

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta – Katedra fyziky

Technologie vstřikování termoplastů

Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. František Špulák

Autor: Jiří Bastl

Anotace

Bakalářská práce se zabývá charakteristikou technologie vstřikování termoplastů. Pojednává o důležitých faktorech nejrozšířenějšího způsobu výroby dílů z plastických hmot. Práce se také věnuje modelování ve 3D programu a postupem tvorby konkrétního dílu vstřikovacího stroje v jednotlivých krocích.

Klíčová slova: plasty, termoplasty, vstřikovací stoj, 3D modelování

Abstract

This thesis describes technology of injection of thermoplastics and disserts upon important factors of mass production of plastic components. The document also illustrates modeling in 3D software application and step by step explains production of a part of an injection molding machine.

Key phrases: plastic, thermoplastic, injection molding machine, 3D modeling

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě - v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných pedagogickou fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích dne 25. listopadu 2009

.....
Jiří Bastl

Poděkování

Rád bych touto formou poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce RNDr. Františku Špulákovi za vedení, rady a připomínky, které mi v průběhu zpracování práce poskytl.

OBSAH

1. Plasty	7
1.1 Vlastnosti plastů	7
1.1.1 Výhodné vlastnosti plastů	7
1.1.2 Nevýhodné vlastnosti plastů	9
1.2 Termoplasty	10
1.2.1 Rozdělení a charakteristika vybraných termoplastů	10
2. Technologie zpracování termoplastů vstřikováním	20
2.1 Plastikace	21
2.2 Vstřikování taveniny do formy	22
2.3 Dotlačování	23
2.4 Chlazení vylisku ve formě	24
3. Vlastnosti toku taveniny	26
3.1 Viskozita	26
4. Řízení a regulace vstřikovacího procesu	30
4.1 Řízení programovanou vstřikovací rychlostí	33
4.2 Řízení závislé na tlaku taveniny v dutině formy	34
4.3 Řízení systémovým tlakem hydraulického oleje	35
4.3.1 Regulace čerpadlem	36
4.3.2 Regulace servoventilem	37
5. Odvzdušnění formy	41
5.1 Dieselův efekt	42
6. Chlazení formy, způsoby odvodu tepla	44
6.1 Tepelná bilance formy	44
6.2 Rozmístění temperančních kanálů ve formě	45
7. Sušení termoplastů	49
8. Modelování a tvorba výkresové dokumentace vstřikovacího stroje	52
8.1 Postup modelování součástí	53
8.2 Tvorba výkresu součástí	61

ÚVOD

Technologie vstřikování termoplastických hmot prodělala od svých počátků až do dneška velmi dynamický vývoj - zejména v druhé polovině dvacátého století.

Předkládaná bakalářská práce si klade za cíl z několika pohledů charakterizovat technologii výroby dílů vstřikováním termoplastů. Jedná se o velmi důležitý způsob výroby dílů především v automobilovém a elektronickém průmyslu, kde i poměrně složité vylisky jsou z taveniny termoplastu hotovy během několika desítek sekund.

Úvodní část práce představuje vybrané nejrozšířenější termoplasty, jejich vlastnosti a použití. Mimo jiné zde vyplývá, že termoplasty nacházejí díky přizpůsobivosti svých vlastností uplatnění ve všech oborech lidské činnosti.

Následující kapitola má za úkol seznámit čtenáře s jednotlivými fázemi technologie vstřikování: Jde o proces změny polotovaru (plastových granulí), kdy dochází za spolupůsobení teploty a tlaku k postupnému roztavení granulí. Druhou fází představuje samotné naplnění tvarové dutiny formy taveninou následované třetím krokem - dotlačováním ubývajícího objemu plastu v chladnoucí dutině formy. Poslední fází je chladnutí vylisku před vyjmutím z formy.

Znalost vlastností toku tavenin termoplastů je důležitá jak pro výrobce a zpracovatele termoplastických hmot, tak pro výrobce forem a vstřikolisů. O viskozitě jako nejdůležitější tokové charakteristice pojednává kapitola třetí.

Kapitola čtvrtá se zabývá používanými způsoby řízení procesu vstřikování. Jde o řízený průběh plnění dutiny formy taveninou.

Podmínkou žádoucího naplnění dutiny taveninou je odvedení vzduchu ze všech partií, která mají být plastem vyplněna. To je předmětem následující kapitoly.

Vystříknutý vylisek musí být ochlazen na takovou teplotu, aby mohl být vyjmut z formy bez poškození a deformací. O procesu ochlazování pojednává šestá kapitola.

Jakost výrobků z termoplastů ovlivňují nejen výše uvedené faktory, ale i obsah vody v polotovaru (granulích). Předposlední kapitola se zabývá problematikou sušení granulátu. Ten musí mít před vstupem do plastikačního válce vlhkost výrobcem doporučenou.

Závěr práce tvoří příklad modelování dílu vstřikovacího stroje. Děje se v prostředí 3D programu IDEAS. Z vytvořeného modelu lze snadno automaticky vygenerovat hlavní výkresové pohledy a dokončit tím výkresovou dokumentaci dílu.

1. Plasty

Plasty neboli polymery představují látky, jejichž strukturu tvoří makromolekulární řetězce (makromolekula = molekula řetězovitého typu tvořená tisíci až miliony atomů). Například kovy mají strukturu zcela odlišnou, tvořenou krystalickými mřížkami. Plasty dělíme na dva základní druhy:

- **termoplasty**, mají řetězce přímé (lineární polymery), nebo řetězce s bočními větvemi (rozvětvené polymery). Při ohřevu termoplastů dochází k uvolnění soudržnosti řetězců a hmota se stává viskózní. V tomto stavu ji můžeme tvářet. Po ochlazení se vrátí do původního pevného stavu.

- **reaktoplasty**, mají v konečné fázi zpracování řetězce příčně propojeny chemickými vazbami a vytváří prostorovou trojrozměrnou síť. Ohřevem tato síť zvětšuje svoji pohyblivost, avšak řetězce se zcela neuvolní. Při tváření vlivem teploty a tlaku nastává zesíťování (vytvrzování) plastu (někdy i za spolupůsobení katalyzátoru). Jsou-li původní řetězce velmi ohebné a hustota sítě je přiměřená, je hmota za normální teploty poddajná a pružná. Takové materiály nazýváme elastomery.

Nejrozšířenějším elastomerem je přírodní nebo syntetický kaučuk, u něhož dodáním síry + dalších přísad a následným ohřevem dojde k zesíťování (síra se naváže na dvojné vazby butadienového řetězce) a vznikne pryž. Proces nazýváme vulkanizací. Jakmile je chemický proces ukončen, další tváření již není možné.

Při nadměrném ohřevu se u obou druhů polymerů přetrhají chemické vazby, dojde k rozrušení hmoty a ztrátě pevnosti. Tento proces je nevratný a nazýváme jej degradace hmoty. Další zpracování již nepřipadá v úvahu.

1.1 Vlastnosti plastů

Obecné vlastnosti plastů jsou ty vlastnosti, které nacházíme u všech nebo u převážné většiny plastů. Obvykle jsou členěny na výhodné a nevýhodné. Kritériem takového členění jsou aspekty technické, což znamená, že některá vlastnost může být z jednoho pohledu výhodná a z jiného naopak nevýhodná.

1.1.1 Výhodné vlastnosti plastů

Mezi výhodné vlastnosti plastů patří například: malá hustota, stálost vůči vodě, velká chemická odolnost a odolnost proti korozi, nízká tepelná vodivost, nízká zvuková

vodivost, nevedou elektrický proud, možnost barvení ve hmotě, snadné zpracování, fyziologická nezávadnost, pružnost a odolnost vůči biologickým činitelům.

Hustota plastů se pohybuje v rozmezí 900-2200 kg.m⁻³. Z toho vyplývá malá hmotnost výrobků z plastů v porovnání s výrobky např. ze železných kovů.

Téměř všechny plasty **odolávají vodě**. Proto je můžeme využívat například jako izolace staveb proti vlhkosti a na nádoby s vodou.

Velká **chemická odolnost a odolnost proti korozi** - plasty jsou vysoce odolné vůči kyselinám a i zásadám. Proto nachází uplatnění při výrobě nádob na chemikálie a při výrobě potrubí v chemických provozech. U plastů se nesetkáme s korozi.

Nízká tepelná vodivost předurčuje využití plastů jako tepelné izolující materiály ve stavebnictví. V závislosti na druhu termoplastu se efektivní součinitel vedení tepla a_{ef} pohybuje v rozmezí 0.050÷0.100 mm².s⁻¹ [10].

Nízká zvuková vodivost dává možnost využívat plasty v oblasti zvukově izolujících materiálů.

V elektrotechnice využíváme, že plasty **nevedou elektrický proud**. Jsou nazývány izolanty nebo dielektrika. Vyrábíme z nich izolace vodičů, pouzdra elektrotechnických zařízení atd. Nevodivost plastů způsobuje obtížnější přesun nábojů, jež je zaznamenán v kovech. Elektrická nevodivost však neplatí zcela, záleží na rozdílu potenciálů. Od určitého rozdílu potenciálů může i v plastech vodivost nastat.

Většinu plastů **můžeme barvit**. Proto odpadá dodatečná povrchová úprava výrobků z plastů. Zpravidla lze plasty vybarvit jakýmkoliv barvami. Na světlé odstíny barev nemůžeme vybarvit ty plasty, jež mají hnědou až černou nebo šedou barvu.

Plasty **snadno zpracováváme obráběním a tvarováním**. Tyto technologické možnosti vychází z jejich měkkosti. Část plastů lze obrábět nástroji na obrábění dřeva. Avšak při ručním i strojním obrábění musíme počítat s malou tepelnou vodivostí plastů. Teplota není z místa kontaktu nástroje s materiálem odváděna, a proto se plast zahřívá a může dojít k jeho tavení. Teploty tvarování se pohybují zhruba v rozmezí od 80 °C do 140 °C.

Mezi další významné vlastnosti plastů řadíme **pružnost, houževnatost** a v podstatě **nerozbitnost**. Uvedené vlastnosti předurčují plasty k výrobě předmětů, které mají odolávat nárazům, pádům apod.

Odolnost vůči biologickým činitelům (bakteriím, plísním, houbám, hmyzu a hlodavcům) je vlastností všech plastů. Tato vlastnost činí plasty téměř nezničitelné přírodními postupy. Plast odhozený v přírodě vydrží řádově stovky let – tuto vlastnost mu-

síme mít v patrnosti především z ekologického hlediska. Zmíněná vlastnost přispívá k tomu, že se vyvíjí plasty s tzv. „časově řízenou degradací“ – tyto polymery se po určité době samovolně rozpadnou. Začátek degradace signalizuje změna barvy.

1.1.2 Nevýhodné vlastnosti plastů

Do této skupiny řadíme: malou tepelnou stálost, velkou tepelnou roztažnost, měkký povrch, hořlavost, tvorbu elektrostatického náboje a nízkou odolnost vůči ultrafialovému záření.

Na malou tepelnou stálost narážíme zejména u termoplastů. Může činit problémy při zpracování plastů.

Velká tepelná roztažnost - plasty mají nezvykle vysoký koeficient zejména tepelného prodloužení. Délková teplotní roztažnost α se při teplotách 20÷50 °C pohybuje v rozmezí $2,5 \cdot 10^{-5}$ až $23 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [4].

Mnoho druhů plastů má **měkký povrch**. Tuto vlastnost je třeba brát na zřetel zejména při údržbě výrobků z plastů (zejména termoplastů). Vyšší tvrdost mají reaktoplasty.

Převážná část plastů je hořlavá. Některé velmi prudce vzplanou. Nebezpečí hrozí vznikem toxických plynů při spalování. To omezuje možnost likvidace plastů spalováním. Hořlavost plastů se snižuje, popř. odstraňuje přidáním halogenových sloučenin převážně na bázi bromu.

Velmi nepříjemným až nebezpečným jevem je **tvorba elektrostatického náboje** známá například u oděvů a předmětů v domácnosti. Tvorbu elektrostatického náboje lze zamezit přidáním vhodných přísad na bázi molekulárních kovů, nejčastěji mědi.

Životnost výrobků z plastů ve venkovních podmínkách snižuje **nízká odolnost vůči ultrafialovému záření**.

Základní vlastnosti polymerů se mohou měnit i vlivem nejrůznějších přísad a tím splnit požadavek volby vhodného plastu. Jako přísady se používají:

- plniva vláknitá svým charakterem mění především fyzikální i mechanické vlastnosti plastu. Vláknitá plniva především vyztužují hmotu a zvětšují její pevnost.
- změkčovadla přidáváme k některým tvrdým polymerům pro získání měkkosti a ohebnosti;
- barviva slouží k dosažení žádaného barevného odstínu;
- stabilizátory zlepšují některé vlastnosti, např. odolnost proti vyšším teplotám při jejich

zpracování, proti DV záření (dlouhé vlny, 30-300 kHz), stárnutí atd.;

- nadouvadla uvolňují při zpracování plyny a vytváří tak lehčenou strukturu plastu se svými zvláštními vlastnostmi. [3]

1.2 Termoplasty

Termoplasty, jakožto nejrozšířenější, jsou plasty teplem tavitelné. Skládají se z lineárních, rozvětvených či prostorových makromolekul. Výrobci dodávají termoplasty ve formě granulí, prášků, desek, bloků, vláken a profilů. Tyto plasty působením zvýšené teploty na hranici teploty tání měknou. Za tohoto plastického stavu se dají tvarovat ohýbáním, tažením, lisováním a vyfukováním. Dalším zahříváním přechází do kapalného skupenství, kde je lze zpracovávat jinými technologiemi (např. vstřikováním). Ochlazením opět ztuhnou, aniž by se podstatně změnily jejich původní vlastnosti. Jde o fyzikální proces, který lze stále opakovat.

Teploty měknutí se pohybují v rozmezí zhruba od 40 °C do 80 °C.

Teploty tvarování se pohybují zhruba v rozmezí od 80 °C do 140 °C.

Teploty tavení začínají přibližně hodnotou 190 °C, záleží na druhu plastu. Musíme si uvědomit, že při dosažení teploty, která se blíží hranici měknutí, se mění všechny mechanické vlastnosti termoplastů. Vzhledem k tomu, že nejde o vysoké teploty, je třeba s tím při používání výrobků z termoplastů počítat. Již sama teplota vzduchu v letních měsících se této kritické teplotě pro mnohé termoplasty blíží.

1.2.1 Rozdělení a charakteristika vybraných termoplastů

Z hlediska složení dělíme termoplasty na následující:

- **homopolymery**, jejichž řetězec tvoří jen jeden druh základní chemické skupiny.
- **kopolymery**, které jsou složeny z více druhů základních chemických skupin.

Vzhledem k vnitřní struktuře rozdělujeme termoplasty následovně:

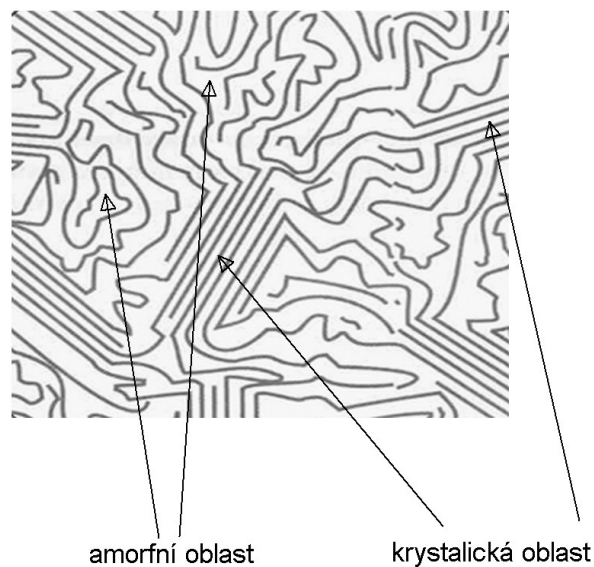
- **amorfní**, jejichž řetězce jsou nepravidelně prostorově uspořádány, např. PS, ABS, PVC, PC, PMMA.

Využitelnost výrobků z amorfních plastů se nachází v oblasti pod teplotou skelného přechodu (T_g). Ve sklovitém stavu pod teplotou T_g musíme amorfní plasty též vyjmát z formy. Polymer je v tomto stavu pevný. Zvyšováním teploty nad T_g postupně slábnou kohezní síly mezi makromolekulami a plast přechází do plastické oblasti (tzv. kaučukovitý stav). Při dalším ohřevu nastupuje viskózní stav, kdy plast zpracováváme. Se zvy-

šování teploty současně narůstá i objem polymeru. Teplota skelného přechodu např. pro PS je v rozmezí 90÷100 °C, pro PMMA kolem 100 °C, pro ABS v rozmezí 105÷115 °C.

- **semikrystalické**, kde je podstatná část řetězců pravidelně a těsně uspořádána a tvoří krystalické útvary. Zbytek má amorfni uspořádání. Patří sem např. PE, PP, POM, PA, PET.

U semikrystalických plastů jsou části makromolekul vázány pevněji v lamelách a ve sferolitech krystalické fáze. Zvyšováním teploty se nejprve uvolní část makromolekul z amorfni oblasti, potom i ostatní. To je doprovázeno značným objemovým nárůstem. Plasty tohoto typu používáme v oblasti mezi teplotami T_g a T_m (T_m - teplota tání krystalického podílu), protože zde mají výhodnou kombinaci pevnosti a houževnatosti. Ve stavu mezi teplotami T_g a T_m zároveň vyhazujeme výlisky z formy. Teplota skelného přechodu např. pro PE je -80 °C, pro PA6 je +45 °C, pro PP je -20 °C. [4]



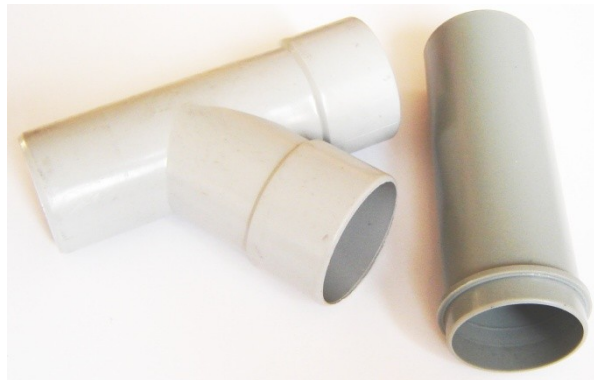
Obr. 1.1 Struktura semikrystalického plastu s vyznačenou oblastí amorfni a krystalickou

Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid se získává z těchto surovin: voda, uhlí, vápno a kyselina chlorovodíková. Z těchto látek se vyrobí vinylchlorid a ten se potom polymeruje na polyvinylchlorid. Vzniká jako rohovitá, bezbarvá a průhledná hmota, kterou lze libovolně barvit. Plast může být vyroben v libovolné měkkosti podle obsahu změkčovadel (mohou tvořit až 50 %). Rozlišujeme tvrdý PVC a měkký PVC. Tvrdý (neměkčený) má obchodní název novodur a měkčený novoplast, igelit. Neměkčený se používá k výrobě

mnoha výrobků - nádoby, desky, tyče, trubky apod. Měkčený se používá k výrobě fólií, ubrusů, pláštěnek, obalů, podlahových krytin apod. PVC je také známý jako modelovací hmota modelit, modurit. Tuhne při teplotách 100-150 °C.

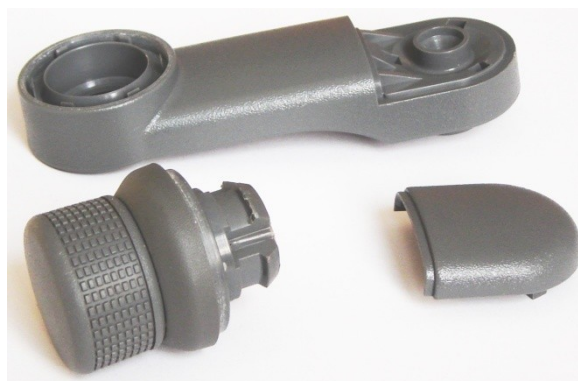
Tvrký PVC má relativně vysokou hmotnost. Je tvrdý, tuhý a poměrně křehký s nízkou tepelnou odolností (85 °C). Dá se velmi dobře barvit, lepit a svařovat.



Novodurové odpadové fitinky

Polyformaldehyd (POM polyoxymetylen)

Jedná se o klasický konstrukční termoplast s vysokou hustotou (1410÷1430 kg.m⁻³). POM vyniká zejména pevností, odolností proti otěru a dobrými elektroinstalačními vlastnostmi. Vlastnosti, které jsou charakteristické pro kovy, umožňuje POMu vysoce krystalická struktura. Neodolává silným kyselinám a oxidačním činidlům.



Díly klíčky stahování oken automobilu z POMu

Polystyren (PS)

Polystyren vzniká polymerací styrenu (vinylbenzenu). Je to čistý amorfní plast čirý jako sklo, tvrdý, křehký a odolný vůči teple do +70 °C. Lze jej libovolně barvit. Má téměř nulovou nasákavost. Je odolný vůči vodě, alkáliím, kyselinám, louhům, solím i proti alkoholu. Aromatická rozpouštědla ho však narušují. Nestabilizované typy podléhají povětrnostním vlivům ve středoevropských podmínkách po 1 až 2 letech (žloutnou). Polystyren lze snadno opracovávat, lepit, svařovat a brousit. Smícháním s vhodnými nadouvadly vzniká lehčený (pěnový) polystyren. Při lepení pěnových polystyrénových desek musíme používat speciální lepidla. Jinak dochází k rozpouštění polystyrenu.

Z normálního polystyrenu se vyrábí výrobky běžné denní spotřeby – kelímky, obaly na potraviny apod. Pěnový polystyren se používá k tepelným izolacím (ve stavebnictví, ledničky). Vyrábí se z něj také obaly na zboží, přístroje atd.



Spodní polystyrénový díl pouzdra nosičů CD/DVD

Akrylonitril-butadien-styren (ABS)

Jedná se o polystyrénový houževnatější plast. Vykazuje poněkud menší odolnost vůči atmosférickým vlivům. Tím je určen pouze pro vnitřní použití. Tepelnou odolnost má v rozmezí -30÷80 °C, speciální typy do cca 120 °C.



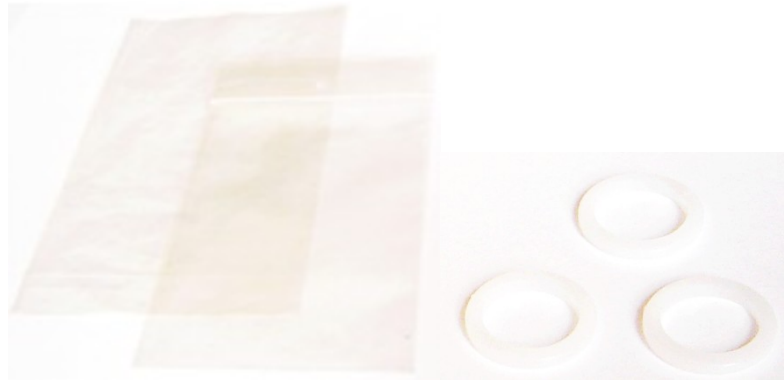
Schránka automobilového interiéru z ABS

Polyetylen (PE)

Polyetylen se vyrábí tlakovou polymerací etylenu. Je to čirá až mléčně zbarvená hmota, zdravotně naprosto nezávadná. Za normální teploty není rozpustná v žádném rozpouštědle. Teprve při zvýšené teplotě se rozpouští v toluenu a xylenu. Za normální teploty také odolává kyselinám a zásadám. Odolává působení vody, nepropouští vodní páry, ale propouští plyny - kyslík, oxid uhličitý, vzduch. Není odolný vůči ultrafialovému záření. Je to jeden z nejlehčích plastů (má hustotu 920 kg.m^{-3}). Používá se na výrobu výrobků pro domácnost, desek, folií, tyček, trubek atd. Polyetylenové folie jsou jeden z nejkvalitnějších obalových materiálů. Vzhledem ke své vynikající chemické odolnosti se tento polymer používá také jako velmi kvalitní antikorozní materiál.

Polyetylen nízkohustotní (PE-LD) - je měkký, pružný a houževnatý plast. Křehne pod $-60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a odolává teplotám do $85 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Má velmi dobrou chemickou odolnost a elektroisolační vlastnosti. Méně odolný je proti povětrnostním vlivům. Tato vlastnost se zlepší naplněním aktivními sazemí. Při zaformování se musí uvážit měkkost a pružnost dílců a podle toho konstruovat vyhazování z formy. Snadno překoná negativní úkosy i dočasné deformace tvaru.

Polyetylen vysokohustotní (PE-HD) - je tužší, méně houževnatý než PE-LD. Má vynikající chemickou odolnost. Při zatížení má sklon ke korozi za napětí. Ostatní vlastnosti obdobné jako PE-LD.



Sáčky (PE-LD)

Záclonové kroužky (PE-HD)

Polypropylen (PP)

Polypropylen patří k nejmladším plastům. Výchozí surovinou je propylen (propen), získávaný z propanu, který je obsažen v zemním plynu a v rafinačním plynu při zpracování ropy. Způsobem výroby i použitím se velmi podobá polyetylenu (v porovnání s PE je však tvrdší a tužší). Je velmi lehký (hustota $900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) bezbarvý, fyziologicky nezávadný, povrchově tvrdý) a tepelně odolný. Krátkodobě snáší tepelné zatížení až $140 \text{ }^\circ\text{C}$. Je vysoce odolný vůči chemikáliím a rozpouštědlům. Vyniká výbornými dielektrickými vlastnostmi. Má však nízkou houževnatost za nižších teplot. Pro venkovní použití musí být stabilizován. Při zpracování vykazuje nejnižší závislost na kolísání technologických parametrů.

Používá se na výrobu obalů v potravinářství, výrobu fólií a desek, vláken pro výrobu technických tkanin i pro ruční pletení a výrobu kobereců. Hojně nachází využití při výrobě hraček, nádob, součástí elektrických spotřebičů apod.



Vrchní polypropylenový díl pouzdra nosičů CD/DVD

Akrylátové sklo (PMMA)

Akrylátové sklo se vyrábí z ropy a zemního plynu. Plast je čirý jako sklo, tvrdý, velmi lesklý, stálý na světle a velmi odolný proti nárazu. Oproti běžnému sklu není tak křehký a má poloviční hmotnost a větší houževnatost i pevnost v ohybu. Je však náchylnější k poškrábání a není tak tvrdý. Je odolný vůči všem běžným chemikáliím, ale je napadán téměř všemi rozpouštědly (zejména aceton a chloroform). Nárazem sice praská, ale nevytváří ostré a nebezpečné stěpy jako silikátové sklo. V silných vrstvách je neprůstřelný. Je zdravotně nezávadný. PMMA lze obrábět, brousit, lepit a při teplotě 140-160 °C v plastickém stavu snadno tvarovat. Do 90 °C je tvarově stálý.

Používá se k zasklívání oken do letadel, na výrobu ochranných štítů, v automobilovém průmyslu, k výrobě optických čoček, zubních protéz, ochrany dveří atd. V obchodech se prodává pod názvy plexisklo, nebo organické sklo.



Ploskovypuklá čočka z plexiskla

Polyamidy (PA)

Polyamidy patří ke konstrukčním plastům. Vynikají dobrou zatékavostí. Používají se s nejrůznějšími plnivými. Polyamidy se vyrábějí z uhlí, vznikají polykondenzací. Nebarvené vypadají mléčně bíle, až nažloutle. Jsou velmi nepoddajné a odolné proti otěru. Jsou odolné vůči běžně užívaným rozpouštědlům a chemikáliím s výjimkou kyselin a louhů. Lze je obrábět, lepit a svařovat.

Používají se na výrobu mechanicky namáhaných nábytkových doplňků (např. západky u dveří a kluzáky u posuvných dveří). Dále potom na výrobu textilních vláken, hřebenu, obrouček k brýlím. Polyamidové tkaniny se používají jako ploché textilní řemeny, polyamidové provazy jako vložky do klínových řemenů. Vstřikováním se vyrábí různé technické výlisky - ozubená kola, samomazná ložiska atd. Vyrábí se z nich polotovary - desky, tyče a trubky.

Polyamid 6 (PA 6) - patří k nejhouževnatějším, avšak nejvíce navlhavým PA. Má malý

koeficient tření a výbornou odolnost proti otěru, nízkou hodnotu tečení, tzv. creep (pomalá plastická deformace materiálu vyvolaná dlouhodobým působením teploty a času) a použitelnost v širokém intervalu teplot.

PA 6.10 - má poněkud nižší pevnost, ale i nižší navlhavost. Je vhodný pro přesné výstřiky.

PA 6.6) - velmi pevný, odolný proti opotřebení. Ve vysušeném stavu není tak křehký jako PA6.

PA 11, PA 12 - jsou nenavlhavými typy PA. Nižší pevnost oproti PA 6.6. Jsou houževnaté i za mrazu a vykazují dobrou rozměrovou stabilitu. Proto jsou vhodné pro rozměrově přesné výstřiky.

Polyamidy se v hojné míře plní skelnými mikrovláknny anebo sklem ve formě mikroskopických kuliček.



Dvoudílná objímka – držák cyklistické svítilny, materiál PA6

Polykarbonát (PC)

Polykarbonát je produkt kondenzace. Základními surovinami jsou uhlí a zemní plyn. Čistý plast je čirý jako sklo, tvrdý, pevný, elastický s vynikající rázovou a vrubovou houževnatostí. Jeho mechanické vlastnosti (zejména houževnatost) je možné zesílením skleněnými vlákny ještě zlepšit, takže může téměř nahradit kovový materiál. Je odolný vůči kyselinám, alkoholu, benzínu, tukům a olejům. Louhy tento plast ničí. Je nehořlavý a odolný proti povětrnostním vlivům. Lze ho leštit, obrábět, lepit, svařovat i sbíjet. Tepelná odolnost je až do 135 °C. Křehne při -140 °C. Má velmi nízkou nasákavost a výborné dielektrické vlastnosti. Dlouhodobé působení vody nad 60 °C vyvolává destrukci. V průběhu času dochází k barevným změnám (žloutne). Vyšší viskozita taveniny způsobuje obtížnější vstřikování. Má sklon k vnitřnímu pnutí. Je vhodný pro přesné výstřiky.

Používá se na výrobu silně namáhaných dílů např. nábytkového kování a krytů elektrických přístrojů (např. vrtaček). V automobilovém průmyslu se s polykarbonátem

setkáme u reflektorů, blinkrů atd. Ve formě průhledných desek se používá jako nerozbitné stavební díly - např. výplně schodišťových zábradlí a pro neprůstřelné zasklí vání přepážek.



Polykarbonátová deska

Polytetrafluoretylen (PTFE)

Polytetrafluoretylen vzniká polymerací tetrafluoretylenu. Je to jeden z chemicky i termicky nejodolnějších plastů. Tvoří bílou hmotu, která má vzhled parafinu. Je odolný proti vodě, organickým rozpouštědlům, kyselinám i zásadám. Je fyziologicky nezávadný. Je narušován pouze roztavenými alkalickými kovy. Je trvale použitelný v rozmezí teplot -100 až +200 °C. Pružnost je zachována v rozmezí teplot -270 až +260 °C. To je největší teplotní odolnost z termoplastů. Má velmi nízký koeficient tření a snadno se odírá. Je jedním z nejtěžších plastů (má hustotu 2200 kg.m⁻³).

Používá se na výrobu trvanlivých samomazných ložisek a ochranných povlaků. Velmi rozšířené je kuchyňské nádobí, na kterém je nanesena vrstva teflonu a vypálená při teplotě až 400 °C. Vlákna z polytetrafluoretylenu se používají na speciální izolace kosmických raket a tvoří důležitou součást obleku kosmonautů.



Teflonové těsnění příruby

Polysulfon (PSU)

Patří mezi amorfny plasty. Má vysokou tepelnou odolnost (do 175 °C). Má velkou pevnost, tuhost a houževnatost, velmi nízký creep, ale je citlivý na vruby. Bobtná a rozpouští se v některých organických rozpouštědlech. Tokové vlastnosti i smrštění jsou obdobné jako u PC a proto lze použít i stejných forem.

PSU používáme k výrobě dílů místo nerezavějících ocelí, elektronu apod.

Acetát celulozy (CA)

Jedná se o amorfny transparentní plast, odolný proti poškrábání, houževnatý a lehce barvitelný. Má hezký vzhled, nepodléhá korozi pod napětím a výstřiky neobsahují vnitřní pnutí. Z důvodu nízkého elektrostatického náboje zachovává čistý povrch. Nevýhodou je značná navlhavost.

Acetocelulozové plasty mají nejhorší chemické vlastnosti. Zpracování těchto hmot je snadné. [3]

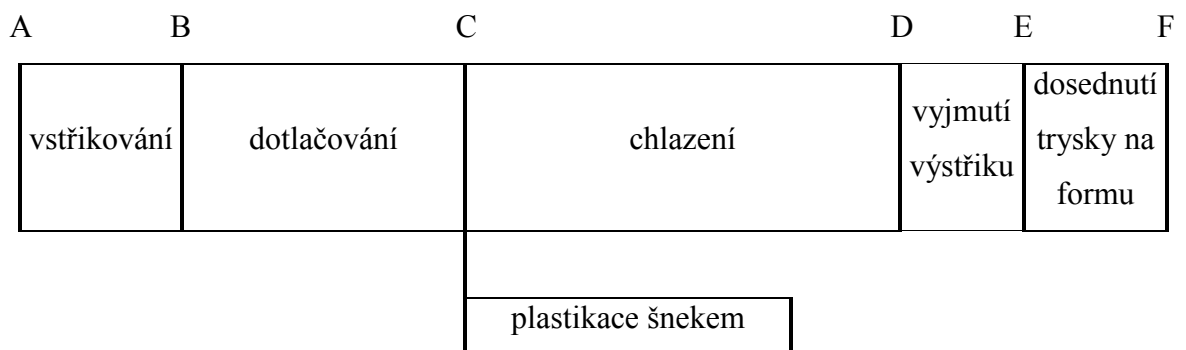
2. Technologie zpracování termoplastů vstřikováním

Technologie zpracování termoplastů vstřikováním je specifická „kompletností“, tj. za relativně velmi krátký čas vznikne hotový použitelný výrobek (nazýváme rovněž výstřík, výlisek). Samozřejmě musíme respektovat přirozené chování vstupního materiálu (ten má zpravidla podobu granulátu), aby po zpracování setrval v požadovaném tvaru.

Vstřikovací proces lze rozdělit na následující hlavní fáze:

- plastikace materiálu v tavném válci
- vstříknutí taveniny do formy
- dotlačování taveniny a její chlazení ve formě
- vyjmutí výstříku z formy.

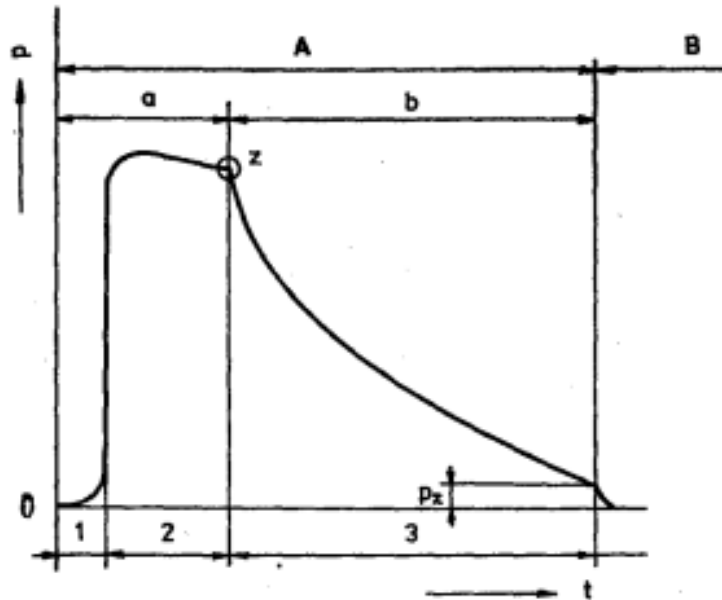
Časový průběh vstřikovacího cyklu je znázorněn na obr. 2.1. Vstřikovací čas A-B je velmi krátký - jen u velkých výstříků dosahuje několika sekund. Čas dotlačování B-C se pohybuje mezi 10 až 20 s. Čas chlazení C-D, který bývá nejdelší, může být u velkých výstříků i několik minut. V bodě C dojde k zatuhnutí vtoku (= konec dotlačování), šnek začne otáčením plastifikovat další materiál (v případě uzavíratelných trysek se plastikační jednotka odsune od formy). V intervalu D-E je otevřena forma, vyjmut výstřík a forma zavřena. V intervalu E-F plastikační jednotka znovu dosedá na formu a může být zahájen další cyklus.



Obr. 2.1 Časový průběh vstřikovacího cyklu

Průběh tlaku v dutině formy je schematicky znázorněn na obr. 2.2. V intervalu plnění (1) tlak ve formě prudce vzrůstá, v intervalu dotlačování (2), kdy je do formy doplňována tavenina kompenzující objemové smrštění tuhnoucího výstříku, tlak mírně klesá až do okamžiku zatuhnutí vtoku (bod Z). V intervalu 3 je výstřík ochlazen a tlak postupně

vlivem jeho smršťování klesá až na zbytkový tlak p_z , v optimálním případě shodný s okolním tlakem. Zbytkový tlak závisí hlavně na velikosti dotlačovacího tlaku. U dnešních vstřikovacích strojů je dotlačovací tlak regulovatelný a bývá nižší než vstřikovací tlak.



Obr. 2.2 Časová závislost tlaku p v dutině formy při vstřikování [2]

1 - vstřikování, 2 - dotlačování, 3 - chlazení

a - píst (šnek) se pohybuje vpřed, b - píst (šnek) se pohybuje vzad

A - forma je uzavřena, B - forma otevřena, P – zbytkový tlak, z – zatuhnutí vtoku

2.1 Plastikace

Účelem plastikace je připravit homogenní taveninu plastu a shromáždit ji v prostoru před čelem šneku. Granulát, padající z násypky stroje, se v tavném válci taví, působením šneku hněte, homogenizuje a následně je dopravován do prostoru ve válci před čelem šneku. Ohřev polymeru se děje převodem tepla ze stěn tavného válce a frikčním teplem, které vzniká působením šneku na materiál.

Při plastikaci se šnek otáčí a současně posouvá zpět. Při zpětném pohybu šneku se posouvá i hydraulický píst (zajišťující axiální posun šneku), který z hydraulického válce vytlačuje hydraulickou kapalinu (hydraulický olej). Tento pohyb zpět lze brzdit tzv. zpětným tlakem: hydraulická kapalina může z hydraulického válce odtékat až při dosažení tohoto zpětného tlaku, kterému odpovídá určitý tlak taveniny polymeru před

čelem šneku. Homogenitu taveniny lze ovlivňovat konstrukcí šneku, jeho otáčkami, zpětným tlakem a dávkou vstřikované taveniny.

Optimální průběh plastikace zajišťují tzv. kompresní šneky, které mají dvojitě možné provedení:

- rozteč šroubovice se směrem k čelu šneku zmenšuje
- průměr jádra šneku se směrem k čelu šneku zmenšuje (viz obr. 2.3).



Obr. 2.3 Průběh postupné proměny materiálu v plastikačním válci

- 1, 2 - vstupní zóna; zde vstupuje granulát, je stlačen a hnán proti horkému válci
- 3, 4 – kompresní zóna; objem mezi závitů šneku se zmenšuje, nerozpuštěná hmota se dále stlačuje, tím se zvyšuje tření a granulát se taví
- 5, 6 – homogenizační zóna; zde je opět neměnný objem mezi závitů šneku, na konci zóny je tavicí proces dokončen, granule termoplastu jsou roztaveny

2.2 Vstřikování taveniny do formy

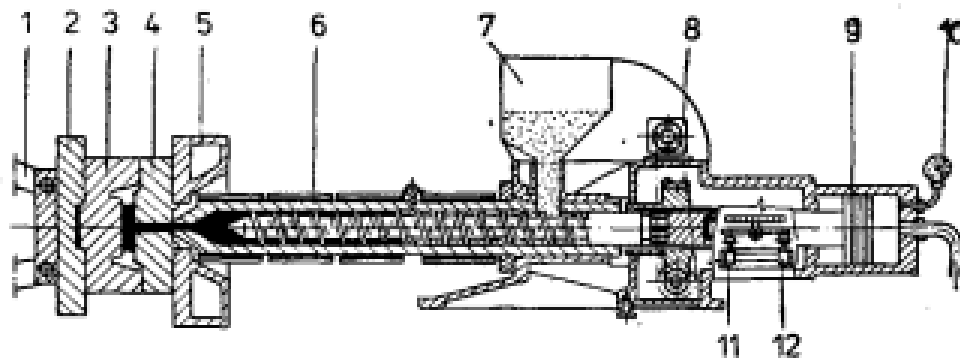
Plnění dutiny formy nastává vstříknutím taveniny do uzavřené prázdné tvarové dutiny. To je vyvoláno posunutím šneku ve směru jeho podélné osy. V zájmu získání výstřiku s dobrými fyzikálními vlastnostmi a dobrým povrchem se plnění formy musí řídit tak, aby tavenina nevtékala do formy volným paprskem, ale aby materiál vtékal do formy postupně. Při tomto způsobu laminárního plnění vzniká plastické jádro, které umožňuje stlačení taveniny ve formě a dotlačování během chladnutí.

Velikost vstřikovacího tlaku v dutině formy se v závislosti na zvolených parametrech a vstřikovaném materiálu pohybuje v rozmezí cca 200÷900 barů. Tlak v dutině formy samozřejmě není ve všech místech stejný – u vtokového ústí je největší a se vzdáleností od něj klesá. [10]

Pro většinu výstřiků se volí konstantní vstřikovací rychlost daná konstantní rychlostí axiálního posunu šneku. U výstřiků složitějších tvarů (s tvarovými jádry a kovovými základy a s různou tloušťkou stěn), u výstřiků s vysokými požadavky na jakost povrchu a při vstřikování tepelně citlivých plastů je z hlediska dosažení vysoké kvality

účelné programovat průběh vstřikovací rychlosti tak, aby optimálně vyhovovala konkrétnímu výstřiku. Jakmile je forma naplněna, nastává stlačování taveniny. Tlak ve formě i v hydraulice prudce stoupne a vstřikovací rychlost náhle poklesne (obr. 2.2). V tom okamžiku tlak dosahuje maximální hodnoty, vzniká tlaková špička, která převyšuje nastavenou hodnotu tlaku. Tuhnoucí hmota pak získává pod vlivem nadměrného tlaku v povrchových vrstvách větší hustotu, která vyvolává anizotropii vlastností výstřiku. Jestliže má stroj nedostatečnou přidržovací sílu nebo je malá tuhost formy, může dojít k nepatrnému otevření či prohnutí, tzv. dýchnutí formy. To se projeví v kolísání hmotnosti výstřiku, popř. vznikem otřepu.

Většina strojů je vybavena řídicí technikou, která umožňuje včas snížit vstřikovací tlak před dosažením tlakové špičky na dotlačovací tlak, tzv. dotlak. Okamžik přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak a tedy i výše tlakové špičky musí být pečlivě kontrolovány.



Obr. 2.4 Fáze vstřikování [1]

1 - uzavírací mechanismus, 2 - pohyblivá upínací deska, 3 - tvárnice, 4 - tvárník, 5 - nepohyblivá upínací deska s otvorem pro trysku, 6 - vstřikovací válec, 7 - násypka, 8 - hydraulický motor pro pohon šneku, 9 - hydraulický válec, 10 - tlakoměr, 11 - koncový spínač dotlačování, 12 - koncový spínač zpětného posunu šneku

2.3 Dotlačování

Doba dotlačování má významný vliv na vlastnosti výstřiku. V tomto časovém intervalu je nahrazován úbytek materiálu (= potlačení vzniku staženin uvnitř stěn a propadlin na povrchu vylisku), který vzniká smršťováním hmoty při chlazení ze zpracovatelské teploty na teplotu formy. Dotlačování a doba jeho působení má nejvýznamnější vliv na tvary a rozměry vylisku a jeho hmotnost. Mezi rozměry a hmotností vylisku není

přímý vztah - to znamená, že dva stejné výstřiky z téže formy mohou mít stejnou hmotnost, avšak rozdílné rozměry. [10]

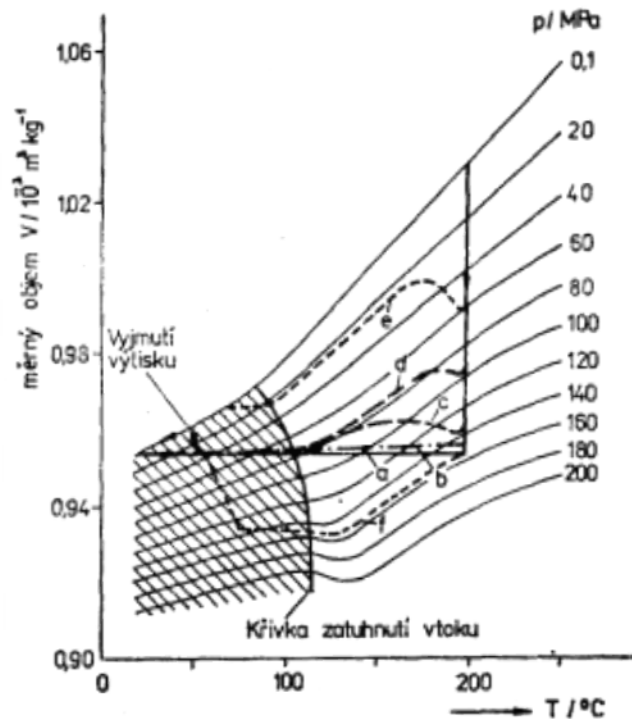
Výši dotlaku, popř. jeho časovou závislost musíme určit samostatně pro každý výstřik. Příliš vysoký dotlak omezuje pohyblivost makromolekul při chlazení a vyvolává tím pnutí ve výliskách, kroucení atd. Kromě toho může způsobit vysoký zbytkový tlak a s ním spojené potíže při vyjímání výstřiku. Nízký dotlak u výstřiků, zvláště tlustostěnných, může být příčinou povrchových propadlin, vnitřních staženin (lunkrů) či mikropórovitosti.

Dotlačování je ukončeno v okamžiku, kdy ztuhne vtok a uzavře se další vstup taveniny do formy. Je-li u tlustostěnných výstřiků vhodné udržet vtok co nejdéle tekutý, užívá se pulzní dotlak. V tomto případě pulsující hydraulický tlak vyvolává střídavou změnu proudění taveniny z trysky do formy a zpět, a tím se udržuje jádro vtoku déle tekuté. [1]

2.4 Chlazení výlisku ve formě

Chlazení výstřiku ve formě probíhá již během vstřikování, zejména však souběžně s dotlačováním. Je ovlivněno především tvarem výlisku a tloušťkou stěn, teplotou taveniny, vstřikovací rychlostí, průběhem dotlaku, teplotou formy (viz tabulka 6.1) a dále konstrukcí chlazení formy. Doba chlazení by měla být tak dlouhá, aby zajistila, že při vyhazování výlisku z formy nedojde k jeho deformaci, přetržení, protlačení vyhazovačů atd. určuje v podstatě délku vstřikovacího cyklu, a tím i hospodárnost zpracování. U běžných výstřiků je proto volena teplota formy co nejnižší - avšak tak, aby nebyla narušena kvalita povrchu výstřiku, nebo nebylo prudkým ochlazením vyvoláno ve výstřiku velké vnitřní pnutí. U přesného vstřikování je nezbytné, zvláště u semikrystalických polymerů, temperovat formy na teploty, kdy lze dosáhnout rovnovážných podmínek z hlediska krystalizace i z hlediska orientace makromolekul. Proces dotlačování a chlazení (zejména pro potřeby přesného vstřikování) je regulován podle diagramu $p-V-T$ (obr. 2.5). [2]

Vstřikovací stroj ovládaný mikroprocesorovým systémem nastavuje průběh dotlačování a chlazení výstřiku tak, aby pokud možno probíhaly za konstantního měrného objemu. Touto úpravou se výrazně zvýší kvalita výstřiku a především se dosáhne optimálního a reprodukovatelného smrštění. Současně je možno ovlivnit i orientaci, vnitřní pnutí výlisku a další s tím spojené vlastnosti.



Obr. 2.5 Diagram p - V - T pro plnění formy a chlazení výtříku u amorfního polymeru [1]

- a - ideální průběh – měrný objem je v závislosti na teplotě konstantní
- b - průběh s vysokým vstříkovacím tlakem a optimálně nastaveným dotlakem
- c, d - průběh, kdy nižší vstříkovací tlak je vyrovnán relativně vysokým dotlačovacím tlakem; měrný objem v závislosti na teplotě od zatuhnutí vtoku je již konstantní
- e - průběh, kdy nízký vstříkovací a dotlačovací tlak vyvolá zvětšení měrného objemu; důsledek - propadnutí stěn výtříku a vznik staženin
- f - průběh, kdy příliš vysoký dotlačovací tlak zůstává na úrovni vstříkovacího tlaku; důsledek - výtříky po otevření formy výrazněji ulpívají ke tvaru dutiny formy

3. Vlastnosti toku taveniny

Převážná většina zpracovatelských pochodů je charakteristická tím, že dochází k toku taveniny polymerů. Chování tavenin polymerů při toku popisuje především základní toková charakteristika taveniny – viskozita. Viskozitu chápeme také jako míru přeměny energie při smykovém namáhání. Vzhledem k vysokým hodnotám viskozit polymerních tavenin se při jejich toku vyvíjí značné množství tepla, které je obvykle nutno odvést. Jindy naopak musíme teplo do materiálu dodat, abychom ho dostali do stavu schopného toku. Proto při většině pochodů dochází rovněž k výměně tepla. Při zpracovávání polymerů se můžeme setkat s degradačními procesy doprovázenými změnami barvy či dalších vlastností, uvolňováním plynných produktů, apod.

3.1 Viskozita

Viskozita kapalin η je základní charakteristikou, která určuje odpor kapaliny proti tečení pomocí Newtonova zákona:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (3.1)$$

kde

τ je smykové napětí [Pa]

η ... dynamická viskozita [Pa.s]

$\dot{\gamma}$... smyková rychlost [s^{-1}].

Existují kapaliny s viskozitou nezávislou na smykové rychlosti. Takové kapaliny se nazývají newtonské. Velká část kapalin naopak vykazuje závislost viskozity na smykové rychlosti. Obecně lze pozorovat jak růst, tak pokles velikosti viskozity s rostoucí smykovou rychlostí.

Taveniny plastů bez přísad jsou vždy tzv. neneutonsky pseudoplastické. To znamená, že se stávají řidšími v závislosti na smykovém napětí - viskozita se snižuje se stoupajícím smykovým napětím. V tomto případě vztah mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí není lineární.

Obecný tvar závislosti viskozity taveniny polymeru η na smykové rychlosti $\dot{\gamma}$ znázorňuje obr. 3.1, kde je smyková rychlost označena symbolem D . Závislost lze rozdělit na tři oblasti:

V oblasti I. je viskozita konstantní, nezávislá na smykové rychlosti. Tato oblast se nazývá newtonská a hodnota viskozity je označována jako limitní hodnota pro $\dot{\gamma} \rightarrow 0$.

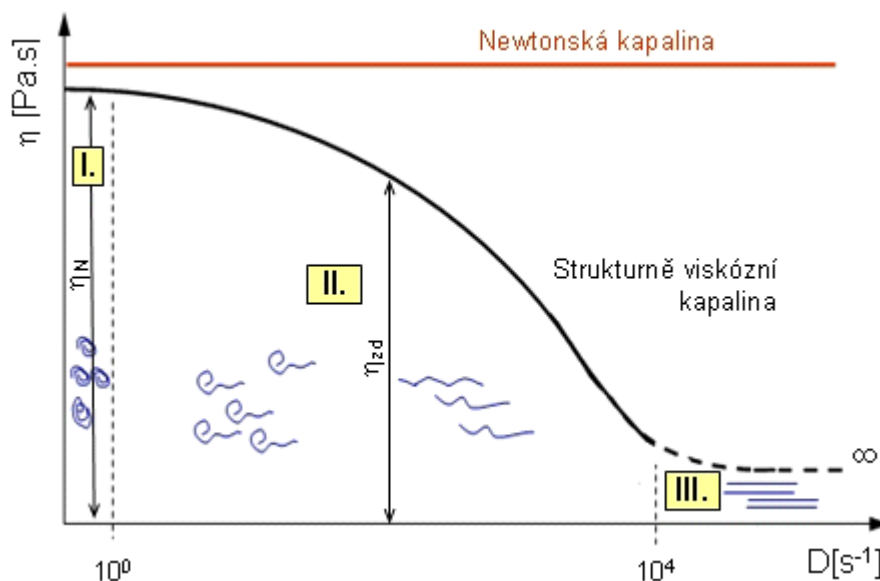
V oblasti II. již viskozita závisí na smykové rychlosti, ale hodnota derivace $d\log\eta / d\log\dot{\gamma}$ (rychlost poklesu viskozity) se mění. Proto se tato oblast nazývá přechodová.

V oblasti III. je viskozita také závislá na smykové rychlosti, ale derivace $d\log\eta / d\log\dot{\gamma}$ je konstantní. Tato oblast se nazývá oblast platnosti mocninového zákona:

$$\eta = \mu_0 \dot{\gamma}^{n-1} \quad \text{nebo} \quad \tau = \eta \dot{\gamma} = \mu_0 \dot{\gamma}^n \quad (3.2)$$

Pokusy o teoretické vysvětlení tvaru a popis závislosti z obr. 3.1 se dělí na dvě skupiny:

- molekulární, tj. vysvětlení na základě představ o deformaci molekul při toku
- fenomenologické. Sem patří reologické modely s pamětí, která umožňuje zahrnout vliv předcházejících deformací na současnou hodnotu napětí.

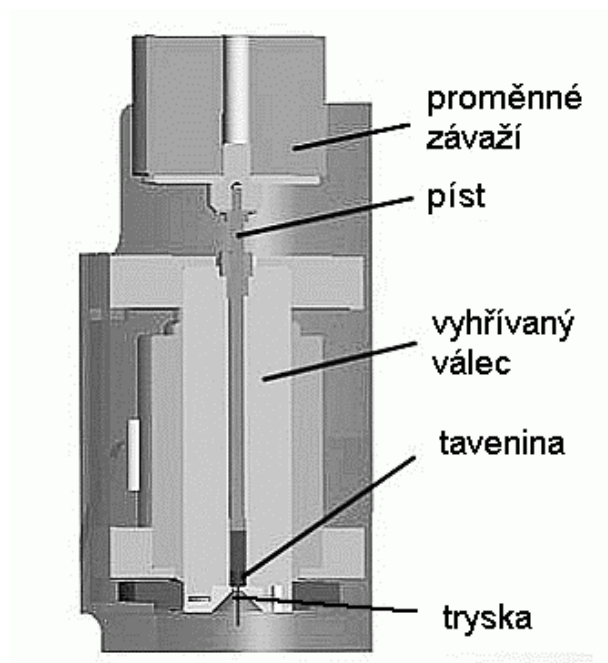


Obr. 3.1 [7]

Typická závislost viskozity taveniny polymerů η na smykové rychlosti D
 I - oblast newtonského chování, II - přechodová oblast, III - oblast platnosti
 mocninového zákona

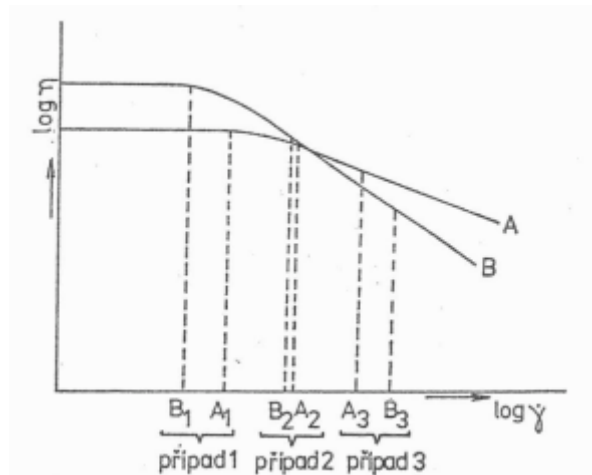
Při všech způsobech měření viskozity musí tavenina protékat kanálem definovaného geometrického tvaru; měří se odpor proti tomuto tečení a ten charakterizuje viskozitu. Používají se většinou kapilární a rotační viskozimetry. Obvykle se pro měření v oblasti malých smykových rychlostí ($\dot{\gamma} < 1$) používají rotační viskozimetry, pro větší smykové rychlosti se používají kapilární viskozimetry.

S viskozitou souvisí často používaná charakteristika plastů - **index toku taveniny**, tzv. tavný index (ITT). Tato veličina je zavedena normou a je užívána výrobci i technologi v oblasti zpracování plastů. Je definována jako hmotnost materiálu (v gramech), která proteče definovanou tryskou za 10 minut při daném zatížení pístu a dané teplotě (zatížení a teplota je pro každý materiál normou určena). Protože závaží pro zatížení pístu je dáno, je tím jednoznačně dán tlak v komoře plastometru, a tím i smykové napětí. Působením tlaku tavenina vytéká. Čím lépe tavenina teče, tím více jí vytéká a tím větší je rychlost v trysce (smyková rychlost). Tavný index proto souvisí pouze s jedním bodem tokové křivky daným dvojicí hodnot $\dot{\gamma}, \tau / \dot{\gamma}$. Poloha tohoto bodu na tokové křivce není stálá, ale mění se změnou $\dot{\gamma}$, tj. s tokovými vlastnostmi taveniny. Charakterizovat materiál podle jednoho bodu tokové křivky je problematické, protože se tento bod po křivce posouvá. Proto se tavný index považuje pouze za hrubou informaci o tokových vlastnostech polymerní taveniny a pro popis chování při toku se zásadně používá celá toková křivka.



Obr. 3.2 Řez plastometrem

Srovnání dvou tavenin na základě tavného indexu může být zavádějící, což je patrné z obr. 3.2. Jsou srovnávány dva materiály označené písmeny A, B. Bude-li zatížení plastometru takové, že se při obou měřeních budeme nacházet vlevo od průsečíku tokových křivek, zjistíme, že materiál A teče lépe než materiál B (případ 1). Bude-li zatížení takové, že se nacházíme v oblasti průsečíku tokových křivek, můžeme zjistit, že taveniny tečou přibližně stejně (případ 2). Bude-li zatížení takové, že tavné indexy leží vpravo od průsečíku, zjistíme, že materiál B teče lépe než materiál A (případ 3). V tomto myšleném případě měníme zatížení, což není podle normy možné. V reálném případě se však často stává, že tavné indexy materiálů jsou v jiné oblasti, než je zpracovatelská, a srovnání může být bezcenné. Použití celé tokové křivky je proto při srovnávání materiálů nezbytné. [1]



Obr. 3.2 [1]

Určení hodnot tavného indexu pro dva materiály a různá zatížení

- 1 - zatížení, při němž materiál A teče lépe než materiál B,
- 2 - zatížení, při kterém tečou oba materiály stejně,
- 3 - zatížení, při němž materiál B teče lépe než A

Zatřídění některých termoplastů do skupin viskozity

Nízká viskozita: PA6, PA6.6, PA11, lineární PE

Střední viskozita: PS, SAN, ABS, měkký PVC, PP, PA12, amorfni PA, rozvětvený PE

Vysoká viskozita: PC, PES, tvrdý PVC

4. Řízení a regulace vstřikovacího procesu

Řízením se rozumí nastavení strojních parametrů bez zpětného hlášení o skutečných hodnotách strojních a technologických veličin. Rušivé vlivy způsobené např. kolísáním napětí v síti, teploty oleje nebo viskozity taveniny nelze v tomto případě automaticky odstranit. Jsou-li však tyto rušivé vlivy malé, lze udržet dostatečně rovnovážný průběh vstřikovacího procesu.

Regulací vstřikovacího procesu se rozumí ruční nebo automatické nastavení strojních parametrů se zpětným hlášením skutečných hodnot strojních nebo technologických veličin. Skutečná hodnota se srovnává s nastavenou a v případě odchylky nad přípustnou toleranci se automaticky provede korekce, kterou se eliminují rušivé vlivy.

Strojní parametry jsou primární, nastavovány na stroji a určují technologické parametry. Jedná se např. o následující:

- teplota jednotlivých zón vstřikovacího válce
- teplota formy
- tlak kapaliny při vstřikování a dotlaku a zpětný tlak při plastikaci
- jednotlivé časové úseky pracovního cyklu
- otáčky šneku při plastifikaci
- rychlost posuvu šneku při vstřikování (vstřikovací rychlost)
- délka posuvu šneku
- rychlost uzavírání a otevírání formy

Technologické parametry určují stav plastu, případně jeho časovou závislost při vstřikování. Jsou to například:

- teplota taveniny v plastifikačním válci
- teplota hmoty ve formě
- tlak taveniny ve válci
- tlak hmoty ve formě
- viskozita taveniny
- doba vstřiku taveniny do formy
- doba chlazení hmoty ve formě
- rychlost proudění taveniny ve válci ve formě

- rychlost proudění taveniny ve formě

Každý vstřikovací stroj je schopen automatického provozu, tj. je zajištěn automatický sled jednotlivých operačních úseků (plastifikace, uzavření formy, vstřik, dotlak, chlazení výstřiku, otevření formy) v nastavených časových úsecích. Vstřikovací proces lze samozřejmě programovat (optimální řízení průběhu vstřikovací rychlosti, dotlaku, brzděného tlaku atd.). V součinnosti se snímači teploty, tlaku a polohy a s hydraulickými prvky (proporcionální ventily, servoventily, ...) je dosahováno vysoké reprodukovatelnosti strojních parametrů. Dosahuje se tak stejnoměrné a vysoké kvality výstřiků, minimální zmetkovitosti a vysoké produktivity.

Veškeré ovládání vstřikovacích strojů se děje elektronicky s použitím mikroprocesorů. Mikroprocesorový systém je základem centrální ovládací jednotky, která řídí činnost celého vstřikovacího stroje na základě programu uloženého v pevné paměti. Z hlediska vedení vstřikovacího procesu umožňuje nebo usnadňuje mikroprocesorový systém tyto funkce:

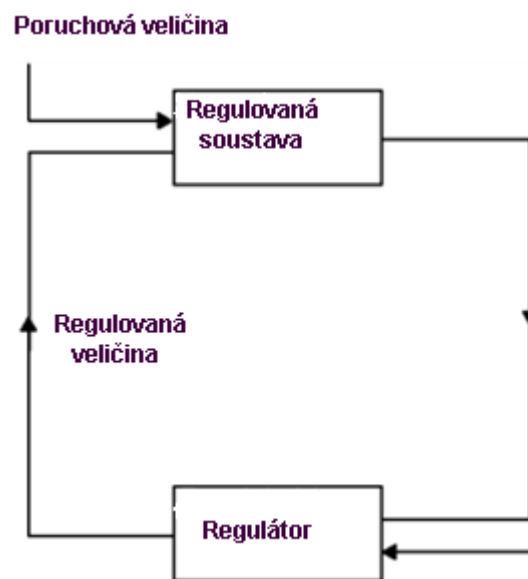
- jednoduché a rychlé nastavení režimu činnosti vstřikovacího stroje a jeho snadnou změnu
- kontrolu funkce stroje, hlášení poruch a jejich příčin (diagnostický systém)
- řízení a regulaci procesu (především vstřikovací rychlosti, dotlaku a zpětného tlaku) pomocí hydraulických ovládacích prvků
- připojení dlouhodobé paměti pro zaznamenávání nalezeného optimálního programu a dat pro případ znovupoužití formy při opakované výrobě
- možnost připojení na centrální počítač pro řízení celé skupiny strojů nebo sledování výrobních dat (počet vyrobených výstřiků, počet zmetků, délka cyklu, spotřeba energie, ztrátové časy atd.
- připojení informačního systému na bázi monitoru - ten ukazuje v textové nebo grafické úpravě nastavené a skutečné hodnoty a dovolené horní a dolní odchylky. Dále informuje obsluhu i o poruchách na stroji, popř. uvádí i možnost jejich odstranění.

Vstřikovací stroje umožňují adaptivní regulaci vstřikovacího procesu podle diagramů p-V-T (obr. 2.5). V tomto případě, který představuje vyšší stupeň regulace vstřikovací techniky, je proces řízen podle stavu vstřikované hmoty a podle hotového výstřiku. Mikroprocesorový systém najíždí a seřizuje vstřikovací proces na základě programu vycházejícího z diagramů p-V-T, optimalizuje jeho průběh a udržuje nastavené parametry.

try. Přitom je schopen průběžně potlačovat rušivé vlivy, např. kolísání viskozity taveniny.

Moderní vstřikovací stroje umožňují řízení, popř. regulaci vstřikovací rychlosti, dotlaku a zpětného tlaku. Programované vstřikování umožňuje použití různých vstřikovacích rychlostí během jedné vstřikovací operace. Toto uspořádání je výhodné zejména u složitějších tvarů výstřiků s různou tloušťkou stěn, u výstřiků s vysokými požadavky na kvalitu povrchu.

Princip regulace

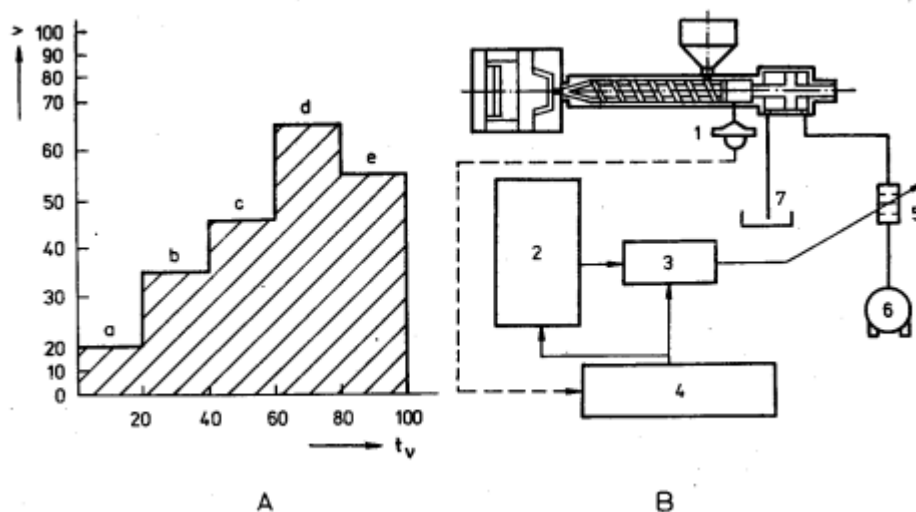


Obr. 4.1 Princip regulace

Reprodukovatelnost každého kroku plnění formy závisí na opakovatelné přesnosti požadované vstřikovací rychlosti, dotlaku a dynamického tlaku. V regulačním obvodu obecně probíhá srovnávání hodnot požadované (nastavené) a skutečné. Rozdíl (diference) těchto hodnot je odpovídajícím způsobem zpracován speciálními výpočetními algoritmy a poté představuje přiměřenou korekční hodnotu. Použitím regulovaného čerpadla je objemový výkon a tlak automaticky přizpůsoben cyklu stroje, přičemž je zajištěna minimální spotřeba energie. Tlakové spády jsou regulačním ventilem udržovány konstantní, čímž se kolísání tlaku kompenzuje v závislosti na tlaku spotřebovávaném. V zájmu dodržení co nejužších tolerancí a vyvarování se jakýchkoliv víceprací je systém doplněn regulací vstřikovací rychlosti anebo vstřikovacího tlaku.

4.1 Řízení programovanou vstříkovací rychlostí

Základní schéma řízení, popř. regulace programovaného vstříkovaní je znázorněno na obr. 4.2. Časový průběh vstříkovacích rychlostí je programován tak, aby umožnil přesné plnění formy u složitých výstříků. Vstříkovací rychlost je regulována polohovým regulátorem. Ten pracuje v závislosti na nastavené/skutečné pozici šneku. Výstupní akční veličina je ve voltech. Ve fázi zrychlení vstříkovací rychlosti (po dobu, než naběhne regulátor) je výstupní hodnota neregulována. Požadované vstříkovací rychlosti by mělo být dosaženo přibližně v počáteční fázi vstříkovacího cyklu - avšak tím způsobem, aby rozdíl mezi požadovanou a skutečnou hodnotou nevedl k překmitům, které by se regulátor snažil vyrovnat.



Obr. 4.2 Vstříkování s programovanou vstříkovací rychlostí [1]

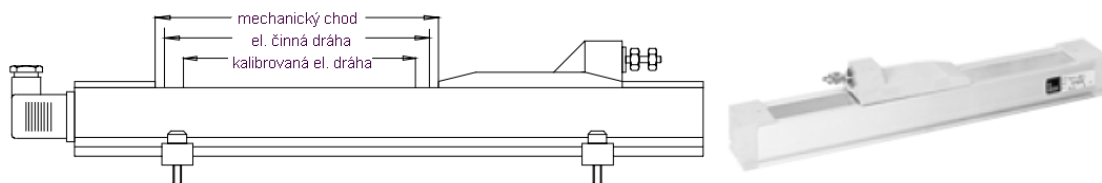
A - průběh vstříkovací rychlosti intervalu vstříkování t_v

a, b, c, d, e – programovaná vstříkovací rychlost;

B - schéma vstříkovacího stroje s programovanou vstříkovací rychlostí

1 - snímač rychlosti, 2 - programátor vstříkovacího procesu, 3 - řízení průtoku,

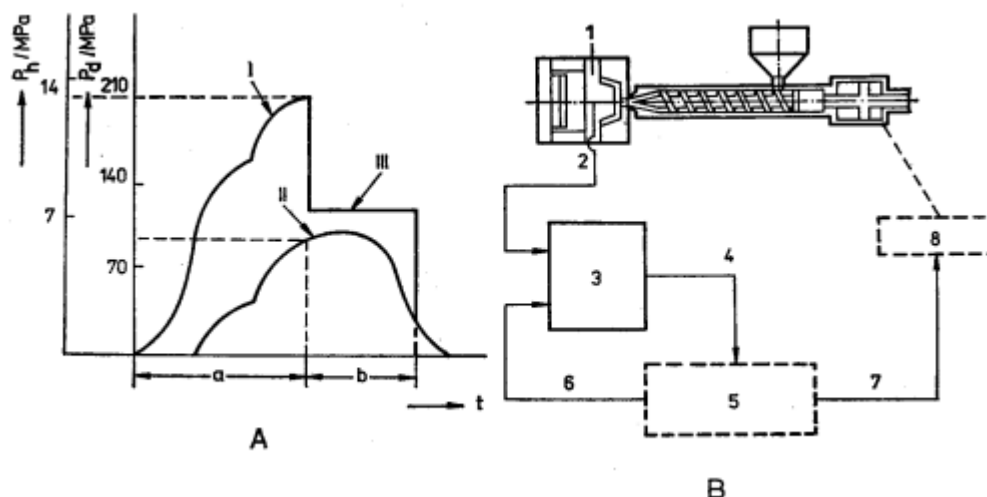
4 - řídicí jednotka stroje, 5 - analogový průtokový ventil, 6 - čerpadlo, 7 – olej zpět do nádrže



Obr. 4.3 Odporový snímač polohy/rychlosti Gefran PK

4.2 Řízení závislé na tlaku taveniny v dutině formy

Uspořádání pro sledování tlaku vstřikované taveniny v dutině formy představuje obr. 4.4. Uvedené řešení umožňuje přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak poté, kdy je dosažena nastavená hladina vstřikovacího tlaku. Tím se zabráňuje přeplnění formy, pootevření formy a omezuje se kolísání rozměrů výstřiků. Pokud není dosaženo zvoleného vstřikovacího tlaku, je hlášena porucha.



Obr. 4.4 Vstřikování s tlakovým čidlem v dutině formy [1]

A - typická závislost tlaku p na čase t

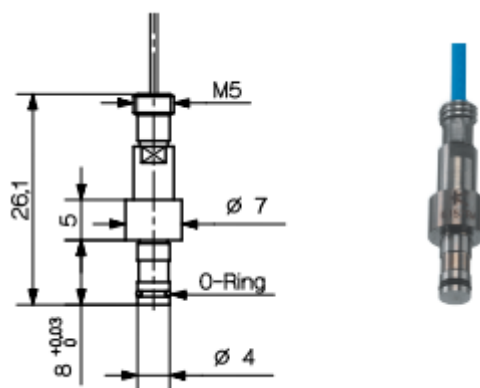
a – interval vstřikování, b – interval dotlačování, p_h – tlak v hydraulice, p_d – tlak v dutině formy, I - tlak v hydraulickém válci, II - tlak v dutině formy, III - dotlak;

B - schéma vstřikovacího stroje se snímáním tlaku v dutině formy

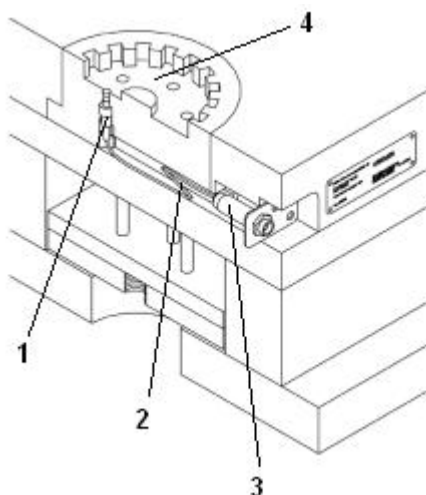
1 - tlakové čidlo, 2 - tlakový signál, 3 - logická jednotka vyhodnocení tlaku, 4 - řídicí signál, 5 - řídicí jednotka stroje, 6 - blokovací signál, 7 - řídicí signál, 8 - řízení hydraulického tlaku

V obvyklých případech lze pro snímání tlaku taveniny vstřikované do dutiny formy použít např. tlakové čidlo 6157B od firmy Kistler (viz obr. 4.5). Čidlo představuje člen 1 na obrázku 4.4 B. Jde o piezoelektrický snímač, kde při mechanickém namáhání (na čele snímače o průměru 4 mm) vzniká elektrický náboj. Ten je převeden na elektrické napětí a to je kabelem převáděno do jednotky vyhodnocení tlaku.

Uvedené čidlo měří tlak v rozsahu 0÷2000 bar při teplotě taveniny do 450 °C.



Obr. 4.5 Tlakové čidlo Kistler 6157B



Obr. 4.6 Příklad zástavby tlakového čidla ve formě [11]

1 – tělo čidla, 2 – kabel, 3 – konektor, 4 – tvarová dutina formy

4.3 Řízení systémovým tlakem hydraulického oleje

Regulace vstřikovacího tlaku se používá v případech, kdy je dosaženo stanoveného maximálního tlaku. Překročený maximální vstřikovací tlak může vážně poškodit formu. V přechodu od fáze plnění do fáze stlačení taveniny dochází následkem nárůstu tlaku k přepnutí typu regulace. Na regulaci polohy vstřikovacího válce navazuje regulace vstřikovacího tlaku. Tento bod se nazývá bodem přepnutí.



Obr. 4.7 Snímač systémového tlaku

4.3.1 Regulace čerpadlem

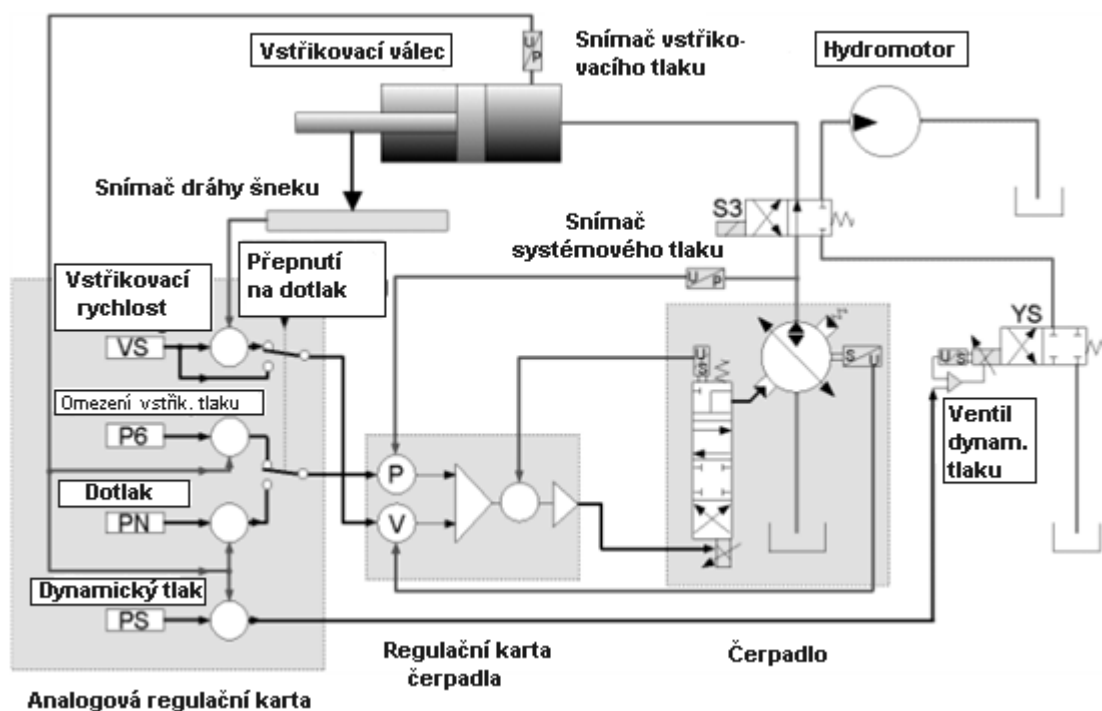
Velikost tlaku je regulována na požadovanou hodnotu elektronikou čerpadla. Měření tlaku obstarává snímač systémového tlaku. Z hlediska mezního vstřikovacího tlaku je softwarový regulátor nadřazen hardwarovému regulačnímu obvodu. Složka D regulátoru (derivační konstanta) je činná pouze po dobu nárůstu tlaku. Omezení tlaku je přitom odpojeno za účelem dosažení lepšího průběhu regulace.

Regulace dotlaku

Za účelem zvýšení přesnosti regulace tlaku je možno regulátoru tlaku čerpadla předřadit na analogové kartě ještě jeden regulátor. Toto opatření vyrovnává ty dynamické průběhy a odchylky, které mohly být zapříčiněny samotným řízením. Použitý PID regulátor reguluje podle nastavených a skutečných hodnot a poskytuje akční veličinu ve voltech.

Regulace vstřikovacího tlaku

Regulátor dynamického tlaku je realizován jako PID a podle požadované/skutečné tlakové odchylky poskytuje akční veličinu ve voltech. U strojů vybavených proporčním ventilem vstřikovacího tlaku je možno volitelně iniciovat regulátor zadáním startovací hodnoty. Ta představuje pro regulátor konkrétní velikost elektrického napětí, která je výstupní hodnotou regulátoru při počátku procesu regulace. Obecně menší hodnoty výstupního napětí regulátoru servoventil přivírají a naopak vyšší výstupní hodnoty servoventil otevírají a tím je okamžitě snížen anebo zvýšen tlak.



Obr. 4.8 Regulace čerpadlem

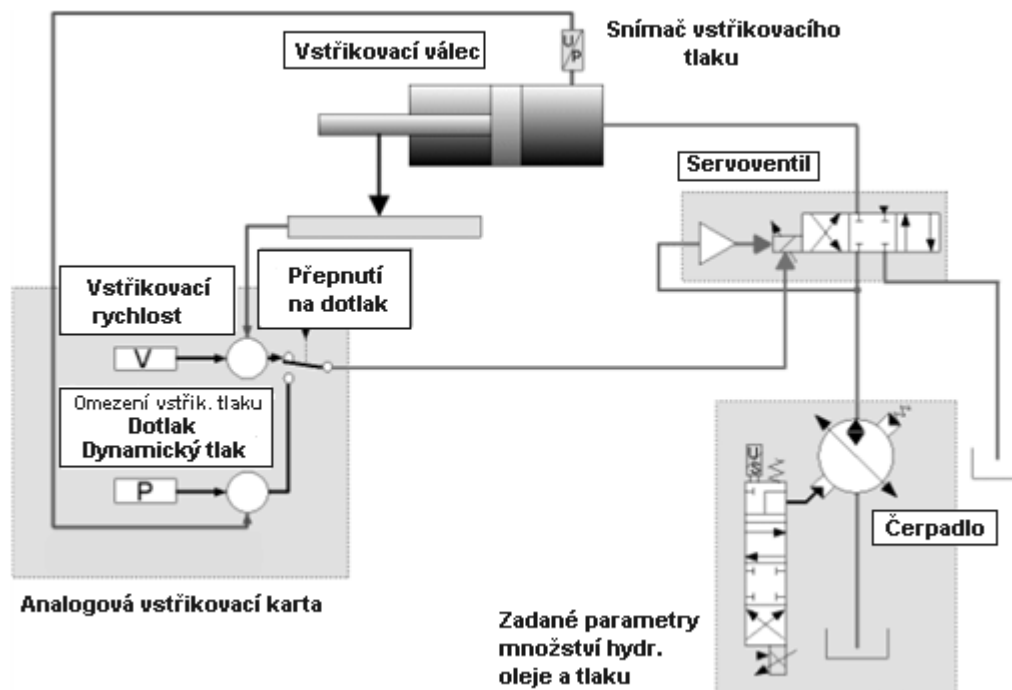
4.3.2 Regulace servoventilem

Regulace vstřikování taveniny bývá na vstřikovací straně často realizována servoventilem. Tímto rychlým ovládacím prvkem je regulována vstřikovací rychlost, vstřikovací tlak a dotlak. Během fáze plnění dutiny formy probíhá softwarová regulace polohy ventilu – systém přesně dodržuje požadovanou vstřikovací rychlost dle implicitní hodnoty (ta je vypočtena z průběhu poloh vstřikovacího válce).

Pojem „servo“ obecně znamená, že malá vstupní veličina ovlivňuje velkou výstupní veličinu. V elektrohydraulických regulačních obvodech, které regulují rychlost a tlak, jsou voleny servoventily podle jejich rychlosti reakce. Poloha ovládacího pístu servoventilu je regulována přesně a pokud možno nezávisle na poruchové veličině. Servoventil jako celek slouží tedy pro převod elektrického vstupního signálu na průtok nebo tlak hydraulického oleje. Elektrický vstupní signál (požadovaná hodnota) je přiváděn do regulátoru polohy. Proudem z regulátoru jsou napájeny cívky motoru. Regulátor je fyzicky integrován do ventilu.

Snímač polohy je napájen oscilátorem a měří polohu řídicího pístu (skutečnou hodnotu). Hodnota polohy je usměrněna v demodulátoru a vedena zpět do regulátoru polohy, který ji srovná s požadovanou hodnotou. Regulátor nastavuje motor tak dlouho,

dokud se nerovná nastavená a skutečná hodnota polohy. Proto je poloha řídicího pístu poměrná (proporcionální) k elektrické hodnotě požadované veličiny. Zjednodušeně se nastavená hodnota polohy označuje jako nastavená hodnota průtoku. Skutečný průtok od ventilu k místu určení (hydraulický vstřikovací válec) závisí na tlakovém spádu ventilu.



Obr. 4.9 Princip regulace servoventilem

Zpoždění náběhu regulace

Při regulaci servoventilem nemá dojít ke zpoždění čerpadla při začátku vstřikování. Proto je čerpadlo spuštěno ještě předtím, než je aktivován regulátor servoventilu.

Nastavení vstřikovacího tlaku

Regulaci vstřikovacího tlaku na požadovanou hodnotu servoventilem lze provádět nezávisle na regulátoru vstřikovací rychlosti. Aktivní regulátor pumpy běží s nastavenou požadovanou hodnotou vstřikovací rychlosti v nastavitelném tolerančním rozpětí. Regulace tlaku se provádí algoritmem PID regulátoru a ovlivňuje nastavenou hodnotu vstřikovací rychlosti u regulace servoventilem. Před dosažením meze vstřikovacího tlaku působí PD regulátor bez členu I (integrační konstanta T_n). Po dosažení tlakové meze je

aktivní regulátor PI bez parametru D (derivační konstanta T_v), čímž je dosaženo větší stability ve fázi regulace tlaku.

Zesílení (parametr P složky regulátoru) se zvětšuje až do vzniku první náchylnosti k překmitům. Dále se s touto dosaženou hodnotou zesílení bez překmitů zvyšuje T_v (derivační konstanta D-regulátoru) dokud se překmity neustálí na přijatelné hodnotě, aniž by se systém rozkmital.

Tlaková regulace by měla být nastavena nejlépe na materiálový polštář (=dostatek taveniny ve vstřikovacím válci před šnekem). Není-li to možné, může se regulace nastavit na doraz, musí se však dbát na to, aby si materiál zachoval svoje vlastnosti – aby nedocházelo k degradaci materiálu. Při nastavení na doraz by se měla nastavit hranice vstřikovacího tlaku na 90 % jeho maximální velikosti. Počáteční pozicí pro kontrolu regulace tlaku je vždy přední pozice šneku.

Regulace dotlaku

Po přepnutí na dotlak je aktivní PI-regulátor dotlaku. Reguluje dle nastavené/skutečné hodnoty tlaku a výstupní akční veličina je ve voltech.

Zesílení regulační větve (složka P regulátoru) se zvyšuje tak dlouho, dokud nedojde k náznakům kmitání systému. Potom se tato hodnota bez kmitání ponechá a snižuje se integrační časová konstanta až do akceptovatelné hodnoty zakmitávání. Aby nevznikaly překmity, mohou se také změnit mezní hodnoty akčních veličin.

Regulace vstřikovacího tlaku

Regulátor vstřikovacího tlaku je realizován jako PI a výstupem je na základě rozdílu nastaveného/skutečného tlaku akční veličina ve voltech.

Zesílení regulační větve (složka P regulátoru) je tak dlouho zvyšováno až se vyskytnou první náznaky kmitání. Poté je při této hodnotě zmenšována integrační časová konstanta, dokud není dosaženo přijatelného zakmitávání systému. Aby nevznikaly překmity, může se také korigovat mezní hodnota akční veličiny.

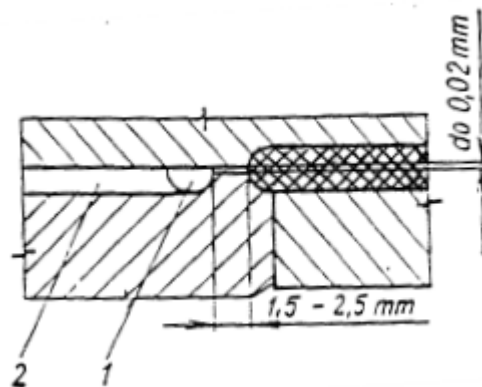
Kompenzace přebytečného oleje

Okamžitá spotřeba tlakového oleje se mění v průběhu vstřikovacího cyklu. U vstřikolisů s ventilem značky Moog může být účinnost servoventilu vyrovnána kompenzací přebytečného oleje. Za tím účelem se zavádí kalibrace tlaku ventilem. O kalibrační hodnotu je pak upravena akční veličina.

Uvedenou kompenzací oleje je zastíněna část integrální složky regulace, a tudíž může být zmenšen I člen PI regulátoru.

5. Odvzdušnění formy

Plnění dutiny formy taveninou při procesu vstřikování vyžaduje zajištění úniku vzduchu, jenž vyplňuje volnou dutinu. Čím větší je rychlost plnění, tím účinnější musí být odvzdušňování dutiny formy. Samotná doba plnění má značný vliv na optimální vlastnosti výstřiku a proto ji nelze přizpůsobovat potřebám resp. chybám v odvzdušňování. Při rychlém plnění je zajištěna termická homogenita dávky taveniny, přičemž rychlé plnění vyžadují zvláště výlisky s malou tloušťkou stěny, kde není přípustné zastavení (tzv. zamrznutí) čela taveniny a tím způsobení buď nedostříknutí, anebo nutnost nadměrného zvýšení vstřikovacího tlaku. Důsledkem je vnesení vnitřního pnutí, velkých tlakových spádů a z toho plynoucích různých anizotropií. Příkladem jsou slabostěnné výlisky typu kelímků vyráběné v cyklech 2-4 s, s rychlostí vstřiku několik desetin sekundy. Tyto výlisky vyžadují kontinuální odvzdušnění celého horního obvodu výlisku (viz obr. 5.1) při použití vysoké vstřikovací rychlosti, jež zabrání zamrznutí čela taveniny při tloušťkách stěn 0,4-0,5 mm.



Obr. 5.1 Kontinuální odvzdušnění [6]

1 – sběrný kanál (po obvodu celého výlisku-kelímku), 2 – odvod vzduchu do atmosféry

Anizotropie neboli směrová rozdílnost rozměrových změn, je způsobena především orientací makromolekul a plniva, zejména vláknitého, včetně krystalických útvarů u částečně krystalických termoplastů.

U neplněných termoplastů existuje vlivem orientace makromolekul rozdíl mezi smrštěním podélným (ve směru toku taveniny) a smrštěním příčným (ve směru kolmém k toku taveniny). [10]

Pokud nemůže vzduch z dutiny formy uniknout (zpravidla při málo účinném odvodu vzduchu z tvarové dutiny formy a při vysoké rychlosti plnění dutiny formy taveninou), dochází jeho stlačením v určitém místě dráhy toku taveniny k následujícímu:

- vzduch je zatlačen do výlisku (vznikne bublina; vzniká u silnějších stěn výlisku)
- stlačením se vzduch ohřeje na vysokou teplotu, tím dojde k místnímu ohřátí povrchu výlisku a určitá plocha povrchu se spálí (degraduje) – jedná se o tzv. Dieselův efekt (tento vzniká častěji).

Teplotu stlačeného vzduchu T_2 lze za předpokladu adiabatické změny tlaku (tj. změna stavu bez sdílení tepla) přibližně určit dle vztahu

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} \quad (5.1)$$

kde

T_1 je teplota vzduchu v prázdné dutině formy před začátkem vstřikování taveniny [K]

p_1 je atmosférický tlak [MPa], při $t_1 = 20 \text{ °C}$ ($T_1 = 293 \text{ K}$) ... $p_1 = 0,1 \text{ MPa}$

p_2 je tlak vzduchu stlačeného taveninou [MPa]

χ je Poissonova konstanta [-], při tlaku 0,1 MPa a teplotě 20 °C ... $\chi = 1,4$

Tlak taveniny v dutině formy je závislý na technologických parametrech, materiálu, konstrukci formy a výlisku. Pohybuje se v intervalu cca 20÷100 MPa.

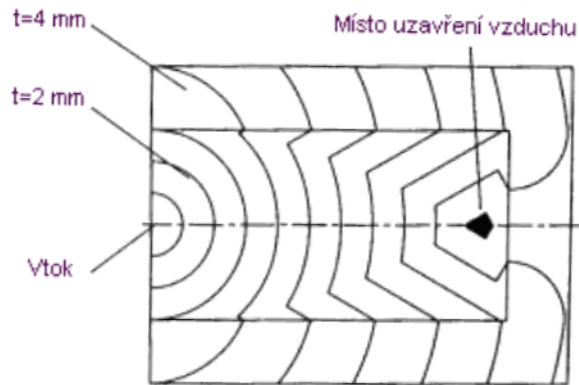
Například pro $t_1 = 20 \text{ °C}$ ($T_1 = 293 \text{ K}$) a $p_2 = 25 \text{ MPa}$ vychází dle vztahu (5.1) teplota stlačeného vzduchu $t_2 = 1148 \text{ °C}$ ($T_2 = 1421 \text{ K}$).

5.1 Dieselův efekt

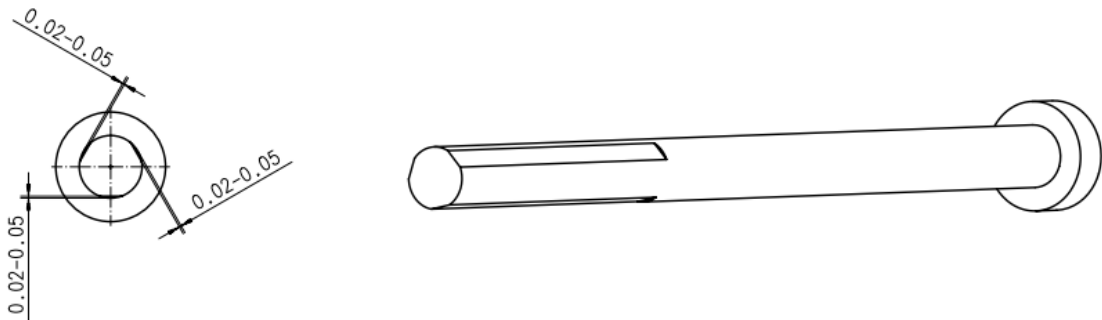
Dieselův efekt je čistě problém odvzdušnění formy. Může se vyskytnout v oblasti slepých dutin, přepážek, míst, kde se sbíhají proudy taveniny atd. - to za předpokladu, že vzduch přítomný v těchto oblastech nemůže dostatečně rychle zcela uniknout (mezerami dělicích rovin, odvzdušňovacími kanály nebo vřely vyhazovačů). Vzduch hnaný ve vstřikovacím cyklu před čelem taveniny je na konci cesty taveniny ve velmi krátkém čase stlačen a proto silně ohřátý. Vzniklá vysoká teplota může zapříčinit nevratné poškození povrchu výlisku. Dochází ke vzniku ohraničených spálených míst na povrchu plastu. Toto časté místní spalování plastu způsobuje vznik agresivních zplodin, které negativně působí na povrch formy a tím jej poškodit.

Technicky se dá Dieselův efekt omezit nebo vyloučit těmito opatřeními:

- provést odvzdušnění postižených oblastí formy např. úpravou vyhazovačů (viz obr. 5.3), odvzdušňovací vložkou (obr. 5.4) apod.
- kontrola a čištění již provedených odvzdušnění
- snížení vstřikovací rychlosti, je-li to možné
- snížení zavírací síly, je-li to možné



Obr. 5.2 Plochý vylisek s Dieselovým efektem (plnicí studie) [8]



Obr. 5.3 Příklad odvzdušnění třemi vybroušenými ploškami na vyhazovači



Obr. 5.4 Porézní odvzdušňovací vložka z nerezové spékané oceli [13]

6. Chlazení formy, způsoby odvodu tepla

Chlazení formy neboli temperace slouží k udržování pokud možno neměnného teplotního režimu formy. Účelem je dosáhnout optimálně krátkého pracovního cyklu vstřikování při zachování všech technologických požadavků na výrobu.

Při procesu vstřikování je do dutiny formy přiváděn roztavený polymer a ten je v dutině ochlazován na teplotu vhodnou pro vyjmutí vylisku. Temperace tedy ovlivňuje plnění tvarové dutiny a zajišťuje optimální tuhnutí a chladnutí plastu. Při každém vstřiku je forma ohřívána, přičemž každý další výstřik je nutno vyrobít opět při stanovené teplotě. Přebytké teplo, jež je dodáváno při každém vstřiku taveniny do formy, je nutno odvést temperační soustavou formy.

Termoplast	Teplota taveniny [°C]	Teplota formy [°C]
PVC tvrdý	180÷210	20÷60
POM	180÷220	80÷120
PS	180÷270	40÷80
PE-LD	170÷270	20÷60
PE-HD	190÷280	20÷60
PP	180÷280	20÷90
PMMA	200÷260	50÷90
PA 6	230÷290	40÷120
PC	280÷330	80÷120
PTFE	200÷250	50÷80

Tabulka 6.1 Doporučená rozmezí teplot taveniny a teplot formy některých termoplastů

6.1 Tepelná bilance formy

Z hlediska tepelné bilance je forma vlastně výměník tepla, mající za úkol odnémat tavenině polymeru teplo, které mu bylo předáno v plastikační komoře vstřikovacího stroje.

Při ustáleném stavu pracovního cyklu vstřikování platí, že teplo přivedené taveninou plastu do formy je rovno teplu odvedenému z formy temperací a ostatními ztrátami, tj.:

$$Q_p = Q_{tm} + Q_z \quad (6.1)$$

Q_p ... teplo přivedené polymerem [J]
 Q_{tm} ... teplo odvedené temperací [J]
 Q_z ... ztráty tepla do okolního prostředí [J]
 přičemž

$$Q_p = m \cdot \Delta Q_p \quad (6.2)$$

m ... hmotnost vylisku i s vtoky [kg]

ΔQ_p ... rozdíl měrné entalpie při vstřikování a ochlazování při odformování [$J \cdot kg^{-1}$]

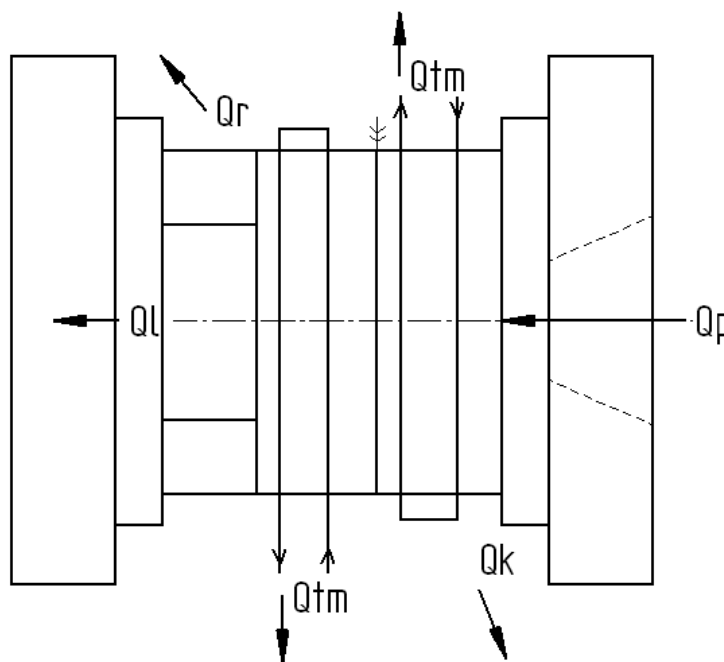
$$Q_z = Q_l + Q_k + Q_r \quad (6.3)$$

Q_l ... tepelné ztráty odvodem do upínacích desek vstřikolisů (konduktce) [J]

Q_k ... ztráty odvodem-prouděním tepla do okolí (konvekce) [J]

Q_r ... ztráty tepla vyzařováním (radiace) [J]

[6]

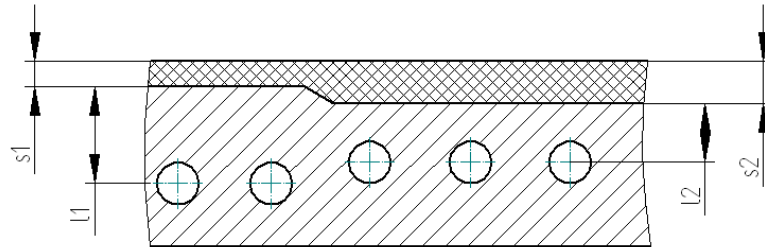


Obr. 6.1 Tepelná bilance formy

6.2 Rozmístění temperančních kanálů ve formě

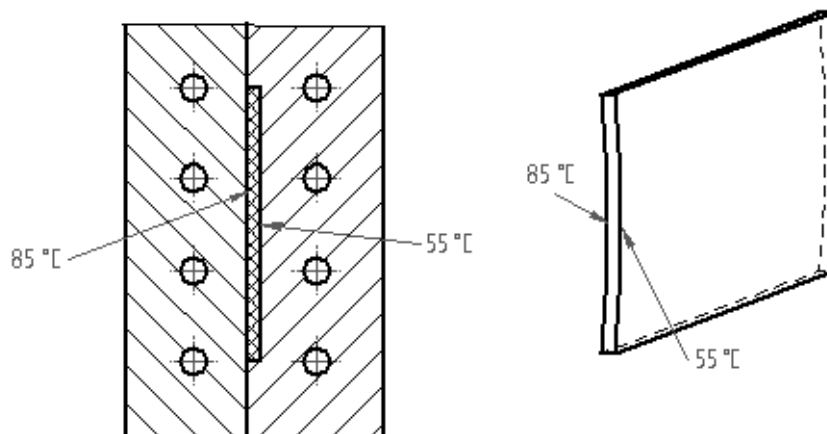
Vzdálenost kanálů od stěny tvarové dutiny formy by měla být optimální – to znamená, že má být dosaženo časově rovnoměrného chlazení pokud možno všech partií vylisku současně. To znamená, že všechny stěny (jak slabší tak i silnější) by měly

chladnout stejně rychle. Tím se omezí rozdílné smrštění při chladnutí výlisku a následné deformace. Při stejném průřezu kanálů má tedy slabší stěna kanály více vzdáleny a silnější stěna má kanály blíže. Platí, že $s_1 < s_2$ a zároveň $l_1 > l_2$, viz obrázek 6.2.



Obr. 6.2 Rozmístění temperančních kanálů ve formě

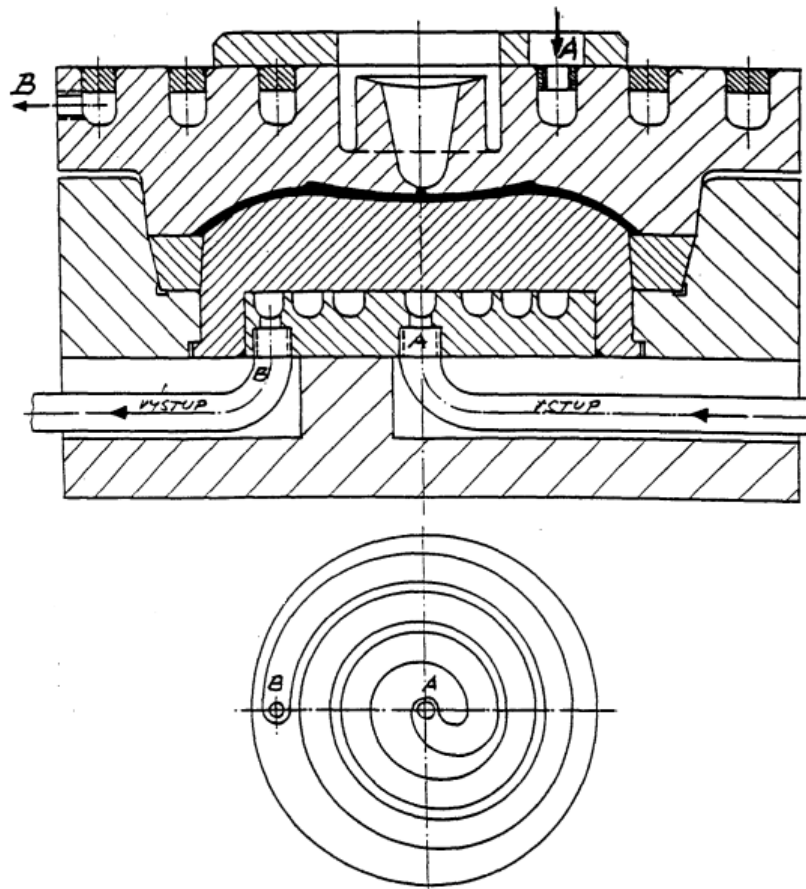
I při symetrickém umístění chladicích kanálů je důležité, aby stěny dutiny formy měly přibližně stejnou teplotu. Rozdíl v chlazení protilehlých stěn výlisku vyvolá posunutí teplotního profilu chladnoucí taveniny. Tím vznikne rozdílný potenciál pro smrštění, přičemž výsledkem je rozdílné vnitřní pnutí na delších stranách výlisku. Deformace stěn výlisku je výsledkem nesouměrného rozdělení vnitřního pnutí a projeví se po vyhození z dutiny formy, viz obr. 6.3.



Obr. 6.3 Rozdílná teplota stěn výlisku, vliv na deformace

Vstup chladicího média situujeme do těch míst výlisku, která jsou nejteplejší. To jsou oblasti vstupu taveniny do tvarové dutiny formy. S postupně chladnoucí taveninou ve formě (směrem ke konci toku taveniny) se pak chlazením dutiny zvyšuje teplota temperačního média. Příklad chlazení výlisku typu talíř je na obr. 6.4. Zde je přiváděno

chladičí médium do středu výlisku a následně odváděno spirálovou cestou směrem k obvodu.



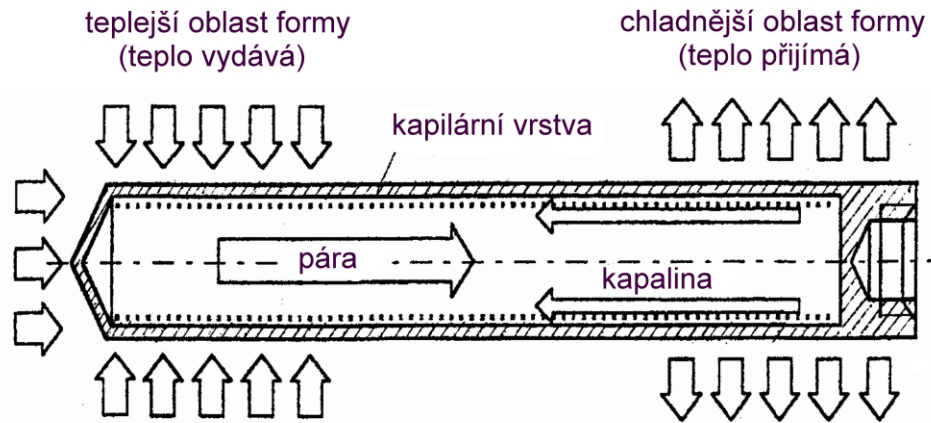
Obr. 6.4 Příklad chlazení talíře [6]

A – vstup chladičího média, B – výstup chladičího média

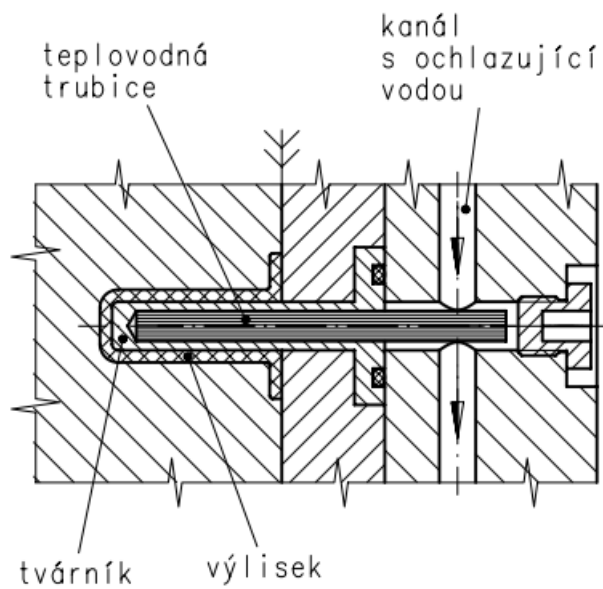
Chlazení tepelnými trubicemi

Tepelná trubice je oboustranně uzavřená trubice (nejčastěji kruhového průřezu). Uvnitř obsahuje vhodnou teplonosnou látku. Vnitřní povrch trubice je pokryt porézním materiálem (např. vrstva drátěné tkaniny). Ten představuje kapilární soustavu. Kapilární tepelné trubice mohou pracovat v jakékoliv poloze.

Při ohřevu jednoho konce trubice chlazenu (teplejší) oblastí formy se teplonosné médium vypařuje a přitom odebírá velké množství tepla. Vzniklé páry proudí vnitřním prostorem trubice do její opačné části, kde kondenzují. Při kondenzaci předává médium výparné teplo chladičímu prostředí. Vypařování i kondenzace probíhají při malých odlišných teplotách. Funkci tepelné trubice znázorňuje obrázek 6.5.



Obr. 6.5 Princip funkce tepelné trubice



Obr. 6.6 Příklad zástavby tepelné trubice

7. Sušení termoplastů

Termoplasty mohou svým povrchem pohlcovat vlhkost obsaženou v okolním prostředí. Některé plasty vstřebávají vodu v podobě páry z ovzduší. Jedná se o tzv. navlhavé plasty a dle schopnosti jímat vlhkost je dělíme do třech skupin:

- málo navlhavé, např. ABS, PC, SAN, SB
- středně navlhavé, např. POM, PMMA, PVC
- silně navlhavé např. PA6, PA66, PUR.

Vlhkost obsaženou v granulátu můžeme vyjádřit:

- hmotnostními procenty w , které udávají počet dílů vody v 100 dílech vlhkého plastu
- poměrem c , což je počet kilogramů vody na kilogram sušiny.

Obsah vlhkosti u navlhavých plastů mohou ovlivnit následující faktory:

- druh plastu
- vlhkost prostředí
- teplota prostředí
- doba vystavení plastu působení atmosférického vzduchu.

Výše uvedené okolnosti určují možnosti vysušení, tj. že materiál lze vysušit pouze do určité vlhkosti zvané rovnovážná vlhkost.

Sušení plastů probíhá s následující podmínkou:

$$p_{pp} > p_{po}, \quad (5.1)$$

p_{pp} - tlak páry ustavené těsně nad povrchem sušeného materiálu [Pa]

p_{po} - parciální tlak páry okolí [Pa]

Sušení plastu probíhá do okamžiku, kdy se tlak nad povrchem plastu sníží na tlak páry okolí, tj. $p_{pp} = p_{po}$.

Nadměrná vlhkost obsažená v granulátu vstupujícím do plastikačního válce a následně pak v tavenině může způsobovat zhoršení vlastností výstřiků a povrchové vady.

Zhoršení vlastností výstřiků

- zhoršení fyzikálních vlastností (hustota)
- změna mechanických vlastností (snížení pevnosti a tuhosti)
- zhoršení tepelných vlastností

- zhoršení dielektrických vlastností
- zvýšení reologických vlastností (získaná vyšší tekutost přináší větší sklon k přetokům)
- zhoršení pevnosti svarového spoje

Povrchové vady

Projevují se převážně tzv. vlhkostními šmouhami na povrchu výrobku jako otevřený profil ve tvaru písmene U proti směru toku taveniny. V oblasti vlhkostních šmouh vykazuje výrobek hrubý, porézní povrch. Další povrchové vady se projevují nerovnoměrným leskem, lokálními změnami barevného odstínu a tzv. stříbřením.

Povrchové vady vznikají v případě, že je vlhkost vázána v materiálu. V tavenině se vytváří vodní páry a bubliny jsou transportovány k povrchu taveniny. Bubliny mají snahu vyrovnat tlak, praskají a jsou s postupujícím čelem toku ochlazeny na stěnách nástroje. [10]

Konvenční sušení granulátu

Konvenční sušičky zahřívají granule a udržují je v proudu suchého vzduchu po dobu, než se dostane vlhkost na povrch a kde kritériem kvality je míra rosného bodu vzduchu (energeticky velmi nákladný proces). Sušení obvykle probíhá 2 až 6 hodin při teplotě 80 až 180 °C v závislosti na typu materiálu. Např. polyamid (PA) s počáteční vlhkostí 0,37 % lze vysušit konvenčním způsobem na 0,15 % konečné vlhkosti za 4-5 hodin.

V důsledku průtoku velkého množství vzduchu přes granulát, následkem tepelného, chemického a mechanického zatížení materiálu může docházet k jeho částečné degradaci.

Podtlakové sušení

U sušiček, jež pracují na principu podtlakového sušení, jsou molekuly vody vlivem podtlaku z granulí doslova vysáty. Výsledkem je, že doba sušení se zkracuje až patnáctkrát a spotřeba energie se snižuje téměř o 80 %. Vysoká účinnost je dána snižováním bodu varu vody se snižováním tlaku. Zatímco při normálním atmosférickém tlaku vzduchu 760 mm Hg je bod varu vody 100 °C, pak při tlaku sníženém na 635 mm Hg je bod varu 56 °C. Podtlaková sušička LPD vygeneruje vakuum 737 mm rtuťového sloupce. Např. polyamid s počáteční vlhkostí 0,37 % lze vysušit pomocí podtlakové sušičky již za 30 minut. [9]

Princip činnosti podtlakové sušičky:

Materiál je v zásobníku ohříván v uzavřeném okruhu na žádanou teplotu odpovídající typu materiálu. Následně se komora s teplým materiálem zatěsňuje a v zásobníku je vygenerován podtlak za současného odvádění vlhkosti do okolního vzduchu. Vysušený materiál podtlakově cyklicky postupuje z komory přes materiálový cyklon s uzavírací klapkou rovnou do násypky stroje nebo do mezizásobníku. Převážný výkon sušičky umožňuje nastavit tak, aby v násypce stroje bylo minimální nezbytné množství suchého materiálu.

8. Modelování a tvorba výkresové dokumentace vstřikovacího stroje

Moderní výroba používá dokumentaci výrobků vytvářených v tzv. elektronickém prostředí. Z uvedeného plyne, že informace o tvaru a rozměrech výrobků a výrobních sestav jsou v aktuální změnovatelné podobě pouze v tzv. elektronické podobě. Program, v němž byla 3D (3D znamená 3 dimenze = trojrozměrný) dokumentace vytvořena, poznáme obvykle na první pohled podle přípony souboru za tečkou v názvu (název_souboru.xxx). Například:

- přípona „.CATPart nebo „.CATProduct“ pochází z programu Catia v5
- příponu „.asm,“ vytváří program Pro/Engineer a Solid Edge
- příponu „.prt“ vytváří NX (Unigraphics), SlidWorks a Pro/Engineer
- přípony „.mfl“ a „.mf2“ pochází z programu IDEAS atd.

Existují i datové výměnné formáty čitelné téměř pro všechny modeláře. Ty představují zejména přípony „.igs“, „.stp“, „.vda“.

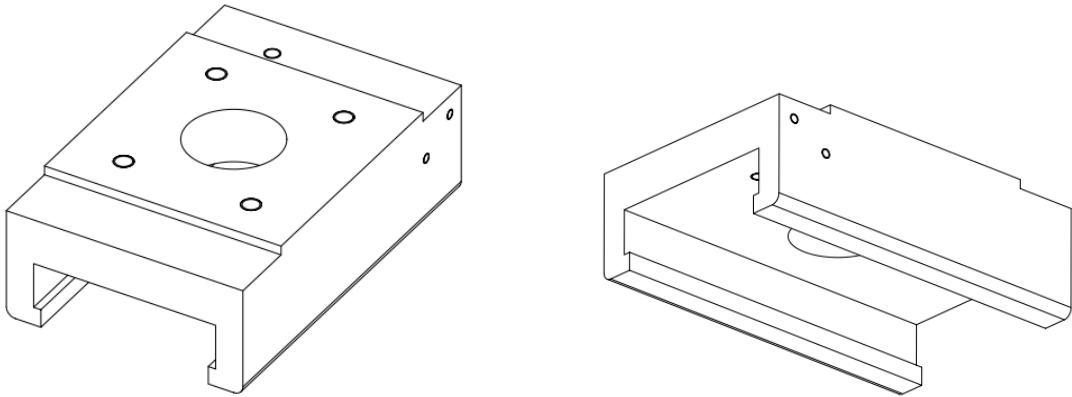
Podstatnou výhodou elektronické podoby dat je možnost snadného uchovávání (zálohování) na více místech současně. Způsob uchovávání vyplývá z podoby dat. V případě elektronických dat připadají v úvahu elektronická úložiště a zálohovací média:

- pevné počítačové disky
- disky DVD (CD)
- kazety s paměťovými páskami
- nejnověji flash paměti (flash paměť je principiálně obdoba EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory). Jde o vysoce integrované obvody, nikoli o magnetické médium, jež by mohlo být porušeno elektromagnetickým nebo jiným zářením.

3D data vytváříme v tzv. prostorových modelářích, jejichž využití nesmírně zjednodušuje tvorbu přesné a názorné technické dokumentace. To platí zejména tehdy, pokud máme již podobná data (tj. modely, sestavy a příslušné výkresy) v požadované kvalitě k dispozici. Tvarovou a zejména pak rozměrovou změnu výrobku můžeme za předpokladu dodržení pravidel tvorby dokumentace provést v relativně krátkém čase.

8.1 Postup modelování součásti

Následující obrázky a komentáře naznačují vznik dílu modelováním ve 3D prostředí programu IDEAS. Jedná se o obráběnou ocelovou kluznou přírubu násypky granulátu, viz obr. 8.1.

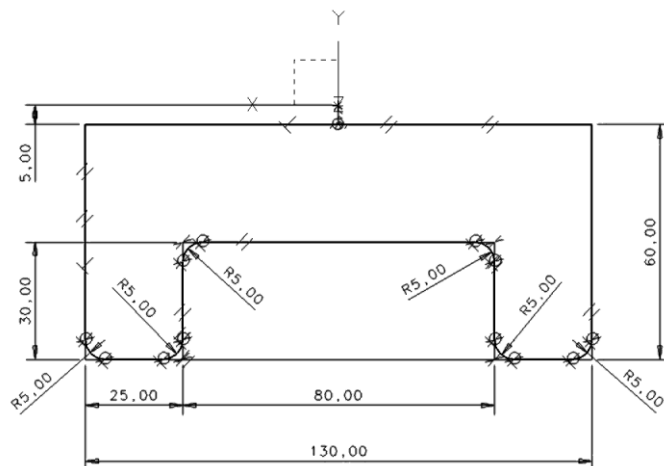


Obr. 8.1 Modelovaná příruba v prostředí 3D

Obrázek 8.2 znázorňuje vytvořenou dvojrozměrnou skicu v rovině xy (= obrys zhotovený ve směru os x a y). Jde o přesně tvarově a rozměrově definovaný profil, který následným krokem – tažením, vytvoří plné těleso příruby.

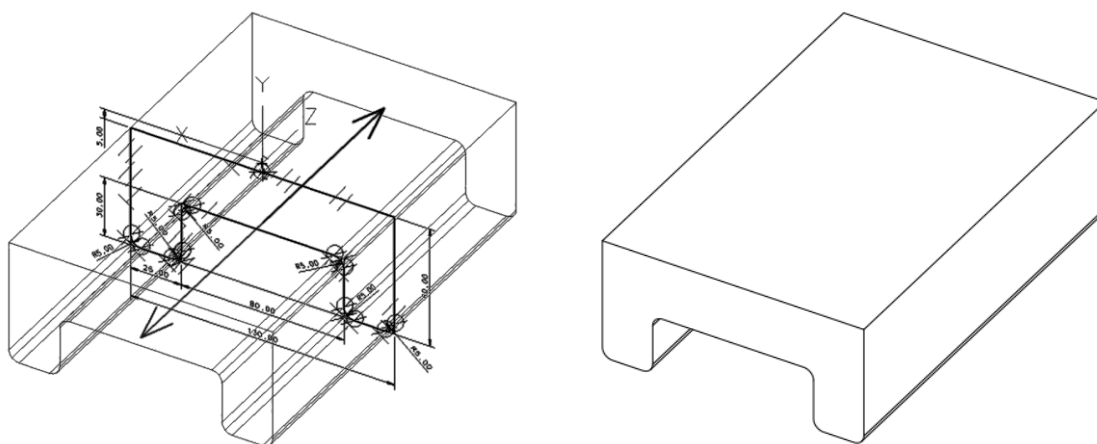
Základ uvedené skici spočívá v koordinačním systému, jehož definováním se začíná dílec konstruovat. Systém souřadnic polohově zajišťuje skicu, tj.:

- ve směru osy x ... střed horní vodorovné obrysové čáry je vázán k počátku souřadnic
- ve směru osy y ... střed horní vodorovné obrysové čáry je vázán ve vzdálenosti -5 mm od počátku souřadnic.



Obr. 8.2 Vytvoření 2D obrysové skici

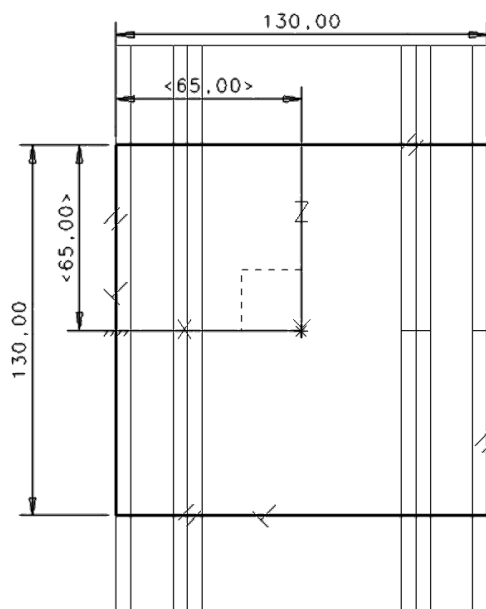
Na obrázku 8.3 vidíme tzv. tažení předem definované skici. Skica je tažena od středu o 100 mm v obou směrech osy z. Tím dostaneme prostorové těleso dlouhé 200 mm, vnější rozměry 60x130x200 mm.



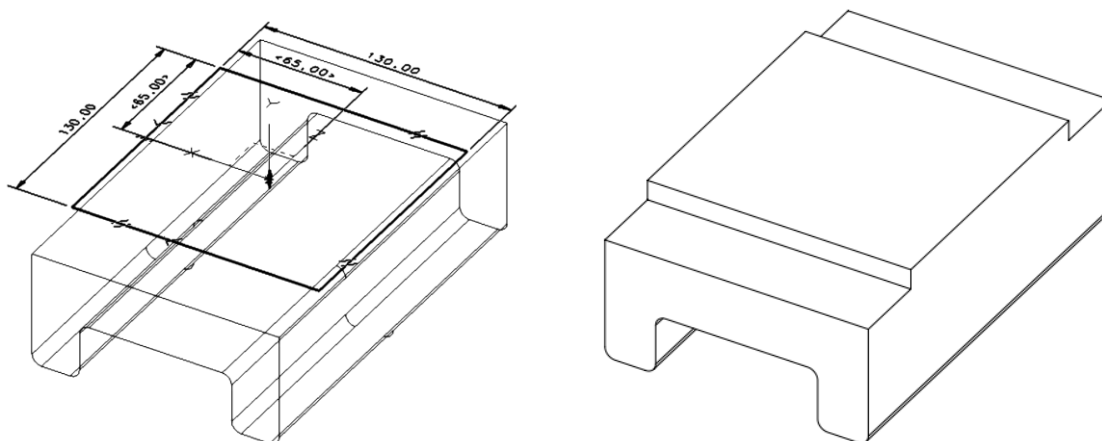
Obr. 8.3 Tažení obrysové skici - vznik prostorového dílu

Na obrázku 8.4 v provedení tučnou čarou vyniká obrys skici výstupku 130x130 mm na horní ploše dílu. Skica kreslena v rovině xz.

Tažením skici od počátku v záporném směru osy y o 10 mm se výstupek spojí s tělem příruby (obr. 8.5).



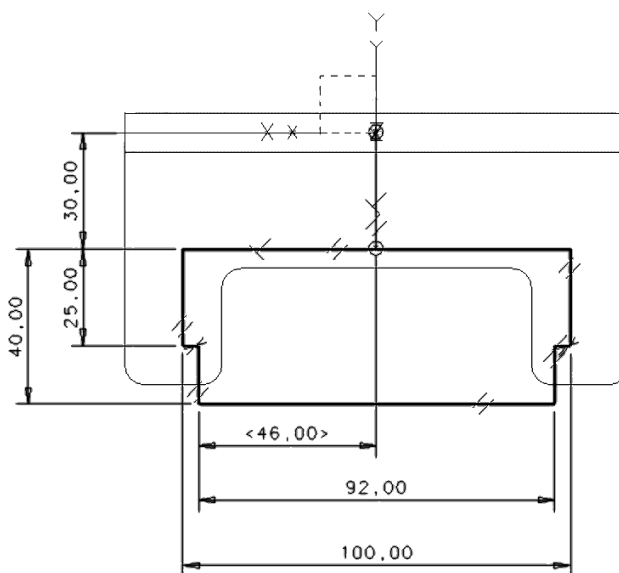
Obr. 8.4 Skica výstupku 130x130x5 mm v horní části příruby



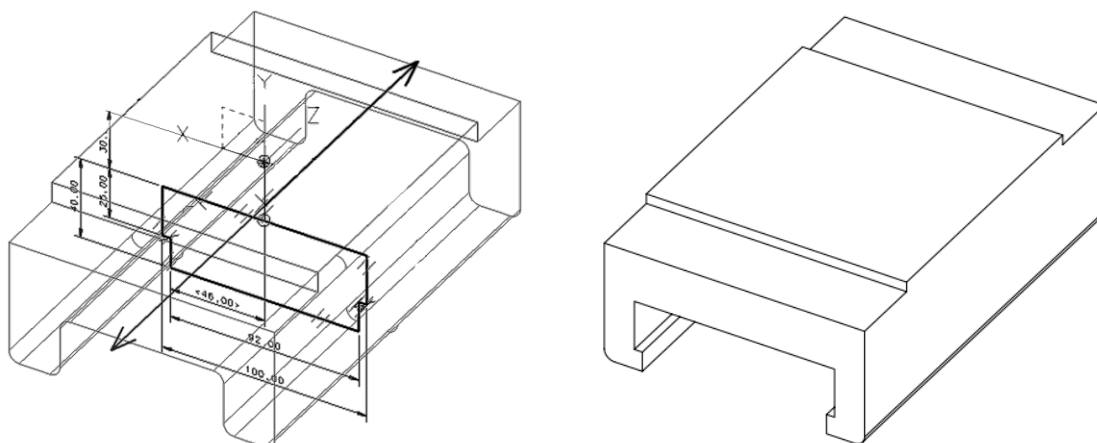
Obr. 8.5 Vytvoření výstupku 130x130x5 mm na horní ploše příruby tažením skici

Další prvek - drážka tvaru T naspodu příruby. Profil drážky tvoří skica v rovině xy . Polohu skici drážky vůči počátku koordinačního systému určují kóty 46 a 30 (obr. 8.6).

V následujícím kroku na obr. 8.7 vzniká tažením skici T-drážka. Tažení a zároveň vybrání materiálu se děje od středu koordinačního systému a to oboustranně po 105 mm ve směru osy z . Délka drážky vychází v celé délce příruby (200 mm). Oboustranný přesah 5 mm volíme proto, abychom s jistotou vyloučili překrytí čelních ploch řezaného a řezacího profilu.



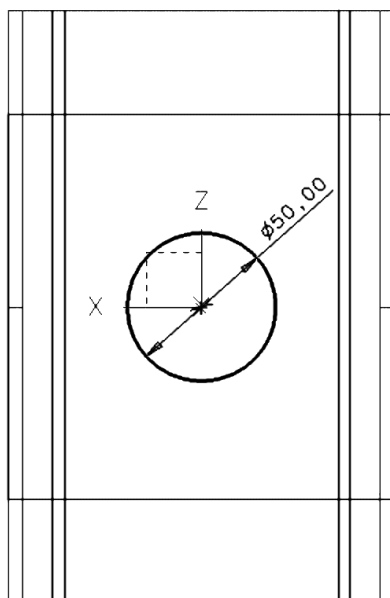
Obr. 8.6 Skica T-drážky



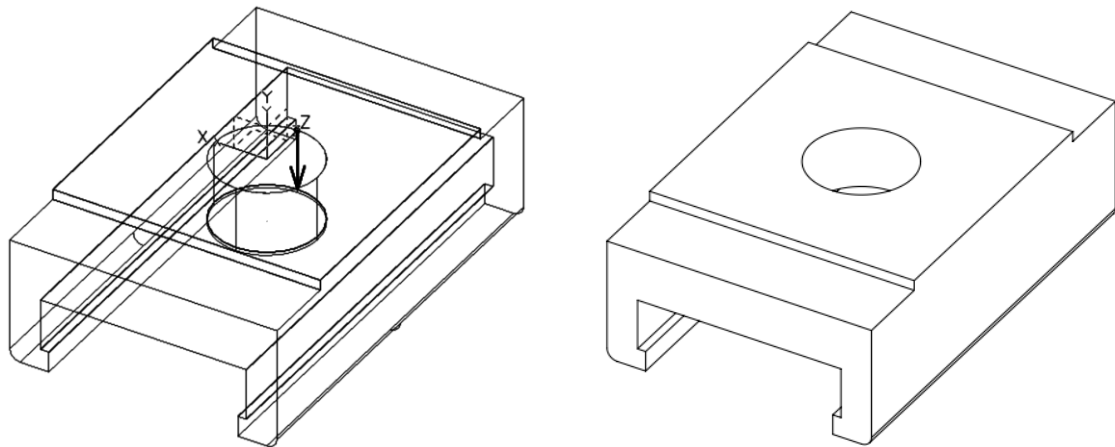
Obr. 8.7 Vybrání materiálu tažením skici T drážky

Skica otvoru násypky = kružnice $\varnothing 50$ mm v rovině xz se středem vázaným k počátku koordinačního systému (obr. 8.8).

Otvor násypky vyřízneme válcem vzniklým z připravené skici v záporném smyslu osy z . Hodnotu pro tažení volíme v tomto případě nečíslně a to *skrz celý díl* (obr. 8.9).



Obr. 8.8 Skica otvoru násypky



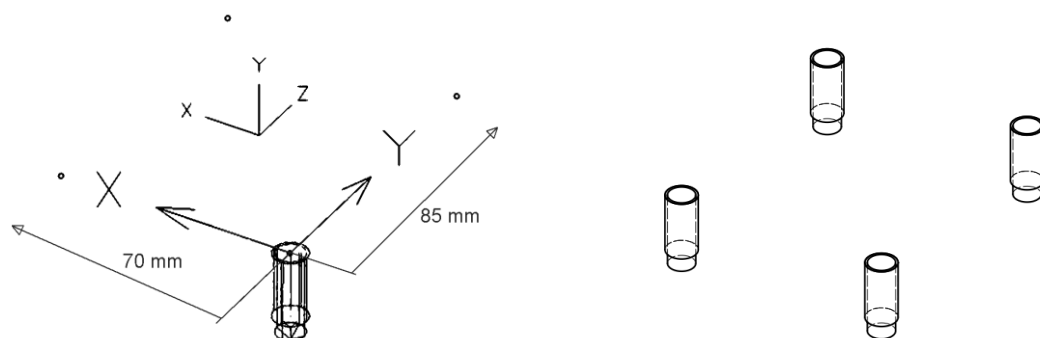
Obr. 8.9 Tažení skici – vybrání materiálu pro otvor násypky

Pro další prvek, nacházející se na horní ploše výstupku – čtveřici závitů M10 do hloubky 20 mm, připravíme jeden tzv. řezací dílec (obr. 8.10). Ten vznikne následujícím způsobem:

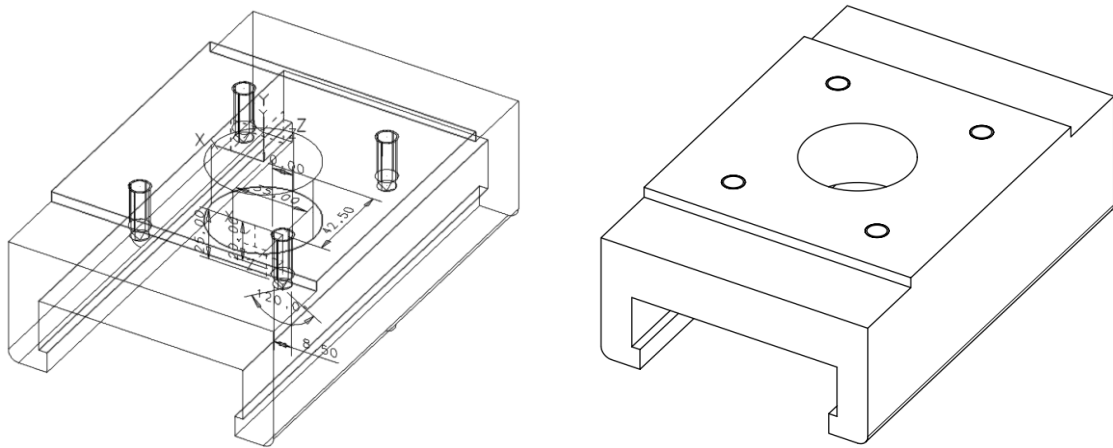
1. V knihovně 3D dílů vybereme závitový otvor M20 s délkou závitu 20 mm a hloubkou otvoru malého průměru závitu 25 mm. Vybraný závit má na ploše tvar plného osazeného válce (plochou zde rozumíme obrazovku počítače).
2. Pomocí funkce *pravoúhlé pole* vytvoříme blok ve tvaru obdélníku o stranách 70 (ve směru osy x) a 85 mm (ve směru osy y), v jehož rozích jsou následně umístěny 4 definované závity.

Připraveným řezacím dílcem vyřízneme čtveřici závitů v horní ploše výstupku příruby. Operaci vyříznutí závitů předchází polohování (obr. 8.11):

1. Rovinu xz pole děr umístíme do roviny xz příruby, přičemž osy x zůstanou orientovány vzájemně rovnoběžně.
2. Vzájemnou polohu souřadných systémů v rovině xz určíme kótami 42.5 mm ve směru osy z a 35 mm ve směru osy x .



Obr. 8.10 Pravoúhlé pole čtveřice děr M10x20



Obr. 8.11 Vyříznutí čtveřice závitů M10x20

Dvojice závitů M5x10 po obou bocích příruby vyřízneme naráz poté, co připravíme řezací díl obsahující všechny 4 závity.

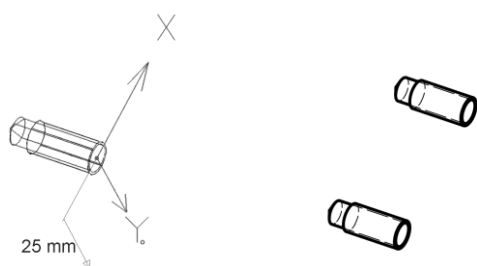
Řezací dvojici závitů pro jeden bok příruby konstruujeme následovně:

1. V knihovně 3D dílů vybereme závitový otvor M5 s délkou závitu 10 mm a hloubkou otvoru malého průměru závitu 13 mm. Umístíme jej na plochu.
2. Pomocí funkce *pravoúhlé pole* vytvoříme dvojici závitů zadáním vzdálenosti 25 mm ve směru osy y (viz obr. 8.12). Počet kopírovaných závitů zadáme 1 ve směru osy x a 2 ve směru osy y .

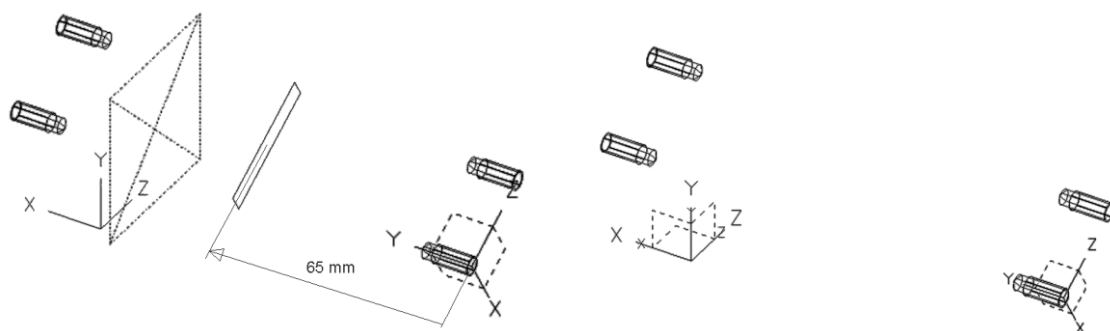
Čtveřici řezacích závitů získáme zrcadlením již vytvořené dvojice. Rovinu zrcadlení určíme jako rovinu rovnoběžnou s rovinou xz ve vzdálenosti 65 mm v kladném smyslu osy y (obr. 8.13).

Zhotoveným řezacím dílem obsahujícím všechny čtyři závity M5 vyřízneme najednou závitové otvory do obou boků příruby. Pravý bok příruby zvolíme referenční rovinou pro řezací díl. Na referenční rovinu navážeme rovinu xz řezacího dílu. Polohu řezacího dílu v rovině xz určíme kótami vázanými k souřadnému systému příruby (viz obr. 8.14):

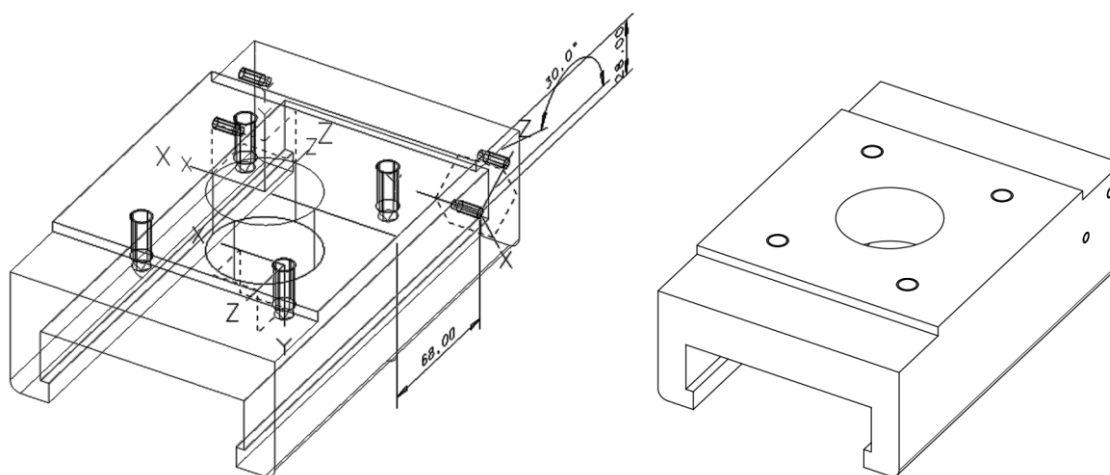
- v kladném smyslu osy z ... 68 mm
- v záporném smyslu osy y ... 28 mm
- úhel mezi osou z a spojnici středů závitů na jednom boku 30°.



Obr. 8.12 Pole dvojice závitů M5x10



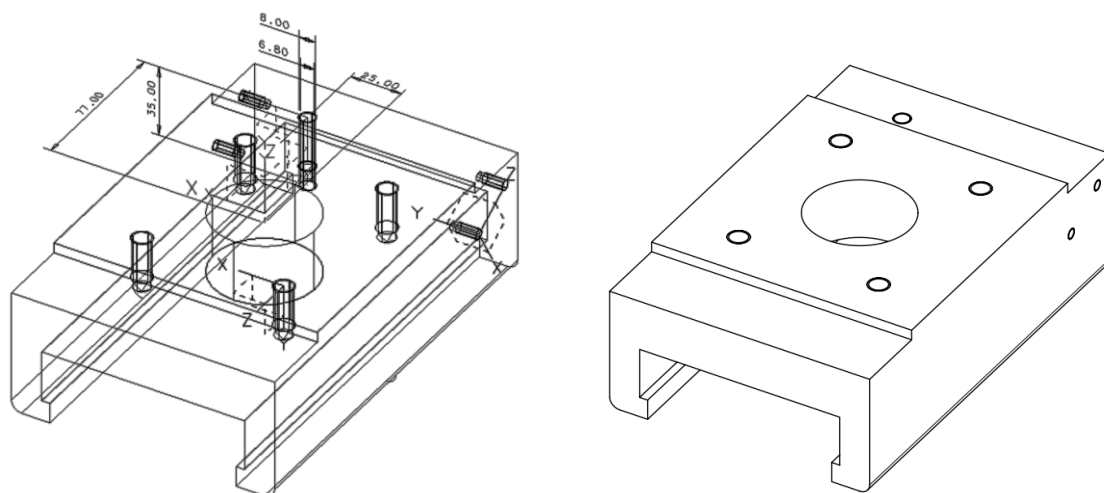
Obr. 8.13 Čtveřice závitů M5x10 vytvořena zrcadlením



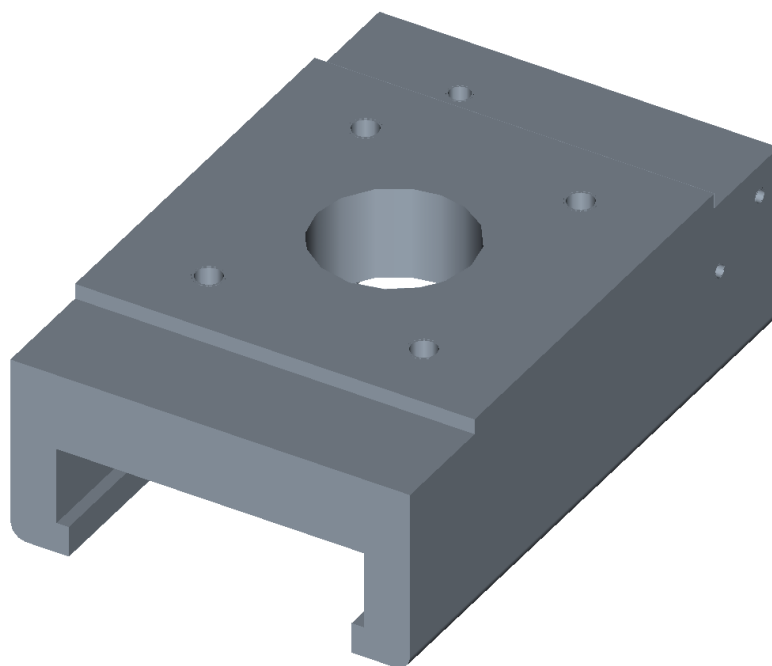
Obr. 8.14 Vyříznutí závitů M5 do boků příruby

Poslední operace spočívá ve vyříznutí průchozího závitu M8 do horní krajní plochy příruby. Z knihovny stáhneme model závitu M8x30/35. Za referenční plochu pro rovinu xz závitu volíme vrchní okrajovou plochu příruby. Polohu závitu v referenční rovině určíme kótami vzdálenosti středu souřadného systému závitu od středu souřadného systému příruby (viz obr. 8.15):

- v kladném smyslu osy z ... 77 mm
- v kladném smyslu osy x ... 25 mm.



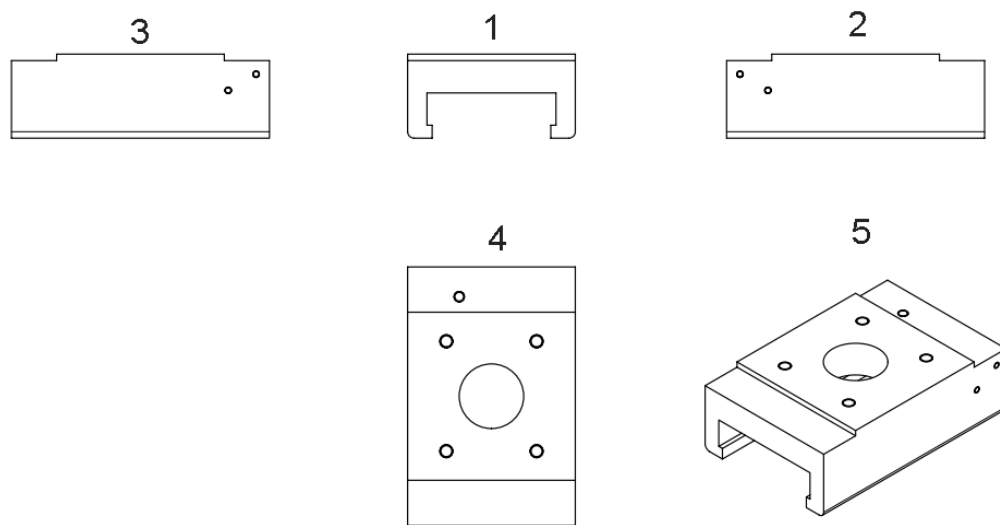
Obr. 8.15 Vyřízení závitu M8



Obr. 8.16 Hotový vymodelovaný dílec

8.2 Tvorba výkresu součásti

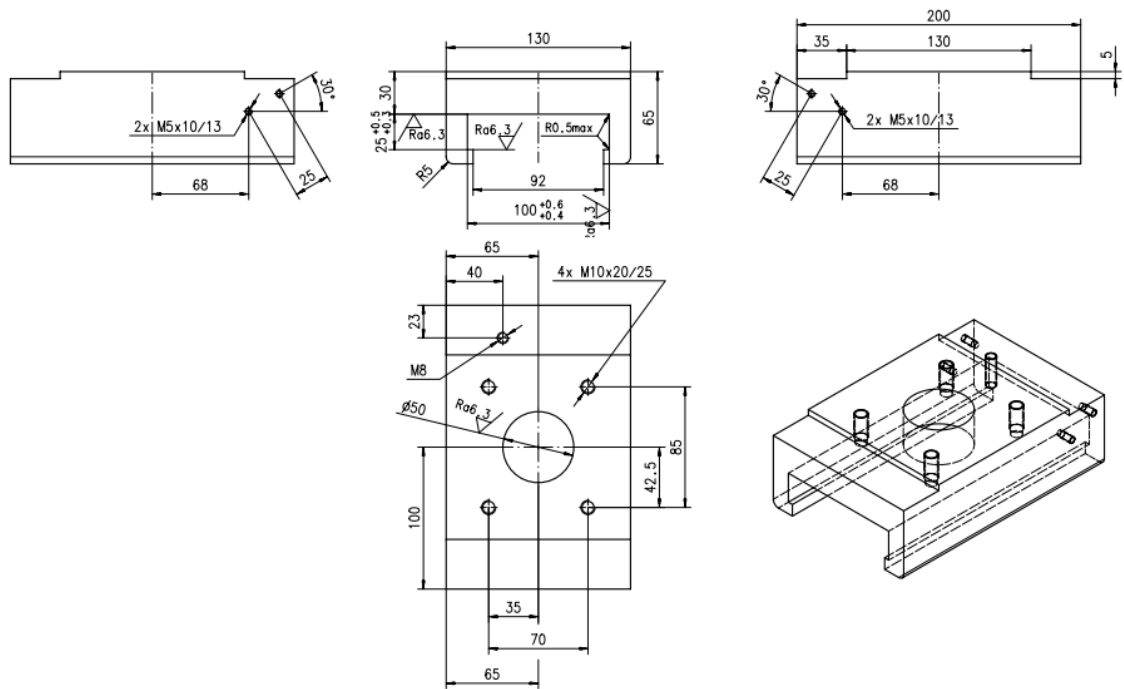
Výkresy v prostředí 3D vytváříme pomocí již vytvořených modelů nebo sestav. Začínáme vybráním a vyrovnáním konkrétního dílu nebo sestavy. Ze stanovené polohy se vychází při zhotovení prvního tzv. čelního pohledu, na obr. 8.17 označeného číslem 1. Další pohledy již automaticky vyplynou z čelního pohledu. Pro lepší názornost se přidává ještě pohled trojrozměrný, na obr. 8.17 s číslem 5. V případě nutnosti můžeme přidat další doplňující pohledy (např. pohled zespoda), řezy určitými částmi dílu atd.



Obr. 8.17 Vytvoření základních výkresových pohledů

1 – čelní pohled, 2 – pohled zleva, 3 – pohled zprava, 4 – pohled shora, 5 – trojrozměrný pohled

Definováním pohledů máme určeny obrysy pro následné kótování, doplnění os souměrnosti, hodnot drsností, geometrických tolerancí tvaru a polohy, viz obr. 8.18. V jednotlivých pohledech můžeme např. povolit zobrazení neviditelných a tangenciálních hran. Pro úplnost se výkres doplní rámečkem, rohovým razítkem a případně dalšími technickými požadavky a předpisy.



Obr. 8.18 Okótovaný výkres příruby

Výše uvedené postupy dávají tušit, že jakýkoliv díl z technické praxe lze vymodelovat a zdokumentovat ve 3D prostředí zpravidla několika způsoby, přičemž záleží na zkušenostech a invenci konstruktéra. Počítačová podpora vydatně pomáhá při tvorbě technické dokumentace. V zásadě platí: čím více různých výrobků máme již ve 3D podobě k dispozici, tím snazší a rychlejší je tvorba dílů nových, tvarově více či méně podobných.

Závěr

Účelem práce bylo nastínění důležité a perspektivní výrobní technologie. Jakost dílů vyrobených popisovanou technologií ovlivňuje mnoho faktorů, které musíme zohlednit již při návrhu dílu a volby vhodného materiálu, přes konstrukci formy a řízení vstřikování až po vyjmutí a dochlazování dílu mimo formu. Přes mnohá technická úskalí můžeme popisovanou technologii považovat za technicky zvládnutou.

Svým rozsahem nemůže předkládaná bakalářská práce detailně postihnout nastíněnou problematiku. Zpracování tématu práce by nepochybně šlo uchopit i z jiných stran a pohledů. Zmíněné téma je mnohem širší a jsem si vědom, že by šlo dále podrobněji rozpracovat zejména v následujících směrech:

- tokové chování tavenin termoplastů s využitím simulačních programů
- modelování součástí v prostředí 3D by šlo provádět i v jiných programech (např. SolidWorks, Pro/Engineer, NX atd.), které by mohly být rychlejší při zachování standardů stávajícího programu (IDEAS).

Použitá literatura

- [1] ŠTĚPEK, Jiří, ZELINGER, Jiří, KUTA, Antonín. *Technologie zpracování a vlastnosti plastů*. Redaktorka J. Pochmanová. 1. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1989. 638 s.
- [2] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracovávání kaučuků a plastů*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1999. 203 s. ISBN 80-7080-367-3.
- [3] PECINA, Pavel, PECINA, Josef. *Materiály a technologie - plasty*. Brno: Masarykova univerzita, 2006. 54 s. ISBN 80-210-4100-5.
- [4] BOBČÍK, Ladislav, et al. *Formy pro zpracování plastů, I. díl – Vstřikování termoplastů*. Zdislav Heger. 2. upr. vyd. Brno: Uniplast, 1999. 134 s.
- [5] BOBČÍK, Ladislav, et al. *Formy pro zpracování plastů II. díl – Vstřikování termoplastů*. Zdislav Heger. 1. vyd. Brno: Uniplast, 1999. 214 s.
- [6] ŘEHULKA, Zdeněk. *Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů*. 1. vyd. Praha: Sekurkon, 2001. 175 s. ISBN 80-902756-7-2.
- [7] L. Běhálek: Reologie tavenin termoplastů v průmyslové praxi, Laboratorní cvičení studijního programu „Strojní inženýrství“, TU v Liberci 2007
- [8] Kunststoff-Institut Lüdenscheid K.I.M.W. NRW GmbH: Störungsratgeber für Oberflächenfehler an thermoplastischen Spritzgußteilen, Lüdenscheid, Německo
- [9] Podtlakové sušení navlhavých materiálů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002, č. 1 [cit. 2009-09-30], s. 20. Dostupný z WWW:
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/podtlakove-suseni-navlhavych-materialu>>.
- [10] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů*. Redaktorka Hana Züglerová. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009. 248 s. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [11] <http://www.kistler.com>
- [12] http://www.okino.com/conv/filefmt_cad.htm
- [13] <http://www.strack.de/>
- [14] <http://www.engelglobal.com>