

Vliv procesních parametrů vstřikování na mikro- mechanické vlastnosti konstrukčních polymerů

Bc. Martin Chytil

Diplomová práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Chytil**
Osobní číslo: **T17562**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv procesních parametrů vstřikování na mikro-mechanické vlastnosti konstrukčních polymerů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracovat literární studii na dané téma**
- 2. Příprava zkušebních těles pro experiment**
- 3. Provedení experimentu**
- 4. Vyhodnocení naměřených hodnot**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **PTÁČEK, L a kol. Nauka o materiálu I. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2**
2. **PTÁČEK, L. a kol. : Nauka o materiálu II, Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.**
3. **BALTÁ CALLEJA, F a Stojko Christov FAKIROV. Microhardness of polymers. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, xiii, 237 s. ISBN 0-521-64218-3.**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Ovsík, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2019

Termín odevzdání diplomové práce:

17. května 2019

Ve Zlíně dne 7. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

Příjmení a jméno:

Obor:

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, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

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

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

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení 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 výtisky, apisy nebo rozmnoženiny.

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

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

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

⁴¹ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní díla:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy a 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. Ústanovení § 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 výdělků 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 přihlídá k výši výdělků dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studii vlivu jakosti povrchu dutiny formy a technologických parametrů vstřikovacího procesu na mikro-mechanické vlastnosti povrchu a zatékavost vstřikovaného materiálu.

Teoretická část obsahuje problematiku vstřikovacího procesu, poznatky z oboru reologie polymerních materiálů a popisuje instrumentovanou zkoušku tvrdosti DSI.

V praktické části byl zkoumán vliv vstřikovacího tlaku a drsnosti povrchu zkušebních desek na zatékavost daného termoplastu v dutině formy a na jeho výsledné mikro-mechanické vlastnosti měřené v různých vzdálenostech od vtoku pomocí metody Instrumentované zkoušky tvrdosti DSI.

Klíčová slova: DSI, mikrotvrdość, vstřikování, mechanické vlastnosti, zatékavost polymeru.

ABSTRACT

Master's thesis deals with study of the influence of the mold cavity surface roughness and various technological parameters of the injection molding process on surface micro-mechanical parameters and polymer fluidity of the injected material.

Theoretical part contains a description of the injection molding process, knowledge from the field of rheology of polymer materials and describes Instrumented Depth Sensing Indentational method.

In the practical part, the influence of the injection pressure and the surface roughness of the tested plates on the flowability of tested thermoplastic in the mold cavity have been studied and on its outcoming micro-mechanical properties that was measured at various distances from the inlet using the Instrumented Depth Sensing Indentational method (DSI).

Keywords: DSI, microhardness, injection molding, mechanical properties, polymer fluidity

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za čas a odborné rady, které mi po dobu vytváření této práce byly věnovány. Poděkování patří také spolužákům, mým nejbližším a zejména rodičům za trvalou materiální i morální podporu, která mi byla poskytována během celého studia.

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

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	12
1 POLYMERY.....	13
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	13
1.1.1 Plasty	14
1.1.2 Termoplasty.....	14
1.1.3 Reaktoplasty	15
1.1.4 Elastomery.....	15
1.2 ROZDĚLENÍ PODLE TVARU MAKROMOLEKULÁRNÍCH ŘETĚZCŮ.....	15
1.3 ROZDĚLENÍ PODLE SLOŽENÍ.....	16
1.4 ROZDĚLENÍ PODLE APLIKACE	17
1.5 DĚLENÍ PODLE VÝCHOZÍ SUROVINY.....	18
1.5.1 Polymerace	18
1.5.2 Polykondenzace.....	19
1.5.3 Polyadice	19
1.6 ZPŮSOBY VÝROBY POLYMERŮ.....	19
1.6.1 Polymerace v monomerní fázi	20
1.6.2 Suspenzní polymerace.....	20
1.6.3 Roztoková polymerace.....	20
1.6.4 Emulzní polymerace.....	21
2 VSTŘIKOVACÍ FORMY	22
2.1 TEMPERAČNÍ SYSTÉM.....	22
2.2 VTOKOVÝ SYSTÉM	23
2.3 DUTINA TVARU FORMY	24
2.4 MATERIÁLY VSTŘIKOVACÍCH FOREM	24
2.4.1 Oceli	25
2.4.2 Slitiny mědi	27
2.4.3 Slitiny hliníku.....	27
3 VSTŘIKOVÁNÍ	28
3.1 SUŠENÍ TERMOPLASTŮ	29
3.2 PROCES VSTŘIKOVÁNÍ	29
3.3 CYKLUS VSTŘIKOVÁNÍ	30
3.3.1 Průběh teploty a tlaku (dotlaku) během vstřikování	31
3.4 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	32
3.4.1 Uzavírací jednotka	33
3.4.2 Vstřikovací jednotka	35
3.4.3 Regulace a ovládání vstřikovacího stroje.....	36
4 REOLOGIE POLYMERŮ	38

4.1	REOLOGICKÉ CHOVÁNÍ POLYMERNÍ TAVENINY	38
4.2	VISKOZITA A TOK TAVENINY	39
4.2.1	Tok taveniny ve formě	40
4.3	INDEX TOKU TAVENINY	41
4.4	SPIRÁLOVÁ ZKOUŠKA ZABÍHAVOSTI.....	43
5	INSTRUMENTOVANÁ VNIKACÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI – DSI.....	45
5.1	INDENTAČNÍ KŘIVKY	46
5.2	STANOVENÍ VÝSLEDKŮ INSTRUMENTOVANÉ ZKOUŠKY DSI	47
5.2.1	Vtiskový modul pružnosti	47
5.2.2	Vtiskové tečení	47
5.2.3	Tvrдость	48
5.2.4	Elastická a plastická práce vtisku.....	48
II	PRAKTICKÁ ČÁST	49
6	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	50
7	VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	51
7.1	PODMÍNKY PŘÍPRAVY ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	51
7.1.1	Vstřikovaný materiál	52
7.2	VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	53
7.3	ZKUŠEBNÍ VZORKY	54
7.3.1	Technologické parametry vstřikování zkušebních těles	54
7.4	ZKUŠEBNÍ DESKY	55
7.4.1	Dutina tvaru formy	56
7.5	MĚŘENÍ INSTRUMENTOVANOU ZKOUŠKOU TVRDOSTI DSI	57
7.5.1	Postup měření vstřikované spirály	58
7.6	MĚŘENÍ DÉLKY ZATEČENÍ	59
8	ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	62
8.1	POUŽITÉ VELIČINY	62
8.2	VÝSLEDNÉ HODNOTY	63
8.2.1	Hodnoty vtiskové tvrdosti H_{IT}	63
8.2.2	Hodnoty vtiskového modulu E_{IT}	66
8.2.3	Hodnoty creepového chování C_{IT}	69
9	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	73
9.1	VTISKOVÁ TVRDOST H_{IT}	74
9.2	VTISKOVÝ MODUL E_{IT}	75
9.3	VTISKOVÉ TEČENÍ (CREEP) C_{IT}	76
	ZÁVĚR	78
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	80
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	84
	SEZNAM OBRÁZKŮ	86
	SEZNAM TABULEK.....	88
	SEZNAM PŘÍLOH.....	89

ÚVOD

V poslední době nacházejí polymerní materiály stále větší uplatnění napříč všemi spektry odvětví průmyslu. Dosud běžně používané kovové, či organické materiály jako jsou dřevo, sklo, jsou nahrazovány polymerními materiály díky jejich vynikajícím vlastnostem jako například jednoduchá zpracovatelnost, nízká měrná hmotnost či chemická odolnost. S růstem požadavků na výrobu polymerních výrobků jde ruku v ruce i také růst průmyslové oblasti, která je zaměřena na výzkum a zpracování polymerních materiálů.

Během zpracování polymerních materiálů je dbáno především na optimalizaci výrobního procesu, tím i na minimalizaci nákladů a také na kvalitu plastového výrobku. K nejpoužívanějším technologiím využívaných ve zpracovatelské oblasti plastů řadíme především vstřikování. Toto prvenství si vstřikování zasloužilo především díky vysoké produktivitě, možnosti úplné automatizace výroby, schopnosti vyrábět rozličné výrobky i často složitých tvarů a také díky své univerzálnosti, kdy je možné zpracovávat elastomery, reaktoplasty i termoplasty. Optimalizace výrobního procesu je vzhledem k produktivitě této technologie o to důležitější, jelikož každá jedna sekunda, jenž zkrátí vstřikovací cyklus vede k nezanedbatelným úsporám výrobních nákladů.

Hlavním prvkem optimalizace procesu vstřikování je volba optimálního polymerního materiálu a užití náležitého nástrojového materiálu tvarové dutiny formy. Během výroby samotné vstřikovací formy je nutno zvolit vhodnou technologii obrábění, kterou dosáhneme požadovaných mechanických a estetických vlastností výrobků se zachováním určené jakosti povrchu. Koncepce výroby vstřikovacích forem bývá zpravidla nastavena, aby tvarové dutiny vstřikovací formy měly co nejlepší možnou jakost povrchu. Kvalitnější povrch nám poté zabezpečí mnohem lepší podmínky pro tok taveniny. Dřívější studie a výzkumy, ale nastínily u povrchu o horší jakosti, lepší zatékavost polymerní taveniny než u leštěného povrchu. Tyto znalosti nám poté v praxi poskytují četné možnosti optimalizace výrobního procesu vstřikovacích forem a s tím i významné snížení nákladů kladených na výrobu.

Další významnou součástí optimalizace vstřikování, je nastavení procesních parametrů, kterými jsou například velikost vstřikovacího tlaku, dotlaku a doba chlazení. Tyto parametry se také významně podílí na výsledných mechanických vlastnostech a jakosti povrchu vstřikovaného výrobku. Během volby vstřikovaného materiálu, musíme brát v úvahu jeho molekulární struktura a jeho reologické vlastnosti, jenž mají rovněž značný vliv na vzhled, mechanické vlastnosti a jakost povrchu budoucího vstřikovaného výrobku.

Vhodné kombinace a nastavení technologických podmínek pro daný materiál, jsou poté v praxi vyhledávány k dosažení požadované jakosti povrchu a mechanických vlastností při zachování co možná nejnižších nákladů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

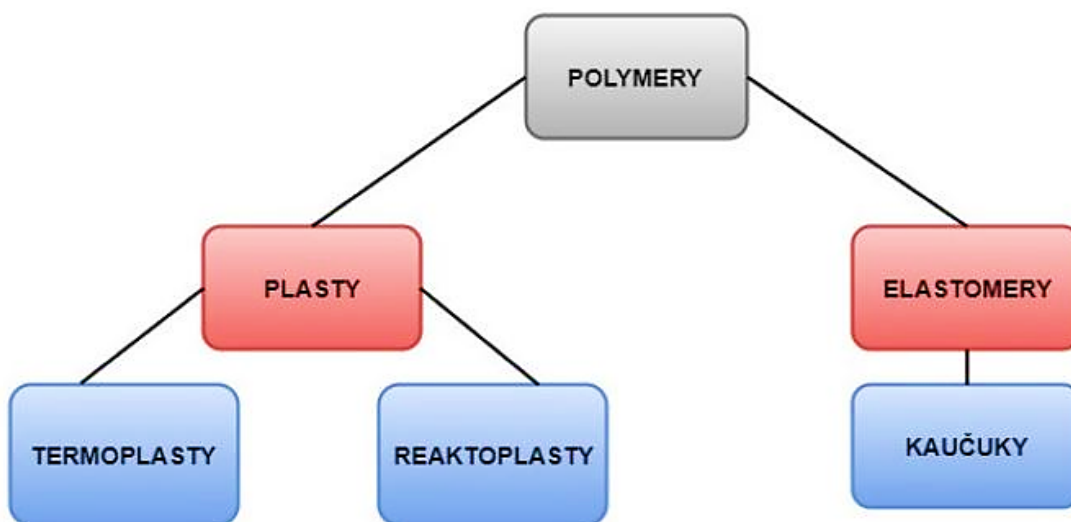
Názvem polymer označujeme přírodní i syntetické látky, jež se skládají z velkých molekul, obsahující mnoho opakujících se stejných jednotek.

Dle chemického pohledu jsou polymery sloučeniny vodíku a uhlíku, často obsahující též prvky jako kyslík, dusík. Ke vzniku polymerních materiálů dochází z nízkomolekulárních sloučenin monomerů, za specifické polyreakce (polykondenzace, polymerace, polyadice).

Charakteristickými vlastnosti polymerních materiálů je malá tvrdost i hustota, při porovnání s kovy nízká pevnost v tahu a tepelná odolnost. Ve většině případů jsou elektrickými izolanty. Další výhodou polymerů oproti kovům, keramice nebo sklům je nízká energetická náročnost výroby. Avšak v porovnání s kovy jsou polymery obtížně recyklovatelné [1]

1.1 Základní rozdělení polymerů

Polymer je možno rozdělit podle několika kritérií. Základní skupiny jsou elastomery a plasty.



Obr. 1. Základní rozdělení polymerů [1]

1.1.1 Plasty

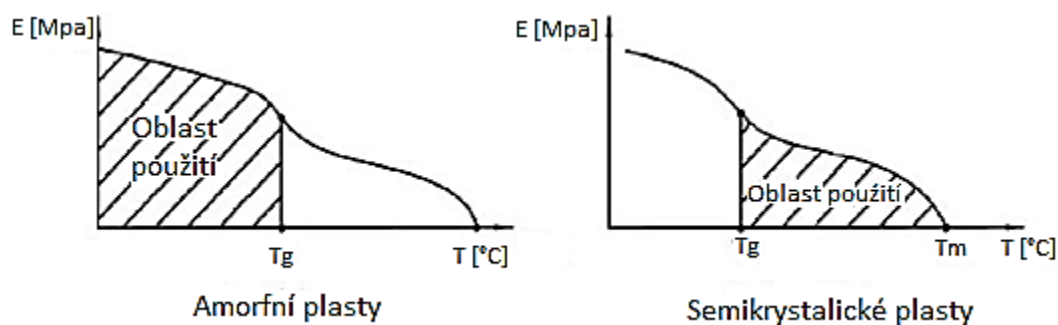
Plasty rozumíme polymery, u nichž dochází působením vnějšího namáhání k deformaci nevratného charakteru. Při běžných podmínkách jsou tvrdé, křehké. Dle chování při zahřívání je dělíme na reaktoplasty a termoplasty. [2]

1.1.2 Termoplasty

Termoplasty jsou materiály, které zahříváním měknou a nedochází v nich k chemickým změnám. Působením tepla je lze dále tvarovat. Zahřátím nad teplotou tání přechází do oblasti taveniny. Do tuhého stavu přejde opět zpětným ochlazením. Během zahřívání neprobíhá chemická reakce a v průběhu zpracování nedochází ke změně chemické struktury. Změny, kterými materiál projde, jsou pouze fyzikálního charakteru a proces tuhnutí s měknutím je vratný. Tento proces lze opakovat do nekonečna a v porovnání s reaktoplasty nejsou tak náročné na recyklaci. Termoplasty můžeme rozdělit z hlediska vnitřní struktury na: [3]

Semikrystalické – z větší části jsou řetězce pravidelně uspořádány a vytváří krystalické útvary. Zbytek je amorfního uspořádání. Přirozeně jsou mléčně zakalené. Jejich pevnost a modul pružnosti stoupá se stupněm krystalinity. Použití je do teploty tání (T_m). Mezi typické představitele řadíme polypropylen (PP), polyethylen (PE), polyamid 6 (PA6) a polyoxymetylen (POM). [2]

Amorfní – řetězce mají nepravidelné uspořádání. Jsou charakteristické křehkostí, tvrdostí, modulem pružnosti, vysokou pevností a díky nízkému indexu lomu také průhledné. Polymery amorfního charakteru jsou použitelné do teploty zesklnění (T_g). Jako představitele, zde řadíme polystyrén (PS), polykarbonát (PC), polymethylmethakrylát (PMMA), polyvinylchlorid (PVC) a kopolymerstyrenakrylonitril (SAN). [1]



Obr. 2. Oblast využití u amorfních a semikrystalických plastů [4]

1.1.3 Reaktoplasty

Odlišují se svým chováním. Zahřátím polotovaru, jenž zaujímá tvar budoucího výrobku, dochází k jeho vytvrzení, změně struktury (dojde k zesíťování). Tento proces již není vratný. Výsledek tohoto procesu je tvrdý a tuhý materiál. Při opakovaném zahřátí tohoto materiálu již nedochází k tavení a měknutí. Řadíme zde: polyesterové pryskyřice (UP) epoxidové pryskyřice (EP), fenolformaldehydová pryskyřice (PF) [2]

1.1.4 Elastomery

Při mechanickém zatížení dochází k velkým deformacím. Po následném odlehčení zatížení se materiál navrácí do původního tvaru, v materiálu tedy dojde k pružné deformaci. Do elastomerů řadíme též kaučukové materiály.

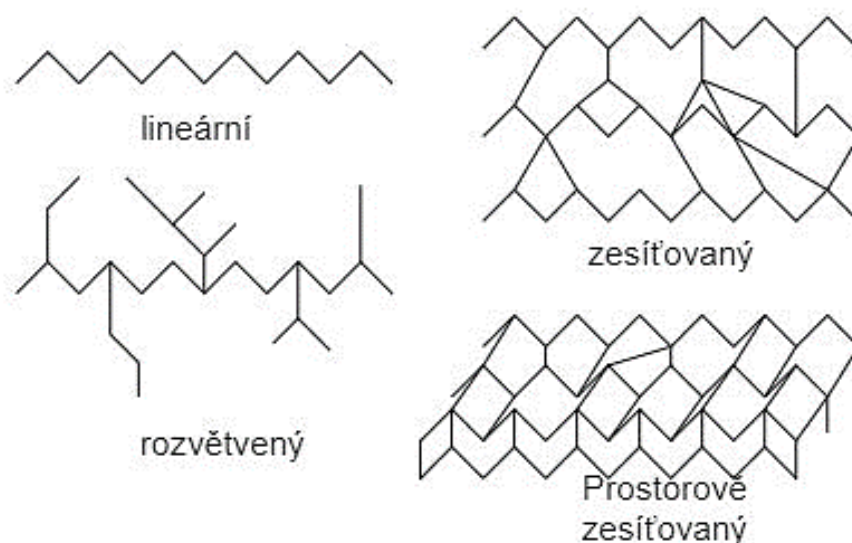
Mezi makromolekulami může dojít k výskytu příčných kovalentních vazeb, které udržují vzájemnou polohu makromolekul a tím dojde k zabránění trvalé deformaci materiálu. Mají nižší hustotu příčných vazeb jako u reaktoplastů, makromolekuly mají možnost orientace ve směru působící síly a po odlehčení se navrátí do původního tvaru. [1]

1.2 Rozdělení podle tvaru makromolekulárních řetězců

- **Lineární polymer** – monomery seřazeny vedle sebe, vytváří jednoduchý řetězec. Lineární makromolekuly se více přibližují k sobě a vyplňují tak kompaktnější prostor (poté vykazují vyšší hustotu např. HDPE). [4]
- **Rozvětvený polymer** – znakem makromolekuly je hlavní řetězec, na němž jsou boční větve. Rozvětvené se liší od lineárních makromolekul tím, že je nelze k sobě dostatečně přiblížit kvůli obsahu bočních větví. Díky tomuto jsou charakteristické nižší hodnotou hustoty. [4]
- **Zesíťovaný polymer** – vyskytuje se zde několik rozvětvených či přímých makromolekulárních řetězců spojených vazbami, tudíž vytváří jednu nekonečnou makromolekulu označovanou také jako prostorová síť. Tato síť poté vede ke ztrátě rozpustnosti a tavitelnosti polymeru. Polymery vykazují vysokou tvrdost, tuhost a odolnost

proti zvýšené teplotě, ale také i nízkou odolností vůči rázovému namáhání. Síť bývají husté (reaktoplasty) nebo řídké (elastomerní kaučukovité polymery) [4]

- **Prostorově zesíťovaný polymer** – trojrozměrné monomery, jenž obsahují tři aktivní kovalentní vazby tvořící trojrozměrnou síť. Do těchto polymerů patří epoxidy a fenolformaldehydy. [4]



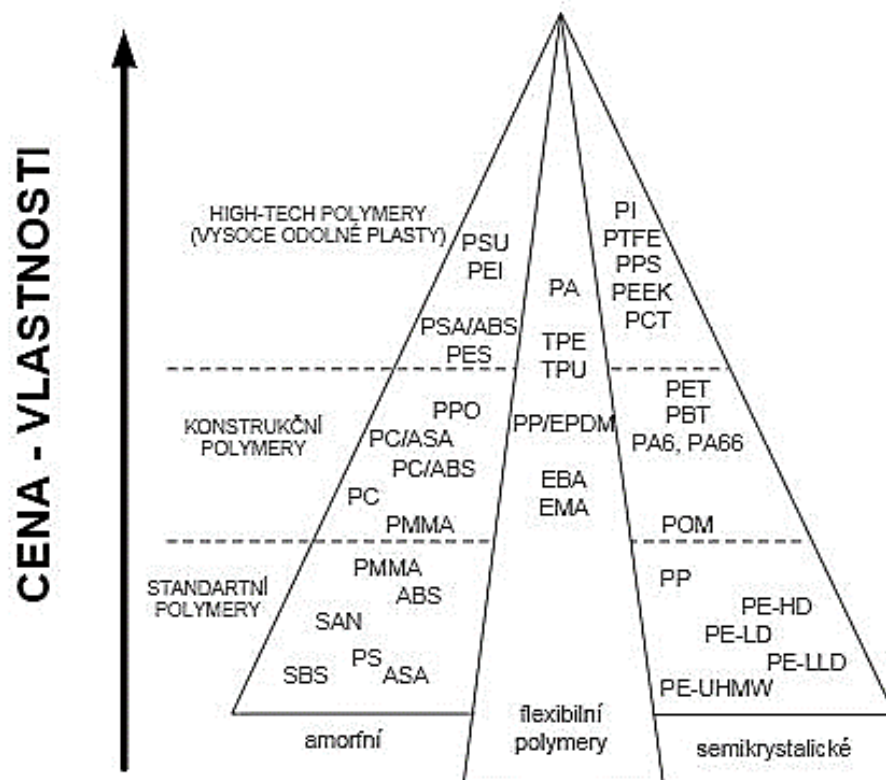
Obr. 3. Schematické znázornění molekulární struktury [4]

1.3 Rozdělení podle složení

- **Plněné plasty** – plnivo nám ovlivní fyzikální a mechanické vlastnosti plastu. Funkci pojiva zajišťuje makromolekulární látka a určuje také základní fyzikální a mechanické vlastnosti hmoty. Přísady mohou být maziva, stabilizátory, plniva, barviva, iniciátory, tvrdidla, změkčovadla, nadouvadla, retardéry hoření atd.
- **Neplněné plasty** – Neplněným plastem nazýváme hmotu, ve které nám množství přísad neovlivní vlastnosti polymerní matrice. [4]

1.4 Rozdělení podle aplikace

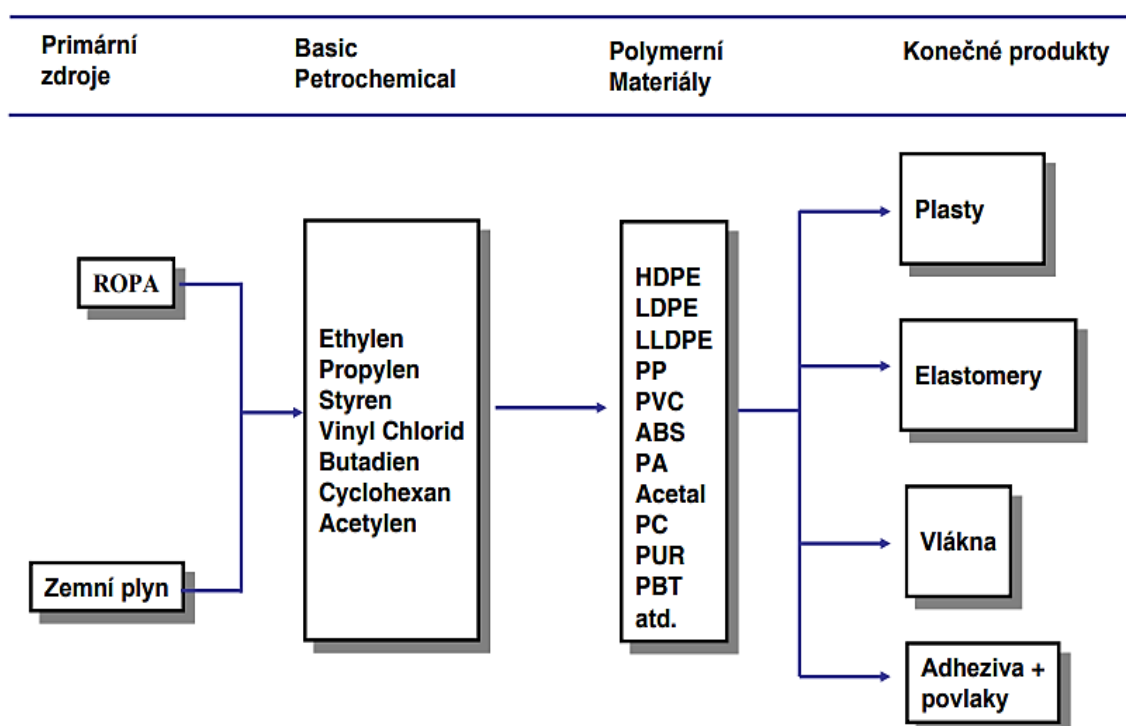
- **Standardní využití** – vyskytují se všude kolem nás, např. PVC podlahy, fólie. Řadíme k nim polyolefiny (PE, PP, PS, fenoformaldehydové hmoty PF, močovinoformaldehydové hmoty UF a PVC). [5]
- **Konstrukční plasty** – využití u součástí, které podléhají většímu namáhání např. polyamidová ozubená kola, PMMA jako náhrada skla, ve stavební oblasti POM profily a tyče. [5]
- **Vysoce odolné plasty** – tímto termínem nazýváme plasty, jež mají schopnost odolávat chemickým vlivům, velkému namáhání a vysokým teplotám. Využití převažuje v kosmu, leteckém odvětví, v automobilovém a chemickém průmyslu. Řadíme zde polyetherimid (PEI), polysulfon (PSU), polybenzenimid (PBI), polyfenylénsulfid (PPS), polyimidy (PI) a tetrafluoretylén (PTFE). [5]



Obr. 4. Rozdělení polymerů dle aplikace, nadmolekulární struktury a ceny [13]

1.5 Dělení podle výchozí suroviny

- **Přírodní** – chemicky upravené např. umělá rohovina, celuloid, umělé hedvábí, organické polymery, původní jako je škrob, celulóza, kaučuk. [4]
- **Syntetické** – výroba chemickými reakcemi z nízkomolekulárních sloučenin. Dle druhu reakce je lze rozdělit na polymery, které vznikají: polymerací, polykondenzací, polyadící. [4]

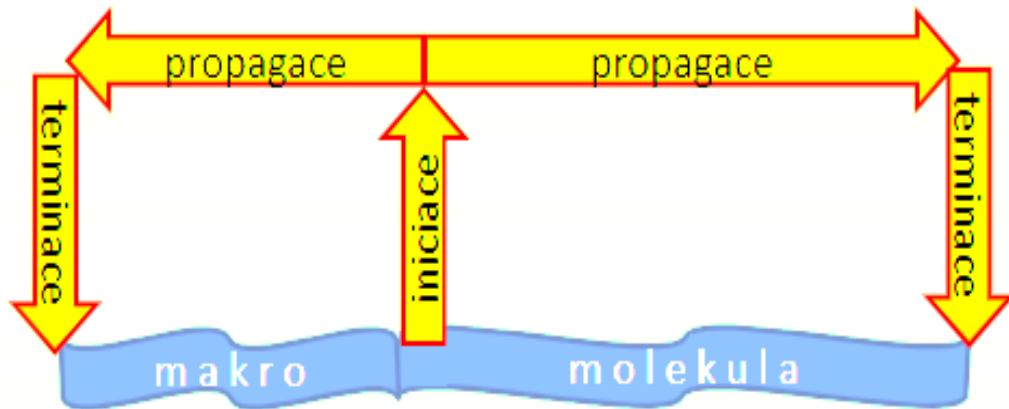


Obr. 5. Příprava syntetických polymerů [12]

1.5.1 Polymerace

Je řetězová chemická reakce velkého počtu molekul monomeru, při níž dochází ke vzniku dlouhých makromolekul polymeru. Tato reakce nevytváří vedlejší produkty, chemické složení polymeru je totožné jako chemické složení monomeru. Produktem polymerace je makromolekulární řetězec, jenž narůstá do své konečné délky ve velmi krátkém časovém úseku, díky tomu v každém stádiu polymerace existují v reakční hmotě vedle sebe nezreagované molekuly monomeru a makromolekuly polymeru ve své konečné velikosti. [11]

Velikost vznikajících makromolekul a rychlost polymerace je dána rychlostmi dílčích dějů, ze kterých se polymerace skládá – počáteční reakce (iniciace), následný růst (propagace) a končení (terminace). [11]



Obr. 6. Fáze polymerace [11]

1.5.2 Polykondenzace

Je sled stejných opakujících se reakcí funkčních skupin výchozích látek. Ke vzniku polymeru je nutné, aby výchozí sloučeniny měly dostatečný počet funkčních skupin, nejméně dvě v každé molekule navzájem reagující komponenty. V tomto případě dojde ke vzniku lineárního polymeru. Pokud má některá výchozí látka více funkčních skupin v molekule, vznikají produkty se strukturou prostorové sítě. [6]

1.5.3 Polyadice

Sloučeniny, jejichž molekuly obsahují násobné vazby, nebo tvořeny kruhy s malým počtem členů, mimo řetězení jsou schopny adičních reakcí se sloučeninami, jichž molekuly obsahují vhodné funkční skupiny. Pokud mají tyto sloučeniny ve svých molekulách aspoň dvě funkční skupiny, lze mnohonásobnou adicí dojít ke vzniku polymeru; tuto reakci proto nazýváme polyadice. [6]

1.6 Způsoby výroby polymerů

Při průmyslové výrobě, vyrábíme několika základními způsoby. Chemicky nejsnazší je polymerace samotného monomeru. Pokud je polymer v monomeru rozpustný, dojde s postupující polymerací ke stále viskóznějšímu roztoku, jenž nakonec ztuhne v blok, který zaujímá

tvar reakční nádoby. Pokud se vznikající polymer nerozpouští ve výchozím monomeru, dojde k jeho vylučování v jemných částicích. Dodáme-li k monomeru vhodné rozpouštědlo, vzniká roztok polymeru. Více než polymerace samotného monomeru nebo roztoku, je pro její technologické výhody suspenzní polymerace, nebo emulzní polymerace. Pouze omezený počet monomerů lze polymerovat všemi způsoby. Díky různým způsobům výroby se vlastnosti polymerů liší, a tudíž je nutno se řídit také požadavky na vlastnosti produktu. [7, 8]

1.6.1 Polymerace v monomerní fázi

Tímto způsobem provádíme radikálovou a iontovou polymeraci. Nevýhodou této polymerace je obtížný odvod reakčního tepla, doprovodným jevem bývá zmenšení objemu. V bloku dochází k úbytku monomeru, to má za následek smršťování výrobku a také pnutí kvůli malé pohyblivosti makromolekul. Projevem může být výskyt trhlin u velkých předmětů. Touto blokovou polymerací vyrábíme např. PMMA desky, kontaktní čočky. [7, 39]

1.6.2 Suspenzní polymerace

Je způsob odstraňující špatný odvod reakčního tepla při polymeraci. Monomer a iniciátor je rozptýlen mícháním ve vodě na malé částičky. S postupující konverzí monomeru na polymer stoupá lepkavost částiček a viskozita a tím se zvyšuje nebezpečí jejich slepení ve velké shluky. Lze tomu zabránit přidávkem látek zvyšující viskozitu vodné fáze (želatina, polyvinylalkohol) nebo ulpívání na povrchu částic (mastek) tím se zabrání nechtěnému shlukování. Kvalitou v porovnání s polymerem vyrobeným v monomerní fázi je suspenzní stejnoměrnější, tudíž po zpracování zhotovené výrobky vykazují lepší mechanické vlastnosti. Jsou také dobrými elektroizolačními materiály. Suspenzním způsobem vyrábíme např. PVC, PS. [7,39]

1.6.3 Roztoková polymerace

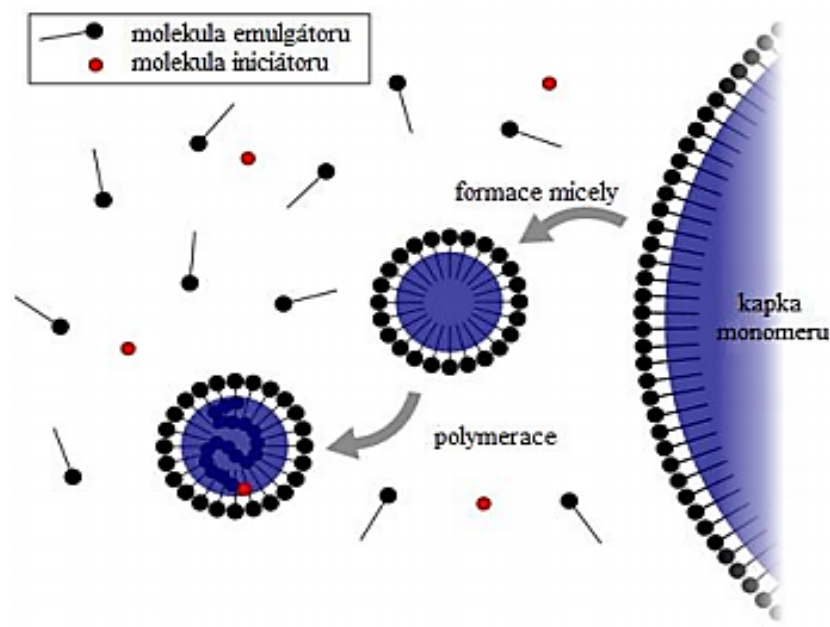
Snadnější odvod reakčního tepla a zároveň způsob provádění iontových i radikálových polymerací. Molekulová hmotnost výsledného produktu je vždy nižší než při polymeraci v monomerní fázi. V prostředí benzenu, cyklohexanu, xylenu za přítomnosti katalyzátorů vyrábíme např. butadienový a izoprenový kaučuk. V situacích, kdy je polymer v rozpouštědle rozpustný používáme získaný produkt přímo, jako lepidlo nebo s přísady jako nátěrovou hmotu. [7, 39]

1.6.4 Emulzní polymerace

Polymer se získává ve formě latexu, jemné stabilní disperze polymeru ve vodě, která je meziproduktem a suchý polymer z ní získáme koagulací nebo přímo použijeme ke zpracování.

Emulzní polymerací rozumíme pochod, jímž vzniká polymer z částic monomeru rozptýlených ve vodě, s obsahem emulgátoru (mýdlo a iniciátor). Na obr. 7. lze pozorovat popsany model-migrace monomeru do micel vzniklých z molekul emulgátoru, difúze molekul iniciátoru do micely a polymerace v micelle.

Emulzně polymerujeme syntetické kaučuky (butadienstyrenový, butadienový), PVC, polyvinylacetát. [7, 8]



Obr.7. Ilustrace disperze a procesů probíhajících v počáteční fázi emulzní polymerace.[8]

2 VSTŘIKOVACÍ FORMY

Hlavním úkolem vstřikovacích forem je dát budoucímu výrobku vyžadovaný tvar, který je nutno zafixovat dostatečným odvodem tepla z výrobku tedy ochladit. Jsou důležitými a zároveň složitými zařízeními, jež umožňují výrobu velmi složitých, přesných plastových výrobků. Musí být schopny odolávat vysokým tlakům, zvládnout automatický provoz a snadněji vyjímat výstřiky. Výroba forem je složitý proces, díky obtížné konstrukci a vysokým ekonomickým nákladům. [9]

K základním požadavkům vstřikovacích forem řadíme: vysoká přesnost a kvalita ploch, nejvyšší možná tuhost a pevnost celků včetně jednotlivých částí za účelem zachycení tlaků, vhodná konstrukce vyhazovacího systému, temperačního, vtokového nebo odvodušnění a díky správné konstrukci, materiálu a druhu výroby zaručená dlouhá životnost. [9]

Stavba vstřikovací formy:

- Vtokový systém
- Temperační systém
- Vyhazovací systém
- Vodící a upínací části
- Díly, tvaru a dutiny formy [10]

2.1 Temperační systém

Temperace pomáhá udržovat konstantní teplotní režim formy. Cílem je dosažení optimálního cyklu vstřikování při dodržení daných technologických požadavků na výrobu. Probíhá zásadně ochlazováním, nebo vyhříváním celé formy, případně jejich částí.

V průběhu vstřikování dojde k přívodu roztaveného polymeru do formy, jenž se v její dutině ochladí na teplotu vhodnou k vyjmutí výstřiku. Temperací dojde k ovlivnění plnění tvarové dutiny, k zajištění optimálního chladnutí a tuhnutí plastu. S každým výstřikem dochází k ohřevu formy. Za stanovené teploty, je nutno zase vyrobit každý další výstřik. Z tohoto důvodu je třeba odvádět přebytečné teplo během pracovního cyklu pomocí temperační soustavy formy. [10]

Úkol temperace:

- Zajištění rovnoměrné optimální teploty formy po celém povrchu její dutiny.
- Odvedení tepla z dutiny formy naplněné taveninou takovým způsobem, aby celkový pracovní cyklus měl ekonomické rozměry.

Následkem nerovnoměrného lokálního rozložení teplot formy je zvětšení tvarových a rozměrových úchylek výstřiku. [10]

Tab. 1. Požadované teploty formy během vstřikování u různých termoplastů [15]

Termoplast	Teplota taveniny [°C]	Teplota formy [°C]
ABS	190-250	50-85
PA6	230-290	40-120
PC	280-320	85-120
PE-LD	180-270	20-60
PE-HD	180-270	20-60
PMMA	200-250	50-80
POM	180-220	50-120
PS	180-260	55-80
PP	170-280	20-100
PVC tvrdé	190-220	30-60
SAN	200-260	50-85
PEEK	380-430	160-220
PSU	340-400	120-160
LCP	310-360	65-95

2.2 Vtokový systém

Vtokový systém ovlivňuje jakost výrobku, produktivitu výroby. Tvoří vtokové kanály a spojuje nám dutinu formy s dutinou tavicí komory. Skládá se z kanálového systému a vtokového ústí. Během průtoku taveniny snižují kanály její teplotu, a zároveň navyšují hydraulické ztráty. Z tohoto důvodu je nutno dbát, aby kanály byly co nejkratší, s co největším průřezem, optimálního tvaru a zvýšeného tlaku během vstřikování. Současně musí zaručit, snadné odtržení výrobku, naplnění formy a jeho bezproblémové vyhození z formy. Je konstrukčně řešen studený, horký anebo různě tvarově řešen. [9]

2.3 Dutina tvaru formy

Tvarem přesně odpovídá konkrétnímu výrobku, jen je procentuelně zvětšena o hodnotu smrštění polymeru během chladnutí. Tato hodnota závisí na druhu vstřikovaného materiálu.

Formy členíme do skupin dle:

- Konstrukce vstřikovacího stroje (vstřik dělicí rovinou, kolmo na rovinu)
- Konstrukčního provedení (čelist'ové, vytáček, dvoudeskové, třideskové, etážové apod.)
- Násobnosti formy (jednonásobné, vícenásobné)

Dalším důležitým úkolem forem je odebrání tepla zpracovávanému polymeru obou částí tvarových forem navzájem. Odebrání tepla se musí blížit ideálu ochlazování (ve všech místech stejnou rychlostí). Následkem rozdílné rychlosti odvodu tepla je poté nerovnoměrné tuhnutí částí budoucího produktu, vznik vnitřních pnutí s následujícím vnikem trhlin a také špatné proudění taveniny [12]

2.4 Materiály vstřikovacích forem

Formy jsou nákladnými nástroji, sestavené z funkčních a pomocných dílů. Materiál forem je významným prvkem k dosažení potřebné životnosti výstřiku, kvality a nízkých nákladů na zařízení. Druh materiálu formy se volí s ohledem na provozní podmínky výroby, jako převážně:

- Procesní parametry
- Typ vstřikovaného plastu
- Vstřikovací stroj
- Potřebná jakost a přesnost výstřiku [9]

K výrobě forem využíváme materiály, které optimálně splňují nároky na provoz. Velké množství materiálů lze tedy omezit na užší sortiment o větším rozsahu užitečných vlastností. Převládajícími druhy jsou:

- Oceli vhodné jakosti
- Neželezné slitiny kovů (Al, Cu, ...)
- Další materiály (tepelně nevodivé, izolační, ...) [9]

Nejvíce využívanými materiály na výrobu vstřikovacích forem jsou oceli. Jsou obtížně nahraditelné díky jejich pevnosti a ostatním mechanickým vlastnostem. Také další druhy materiálů jsou používány např. pro jejich fyzikální a ostatní vlastnosti, (tepelně vodivé materiály, tepelně izolační materiály...) [9]

2.4.1 Oceli

Správné určení druhu oceli na určitou část formy záleží, jakou funkci bude daný komponent plnit. Dalším předpokladem funkčnosti, vhodnosti a potřebné životnosti je taktéž vhodné zacházení včetně údržby, druh výroby a tepelného zpracování využitého materiálu a také správná konstrukce. S použitými materiály požadujeme dobrou obrobitelnost a mechanickou pevnost.

Nedostačující povrchová jakost znesnadní vyjímání. Opakem leštěný povrch je prostředkem chránění vůči korozi.

Z široké škály ocelí využíváme k výrobě forem především:

- Uhlíkové oceli k zušlechťování
- Konstrukční oceli
- Nástrojové oceli
- Oceli k nitridování
- Antikorozní oceli
- Martenzitické oceli [10]

Z pohledu technologie výroby vstřikovacích forem je kladen důraz na materiály funkčních dílů, aby zaručily kvalitní strukturu, jež je dána:

- Vyhovující prokalitelností a kalitelností
- Dobrou obrusitelností a leštitelností
- Minimálními deformacemi během tepelného zpracování a stálostí rozměrů
- Žádoucími fyzikálními vlastnostmi
- Zvýšenou odolností proti otěru [10]

Tab. 2. Příklady použití typů ocelí na formy [34]

Součást	ČSN	Použití a vlastnosti
Součásti forem s povrchovou odolností vůči opotřebení, tvarové díly.	19 487	Cementační ocel, lešitelná, dobře obrobitelná. Nevhodnost pro větší úběr materiálu po kalení, dobrá svařitelnost. HRC 58–62.
Desky tvarových vložek a kotvení desky vyhazovačů.	19 520	Zušlechtěná ocel používaná pro namáhané desky a jiné součásti forem. Dobrá obrobitelnost, lešitelnost a dezénovatelnost. Vhodnost taktéž pro tvarové díly velkých rozměrů.
Tvarové díly forem.	19 552	Nejvyužívanější kalitelná ocel. Vysoce odolná proti tepelnému namáhání. Dobře lešitelná, vhodná k nitrídování a povlakování. Dobře prokalitelná, houževnatá a pevná. Menší odolnost proti opotřebení. HRC 48–53.
Tvarové díly forem se zvýšenou odolností proti opotřebení a namáhání.	19 655	Kalitelná ocel tvarově stálá a vysoce houževnatá i po tepelném zpracování. Dobře lešitelná. HRC 50–56.
Tvarové díly forem, menších rozměrů, trny, vodící a strhovací pouzdra, příložky, přítlačné a vodící lišty.	19 312	Ocel k univerzálnímu využití. Vysoká tvrdost s dostatečnou houževnatostí, nástrojová ocel. HRC 56–64.
Nepříliš namáhané díly formy, jako vyhazovací tyče, táhla, středící kroužky, podložky.	12 050	Jakostní konstrukční ocel, těžce svařitelná.
Pouzdra, šikmé kolíky, vodící sloupky.	14 220	Cementační ocel. Snadno svařitelná a obrobitelná.

2.4.2 Slitiny mědi

Mezi hlavní výhody těchto slitin řadíme jejich velkou tepelnou vodivost (4x vyšší proti ocelím). Přibližně 70 % času tvoří chlazení u ocelových forem. S užitím slitin mědi dosahujeme dvaceti až padesáti procentní zkrácení času chlazení, čímž snížíme dobu celkového vstřikovacího cyklu, a tím cenu vstřikovaného výrobku. Lepší procesní časy mají také pozitivní vliv na kvalitu a strukturu vstřikovaného materiálu, což zpřesní geometrie tvaru výrobku a lepší jakost povrchu. Jako nevýhodu použití těchto slitin bereme jejich horší opracovatelnost pomocí elektroerozivních metod obrábění. [9]

2.4.3 Slitiny hliníku

Formy vyrobeny z hliníkových slitin používáme hlavně na specifické aplikace. Tyto vyrobené formy jsou vysoce tepelně vodivé a odolné vůči korozi, ale nejsou tak odolné a pevné jako ocelové.

Hlavní využití najdou hlavně během vstřikování strukturních pěn, kde vyžadujeme intenzivně chladit, dobrou chemickou odolnost proti korozi a ostatním látkám, jež jsou přítomny během vstřikování plastů s nadouvadlem. Nižší tlaky jsou využity během vstřikování (oproti ocelovým formám až 10x menší) z tohoto důvodu u těchto forem nevyžadujeme tak velkou pevnost. [9]

3 VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování řadíme k nejvýznamnějším technologiím plastikářského průmyslu. Vstřikovací cyklus je vyznačován komplikovanými fyzikálními procesy, na kterých má podíl forma, vstřikovaný polymer i vstřikovací stroj. Vstřikováním jsou v dnešní době vyráběny plastové výrobky skoro ve všech odvětvích. Tento cyklický proces zpracování termoplastů je také využíván pro určité elastomery nebo reaktoplasty. Jeho náplní je doprava polymeru ve vstřikovací stroji, jeho tavení a následné vstříknutí do formy, odkud je po zatuhnutí výrobek vyhozen. [14]

K hlavním výhodám vstřikování řadíme:

- Plná automatizace procesu
- Velmi vysoká reprodukovatelnost
- Není nutnost dokončovacích operací
- Bezprostřední cesta suroviny v konečný výrobek
- Nízké náklady na jeden kus během velkovýroby [14]

Hlavní nevýhody vstřikování:

- Vysoké pořizovací náklady na vstřikovací stroje
- Čas a cena za konstrukci a výrobu forem
- Nevhodnost pro kusovou výrobu



Obr. 8. Příklady vstřikovaných dílů [15]

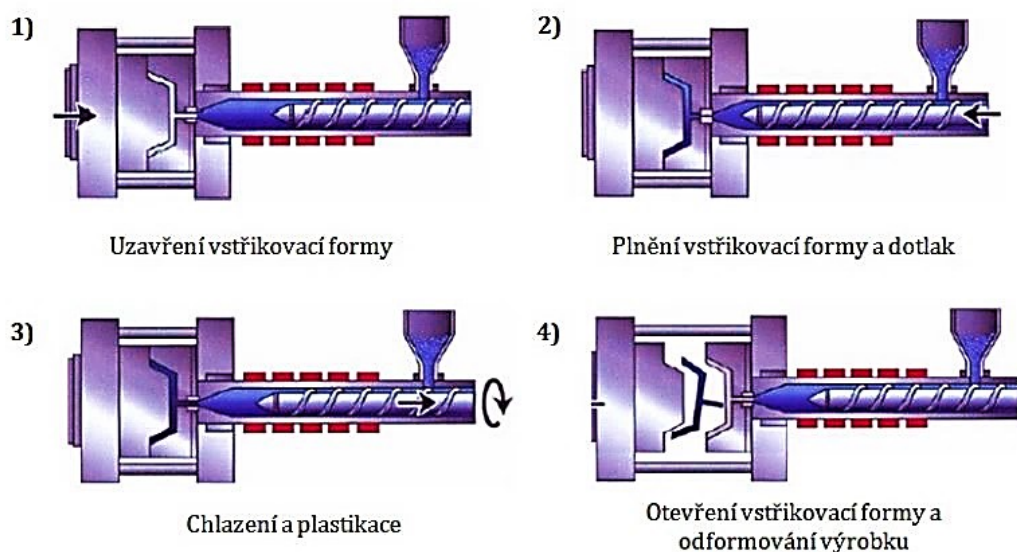
3.1 Sušení termoplastů

Než dochází ke vstřikování je materiál často upraven dle technologického postupu výrobku. Před samotným vstřikováním připravujeme plasty většinou barvením, sušením granulátu nebo také mísením s rozdrčeným odpadem atd. Tyto přípravné operace upraví termoplasty takovým způsobem, aby následný vstřikovací proces proběhl bez obtíží. [12]

Termoplastické materiály na sebe často vážou vlhkost z atmosférického vzduchu. Důsledkem této vlhkosti může být zhoršení kvality povrchu, jakosti výrobku a také složitější vyhození výrobků z formy a to během zpracování relativně nízkými teplotami. K odstranění nadbytečné vlhkosti z granulátů vysušujeme materiály sušárnách s cirkulací teplého vzduchu nebo také v komorových pecích. Následně vysušený materiál ihned zpracováváme (nejlépe do 30 minut). Dle doporučených teplot jednotlivého druhu plastu volíme teploty samotného sušení. [12]

3.2 Proces vstřikování

Vstřikování je založeno na cyklickém ději těchto operací: plast ve formě granulátu je nasypan do násypky, odkud je odebrán do pracovní části vstřikovacího stroje, v níž vlivem tření a tepla dojde ke vzniku taveniny. Vzniklá tavenina je následně vstříknuta do dutiny formy, ve které zaujímá tvar budoucího výrobku. Poté dojde k dotlaku a následnému chlazení. Po skončení chlazení výrobku dochází k otevření dělicí roviny a následuje odformování výrobku. [15]

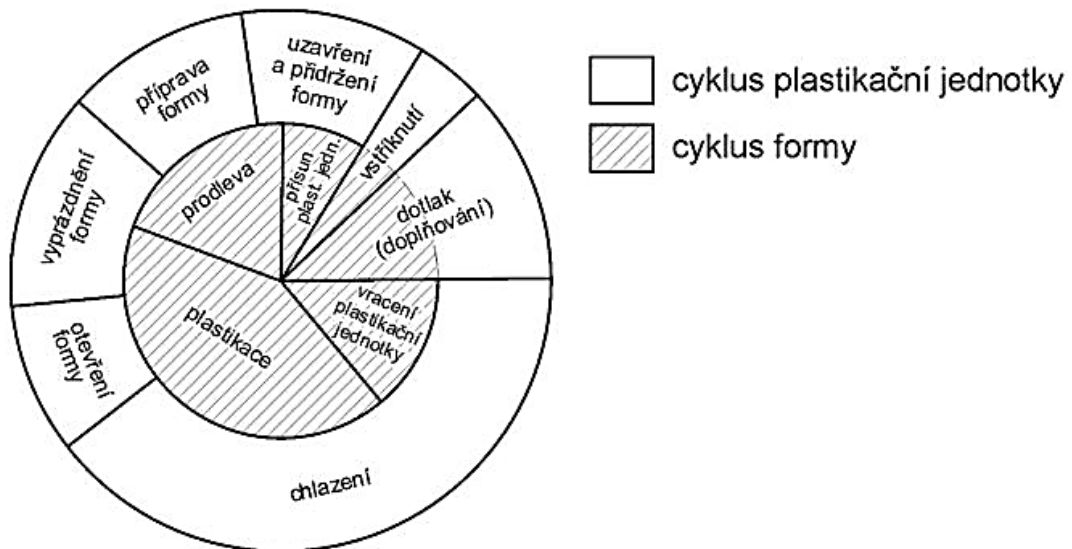


Obr. 9. Proces Vstřikování [15]

3.3 Cyklus vstřikování

Obr. 10. znázorňuje časovou posloupnost jednotlivých fází cyklu vstřikování. Doba plnění musí být při kladení důrazu na produktivitu co nejkratší, avšak zároveň u vstřikovaného dílu vzít v úvahu rovnováhu mezi vnitřním napětím a vstřikovacím tlakem. Přiměřená doba dotlaku by měla být ukončena v momentu zatuhnutí polymeru v dané vtokové soustavě, při delším působení ztrácí dotlak význam. Chladicí fáze začíná při prvním kontaktu stěny dutiny vstřikovací formy s taveninou. Tato fáze je nejdelší fází vstřikovacího cyklu kvůli pomalému přechodu tepelné energie z výchozího polymeru do dutiny stěny vstřikované formy. U velkoobjemových dílů z materiálu, jež potřebuje během plastikace nízké otáčky šneku může nastat situace, kdy dojde k překročení doby chlazení dobou plastikace. Taktéž musí být optimalizovány pohyby formy, abychom zamezili nepřiměřenému prodlužování výrobního cyklu, což má podstatný dopad na vstřikovaný díl – zvýšení jeho výrobních nákladů. [17]

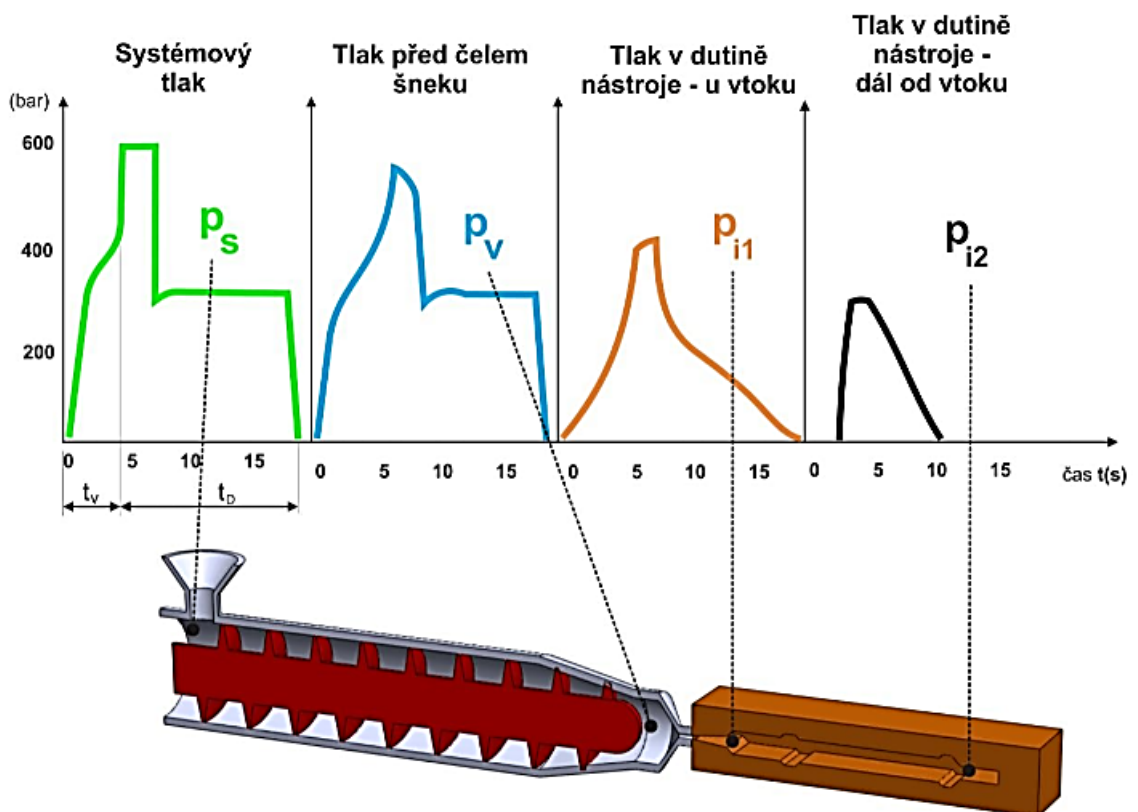
Existuje řada modifikací standardního vstřikovacího procesu (např. vstřikování s pomocí plynu, vstřikování s pomocí vody, zastřikování, více komponentní vstřikování, kompresní vstřikování apod.). Cílem realizace těchto modifikací je rozšíření okruhu výrobků vyráběných pomocí technologie vstřikování, zlepšení jejich vlastností a zvýšení produktivity celého procesu. [17]



Obr. 10. Cyklus vstřikování [16]

3.3.1 Průběh teploty a tlaku (dotlaku) během vstřikování

Nesmírně důležitou fází vstřikovacího cyklu je dotlak, jenž má vliv na celou škálu vlastností budoucího výrobku. K popsání této problematiky je nezbytná znalost polymerních termodynamických charakteristik, jako je tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita a vazba specifického objemu na teplotě během rozdílných tlaků. Vzájemnou závislost tří hlavních stavových veličin u určitého typu polymeru ukazuje diagram p-v-T (tlak- měrný objem – teplota). Dle tohoto diagramu definujeme průběh dotlaku s ohledem na vyžadovanou přesnost konečného výrobku, nachází využití u nejmodernějších vstřikovacích strojů, kde řídí takřka celý vstřikovací proces. [16]



Obr. 11. Průběhy tlaku na jednotlivých místech výrobního zařízení [16]

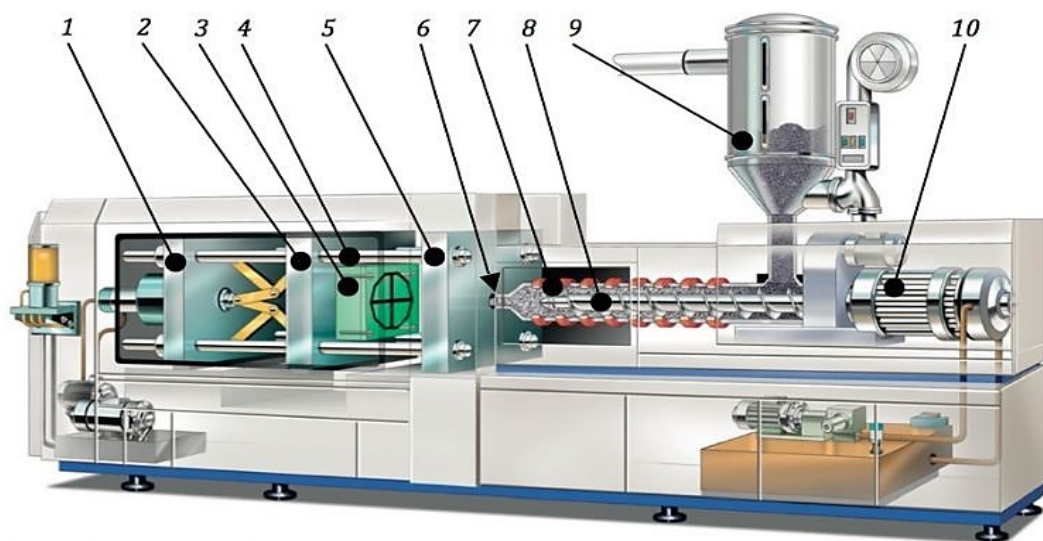
3.4 Vstřikovací stroj

Hlavní a doplňující části vstřikovacího stroje nezbytné k celému procesu:

- Regulační a řídicí jednotka – pomocí programovací části zajišťuje chod stroje
- Vstřikovací jednotka – zajišťuje dopravu taveniny do formy včetně vyvození tlaku
- Uzavírací jednotka – zaručuje uzavření formy přetlakem
- Forma – zajistí tvar výrobku
- Vstřikovací tryska – definuje přítok taveniny do formy

K plynulému automatickému procesu, lze vstřikovací stroje také dle potřeby dovybavit různými příslušenstvími jako:

- Mísící a dávkovací zařízení
- Manipulátory
- Temperační zařízení
- Dopravníky výrobků
- Sušárny



Obr. 12. Vstřikovací stroj [17]

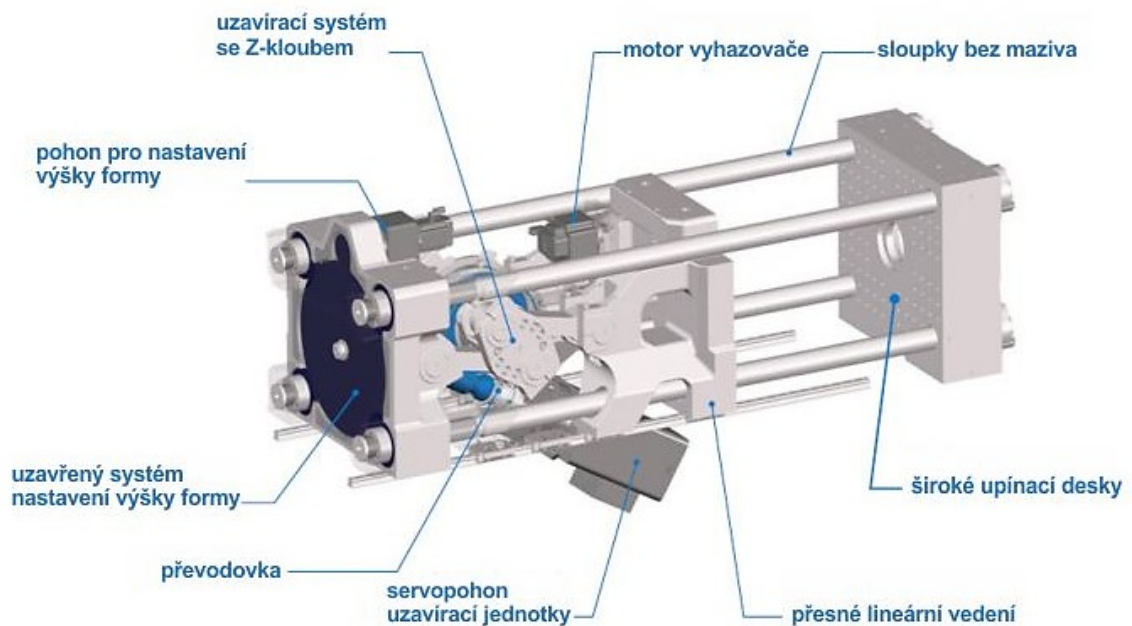
- | | |
|--|---|
| 1) Uzavírací jednotka | 6) Čelo špičky vstřikovací trysky vstřikolisu |
| 2) Pohyblivá upínací deska vstřikolisu | 7) Tavicí komora |
| 3) Pohyblivá část vstřikovací formy | 8) Šnek |
| 4) Vodící sloupky vstřikolisu | 9) Násypka pro plastový polotovar |
| 5) Pevná upínací deska vstřikolisu | 10) Pohonná jednotka šneku |

Elementární rozdělení vstřikovacích strojů:

- Šnekové, pístové
- Elektrické, hydraulické, nebo kombinované
- Bez předplastikace, s předplastikací
- Rychloběžné, pomaluběžné
- Vertikální, horizontální
- Na vstřikování reaktoplastů, termoplastů, kaučukových směsí [17,18,19]

3.4.1 Uzavírací jednotka

Zajišťuje bezpečné zavření a otevření formy pomocí uzavíracího ústrojí. Nutná uzavírací síla závisí na velikosti stroje, respektive na rozměrech plochy průřezu daného výstřiku v dělicí rovině a také na intenzitě vstřikovacího tlaku. Na těsnost formy má zásadní vliv tuhost uzavíracího mechanismu a také uspořádání uzavírací jednotky

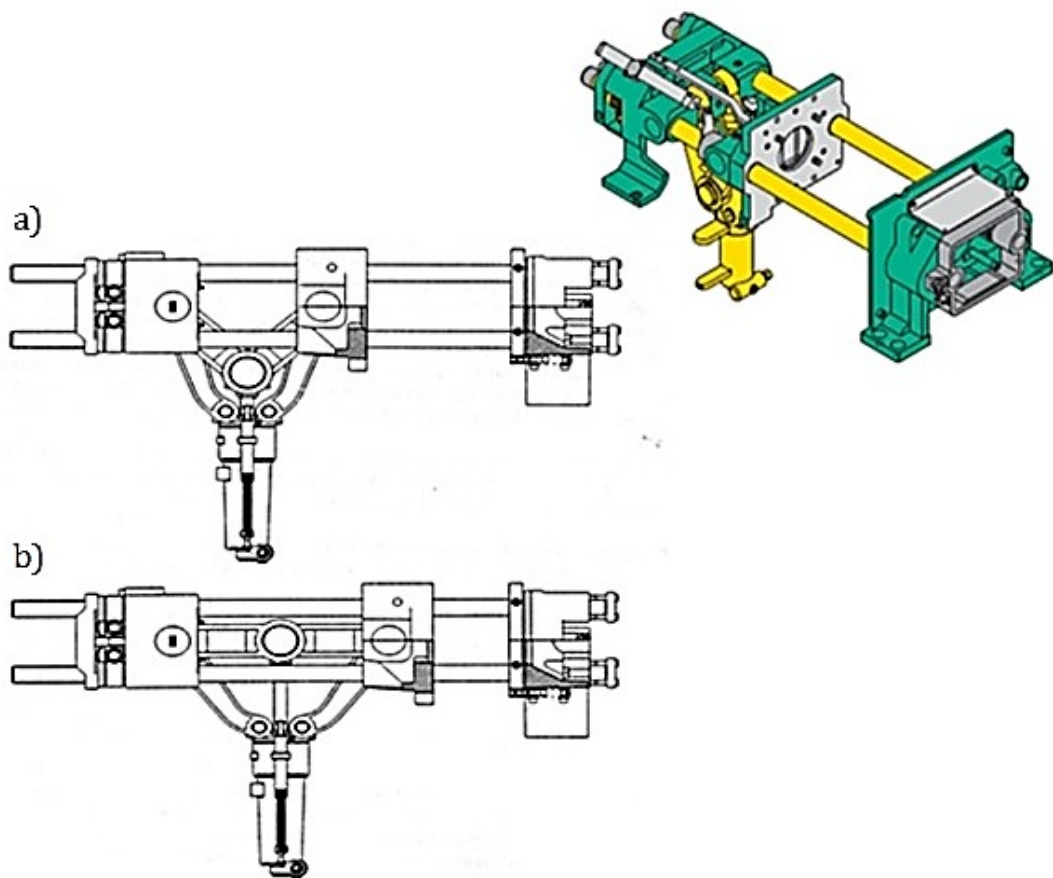


Obr. 13. Uzavírací jednotka [33]

Druhy uzavíracího ústrojí:

- Hydraulické

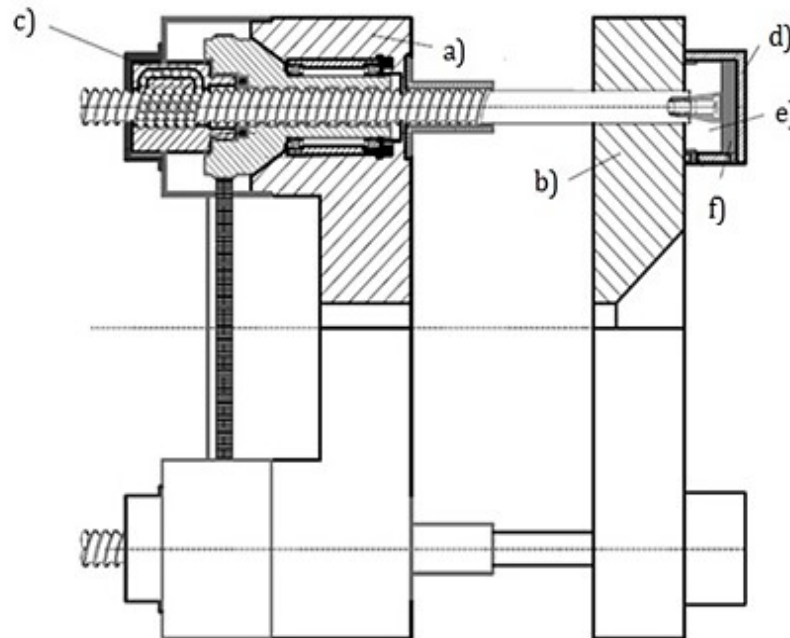
Uzamykací síla je vyvozena hydraulickým pístem. Výhoda tohoto ústrojí spočívá v jednoduché regulaci velikosti uzavírací síly a rychlosti hybné upínací desky v určitých fázích uzavírání. Jako nevýhodu můžeme brát horší těsnění pístů, které vyžadují velký průměr k dosažení velkých uzavíracích sil. [35]



Obr. 14. Jednoduchý kloubový mechanismus s hydraulickým pohonem, (a) otevřený, (b) uzavřený [35]

- Hydraulicko-mechanické

Malý hydraulický válec vyvozuje uzavírací sílu přes systém pákových převodů. Díky kinematickému uspořádání mechanismu docílíme velmi dobrých rychlostních i silových poměrů.



Obr. 15. Schéma kombinovaného uzavíracího systému [35]

- | | |
|-------------------------|-------------------------------|
| a) Pohyblivá část formy | d) Lineární hydraulický pohon |
| b) Pevná část formy | e) Píst |
| c) Kuličkový šroub | f) Hydraulická kapalina |

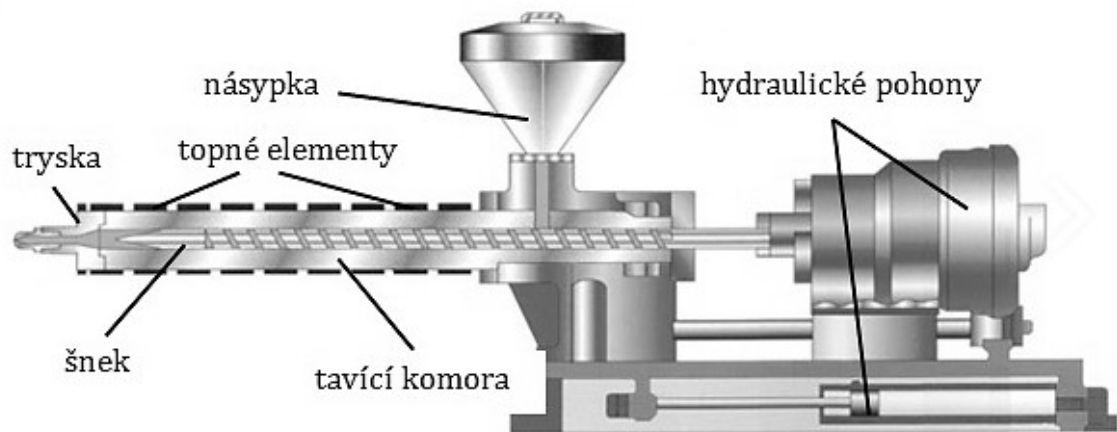
- Elektromechanické

Nahrazují přímočarý hydraulický motor, elektromotorem s klikovým mechanismem. Jako výhody těchto ústrojí vnímáme jejich konstrukční jednoduchost, vysokou uzavírací rychlost, nízkou energetickou náročnost a také jednoduchou automatizaci celého pracovního cyklu. K nevýhodám pak řadíme vyšší celkové náklady nežli u dvou předchozích typů. [35]

3.4.2 Vstřikovací jednotka

Její hlavní funkcí je převedení polymeru ze stavu tuhého do stavu viskózní taveniny s následným přesunem taveniny do tvarové dutiny vstřikovací formy. Na obr. 16. lze vidět vstřikovací jednotku, jejíž funkcí je přesunutí zpracovávaného plastu z násypky do prostoru pracovního válce, kde díky otáčejícímu se šneku dojde k přesunutí materiálu ze vstupního

pásma, pásmem přechodovým, do pásma výstupního. Během přechodu pásem dojde díky disipaci a účinku tepla k plastikaci a homogenizaci daného zpracovávaného materiálu. [35]



Obr. 16. Vstřikovací jednotka [35]

Tavící komora je zakončována vyhřívanou tryskou, která spojuje formu se vstřikovací jednotkou. Díky kulovému zakončení trysky, dojde k optimálnímu dosednutí do sedla vtokové vložky.

Pomocí dvou parametrů charakterizujeme výkon vstřikovací jednotky:

- Vvstřikovací kapacita
Maximální objem taveniny, jenž lze na daném stroji vystříknout, po čas jednoho pracovního zdvihu. Nejčastěji udávána v cm^3 . Jako optimální vstřikovací množství uvažujeme 80 % kapacity dané vstřikovací jednotky. [20]
- Plastikační kapacita
Udává maximální možné množství taveniny, které je vstřikovací stroj schopný převést do taveniny ucházející jakosti za 1 hodinu. Tato hodnota je ovlivněna působící teplotou a typem zpracovávaného plastu a je spíše orientačního charakteru sloužícího k výpočtu času nezbytného pro plastikaci vyžadovaného množství materiálu. [21]

3.4.3 Regulace a ovládání vstřikovacího stroje

Úroveň řízení a také jednoduchá obsluha stroje je charakteristickým znakem jeho kvality. Je kladen důraz na neustálou reprodukovatelnost technologických parametrů. Nepřiměřené kolísání technologických parametrů zapříčiní nepřesnosti a to se projeví na výsledné kvalitě

vyrobených výstříků. Vhodné regulační a řídicí prvky jsou proto nutností k plynulému chodu a řízení stroje.

Abychom získali zpětnou vazbu od stroje, je nutno nastavení stroje neustále kontrolovat pomocí řídicího systému. Požadovaná jakost a přesnost výstříků se udržuje tak, že určíme a dodržíme přesnost:

- Tavení doby i výše vstřikovacího dotlaku, tlaku, rychlosti vstřiku a také chlazení. Tyto zmíněné parametry mají zásadní vliv na toleranci a přesnost výstříků.
- Nastavením výšky i doby teploty taveniny. Výsledné mechanické a fyzikální vlastnosti výstříků jsou určeny homogenizací taveniny. [12]



Obr. 17. Řídicí systém [18]

Nejmodernější vstřikovací stroje se v dnešní době neobejdou bez výkonné procesní techniky. Namísto zažitých nastavení technologických parametrů do textové podoby, využíváme rozličných grafických forem řízení pracovního cyklu pomocí displeje se selektivním přístupem k dílčím parametrům stroje. Cyklus rozdělený na programované sekvence je pak jednoduše upravitelný a kontrolovatelný. Pomocí zpětné vazby je nastavení stroje kontrolováno řídicím systémem. Je snaha o automatický průběh vstřikovacího procesu – bez zásahu člověka. [12,20,18]

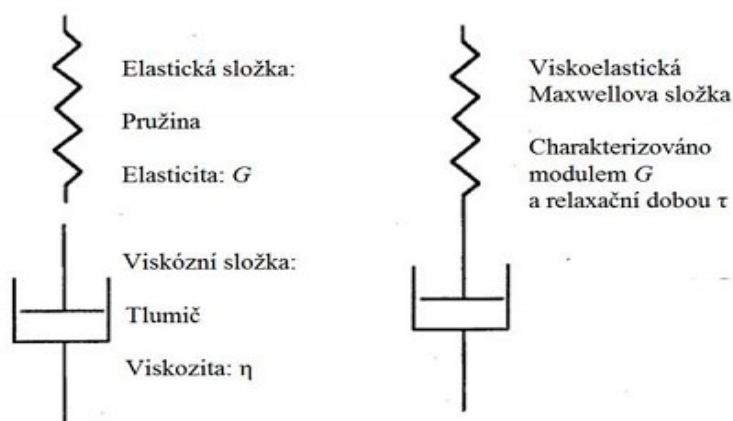
4 REOLOGIE POLYMERŮ

Reologií charakterizujeme vědní obor, zabývající se deformací a tokem látek. Svůj název získala reologie z řečtiny, kde rheos znamená řeka, tok nebo proudění. Doslovným překladem tedy můžeme reologii nazvat vědou o toku. Reologie se nicméně neomezuje jen a pouze na tokové chování kapalin, ale též na deformaci tuhých těles, jež za specifických okolností (čas) také tečou. [21]

Každým rokem je vyprodukováno přibližně 300 miliónů tun polymerů, kdy většina z nich je tvořena termoplasty, které jsou taveny a poté je jim udáván tvar prostřednictvím vstřikovacíh forem, nebo také vytlačovacích hlav. Po zatuhnutí taveniny dochází k vytvoření finálních výrobků. Kvůli tomuto hledisku má velký význam tok taveniny z určených procesních podmínek jako je teplota či tlak. Ke zvolení vhodného, správného návrhu nástrojů a taktéž optimalizaci výrobního procesu je nezbytně nutné zaobírat se tokovými vlastnostmi materiálů. [22]

4.1 Reologické chování polymerní taveniny

Polymerní tavenina se chová jako viskoelastická. To znamená, že polymerní tavenina se chová viskózně jako kapalina, ale též elasticky jako tuhá látka. K popisu tohoto viskoelastického chování používáme Maxwellův model. Tento model lze zobrazit dle obr. 18., kde pružina s elasticitou G představuje elastickou reakci na vloženou deformaci. Tlumič představuje viskózní odpověď a popsán viskozitou η . Maxwellův model je poté tvořen zapojením tlumiče a pružiny do série a je charakterizován relaxační dobou τ . Viskózní vlastnosti avšak z velké části převažují u polymerních tavenin. Tyto viskózní vlastnosti charakterizujeme viskozitou. [23]



Obr. 18. Maxwellův model viskoelastivity [24]

4.2 Viskozita a tok taveniny

Znalost reologického chování a stanovení tokových vlastností jsou nezbytně nutné znalosti pro výrobce strojů, konstruktéry vstřikovacích forem, dodavatele a zpracovatele surovin, kde jsou poznatky využívány:

- Dodavatelé a zpracovatelé surovin:
 - K zajištění stejnoměrné kvality vstupního materiálu
 - Stabilizaci a řízení zpracovatelského procesu
 - Během kontroly technologických parametrů

- Konstruktéři vstřikovacích forem
 - K návrhu vtokového systému vstřikovacích forem
 - Návrh designu výstřiku

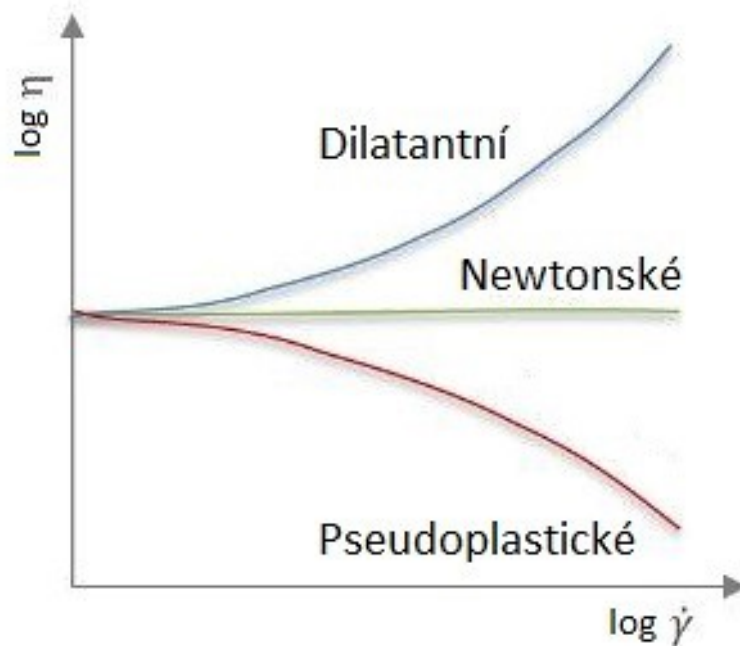
- Výrobci strojů
 - Výpočet uzavíracích sil, pohonů atd.
 - Během návrhu vstřikovacích trysek, ozubených čerpadel, šneků [23]

Viskozitu definujeme jako odpor proti tečení, stanovujeme ji jako smykové napětí ku smykové rychlosti. Čím menší je viskozita, tím menší je i odpor proti toku. U obyčejných tekutin je viskozita, stejně jako olej nebo voda ovlivněna teplotou, ale zato konstantní s měnící se smykovou rychlostí. Tekutinu, u níž se nemění viskozita s měnící se smykovou rychlostí, nazýváme Newtonskou.

Průběh viskozity polymerních materiálů je mnohem složitějšího charakteru. Během nízké smykové rychlosti se polymerní materiál chová jako Newtonský, ale s rostoucí smykovou rychlostí zase jako ne-Newtonovský s jeho charakteristickým exponenciálním profilem, u něhož, se snižující viskozitou roste smyková rychlost. Oproti tomu u dilatantních ne-Newtonových tekutin viskozita roste se vzrůstem smykové rychlosti. [24]

Závislost smykové viskozity na rychlosti smykové deformace můžeme popsat dle tokové křivky na obr. 19. materiály podle této křivky rozdělujeme do tří základních skupin:

- Pseudoplastické - s rychlosí smykové deformace klesá viskozita (majoritní část plastů)
- Newtonské – u těchto materiálů zůstává viskozita konstantní (voda,)
- Dilatantní - s rychlosí smykové deformace dochází k růstu viskozity (vysoce koncentrované suspenze)

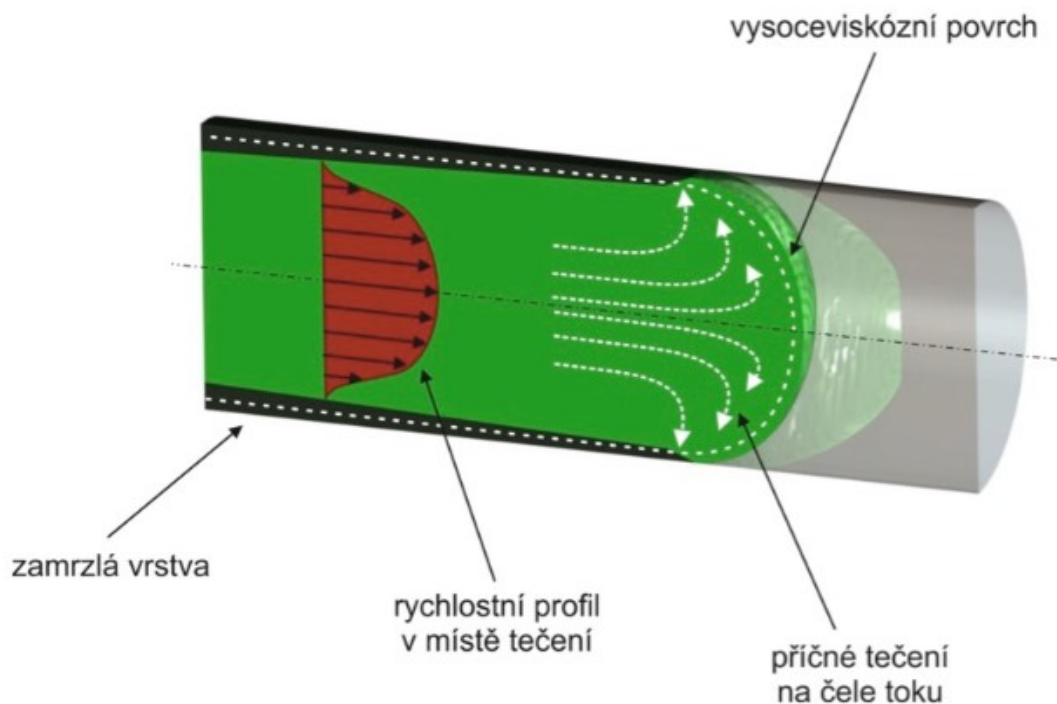


Obr. 19. Toková křivka [36]

4.2.1 Tok taveniny ve formě

Díky zásluze poměrně vysoké viskozity běžně užívaných polymerů, je očekáváno, že jejich tok kanály vstřikovací formy bude skoro vždy laminárního charakteru. [25]

Během plnění dutiny formy nedojde ke skluzu taveniny po stěně, ale k “navalování,, taveniny. Tento laminární tok bývá též nazýván jako “fontánový,,



Obr. 20. Fontánový tok [15]

Tento druh toku materiálu kanálem bývá často srovnáván s rozvinujícím se kobercí. Materiál, který teče středem kanálu, je stále natlačován k jeho obvodu. Zde tuhne a nový materiál, který teče za ním protéká stále dál dopředu, skrz ztuhlé vrstvy. Poté co se dostane až na špičce toku, je rovněž natlačen ke stěně, kde poté ztuhne. Chod taveniny na špičce toku má podobu tryskání fondánové vody, z tohoto důvodu poté dostal název fontánový tok. [25]

4.3 Index toku taveniny

Zpracovatelské výrobní postupy jsou stavěny na tváření polymerů ve stavu taveniny.

Pro volbu správné zpracovatelské technologie a pro posouzení chování tavenin termoplastů se používá veličina ITT (index toku taveniny). Zkoušku ITT řadíme k nejběžnějším testům ve sféře zpracování polymerů.

Jedná se o technologickou zkoušku, která posuzuje vhodnost použití polymerního materiálu k výrobě dílce o daném konstrukčním řešení. [27]

ITT toku taveniny je vhodný zejména pro:

- Hodnocení stejnoměrné kvality materiálu (šarže) – Neodpovídá-li index toku taveniny hodnotám certifikátu zkoumaného polymeru, deklarovaného výrobcem, tj. odlišuje-li se jeho tekutost, nebudou také vyhovovat mechanické vlastnosti jelikož mají závislost stejně jako jeho tekutost na velikosti makromolekul.
- Porovnání neplněných a plněných termoplastů.
- Kvalitativní hodnocení výrobního procesu – ITT stanoveného u regranulátů výrobků lze pomocí vzájemného porovnání prokázat degradaci taveniny zapříčiněnou zvolením nevhodných technologických podmínek během vstřikovacího procesu (vysokou dobou zdržení materiálu v tavicí komoře, vysokými teplotami taveniny plastu) [26]

Index toku taveniny (MFI, překladem z anglického názvu Melt Flow Index) se stanoví vytlačení roztaveného materiálu z válce plastometru pomocí trysky o definovaném průměru a délce, za předepsané teploty (T) a zatížení (m_{nom}) viz dle Obr. 21., 22.

ITT vyjadřuje množství taveniny v gramech nebo také v cm^3 vytlačené pomocí trysky po dobu 10 minut.

Index toku tedy může být:

- Hmotnostní (MFR, z anglického překladu Melt Flow Rate) udávaný v jednotkách g/10 minut
- Objemový (MVR, z anglického překladu Melt Volume Rate) udávaný v jednotkách $cm^3/10$ minut. [27]

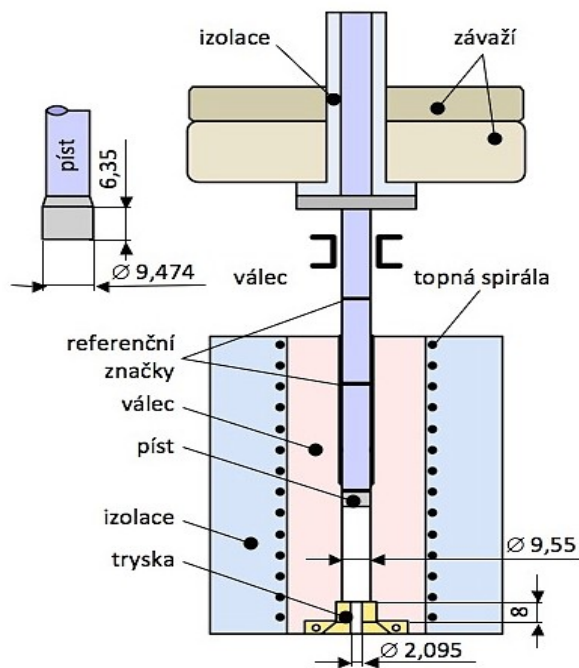
ITT je stanoven nejčastěji s použitím standartní trysky se jmenovitou délkou 8 mm a jmenovitým vnitřním průměrem 2,095mm. Měřicí zařízení (výtlačný plastometr) je složen z:

- Válce s indukční pískou ustaveného do svislé polohy
- Trysky (složené z tvrzené oceli nebo karbidu wolframu)
- Pístu
- Sady snímatelných závaží, jež jsou upevněny na horní části pístu

- Rotujícího nože (k odřezu vytačené struny)
- Čidel (pro měření času a posuvu pístu)
- Pomocného vybavení



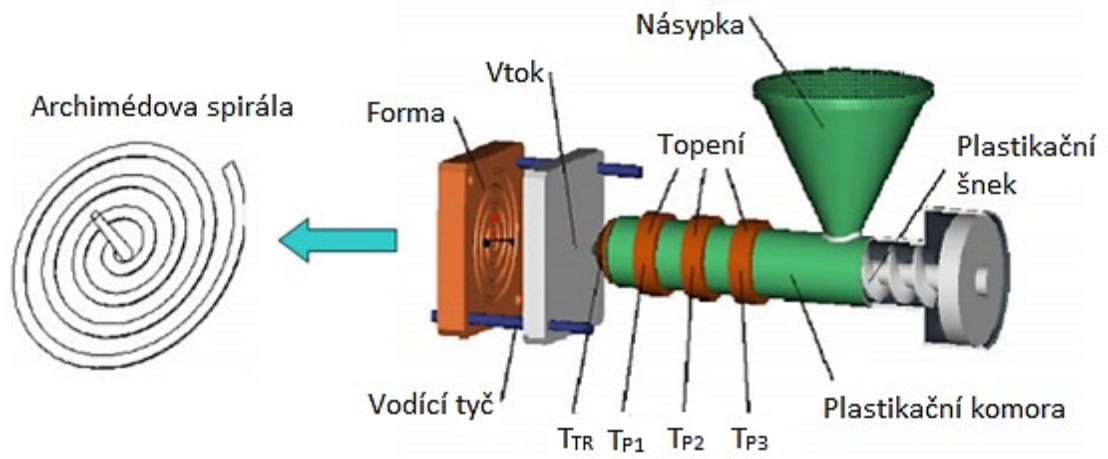
Obr. 21. Výtlačný plastometr
1) řídicí panel 2) válec; 3) píst;
4) závaží [13]



Obr. 22. Schéma výtlačného plastometru [13]

4.4 Spirálová zkouška zabíhavosti

Principem této zkoušky je vstříknutí polymerní taveniny za předem definovaných technologických podmínek, vstřikovacím strojem do dutiny formy, jejíž dutina zaujímá tvar Archimédovy spirály o teoreticky nekonečné délce, výšce 2 nebo 4 mm a šířce 10 mm. Při hodnocení zatékavosti dbáme na zvolení takových technologických podmínek, jež jsou totožné s podmínkami během vlastního vstřikování. Tato technologie nám dává prostor k ověření vlivu druhu textilie (hybridní technologie vstřikování) na zatékavost polymeru a dále také možnost prověřit vliv měnících se procesních parametrů a technologických parametrů (tlak, teplota), případně aditiv na výslednou zatékavost zkoumaného polymeru. [23]



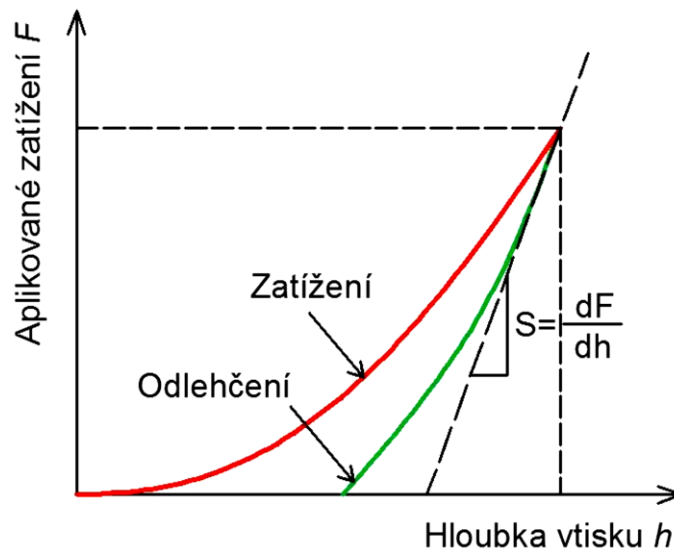
Obr. 23. Schéma zkoušky spirálové zabíhavosti tavenin a Archimédova spirála [23]

5 INSTRUMENTOVANÁ VNIKACÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI – DSI

Ke vzniku této zkoušky přispěla snaha o objevení mechanických vlastností na tenkých vrstvách. Běžné přístroje k měření mikrotvrdomosti nebyly uzpůsobené k vytvoření tak malého zatížení, aniž by nebyl jen indentací ovlivněn též substrát, na němž daná vrstva byla nanesena. Zásadní nároky byly kladeny na celkovou hloubku vtisku, aby byla rovna 10 % z celkové hloubky vtisku. Byl-li vytvořen vtisk podle zadaných nároků, nebylo možno přesně změřit jeho rozměry s pomocí optického mikroskopu, to zapříčinilo využívání elektronového mikroskopu, jenž bohužel práci protahoval a znesnadňoval. Stanovení mikrotvrdomosti se stávalo tedy nepohodlné.

Zkouška DSI (Depth Sensing Indentation) – českým ekvivalentem Instrumentovaná zkouška tvrdosti. Vznikla počátkem 80. let.

Principem této zkoušky je současná detekce okamžitého rozdílu hloubky průniku indentoru měřicího zařízení do zkoušeného materiálu, v závislosti nárstu nebo poklesu zatížení během průběhu celého zatížení/odlehčení. Průběhy zkoušek se zaznamenávají zároveň s vyhodnocením ostatních materiálových parametrů pomocí využití spojení PC s měřicím přístrojem. Poté pomocí grafického souhrnu dat vznikají charakteristické indentační křivky zatížení-hloubka vtisku. [28,35]



Obr. 24. Indentační křivka

5.1 Indentační křivky

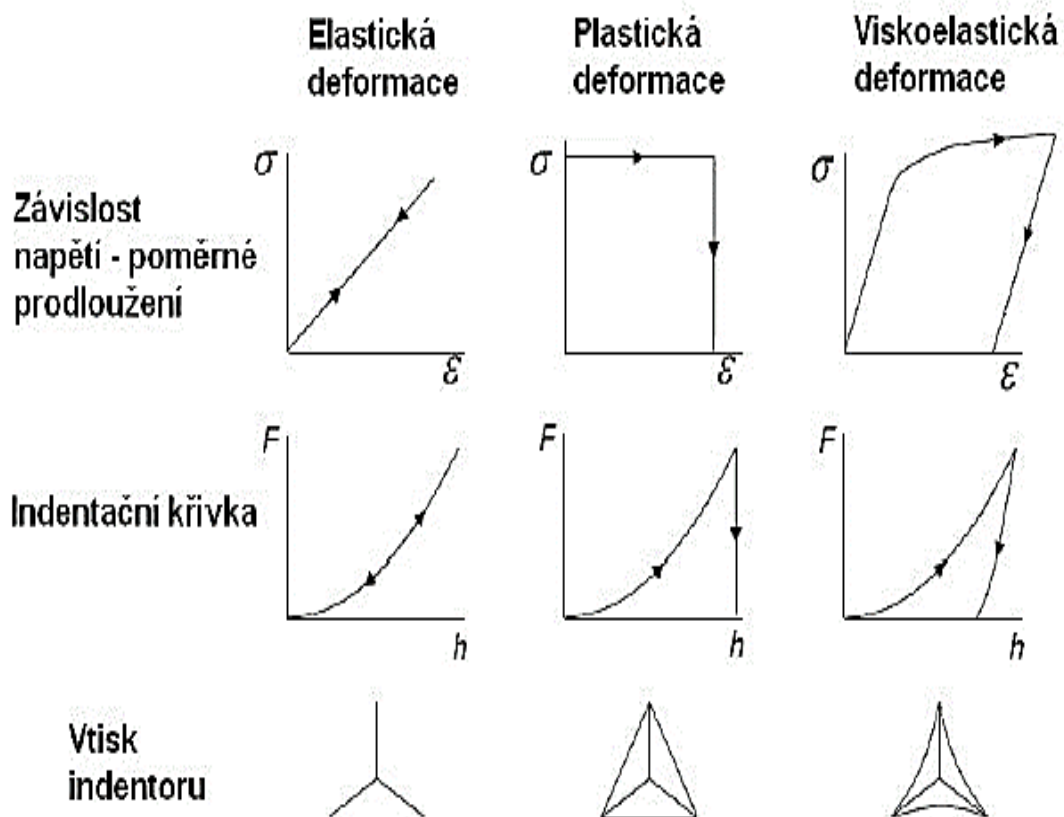
Zásadní vliv tvaru křivky má odezva zkoušeného materiálu na působícím zatížení

Materiály dělíme podle této odezvy na 3 druhy:

- Elastické
- Plastické
- Elasticko-plastické

Pokud má odezva materiálu čistě elastický charakter, nedochází k žádné plastické deformaci, po odlehčení nevzniká žádný zřetelný vtisk. U materiálů, které mají dokonale plastickou odezvu dochází i k trvalému vtisku, jehož tvar a hloubka odpovídá indentoru. Velká většina strojírenských materiálů ale zanechává zjevný vtisk, na kterém lze vidět elastické zotavení. (materiál se chová plasticko-elasticky). [29]

Toto popsané chování je znázorněno na obrázku 25.



Obr. 25. Schematické znázornění chování materiálu [31]

5.2 Stanovení výsledků instrumentované zkoušky DSI

5.2.1 Vtiskový modul pružnosti

Prostřednictvím zkoušky tvrdosti DSI, lze zjistit redukovaný modul E_r , komplexní modul E^* anebo vtiskový modul E_{IT} .

Určení komplexního modulu E^* z rovnice:

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_r} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \quad (5.1)$$

E_r – redukovaný modul

E_i – modul vnikajícího tělesa

Vtiskový modul lze vypočítat:

$$E_{IT} = E^* \cdot (1 - \nu_s^2) \quad (5.2)$$

E^* - komplexní modul

ν_s = Poissonův poměr zkoušeného tělesa [27]

5.2.2 Vtiskové tečení

Změnu hloubky vtisku značíme C_{IT} , výpočet:

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \quad (5.3)$$

h_1 – hloubka vtisku při dosažení zkušebního zatížení

h_2 – hloubka vtisku při maximálním zkušebním zatížení [27]

5.2.3 Tvrdost

Vtiskovou tvrdost H_{IT} vyjadřujeme podělením maximálního zatížení P_{max} plochou A_p (průmět kontaktu vnikajícího tělíska s povrchem [30])

$$H_{IT} = \frac{P_{max}}{A_p} \quad (5.4)$$

Tvrdost podle Martense H_M vyjadřujeme podílem zatížení P_{max} s plochou A_s povrchu části vnikajícího tělíska do povrchu materiálu. [23]

$$H_M = \frac{P_{max}}{A_s(h)} \quad (5.5)$$

5.2.4 Elastická a plastická práce vtisku

Studiem indentačních křivek zjišťujeme deformační práci.

W_{total} - celkovou práci spotřebovanou na vtisk, vypočítáme součtem elastické práce W_{elast} a plastické práce W_{plast} [30]

$$W_{total} = W_{plast} + W_{elast} \quad (5.6)$$

Dále lze vypočítat koeficient zpětné relaxace η_{IT} jenž zobrazuje jak se vykonaný vtisk vrací do původního stavu [31]

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast}}{W_{total}} \cdot 100 \quad (5.7)$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je zkoumání vlivu procesních podmínek vstřikování na výslednou jakost povrchu zkušebních vzorků. Budou použity rozdílné tvarové desky vstřikovací formy a z technologických parametrů vstřikování budou provedeny variace vstřikovacího tlaku.

Bude vstřikován materiál PP (Borealis BJ380MO) a vyhodnocena jeho zatékavost ve spirálovitě řešené dutině formy. K jednotlivým procesním podmínkám budou pomocí přístroje Micro-Combi Tester naměřeny mikro-mechanické vlastnosti (parametry H_{IT} , E_{IT} , C_{IT}) u kterých budou sledovány následující závislosti a porovnání:

- Porovnání rozdílných jakostí povrchu dutiny formy
- Jak se jednotlivé parametry liší v závislosti na vzdálenosti od vtoku
- Jak se jakost povrchu mění při použití rozdílných vstřikovacích tlaků
- Srovnání mikro-mechanických vlastností mezi jednotlivými variacemi

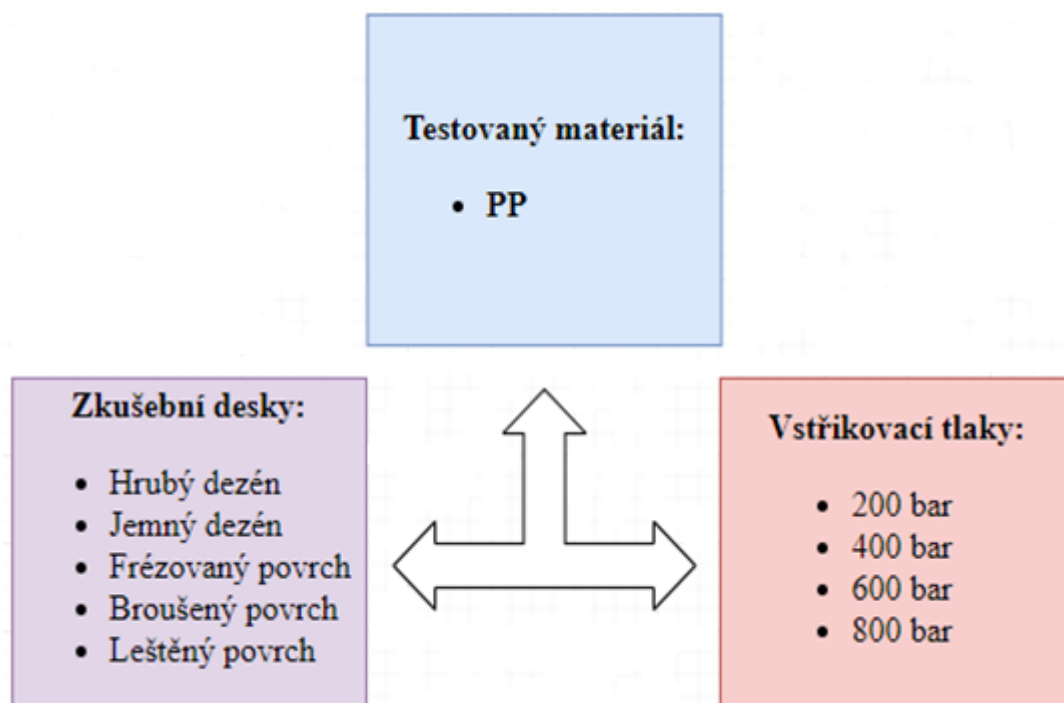
Postup při vypracování diplomové práce:

- Vypracování literární studie daného tématu
- Příprava zkušebních vzorků pro experimentální část
- Provedení experimentu
- Vyhodnocení získaných výsledků

7 VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

7.1 Podmínky přípravy zkušebních vzorků

K tomuto experimentu byl vybrán termoplast polypropylen, který byl následně vstřikován za 4 různých vstřikovacích tlaků s použitím 5 ti různých zkušebních desek, vyrobenými rozdílnými výrobními technologiemi a díky tomu tedy i o rozdílných drsnostech povrchu. Bylo vyrobeno 10 zkušebních těles ke každým jednotlivým procesním podmínkám. Tedy 200 zkušebních těles celkem.



Obr. 26. Kombinace podmínek přípravy zkušebních těles

7.1.1 Vstříkovaný materiál

Za účelem vstříkování zkušebních těles byl vybrán materiál polypropylen, který řadíme k nejběžnějším polymerům mnoha odvětví textilního a potravinářského průmyslu. Tento vstříkovaný polymer prodává firma Borealis s obchodním názvem BJ380MO a s následujícími vlastnostmi.



Obr. 27. Granulát – PP Borealis BJ380MO

Tab. 3. Vlastnosti vstříkovaného materiálu [41]

Materiál	Hustota [kg/m³]	Podmínky ITT [°C/kg]	Hodnota ITT [g/10 min]
PP	906	230 / 2,16	80

7.2 Vstřikovací stroj

K přípravě zkušebních vzorků byl využit vstřikovací stroj Allrounder 470 C Golden Edition od společnosti ARBURG



Obr. 28. ARBURG Allrounder 470 C Golden Edition [37]

Tab. 4. Technické parametry vstřikovacího stroje [40]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Vstřikovací jednotka		
Průměr šneku	40	mm
Maximální dráha šneku	160	mm
Maximální hodinový výkon (PS)	29	kg/h
Maximální vstřikovací objem	201	cm ³
Maximální vstřikovací tlak	200	MPa
Uzavírací jednotka		
Rozměry upínacích desek	650x650	mm
Rozměry mezi vodícími sloupy	470x470	mm
Uzavírací síla	1500	kN

7.3 Zkušební vzorky

Materiál ve formě granulátu byl vkládán otvorem přímo do vstřikovací jednotky, která byla tvořena šnekem s určením pro homogenizaci a plastikaci taveniny a také pístem, s jehož pomocí je tavenina vstříknuta do formy. Za výsledek měl tento vstřikovací proces zkušební vzorek spirálovitého tvaru. Po následném vyjmutí došlo na vychlazení vzorku a následovalo přeměření spirály.

7.3.1 Technologické parametry vstřikování zkušebních těles

Tab. 5. Technologické parametry PP pro vstřikování

Technologické parametry	PP
Dotlak	80 % vstřikovacího tlaku
Doba dotlaku [s]	1
Dráha dávkování [mm]	10
Dráha přepnutí [mm]	7
Doba chlazení [s]	20
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
Teplota taveniny [°C]	215

Tab. 6. Nastavení teplot PP pro vstřikování

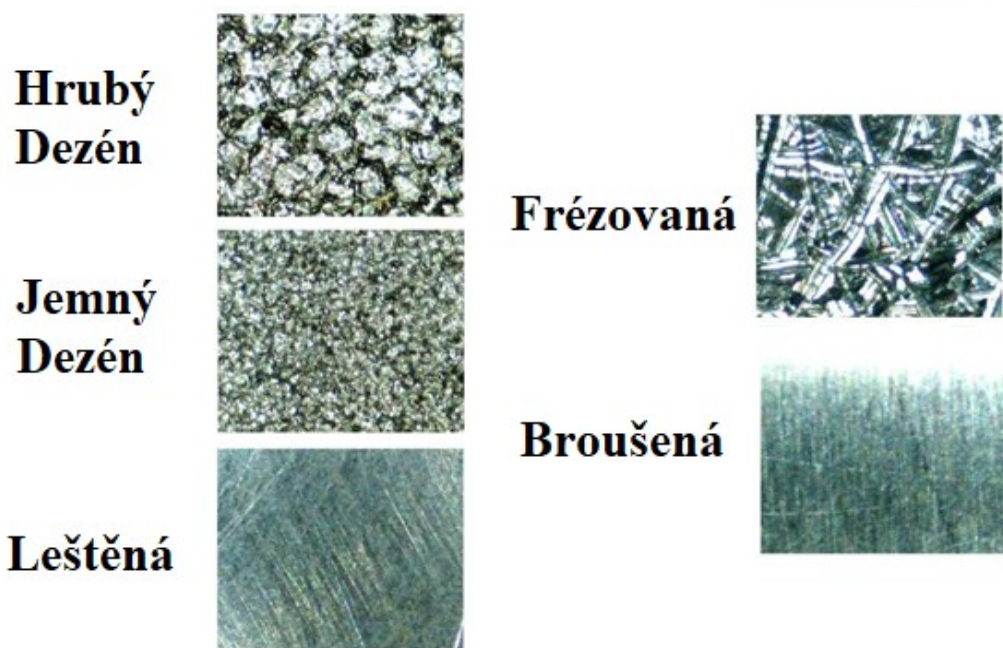
Nastavení topných pásem [°C]	PP
Pásmo č. 1	215
Pásmo č. 2	210
Pásmo č. 3	205
Pásmo č. 4	200
Pásmo č. 5	200

7.4 Zkušební desky

Během experimentu bylo využito 5 zkušebních desek, jež byly v průběhu experimentu postupně obměňovány. K obrobení povrchu těchto zkušebních desek, byly využity technologie frézování, leštění, elektrozivní obrábění a broušení.

Tab. 7. Povrchy zkušebních desek [38]

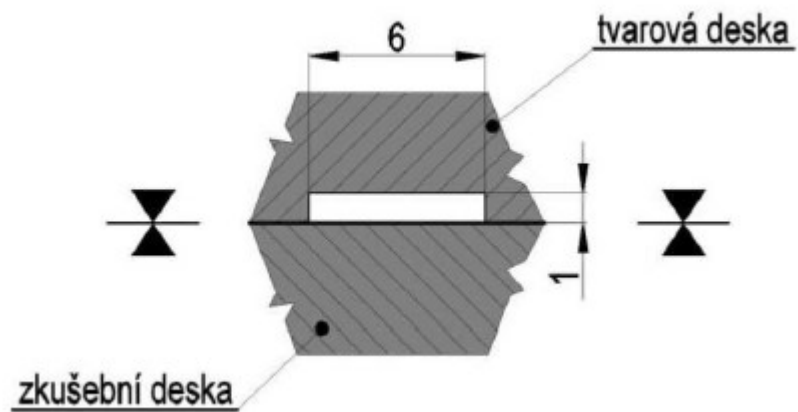
Označení zkušebních desek	Druh obrobení	Výsledná jakost povrchu
Jemný dezén	elektroerozivní obrábění	Ra = 4,36 μm
Hrubý dezén	elektroerozivní obrábění	Ra = 12,74 μm
Frézovaná	frézování	Ra = 5,01 μm
Broušená	broušení	Ra = 0,45 μm
Leštěná	leštění	Ra = 0,42 μm



Obr. 29. Označení zkušebních desek včetně fotografií povrchu (zvětšeno 50x) [42]

7.4.1 Dutina tvaru formy

Tvarová dutina formy byla v tomto experimentu tvořena výměnnou zkušební deskou s deskou tvarovou. Tvarová deska udávala výsledný tvar spirály. Po celou dobu experimentu byla tvarová deska stále stejná, měněny byly pouze zkušební desky.



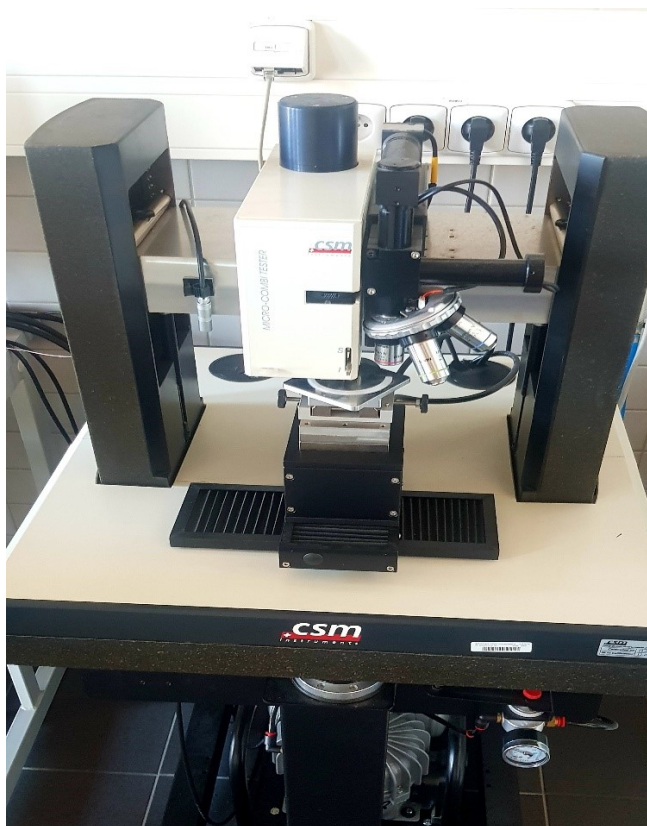
Obr. 30. Řez dutinou formy [38]

7.5 Měření instrumentovanou zkouškou tvrdosti DSI

Měření Instrumentované zkoušky tvrdosti proběhlo dle normy ČSN EN ISO 14577 na přístroji MICRO-COMBI-TESTER firmy CSM Instruments.

Parametry zkoušky:

- Aplikované zatížení – 1 N
- Výdrž na maximálním zatížení – 90 s
- Zatěžující a odtěžující rychlost – 2 N/min
- Poissonovo číslo – 0,3



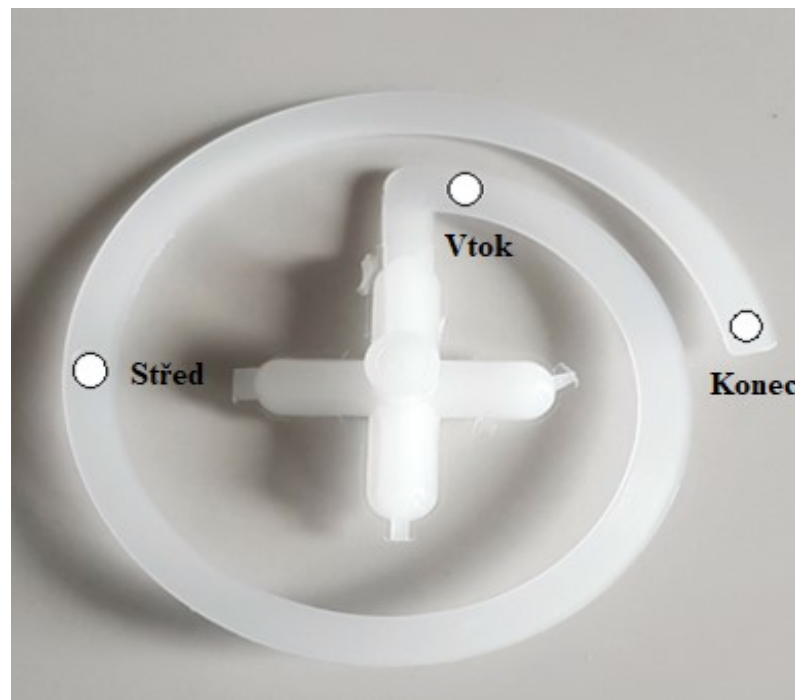
Obr. 31. Mikrotvrdoměr – Micro Combi Tester

Vnikacím tělesem (indentorem) byl čtyřboký diamantový jehlan o vrcholovém úhlu 136° (Vickersův jehlan). Dílčí měření byla zhotovena metodou DSI a následné vyhodnocení mikro-mechanických vlastností pomocí metody Oliver & Pharr.

7.5.1 Postup měření vstříkované spirály

Dílčí měření spirál bylo rozděleno na tři oblasti (počátek, střed, konec). Vyznačení měřených oblastí je znázorněno na obr. 32. Během měření byl kladen důraz na ustanovení polohy spirály do takové polohy, aby měřicí jednotka přístroje dopadala tečně na požadovanou vyhodnocovanou oblast zkoušeného vzorku spirály. Pro každou spirálu bylo na počátku, středu a konci provedeno 10 měření a byly vyhodnocovány veličiny:

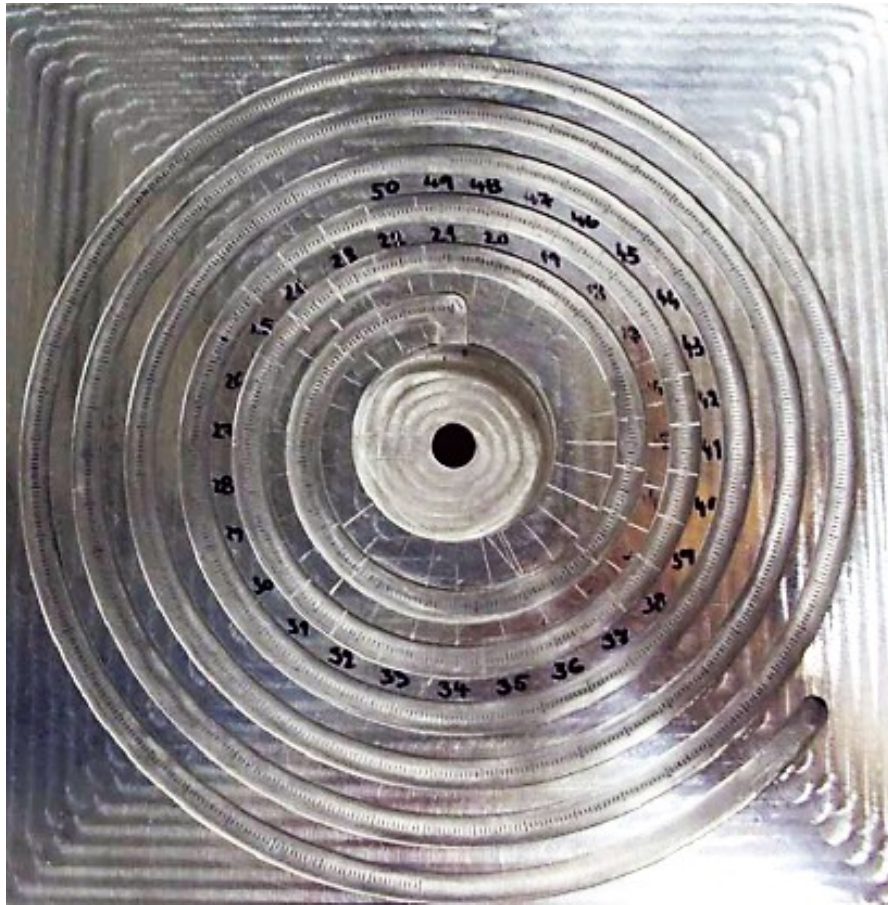
- Vtisková tvrdost H_{IT}
- Vtiskový modul pružnosti E_{IT}
- Creep C_{IT}



Obr. 32. Oblasti měření

7.6 Měření délky zatečení

Všechna zkušební tělesa byla spirálovitého tvaru. Maximální možná délka vstřikované spirály mohla dosahovat i 2 metrů. Této maximální délky nebylo dosaženo ani v jednom z případů. Šířka kanálu spirály byla 6 mm a hloubka byla 1 mm. Měření délky zatečení vyrobených zkušebních těles byla změřena s pomocí přípravku, položením tělesa do drážky přípravku, jenž obsahovala stupnici s dílky o rozteči velikosti 1 mm (obr. 33.). Ze stupnice byla poté odečtena příslušná délka s přesností na 1 mm. Každé měření bylo provedeno 10krát a následné výsledky byly statisticky zpracovány.



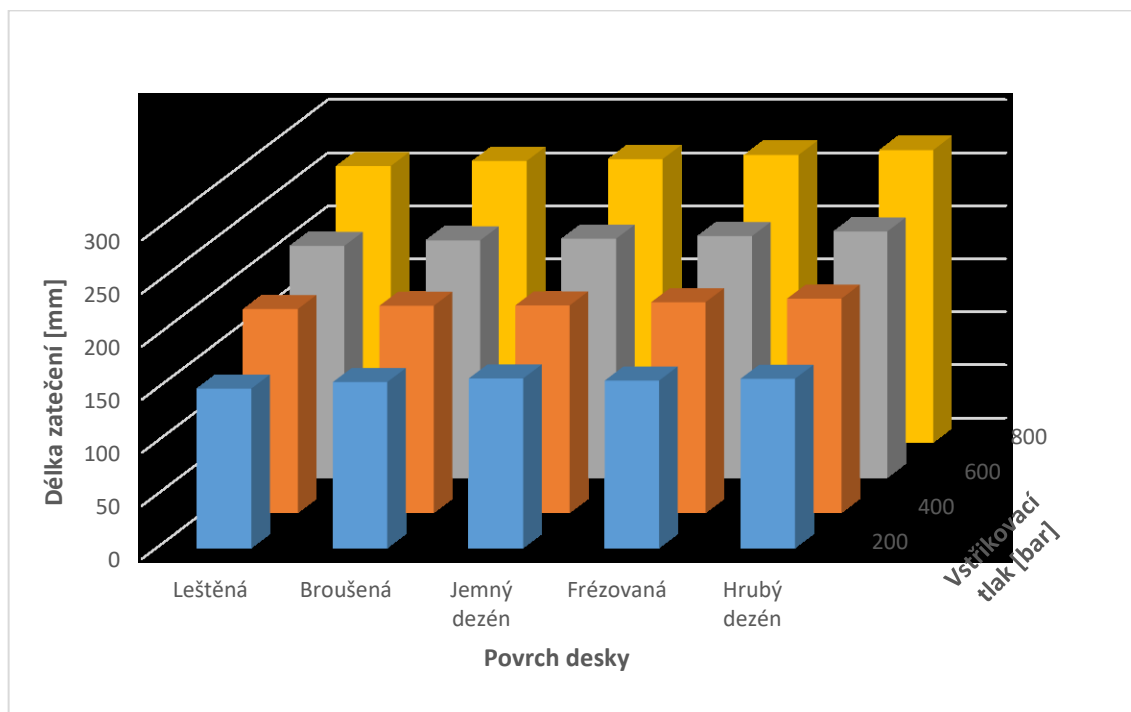
Obr. 33. Přípravek pro měření délky zatečení zkušebních těles

Tab. 8. Naměřené hodnoty zatékavosti při různých tlacích

Označení zkušebních desek	Průměrná délka zatečení v [mm] při následujících tlacích v [bar]			
	200	400	600	800
Leštěná	150,1	192	218,4	260,6
Broušená	156,3	195,1	223,6	265,4
Jemný dezén	159,7	195,4	225,2	267,1
Frézovaná	157,7	198,4	227,7	271
Hrubý dezén	159,4	201,8	232,0	275,6

Tab. 9. Naměřené odchylky hodnot zatékavosti při různých tlacích

Označení zkušebních desek	Odchylky délky zatečení v [mm] při následujících tlacích v [bar]			
	200	400	600	800
Leštěná	3,18	1,33	2,63	0,84
Broušená	3,40	3,96	3,53	0,52
Jemný dezén	1,89	2,91	3,61	0,99
Frézovaná	2,75	2,37	3,30	0,67
Hrubý dezén	4,55	3,05	2,91	2,27



Obr. 34. 3D graf závislosti délky zatečení na povrchu zkušebních desek a vstřikovacím tlaku materiálu PP Borealis BJ380MO.

Z grafu na obr. 34. lze dle předpokladu pozorovat, že s rostoucím vstřikovacím tlakem dochází také k lineárnímu růstu délky zatečení u každé desky. Dále vyplývá, že změna povrchu výměnné desky má jistý vliv na délku zatečení taveniny.

8 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

V této kapitole jsou naměřená data zpracována formou grafů a tabulek. Tabulky obsahují průměrné hodnoty ze souboru měření a ty jsou dále vyznačeny do grafů. Bylo provedeno celkově 10 měření se statistickým vyhodnocením pro každý vzorek.

8.1 Použité veličiny

- Aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8.1)$$

- Směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (8.2)$$

n = počet měření

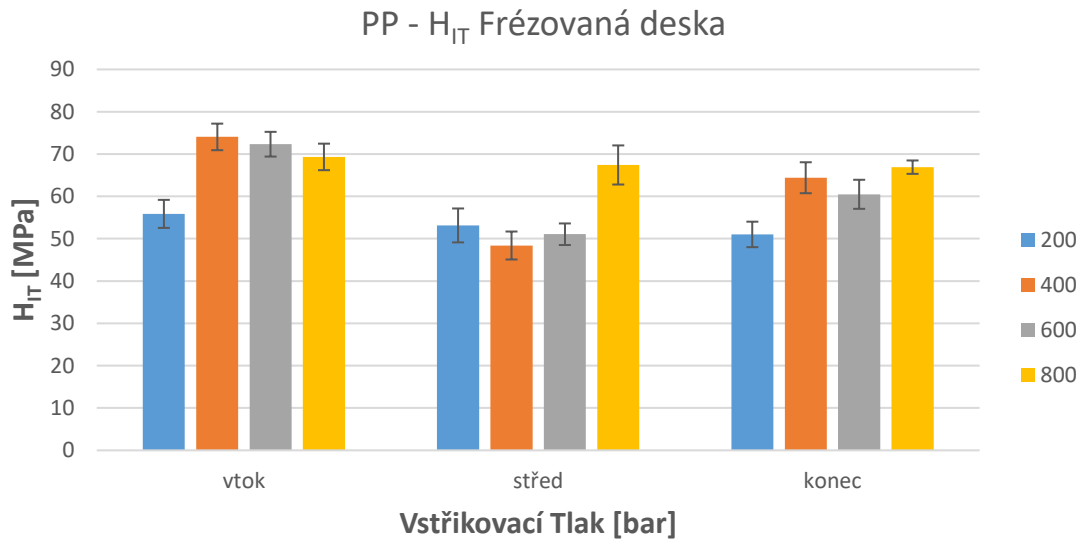
\bar{x} = aritmetický průměr

x_i = i -tá hodnota měřené veličiny

s = směrodatná odchylka

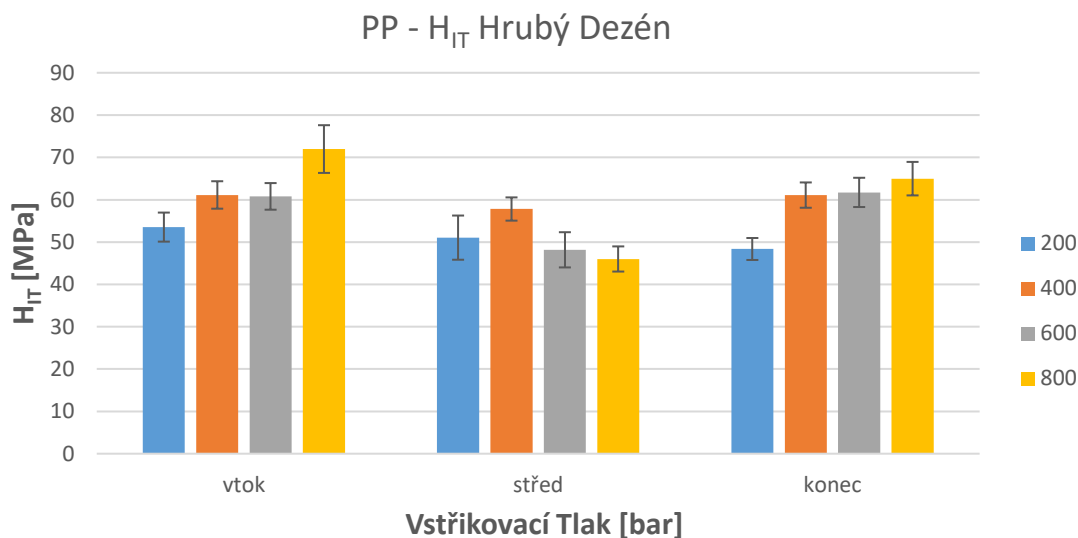
8.2 Výsledné hodnoty

8.2.1 Hodnoty vtiskové tvrdosti H_{IT}



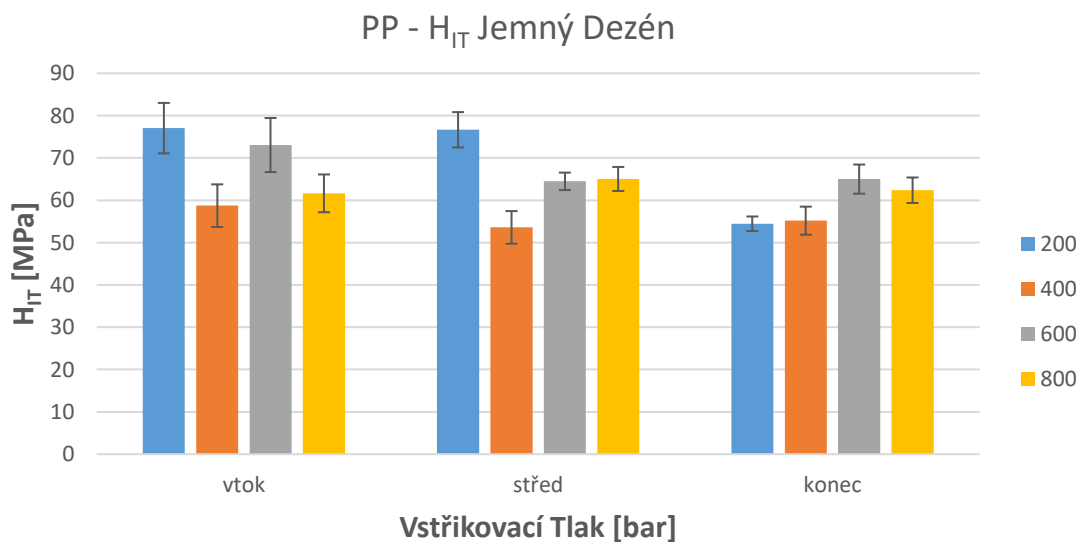
Obr. 35. Vtisková tvrdost H_{IT} v závislosti na pozici měření
- Frézovaná deska

Dle obr. 35., při použití frézované tvarové desky, byl zjištěn u výsledných vzorků trend nejvyšší vtiskové tvrdosti při různých tlacích na místě vtoku. U tlaků 200 a 800 bar se zvětšující vzdáleností od vtoku se hodnota vtiskové tvrdosti lineárně zmenšuje. Nejvyšší hodnoty H_{IT} byly zaznamenány u tlaků 400 a 600 bar včetně nejvyššího kolísání hodnot.



*Obr. 36. Vtisková tvrdost H_{IT} v závislosti na pozici měření
- Deska s hrubým dezénem*

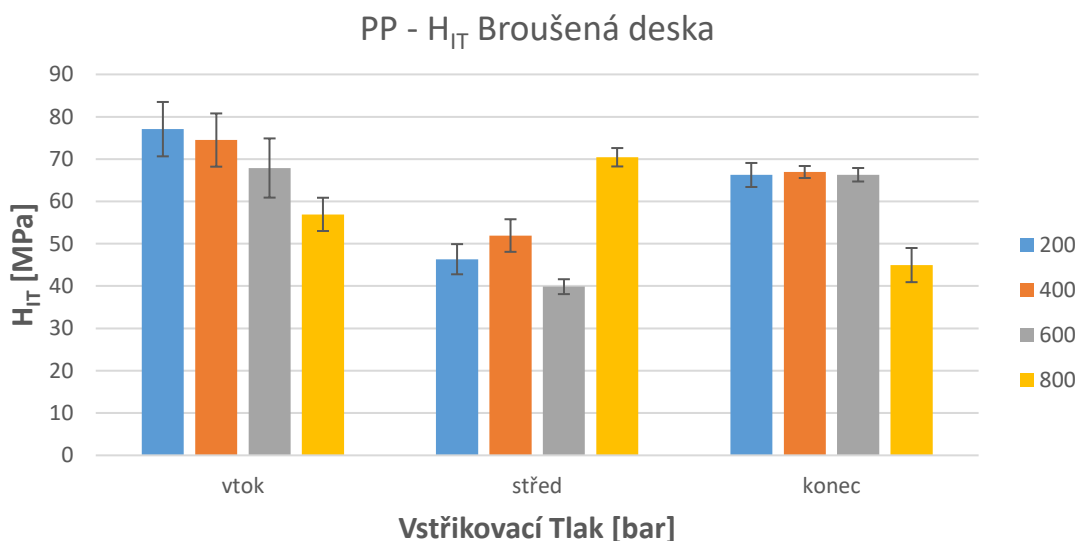
Při použití desky s hrubým dezénem stále převládá při všech zkoumaných tlacích trend nejvyšší vtiskové tvrdosti na místě vtoku. Nejvyšší vtisková tvrdost 71,981 MPa byla naměřena u tlaku 800 bar. Při tlacích 400 a 600 bar došlo k vyrovnání hodnot H_{IT} v počáteční i koncové poloze měření.



*Obr. 37. Vtisková tvrdost H_{IT} v závislosti na pozici měření
- Deska s jemným dezénem*

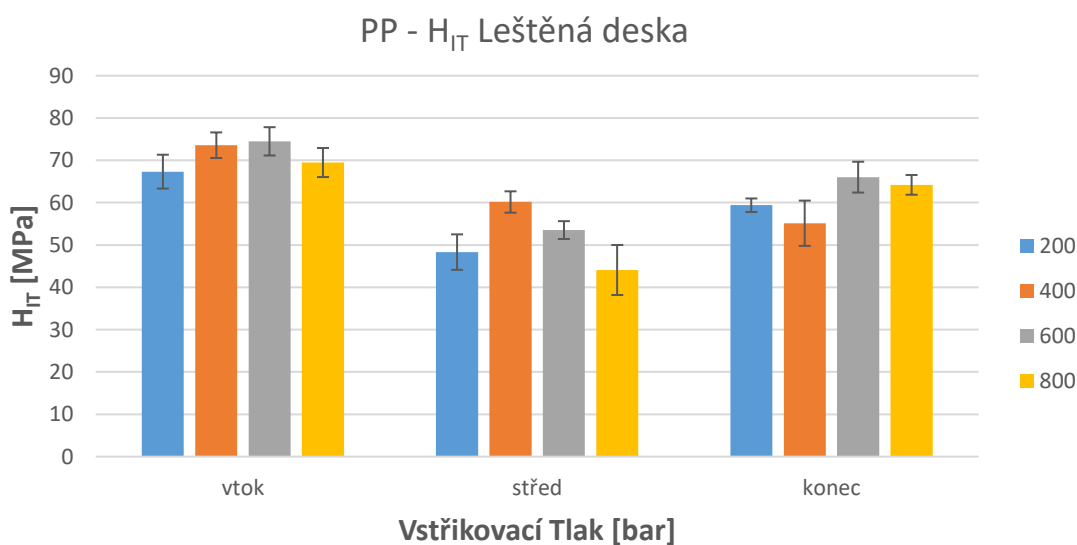
U desky s jemným dezénem byl opakován trend nejvyšší hodnoty H_{IT} na místě vtoku, mimo tlak 800 bar, kdy byla naměřena nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti ve střední vzdálenosti od

místa vtoku. Nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti 77,04 MPa byla dosažena při nejmenším tlaku 200 bar na místě vtoku.



Obr. 38. Vtisková tvrdost H_{IT} v závislosti na pozici měření – Broušená deska

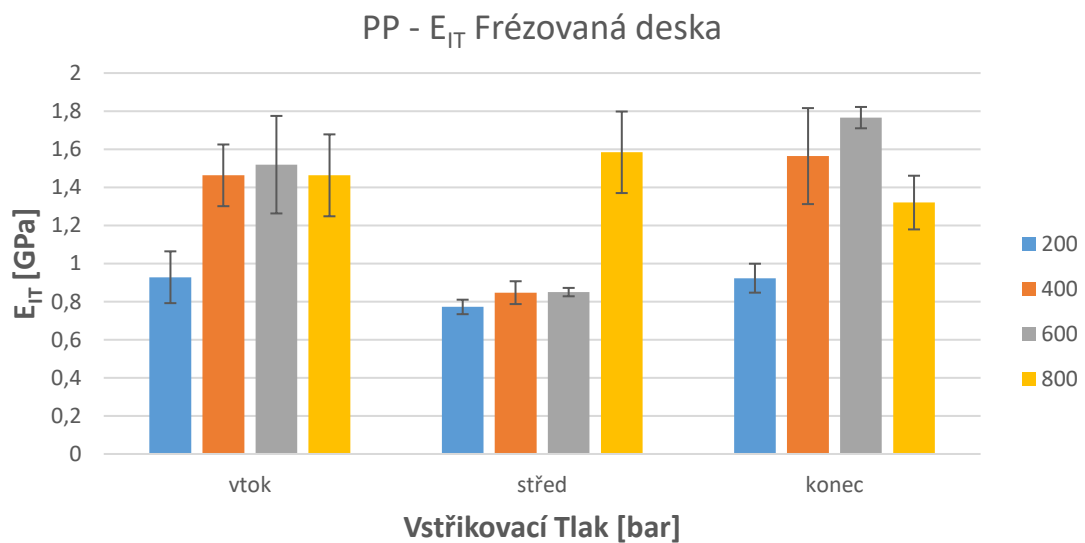
S použitím broušené desky byly získány obdobné výsledky jako u desky s jemným dezénem a to opětovný trend nejvyšších hodnot vtiskové tvrdosti na místě vtoku. Stejně také při tlaku 800 bar, nejvyšší hodnota H_{IT} ve střední vzdálenosti od vtoku. Včetně nejvyšší dosažené hodnoty vtiskové tvrdosti 77,07 MPa při tlaku 200 bar.



Obr. 39. Vtisková tvrdost H_{IT} v závislosti na pozici měření – Leštěná deska

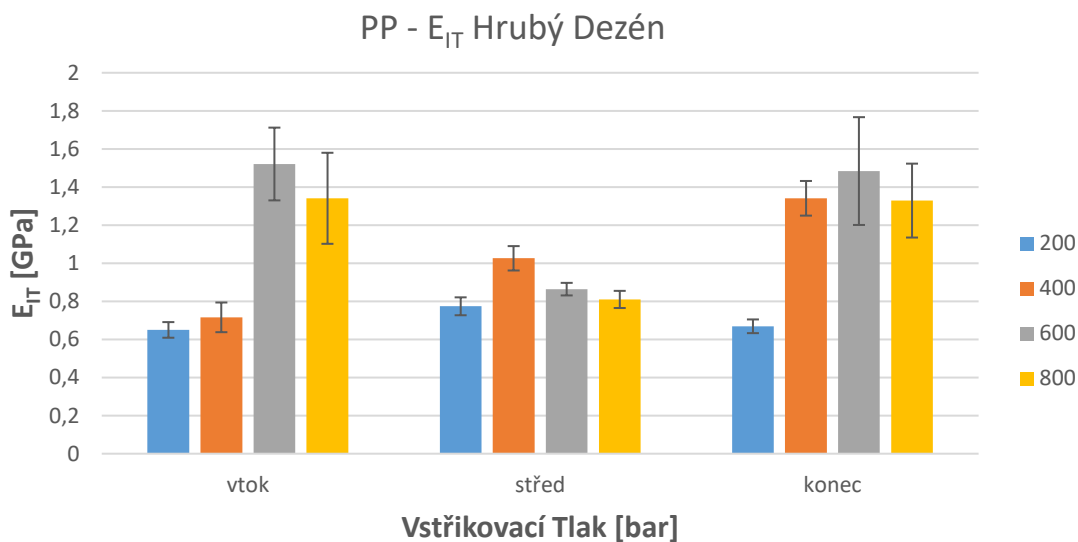
U leštěné desky byly nejvyšší hodnoty naměřeny u tlaků 400 a 600 bar s opětovným prokázáním trendu nejvyšších hodnot E_{IT} na místě vtoku. Lineární pokles hodnot byl prokázán u tlaku 400 bar, u zbytku tlaků šlo o kolísavý trend, kdy na nejdlejší vzdálenosti došlo ke zvýšení vtiskové tvrdosti oproti střední vzdálenosti od místa vtoku.

8.2.2 Hodnoty vtiskového modulu E_{IT}



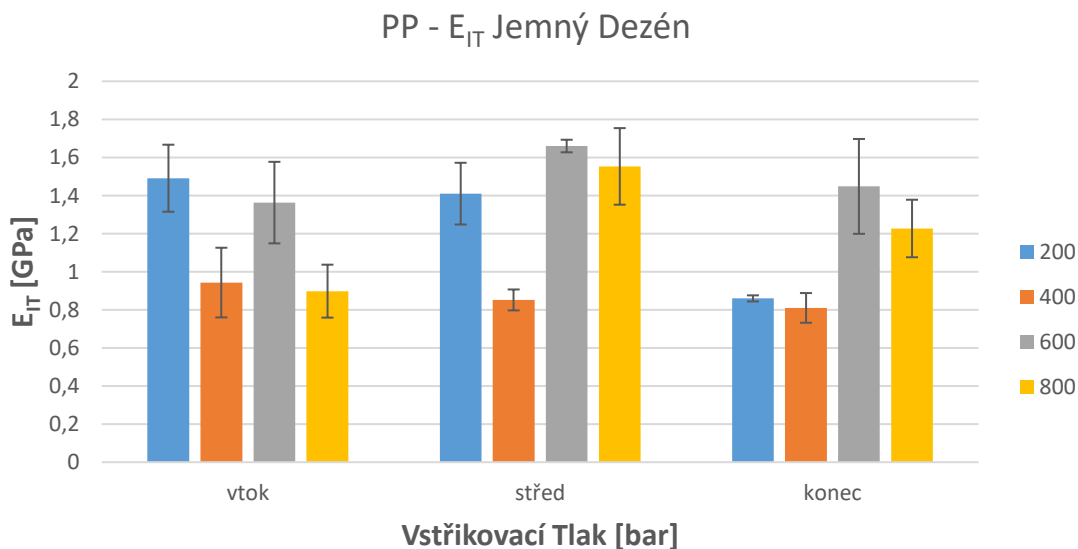
Obr. 40. Vtiskový modul E_{IT} v závislosti na pozici měření – Frézovaná deska

Na obr. 40. pro jednotlivé tlaky s použitím frézované desky, byly u spirál pozorovány nejvyšší hodnoty vtiskového modulu E_{IT} na vtoku a v konečné oblasti měření, s výjimkou tlaku 800 bar, kde bylo dosaženo nejvyšších hodnot v prostřední oblasti měření. Nejmenších hodnot v celém rozsahu měření dosahovala spirála s použitím tlaku 200 bar.



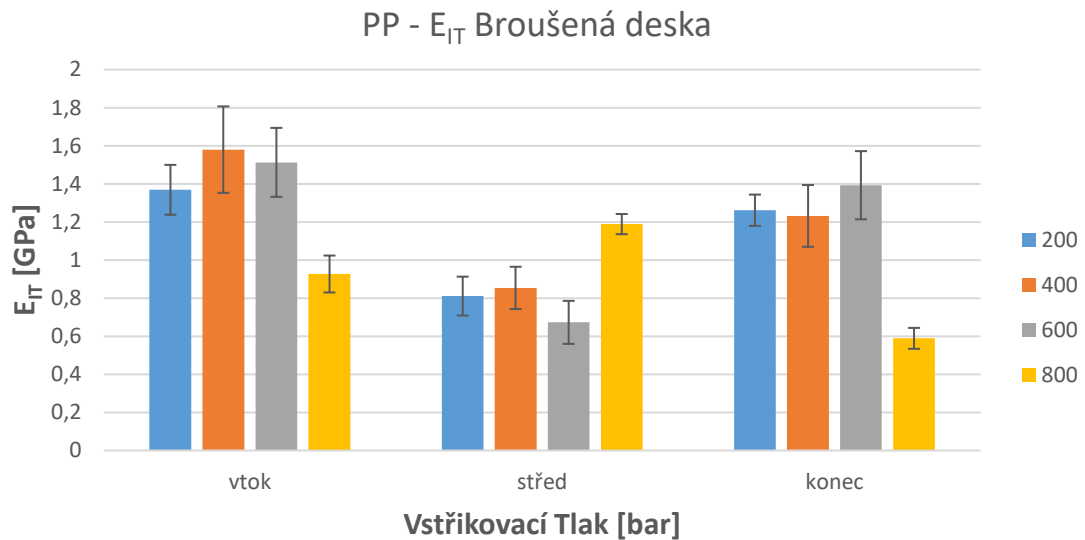
*Obr. 41. Vtiskový modul E_{IT} v závislosti na pozici měření
– Deska s hrubým dezénem*

Obdobně jako s použitím frézované desky, byly u desky s hrubým dezénem zpozorovány nejmenší hodnoty v celém měřeném rozsahu u použití tlaku 200 bar. S tlakem 600 bar byly získány nejvyšší hodnoty vtiskového modulu E_{IT} na vtoku 1,52 GPa a v konečné oblasti měření 1,48 GPa.



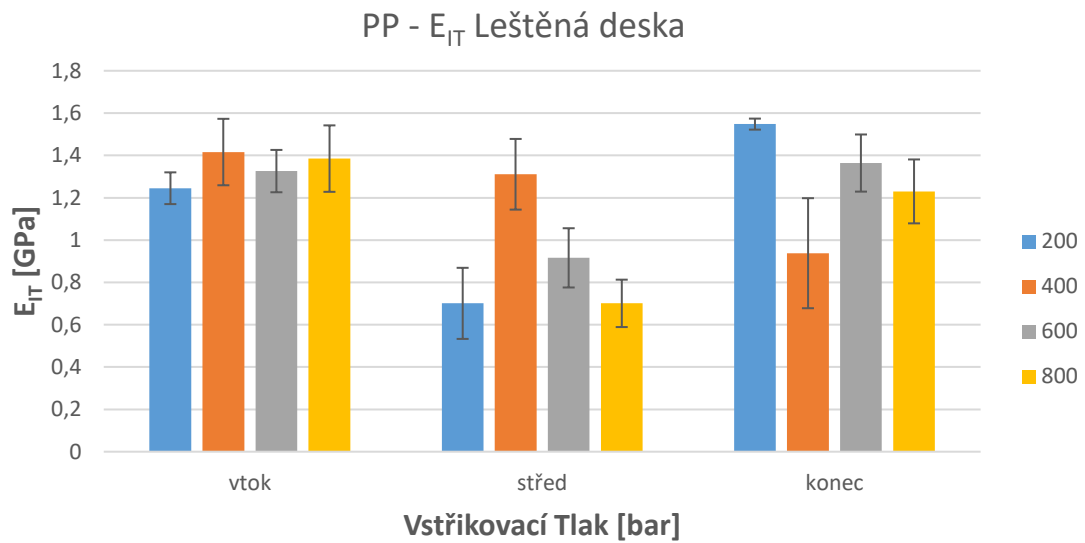
*Obr. 42. Vtiskový modul E_{IT} v závislosti na pozici měření
– Deska s jemným dezénem*

S použitím desky s jemným dezénem pokračoval trend nejvyšších hodnot vtiskového modulu E_{IT} u tlaku 600 bar v celém měřeném rozsahu spirály. Dále u tlaků 200 a 400 bar se s rostoucí vzdáleností od vtoku hodnota vtiskového modulu lineárně zmenšovala.



Obr. 43. Vtiskový modul E_{IT} v závislosti na pozici měření – Broušená deska

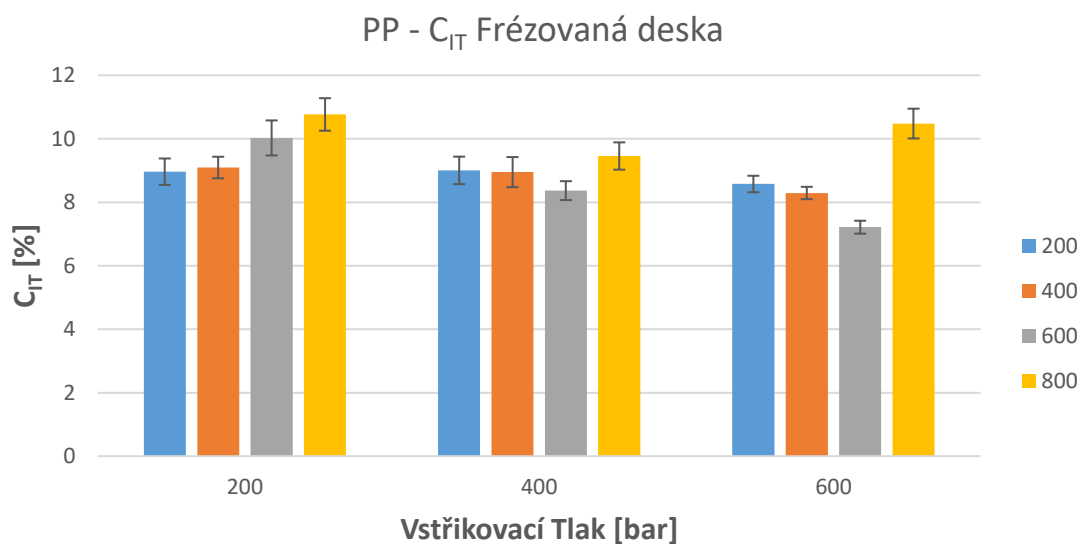
Vtiskový modul E_{IT} s použitím broušené desky prokázal obdobný grafický průběh jako u frézované desky, nejvyšší hodnoty vtiskového modulu E_{IT} byly naměřeny opětovně u použití tlaků 400 a 600 bar. Obdobně také u tlaku 800 bar, kdy nejvyšší hodnota byla naměřena ve střední vzdálenosti od vtoku.



Obr. 44. Vtiskový modul E_{IT} v závislosti na pozici měření – Leštěná deska

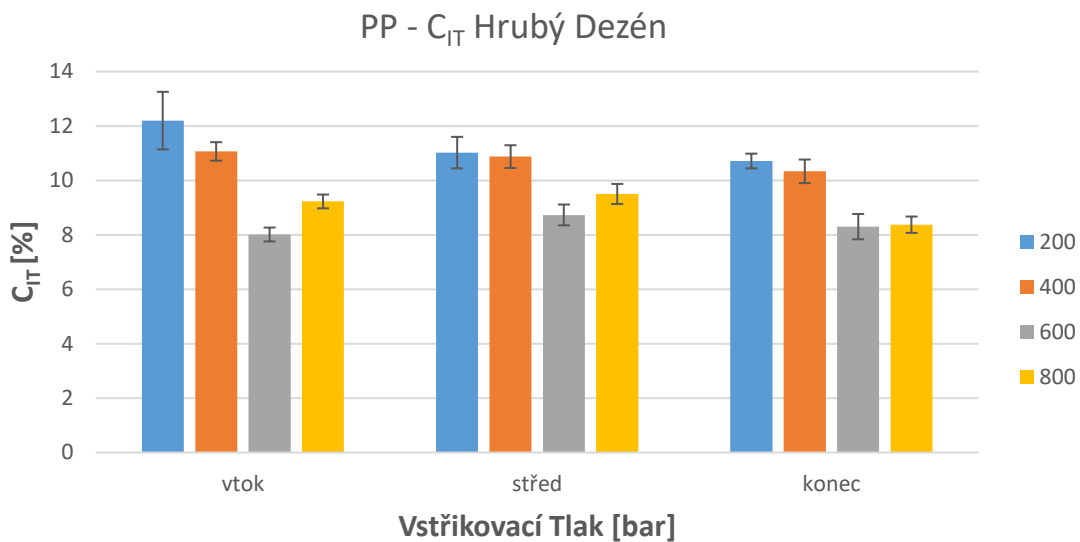
Grafické srovnání hodnot vtiskového modulu E_{IT} prokázalo při použití leštěné desky u tlaků 400 a 600 bar opětovně nejvyšší hodnoty v celém měřeném rozsahu od místa vtoku. S výjimkou tlaku 200 bar, kdy byla nejvyšší hodnota 1,416 GPa naměřena v nejdelší vzdálenosti od místa vtoku.

8.2.3 Hodnoty creepového chování C_{IT}



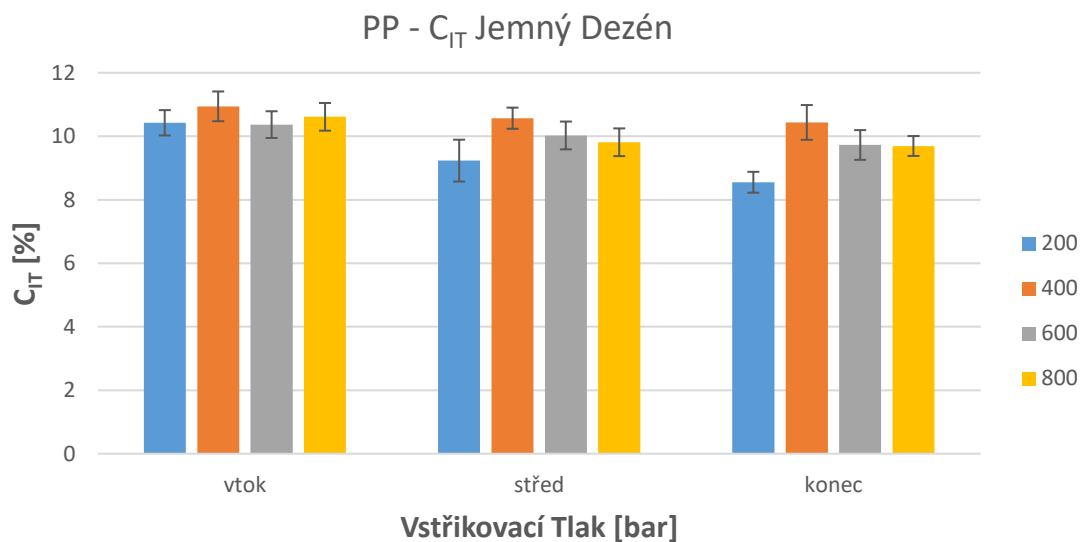
Obr. 45. Creepové chování C_{IT} v závislosti na pozici měření – Frézovaná deska

U creepového chování byly s použitím frézované desky, naměřeny nejvyšší hodnoty v místě vtoku včetně lineárního poklesu hodnot těchto hodnot, s rostoucí vzdáleností od vtoku. S výjimkou tlaku 800 bar, kdy došlo k růstu v konečné vzdálenosti od vtoku, při tomto tlaku byla také naměřena nejvyšší hodnota C_{IT} 10,77 %.



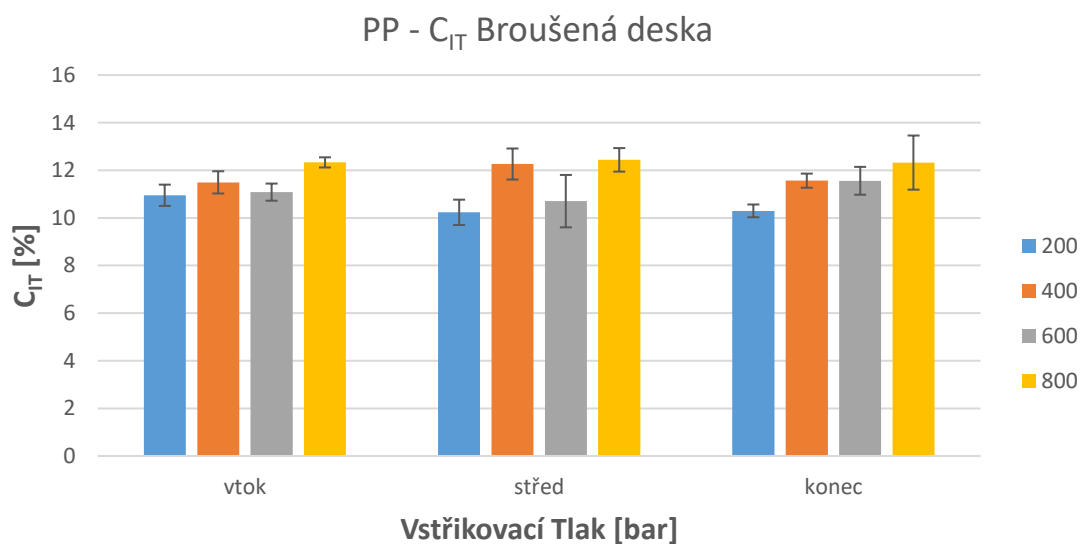
Obr. 46. Creepové chování C_{IT} v závislosti na pozici měření
– Deska s hrubým dezénem

U desky s hrubým dezénem byly získány nejvyšší hodnoty za použití nejmenšího tlaku 200 bar s lineárním poklesem hodnot v měřené délce. Tento trend byl obdobný u tlaku 400 bar. U zbylých tlaků došlo k mírnému kolísání hodnot.



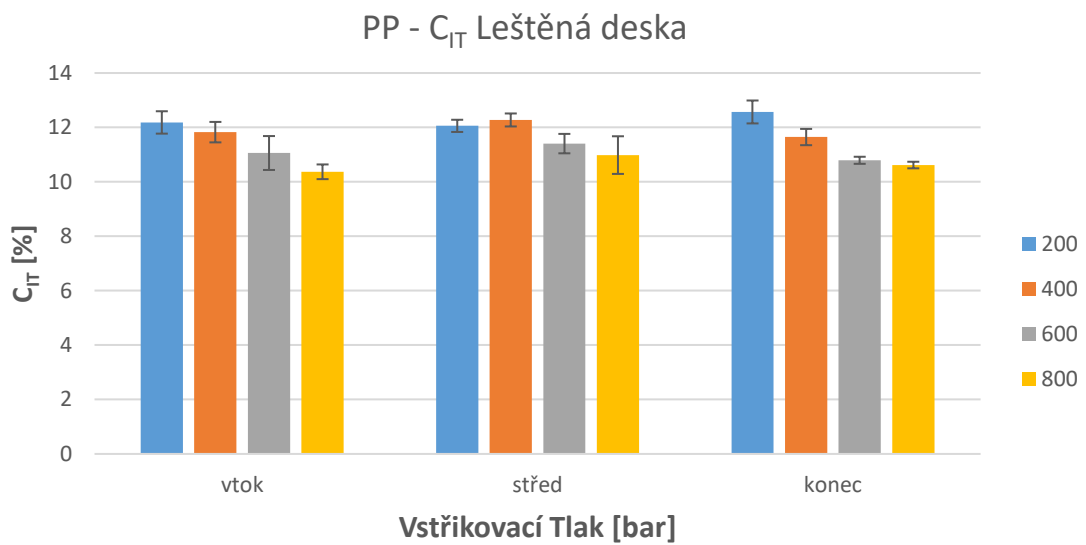
*Obr. 47. Creepové chování C_{IT} v závislosti na pozici měření
– Deska s jemným dezénem*

Grafické srovnání u použití desky s jemným dezénem dokázalo trend lineárního klesání vstřikového tečení C_{IT} u všech použitých tlaků od místa vtoku až po konec měřené spirály. S dosažením nejvyšší hodnoty C_{IT} 10,94 % u použitého tlaku 400 bar.



Obr. 48. Creepové chování C_{IT} v závislosti na pozici měření – Broušená deska

Srovnání creepového chování C_{IT} s použitím broušené desky znázornilo kolísání hodnot u měřených tlaků ve všech vzdálenostech od vtoku, kdy nejvyšší hodnoty byly naměřeny při použití tlaku 800 bar.



Obr. 49. Creepové chování C_{IT} v závislosti na pozici měření – Leštěná deska

U leštěné desky byla při tlaku 200 bar zjištěna nejvyšší hodnota vtiskového tečení C_{IT} 12,57 % na nejvzdálenějším místě od vtoku měřené spirály. U ostatních tlaků byly naměřeny nejvyšší hodnoty na počátku a na středu od vtoku spirály.

9 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Cílem diplomové práce byl výzkum vlivu procesních podmínek vstřikování na zatékavost a výsledné mikro-mechanické vlastnosti vstřikovaného tělesa. K tomuto výzkumu byla využita vstřikovací forma se schopností výměny tvarových desek s různou drsností povrchu: broušený, leštěný, frézovaný, jemný dezén a hrubý dezén. Dutina formy byla spirálovitého charakteru se vtokovým ústím o šířce 6 mm, které odpovídalo šířce průřezu spirály. K výrobě zkušebních těles byl vybrán materiál PP Borealis BJ380MO, tento materiál byl vstřikován pro každou zkušební desku při 4 variacích vstřikovacích tlaků. U výsledných zkušebních těles byla pomocí speciálního přípravku změřena zatékavost a pomocí Instrumentované zkoušky tvrdosti DSI, mikro-mechanické vlastnosti povrchu vzorků. Z řady výsledků, které nám poskytla metoda DSI, byla vyhodnocena vtisková tvrdost H_{IT} , vtiskový modul E_{IT} a creep C_{IT} , jež byly měřeny a porovnány v závislosti na vzdálenosti od místa vtoku.

Vyhodnocením vlivu drsnosti povrchu zkušebních desek na délku zatečení u testovaných vzorků vynesných do grafu na obr. 34. bylo zjištěno, že s rostoucím vstřikovacím tlakem dochází též k lineárnímu růstu délky zatečení u každé jednotlivé testované desky. Dále vyplývá, že změna povrchu má vliv na délku zatečení taveniny. Dále byl potvrzen předpoklad vlivu vstřikovacího tlaku na délku zatečení, kdy s růstem vstřikovacího tlaku rostla i délka zatečení. Výsledky se u všech použitých vstřikovacích tlaků velmi blížily lineárnímu charakteru.

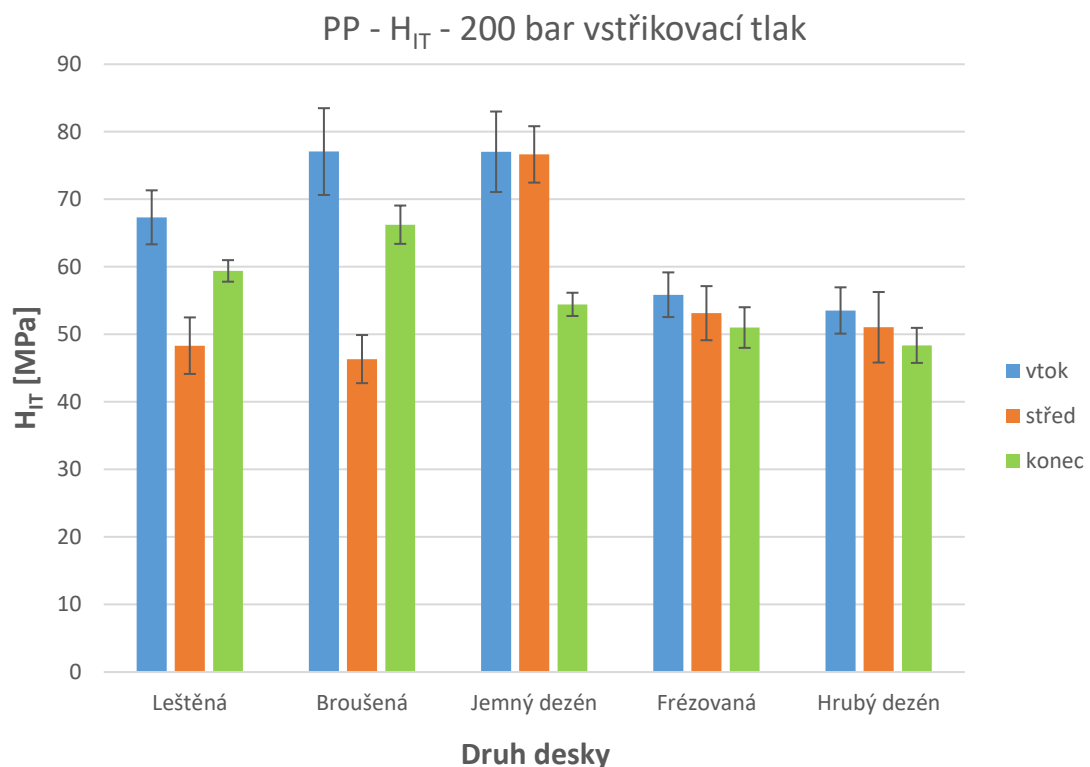
Další část byla zaměřena na vyhodnocení mikro-mechanických vlastností vstřikovaného tělesa.

Byly zkoumány materiálové parametry: Vtisková tvrdost H_{IT} , Vtiskový modul E_{IT} , Vtiskové tečení C_{IT} .

9.1 Vtisková tvrdost H_{IT}

Vtisková tvrdost je mírou rezistence k poškození, nebo trvalé deformaci, charakterizována jako maximální zatěžující síla podělená průmětem kontaktní plochy.

Porovnáním hodnot vtiskové tvrdosti H_{IT} v závislosti na vzdálenosti od místa vtoku, při použití různých druhů desek, s variací tlaků vstřikování nebyl pozorován jednoznačný trend, jenž by odkazoval na závislost mezi vzdáleností od místa vtoku a vtiskovou tvrdostí.



Obr. 50. Srovnání Vtiskové tvrdosti H_{IT} v závislosti na pozici měření

– Vstřikovací tlak 200 bar

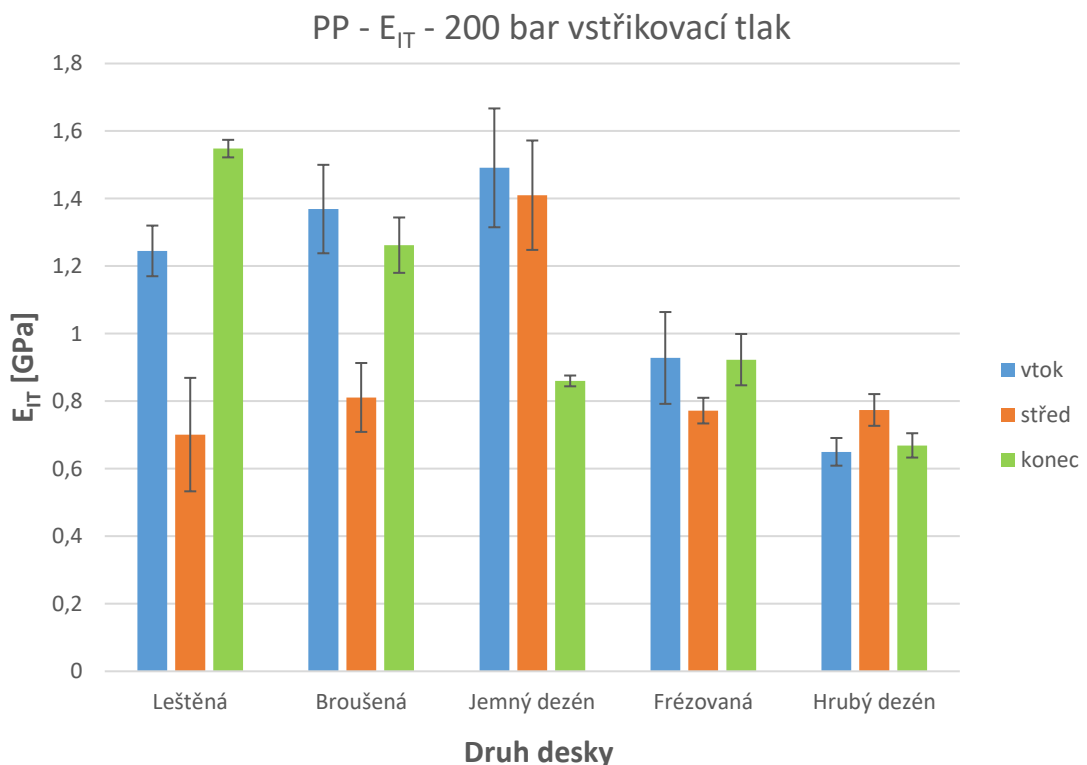
Na obr. 50. u zkušebních vzorků vstřikovaných za použití tvarových desek s jemným dezénem, hrubým dezénem a frézovaným byla pozorována sestupná tendence velikosti vtiskové tvrdosti H_{IT} se zvyšující se vzdáleností od místa vtoku, kdy na místě vtoku byla tvrdost dle předpokladu nejvyšší. Opakem u zkušebních těles vstřikovaných s použitím broušené a leštěné desky docházelo ke kolísání hodnot vtiskové tvrdosti H_{IT} . Nejnižší hodnoty vtiskové tvrdosti byly naměřeny při vstřikovacím tlaku 200 bar v místě vtoku u použití frézované desky a desky s hrubým dezénem. Největších hodnot bylo dosaženo u broušené a jemně

dezénované desky s rozdílem přibližně 44 %. Uprostřed vzorku byla nejnižší hodnota vtiskové tvrdosti 46,34 MPa naměřena u spirály zhotovené s pomocí broušené desky. Nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena u jemně dezénované desky, kde hodnota činila 76,65 MPa, rozdíl 65 %. V nejvzdálenějším měřeném místě od vtoku byla nejnižší hodnota tvrdosti H_{IT} 48,37 MPa zaznamenána u spirály vyrobené s pomocí hrubě dezénované desky. Nejvyšší hodnota 66,24 MPa byla naměřena u broušené desky, s rozdílem těchto hodnot 37 %.

9.2 Vtiskový modul E_{IT}

Vtiskový modul je určen ze směrnice tečny odtěžující křivky, odpovídající Youngově modulu.

Vtiskový modul zobrazil dle předpokladu obdobný průběh jako u vtiskové tvrdosti H_{IT} . Kdy testované vzorky vstřikované s použitím jemně dezénované desky vykazovaly opětovně nejlepší výsledky. S nejvyšší hodnotou vtiskového modulu E_{IT} naměřenou na vtoku.



Obr. 51. Srovnání Vtiskového modulu E_{IT} v závislosti na pozici měření

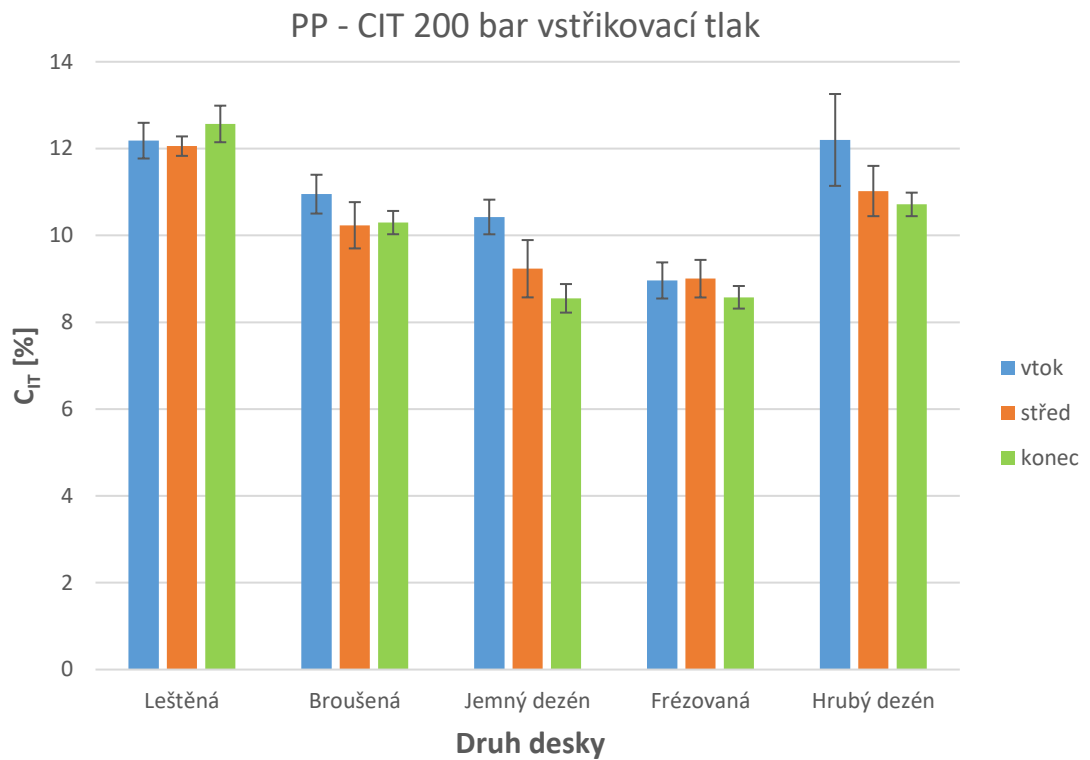
– Vstřikovací tlak 200 bar

Nejnižší hodnota vtiskového modulu E_{IT} 0,65 GPa byla naměřena při vstřikovacím tlaku 200 bar v místě vtoku u použité desky s hrubým dezénem. Největší hodnota vtiskového modulu 1,49 GPa byla zjištěna u použití jemně dezénované desky, procentuálním rozdílem 129 %. Ve střední vzdálenosti od vtoku byla nejnižší hodnota naměřena u spirály zhotovené s pomocí leštěné desky o hodnotě 0,70 GPa. Nejvyšší hodnota 1,41 GPa byla naměřena opět u jemně dezénované desky, procenty rozdíl 101 %. Na konci spirály byla nejnižší hodnota vtiskového modulu E_{IT} 0,67 GPa zaznamenána u hrubě dezénované desky, nejvyšší poté u leštěné 1,55 GPa, s rozdílem hodnot 131 %.

9.3 Vtiskové tečení (creep) C_{IT}

Určeno ze závislosti indentační hloubky na indentovaném čase, při dosažení maximální zatěžující síly 1 N a následné výdrži po dobu 21600 s na maximální síle, kdy dojde k projevu vtiskového tečení postupným propadáváním indentoru.

Creepové chování bylo znázorněno na obr. 52, kde bylo pozorováno, že použití různých výměnných desek má na creepové chování prokazatelný vliv. Nejlepších hodnot dosáhl opět jemný dezén s opakovaným trendem nejvyšší hodnoty na vtoku vstřikovaného vzorku a jeho lineárnímu poklesu se vzdáleností od vtoku. Nejnižší hodnota creepu C_{IT} 8,97 % byla při vstřikovacím tlaku 200 bar v místě vtoku naměřena u použití frézované desky. Nejvyšší naměřená hodnota vtiskového tečení 12,2 % byla zaznamenána u použití hrubě dezénované desky, rozdíl činil 36 %. Na středu spirály byla nejnižší hodnota C_{IT} 9,0 %, naměřena u frézované desky. Nejvyšší hodnota vtiskového tečení 10,06 % byla naměřena u leštěné desky, rozdílem 34 %. V nejvzdálenějším měřeném místě od vtoku byla nejnižší hodnota creepu C_{IT} 8,55 % zaznamenána u spirály vyrobené s pomocí jemně dezénované desky. Nejvyšší hodnota C_{IT} 12,57 % byla naměřena u leštěné desky, s rozdílem 47 % mezi těmito hodnotami.



Obr. 52. Srovnání Creepového chování C_{IT} v závislosti na pozici měření
– Vstřikovací tlak 200 bar

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá zkoumáním a posouzením vlivu procesních podmínek vstřikování na výsledné mikro-mechanické vlastnosti vstřikovaného tělesa a délku zatečení testovaného materiálu. Konkrétní zaměření práce byla studie vlivu velikosti vstřikovacího tlaku na mikro-mechanické vlastnosti materiálu v závislosti na oblasti měření s použitím rozdílných tvarových desek vstřikovací formy o různých drsnostech povrchu.

Teoretická část byla věnována popisu vstřikovacích forem z technologického a materiálového pohledu. Další část se věnovala obecnému popisu procesu vstřikování. Dále bylo popsáno reologické chování taveniny s charakteristikou viskozity a jejího toku. Závěrečnou částí literárního obsahu byl popis využití instrumentované zkoušky tvrdosti DSI včetně stanovení výsledků této zkoušky.

Praktická část obsahovala studii samotného vstřikování zkušebních těles. Byly zde popsány vlastnosti vstřikovaného polymeru včetně procesních podmínek, za kterých samotný výzkum probíhal. Následující část se zabývala problematikou délky zatečení vstřikovaných těles. V poslední části byly studovány mikro-mechanické vlastnosti výsledných těles a zpracování výsledků měření.

Touto studií byl potvrzen vliv vstřikovacího tlaku na délku zatečení, tedy že s růstem vstřikovacího tlaku dochází k růstu i délky zatečení polymerní taveniny. Porovnáním různých vstřikovacích tlaků byly pozorovány patrné rozdíly v nárůstu délky zatečení s nárůstem délky zatečení u všech zkušebních desek. Z těchto výsledků lze usoudit, že drsnost povrchu formy má jistý vliv na délku zatečení polymerní taveniny. Vyhodnocením dle obr. 34. bylo ve většině případů zjištěno, že desky s vyšší hodnotou drsnosti povrchu vykazují lepší zatékavost. Nejvyšší hodnoty zatečení byly dosaženy deskou s hrubým dezénem. Nejnižších hodnot bylo naopak dosaženo deskou s leštěným povrchem a tedy o nižší drsnosti povrchu.

Výsledky studie mikro-mechanických vlastností ukázaly obecný závěr, že u všech vzorků má vliv změna vstřikovacích podmínek na povrch zkušebních těles. Nenapověděly ale bohužel jednoznačný trend změny těchto vlastností, napříč druhům výměnných vstřikovacích desek a variacemi tlaků. S výjimkou desky s jemným dezénem, kde byl s použitím variací tlaků u zkoumaných parametrů H_{IT} , E_{IT} , C_{IT} ve velké většině potvrzen trend nejvyšších hodnot na vtoku s lineárním poklesem se zvyšující vzdáleností. Oproti deskám s jinou drsností povrchu taky vykazoval menších výkyvů naměřených dat napříč variacemi tlaků a obecně

nejlepších výsledků. Příkladem, již popsany vstřikovací tlak 200 bar, kde dosahovaly zkušební spirály s použitím jemně dezénované desky na vtoku a ve střední vzdálenosti o 45 % lepší hodnoty vtiskové tvrdosti H_{IT} než u spirál vyrobených s pomocí frézované desky a desky s hrubým dezénem. Vtiskový modul E_{IT} prokázal závislost na hodnotě H_{IT} a nabídl podobné výsledky a trendy u spirál vyrobených s pomocí desek z jemného dezénu s rozdílem naměřených hodnot až 130 % oproti jiným deskám. Creepové tečení C_{IT} u studovaného materiálu dosáhlo u variací tlaků, nejvyšších hodnot u zkušební desky s vyšší drsností povrchu (hrubého dezénu) kdy změna creepového chování měřených spirál v porovnání ostatních desek byla přibližně 35 %. Nejnižších hodnot C_{IT} a tedy i nejlepších dosahovala deska frézovaná a s jemným dezénem, která prokazovala stabilně nejlepších trendů s lineárním poklesem hodnot ve vzdálenosti od vtoku bez většího kolísání oproti jiným testovaným deskám s variacemi zkušebních tlaků.

Aplikací těchto poznatků do praxe bude možné u tohoto materiálu snížit náklady na vstřikovací formy tím, že bude nutné použití nákladných dokončovacích operací jen na funkční, pohledové plochy budoucího výstřiku a ostatní plochy lze obrábět méně náročnými způsoby obrábění.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [2] BOBČÍK, Ladislav, a kolektiv. *Formy pro zpracování plastů 1: Vstřikování termoplastů*. 2 vyd. Brno: Uniplast, 1999., 134 s.
- [3] BOBČÍK, Ladislav, a kolektiv. *Formy pro zpracování plastů 2: Vstřikování termoplastů*. 1 vyd. Brno: Uniplast, 1999., 214 s.
- [4] LENFELD, Petr. *Technologie2: Vstřikování plastů*. [online]. [cit2019-05-15]. Dostupné z www: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm
- [5] RYBNIKÁŘ, František. *Makromolekulární chemie*. Brno: Vysoké učení technické, 2000. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1556-8.
- [6] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [7] HIEMENZ, Paul C. *Polymer chemistry: the basic concepts*. New York: M. Dekker, c1984. ISBN isbn08-247-7082-x.
- [8] ODIAN, George G. *Principles of polymerization*. 4th ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2004. ISBN isbn04-712-7400-3.
- [9] MAŇAS M., HELŠTÝN J., Miroslav. *Výrobní stroje a zařízení. Gumárenské a plastikařské stroje II*. Brno: Vysoké učení technické, 1990. ISBN 80-214-0213-x.
- [10] SOVA M. KREBS J. *Termoplasty v praxi. Praktická příručka pro konstruktéry, výrobce, zpracovatele a uživatele termoplastů*. 2. Praha: Verlag Dashöfer, 2001. ISBN 80-8622-915-7.
- [11] VAŠÍČEK, E. *Chemické suroviny, učební texty, vydání druhé* [online]. 2. Střední odborná škola Otrokovice, 2009 [cit. 2019-05-15].
- [12] KŘENEK, Tomáš. *Polymerní materiály* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/Polymery_2010.pdf
- [13] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>

- [14] HUDCOVIČ, M. *Využití optimalizace vstřikovacího procesu při výrobě plastových dílů*. Zlín, 2008. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Michal Staněk, Ph.D.
- [15] LENFELD, P., *Technologie injekčního vstřikování* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/02.html>
- [16] TOMIS, František. *Základy gumárenské a plastikářské technologie*. 1992. Praha: SNTL, 1.vyd.1975. ISBN 414-33543.
- [17] BOBEK, František. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/01.html>
- [18] ŠTĚPEK, Jiří, Antonín KUTA a Jiří ZELINGER. *Technologie zpracování a vlastnosti plastů* [online]. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989 [cit. 2019-05-14].
- [19] LENFELD P., Technická univerzita Liberec : *Zpracování plastů* [online]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm
- [20] SEIDL M., *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/03.html>
- [21] REOLOGIE [online]. Ústav fyziky a mat. inženýrství Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_03.pdf
- [22] KONTOPOULOU, Marianna. *Applied polymer rheology: polymeric fluids with industrial applications*. Hoboken, N.J.: Wiley, c2012. ISBN isbn978-047-0416-709.
- [23] MAŇAS, Miroslav a Jiří VLČEK. *Aplikovaná reologie*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-7318-039-1.
- [24] MOTYKA, ANDREA. *An introduction to rheology with emphasis on application to dispersions*. *Journal of Chemical Education*. [online] Easton American Chemical Society, ročník 73 (č.4), s.374. [cit. 2015-05-15].
- [25] BEAUMONT, J., R. SHERMAN a R NAGEL. *Successful injection molding*. Munich: Hanser Publishers, 2002. ISBN 3-446-19433-9.
- [26] BĚHÁLEK, Luboš. *Reologie tavenin termoplastu v praxi* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/35064912-Reologie-tavenin-termoplastu-v-prumyslove-praxi.html>

- [27] SCHWARTZ, M. a P. VONDRÁČEK. *Zkoušení polymerů*. Praha: SNTL, 1979.
- [28] DUŠEK, J. *Tvrdość, mikrotvrdość, nanotvrdość-čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008. Dizertační práce. Masarykova univerzita v Brně. Vedoucí práce Prof. RNDr. Vladislav Navrátil, CSc.
- [29] HORÁČEK, J. *Nauka o materiálu (návody na cvičeni)* [online]. 2. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2004 [cit. 2019-05-15].
- [30] Indentation Software manual. *CSM Instrument* [online]. Peseux, Switzerland [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.csm-instruments.com>
- [31] OVŠÍK, M. *Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů* [online]. [cit. 2019-05-15]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. David Maňas, Ph.D.
- [32] BALTA-CALLEJA, F. J. a Stoyko FAKIROV. *Microhardness of polymers*. Cambridge, [England]: Cambridge University Press, 2000. ISBN 0-521-64218-3.
- [33] KUBOUŠEK, *Technologies and instruments* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.kubousek.cz/cz/divize-kraussmaffeivstrikovaci-stroje/rada-ex/uzaviraci-jednotka.html>
- [34] KRŽÍŽ A., *Rozdělení a označení ocelí* [online]. ZČU FST Plzeň, 2011 [cit. 2019-05-15].
- [35] SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů*[online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/06.html>
- [36] CROW, *polymer properties database: Flow properties of polymer*[online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Viscosity2.html>
- [37] TECHNICKÝ PORTÁL.CZ: *ARBURG, Plastimagen 2019* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/plasty/arburg-na-mezinarodni-vystave-a-konferenci-plastimagen-2019_46329.html
- [38] STANĚK, M. *Vliv technologických parametrů na zatékavost polymerů*. Zlín, 2017. Dizertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, ISBN 978-80-7454-674-7.
- [39] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha, 2005.

- [40] ARBURG [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_ALLROUNDER_470C_GOLDEN_EDITION_TD_529453_en_US.pdf
- [41] Material Data Center PP Borealis [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=059054793d9f487dbef9e9cb75edf3da>
- [42] FLUXA, Petr. *Vliv povrchu formy na zatékavost polymeru*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2018, 77 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/42329>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Staněk, Michal.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

F	Zatěžující síla
F _{max}	Maximální zatěžující síla
E	Youngův modul
E _{IT}	Vtiskový modul
E*	Komplexní modul
E _r	Redukovaný modul
E _i	Modul vnikajícího tělesa
ν_i	Poissonův poměr vnikajícího tělesa
ν_s	Poissonův poměr zkoušeného tělesa
C _{IT}	Vtiskové tečení (creep)
H _{IT}	Vtisková tvrdost
H _{VIT}	Tvrdost dle Vickerse
n _{IT}	Koeficient zpětné relaxace
W _e	Elastická deformační práce
W _p	Plastická deformační práce
W _t	Celková deformační práce
PP	Polypropylen
DSI	Instrumentovaná zkouška tvrdosti
ČSN	Označení českých norem
EN	Označení evropských technických norem
ISO	Zkratka mezinárodní organizace pro normalizaci
PE	Polyetylen
PA6	Polyamid 6
POM	Polyoxymetylén

T _m	Teplota tání
T _g	Teplota zesklnění
PS	Polystyrén
PC	Polykarbonát
PMMA	Polymethylmethakrylát
PVC	Polyvinylchlorid
SAN	Kopolymerstyrenakrylonitril
UP	Polyesterové pryskyřice
EP	Epoxidové pryskyřice
PF	Fenolformaldehydové pryskyřice
PVC	Polyvinylchlorid
PEI	Polyetherimid
PSU	Polysulfon
PBI	Polybenzenimid
PPS	Polyfenylénsulfid
PI	Polyimidy
PTFE	Tetrafluoretylén
HRC	Zkouška tvrdosti dle Rockwella
P-V-T	Tlak-Měrný objem-Teplota
G	Elasticita
η	Viskozita
τ	Relaxační doba
ITT	Index toku taveniny
MFR	Melt Flow Rate
MVR	Melt Volume Rate
H _M	Tvrdość dle Martense

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Základní rozdělení polymerů [1]</i>	13
<i>Obr. 2. Oblast využití u amorfních a semikrystalických plastů [4]</i>	14
<i>Obr. 3. Schematické znázornění molekulární struktury [4]</i>	16
<i>Obr. 4. Rozdělení polymerů dle aplikace, nadmolekulární struktury a ceny [13]</i>	17
<i>Obr. 5. Příprava syntetických polymerů [12]</i>	18
<i>Obr. 6. Fáze polymerace [11]</i>	19
<i>Obr. 7. Ilustrace disperze a procesů probíhajících v počáteční fázi emulzní polymerace.[8]</i>	21
<i>Obr. 8. Příklady vstříkovaných dílů [15]</i>	28
<i>Obr. 9. Proces Vstříkování [15]</i>	29
<i>Obr. 10. Cyklus vstříkování [16]</i>	30
<i>Obr. 11. Průběhy tlaku na jednotlivých místech výrobního zařízení [16]</i>	31
<i>Obr. 12. Vstříkovací stroj [17]</i>	32
<i>Obr. 13. Uzavírací jednotka [33]</i>	33
<i>Obr. 14. Jednoduchý kloubový mechanismus s hydraulickým pohonem, (a) otevřený, (b) uzavřený [35]</i>	34
<i>Obr. 15. Schéma kombinovaného uzavíracího systému [35]</i>	35
<i>Obr. 16. Vstříkovací jednotka [35]</i>	36
<i>Obr. 17. Řídicí systém [18]</i>	37
<i>Obr. 18. Maxwellův model viskoelasticity [24]</i>	38
<i>Obr. 19. Toková křivka [36]</i>	40
<i>Obr. 20. Fontánový tok [15]</i>	41
<i>Obr. 21. Výtlačný plastometr</i>	43
<i>Obr. 22. Schéma výtlačného plastometru [13]</i>	43
<i>Obr. 23. Schéma zkoušky spirálové zabíhavosti tavenin a Archimédova spirála [23]</i>	44
<i>Obr. 24. Indentační křivka</i>	45
<i>Obr. 25. Schematické znázornění chování materiálu [31]</i>	46
<i>Obr. 26. Kombinace podmínek přípravy zkušebních těles</i>	51
<i>Obr. 27. Granulát – PP Borealis BJ380MO</i>	52
<i>Obr. 28. ARBURG Allrounder 470 C Golden Edition [37]</i>	53
<i>Obr. 29. Označení zkušebních desek včetně fotografií povrchu (zvětšeno 50x) [42]</i>	55

<i>Obr. 30. Řez dutinou formy [38].....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 31. Mikrotvrdoměr – Micro Combi Tester</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 32. Oblasti měření</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 33. Přípravek pro měření délky zatečení zkušebních těles</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 34. 3D graf Závislosti délky zatečení na povrchu zkušebních desek a vstřikovacím tlaku materiálu PP Borealis BJ380MO.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 35. Vtisková tvrdost H_{IT} v závislosti na pozici měření.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 36. Vtisková tvrdost H_{IT} v závislosti na pozici měření.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 37. Vtisková tvrdost H_{IT} v závislosti na pozici měření - Deska s jemným dezénem</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 38. Vtisková tvrdost H_{IT} v závislosti na pozici měření – Broušená deska</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 39. Vtisková tvrdost H_{IT} v závislosti na pozici měření – Leštěná deska</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 40. Vtiskový modul E_{IT} v závislosti na pozici měření – Frézovaná deska</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 41. Vtiskový modul E_{IT} v závislosti na pozici měření – Deska s hrubým dezénem</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 42. Vtiskový modul E_{IT} v závislosti na pozici měření – Deska s jemným dezénem</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 43. Vtiskový modul E_{IT} v závislosti na pozici měření – Broušená deska</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 44. Vtiskový modul E_{IT} v závislosti na pozici měření – Leštěná deska.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 45. Creepové chování C_{IT} v závislosti na pozici měření – Frézovaná deska</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 46. Creepové chování C_{IT} v závislosti na pozici měření – Deska s hrubým dezénem</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 47. Creepové chování C_{IT} v závislosti na pozici měření – Deska s jemným dezénem</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 48. Creepové chování C_{IT} v závislosti na pozici měření – Broušená deska</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 49. Creepové chování C_{IT} v závislosti na pozici měření – Leštěná deska</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 50. Srovnání Vtiskové tvrdosti H_{IT} v závislosti na pozici měření</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 51. Srovnání Vtiskového modulu E_{IT} v závislosti na pozici měření.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 52. Srovnání Creepového chování C_{IT} v závislosti na pozici měření</i>	<i>77</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Požadované teploty formy během vstřikování u různých termoplastů [15] ...</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 2. Příklady použití typů ocelí na formy [34]</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 3. Vlastnosti vstřikovaného materiálu [41]</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 4. Technické parametry vstřikovacího stroje [40].....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 5. Technologické parametry PP pro vstřikování</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 6. Nastavení teplot PP pro vstřikování</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 7. Povrchy zkušebních desek [38]</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 8. Naměřené hodnoty zatékavosti při různých tlacích</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 9. Naměřené odchylky hodnot zatékavosti při různých tlacích</i>	<i>60</i>

SEZNAM PŘÍLOH

- P1 CD obsahující
- Diplomovou práci (.pdf)
 - Naměřené hodnoty (.xlsx)
 - Materiálový list PP Borealis BJ380MO