštění	38
4	REOLOGIE POLYMERŮ	39
4.1	REOLOGIE POLYMERNÍCH TAVENIN	40
4.2	VISKOZITA A SMYKOVÝ TOK	42
4.2.1	Zapleteniny polymerních řetězců	45
4.3	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VISKOZITU	45
4.3.1	Teplotní vliv	46
4.3.2	Molekulová hmotnost	46
4.3.3	Vliv indexu newtonského chování	46
4.3.4	Vliv skluzu na stěně	46
4.3.5	Vliv polydisperzity	46
4.4	TOK MATERIÁLU VE VSTŘIKOVACÍ FORMĚ	47
II	PRAKTICKÁ ČÁST	48
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	49
6	PŘÍPRAVA EXPERIMENTU	50
6.1	PODMÍNKY PŘÍPRAVY ZKUŠEBNÍCH TĚLES	50
6.2	SIMULACE VSTŘIKOVACÍHO PROCESU	51
6.3	VSTŘIKOVACÍ STROJ	52
6.3.1	Technologické parametry vstřikování zkušebních vzorků	52
6.3.2	Sušení materiálu	53
6.4	ZKUŠEBNÍ VSTŘIKOVACÍ FORMA	54
6.4.1	Tvarová dutina formy	54
6.4.2	Zkušební desky	55
6.5	VSTŘIKOVANÉ TERMOPLASTY	57
6.6	MĚŘENÍ DÉLKY ZATEČENÍ	58
7	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	59
7.1	DÉLKA ZATEČENÍ V ZÁVISLOSTI NA POVRCHU DESKY - PP	59
7.2	DÉLKA ZATEČENÍ V ZÁVISLOSTI NA VSTŘIKOVACÍM TLAKU - PP	60
7.3	DÉLKA ZATEČENÍ V ZÁVISLOSTI NA POVRCHU DESKY - PC	63
7.4	DÉLKA ZATEČENÍ V ZÁVISLOSTI NA VSTŘIKOVACÍM TLAKU - PC	64
	DISKUZE VÝSLEDKŮ	67
	ZÁVĚR	68
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	69
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	73
	SEZNAM OBRÁZKŮ	74
	SEZNAM TABULEK	76
	SEZNAM PŘÍLOH	77

ÚVOD

Polymerní materiály obecně nacházejí v poslední době stále větší uplatnění ve všech odvětvích průmyslu. V mnoha případech dochází k nahrazování dosud běžně používaných kovových materiálů, či organických materiálů, jako jsou kovy, sklo, či dřevo. S rozšiřujícím se požadavkem na výrobu polymerních výrobků se stejnou rychlostí rozrůstá i průmyslová oblast, která se zaměřuje na výzkum polymerních materiálů a jejich zpracování.

Existuje mnoho technologií zpracování polymerních materiálů, z nichž nejrozšířenější je technologie vstřikování. Touto technologií lze zpracovávat termoplasty, reaktoplasty i elastomery, rozdíl je pak v konstrukci vstřikovací formy, vstřikovacího stroje a nastavení technologických podmínek. Tato technologie se vyznačuje možností výroby výrobků velmi složitých tvarů, kterých by nebylo možné dosáhnout jinými technologiemi zpracování plastů. Další výhodou je často krátká doba přeměny dodávaného materiálu do podoby finálního výrobku, jelikož ve většině případů není nutné využití dodatečných operací. Tyto dvě výhody společně s možností plné automatizace výroby činí technologii vstřikování plastů vysoce produktivní. Vzhledem k produktivitě této technologie je o to důležitější optimalizace výrobního procesu, kde každá sekunda zkrácení vstřikovacího cyklu může vést k nezanedbatelným úsporám nákladů.

Vstřikovací forma je v porovnání s jinými nástroji velmi drahou záležitostí. I z tohoto důvodu byla většina konstrukčních prvků formy normalizována. Normalizovány jsou jednotlivé desky, vodící prvky, celé horké vtokové bloky apod. Nicméně tvarovou dutinu, tvořenou tvarovými vložkami, či čelistmi, není možné normalizovat, jelikož tvar výrobku je pro každou aplikaci jiný. A právě na tvarovou dutinu formy jsou kladeny největší nároky, jelikož má největší podíl na kvalitě vyráběných dílů. Významnou roli zde hraje odolnost proti opotřebení, jelikož požadavkem je vyrábět díly jednotné kvality a shodných rozměrů, a to za působení vysokých tlaků při vstřikování a plnění dutiny formy a rychlých teplotních změn. Plnění tvarové dutiny formy je velmi rychlý a zároveň velmi komplikovaný děj a je nejdůležitější částí vstřikovacího cyklu.

Při výrobě tvarové dutiny formy je využíváno mnoho konvenčních i nekonvenčních technologií a pro každou technologii je specifická jakost obrobeného povrchu. Jakost povrchu dutiny formy má jistý vliv na zatékavost polymeru a také má nezanedbatelný vliv na celkové náklady na výrobu vstřikovací formy.

I. TEORETICKÁ ČÁST

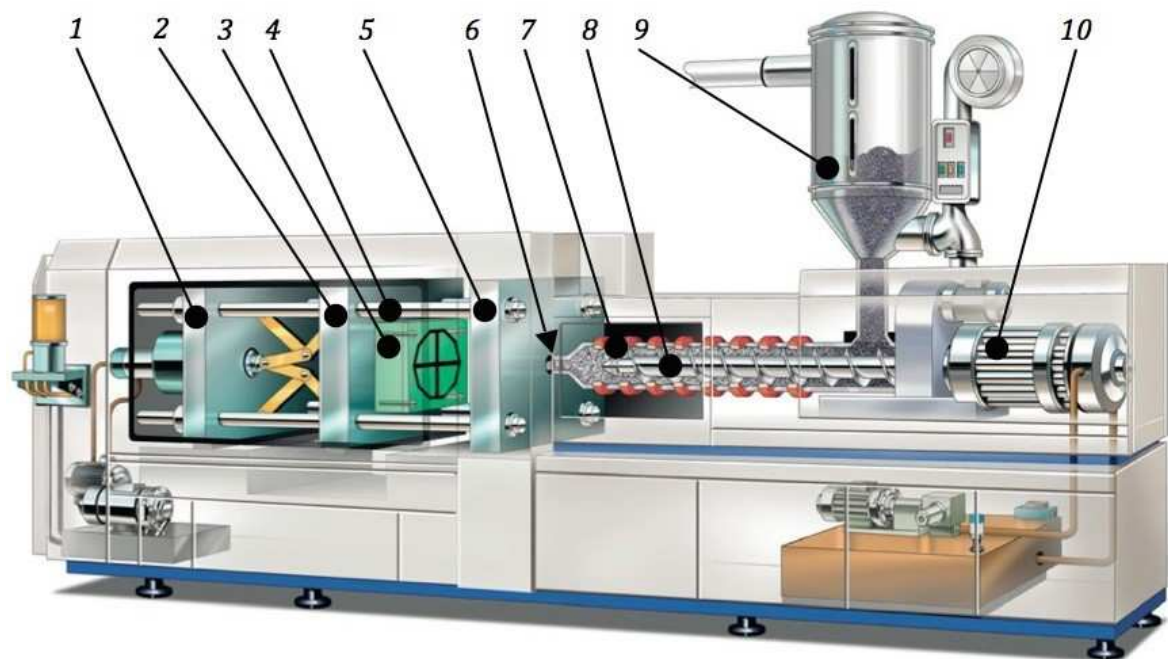
1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování je nejrozšířenější technologií zpracování plastů. Je to poměrně náročný fyzikální proces, na kterém se podílí polymer, vstřikovací stroj a vstřikovací forma. Vstřikováním se vyrábějí konečné výrobky nebo to mohou být i polotovary, či díly pro další zkompletování celku. Tyto výrobky mají velmi dobrou rozměrovou a tvarovou přesnost a vysokou reprodukovatelnost mechanických a fyzikálních vlastností. Vstřikování je cyklický proces, při kterém lze zpracovávat drtivou většinu termoplastů. Výhodou vstřikování je krátký čas jednoho cyklu a z toho vyplývající vysoká produktivita, možnost výroby tvarově složitých výrobků při dobré toleranci rozměrů a dobrá povrchová úprava. Mezi nevýhody patří především vysoké investiční náklady na zavedení výroby, dlouhá doba nutná k vyrobení formy. Proto i díky možnosti automatizace se tato technologie používá v hromadné výrobě. [1,18]

1.1 Vstřikovací stroj

Jak už bylo řečeno, jedním ze základních činitelů výroby je vstřikovací stroj. Požadavkem na vstřikovací stroj je výroba výstřiků v požadované jakosti. V současné době existuje velké množství konstrukčních řešení strojů, které se od sebe odlišují samotným provedením, stupněm řízení, stálostí a reprodukovatelností jednotlivých parametrů, rychlostí výroby, náročností obsluhy a v neposlední řadě i cenou. Konstrukce je charakterizována podle vstřikovací jednotky, uzavírací jednotky a řízení stroje. V dnešní době se staví hydraulické, hydraulicko-mechanické stroje, stále častěji pak hybridní stroje jako hydraulicko-elektrické. Jsou často stavebnicového uspořádání a liší se stupněm elektronického řízení. Ovládací a řídicí prvky bývají umístěny na panelu vstřikovacího stroje, případně v elektrorozvodné skříni vybavené zásuvkami a vypínači. To lze využít pro připojení dalších zařízení, jako jsou temperační a vytápěcí jednotky, zařízení pro ovládání tahačů jader, dopravníky materiálu apod. Při výrobě jsou kladeny na vstřikovací stroj tyto požadavky:

- tuhost a pevnost při vstřiku;
- zajištění konstantního tlaku, rychlosti, teploty a dalších parametrů a jejich časování;
- reprodukovatelnost technologických parametrů. [1]



Obr. 1. Schéma vstřikovacího stroje [19]

1 – uzavírací jednotka, 2 – pohyblivá upínací deska stroje, 3 – pohyblivá část vstřikovací formy, 4 – vodící sloupky, 5 – opěrná deska stroje pevná, 6 – čelo špičky vstřikovací trysky, 7 – tavící komora, 8 – šnek, 9 – násypka, 10 – pohonná jednotka šneku

1.1.1 Vstřikovací jednotka

Úkolem vstřikovací jednotky je příprava a dopravení požadovaného množství polymerní taveniny o předepsaných vlastnostech do vstřikovací formy. Objem polymerní taveniny ve vstřikovací jednotce neodpovídá objemu dutiny formy, jelikož je nutné počítat s rezervou pro případné doplnění úbytku materiálu při ochlazování (vlivem smrštění). Optimální množství vstřikovaného materiálu je 80 % maximálního objemu vstřikovací jednotky. [1]

V případě šnekového vstřikovacího stroje funguje vstřikovací jednotka tak, že do tavného válce je dodáván granulát pomocí násypky a je dále dopravován pomocí pohybu šneku. Materiál je průchodem přes vstupní, přechodové a výstupní pásmo plastikován, homogenizován a hromadí se před šnekem. Šnek při plastikaci postupně odjíždí proti pohybu materiálu. Tepelná energie je dodávána pomocí topných pásem a část tepelné energie vznikne disipací v materiálu. Tavná komora je zakončena vyhřívanou tryskou, která zajišťuje spojení vstřikovací jednotky s formou. U některých typů polymerů je nutné používání uzavíratelných trysek, např. pokud dochází k tzv. tažení vlákna. [1]

1.1.2 Uzavírací jednotka

Uzavírací jednotka ovládá chod formy a zajišťuje její dokonalé uzavření, otevření a případně vyprázdnění. Velikost uzavírací síly se odvíjí od velikosti vstřikovacího tlaku a ploše dutiny a vtoků v dělicí rovině. Mezi hlavní části uzavírací jednotky patří pevná a upínací deska, vodící sloupky a samotný uzavírací mechanismus. Uzavírací mechanismus je ukazatelem kvality uzavírací jednotky. Může mít mnoho různých provedení, používají se hydraulická, hydraulicko-mechanická, či elektricko-mechanická, některé konstrukce uzavíracích jednotek jsou bez vodících sloupků atd. [1]

1.2 Vstřikovací forma

Vstřikovací forma udává tavenině výsledný tvar a rozměry výrobku, při zachování požadovaných fyzikálních a mechanických vlastností. Dobrá kvalita formy splňuje tyto požadavky:

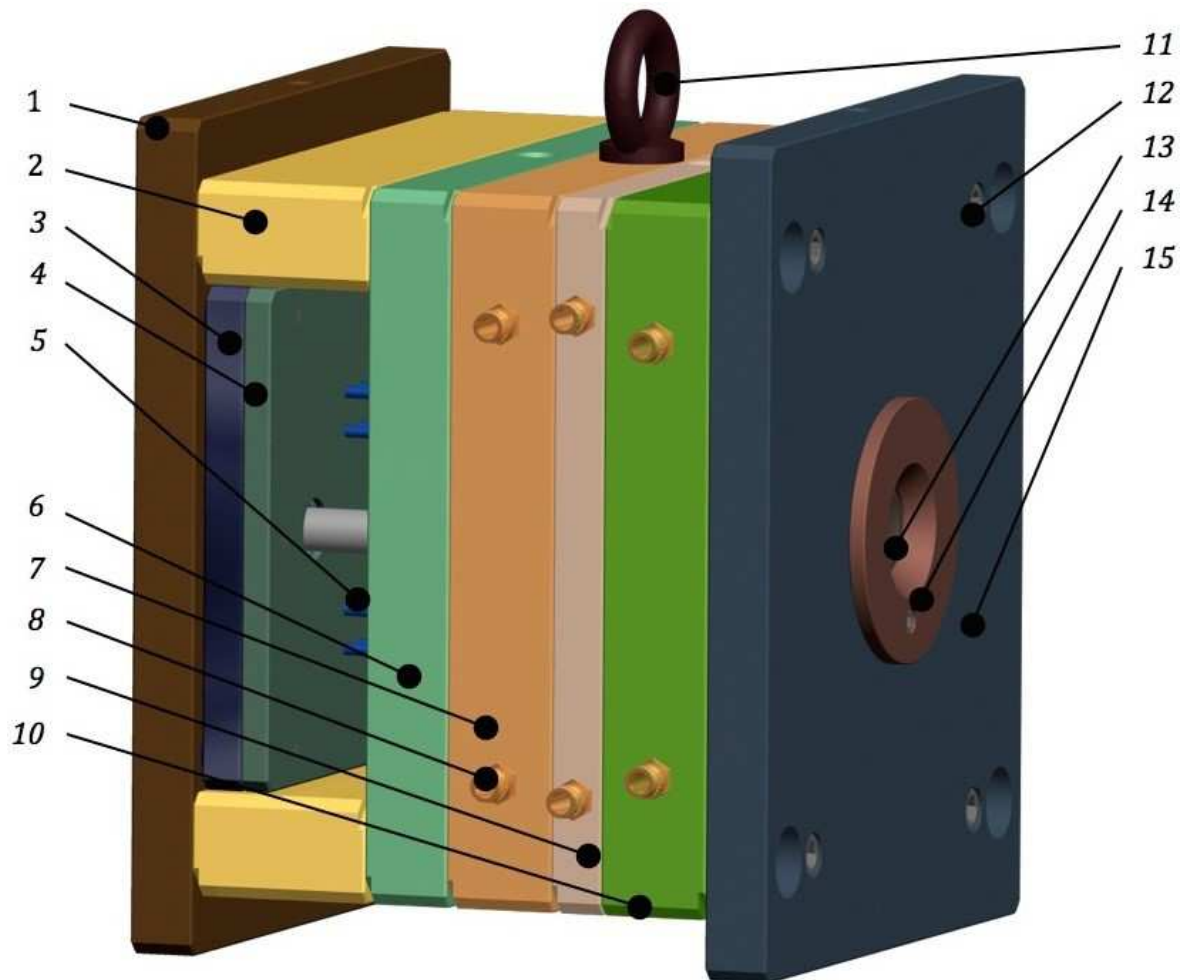
- technické, které zaručují správnou funkci formy (výroba požadovaného počtu výrobků v náležité kvalitě a přesnosti, snadná manipulace a obsluha);
- ekonomické (nízká pořizovací cena, snadná a rychlá výroba výrobků, vysoké využití materiálu);
- společensko-estetické (zajištění bezpečné práce, vhodné prostředí, dodržení všech bezpečnostních zásad při výrobě i provozu formy). [1]

1.2.1 Konstrukce vstřikovací formy

Obecně se vstřikovací forma skládá z dvou typů součástí. Do první skupiny lze zařadit součásti tvořící dutinu formy, jež jsou ve styku s materiálem. Do druhé skupiny spadají ostatní součásti, které zajišťují ukotvení součástí z první skupiny, či zajišťují samotný chod formy. Části formy spadající do druhé skupiny jsou často normalizovány, jelikož nejsou přímo závislé na tvaru výrobku a lze je tedy použít pro různé výrobky. [3]

U vstřikovací formy jsou kladeny požadavky na:

- vysokou přesnost a požadovanou jakost ploch dutiny formy a funkčních dílů;
- tuhost a pevnost jednotlivých částí formy i celků;
- správnou funkci formy, vhodný vtokový systém, vyhazování, temperaci atd.;
- optimální životnost zaručenou konstrukcí, materiálem i výrobou. [1]



Obr. 2. Schéma vstřikovací formy [19]

1 – upínací deska levé (pohyblivé) části vstřikovací formy, 2 – rozpěrná deska, 3 – kotevní vyhazovací deska, 4 – opěrná vyhazovací deska, 5 – vyhazovač, 6 – opěrná deska, 7 – levá kotevní deska, 8 – nátrubek temperace, 9 – mezideska, 10 – kotevní deska pravá, 11 – manipulační oko, 12 – hlavní montážní šrouby, 13 – vtoková vložka, 14 – středící kroužek pravý, 15 – upínací deska pravé (nepohyblivé) části vstřikovací formy

1.2.2 Materiály forem

Vstřikovací formy se skládají z velkého množství součástí, přičemž ne všechny jsou vyrobeny ze stejného materiálu. Části formy tvořící tvarovou dutinu vykazují mnohem vyšší požadavky na materiál než na jiné části forem. Volba materiálu tvarových částí se řídí vlastnostmi vstřikovaného polymeru. Dalšími kritérii jsou způsob výroby těchto částí, jejich velikost, možnosti tepelného a chemicko-tepelného zpracování apod. [3,20]

Část tvarových dílů malých a středně velkých forem se vyrábí z cementačních ocelí. Po tepelném zpracování je povrch nasycený uhlíkem tvrdý a odolný proti opotřebení, ovšem jádro růstává měkčí a tím i houževnatější. Z používaných ocelí lze uvést např. chrom-manganovou ocel 1.2162 (ČSN 19 487). Tato ocel má střední prokalitelnost, vysokou houževnatost, relativně dobrou odolnost proti opotřebení. Mimo použití pro tvarové části dutiny formy se tato ocel používá i při výrobě vtokových vložek. Pro zpracování chemicky agresivních plastů nebo pro výrobu velkých tvárnků a tvárnic se používají mangan-vanadové ocele, například 1.2842 (ČSN 19 312). Tato ocel se rovněž používá pro výrobu dorazů ve formě. U tvarových částí s požadavkem na vysokou houževnatost se používají nástrojové ocele chrom-nikl-vanadové, například 1.2601 (ČSN 19 614). Používaných materiálů je samozřejmě velké množství v závislosti na požadovaných vlastnostech. [3,20]

Na ostatní části formy, jako jsou například jednotlivé desky, se používají konstrukční ocele jako 1.0570 (ČSN 11 523) nebo 1.0060 (ČSN 11 600). Pro desky s požadavkem na vyšší pevnost se používá konstrukční uhlíková ocel 1.0535 (ČSN 12 060). Nejvíce namáhané desky se pak vyrábí z cementačních ocelí jak konstrukčních, tak i nástrojových. [20]

Vodící sloupky a pouzdra jsou z pravidla vyrobeny z cementačních ocelí 1.7131 (ČSN 14 220). Jsou cementovány a kaleny. Vyhazovače jsou nejčastěji vyrobeny z ocelí 1.2210 (ČSN 19 421) a 1.2363 (ČSN 19 452). [20]

1.2.3 Povrch dutiny formy

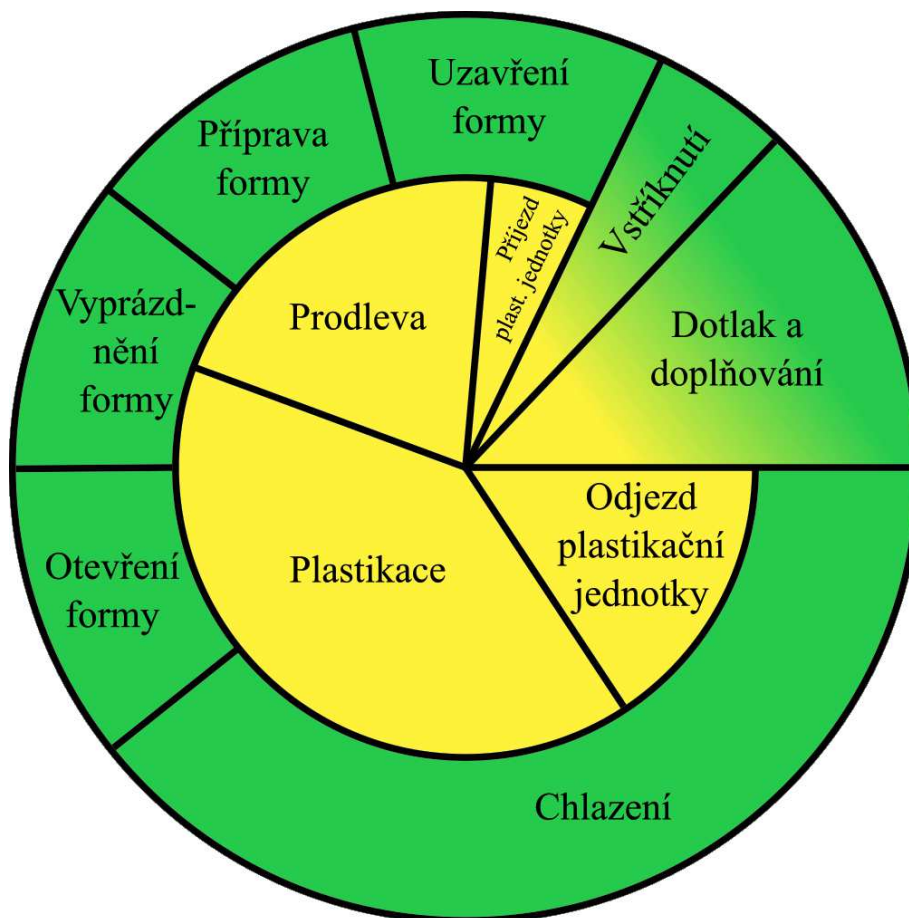
Dutina formy je definována tvarem výrobku a jeho rozměry a také jakostí povrchu. Vzhledem k tomu, že povrch budoucího výstřiku je obrazem povrchu dutiny formy, je nutné vycházet z požadavku na vyráběný díl. Povrch dutiny formy může být:

- matný, který je technologicky nejjednodušší. Běžně vyrobitelný elektroerozivním obráběním, případně ručními úpravami, otryskáváním apod. Způsob dokončení dutiny formy je volen dle požadované jakosti;
- lesklý, nejnáročnější na výrobu. Dutina formy musí být vyrobena z kvalitní oceli. Povrch je leštěn různými mechanickými pomůckami, nebo elektrickými jednotkami s rotačním, přímočarým, či planetovým pohybem za pomoci brusného tělíska nebo brusné pasty. Stupeň lesku je definován, např. vysoký lesk, zrcadlový, atd.;

- drénovaný, který nachází stále větší uplatnění. Kromě estetického významu také zakrývá i některé drobné povrchové vady na výstřiku. [1]

1.3 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus je složen z cyklu formy a cyklu plastikační jednotky, přičemž některé operace spolu sdílí a jsou stejně dlouhé. Vstřikování a dotlak jsou společnými operacemi jak pro formu, tak plastikační jednotku. Po ukončení dotlaku dojde k odjezdu plastikační jednotky, následuje plastikace další dávky taveniny. Po dokončení plastikace může následovat prodleva, pokud forma není připravena a následně dojde k příjezdu plastikační jednotky a cyklus se opakuje. Ve formě po ukončení dotlaku následuje chlazení, které je z hlediska potřebné doby nejnáročnější. Po ochlazení dílce je forma otevřena, výstřik je vyhozen pomocí vyhazovacího systému, dále může následovat příprava formy apod. Když je forma připravena, dojde k jejímu uzavření a je připravena na další vstřikování, tedy na další cyklus. [18,21]



Obr. 3. Graf vstřikovacího cyklu [21]

1.4 Vstřikované materiály

Technologie vstřikování slouží ke zpracování velmi široké škály polymerních materiálů. Tyto materiály lze rozdělit do dvou základních skupin:

- termoplasty, které mají přímé (lineární polymery) nebo větvené (rozvětvené polymery) řetězce. Při ohřevu se uvolní soudržnost řetězců a je tak umožněno tváření. Po ochlazení se dostanou opět do pevného stavu. Z pevného stavu jsou opět tavitelné, je možné je znovu zpracovávat, tedy recyklovat;
- reaktoplasty, jejichž řetězce jsou po zpracování příčně propojeny chemickými vazbami a vytváří prostorovou trojrozměrnou síť. Při ohřevu je zvýšena pohyblivost této sítě, ale nedochází k úplnému uvolnění řetězců. Při vstřikování dochází ke změně vstřikovacího cyklu, kdy místo chlazení je zaveden ohřev, který zapříčiní zesíťování. Reaktoplasty nelze opětovně tavit a jejich recyklace je velmi obtížná. [1]

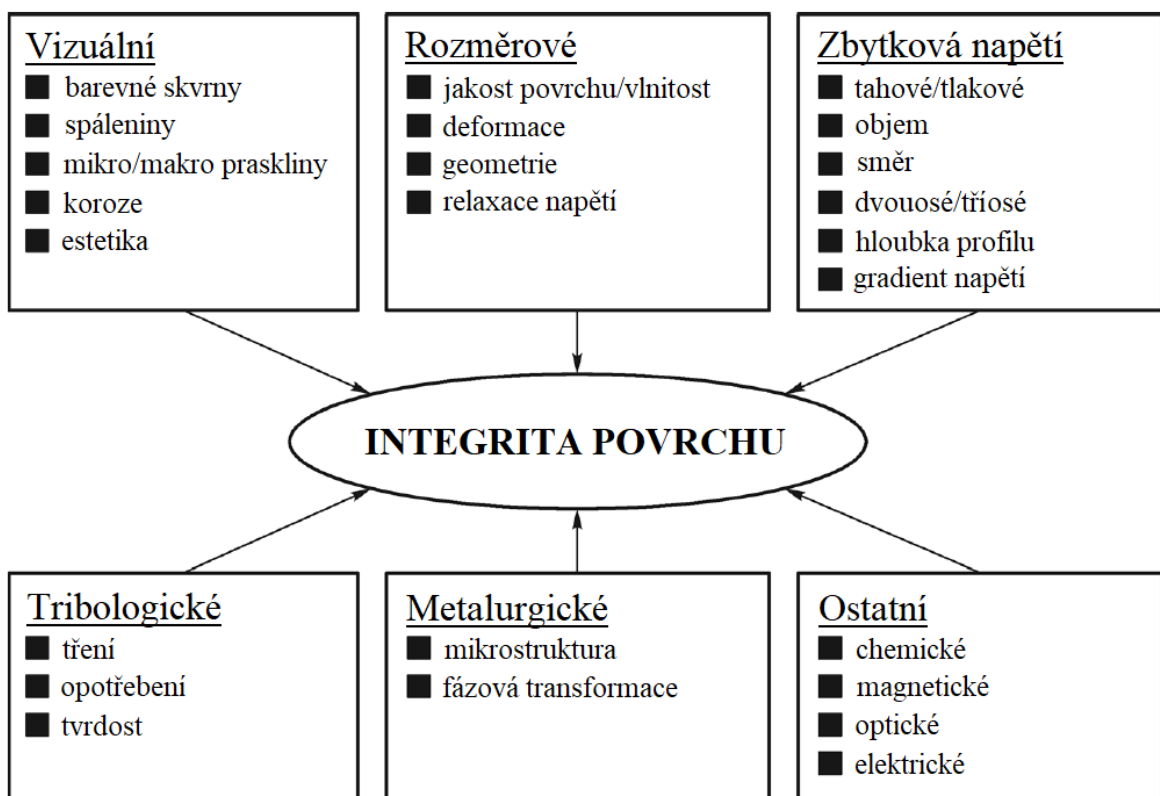
1.4.1 Vstřikování termoplastů

Termoplasty tvoří nejrozšířenější skupinu. Lze je dále dělit dle vnitřní struktury na amorfní, které vykazují nepravidelné prostorové uspořádání, a semikrystalické, které obsahují jak amorfní část, tak i pravidelné uspořádání řetězců do tzv. sférolitů. Jednotlivé termoplasty se liší svými vlastnostmi a tyto vlastnosti lze dále měnit pomocí přísad. Mohou to být různé typy plniv v podobě prášků nebo vláken, které mění především fyzikální a mechanické vlastnosti plastů. Dále jsou to barviva pro dosažení požadovaného odstínu, stabilizátory, retardéry hoření, nadouvadla apod. [1,21]

Při hodnocení vlastností materiálů je mimo mechanických, elektrických, chemických, či optických vlastností důležitá tekutost. Tato veličina je důležitá pro samotné zpracování z hlediska koncepce zaformování, velikosti, případně počtu vtoků. Z toho dále vyplývá i návrh temperačních okruhů apod. Další důležitou vlastností je smrštění, které je mnohem výraznější než u kovových materiálů a určuje výrobní přesnost výrobku. V neposlední řadě je také nutno brát ohled na citlivost materiálu na technologické parametry. [1,21]

2 HODNOCENÍ INTEGRITY POVRCHU

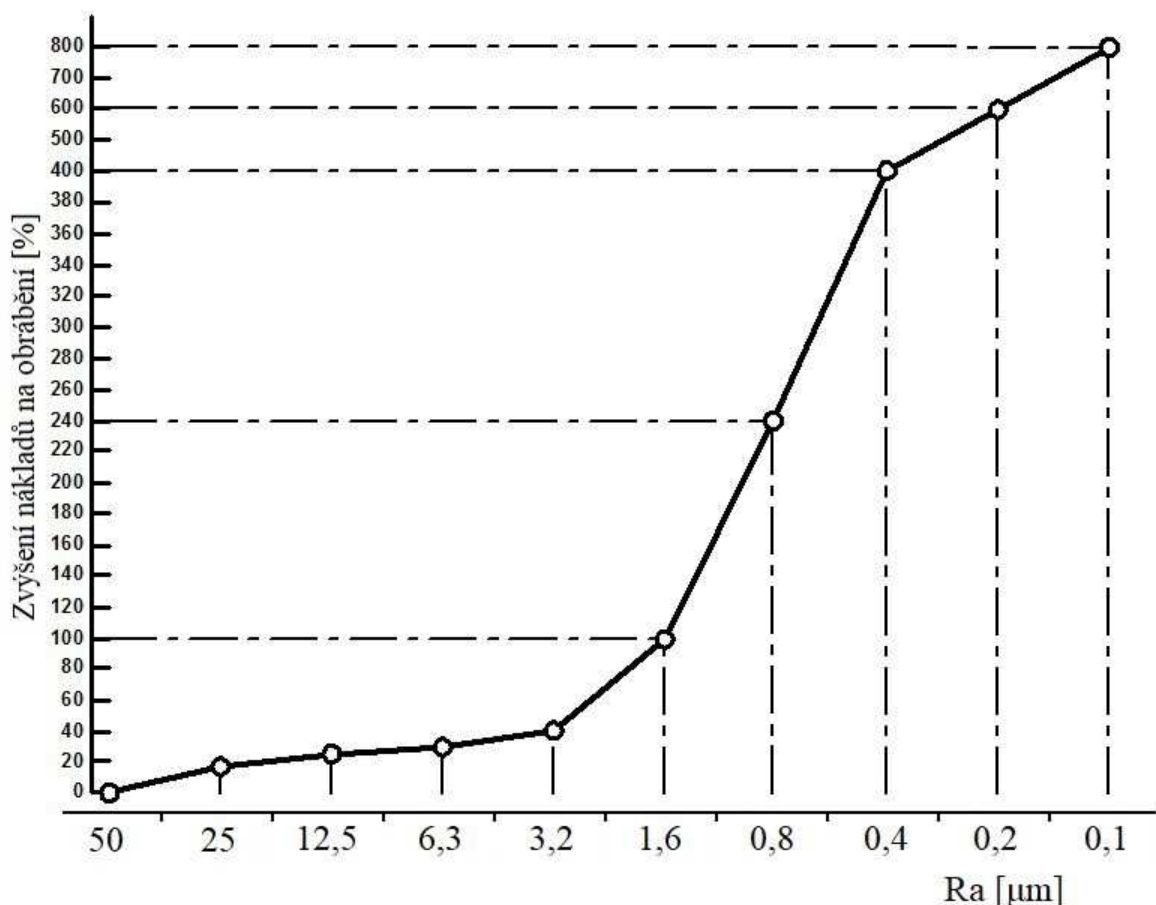
Z hlediska výroby má zásadní význam znalost mechanismu vytváření nového povrchu součástí. To umožňuje pochopení povahy a vlastností vzniklého povrchu, dává možnost pro zlepšení použitých procesů, případně umožňuje vytvoření obrobených ploch bez poruch. Všechny změny v povrchu součásti lze posuzovat jako změny jakosti. Tyto změny se dále mohou dávat do vztahu s budoucí funkcí dokončené plochy a využívají se pro hodnocení její integrity. Integrita povrchu je tedy odrazem podmínek, ze kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek. Zatím neexistuje způsob, kterým by bylo možné komplexním způsobem zhodnotit nově vytvořenou plochu z hlediska integrity. Některé údaje o obrobené ploše se běžně zjišťují, pro jiné jsou zpracovávány postupy, nicméně zatím nejspolehlivější zkouškou integrity je samotný provoz. [23]



Obr. 4. Klíčové složky integrity povrchu [22]

2.1 Jakost povrchu

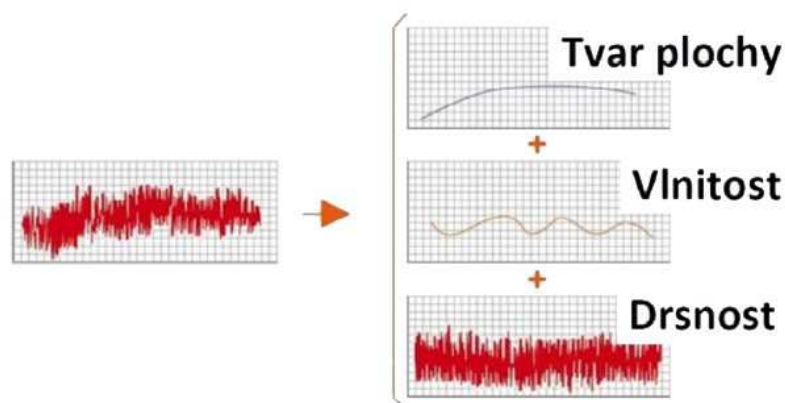
Pojem jakost povrchu z hlediska technologie výroby zahrnuje přesnost rozměrů, přesnost geometrického tvaru, polohy a drsnosti povrchu. K těmto hodnotám patří navíc i sledování chemických a fyzikálních změn vlastností materiálu v povrchové vrstvě obrobku, které vznikly v důsledku vlastního procesu úběru materiálu. Jakost povrchu má výrazný vliv na životnost a spolehlivost provozu součásti. Na jakosti povrchu je závislá přesnost chodu strojních součástí, jejich hlučnost, doba záběhu, ztráty třením, přestup tepla, konkrétně u forem to je odolnost proti opotřebení, odolnost proti korozi, únavová pevnost a samozřejmě přímý vliv na jakost vyrobeného výstřiku. V dnešní době je možné vyrobit vysoce jakostní povrch, nicméně s rostoucí jakostí povrchu rostou i náklady (Obr. 5). Je proto třeba hledat optimum. [21,24]



Obr. 5. Náklady na obrábění v závislosti na požadované jakosti povrchu [38]

2.2 Drsnost povrchu

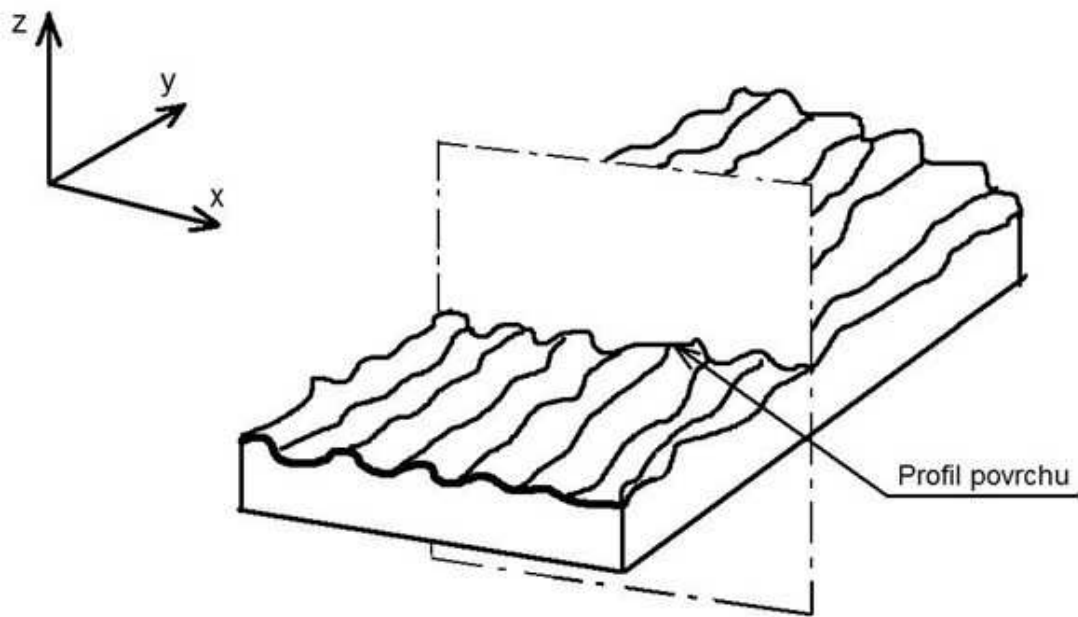
Drsnost povrchu hraje v technické praxi nezastupitelnou roli a tvoří velmi rozsáhlou problematiku. K vyhodnocení drsnosti povrchu slouží různé techniky, či matematické postupy. Dle ČSN EN ISO 4287 byla stanovena definice drsnosti povrchu: drsnost povrchu je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Při pohledu na reálný povrch je třeba rozlišovat mikronerovnost (drsnost povrchu – stopy po řezném nástroji, či brusivu) a makronerovnost (vlnitost povrchu nejčastěji způsobená vibrační soustavou Stroj – Nástroj – Obrobek – Prostředí). Tyto nerovnosti se u obrobených povrchů navzájem překrývají a je třeba je navzájem odfiltrovat. Do hodnocení drsnosti povrchu se samozřejmě nepočítají vady, jako jsou škrábance, povrchové trhliny, praskliny, naraženiny apod. [25]



Obr. 6. Struktura povrchu po odfiltrování [26]

2.3 Rozdělení parametrů profilů povrchu

Nejdříve je nutné definovat, co je to profil povrchu. Profil povrchu je průsečnicí nerovností skutečného povrchu s rovinou vedenou kolmo k tomuto povrchu (Obr. 7.) a je základním zdrojem informací pro posuzování drsnosti povrchu. [25]

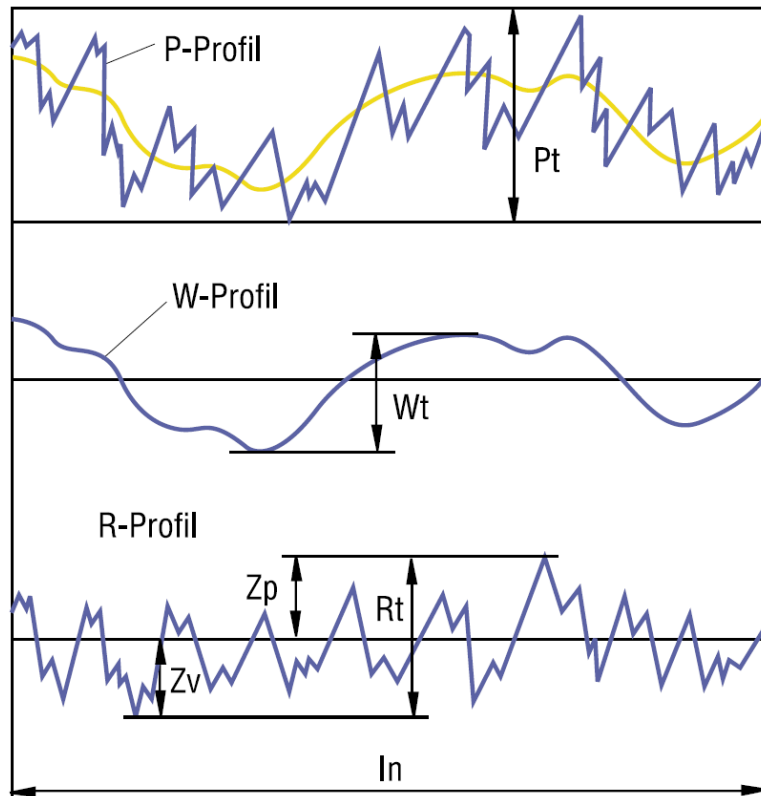


Obr. 7. Profil povrchu [25]

Dle normy ČSN EN ISO 4287 jsou definovány geometrické parametry (Obr. 8.):

- P-parametr, který je dán jako nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami z nefiltrovaného povrchu v rámci měřené délky l_n ;
- W-parametr, který vyjadřuje vzdálenost mezi nejvyšším a nejhlubším bodem profilu vlnitosti (drsnost odfiltrována) uvnitř vyhodnocované délky l_n ;
- R-parametr, svislá vzdálenost od nejvyššího bodu k nejhlubšímu bodu filtrovaného profilu (vlnitost odfiltrována) uvnitř měřené délky l_n . [25]

Základní délka l je délka základní čáry užívaná pro oddělení nerovností charakterizujících drsnost povrchu od jiných geometrických úchylek. Praktické hodnoty základní délky l jsou závislé na měřené veličině drsnosti povrchu a jedná se o tabulkové hodnoty (Tab. 1. a Tab. 2.). [24]



Obr. 8. Parametry P, W, R na profilu povrchu [27]

Tab. 1. Základní délky l pro veličinu R_a [24]

l [mm]	R_a [μm]		
0,08		do	0,025
0,25	přes 0,025	do	0,4
0,8	přes 0,4	do	3,2
2,5	přes 3,2	do	12,5
8,0	přes 12,5	do	100,0

Tab. 2. Základní délky l pro veličiny R_z a R_m [24]

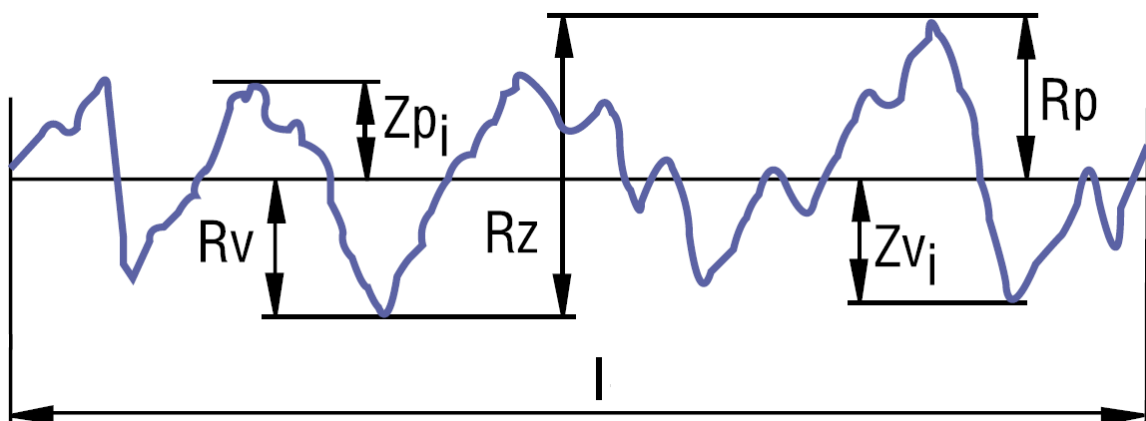
l [mm]	R_z, R_m [μm]		
0,08		do	0,010
0,25	přes 0,10	do	1,6
0,8	přes 1,6	do	12,5
2,5	přes 12,5	do	50
8,0	přes 50	do	400

Vyhodnocovaná délka l_n je délka, na které se vyhodnocuje profil povrchu. Pro R-profil tato délka obsahuje implicitně 5 základních délek. Pro jiný počet se musí předepsat. [24,25]

2.3.1 Výškové parametry profilu povrchu

Dne normy ČSN EN ISO 4287 jsou definovány například tyto parametry:

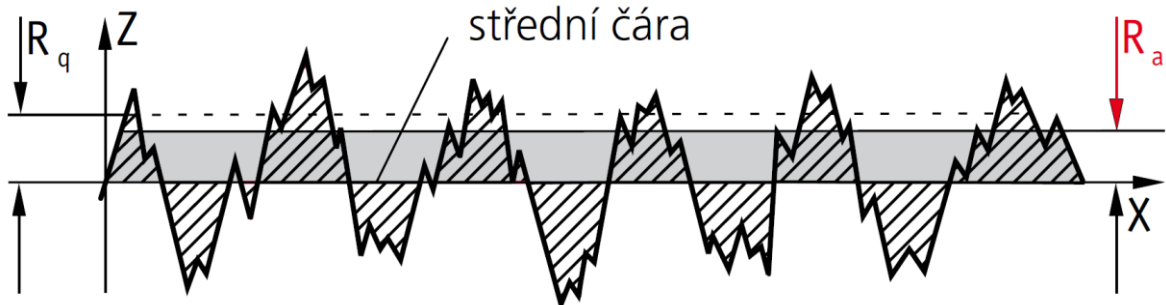
- největší výška výstupku profilu R_p (Obr. 9.), to je výška Z_p nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky l ;
- největší hloubka prohlubně profilu R_v (Obr. 9.), to je hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l ;
- největší výška profilu R_z (Obr. 9.), to je součet výšky nejvyššího výstupku profilu R_p a hloubky nejnižší prohlubně R_v uvnitř rozsahu základní délky l ;



Obr. 9. Parametry R_p , R_v a R_z [27]

- střední vzdálenost výšek elementů profilu R_c , aritmetický průměr výšek elementů drsnosti profilu Z_t v rozsahu základní délky l . Měření R_c požaduje zadání jedné vertikální a horizontální hladiny řezu;
- střední aritmetická hodnota drsnosti R_a (Obr. 10.), to je aritmetický průměr absolutních odchylek filtrovaného profilu drsnosti od střední čáry uvnitř rozsahu základní délky l . Vypovídající schopnost parametru je nízká, jelikož R_a nereaguje na extrémní výšky hrotů profilu a hloubky rýh profilu;
- střední kvadratická hodnota drsnosti R_q (Obr. 10.), to je střední kvadratická hodnota odchylek filtrovaného profilu drsnosti v rozsahu základní délky l . Parametr R_q má

význam při statistickém pozorování profilu povrchu, jelikož R_q zároveň odpovídá standardní odchylce z profilových souřadnic. [25,27,28]



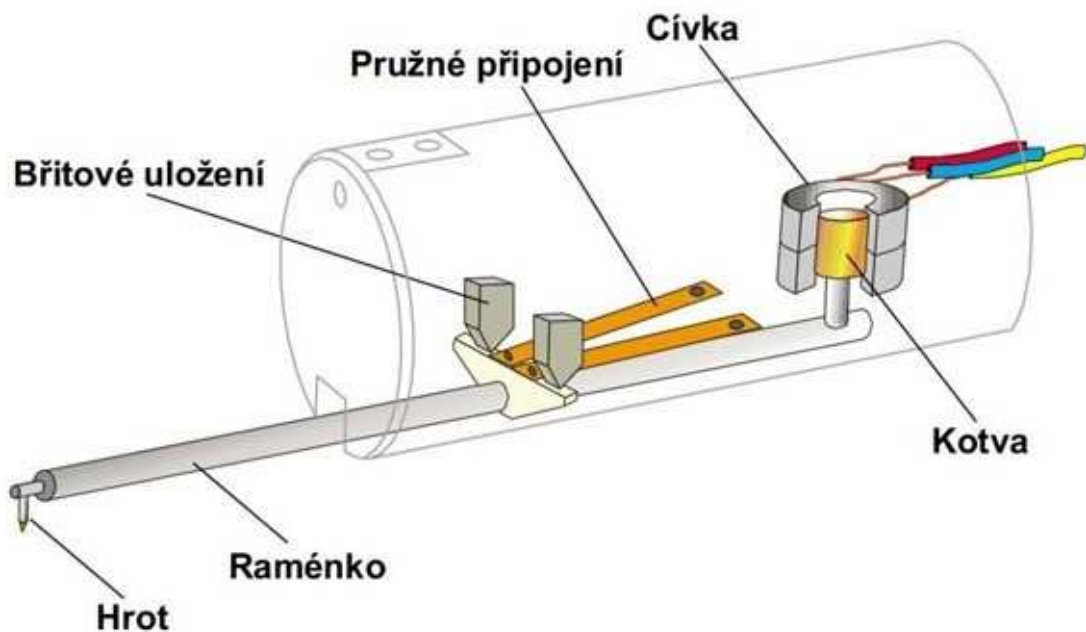
Obr. 10. Parametry R_a a R_q [28]

2.4 Metody měření drsnosti povrchu

Pro možnost hodnocení drsnosti povrchu a pro kvantitativní měření charakteristik drsnosti povrchu byl vyvinut velký počet kontrolních metod a měřících přístrojů, založených na různých principech a vyráběných různými výrobci. Obecně lze přístroje pro hodnocení povrchů rozdělit na kontaktní a bezkontaktní. [24,25]

2.4.1 Kontaktní přístroje

Kontaktní přístroj je takový přístroj, který má speciálně upravený hrot, pomocí kterého jsou snímány souřadnice vyhodnocovaného povrchu a následně jsou zpracovávány za pomoci počítače. Kontaktní přístroj je složen z mechanické a elektronické části. Mechanická část je složena z pracovního stolku, sloužícího k ukotvení měřené součásti, a z ramena se snímacím hrotem. Elektronická část slouží k převedení mechanického signálu generovaného snímacím hrotem sledujícím nerovnosti povrchu měřené plochy na elektrický signál, který je dále zpracováván. Přístroje často umožňují přenos naměřených dat do PC a jejich podrobnější vyhodnocení. [25]

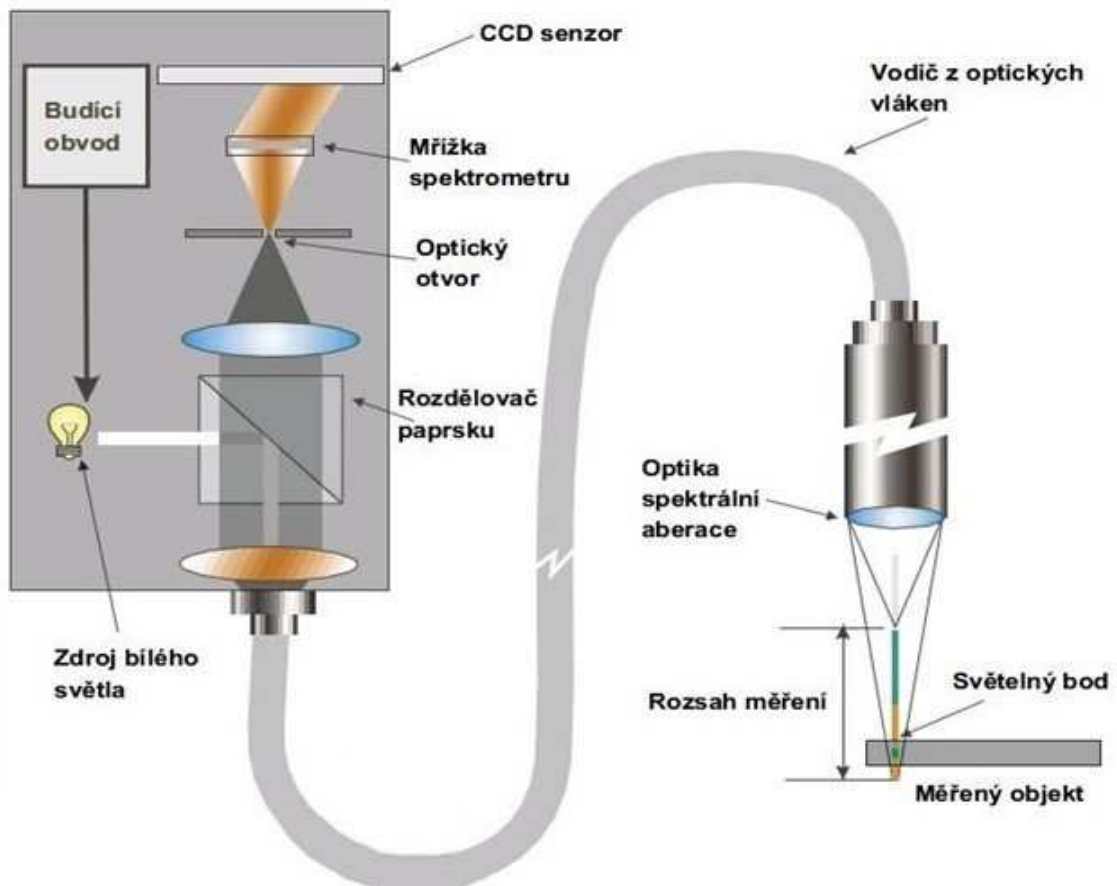


Obr. 11. Schéma indukčního systému měření povrchu kontaktním způsobem [25]

2.4.2 Bezkontaktní přístroje

V laboratorní a vědecké praxi se využívají především bezkontaktní přístroje, jelikož tyto přístroje vyžadují čistotu povrchu. Bezkontaktní přístroje využívají bezkontaktních snímačů, z nichž se nejčastěji využívá CLA (Chromatic Length Aberration) snímačů a snímačů laserových. Rozlišitelnost CLA snímačů se pohybuje v jednotkách μm , laserové snímače jsou přibližně o řád přesnější. [25]

Princip CLA je založen na rozkladu bílého světla za pomoci optiky a jeho nasměrování na kontrolovaný povrch. Světlo je rozloženo podle vlnových délek a v každém bodě povrchu je zaostřena jen určitá vlnová délka. Světlo odražené z povrchu prochází otvorem, který propustí pouze světlo zaostřené vlnové délky. Spektrometr vychýlí světlo na maticový senzor, kde je každému bodu připravena prostorová poloha, která je následně počítačově zpracována a vyhodnocena. Zpracování probíhá za pomoci speciálních softwarů, které umožňují 3D zpracování dat, včetně 3D vizualizace. [25]



Obr. 12. Schéma CLA snímače [25]

2.5 Dosahovaná drsnost povrchu v tvarové dutině formy

Jednotlivé díly vstřikovací formy včetně dílů tvořících dutiny formy je dány přesností a jakostí povrchu výrobním výkresem a technologickým postupem. Konkrétně pro výrobu dílů tvořících tvarovou dutinu vstřikovací formy se využívá větší množství technologií a tyto technologie se liší dosažitelnou hodnotou drsnosti povrchu (Tab. 3.). Při znalosti hodnot požadovaných výkresem a dosažitelných hodnot drsnosti povrchu pro jednotlivé technologie, je pak už snadné stanovit výrobní technologie i s příslušným výrobním zařízením. Hodnota drsnosti povrchu se volí s požadavkem na funkci dané plochy. Dalším parametrem je i stupeň přesnosti, jelikož stupeň přesnosti souvisí s drsností povrchu. [2]

Tab. 3. Přehled dosažitelných drsností povrchu vybraných technologií [2,4,29]

Způsob obrábění	Dosažitelná drsnost Ra [μm]	
Frézování čelní – jemné	3,2	(1,6)
Frézování čelní – velmi jemné	1,6	(0,8)
Frézování válcovou frézou - jemné	3,2	(1,6)
Soustružení – jemné	1,6	(0,8)
Soustružení – velmi jemné	0,4	(0,2)
Vystružování	0,8	(0,4)
Vyvrtávání – jemné	1,6	(0,8)
Vyvrtávání – velmi jemné	0,4	(0,2)
Broušení na plocho – obvodové	0,4	(0,2)
Broušení na plocho – čelní	0,4	(0,2)
Broušení brusnými pásy – vyhlazování	1,6 - 0,8	
Broušení brusnými pásy – jemné vyhlazování	0,8 - 0,4	
Broušení brusnými pásy – předleštění	0,4 - 0,1	
Broušení vnitřní – jemné	0,4	(0,2)
Broušení vnitřní – zvláště jemné	0,1	
Superfinašování – jemné	0,1	
Superfinašování – velmi jemné	0,05-0,025	
Lapování – jemné	0,1	
Lapování – velmi jemné	0,05-0,005	
Leštění	0,1	
Elektroerozivní obrábění	0,2	
HSC obrábění	0,6	(0,2)

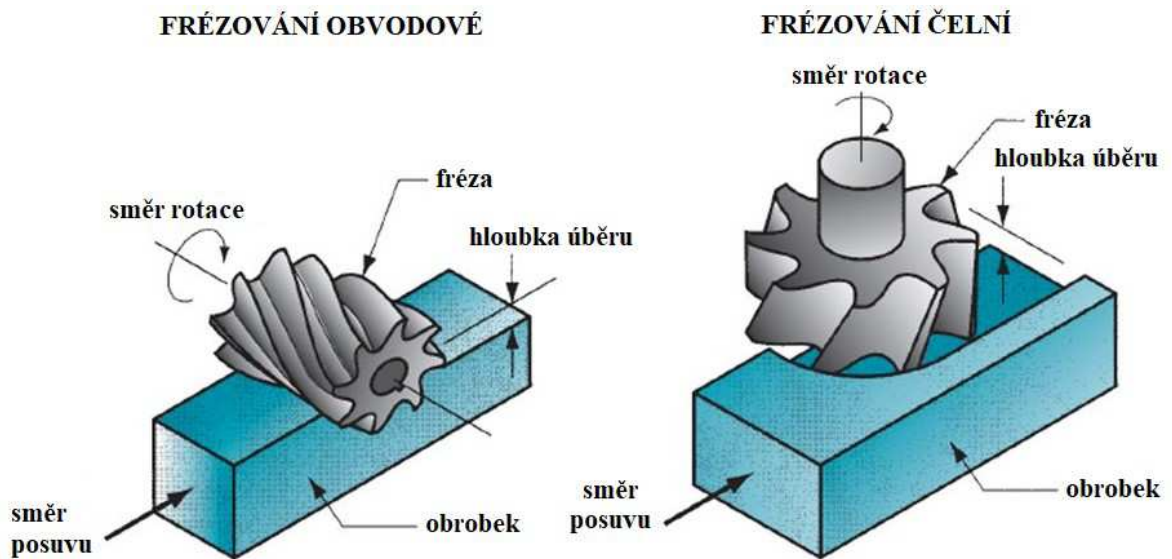
Hodnoty v závorkách jsou dosažitelné za zvláštních podmínek.

3 TECHNOLOGIE VYUŽÍVANÉ PŘI VÝROBĚ DUTINY FORMY

Části vstřikovací formy tvořící tvarovou dutinu jsou vyráběny z dražších materiálů, než běžné konstrukční prvky formy a často také vyžadují složité obráběcí práce. Tyto materiály jsou zároveň obtížněji obrobitelné. U případů, kde je tvarová dutina složitého tvaru je vhodné předcházet vzniku chyb za pomoci simulací procesu obrábění a tyto chyby odhalit. Před samotnou výrobou dutiny formy jsou vyvrtány temperační kanály, jelikož je zde riziko vzniku deformací a případných vad vlivem vrtání. Po vyvrtání temperačních kanálů následuje hrubování tvarových ploch dutiny vstřikovací formy s přídávkem 1,5 mm oproti finálnímu tvaru. Hrubování je prováděno po vrstevnicích. Pro hrubovací operace se nejčastěji využívá technologie frézování. Hrubovací operace jsou následovány obráběním s přídávkem přibližně 0,5 mm oproti finálnímu tvaru. Pokud je to nutné, poslední strojní operací je elektroerozivní obrábění. Po ukončení operace by měla být provedena mezioperační kontrola a po ukončení všech strojních operací je provedena 100 % kontrola ručním měřením nebo 3D měřením. Po ukončení kontroly následují ruční práce. Mezi tyto operace se řadí především leštění, dále montáž, či tuširování (zkoušení správnosti provedení dosedacích ploch, zejména dělicí roviny. Příslušné dosedací plochy se jednostranně opatří tuširovací barvou, díly se sestaví a tím se vytvoří otisk, ze kterého je patrné, zda-li a kde na sobě plochy správně doléhají či nikoliv). [2,19]

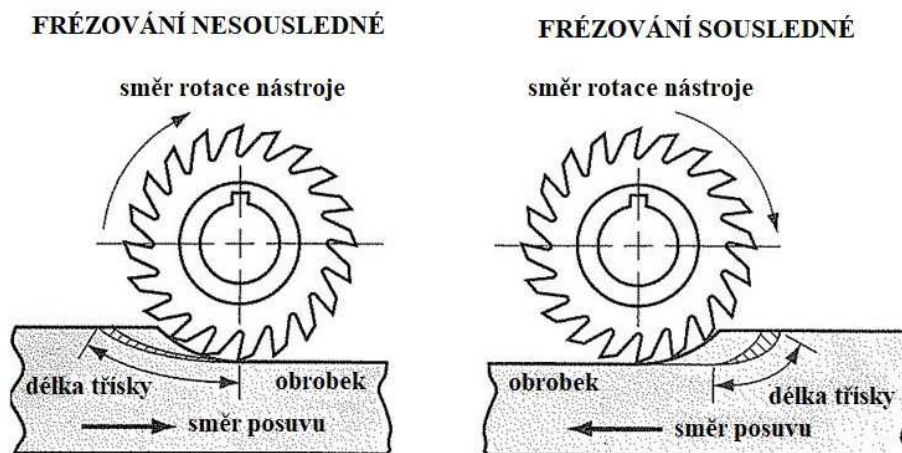
3.1 Frézování

Frézování je obráběcí metoda, při které se materiál obrobku odebírá pomocí břitů otáčejícího se nástroje. Posuv nejčastěji koná součást, převážně ve směru kolmém na osu nástroje. U moderních frézovacích strojů (obráběcí centra, CNC frézky) jsou posuvné pohyby plynule měnitelné a mohou být realizovány ve všech směrech. Řezný proces je přerušovaný, přičemž každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnlivé tloušťky. Z technologického hlediska lze frézování rozdělit na dva základní způsoby: frézování válcová (frézování obvodem) a frézování čelní (frézování čelem). Dále lze odvodit některé další způsoby, jako je frézování okružní, či planetové. [4]



Obr. 13. Základní typy frézování [31]

Podle smyslu otáčení frézy vůči směru posuvu se frézování dělí na nesousledné a sousledné. Při nesousledném obrábění je smysl otáčení nástroje proti směru posuvu obrobku. Tloušťka třísky se postupně mění z nulové hodnoty na hodnotu maximální. Vlivem skluzu břitu po ploše vytvořené předcházejícím zubem vznikají silové účinky a deformace způsobující zvýšené opotřebení břitu. Mezi výhody nesousledného obrábění patří nezávislost trvanlivosti nástroje na povrchu obrobku (okuje, písčité povrch apod.), odpadá potřeba vymezit vůli mezi posuvným šroubem a maticí stolu stroje a jejich menší opotřebení. Naopak při sousledném obrábění je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku. Výhodou je vyšší trvanlivost nástroje, možnost použití vyšších řezných rychlostí a rychlostí posuvů, menší potřebný řezný výkon, menší sklon ke chvění, či menší drsnost povrchu. [4,30]



Obr. 14. Frézování nesousledné a sousledné [31]

3.1.1 Nástroje

Nástroje pro frézování jsou frézy. Frézy je možné dělit z různých hledisek, především podle umístění břitů, tvaru zubů, průběhu ostří, upínání a konstrukce. Podle toho, na jaké ploše jsou umístěny břity, se frézy dělí na:

- válcové, s břity na válcové ploše;
- čelní, s břity na válcové a čelní ploše;
- kotoučové, s břity na válcové a obou čelních plochách;
- kuželové, s břity na jedné nebo dvou kuželových plochách;
- tvarové, s břity na tvarových plochách (zaoblovací frézy, frézy na závity, frézy na ozubení, apod.). [30]

Další dělení je například podle tvaru zubů na frézy s frézovanými zuby (zuby frézované pomocí kuželových fréz) a frézy s podsoustruženými zuby (použití u tvarových fréz). Podle průběhu ostří se dělí na frézy s přímými zuby a na frézy se zuby do šroubovice. Dle upínání se dělí na stopkové a nástrčné. Dle konstrukce se dělí na frézy celistvé a frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami. [30]

Celistvé frézy se vyrábějí z rychlořezných ocelí obráběním, nebo přesným litím. Frézy menších rozměrů se jako celistvé vyrábějí ze slinutých karbidů. Frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami mají zuby tvořené břitovými destičkami z rychlořezné oceli, slinutého karbidu nebo řezné keramiky a tělo frézy je vyrobeno z konstrukčních ocelí vyšší pevnosti. Břítové destičky jsou k tělu připevněny mechanicky, nebo pájením. [30]

3.2 HSC obrábění

S rozvojem technologie obrábění a s rostoucími požadavky na složitost výrobků, tvarovou a rozměrovou přesnost, integritu povrchu, zkracování výrobních cyklů atd. bylo nutné hledat nové možnosti v oblasti výroby. Vysokorychlostní obrábění (dále jen HSC) je jednou z možností, jak tyto cíle realizovat. HSC zahrnuje podstatné zvýšení relativní rychlosti nástroje vzhledem k obrobku, možnost obrábění bez chlazení a obrábění tepelně zpracovaných ocelí a dalších velmi tvrdých materiálů. Obecně lze říci, že řezná rychlost je 5x až 10x vyšší. [4]

3.2.1 Řezné materiály

Materiály pro výrobu nástrojů pro HSC obrábění musí mít vysokou tvrdost povrchu, houževnatost a vysokou odolnost proti chemickému opotřebení. To zabrání možnosti náhlého lomu nástroje následkem mechanických nebo tepelných šoků a zároveň dojde ke snížení opotřebení nástroje. Je možná aplikace těchto řezných materiálů:

- polykrystalický kubický nitrid boru, který patří do skupiny supertvrdých řezných materiálů. Je po diamantu druhým nejtvrdějším materiálem, nachází využití při obrábění tvrdých materiálů, kalené oceli, tvrdé litiny, či nástrojů z kalených nástrojových ocelí;
- slinuté karbidy, jsou kombinované materiály na bázi práškových kovů. Jsou tvořeny tvrdými karbidy, ovšem jsou křehké a může dojít k vydrolování. Tyto karbidy jsou uloženy v relativně měkké kovové fázi, které slouží jako pojivo. Tvrdost a odolnost lze zvýšit použitím povlaku karbidu titanu TiC, nitridu titanu TiN nebo oxidu hlinitého Al₂O₃. Povlaky mohou být jednovrstvé nebo vícevrstvé;
- keramické materiály, které lze dále rozdělit do dvou skupin. Dělí se na keramické materiály na bázi kyslíčnicku hlinitého nebo nitridu křemičitého. Tyto materiály mají vyšší tvrdost a tepelnou odolnost než slinuté karbidy, ovšem mají vyšší křehkost;
- monokrystalický a polykrystalický diamant, je nejtvrdějším řezným materiálem, trvanlivost je mnohem vyšší, než u jiných řezných materiálů. Nevýhodou je cena. [4]

3.2.2 Výhody a nevýhody

Hlavní výhody aplikace HSC jsou především:

- dosažení vysoké kvality obrobeného povrchu;
- snížení řezné síly až o třetinu díky menšímu pěchování třísky;
- snížení tepelného zatížení nástroje a obrobku díky vysoké řezné rychlosti, kdy je vzniklé teplo odváděno zejména třískami;
- malá pravděpodobnost vzniku chvění;
- lze aplikovat bez chlazení (ekonomicky i ekologicky výhodné);
- zkrácení strojních časů. [4]

Nevýhodou je ekonomické hledisko. Cena strojního vybavení a cena nástrojů je mnohem vyšší, než u běžného frézování. Dále je zde nutnost vyvažování nástrojů, speciálního upínání nástroje a obrobku. Nevýhodou je také nutnost odstraňování velkého objemu třísek za jednotku času. [4]

3.3 Broušení

Abrazivní metoda obrábění, která se vyznačuje vysokou přesností, správností geometrického tvaru a velmi dobrou jakostí povrchu. Tato technologie patří k nejvýznamnějším technologiím výroby dnešní doby. Jedná se o technologii s nedefinovanou geometrií nástroje. Pro broušení je charakteristický úběr velkého množství malých třísek pomocí brousících zrn, která jsou rozložena nepravidelně na povrchu brousícího kotouče. Zrna brusiva jsou vázány pojivem s tím, že mezi pojivem a zrna se vyskytují volná místa – póry. [4,30]

3.3.1 Nástroje

Nástroje na broušení jsou brousící kotouče, segmenty, kameny a pásy. Zrna brusiva jsou buď volná (brousící pasty) nebo vázaná v tuhých nebo pružných tělesech (brousící kotouče a brousící tělíška). Při vhodně zvolených řezných podmínkách dochází vlivem otupování brousících zrn k růstu řezné síly a k vylamování opotřeбенých zrn nástroje. Tím se odkryjí nová, ostrá zrna brusiva, dochází k tzv. samoostření, což je jednou z výhod broušení. [30]

Brousící kotouče jsou nejčastěji používanými nástroji. Mohou být vyrobeny s různou velikostí a různého tvaru. Jeho charakteristické vlastnosti jsou dány jeho označením, které obsahuje např.: tvar, rozměry, druh brousícího materiálu, zrnitost, tvrdost apod. [30]

3.3.2 Metody broušení

Obecně lze rozdělit broušení dle tvaru broušených ploch na:

- broušení do kulata (vnější a vnitřní);
- broušení rovinné (obvodem nebo čelem kotouče);
- broušení tvarové. [30]

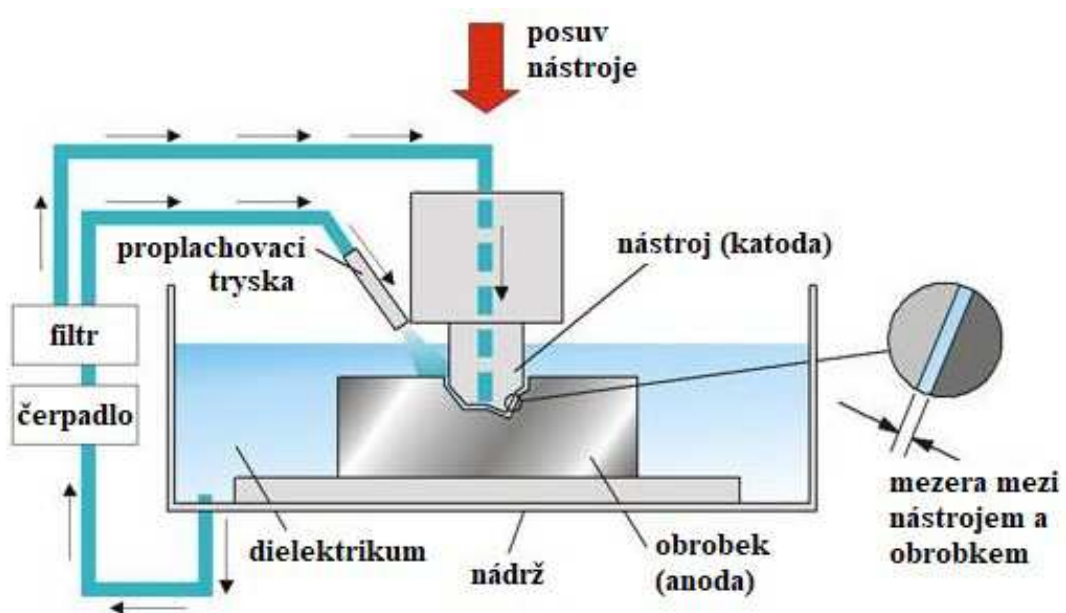
Z hlediska výroby tvarových dutin forem je nejdůležitější tvarové broušení. Tvarové plochy jsou broušeny zapichovacím způsobem pomocí tvarových brusných kotoučů, nebo je nutné udělit kotouči pohyb odpovídající broušenému tvaru – kopírovacím způsobem, nebo v dnešní době častěji numerickým řízením brusky. [4,30]

3.4 Elektroerozivní obrábění (EDM)

Elektroerozivní obrábění (dále EDM) je jednou z nekonvenčních metod obrábění, která nachází široké využití právě v oblasti výroby tvarových dutin forem. Jde o elektrotepelný proces, u kterého je dosaženo úběru materiálu elektrickými výboji mezi katodou (nástrojovou elektrodou) a anodou (obrobkem) ponořenými do tekutého dielektrika. [31]

3.4.1 Princip

Princip EDM je založen na vytvoření rozdílu elektrických potenciálů mezi nástrojem a obrobkem. Důležitou podmínkou je vodivost obou elektrod, tedy obrobek musí být vodivý. Nástroj je společně s obrobkem ponořen do dielektrického média. V nejjednodušším provedení má elektroda možnost vertikálního posuvu. Mezi nástrojem a obrobkem se udržuje mezera 0,01 až 0,5 mm, což je hodnota umožňující vznik elektrického výboje. Tento výboj se vypínáním dodávky proudu periodicky přerušuje. Frekvence tvorby a zániku výboje může dosahovat až 250000 s^{-1} . Vysoké napětí způsobí proražení izolantu (dielektrika) a je vytvořen úzký kanál, kterým proteče velké množství proudu. Nárazy nabitých částic způsobí erozi materiálu obrobku i nástroje. Materiál je odpařen, jelikož je zde dosahováno teplot 8000 až 12000 °C. Díky dielektriku zároveň vzniká mechanický kavitační účinek podporující úběr materiálu. [29]



Obr. 15. Princip EDM [33]

3.4.2 Dielektrické kapaliny

Pro EDM se nejčastěji využívají kapaliny jako petrolej, parafín, naftový olej a neionizovaná voda. Dielektrická kapalina plní hned několik funkcí a jsou na ni kladeny různé požadavky, jako:

- nízká viskozita;
- vysoký elektrický odpor;
- vysoký bod vzplanutí;
- absence převažujícího pH z důvodu leptání;
- ekologické hlediska. [29]

Dielektrická kapalina musí zajišťovat odvod tepla z pracovního prostředí, působí jako izolátor mezi obrobkem a nástrojem, zabraňuje oxidaci, zabraňuje usazování částic na elektrodě a odstraňuje odebraný materiál z místa výboje. Aby bylo možné odstranění drobných částeczek materiálu obrobku a nástroje, je zavedena nucená cirkulace dielektrika. Způsobů vyplachování je více, dielektrikum může být přiváděno skrze okraje mezery (vnější vyplachování) nebo například skrz nástrojovou elektrodu, apod. Dalším způsobem je pulzní vyplachování, kdy dojde ke krátkému přerušení elektroeroze a oddálení elektrody. Tím je dosaženo zvětšení pracovní mezery a dokonalého vypláchnutí. [29,31]

3.4.3 Materiály elektrod

Jelikož dochází k úběru materiálu obrobku i nástroje, je zapotřebí využití takového materiálu, který je schopen odolávat opotřebení. Zároveň musí být odolný proti lokálnímu ohřevu a měl by být také dobře obrobitelný, aby bylo možné vyrobit složité tvary, jež jsou typické pro EDM. Nejpoužívanějšími materiály jsou grafit, mosaz, elektrolytická bezoxidová měď a wolframová měď. Základní vlastnosti materiálů elektrod jsou:

- vysoká elektrická a tepelná vodivost;
- vysoká hustota;
- vysoký bod tavení;
- jednoduchá vyrobiteľnosť. [29]

3.5 Další metody výroby tvarových dutin

Existují i další metody výroby tvarových dutin forem, které jsou méně používané, či vhodné pouze pro malosériovou výrobu. Mezi tyto metody patří například výroba tvarových dutin tvářením, galvanoplastická výroba tvarových částí formy nebo moderní technologie laser sintering. [2,20]

3.5.1 Vtlačování za studena

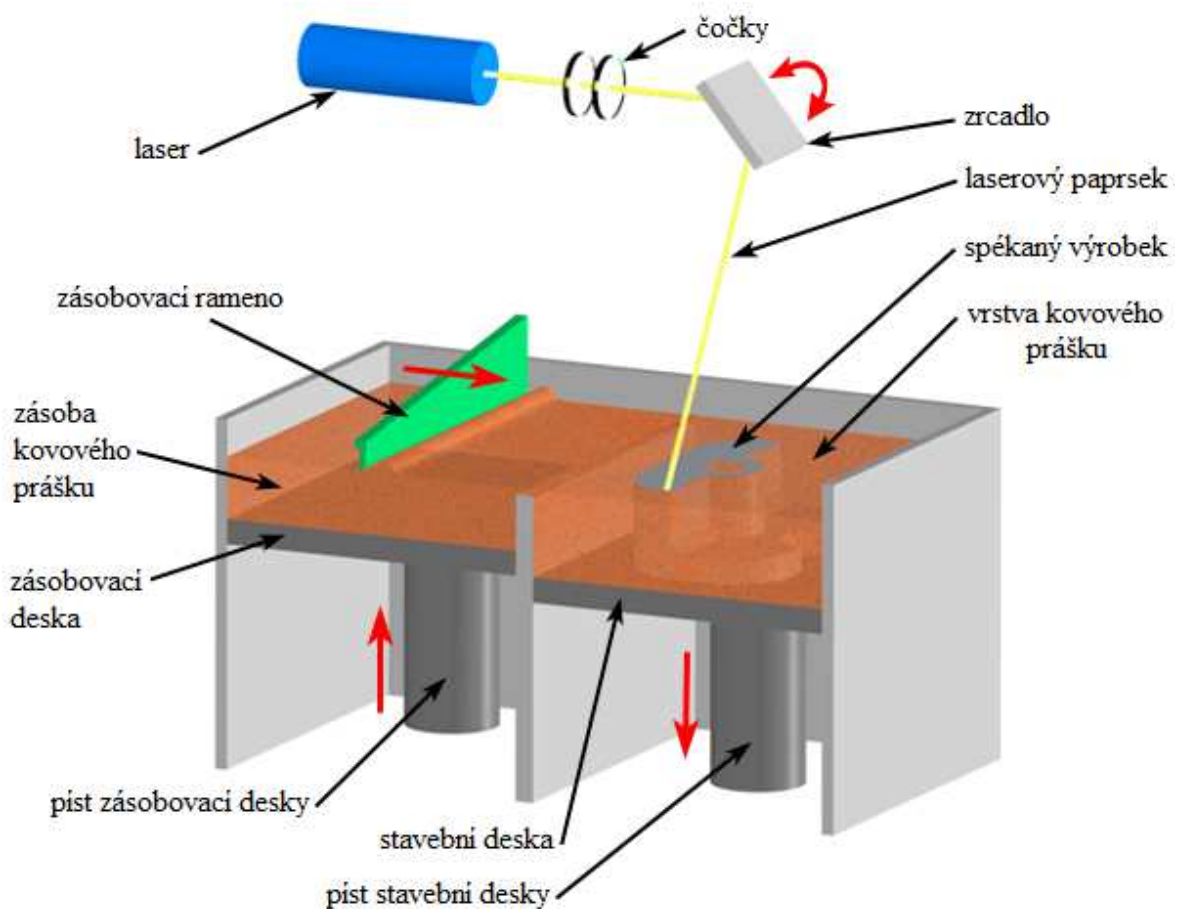
Tato metoda je založena na vtlačování tvarového tlačného trnu do připraveného polotovaru. Takto vyrobená dutiny odpovídá tvaru tlačného trnu. Výroba trnu je jednodušší, než výroba dutiny. Vzhledem k rozšíření technologie EDM je tato technologie na ústupu, ovšem v některých případech má své opodstatnění. Tlačný trn je vyroben z nástrojových ocelí, např. 1.2550 (ČSN 19 733) nebo 1.3343 (ČSN 19 830). Tyto materiály jsou tepelně zpracovány kalením. Tvar trnu se volí co nejjednodušší, s mírnými nenáhlými přechody, jeho povrch je leštěn. Trn rovněž nesmí obsahovat ostré hrany. [2]

3.5.2 Galvanoplastická výroba tvarových částí forem

Tato metoda je další z méně známých a méně používaných technologií. V některých případech je možné touto metodou vyrobit formy, které by nebylo možné vyrobit jiným způsobem. Výhodou je dokonalé kopírování modelů vyrobených z běžných materiálů, jako je ocel, dural, měď, mosaz, vosky apod. Je umožněno kopírování dezénů, jemně gravírovaných textů, různé struktury, jedinou podmínkou je možnost vyjmutí modelu ze vzniklé skořepiny. Nejčastěji používanými materiály forem jsou měď a nikl. Tloušťka stěny skořepiny činí běžně 0,8 až 4 mm. Tato skořepina je pak zalita do slitin hliníku, případně polyesterové pryskyřice. Nejdříve je připraven model, například za pomoci CNC obrábění, který je následně povrchově upraven a je zajištěna jeho vodivost. Samotná výroba skořepiny je složitý elektrochemický proces, je nutná pečlivá kontrola parametrů jako je pH, teplota lázně, čistota elektrolytů, atd. Nejčastěji využívaným elektrolytem je tzv. Wattsův elektrolyt, jeho základní složkou je síran nikelnatý. Déle se běžně používají sulfamátové elektrolyty, či niklobaltové elektrolyty. [34]

3.5.3 Laser sintering

Jednou z moderních technologií je spékání práškových kovů pomocí laseru. Tato technologie se dělí dále na několik kategorií, nejdůležitější z nich jsou DMLS (přímé kovové laserové spékání) a SLS (selektivní laserové spékání). Tyto technologie jsou velmi obdobné a používají se v oblasti rychlé výroby prototypů (Rapid Prototyping). Předpokladem je vytvoření 3D CAD modelu dílu. Ten je dále rozdělen na jednotlivé vrstvy a pak je výrobek postupně staven po jednotlivých vrstvách. Budoucí výrobek je staven na stavební desku, která postupně odjíždí směrem dolů, vedle je deska zásobovací, která s úbytkem kovového prášku postupně stoupá. Nanášení nových vrstev prášku je zajištěno ramenem, které přejíždí mezi deskami. Jakmile je nanášena vrstva, je prášek spékán pomocí laseru. Princip je vyobrazen na Obr. 16. U technologie DMLS je možnost výroby i více tvarově odlišných výrobků zároveň. [35,36]



Obr. 16. Princip technologie DMLS [36]

3.6 Dokončovací operace

Jak už bylo zmíněno, po ukončení strojních operací následují ruční operace, jako je leštění, montáž a tuširování. Leštění je nejpoužívanější dokončovací technologií. Dále může být povrch tvarové dutiny formy například povlakován, aby byla zvýšena životnost formy. [2,19]

3.6.1 Leštění

Leštění je operace, při které jsou odstraněny drobné nerovnosti a je docíleno vysokého lesku a vysoké jakosti obrobeného povrchu. Dochází pouze k malému úběru materiálu, jde o odstranění vrcholků nerovností po předchozím obrábění. Leštění může být prováděno ručně, či strojně. Leštění lze rozdělit na mechanické, chemické a elektrochemické. Při mechanickém leštění je nejdříve nanesen leštící prostředek, který má výrazný vliv na výsledný povrch. Leštění pak ovlivňuje druh a zrnitost použitého brusiva, obvodová rychlost kotouče, tlak součásti na kotouč, materiál kotouče a jeho vlastnosti. Mimo kotouče se také využívají leštící kartáče, prstence a válce. U součástí se složitými a členitými tvary se využívá chemické leštění, které je svou rychlostí vhodné v sériové a hromadné výrobě. Povrch obrobku musí být dokonale očištěn. Nevýhodou jsou vysoké náklady a práce s chemikáliemi. [30]



Obr. 17. Povrch dutiny formy po leštění [37]

4 REOLOGIE POLYMERŮ

Ročně je produkováno až 250 miliónů tun polymerů, z nichž většinu tvoří termoplasty, jež jsou taveny a následně jim je udán tvar pomocí vytlačovacích hlav nebo vstřikovacích forem. Po zatuhnutí jsou vytvořeny finální výrobky. Z tohoto hlediska je velmi významný tok taveniny za stanovených procesních podmínek, jako je tlak, či teplota. Pro zvolení správného designu nástrojů a optimalizaci výrobního procesu je nezbytné se zabývat tokovými vlastnostmi materiálů. [5]

Obecně je reologie věda, která studuje tvarové změny látek za působení vnějších sil. V užším slova smyslu se reologií rozumí nauka o toku látek. [7]

Z hlediska posuzování látek je nutné rozhodnout, zda se jedná o pevnou látku, či tekutinu. To ovšem není jednoduché, jelikož každá látka se může chovat jako tekutina za určitých podmínek. Jako příklad lze uvést tloušťku skla v katedrálách, kde bylo zjištěno, že tloušťka skla ve spodní části okna je větší, než u stropu, tedy sklo teklo. Tento jev lze pozorovat po 100 i více letech, tedy záleží na době pozorování. O tom, zda se bude s danou látkou uvažovat jako s tekutinou, či pevnou látkou lze stanovit pomocí Debořina čísla (De). To je dáno vztahem

$$De = \frac{\lambda}{\theta} \quad (1)$$

kde λ [s] je relaxační čas a θ [s] je doba pozorování. Hodnota relaxačního času vyjadřuje schopnost molekulárního přeskupení. Zde jsou příklady hodnot relaxačního času:

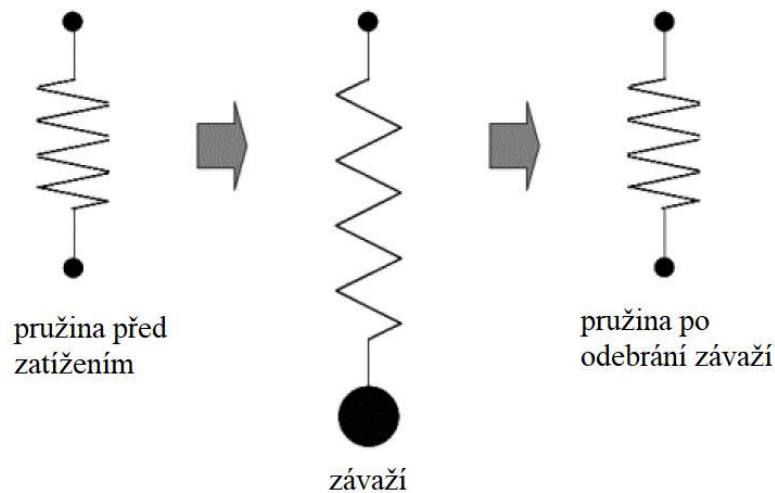
- sklo: $\lambda = 100$ let;
- voda: $\lambda = 10^{-12}$ s;
- polymerní taveniny: $\lambda = 10^{-2} - 10^2$ s. [8]

Hodnota relaxačního času je daná, záleží tedy na době pozorování. Je-li látka o $\lambda = 1$ s pozorována nekonečně dlouhou dobu, bude se jevit jako kapalina. Naopak, pokud bude stejná látka pozorována nekonečně krátkou dobu, bude se jednat o pevnou látku. [8]

4.1 Reologie polymerních tavenin

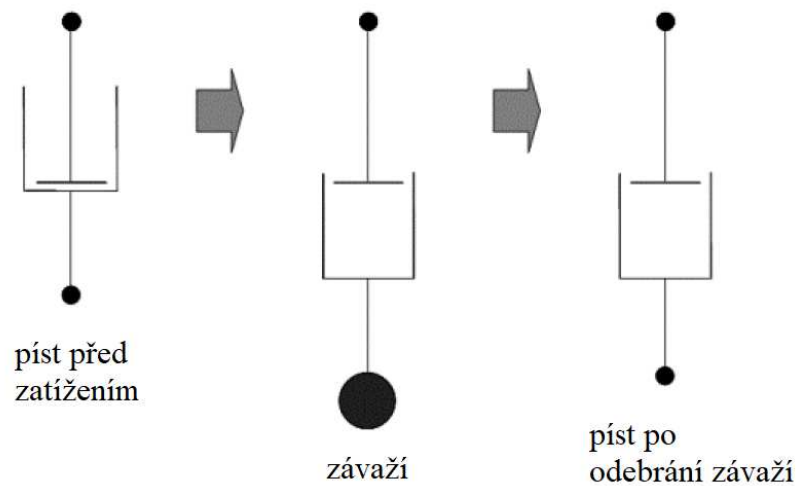
Na rozdíl od kovových nebo keramických materiálů, polymerní materiály se vyznačují silnou závislostí na čase a teplotě. Reagují rozdílně na rychlost silových účinků a vykazují vlastnosti obou limitních modelů deformačního chování. Popis chování polymerních tavenin je tedy velmi komplexní záležitostí. [9,10]

První stav vyjadřuje model ideálně elastické látky (Obr. 18.). Chování je napodobeno pružinou, která je vetknutá na jednom konci a na druhém zatížena silou. I hned při zatížení dojde k deformaci (protažení) pružiny. Po odlehčení se pružina i hned vrátí do původního stavu, jedná se tedy o čistě vratnou deformaci. [9]



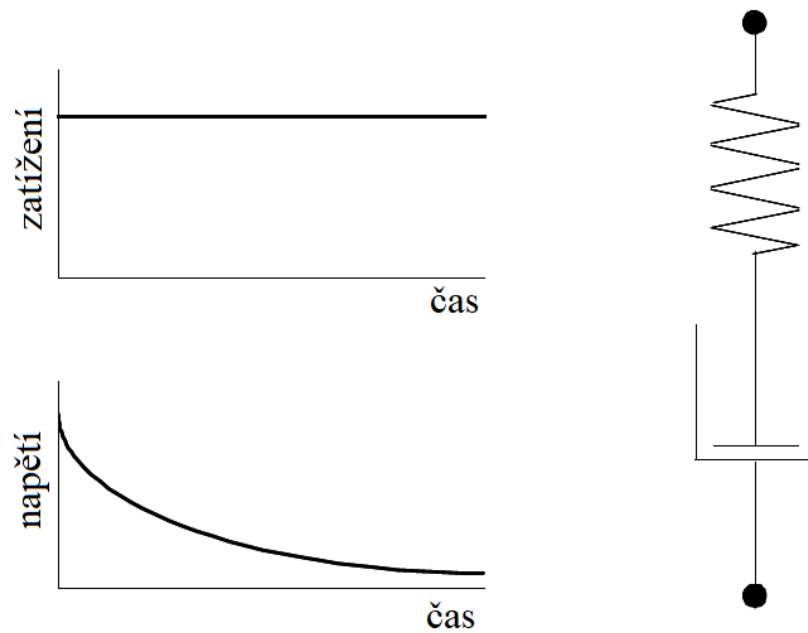
Obr. 18. Model ideálně elastických deformací [9]

Druhým stavem je model ideálně viskózní látky (Obr. 19.). Okrajové podmínky a zatížení zůstávají stejné, ovšem pružina je nahrazena pístem. Po zatížení pístu dochází k postupné deformaci. Je zde tedy jisté časové zpoždění. Po odstranění závaží nedochází k žádné změně deformace, jedná se tedy čistě o trvalou deformaci. [9]

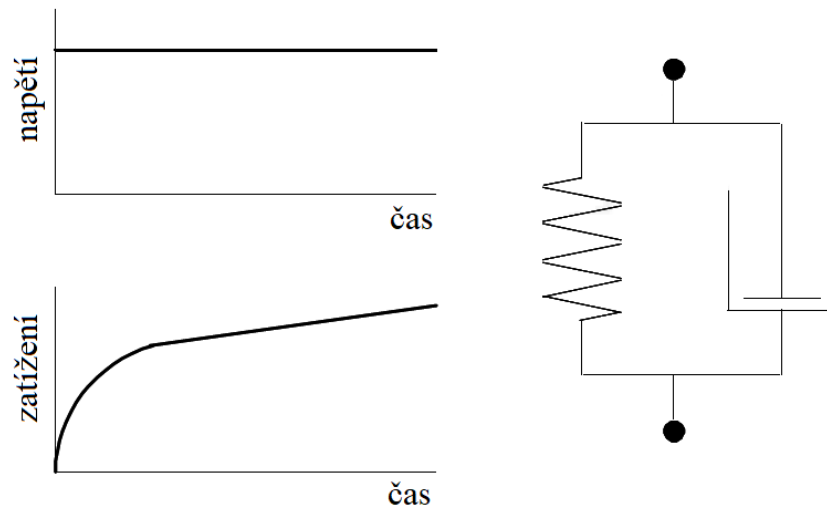


Obr. 19. Model ideálně viskózních deformací [9]

Chování polymerních tavenin se nachází mezi těmito limitními stavy, jedná se tedy o jejich kombinaci. Hovoříme o tzv. viskoelastickém chování. Jejich chování lze vyjádřit pomocí modelů, spojujících sériově (Obr. 20.) nebo paralelně (Obr. 21.) předešlé idealizované modely. [9]



Obr. 20. Maxwellův model [9]

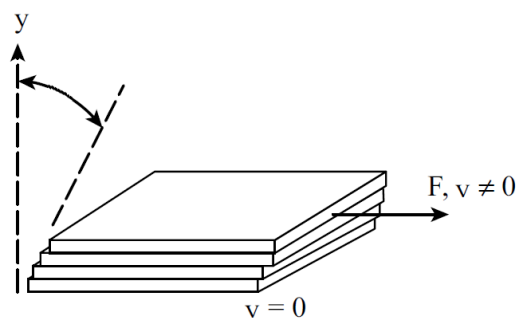


Obr. 21. Voigtův model [9]

4.2 Viskozita a smykový tok

Při toku polymerní taveniny je důležité si uvědomit, že k zajištění stálého rovnoměrného toku je nutné neustále dodávat energii a také to, že celý objem energie nelze získat zpět, jelikož část této energie je přeměněna na tepelnou energii. Jsou zde rozlišovány dva termíny – disipace a viskozita. Disipace je děj, při kterém je mechanická energie přeměněna na energii tepelnou (při smykovém toku). Viskozita je míra odporu látky proti toku. [10]

Viskozitu lze rozdělit na smykovou a elongační. Smyková viskozita představuje odpor látky proti smykovému toku. Smykový tok si zjednodušeně lze představit jako balíček karet, jehož poslední karta pevně leží na podložce a na horní kartu je působeno silou v daném směru (Obr. 22.). [5]

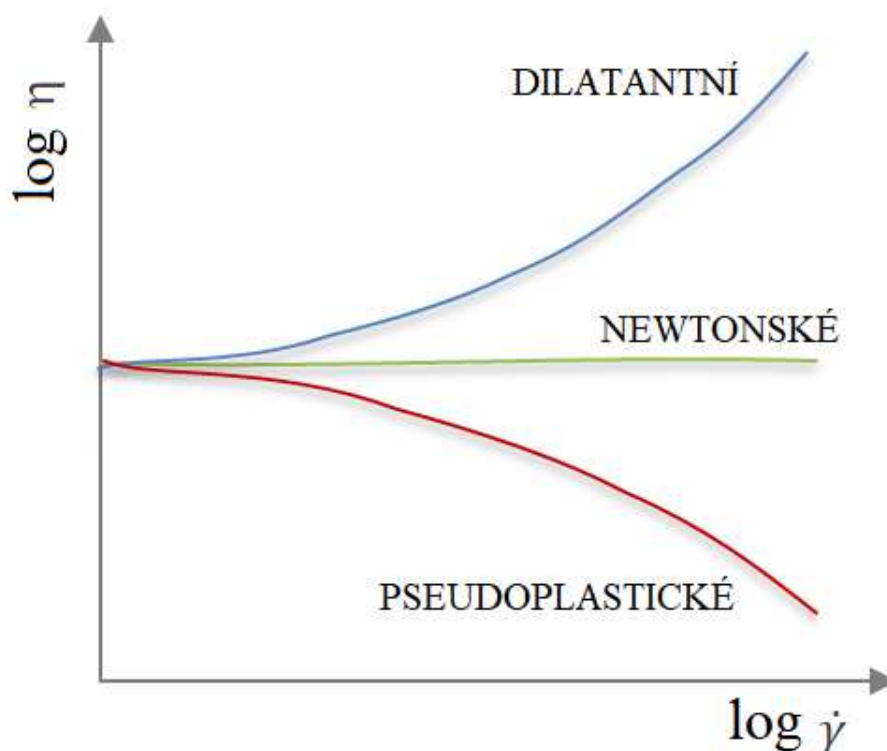


Obr. 22. Schéma smykového toku [6]

Smyková viskozita je pak dána vztahem:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

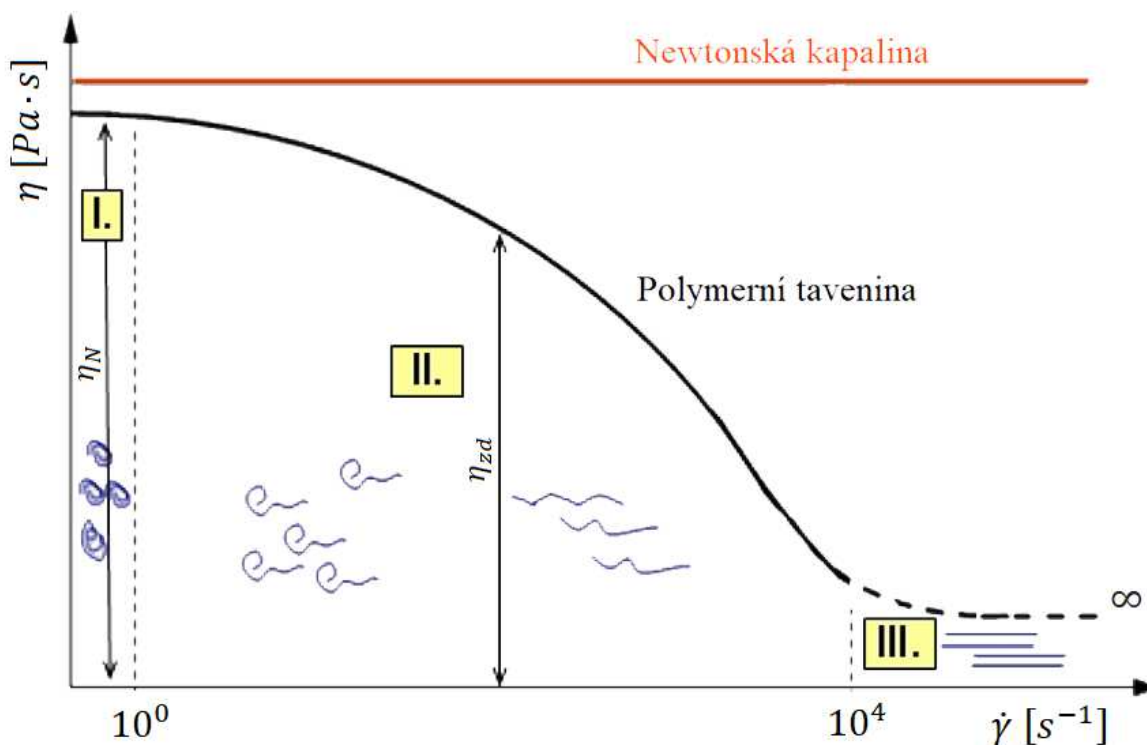
kde τ [Pa] je velikost smykového napětí a $\dot{\gamma}$ [s^{-1}] je rychlost smykové deformace. Tento vztah je označován jako Newtonův viskozitní zákon. Pokud je viskozita konstantní při změně rychlosti smykové deformace, hovoříme o tzv. Newtonských kapalinách. Rozdělení tekutin dle chování při toku je na Obr. 23. [5]



Obr. 23. Rozdělení tekutin dle chování při smykovém toku [11]

Závislost smykové viskozity na rychlosti smykové deformace je také často označována jako toková křivka. Pokud se zvyšováním rychlosti smykové deformace zvyšuje viskozita, hovoříme o tzv. dilatantních tekutinách, to jsou například škrobové suspenze apod. Mezi Newtonské kapaliny se řadí např. voda nebo olej. Polymerní taveniny se řadí k pseudoplastickým tekutinám, takže se zvyšující se rychlostí smykové deformace klesá viskozita. [12,13]

Toková křivka je rovněž poměrem rychlosti vzniku a rozpadu zapletenin polymerních řetězců. Na Obr. 24. je toková křivka polymerní taveniny rozdělena do tří oblastí. Oblast I. představuje rovnovážný stav, tedy rychlost vzniku a rozpadu zapletenin polymerních řetězců je stejná. Tato oblast se nazývá 1. Newtonské plató, polymerní tavenina se chová podobně jako Newtonská kapalina a takový stav se vyskytuje při nízkých rychlostech smykové deformace. Oblast II. vykazuje vyšší rychlost rozpadu zapletenin než jejich vzniku. Tato oblast je označována jako zpracovatelská oblast, při těchto rychlostech smykové deformace tedy probíhají zpracovatelské procesy polymerů. Při dalším zvyšování rychlosti smykové deformace dochází k ustálení poklesu viskozity. V oblasti III. je polymerní tavenina zcela bez zapletenin a nedochází k dalšímu poklesu viskozity. Tato oblast se nazývá 2. Newtonské plató. Tohoto stádia v praxi nelze dosáhnout. [12,13]

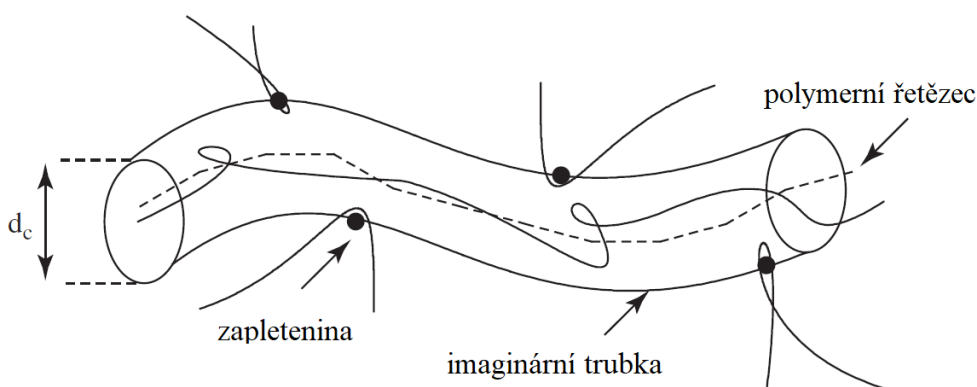


Obr. 24. Porovnání tokové křivky polymerní taveniny a Newtonské kapaliny [12]

Pokles viskozity ve zpracovatelské oblasti polymerních tavenin, tedy odchýlení od Newtonského chování, je vyjádřen indexem nenewtonského chování N . Pro Newtonskou kapalinu je $N = 1$, u polymerních tavenin je $N > 1$. [14]

4.2.1 Zapleteniny polymerních řetězců

Již zmíněný pojem „zapleteniny“ je velmi důležitý při zkoumání toku polymerních tavenin. Čím delší řetězce daná polymerní tavenina obsahuje, tím snadněji tvoří zapleteniny. Tyto zapleteniny znemožňují volný pohyb řetězců, brání toku taveniny a tím tedy zvyšují její viskozitu. Tento komplexní systém si lze představit dle Obr. 25., kde je sledovaný řetězec umístěn v imaginární trubce o průměru d_c . Tento průměr odpovídá průměrné vzdálenosti mezi zapleteninami a je mnohem větší, než průměr samotného polymerního řetězce. Sledovaný polymerní řetězec se může pohybovat pouze v prostoru této trubky, pohyby mimo tuto oblast jsou blokovány systémem zapletenin. Rychlost tvorby zapletenin je klíčová například při tvorbě studených spojů při vstřikování. Pokud je polymer schopen rychlé tvorby zapletenin, nebude studený spoj tak výrazný, jako by tomu bylo v opačném případě. [14,15]



Obr. 25. Zapletené polymerní řetězce [15]

4.3 Faktory ovlivňující viskozitu

Z hlediska zpracovávání polymerních tavenin je viskozita důležitým parametrem, jelikož se zvětšující se viskozitou rostou i energetické náklady a tedy i náklady na zpracování. S rostoucí rychlostí smykové deformace viskozita klesá, ovšem její hodnotu lze ovlivnit i změnou jiných parametrů. [14]

4.3.1 Teplotní vliv

Jednotlivé dlouhé molekulové řetězce jsou vázány kovalentními a chemickými vazbami a tyto řetězce jsou mezi sebou vázány mnohem slabšími van der Waalsovými silami. Při zahřívání polymerní taveniny dochází k oslabení primárních vazeb a prodloužení řetězců. Tyto porušené vazby pak umožňují volnější pohyb. Sekundární vazby jsou také oslabeny a dojde k oddálení řetězců. Zvýšení teploty má za následek snížení viskozity taveniny. [14,16]

4.3.2 Molekulová hmotnost

Polymery se skládají z velmi dlouhých molekulárních řetězců. Se zvyšující se molekulovou hmotností se zvětšuje i jejich délka a to má za následek zvýšení pravděpodobnosti tvorby zapletenin. Tavenina s větším počtem zapletenin hůře teče, tedy s větší molekulovou hmotností polymeru roste hodnota viskozity. [14]

4.3.3 Vliv indexu neneutonského chování

Index neneutonského chování u polymerních tavenin $N > 1$. Když klesá index N , klesá tlak i napětí při toku a dle vztahu (2) rovněž klesá i viskozita. Pokles je více znatelný při vyšších zpracovatelských rychlostech smykové deformace [14]

4.3.4 Vliv skluzu na stěně

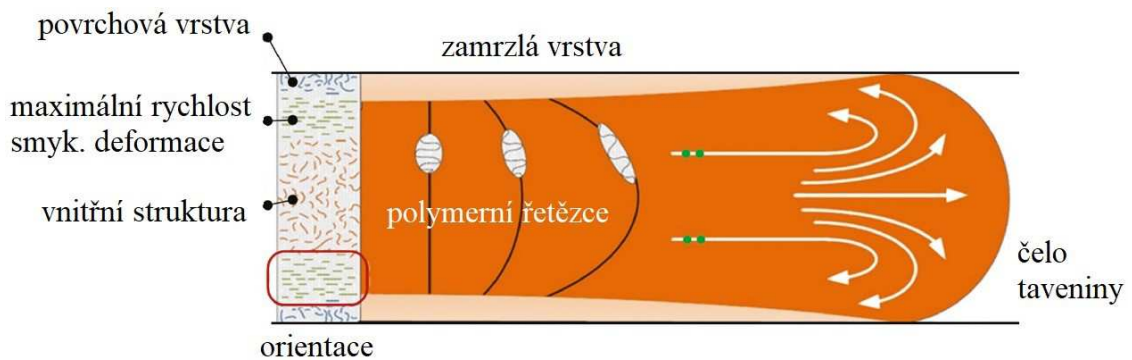
Při toku tavenin může nastat jev zvaný skluz na stěně. Na Obr. 22. je vidět, že rychlost na stěně je rovna 0. Při překročení kritické hodnoty smykového napětí na stěně (např. u PE nastává skluz při $\tau_{xyw} \geq 90$ kPa) začne tavenina klouzat po stěně. Pokud dojde ke skluzu, klesá tlak i napětí při toku a tedy i ke snížení viskozity taveniny. Skluz na stěně lze vyvolat například přidáním aditiv. [14]

4.3.5 Vliv polydisperzity

Polydisperzita je termín, označující délkový rozptyl polymerních řetězců, tzn. materiál s malou polydisperzitou má přibližně stejnou délky všech řetězců. Materiály s větší polydisperzitou vykazují razantnější pokles viskozity při zvyšování rychlosti smykové deformace a jsou tedy snadněji zpracovatelné. [14]

4.4 Tok materiálu ve vstřikovací formě

Ve vstřikovací formě je tavenina vedena úzkými kanály a často nedochází ke skluzu na stěně, jelikož vstřikovací forma je temperována na teplotu často mnohem nižší, než je teplota tavení. Polymerní tavenina u stěny je tedy ochlazována a roste odpor, proti toku. Ovšem jiná situace nastává ve středu průřezu, kde je teplota stále vysoká a okolní polymerní tavenina slouží jako izolant. Dochází k tzv. fontánovému toku (Obr. 26.). Jedná se o velmi komplikovaný děj, jež není možné modelovat jako tok mezi dvěma deskami. Rychlostní profil je v absolutní hodnotě zvonovitého charakteru, přičemž nejvyšší rychlost toku je ve středu průřezu. Středem teče tavenina vpřed, u stěn kanálu teče proti hlavnímu směru toku. [14]



Obr. 26. Fontánový tok ve vstřikovací formě [17]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem praktické části diplomové práce je zhodnocení vlivu vybraných technologických parametrů a drsnosti povrchu na tok termoplastů při plnění dutiny vstřikovací formy. Předmětem je tedy vyhodnocení zatékavosti polymeru ve spirálovitě řešené dutině formy. První částí je příprava samotného experimentu, výběr testovaných povrchů, výběr materiálů a stanovení vstupních podmínek. Součástí přípravy experimentu je rovněž předběžná simulace toku materiálu dutinou formy. Změřeny budou hodnoty délky zatečení taveniny ve spirálové dutině formy s použitím různých zkušebních desek. Pro každou zkušební desku a nadefinované technologické parametry bude připraveno více vzorků a získaná data budou statisticky zpracována a vyhodnocena.

Hlavní zásady pro vypracování diplomové práce:

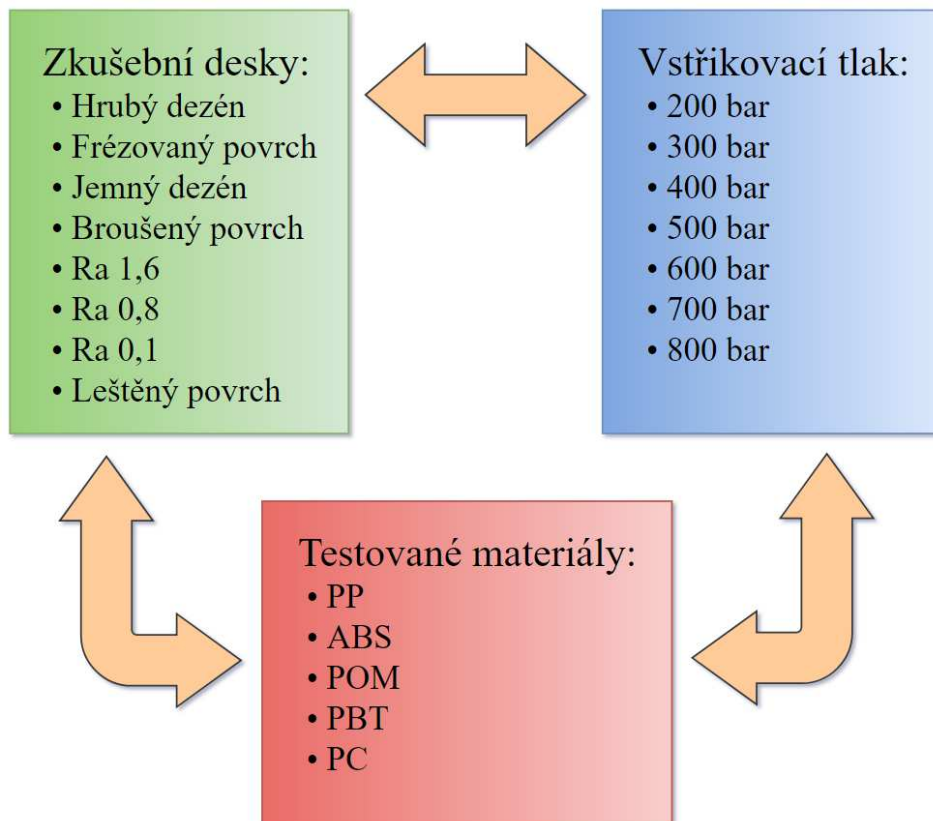
1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Připravte experiment s využitím simulací vstřikovacího procesu.
3. Připravte testovací tělesa a proved'te měření.
4. Vyhodno'te získané výsledky a proved'te statistické zpracování dat.

6 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

Příprava experimentu zahrnovala naplánování podmínek přípravy zkušebních těles a byla provedena simulace vstřikovacího procesu pro vybrané materiály, od které se odvíjelo nastavení technologických parametrů vstřikování. V následujících kapitolách jsou popsány zvolené podmínky, či použítá zařízení.

6.1 Podmínky přípravy zkušebních těles

Pro tento experiment bylo vybráno 5 termoplastů (podrobněji v kapitole 6.5), které byly vstřikovány za 7 různých vstřikovacích tlaků. Zároveň bylo použito 8 zkušebních desek rozlišných povrchů (podrobněji v kapitole 6.4.2). Byly tedy vybrány 3 skupiny proměnných, které ve výsledku dávají 280 kombinací podmínek přípravy zkušebních těles (Obr. 27.). Pro každou z těchto kombinací bylo vytvořeno 10 zkušebních těles. Vstřikovací tlaky jsou uvedeny v jednotkách bar, jelikož veškeré nastavení stroje z hlediska tlaku je právě v jednotkách bar (1 bar = 0,1 MPa) a jedná se o běžně používanou jednotku v praxi.

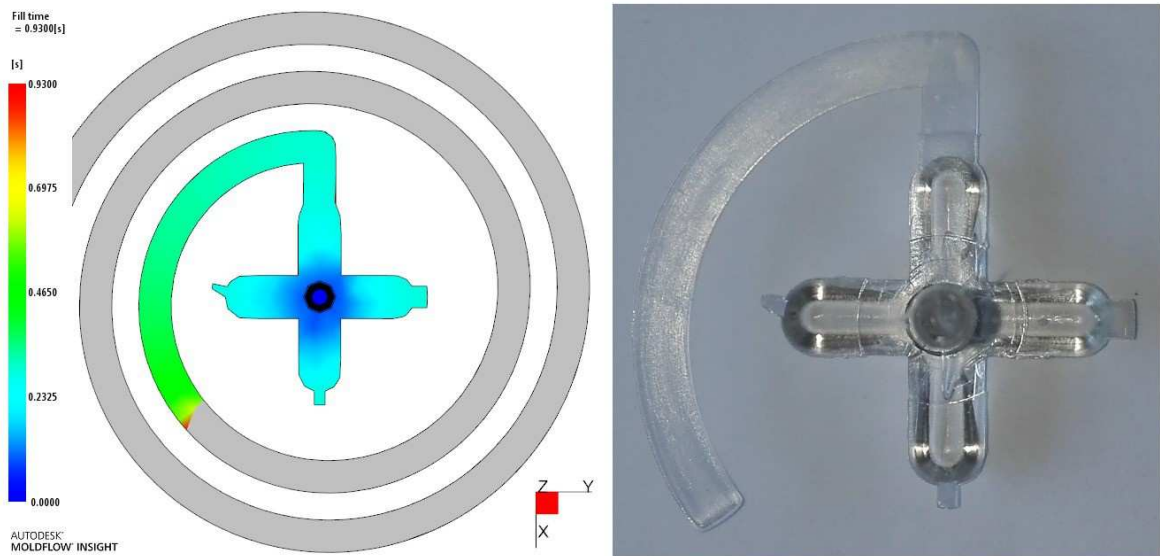


Obr. 27. Kombinace podmínek přípravy zkušebních těles

6.2 Simulace vstřikovacího procesu

Pro všech 5 materiálů byla provedena simulace vstřikovacího procesu, kde byly použity konkrétní testované materiály, nebo materiály obdobných vlastností od jiných dodavatelů. Na základě těchto simulací byly voleny některé z technologických parametrů vstřikování, které jsou uvedeny v Tab. 4. Na Obr. 28. je pro ukázkou vyobrazeno porovnání výsledku simulace pro materiál PC při vstřikovacím tlaku 500 bar se zkušebním vzorkem, jež byl připraven za stejného vstřikovacího tlaku za použití desky s leštěným povrchem. Simulace neuvažuje drsnost povrchu formy a povrch je tedy přednastaven na hodnoty odpovídající leštěnému povrchu. Při porovnání je zřejmé, že délka zatečení byla obdobná.

Pro simulaci i pro následnou realizaci měření bylo pro výrobu všech zkušebních těles použito vtokové ústí o šířce 6 mm odpovídající šířce průřezu spirály.



Obr. 28. Porovnání délky zatečení analýzy a reálného zkušebního vzorku (materiál PC, vstřikovací tlak 500 bar)

6.3 Vstřikovací stroj

Pro přípravu zkušebních těles byl použit vstřikovací stroj ALLROUNDER 470 C GOLDEN EDITION firmy ARBURG (Obr. 29.). Technický list stroje je uveden v příloze práce.



Obr. 29. Vstřikovací stroj použitý k přípravě zkušebních těles

6.3.1 Technologické parametry vstřikování zkušebních vzorků

Na základě hodnot získaných ze simulací vstřikovacího procesu a z materiálových listů jednotlivých vstřikovaných materiálů byly v souladu s možnostmi daného vstřikovacího stroje zvoleny technologické parametry vstřikování (Tab. 4.). Hodnota dotlaku se odvíjela od velikosti vstřikovacího tlaku (Obr, 27.). Nižší vstřikovací tlak než 200 bar nebylo možné použít, jelikož nedošlo k zatečení materiálu do měřitelné oblasti spirály. Tlak vyšší než 800 bar rovněž nebylo možné použít, jelikož i při nastavené maximální uzavírací síle docházelo k otevírání formy a přetékání mezi závity spirály.

Tab. 4. Nastavené technologické parametry pro jednotlivé materiály

Technologické parametry	PP	ABS	POM	PBT	PC
Dotlak	80 % vstřikovacího tlaku				
Doba dotlaku [s]	1				
Dráha dávkování [mm]	10	17	11	11	11
Dráha přepnutí [mm]	7				
Doba chlazení [s]	20	20	20	25	22
Rychlost dekomprese [mm/s]	2				
Dráha dekomprese [mm]	3				
Zpětný tlak [bar]	-1				
Uzavírací síla [kN]	1200				
Obvodová rychlost šneku [mm/s]	30				
Teplota formy [°C]	30	60	80	60	80
Teplota taveniny [°C]	215	205	190	250	260
Nastavení topných pásem	PP	ABS	POM	PBT	PC
Pásma č. 1 [°C]	215	205	190	250	260
Pásma č. 2 [°C]	210	200	190	245	260
Pásma č. 3 [°C]	205	200	185	240	255
Pásma č. 4 [°C]	200	195	180	235	250
Pásma č. 5 [°C]	200	190	180	230	235

6.3.2 Sušení materiálu

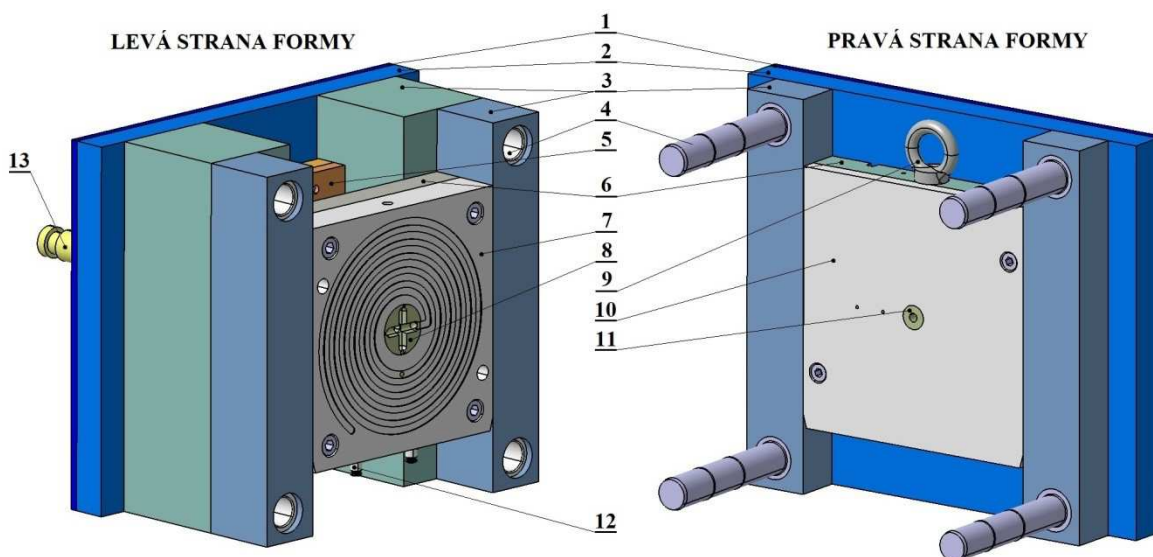
Sušení bylo vyžadováno u 4 z 5 vstřikovaných materiálů. Pro sušení za požadovaných podmínek daných dodavatelem granulátu (Tab. 5.) byla využita sušička THERMOLIFT 100-2 firmy ARBURG. K zásobování vstřikovacího stroje granulátem bylo pak využito pneumatického nasávání.

Tab. 5. Podmínky sušení vstřikovaných materiálů

Parametry	PP	ABS	POM	PBT	PC
Teplota sušení [°C]	-	80	100	120	120
Doba sušení [h]	-	3	3	4	4

6.4 Zkušební vstříkovací forma

Zkušební vstříkovací forma je jednoduché konstrukce umožňující snadnou manipulaci a výměnu zkušebních desek. Jedná se o jednonásobnou formu s možností změny velikosti vtokového ústí. Tato forma je vložena do univerzálního rámu, který je možné využít pro přípravu jiných zkušebních těles apod. Jednotlivé součásti zkušební formy jsou zobrazeny na Obr. 30.

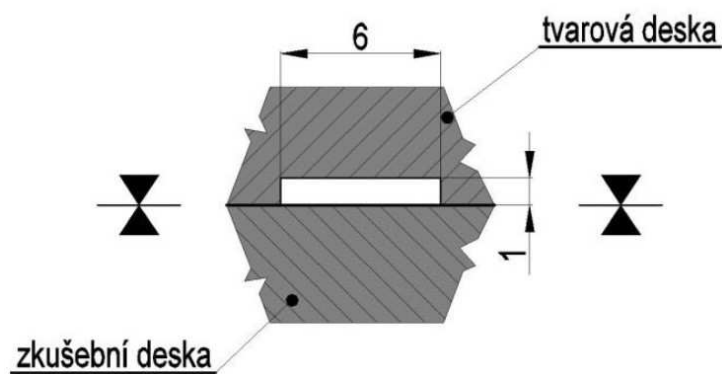


Obr. 30. 3D model zkušební vstříkovací formy

1 - izolační desky, 2 - upínací desky, 3 - rozpěrné desky, 4 - vodící prvky, 5 - vyhazovací systém, 6 - opěrná deska, 7 - tvarová deska, 8 - přídržovač vtoku, 9 - nosné oko, 10 - zkušební deska (vyměnná), 11 - vtoková vložka, 12 - nátrubek temperace, 13 - táhlo vyhazovačů

6.4.1 Tvarová dutina formy

Tvarová dutina formy je tvořena tvarovou deskou a výměnnou zkušební deskou. Tvarová deska udává tvar spirály, u které je sledována délka zatečení. Levá strana formy byla temperována na požadovanou teplotu (Tab. 4.). Tvarová deska byla po celou dobu experimentu stejná a měněna byla pouze zkušební deska pravé strany formy. Na Obr. 31. je vykreslen řez dutinou formy, na kterém je vidět, že při experimentu byla zatékavost materiálu ovlivněna výměnou zkušební desky pouze přibližně ze 43 %.



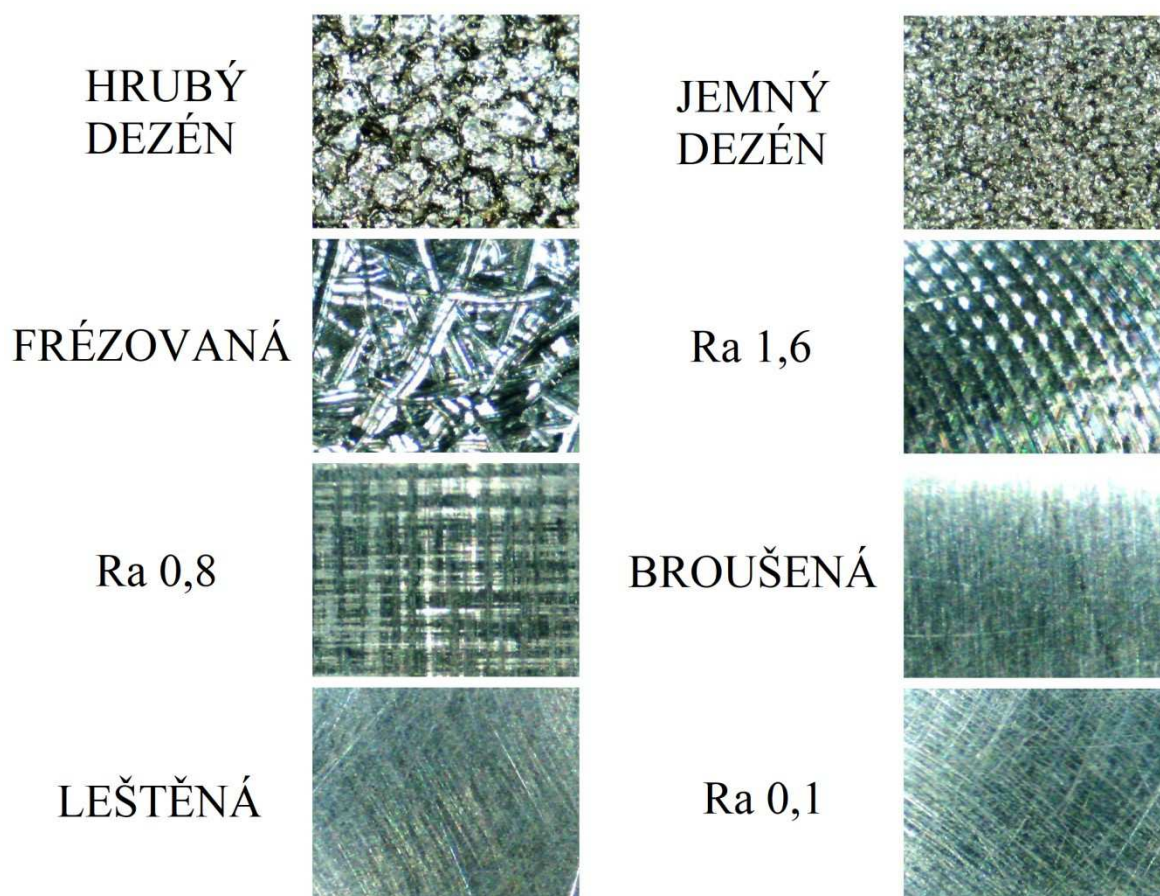
Obr. 31. Řez dutinou formy [39]

6.4.2 Zkušební desky

Při experimentu bylo použito 8 výměnných zkušebních desek. Desky byly označeny dle Obr. 32. a jsou stejným způsobem značeny i při vyhodnocování výsledků apod. Pro obrobení povrchu desek bylo použito elektroerozivní obrábění, frézování, broušení a leštění. Použité obráběcí operace a jakost povrchu jednotlivých desek jsou zobrazeny v Tab. 6. Další informace týkající se povrchů zkušebních desek jsou k dispozici v příloze práce. Zkušební desky byly upevněny za pomoci dvou šroubů a byly navrženy tak, aby umožňovaly rychlou výměnu.

Tab. 6. Povrchy výměnných zkušebních desek [39]

Značení zkušebních desek	Způsob obrábění	Jakost povrchu
Hrubý dezén	elektroerozivní obrábění	Ra = 12,74 μm
Frézovaná	frézování	Ra = 5,01 μm
Jemný dezén	elektroerozivní obrábění	Ra = 4,36 μm
Ra 1,6	frézování	Ra = 1,60 μm
Ra 0,8	broušení	Ra = 0,80 μm
Broušená	broušení	Ra = 0,45 μm
Leštěná	leštění	Ra = 0,42 μm
Ra 0,1	leštění	Ra = 0,10 μm

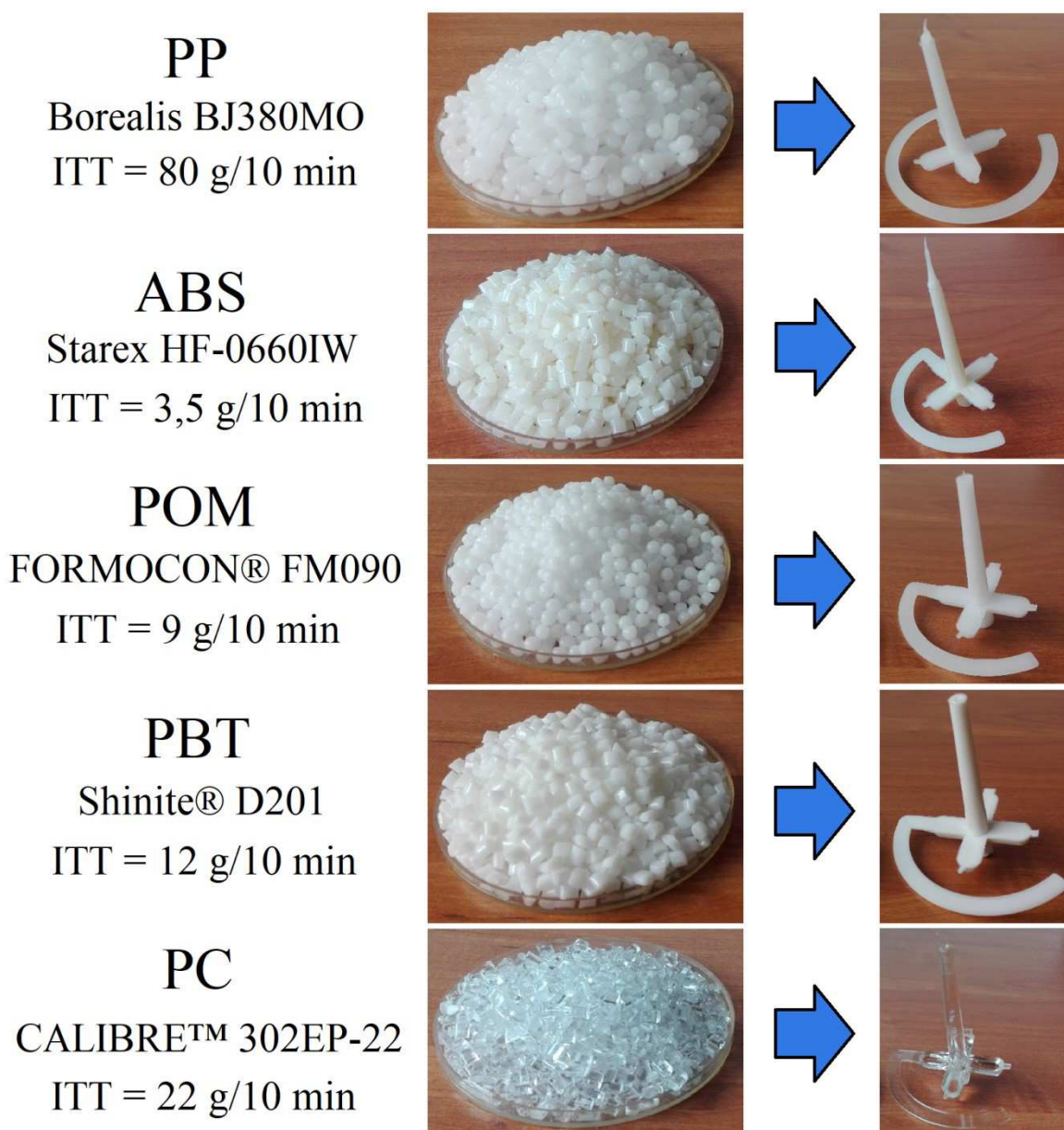


Obr. 32. Značení zkušebních desek společně s fotografiemi povrchu (zvětšení 50x)

Jednotlivé zkušební desky byly seřazeny dle drsnosti povrchu od nejhoršího a výrobně nejméně nákladného povrchu po nejlepší, nejnákladnější povrch. Toto pořadí je zachováno při dalším vyhodnocování dat.

6.5 Vstříkované termoplasty

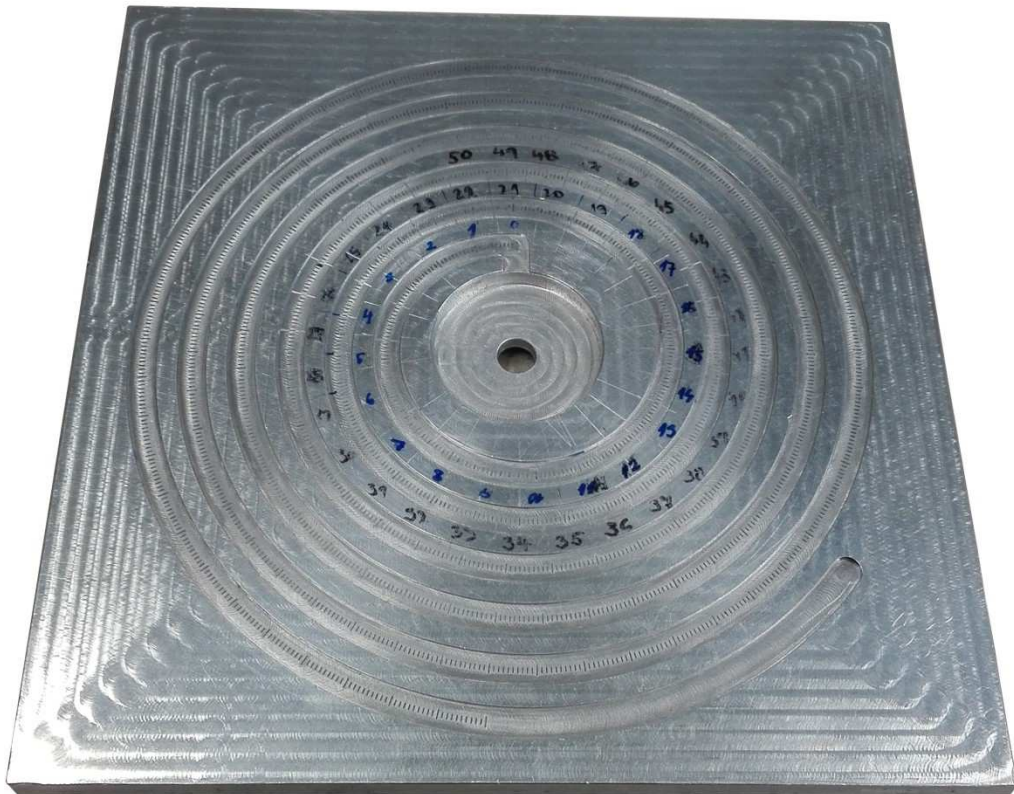
Pro experiment byly vybrány v praxi běžně používané materiály PP, ABS, POM, PBT a PC. Konkrétní obchodní názvy a indexy toku taveniny udávané výrobcem jsou seřazeny na Obr. 33. Další informace jsou k nalezení v materiálových listech jednotlivých termoplastů. Tyto materiálové listy jsou součástí přílohy práce v elektronické podobě. V celé práci jsou názvy materiálů dále uváděny pouze jejich zkrácenými označeními (např. PP).



Obr. 33. Vstříkované termoplasty

6.6 Měření délky zatečení

Dutina formy a tedy i zkušební tělesa nejsou opatřeny stupnicí, aby nedocházelo k ovlivnění délky zatečení. Z tohoto důvodu bylo měření délky zatečení prováděno pomocí přípravku (Obr. 34.). Délka zatečení byla u jednotlivých zkušebních těles měřena s přesností na 1 mm, což je hodnota odpovídající jednomu dílku na přípravku.



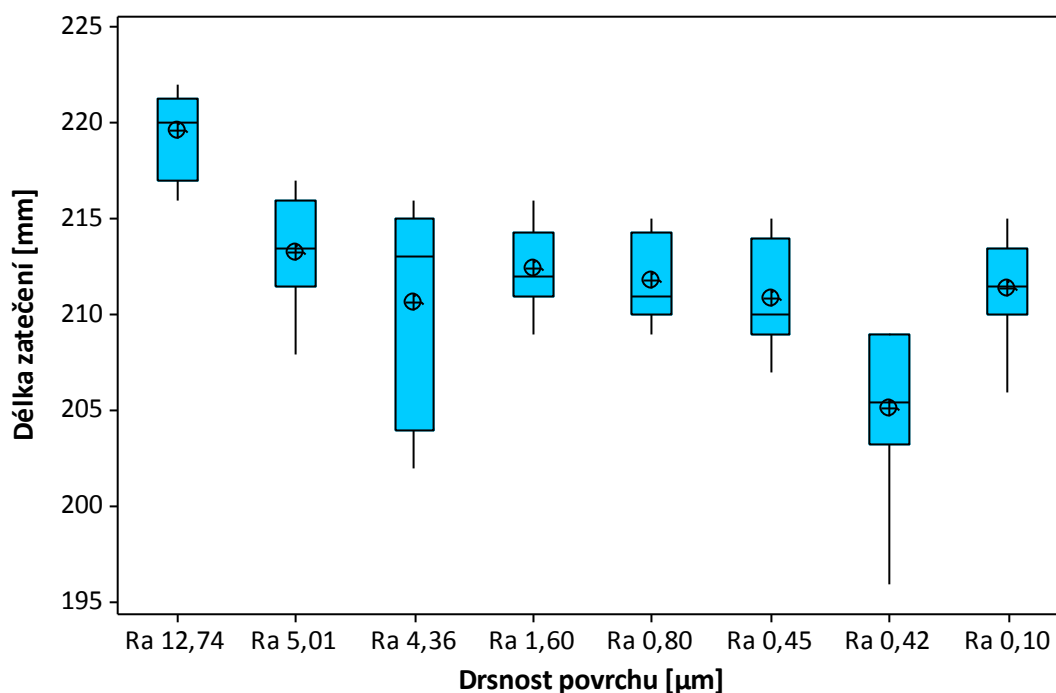
Obr. 34. Přípravek pro měření délky zatečení u zkušebních těles

7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Pro vyhodnocení výsledků byly použity boxplotové diagramy a trendové křivky zobrazující průběh některých ze statistických parametrů. Ke statistickému vyhodnocení byly využity programy Minitab 16 a Microsoft Excel. Výsledky měření jsou rozděleny do dvou podkapitol pro každý z materiálů, kde je vyhodnocena závislost délky zatečení na povrchu desky nebo na vstřikovacím tlaku. Získaná a vyhodnocená data jsou z důvodu velkého rozsahu uvedena v přílohách práce. V této kapitole jsou pro prezentaci popsány pouze vyhodnocené hodnoty jednoho ze semikrystalických materiálů – PP, a jednoho z amorfních materiálů – PC.

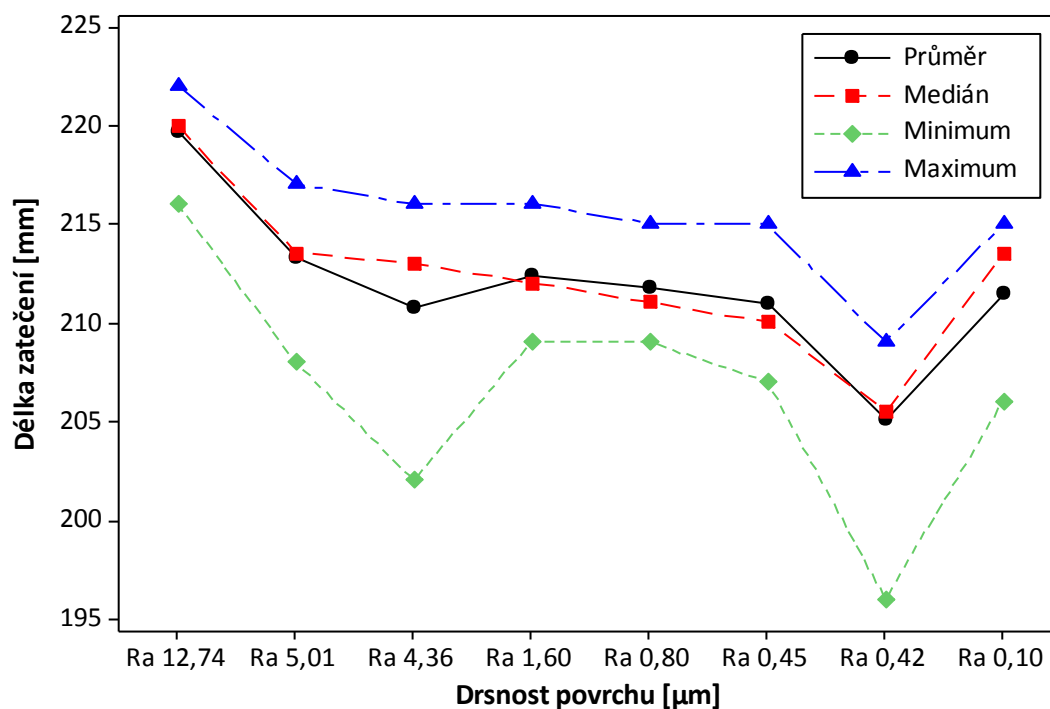
7.1 Délka zatečení v závislosti na povrchu desky - PP

V první části vyhodnocení výsledků byla řešena závislost délky zatečení na povrchu zkušební desky. V tomto případě byla hodnocena délka zatečení testovaného PP při vstřikovacím tlaku 500 bar. Na Obr. 35. je vidět, že se snižující se drsností povrchu klesá délka zatečení. Nejvyšší délku zatečení v tomto případě vykazuje deska s hrubým dezénem ($R_a 12,74 \mu\text{m}$), naopak nejnižších hodnot délky zatečení je dosaženo u leštěných desek.



Obr. 35. Závislost délky zatečení na povrchu zkušební desky (materiál PP, vstřikovací tlak 500 bar)

Na Obr. 36. je zobrazení vybraných statistických parametrů (průměr, medián, minimum a maximum) pro jednotlivé zkušební desky. Rozdíl mezi minimem a maximem byl u PP nejvyšší z testovaných materiálů, nicméně v tomto případě nedošlo k výskytu odlehlých hodnot.

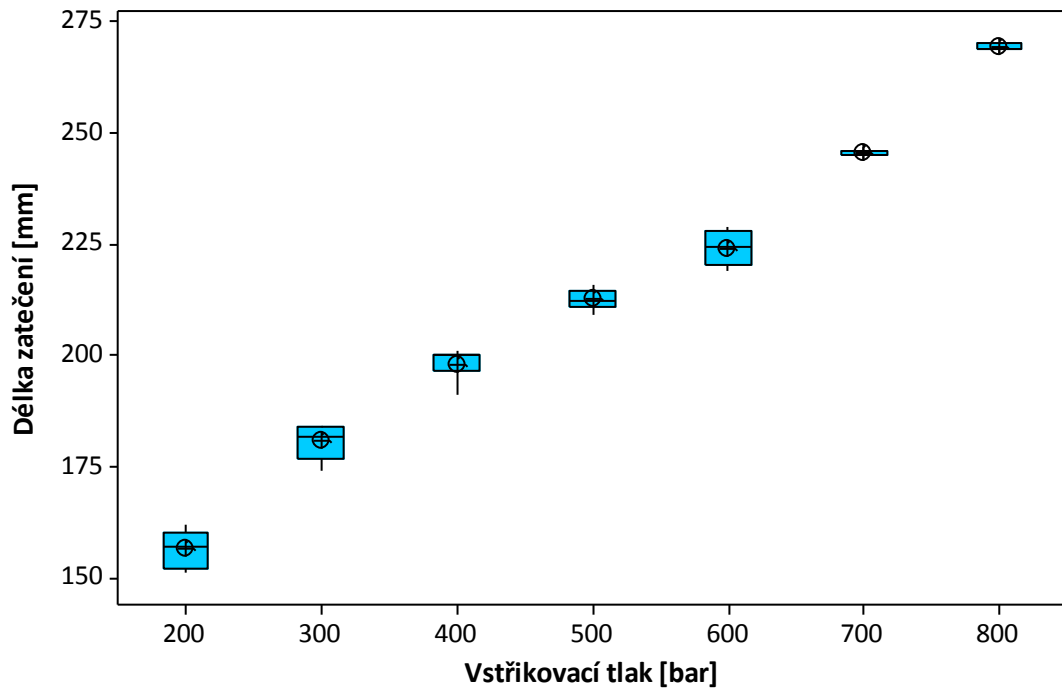


Obr. 36. Závislost vybraných statistických parametrů na povrchu zkušební desky
(materiál PP, vstřikovací tlak 500 bar)

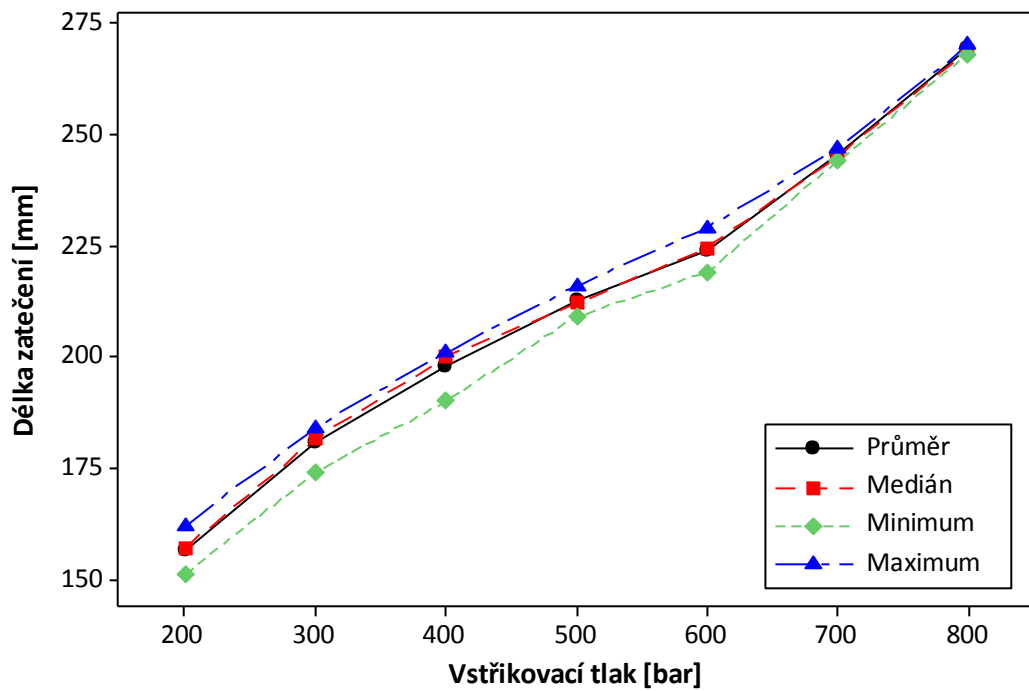
7.2 Délka zatečení v závislosti na vstřikovacím tlaku - PP

Druhá část vyhodnocení výsledků sleduje závislost délky zatečení testovaného PP na změně vstřikovacího tlaku. Pro prezentaci výsledků byla použita zkušební deska Ra 1,6. Na Obr. 37. je vidět, že se zvyšujícím se tlakem roste délka zatečení zkušebních těles.

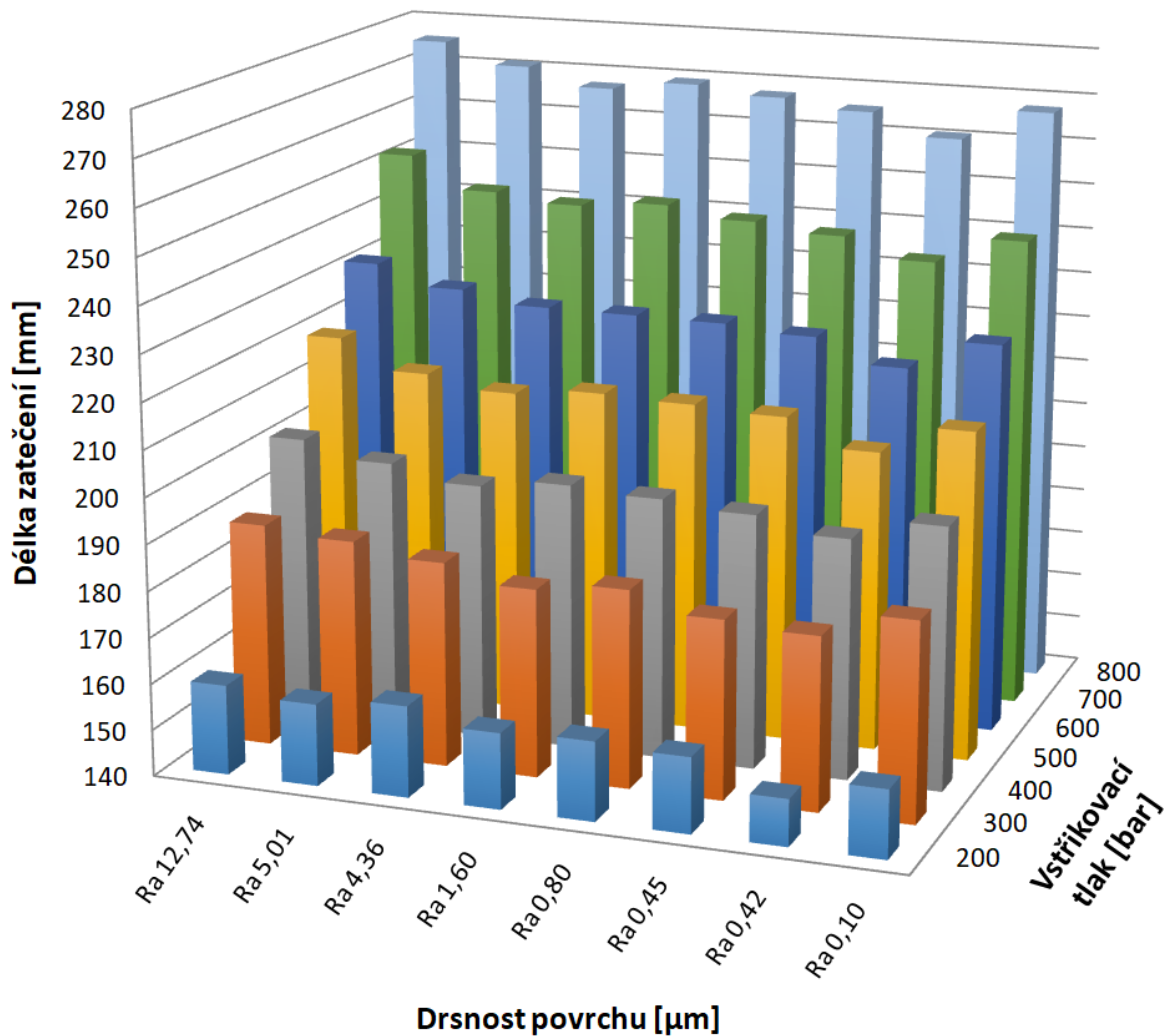
Na Obr. 38. jsou zobrazeny statistické parametry (průměr, medián, minimum a maximum) pro jednotlivé vstřikovací tlaky. Rozdíl mezi minimem a maximem klesá s rostoucím tlakem, zároveň je patrné, že růst délky zatečení se zvyšujícím se vstřikovacím tlakem je lineárního charakteru.



Obr. 37. Závislost délky zatečení na vstřikovacím tlaku (materiál PP, zkušební deska Ra 1,6)



Obr. 38. Závislost vybraných statistických parametrů na vstřikovacím tlaku (materiál PP, zkušební deska Ra 1,6)



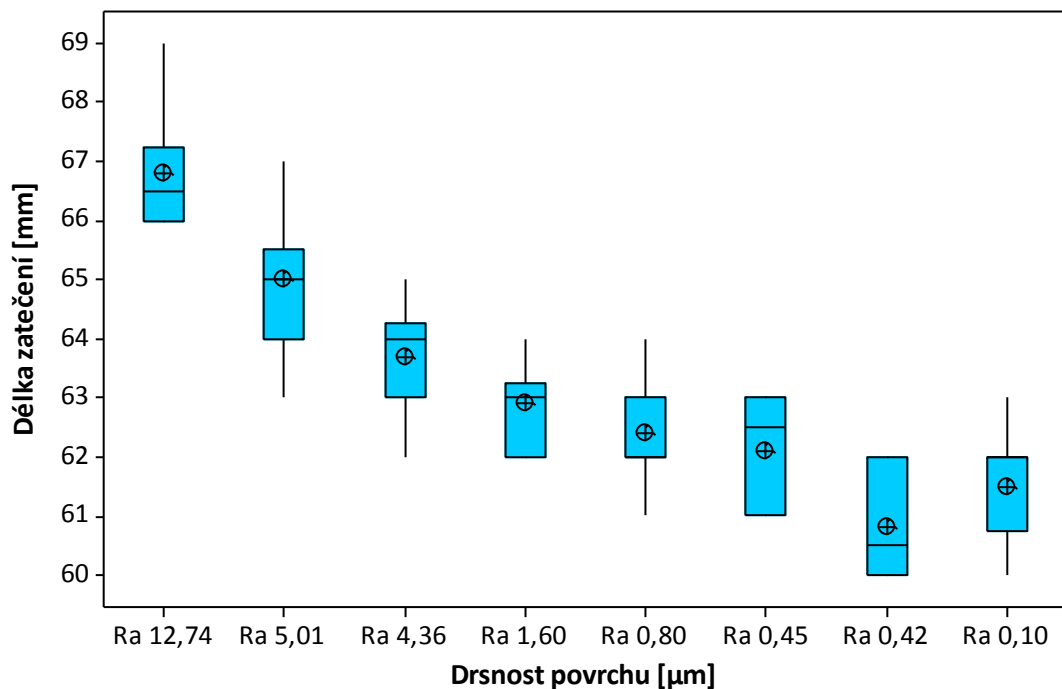
Obr. 39. Závislost povrchu zkušebních desek a vstřikovacího tlaku a délku zatečení (materiál PP)

Na Obr. 39. je zobrazen prostorový graf, který je vyobrazením závislosti délky zatečení na vstřikovacím tlaku a povrchu zkušebních desek. Z grafu je patrné, že pro všechny zkušební desky byl růst délky zatečení se zvyšujícím se vstřikovacím tlakem blízký lineárnímu charakteru. Tento graf slouží pouze pro ilustraci, konkrétní vyhodnocení pro jednotlivé tlaky je k dispozici v příloze práce.

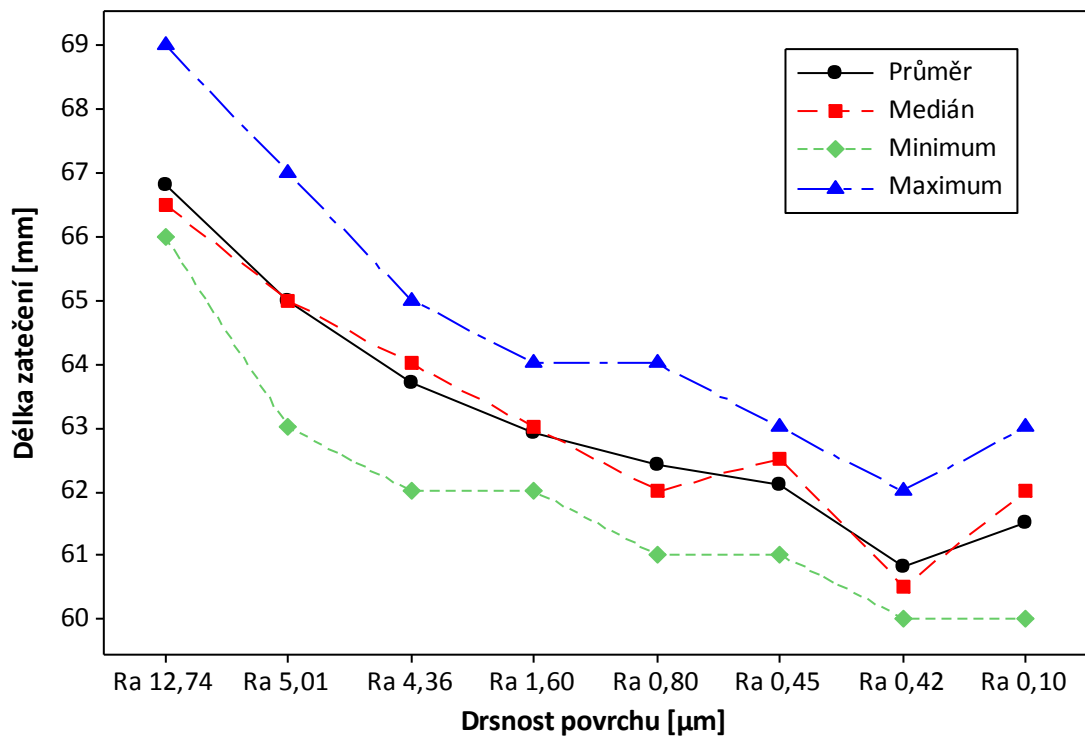
7.3 Délka zatečení v závislosti na povrchu desky - PC

Dalším materiálem vybraným pro prezentaci je PC. Stejně jako u PP byla v první části vyhodnocení řešena závislost délky zatečení na povrchu zkušební desky. Pro porovnání jsou uvedeny výsledky při vstřikovací tlaku 500 bar stejně jako u PP. Na Obr. 40 je vidět, že se snižující se drsností povrchu klesá délka zatečení podobně jako u PP. Nejvyšší délku zatečení vykazuje deska s hrubým dezénem ($R_a 12,74 \mu\text{m}$), nejnižších hodnot délky zatečení je pak dosaženo u leštěných desek ($R_a 0,42 \mu\text{m}$ a $R_a 0,10 \mu\text{m}$).

Na Obr. 41. je zobrazení vybraných statistických parametrů (průměr, medián, minimum a maximum) pro jednotlivé zkušební desky. Rozdíl mezi minimem a maximum) délky zatečení se pohybuje od 2 do 4 mm a z grafu nejsou patrné žádné odlehlé hodnoty.



Obr. 40. Závislost délky zatečení na povrchu zkušební desky (materiál PC, vstřikovací tlak 500 bar)

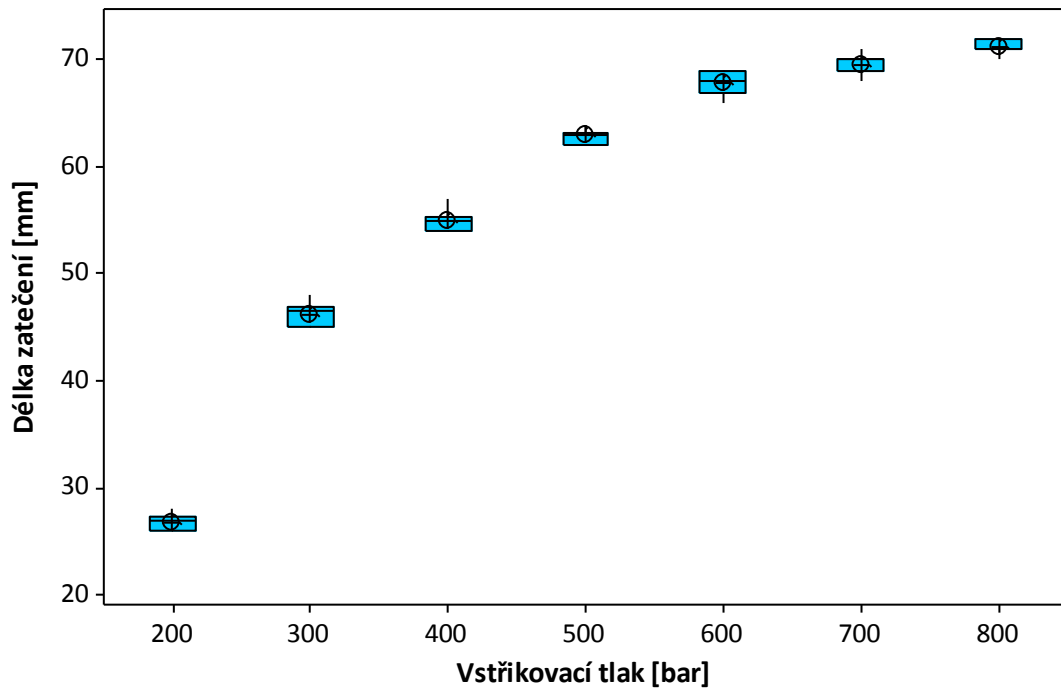


Obr. 41. Závislost vybraných statistických parametrů na povrchu zkušební desky
(materiál PC, vstřikovací tlak 500 bar)

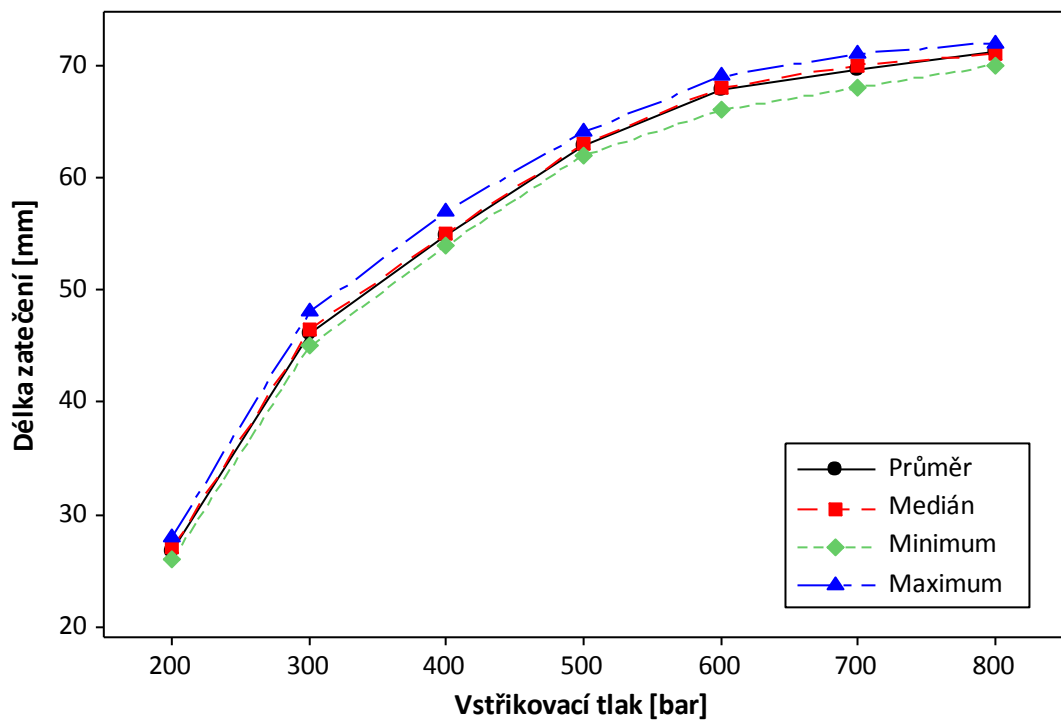
7.4 Délka zatečení v závislosti na vstřikovacím tlaku - PC

Druhá část výsledků je stejně jako u PP zaměřena na sledování závislosti délky zatečení na změně vstřikovacího tlaku. Pro prezentaci výsledků byly vybrány vyhodnocené hodnoty pro zkušební desku Ra 1,6, stejně jako u PP. Na Obr. 42. je vidět, že se zvyšujícím se tlakem roste délka zatečení zkušebních těles a že se mezi naměřenými hodnotami nevyskytuje žádná odlehlá hodnota.

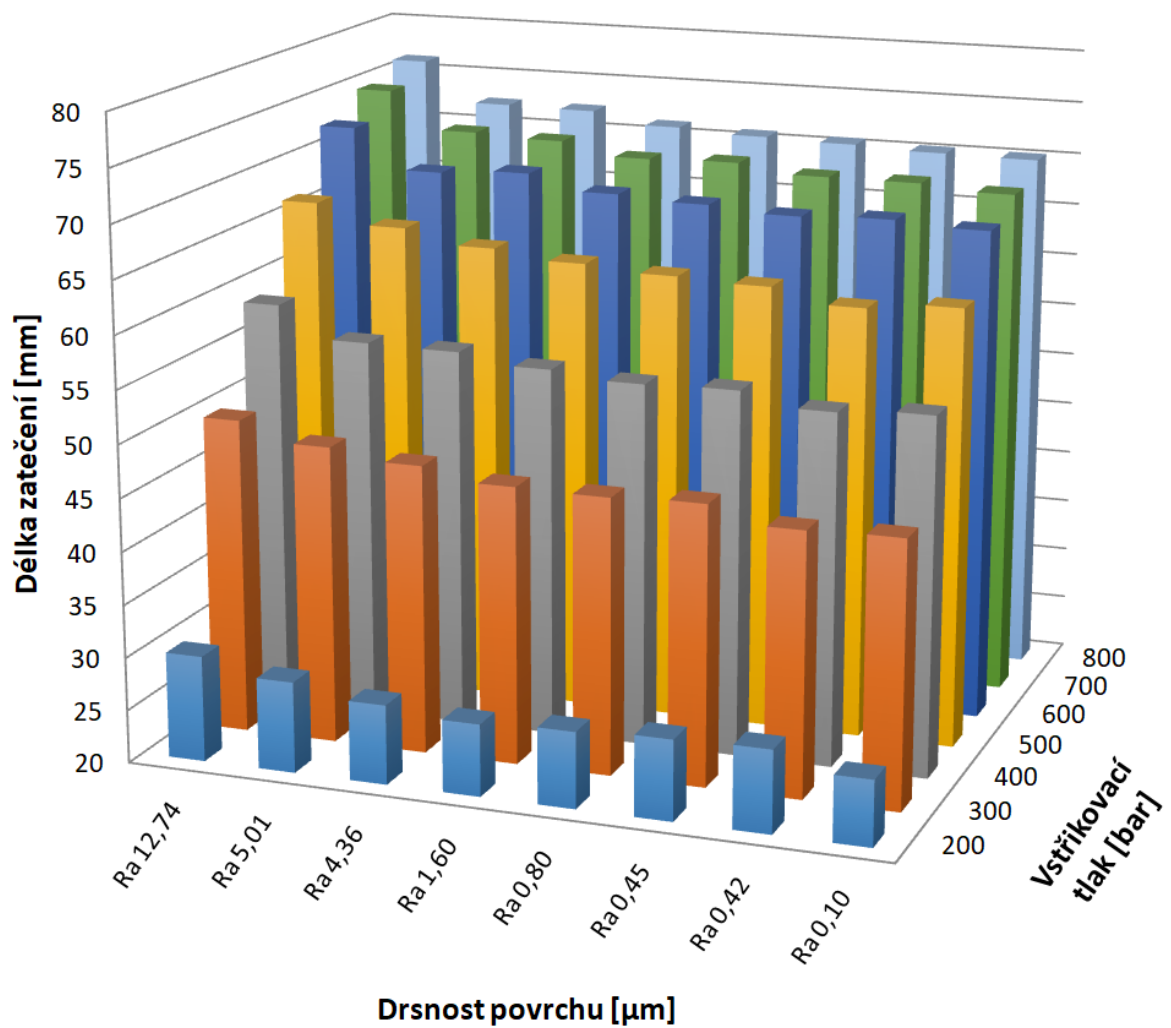
Na Obr. 43. jsou zobrazeny statistické parametry (průměr, medián, minimum a maximum) pro jednotlivé vstřikovací tlaky. Rozdíl mezi minimem a maximem je pro všechny tlaky podobný a z hlediska použité technologie je nevýznamný.



Obr. 42. Závislost délky zatečení na vstřikovacím tlaku (materiál PC, zkušební deska Ra 1,6)



Obr. 43. Závislost vybraných statistických parametrů na vstřikovacím tlaku (materiál PC, zkušební deska Ra 1,6)



Obr. 44. Závislost povrchu zkušebních desek a vstřikovacího tlaku a délky zatečení (materiál PC)

Na Obr. 44. je zobrazen prostorový graf závislosti délky zatečení na vstřikovacím tlaku a povrchu zkušebních desek. Z grafu je patrné, že pro všechny použité vstřikovací tlaky se délky zatečení chová podle podobného trendu jako na Obr. 43. Tento graf slouží pouze pro ilustraci, konkrétní vyhodnocení pro jednotlivé tlaky je k dispozici v příloze práce.

DISKUZE VÝSLEDKŮ

Cílem diplomové práce byl výzkum vlivu drsnosti povrchu dutiny formy na zatékavost polymerní taveniny při různých technologických podmínkách. Pro tento účel byla použita vstřikovací forma s možností výměny tvarových desek s různou drsností povrchu. Pro výrobu 8 použitých zkušebních desek byly využity technologie elektroerozivního obrábění, frézování, broušení a leštění, přičemž hodnoty drsnosti zkušebních desek jsou v rozmezí od Ra 0,1 μm do Ra 12,74 μm . Dutina formy byla tvaru spirály a bylo využito vtokové ústí o šířce 6 mm odpovídající šířce průřezu spirály. Pro výrobu zkušebních těles bylo vybráno 5 různých materiálů. Jednotlivé materiály byly vstřikovány pro každou zkušební desku při 7 různých vstřikovacích tlacích. U zkušebních těles byla měřena zatékavost za pomoci speciálního přípravku. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a statisticky zpracovány.

Po vyhodnocení vlivu drsnosti povrchu zkušebních desek na délku zatečení testovaných materiálů bylo zjištěno, že ve většině případů desky s vyšší hodnotou drsnosti povrchu vykazují lepší zatékavost. Deska s hrubým dezénem vyrobená pomocí elektroerozivního obrábění vykazovala nejvyšší hodnotu zatečení při použití PP, ABS, POM a PC, tedy 4 z 5 testovaných materiálů. Nejnižších hodnot zatečení bylo naopak dosaženo u desek s leštěným povrchem a tedy nižší drsností povrchu. Těchto výsledků bylo dosaženo při využití 7 vstřikovacích tlaků v rozmezí od 200 bar do 800 bar. Materiál PBT vykazoval výsledky stejného charakteru pouze za nižších tlaků, s rostoucím vstřikovacím tlakem nebylo možné prokázat stejnou tendenci, jako u ostatních materiálů.

Vyhodnocením vlivu vstřikovacího tlaku na délku zatečení byl potvrzen předpoklad, že se zvyšujícím se vstřikovacím tlakem roste délka zatečení. Rozdíly v délce zatečení byly výrazné a zároveň lze říci, že se výsledky blíží lineárnímu charakteru. Výjimkou byl pouze materiál PC, který při vyšších tlacích nevykazoval velké rozdíly v délce zatečení a závislost tedy není lineární.

Ze získaných poznatků lze říci, že délka zatečení polymerních tavenin roste se zvyšující se hodnotou drsnosti povrchu dutiny formy. Tento důležitý poznatek může vést k nezanedbatelnému snížení nákladů na výrobu vstřikovací formy, jelikož by odpadlo použití drahých dokončovacích operací na rozvodné kanály, či na plochy dutiny formy, které netvoří funkční, či pohledovou plochu budoucího výstřiku.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá analýzou vlivu drsnosti povrchu a vstřikovacího tlaku na délku zatečení testovaných materiálů. Bylo testováno 5 materiálů ze skupiny semikrystalických i amorfních polymerů: PP, ABS, POM, PBT, PC. Tyto materiály byly vstřikovány při 7 různých vstřikovacích tlacích do dutiny formy ve tvaru spirály s 8 různými drsnostmi povrchu.

Měřením byl potvrzen vliv vstřikovacího tlaku na délku zatečení, tedy že s rostoucím vstřikovacím tlakem roste i délka zatečení polymerní taveniny. Rozdíly mezi jednotlivými vstřikovacími tlaky byly výrazné a u většiny materiálů byl nárůst délky zatečení lineárního charakteru. Dále výsledky naznačují, že drsnost povrchu formy má nezanedbatelný vliv na délku zatečení polymerní taveniny. Byly testovány povrchy s hodnotou drsnosti zkušebních desek v rozmezí od $R_a 0,1 \mu\text{m}$ do $R_a 12,74 \mu\text{m}$, přičemž nejvyšších hodnot délky zatečení bylo dosaženo u zkušebních desek s vyšší drsností povrchu. Při vstřikování polymerní taveniny do formy s horší jakostí povrchu tedy nebylo dosaženo nižší hodnoty zatečení, ale naopak byly výsledné hodnoty zatečení vyšší.

Při aplikaci tohoto poznatku do praxe by bylo možné nezanedbatelně snížit náklady na výrobu vstřikovací formy tím, že by bylo nutné použití nákladných dokončovacích operací (např. leštění) pouze na pohledové, či funkční plochy budoucího výstřiku a ostatní plochy bylo možné obrábět méně náročnými způsoby obrábění (např. frézování).

Na tuto práci bude navazovat disertační práce, kde bude experiment hlouběji zaměřen na jeden konkrétní typ materiálu různých tokových vlastností. Zároveň budou opracovány obě tvarové části formy, případně budou testovány povlakované povrchy dutiny formy z hlediska zatékavosti polymerní taveniny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BOBČÍK, L. *Formy pro zpracování plastů: vstřikování termoplastů. Díl 1.* 2. opr. vyd. Brno: Uniplast, 1999, 133 s.
- [2] BOBČÍK, L. *Formy pro zpracování plastů: vstřikování termoplastů. Díl 2.* Brno: Uniplast, 1999, 214 s.
- [3] DYM, J. B. *Injection molds and molding: a practical manual.* 2nd ed. New York: Nostrand Reinhold, c1987, xvi, 395 s. ISBN 0-442-21785-4.
- [4] KOČMAN, K. *Technologické procesy obrábění.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [5] KONTOPOULOU, M., JAMIESON, A. M. *Applied polymer rheology: polymeric fluids with industrial applications.* Hoboken, N.J.: Wiley, c2012. ISBN 978-047-0416-709.
- [6] UTRACKI, L. A., JAMIESON, A. M. *Polymer physics: from suspensions to nanocomposites and beyond.* Hoboken, N.J.: Wiley, c2010. ISBN 978-047-0193-426.
- [7] MEISSBER, B., ZILVAR, V. *Fyzika polymerů. Struktura a vlastnosti polymerních materiálů.* Praha: SNTL, 1987.
- [8] MAŇAS, M., VLČEK, J. *Aplikovaná reologie.* Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-731-8039-1.
- [9] MURATA, H. *Rheology - Theory and Application to Biomaterials. Polymerization.* InTech, 2012. DOI: 10.5772/48393. ISBN 978-953-51-0745-3.
Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/polymerization/rheology-theory-and-application-to-biomaterials>
- [10] LENK, R. S. *Plastics Rheology.* London: Maclaren, 1968, 214 s.
- [11] CROW Polymer Properties Database. *Flow Properties of Polymers* [online]. 2015 [cit. 2017-12-02]. Dostupné z: <http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Viscosity2.html>

- [12] BĚHÁLEK L. *Reologie tavenin termoplastů v průmyslové praxi* [online]. ksp.tup.cz [cit. 2017-12-01]. Dostupné z:
<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Reologie.pdf>
- [13] SHAW, M. T., JAMIESON, A. M. *Introduction to polymer rheology: from suspensions to nanocomposites and beyond*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2012. ISBN 978-047-0388-440.
- [14] ZATLOUKAL, M. *Aplikovaná reologie (přednášky)* Zlín: UTB Zlín, 2016
- [15] GNANOU, Y., FONTANILLE, M. *Organic and physical chemistry of polymers*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2008. ISBN 978-047-0238-127.
- [16] BEAUMONT J. P., NAGEL R., SHERMAN R. *Successful injection molding: process, design, and simulation*. Munich, Hanser, 2002. ISBN 34-461-9433-9.
- [17] JONG, W., HWANG, S., TSAI, M., WU, Ch., KAO, Ch., HUANG, Y. *Effect of gas counter pressure on shrinkage and residual stress for injection molding process*. *Journal of Polymer Engineering* [online]. 2017, 37(5), - [cit. 2017-12-03]. DOI: 10.1515/polyeng-2016-0071. ISSN 2191-0340. Dostupné z:
<http://www.degruyter.com/view/j/polyeng.2017.37.issue-5/polyeng-2016-0071/polyeng-2016-0071.xml>
- [18] LENFELD, P. *Technologie II. - Vstřikování plastů*. Technická univerzita Liberec, Katedra strojírenské technologie. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [19] BOBEK, J. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. 2014. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Cover.html>
- [20] ŘEHULKA, Z. *Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů: polymery*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-807-2048-335.
- [21] STANĚK, M. *Konstrukce forem (přednášky)* Zlín: UTB Zlín, 2015
- [22] XIANG, Q., HE, Y., HOU, T. *An Exploration of Surface Integrity Remanufacturing for Aeroengine Components*. *Frontiers of Engineering Management*. 2016, 3(2), 107-. DOI: 10.15302/J-FEM-2016025. ISSN 2095-7513. Dostupné z: <http://engineering.cae.cn/fem/EN/10.15302/J-FEM-2016025>

- [23] BUMBÁLEK, B. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci*. [online] 2005. [citace 2018-01-10] Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf
- [24] BUMBÁLEK, B., ODVODY, V., OŠŤÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989, 338 s.
- [25] PATA V. *Učíme v prostoru, Měření jakosti povrchu*. [online] [citace 2018-01-10] Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=1985
- [26] ŠPERKA P. *Struktura vybraných povrchů strojních součástí*. [online] 2009 [citace 2018-01-11] Dostupné z: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/Struktura_povrchu_vybranych_technologii_obrabeni.pdf
- [27] HOMMEL CS s.r.o. *Systém měření drsnosti - parametry drsnosti* [online]. [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <https://www.hommel-etamic.cz/cz/>
- [28] MAHR, spol. s.r.o. *MarSurf. Parametry drsnosti povrchu* [online]. [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <https://www.klz.inshop.cz/inshop/files/6910232/Parametry%20drsnosti%20Mahr-NEW.pdf>
- [29] GELETA, V. *Progresívne technológie obrábania*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2013, 163 s. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3997-9.
- [30] ŘASA, J., GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3.: Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 1. díl. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005, 256 s. ISBN 80-7183-337-1.
- [31] ŘASA, J., GABRIEL, V., POKORNÝ, P. *Strojírenská technologie 3.: Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*. 2. díl. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005, 221 s. ISBN 80-7183-336-3.
- [32] KULLABS.com. *Material Removal Process* [online]. [cit. 2018-01-15]. Dostupné z: <https://www.kullabs.com/classes/subjects/units/lessons/notes/note-detail/3825>
- [33] DHIRENDRANATH, M., BHATIA, A., RANA, V. *Study on Electro Discharge Machining (Edm)*. The International Journal Of Engineering And Science (IJES) [online]. 2014, 3(2), 24-35 [cit. 2018-01-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/306082278_Experimental_Study_of_Process_Parameters_through_Dissimilar_Form_of_Electrodes_in_EDM_Machining

- [34] STOKLÁSEK, J. *Galvanoplastická výroba forem*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2007, 25.04.2007, 2007(4) [cit. 2018-01-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/galvanoplasticka-vyroba-forem.html>
- [35] KING, D., TANSEY, T. *Rapid tooling: selective laser sintering injection tooling*. Journal of Materials Processing Technology [online]. 2003, 132(1-3), 42-48 [cit. 2018-01-17]. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00257-1. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013602002571>
- [36] CustomPart.Net. *Direct Metal Laser Sintering* [online]. 2008 [cit. 2018-01-17]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>
- [37] The Tool Hub. *Polished finishes* [online]. [cit. 2018-01-17]. Dostupné z: <http://thetoolhub.com/toolmaking/polished-finishes/>
- [38] HALEVI, G. *Process and operation planning*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003. ISBN 14-020-1653-0.
- [39] STANĚK, M. *Vliv technologických parametrů na zatékavost polymerů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2017. ISBN 978-80-7454-674-7. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/41577>
- [40] ARBURG. *ALLROUNDER 470 C GOLDEN EDITION technical data* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_ALLROUNDER_470C_GOLDEN_EDITION_TD_523679_en_GB.pdf
- [41] MatWeb. *Material Property Data* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/>
- [42] TEKUMA.de. *TEKUMA Starex HF-0660IW* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://tekuma.de/index.php?eID=blankpage&action=printproduct&product=87&cid=79>
- [43] Arcopolimeri srl. *FORMOCON® FM090* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.arcopolimeri.com/UserFiles/files/ProdottiPlastics/Formocon%20FM%20090%20tech%20english.pdf>
- [44] PlasticPortal.sk. *Materiálový list - CALIBRE™ 303EP-22* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: http://www.plasticportal.sk/image/inzeraty/2569/MA03344_MDS.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ČSN	označení českých technických norem
EN	označení evropských technických norem
ISO	zkratka pro Mezinárodní organizaci pro normalizaci
l	základní délka při zjišťování parametrů profilu povrchu [μm]
l_n	vyhodnocovaná délka při zjišťování parametrů profilu povrchu [μm]
Z_p	výška výstupku profilu povrchu [μm]
Z_v	hloubka prohlubně profilu povrchu [μm]
Z_t	výška prvku profilu povrchu [μm]
<i>CLA</i>	Chromatic Length Aberration – typ bezkontaktního snímače
<i>CNC</i>	Computer Numeric Control – počítačově číslicově řízené obráběcí stroje
<i>HSC</i>	High Speed Cutting – vysokorychlostní obrábění
<i>EDM</i>	Electrical Discharge Mechnining – elektroerozivní obrábění
<i>DMLS</i>	Direct Metal Laser Sintering – přímé kovové laserové spékání
<i>SLS</i>	Selective Laser Sintering – selektivní laserové spékání
<i>CAD</i>	Computer-aided design – počítačem podporované projektování
De	Debořino číslo [1]
λ	relaxační čas [s]
θ	doba pozorování [s]
η	smyková viskozita [Pa.s]
τ	velikost smykového napětí [Pa]
$\dot{\gamma}$	rychlost smykové deformace [s^{-1}]
d_c	průměr imaginární trubky, odpovídající vzdálenosti mezi zapleteninami
N	index neneutonského chování materiálu
τ_{xyw}	Kritická hodnota smykového napětí na stěně při toku látky [Pa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Schéma vstřikovacího stroje [19]</i>	13
<i>Obr. 2. Schéma vstřikovací formy [19]</i>	15
<i>Obr. 3. Graf vstřikovacího cyklu [21]</i>	17
<i>Obr. 4. Klíčové složky integrity povrchu [22]</i>	19
<i>Obr. 5. Náklady na obrábění v závislosti na požadované jakosti povrchu [38]</i>	20
<i>Obr. 6. Struktura povrchu po odfiltrování [26]</i>	21
<i>Obr. 7. Profil povrchu [25]</i>	22
<i>Obr. 8. Parametry P, W, R na profilu povrchu [27]</i>	23
<i>Obr. 9. Parametry Rp, Rv a Rz [27]</i>	24
<i>Obr. 10. Parametry Ra a Rq [28]</i>	25
<i>Obr. 11. Schéma indukčního systému měření povrchu kontaktním způsobem [25]</i>	26
<i>Obr. 12. Schéma CLA snímače [25]</i>	27
<i>Obr. 13. Základní typy frézování [31]</i>	30
<i>Obr. 14. Frézování nesousledné a sousledné [31]</i>	30
<i>Obr. 15. Princip EDM [33]</i>	34
<i>Obr. 16. Princip technologie DMLS [36]</i>	37
<i>Obr. 17. Povrch dutiny formy po leštění [37]</i>	38
<i>Obr. 18. Model ideálně elastických deformací [9]</i>	40
<i>Obr. 19. Model ideálně viskózních deformací [9]</i>	41
<i>Obr. 20. Maxwellův model [9]</i>	41
<i>Obr. 21. Voigtův model [9]</i>	42
<i>Obr. 22. Schéma smykového toku [6]</i>	42
<i>Obr. 23. Rozdělení tekutin dle chování při smykovém toku [11]</i>	43
<i>Obr. 24. Porovnání tokové křivky polymerní taveniny a Newtonské kapaliny [12]</i>	44
<i>Obr. 25. Zapletené polymerní řetězce [15]</i>	45
<i>Obr. 26. Fontánový tok ve vstřikovací formě [17]</i>	47
<i>Obr. 27. Kombinace podmínek přípravy zkušebních těles</i>	50
<i>Obr. 28. Porovnání délky zatečení analýzy a reálného zkušebního vzorku (materiál PC, vstřikovací tlak 500 bar)</i>	51
<i>Obr. 29. Vstřikovací stroj použitý k přípravě zkušebních těles</i>	52
<i>Obr. 30. 3D model zkušební vstřikovací formy</i>	54
<i>Obr. 31. Řez dutinou formy [39]</i>	55

<i>Obr. 32. Značení zkušebních desek společně s fotografiemi povrchu (zvětšení 50x)</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 33. Vstříkované termoplasty</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 34. Přípravek pro měření délky zatečení u zkušebních těles</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 35. Závislost délky zatečení na povrchu zkušební desky (materiál PP, vstříkovací tlak 500 bar).....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 36. Závislost vybraných statistických parametrů na povrchu zkušební desky (materiál PP, vstříkovací tlak 500 bar).....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 37. Závislost délky zatečení na vstříkovacím tlaku (materiál PP, zkušební deska Ra 1,6)</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 38. Závislost vybraných statistických parametrů na vstříkovacím tlaku (materiál PP, zkušební deska Ra 1,6)</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 39. Závislost povrchu zkušebních desek a vstříkovacího tlaku a délku zatečení (materiál PP).....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 40. Závislost délky zatečení na povrchu zkušební desky (materiál PC, vstříkovací tlak 500 bar).....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 41. Závislost vybraných statistických parametrů na povrchu zkušební desky (materiál PC, vstříkovací tlak 500 bar).....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 42. Závislost délky zatečení na vstříkovacím tlaku (materiál PC, zkušební deska Ra 1,6)</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 43. Závislost vybraných statistických parametrů na vstříkovacím tlaku (materiál PC, zkušební deska Ra 1,6)</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 44. Závislost povrchu zkušebních desek a vstříkovacího tlaku a délku zatečení (materiál PC).....</i>	<i>66</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Základní délky l pro veličinu R_a [24]</i>	23
<i>Tab. 2. Základní délky l pro veličiny R_z a R_m [24]</i>	23
<i>Tab. 3. Přehled dosažitelných drsností povrchu vybraných technologií [2,4,29]</i>	28
<i>Tab. 4. Nastavené technologické parametry pro jednotlivé materiály</i>	53
<i>Tab. 5. Podmínky sušení vstřikovaných materiálů</i>	53
<i>Tab. 6. Povrchy výměnných zkušebních desek [39]</i>	55

SEZNAM PŘÍLOH

- P 1 CD obsahující:
- Diplomovou práci (.pdf)
 - Naměřené hodnoty (.xlsx)
 - Soubory s vyhodnocenými výsledky měření (.pdf)
 - Hodnoty povrchu zkušebních desek (.pdf) [39]
 - Technický list ARBURG ALLROUNDER 470 C GOLDEN EDITION [40]
 - Materiálový list PP Borealis BJ380MO [41]
 - Materiálový list ABS Starex HF-0660IW [42]
 - Materiálový list POM FORMOCON® FM090 [43]
 - Materiálový list PBT Shinite® D201 [41]
 - Materiálový list PC CALIBRE™ 302EP-22 [44]