



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY PLASTOVÉHO DRŽÁKU UHLÍKŮ

DESIGN OF MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR PLASTIC MOUNT CARBON

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAKUB FOJTÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. BOHUMIL KANDUS

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jakub Fojtík

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh technologie výroby plastového držáku uhlíků

v anglickém jazyce:

Design of manufacturing technology for plastic mount carbon

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě zadaného tvaru plastového dílce vypracovat rešerši na technologii vstřikování plastů do forem, provést návrh technologického postupu a konstrukce vstřikovací formy včetně potřebných výpočtů.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je komplexní návrh technologie výroby na úrovni technologického postupu a konstrukční výkresové dokumentace nástroje na držák uhlíků z plastu podložený technicko-ekonomickým zhodnocením.

Seznam odborné literatury:

- ŠTĚPEK, Jiří, ZELINGER, Jiří, KUTA, Antonín. Technologie zpracování a vlastnosti plastů. 1. vyd. Praha, Bratislava : SNTL, Alfa, 1989. 638 s. ISBN DT 678.5(075.8).
- SOVA, Miloš, KREBS, Josef. Termoplasty v praxi. 1. vyd. Praha : Verlag Dashöfer, 2001. 2 sv. (580, 425 s.). ISBN 80-86229-15-7.
- ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů. 1. vyd. Praha : Nakladatelství BEN, 2009. 248 s. ISBN 978-80-7300-250-3.
- MENGES, Georg, MOHREN, Paul. How to Make Injection Molds. 2nd edition. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 1993. 558 s. ISBN 1-56990-062-0.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Bohumil Kandus

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 23.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

FOJTÍK Jakub: Návrh technologie výroby plastového držáku uhlíků

Diplomová práce se zabývá návrhem technologie vstřikování plastového dílce držáku uhlíků z polykarbonátu s označením Lexan 945A do vstřikovací formy s horkou vtokovou soustavou. Nejprve je zde předložena obecná literární studie týkající se plastů a technologie vstřikování obecně. Dále pokračuje studie vstřikovacích forem s horkými vtokovými soustavami a analýza vstřikovacího procesu pomocí počítačové simulace. Navrhovaná vstřikovací forma pro výrobu plastových držáků je dvojnásobná se čtyřmi horkými tryskami, třideskového typu s jednou dělicí rovinou, kde jedna z desek slouží pro uložení horké vtokové soustavy ve formě. Práce obsahuje část výkresové dokumentace vstřikovací formy a seznam položek. Zvoleným vstřikovacím strojem je Arburg Allrounder 370 U s označením 700-290 dle EUROMAP.

Klíčová slova: polykarbonát, technologie vstřikování, vstřikovací forma, horká vtoková soustava

ABSTRACT

FOJTÍK Jakub: Design of manufacturing technology for plastic mount carbon

This master thesis deals with design of injection moulding technology for plastic holder of carbon brushes made of polycarbonate labelled Lexan 945A. The injection is performed into injection mould with hot runner system. Initially there is general study related to plastics and injection moulding technology. Further the study continues with injection moulds with hot runners and ends with computer analysis of injection moulding process. The designed injection mould for production of plastic holders is three-plate, double cavity mould with four hot nozzles and one parting plane, where one of the plates serves for mounting of the hot runner system inside the mould. This work contains part of the drawing documentation and item list of the injection mould. The selected injection moulding machine is Arburg Allrounder 370 U labelled 700-290 according to EUROMAP.

Keywords: polycarbonate, injection molding technology, mould, hot runner system

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE

FOJTÍK, Jakub: *Návrh technologie výroby plastového držáku uhlíků*. Brno, 2011. 91 s., 11 příloh, CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Bohumil Kandus.

PROHLÁŠENÍ AUTORA

Čestně prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Návrh technologie výroby plastového držáku uhlíků* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Bohumil Kanduse a uvedl v seznamu všechny použité literární, odborné a jiné zdroje.

V dne 26. 5. 2011

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Bohumilu Kandusovi za uspořádání exkurze do firmy ARBURG s.r.o. v Brně, také za mnoho cenných připomínek a rad při zpracování diplomové práce. Dále děkuji řediteli firmy Moravská nástrojárna a.s. panu Ing. Václavu Mořkovskému za cenné připomínky a praktické rady při zpracování diplomové práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace práce

Prohlášení autora

Poděkování

Obsah

1 ÚVOD	11
2 ZADANÝ PLASTOVÝ DÍLEC.....	12
2.1 VARIANTY VÝROBY DÍLCE	13
3 PLASTY	14
3.1 CHEMICKÁ STAVBA A MOLEKULÁRNÍ STRUKTURA	14
3.2 TERMOPLASTY	15
3.3 REAKTOPLASTY	16
3.4 VZNIK URČITÝCH DRUHŮ PLASTŮ.....	16
3.5 VLASTNOSTI PLASTŮ.....	17
3.5.1 Mikrostruktura polymerních materiálů.....	17
3.5.2 Tepelné vlastnosti.....	18
3.5.3 Smrštění.....	20
3.5.4 Mechanické vlastnosti polymerů.....	20
3.6 STÁRNUTÍ A KOROZE PLASTŮ	22
3.7 PŘÍSAKY (ADITIVA)	22
4 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	24
4.1 VSTŘIKOVACÍ STROJ	24
4.2 VSTŘIKOVACÍ FORMA	25
4.3 POSTUP VSTŘIKOVÁNÍ.....	26
4.3.1 Vstřikovací cyklus.....	27
4.4 VLIVY PLASTOVÉHO DÍLCE NA VSTŘIKOVACÍ PROCES	30
4.5 VLIVY KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY NA VSTŘIKOVACÍ PROCES	31
4.6 KONSTRUKČNÍ TYPY VSTŘIKOVACÍCH FOREM.....	34
4.7 OCELI PRO SOUČÁSTI VSTŘIKOVACÍCH FOREM	35
5 HORKÁ VTOKOVÁ SOUSTAVA.....	37
5.1 TYPY HORKÝCH VTOKOVÝCH SOUSTAV	38
5.1.1 Externě vyhřívaná horká vtoková soustava	39
5.2 VÝHODY A NEVÝHODY POUŽITÍ HORKÝCH VTOKOVÝCH SOUSTAV	42
6 POČÍTAČOVÁ SIMULACE VSTŘIKOVÁNÍ	45
6.1 ANALÝZA PLNĚNÍ A DOTLAKU	45
6.2 ANALÝZA CHLAZENÍ.....	46
6.3 ANALÝZA ORIENTACE VLÁKEN	47
6.4 ANALÝZA ZBORCENÍ DÍLCE	47
6.5 OPTIMALIZACE.....	48
7 VOLBA MATERIÁLU PLASTOVÉHO DÍLCE.....	49
7.1 POPIS A VYROBITELNOST DÍLCE	49
7.2 NEMODIFIKOVANÝ POLYKARBONÁT	50

7.3	VLASTNOSTI LEXANU® (PC)	50
7.3.1	<i>Houževnatost</i>	51
7.3.2	<i>Tuhost</i>	51
7.3.3	<i>Nehořlavost</i>	51
7.3.4	<i>Elektrická izolace</i>	52
7.4	ZPRACOVÁNÍ LEXANU	52
7.5	UŽITÍ LEXANU	55
7.6	VOLBA MODIFIKACE LEXANU	55
7.7	PROCESNÍ PARAMETRY VSTŘIKOVÁNÍ LEXANU	56
7.8	PŘERUŠENÍ VÝROBY A ČIŠTĚNÍ VSTŘIKOVACÍ KOMORY	57
7.9	RECYKLACE LEXANU	58
7.10	VYBAVENÍ VSTŘIKOVACÍHO STROJE	58
8	KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY	59
8.1	PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH VSTŘIKOVACÍ FORMY	59
8.2	DETAILNÍ KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY	60
8.3	KONSTRUKČNÍ NÁVRH VSTŘIKOVACÍ FORMY PRO ZADANÝ DÍLEČ	63
8.3.1	<i>Volba CAD softwaru pro návrh a tvorbu vstřikovací formy</i>	63
8.3.2	<i>Volba dělicí roviny a rozdělení tvarových dutin</i>	64
8.3.3	<i>Volba velikosti a umístění horké vtokové soustavy</i>	65
8.3.4	<i>Volba velikosti desek vstřikovací formy</i>	66
8.4	ÚPRAVA REFERENČNÍHO 3D MODELU PLASTOVÉHO DÍLCE	67
8.5	TECHNOLOGICKÉ VÝPOČTY VSTŘIKOVACÍCH PARAMETRŮ	67
8.6	SIMULACE PLNĚNÍ TVAROVÉ DUTINY FORMY	71
8.6.1	<i>Volba nové polohy vtoků</i>	73
8.6.2	<i>Výsledek optimalizace polohy vtoků</i>	74
8.7	KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY	75
8.8	KONSTRUKČNÍ VÝPOČTY HORKÉ VTOKOVÉ SOUSTAVY	82
9	TECHNOLOGICKÁ ČÁST	84
9.1	VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE	84
9.2	TECHNOLOGICKÝ POSTUP	86
10	TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	88
10.1	VÝPOČET CENY PLASTOVÉHO DÍLCE	88
10.2	VÝPOČET DOBY SPLNĚNÍ DODÁVKY	90
11	ZÁVĚR	91

Seznam použité literatury

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků a grafů

Seznam tabulek

Seznam příloh

Seznam výkresů

1 ÚVOD [10] [31]

Technologie vstřikování jedna z nejpoužívanějších metod výroby plastových součástí. Používá se pro širokou škálu produktů v téměř všech typech průmyslu. Plastový dílec je přitom vyroben pouze za pomoci vstřikovacího stroje, vstřikovací formy a definované technologie. Ta je daná vstřikovací formou.

Simulační softwary pomáhají konstruktérovi formy definovat správnou technologii. Dále také pomáhají plastikářské výrobě nastavit vstřikovací stroj v nejkratším možném čase. Optimalizace vstřikovací formy pouze v reálném procesu často vyžaduje více mnohdy drahocenného času. Počítačová simulace napomáhá k rychlejšímu zavedení vstřikovací formy do produkce a dřívější výroby plastových dílců splňujících zadané požadavky.

Vstřikovací forma může budít dojem velmi drahého kusu oceli. Cena formy je mnohdy vyšší než cena některých ostatní části samotného vstřikovacího stroje. Nicméně při dlouhodobém výrobním procesu vstřikovací forma reprezentuje jen malou část ceny výsledných plastových produktů. Správné plánování během vytváření vstřikovací formy vyžaduje komunikaci mezi designérem plastového dílce, konstruktérem vstřikovací formy, výrobcem vstřikovací formy a dodavatelem materiálu plastu.

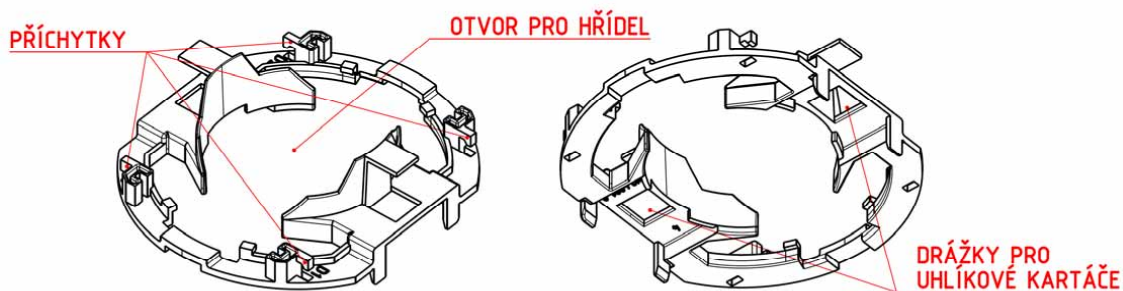
Druh vtokové soustavy je jeden z nejdůležitějších faktorů na proces vstřikování a výsledné vlastnosti plastového dílce. Studené vtokové systémy mají nevýhody jako vysoká odpadovost, nutnost manuálních víceprací, nízká kvalita vzhledu produktu a požadavky na vysoký vstřikovací tlak. Proto se konstruktéři uchylují k použití horkých vtokových systémů, které poskytují přesně regulovatelné procesní teploty, stejnoměrné plnění vícenásobných forem, uniformní teplotní pole, zvýšení mechanických vlastností plastového dílce a v neposlední řadě redukci vstřikovacího tlaku. Horké vtokové systémy umožňují výrazné ušetření nákladů na zpracovávaný materiál plastu. To je dáno eliminací vtokové soustavy, čímž se snižuje objem vstřikované dávky. Navíc odbouráním hlavního vtokového kanálu se výrazně zkracuje dráha otevření nástroje nutná pro vyhazování dílců. Z těchto důvodů dochází k mnohdy podstatnému zkrácení doby vstřikovacího cyklu.



Obr. 1.1 Plastové dílce vyrobené vstřikováním polykarbonátu [10] [31]

2 ZADANÝ PLASTOVÝ DÍLEC [8] [48]

Plastový dílec (Obr. 2.1) o rozměrech $\varnothing 108$ mm a výšce 32,5 mm slouží jako držák dvou uhlíkových kartáčů v elektrickém asynchronním motoru, přičemž držák je uchycen ve statoru za 4 výstupky na obvodu dílce. Po stranách jsou v drážkách na pružinách uchyceny dva uhlíkové kartáče, které tlačí na rotor procházející velkým otvorem uprostřed držáku.



Obr. 2.1 Popis zadané součásti, držáku uhlíků

Důležité jsou především obvodové rozměry držáku pro dostatečně přesné uchycení držáku do statoru elektromotoru. Hřídel rotoru elektromotoru prochází otvorem ve středu držáku se značnou vůlí, není tedy potřeba předepisovat velkou přesnost na vnitřní otvor dílce.

Termoplast pro výrobu plastového dílce zvolený v této diplomové práci je od firmy SABIC Innovative Plastics™ a má obchodní označení Lexan® 945A. Jde o nevyztužený polykarbonát (PC) vhodný pro technologii vstřikování daného dílce a vhodný především pro jeho funkci. Lexan® 945A je technický materiál vyznačující se velmi dobrou houževnatostí, dobrou tuhostí a nehořlavostí. Je také vhodný pro práci za nižších teplot. Některé vybrané vlastnosti materiálu dle [48] jsou uvedeny v Tab. 2.1. Po vyrobení plastového dílce technologií vstřikování již není součást dále upravována.

Tab. 2.1 Vybrané fyzikální, mechanické a procesní vlastnosti [8] [48]

Vybraná vlastnost	Obvyklá hodnota	Dle standardu
Mez kluzu v tahu, 50 mm/min [MPa]	63	ISO 527
Mez pevnosti v tahu, 50 mm/min [MPa]	65	ISO 527
Modul pružnosti v tahu, 1 mm/min [MPa]	2350	ISO 527
Tvrдость, H358/30 [MPa]	95	ISO 2039-1
Nárazová práce dle Izoda, s vrubem 80*10*4 +23°C [kJ/m ²]	12	ISO 180/1A
Nárazová práce dle Izoda, s vrubem 80*10*4 -30°C [kJ/m ²]	10	ISO 180/1A
Objemový index toku taveniny, při 300°C/1.2 kg [cm ³ /10 min]	10	ISO 1133
Smrštění na taženém vzorku [%]	0.5 - 0.7	SABIC Metoda
Hustota [g/cm ³]	1.2	ISO 1183
Izolační pevnost, v oleji, 3.2 mm [kV/mm]	17	IEC 60243-1
Třída nehořlavosti 94V-2 při tloušťce [mm]	1,5	UL 94
Třída nehořlavosti 94V-0 při tloušťce [mm]	3	UL 94
Limitní kyslíkové číslo (LOI) [%]	35	ISO 4589
Teplota taveniny [°C]	280 - 310	-
Teplota formy [°C]	80 - 110	-

2.1 Varianty výroby dílce

Vzhledem k požadované funkci plastového dílce lze dílec vyrobit pomocí různých technologií. A to buď technologií vstřikování termoplastů nebo vstřikování reaktoplastů a nebo jako plechový dílec pomocí technologie lisování. V dané podobě lze plastový dílec vyrobit nejlépe pouze pomocí technologie vstřikování termoplastů. Pro zbylé dvě zmíněné technologie by byla potřeba provést těmito technologiím specifické geometrické změny. Následuje stručný popis zmíněných výrobních variant, seřazených od nejméně vhodné po nejvhodnější.

- 1. varianta – výroba pomocí lisování postupovým nástrojem plechu s ochrannou folií. Daný dílec lze zhotovit pomocí střížných a ohýbacích operací plechu v postupovém lisovacím nástroji. V tomto případě by se však stávající geometrie dílce musela změnit velmi výrazně. Pro dodržení požadavku na elektrickou neprůraznost dílce je také potřeba nanést na funkční části dílce plastovou folii a tím zabezpečit požadované elektrické vlastnosti. Samotná produkce plechových dílců může v postupovém nástroji probíhat velice rychle. Výrazně se však celková doba výroby dílce prodlouží právě z důvodu nanášení fólie. Pro zabránění této prodlevy by bylo nejvhodnější volit nanášení plastové fólie na pás plechu před jeho samotným lisováním. Je také nutné zvážit, zda kovový dílec příliš neovlivní průběh magnetického pole v elektromotoru.
- 2. varianta – výroba technologií vstřikování reaktoplastů. Pro danou aplikaci je vhodný např. druh reaktoplastu zvaný fenolová pryskyřice neboli fenoplast (PF). Je však nutné geometricky upravit dílec tak, aby tokové dráhy plastu v dutině nástroje měly hladší průběh a reaktoplast netvořil shluky. Tzn. zvětšit hodnoty poloměrů hran a v rozích, zanedbat úzké drážky, příp. zvětšit tloušťky stěn v některých místech. Nevýhodou této technologie je relativně dlouhá doba vytvrzování fenoplastu, tj. zhruba 1 až 1,5 min. Doba vstřikovacího cyklu by se tak oproti vstřikování termoplastu výrazně prodloužila.
- 3. varianta – technologie vstřikování termoplastů. Podle vzhledu, tvaru a stop na plastovém dílci lze usoudit použití této technologie. Konkrétně vstřikování termoplastu do formy se studenými tunelovými vtoky. Výhodou je krátká doba vstřikovacího cyklu a není potřeba měnit geometrii plastového dílce, při dostačujících mechanických vlastnostech pro danou funkci dílce. Případný vyprodukovaný plastový odpad lze recyklovat a znovu použít i pro danou aplikaci.

Vzhledem k danému tvaru součásti, funkci součásti a výše zmíněným technologickým vlivům, je nejvhodnější technologie vstřikování termoplastů. Literární studie se dále zaměřuje na problematiku technologie vstřikování termoplastů do formy s horkou vtokovou soustavou, která s sebou přináší pro danou aplikaci další výhody. Hlavním tématem praktické části návrhu technologie je dvojnásobná vstřikovací forma s požadavkem na výrobu série plastových dílců o velikosti 1 200 000 ks.

3 PLASTY [25] [37] [38]

Plasty jsou plnohodnotné konstrukční materiály patřící mezi organické látky (polymery) skládající se z velkých molekul (řetězce molekul, makromolekuly), které se vytváří z molekul menších (monomerů, částic monomerů), buď pomocí chemické reakce zvané polyreakce (polyetylen, polyvinylchlorid, polyuretan) nebo vznikají jako modifikované přírodní produkty (regenerovaná celulóza, umělé hedvábí). Plasty mají mnoho názvů (názvosloví viz Obr. 3.1, širší rozdělení viz Obr. 3.2).

Názvosloví

Plasty
Polymerní materiály
Inženýrské materiály
Termoplasty
Reaktoplasty

Všechny plasty jsou polymery
Ne všechny polymery jsou plasty

Poly + mer = mnoho jednotek

Obr. 3.1 Názvosloví plastů [38]

Polyreakce (polymerace, polykondenzace, polyadice) jsou jednoduché chemické reakce (přeměny), které se mnohokrát opakují, takže nízkomolekulární sloučenina monomer přechází v polymer (polykondenzát, polyadukt). Např. polyester vzniká jako hlavní produkt při polykondenzaci skupiny –OH (alkoholu) s –COOH skupinou (organická kyselina), kde vedlejším produktem je voda.

V roce 2003 byla roční spotřeba plastů ve světě odhadována na 150÷200 mil. tun. Bylo již vyvinuto mnoho druhů polymerů. Některých polymerních materiálů se vyprodukuje více než 1 mil. tun za rok (např. polypropylen okolo 14 mil. tun za rok), zatímco jiných plastů pro speciální účely se vyprodukuje jen malé množství. Kromě velkého množství plastů používaných jako technické materiály, se velké množství vyrábí ve formě vláken, fólií, barev, tepelně izolačních pěněných desek nebo např. ve formě umělé kůže.

3.1 Chemická stavba a molekulární struktura [25] [37] [63]

Pro prezentaci molekul polymerů se využívají např. chemické vzorce, kde jsou částice monomerů uzavřeny v hranatých závorkách [] a index (n) znamená počet částic monomerů tvořící hlavní řetězec molekuly. Např. přeměna etylenu na polyetylen se zapisuje $n\text{CH}_2=\text{CH}_2 \rightarrow [-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$, kde poslední část reprezentuje celou molekulu $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2 \dots \text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$, přičemž poslední n nabývá hodnot v řádech 10^3 až 10^6 .

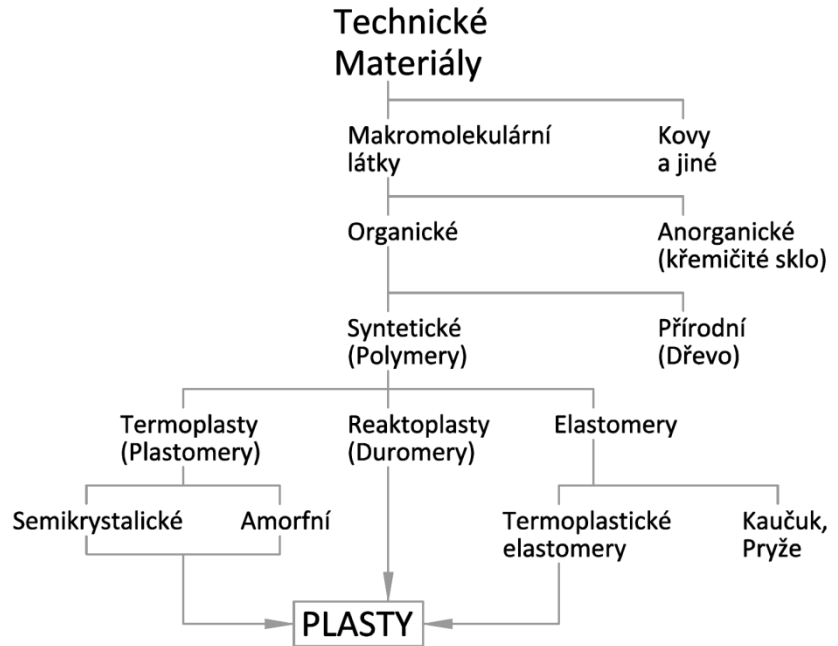
Tab. 3.1 Vybrané příklady široce používaných polymerů a jejich označení [25] [63]

Polymer	Menší řetězce	Hlavní řetězec	Obchodní označení
Polyetylen (PE)	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	$-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-$	Polythen, Lupolen, Dralen
Polypropylen (PP)	$-\text{CH}_2-(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-$	$-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-$	Moplen, Luparen
Polyvinylchlorid (PVC)	$-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$	$-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-$	PVC, PCU, Igelit
Polykarbonát (PC)	$-\text{O}-\text{CO}-\text{O}-\text{R}$	$-\text{C}-\text{O}-\text{C}-\text{C}-$	Makrolon, Lexan

Většina plastů používaných jako technické materiály jsou organické polymery s hlavními řetězci skládajícími se z uhlíkových C–C vazeb nebo vazeb mezi C a dalšími prvky. Polymery s hlavními řetězci neobsahujícími prvek uhlíku se řadí do skupiny neorganických polymerů. Pro většinu plastů existuje specifický název a také obchodní označení, příklady uvedeny v Tab. 3.1, která je výběrem z Tab. 3.44 v Příloze 1.

Polymerní materiály lze klasifikovat také podle mechanických vlastností produktu. Ty jsou výrazně závislé především na teplotě. Polymery dělíme podle mechanických vlastností za určitých teplot do těchto hlavních skupin:

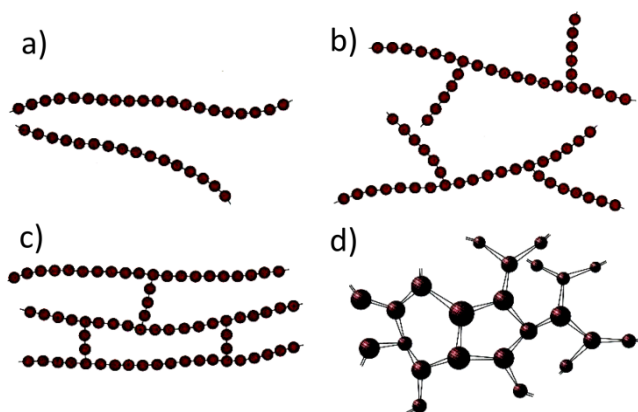
- Termoplasty (Thermoplastics)
- Reaktoplasty (Duromers)
- Elastomery (Elastomers)



Obr. 3.2 Rozdělení technických materiálů [37]

3.2 Termoplasty [21] [25] [46]

Termoplasty se vzhledem ke své měrné hmotnosti vyznačují dobrou pevností v tahu a vysokým modulem pružnosti v tahu za běžných teplot. Jsou tvárné za mírně vyšších teplot, ve většině případů již nad teplotou 100 °C.



Obr. 3.3 Molekuly plastů [21]

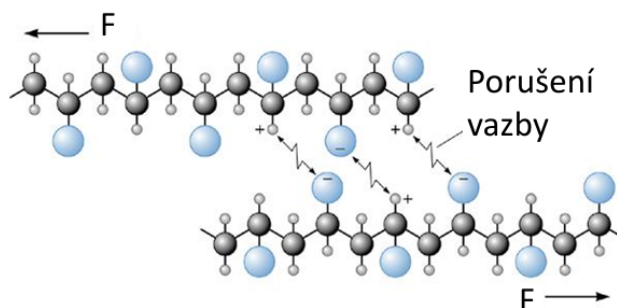
Jsou tvořeny jednoduchou molekulární strukturou z lineárních molekul bez přílišného větvení (viz Obr. 3.3), z malých částí např. $-\text{CH}_3$ skupin nebo delších řetězců $-\text{C}-\text{C}-$, které jsou připojeny k hlavnímu řetězci, čímž tvoří větvenou strukturu polymeru. Stupeň větvení ovlivňuje hustotu výsledného tuhého polymeru. Čím větší je stupeň větvení, tím menší je hustota výskytu jednotlivých molekul blízko sebe, výsledná struktura je tedy řidší.

- a) Lineární řetězce tvořené $-\text{C}-\text{C}-$ vazbami bez vedlejších řetězců – lineární termoplast
- b) Hlavní řetězce s vedlejšími řetězci – vysoko hustotní termoplast
- c) Hlavní řetězce s vedlejšími řetězci – nízko hustotní termoplast
- d) Síťovaná struktura - reaktoplast

U termoplastů existují uvnitř řetězců velmi silné mezi molekulární kovalentní vazby (vazební energie $-\text{C}-\text{C}$ je 348 kJ/mol). Zatímco mezi sousedními řetězci molekul jsou vazby velmi slabé, zde působí Van der Waalsovy síly (vazební energie 0.5-5 kJ/mol, přerušení na Obr. 3.4) nebo vazby vodíkové (vazební energie ≈ 7 kJ/mol). Z toho důvodu mohou být

termoplasty snadno deformovány už při relativně nízké teplotě, v porovnání např. s ocelí. Při deformaci se řetězce pohybují vůči sobě. Průběh elastické i plastické deformace je kromě teploty dán především stavbou struktury.

Chemické složení částí řetězců ovlivňuje vlastnosti výsledné tuhé fáze plastu v širokém měřítku. Dále vlastnosti plastů ovlivňuje velikost makromolekul (stupeň polymerizace, střední délka řetězců, střední molární hmotnost), to však závisí především na způsobu a parametrech zpracování polymeru.



Obr. 3.4 Přerušení Van der Waalsových vazeb [24]

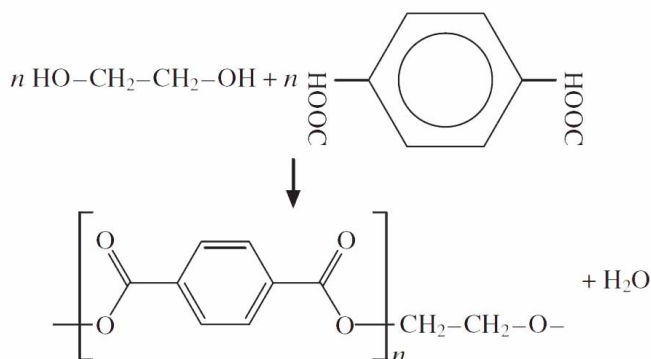
3.3 Reaktoplasty [21] [25]

Reaktoplasty se skládají z prostorově síťované struktury (Obr. 3.3d), kde jsou i mezi jednotlivými molekulami kovalentní vazby. Nedeformují se plasticky i za vyšších teplot. Ve většině případů mohou být zahřátý na teplotu rozkladu bez výrazné elastické nebo plastické deformace.

Většina reaktoplastů (fenoly, nenasycené polyestery, epoxidová pryskyřice, polyuretan, aj.) tuhne a vytvrzuje se exotermickou reakcí. Dílce z reaktoplastů během této reakce získáváme tvářením do požadovaného tvaru, přičemž výsledná struktura je pak hustě zesítěná. Chemická reakce vytvrzování může být spuštěna již za pokojových teplot nebo při zvýšené teplotě. Pro spuštění reakce vytvrzování lze také aplikovat určité druhy energetických záření (UV záření, laserový paprsek, elektronový paprsek).

3.4 Vznik určitých druhů plastů [25] [58]

Většina polymerů vzniká řetězovou polymerizací z určitého typu monomeru (PE, PP, PVC, PS). Např. PE lze dostat polymerizací etylenu $n(\text{CH}_2=\text{CH}_2) \rightarrow [-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$. Další možností je použít dva různé typy monomerů obsahujících různé typy chemických prvků, které spolu reagují (PA, PC, PET, PUR) a formují polymer sestavený ze dvou typů monomerů. Např. polyethyltereftalát (PET) se získává polykondenzací etylen glykolu s kyselinou tereftalátovou, kde vedlejším produktem je voda (viz Obr. 3.5).



Obr. 3.5 Vznik PET při polykondenzaci [25]

Látky tvořené dvěma typy monomerů se nazývají kopolymery. Monomery mohou být ve struktuře uspořádány náhodně, střídavě nebo v blocích. Běžně používané kopolymery jsou např. butadienstyrenový kaučuk (SBR) a terpolymer akrylonitrilu, butadienu a styrenu (ABS).

Vlastnosti polymerních materiálů mohou být dále upravovány směšováním

dvou nebo více typů polymerů. Jeden z důvodů mísení polymerů je získání materiálu s větší houževnatostí než u čistého polymeru, přičemž jedna komponenta je tužší než druhá (PS-PB, PP-PC, PVC-ABS, PE-PTFE).

3.5 Vlastnosti plastů [25]

Tuhost jinak nepoddajných polymerů a teplotu tranzitního přechodu lze zvýšit příměsí nízkomolekulárních částic, tzv. plastifikátorů. Např. pro změkčení PVC se nejčastěji používá dioktylfthalát (DOP). Dále např. v případě polyamidu (PA) má změkčovací efekt přítomnost vody s obsahem do 8%.

V procesu zesítnění se molekuly řadí jedna vedle druhé a stoupá tepelná odolnost plastu, odolnost proti křepeu a klesá náchylnost k tvorbě trhlin. Zesítnění může být dosaženo velmi přesně ozařováním plastů elektronovým paprskem nebo zářením UV. Tato optimalizace může být aplikována i na čisté a široce používané termoplasty, jako PE a PVC. Výhoda techniky zesíťování je, že lze takto modifikovat vlastnosti plastové součásti poté, co už ji byl dán tvar a tento proces probíhá za pokojové teploty a normálního tlaku.

3.5.1 Mikrostruktura polymerních materiálů [25] [28] [38] [41]

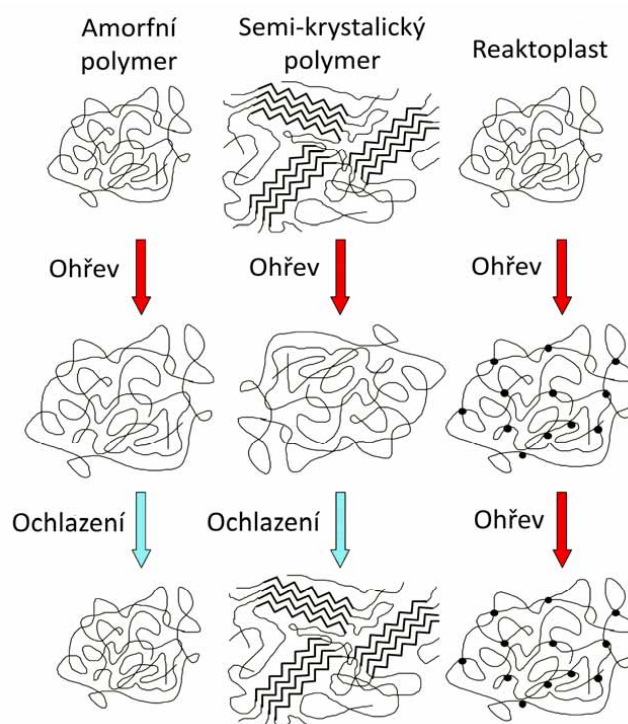
Lineární polymery mohou mít nepravidelnou (amorfní) strukturu nebo částečně krystalické (semikrystalické) uspořádání molekul (Obr. 3.6).

Amorfní stav je charakteristický náhodnou spleť polymerních řetězců. Semikrystalické plasty jsou v některých svých částech uspořádány do tvaru složených řetězců tvořících lamely, které eventuálně tvoří krystalové bloky.

Tab. 3.2 Stupeň krystalinity polymerů [25]

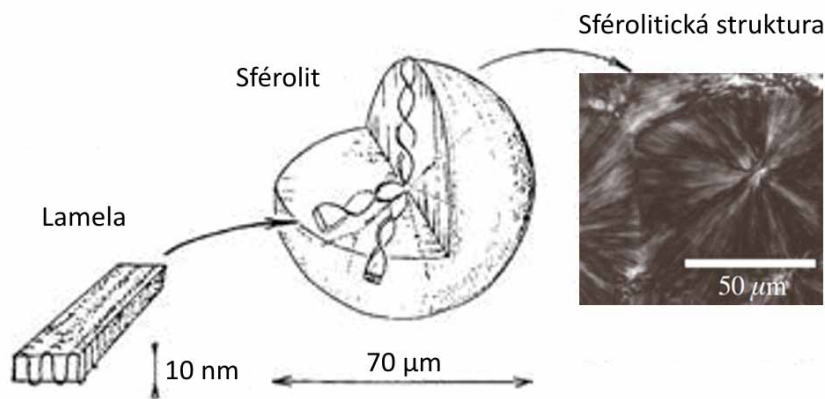
Polymer	Stupeň krystalinity [%]
Nízko-hustotní PE	45÷75
Vysoko-hustotní PE	65÷95
Vlákna PP	55÷60
Vlákna PET	20÷60

Stupeň krystalinity lze odhadnout změněním hustoty plastů, termální analýzou, diferenciální skenovací kalorimetrie (DCS) nebo pomocí rentgenové difrakční analýzy (XRD). Závisí na počtu a délce vedlejších řetězců napojených na hlavní řetězce, tzn. na stupni řetězení a rozhoduje o hustotě a pružnosti polymeru. Stupeň krystalinity polyetylenu (PE) nabývá hodnot v rozsahu od 45 % pro nízko-hustotní PE, a až do 95 % pro vysoko-hustotní PE (příklady uvedeny v Tab. 3.2).



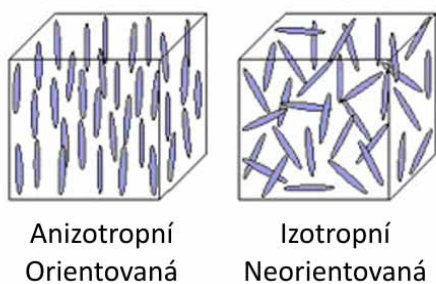
Obr. 3.6 Mikrostruktura plastů [38]

V některých krystalických polymerech dochází k růstu složených řetězců do tvaru lamel, začínající jako nukleus (zárodek) a rozpínají se v poddajný sférolit. Velikost sférolitů může být ovlivněna přidáním nukleantů tzn. zárodkotvorných přísad. Tuhost a transparence výsledného plastového dílce klesají s velikostí sférolitů. Sférolitickou strukturu lze pozorovat pomocí světelné polarizační mikroskopie (snímek na Obr. 3.7).



Obr. 3.7 Sférolitická struktura semikrystalických plastů [25] [41]

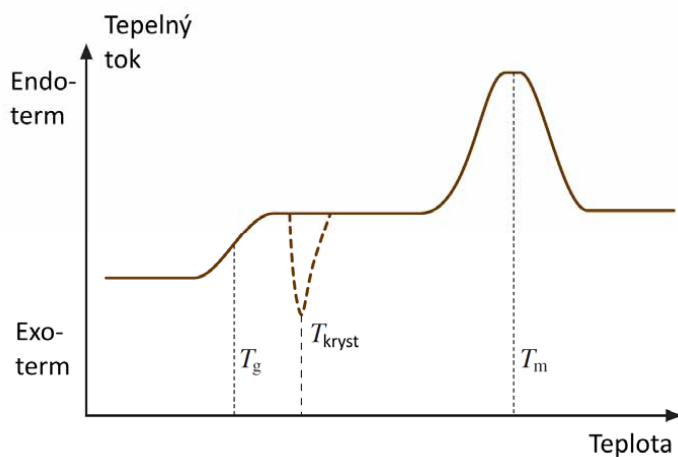
Molekuly polymeru mohou být ve výsledném plastovém dílci výrazně orientovány paralelně se směrem toku taveniny plastu, který polymer měl během výrobního procesu např. při vstřikování. Tato orientace je způsobena vysokou viskozitou výchozí taveniny plastu a dochází k ní především při použití jader ve tvarové dutině formy. Vložená jádra rozdělují tok taveniny na dvě části, ty se poté za nimi spojí. Dochází ke vzniku tuhé oblasti se silně anizotropními mechanickými vlastnostmi, kde se v okolí nachází jinak izotropní polymer.



Obr. 3.8 Schéma orientace struktur [28]

Anizotropní uspořádání molekul (Obr. 3.8) může vést ke značným zbytkovým napětím a možnosti tvorby trhlin v těchto místech při relativně nízkém vnějším zatížení. Stupeň anizotropie v těchto oblastech lze potlačit časovou výdrží při vyšší teplotě při zpracování materiálu, přitom však může dojít ke změně tvaru. Tento jev musí být brán v potaz, pokud jsou součástí z polymerních materiálů zahřívány při dalších procesech výroby nebo při samotném užití.

3.5.2 Tepelné vlastnosti [21] [25] [37]



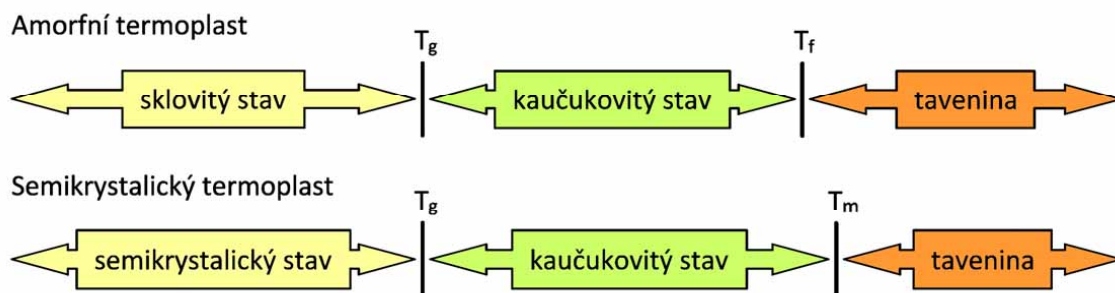
Obr. 3.9 Průběh ohřevu semikrystalického plastu [25]

Pevnost reaktoplastů se se zvyšující teplotou příliš nemění. Reaktoplasty se díky své třírozměrné síťované struktuře netaví, při zvyšující teplotou se spíše rozkládají.

Během zahřívání termoplastů se jejich vlastnosti mění z tuhých, tvrdých a křehkých za nízkých teplot na tvárné za teplot vyšších. Při dalším zvýšení teplot se termoplasty mění ze stavu tuhého (skelného) do stavu kaučukového (tvárného). Při tomto přechodu lze pozorovat po-

hyb molekul, a také exotermický a endotermický tepelný tok (viz Obr. 3.9).

Teplota přechodu materiálu do kaučukového stavu je pro každý termoplast specifická, při této teplotě dojde k endotermickému skoku v určitém teplotním rozmezí. Přechod je způsoben vlivem zvýšené pohyblivosti segmentů molekul v amorfních částech mikrostruktury polymeru a je doprovázen enormním poklesem viskozity. Tím také poklesem pevnosti.



Obr. 3.10 Porovnání přechodových teplot termoplastu [21] [37]

Teplota skelného přechodu (T_g) je teplota přechodu polymeru do kaučukovitého stavu. Definuje se v prvním inflexním bodě křivky grafu závislost tepelného toku na teplotě (Obr. 3.9). Pro další nárůst teploty je potřeba udržet vysoký tepelný tok, protože měrná tepelná kapacita polymeru v kaučukovitém stavu je vyšší než měrná tepelná kapacita tuhého polymeru. Hodnoty specifických teplot některých vybraných polymerů lze najít v Tab. 3.3.

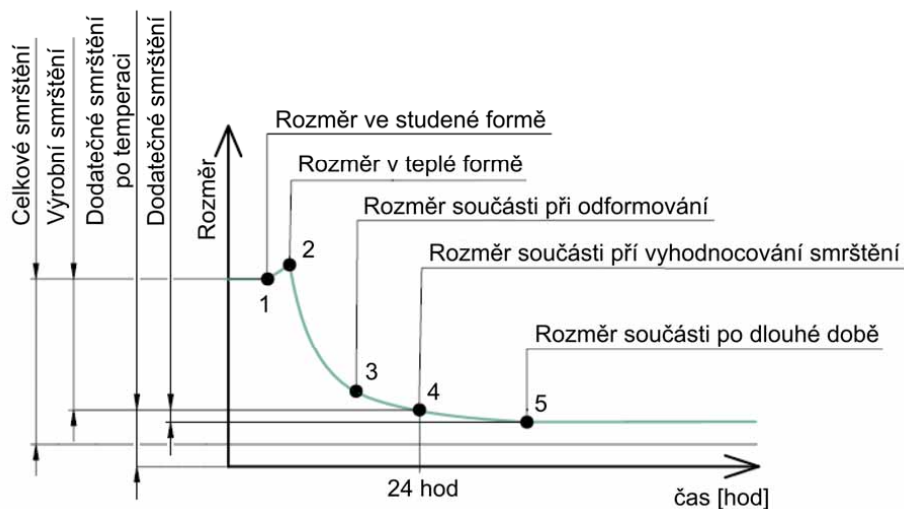
V některých případech dochází při překročení rozmezí teplot skelného přechodu k částečné krystalizaci polymeru, to je spojeno s exotermickým tepelným tokem (čárkovaná křivka v grafu Obr. 3.9). S dalším nárůstem teploty se zkrystalizované oblasti semikrystalického termoplastu mění v taveninu, což se zase vyznačuje endotermickým tepelným tokem, jehož vrchol reprezentuje *teplotu tavení* (T_m). Šířka tohoto vrcholu v grafu je dána nestejnorodostí molekul polymeru a vysokým stupněm nedokonalosti krystalů polymeru. Za touto teplotou se dále semikrystalický polymer chová jako nízkoviskózní tavenina. U amorfních termoplastů, které netvoří krystaly, rozlišujeme tzv. *teplotu viskózního toku* (T_f), která je u stejného druhu polymeru nižší než teplota tavení krystalů (viz Obr. 3.10).

Tab. 3.3 Hlavní teploty vybraných plastů [25]

Polymer	Teplota skelného přechodu T_g [°C]	Teplota tavení T_m [°C]
Polyetylen (PE)	-120	130
Polypropylen (PP)	-15	170
Polystyren (PS)	90	200
Polyvinilchlorid, amorfní (PVC)	80	-
Polyvinilchlorid, semikrystalický (PVC)	80	210
Polytetrafluoretylen (PTFE)	-115	330
Polymethylmetakrylát (PMMA)	45	160
Polyamid 6 (PA6)	75	230
Polyetylentereftalát (PET)	75	280

Po zahřátí přes určitou teplotu se polymery rozkládají nebo oxidují působením vzduchu. V některých případech také hoří (PE, PP, PS) s charakteristickým zbarvením plamene. Rozpad polymeru je v některých případech doprovázen charakteristickým zápachem dýmu, který vzniká při hoření. PE je cítit podobně jako hořící svíčka nebo vosk, PA jako hořící vlasy, PVC ostře a kysele a PS po ovoci. V některých případech se uvolňují nebezpečné člověku jedovaté látky nebo látky.

3.5.3 Smrštění [11] [37]



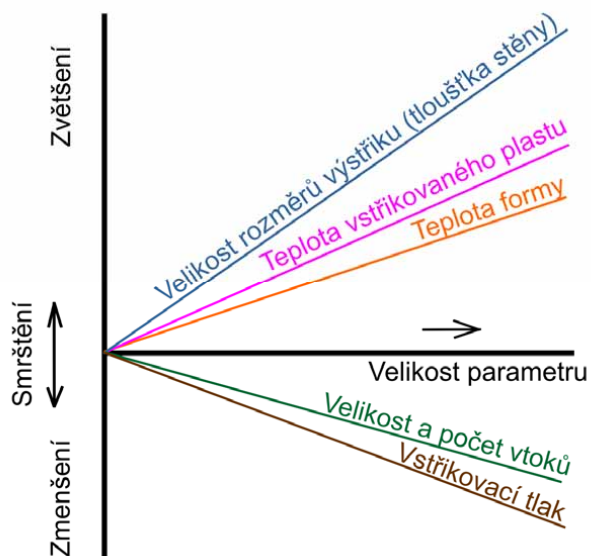
Obr. 3.11 Změna rozměrů plastového dílce v čase vlivem smrštění [11]

Při zpracování plastu dochází při jeho ochlazování z teploty tavení na okolní teplotu ke zmenšení jeho rozměrů a to jak přímo při formování plastu do určitého tvaru, tak také potom co je plastový dílec z formy vyhozen. Rozlišují se tzv. výrobní smrštění a dodatečné smrštění a udávají se v %.

Výrobní smrštění začíná v okamžiku zahájení výroby a končí 16 nebo 24 *hodin* po vyhození plastového dílce z formy (viz Obr. 3.11). V této době se provádí měření plastového dílce. Výrobní smrštění rozměrů zaujímá zhruba 90 % z celkové velikosti smrštění.

Dodatečné smrštění se uvažuje 168 *hodin* po odformování plastového dílce přičemž, je plastový dílec buď do této doby uložen v normalizovaném prostředí s 50 % relativní vlhkostí vzduchu a teplotě 23 °C nebo lze dodatečné smrštění urychlit pomocí temperování.

Velikost smrštění je ovlivňována především druhem plastu, homogenitou taveniny, konstrukcí formy a tvarem plastového dílce (další vlivy viz Obr. 3.12). Velikost smrštění je různá ve směru a kolmo na směr toku taveniny. Smrštění nabývá běžně hodnot 0,3 až 0,7 % u amorfních termoplastů a hodnot 0,8 až 4 % u termoplastů semikrystalických.

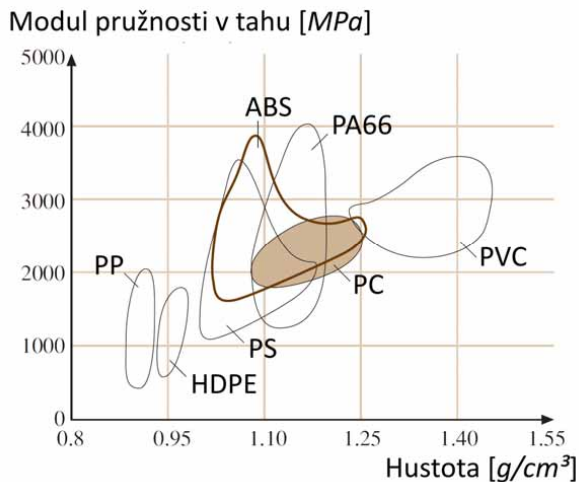


Obr. 3.12 Vliv vybraných činitelů na velikost smrštění [11]

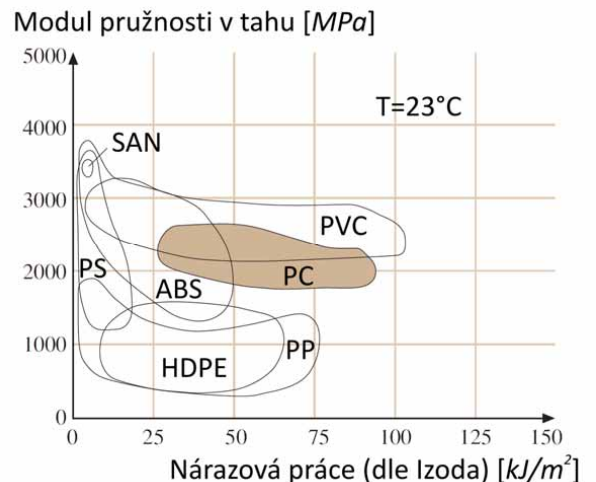
3.5.4 Mechanické vlastnosti polymerů [25] [37] [51]

Termoplasty, reaktoplasty a elastomery vykazují velmi rozdílné mechanické vlastnosti s různými závislostmi na teplotě. To může být důvodem k výběru určitého typu polymeru pro danou aplikaci.

Výběr polymeru může být založen na jeho mechanických vlastnostech, jako pevnosti s tahu, nárazové práci, elastickém chování, ale také často jiných vlastnostech jako hustota,



Obr. 3.13 El. modul vs. hustota [25]



Obr. 3.14 El. modul vs. nárazová práce [25]

korozní odolnost nebo tvařitelnost. Poměr modulu pružnosti v tahu a hustoty (Obr. 3.13) může být potenciálním kritériem při volbě plastu pro danou aplikaci, alternativně také poměr modulu pružnosti v tahu k nárazové práci (viz. Obr. 3.14).

Standardizované zkoušky vlastností polymerních materiálů (zkoušky viz Tab. 3.48 a vlastnosti Tab. 3.49 v příloze 1) se ve většině případů liší od zkoušek jiných materiálů, např. oceli. Zkoušky se především liší velikostí rozměrů a růzností tvarů zkušebních vzorků a velikostí aplikovaných zatížení.

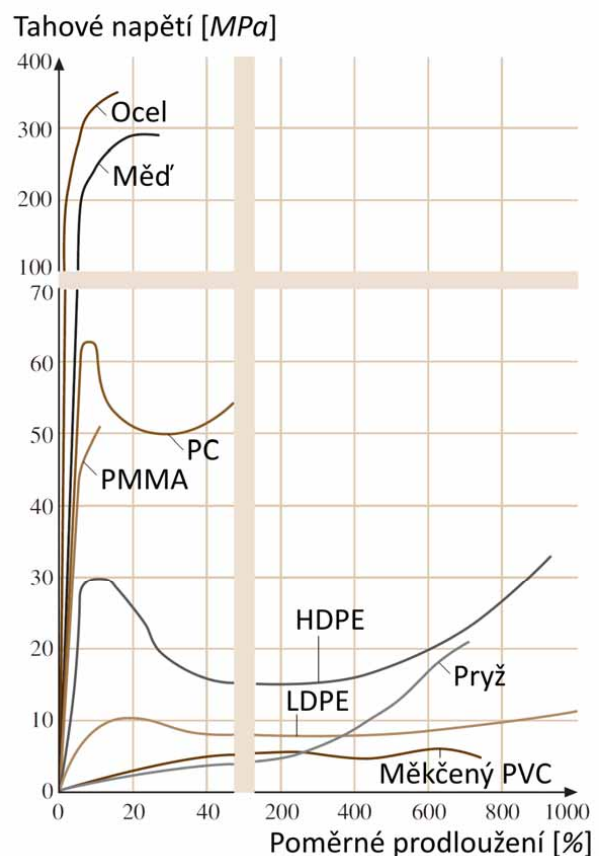
Průběh křivky napětí-deformace může být výrazně odlišný pro dva různé druhy polymerů (Obr. 3.15) a značně závisí na teplotě. Plasty nemají v průběhu elastické části křivky napětí-deformace lineární část, ze které by bylo možno odhadnout modul pružnosti v tahu, proto se *modul pružnosti v tahu* (E_t) určuje podle vztahu 3.1 ze sklonu křivky napětí-deformace mezi 0,05 % a 0,25 % *poměrného prodloužení* (ϵ).

$$E_t = \frac{\sigma_{0,05} - \sigma_{0,25}}{\epsilon_{0,05} - \epsilon_{0,25}} \quad (3.1)$$

kde E_t ... je modul pružnosti v tahu [MPa]

$\sigma_{0,05}$... napětí při 0,05 % poměrného prodloužení [MPa]

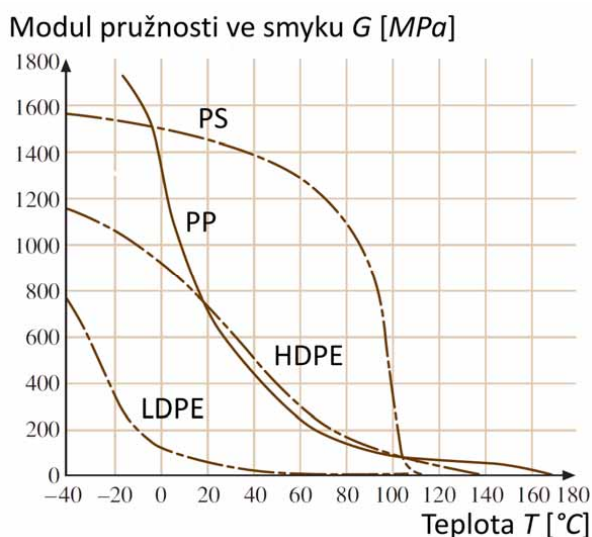
$\sigma_{0,25}$... napětí při 0,25 % poměrného prodloužení [MPa]



Obr. 3.15 Modul pružnosti vs. poměrné prodloužení [25]

$\varepsilon_{0,05}$... poměrné
prodloužení 0,05
[%]
 $\varepsilon_{0,25}$... poměrné
prodloužení 0,25
[%]

Mechanické vlastnosti plastů jsou oproti mechanickým vlastnostem kovových materiálů nižší (viz Obr. 3.15). Tahové napětí, které vzniká napínáním polymerních řetězců při výrobě, může u některých druhů plastů dosahovat hodnot větších než je pevnost oceli (např. ocel S355 \approx 400 MPa). Takové druhy plastů se pak používají jako vyztužovací vlákna. Segmenty polymerních řetězců se při tvářecím procesu orientují, což má zásadní vliv na mechanické vlastnosti.



Obr. 3.16 Modul pružnosti vs. teplota [25]

Pro určení dynamických mechanických vlastností plastů se využívá torzního zatěžování vzorku. Výsledkem je *modul pružnosti ve smyku* (G), určený z *úhlu zkroucení vzorku* (δ). Modul pružnosti ve smyku silně závisí na teplotě (viz Obr. 3.16). Pokud termoplast dosáhne nulové hodnoty modulu pružnosti ve smyku, pak dosáhl *teploty tavení* (T_m), příp. *teploty viskózního toku* (T_f). Mechanické vlastnosti plastů mohou být dále vylepšeny vyztužováním pomocí např. skelných nebo minerálních vláken.

3.6 Stárnutí a koroze plastů [25]

Stárnutí polymerů je zapříčiněno hlavně vlivem chemických strukturních změn makromolekul doprovázených zkracováním řetězců molekul, větvením, síťováním a vznikem nových chemických skupin.

Nezbytným předpokladem stárnutí plastů je vliv světla, především UV záření a eventuálně vliv kyslíku z okolní atmosféry. S těmito vlivy se polymer stává křehkým, tvoří se trhliny a mění kvalita povrchu plastového dílce. Dále dochází ke ztrátě schopnosti elektrické izolace plastu a ztrátě plasticity především za teplot pod 0 °C. Porušení lze dosáhnout také při použití rozpouštědel v kombinaci s mechanickým namáháním.

3.7 Příspěvy (Aditiva) [18] [27] [37] [39] [51] [58]

Aditiva potlačují nedostatky polymerů nebo zlepšují jejich zpracovatelnost. Polymery bez přísad se v praxi téměř nevyskytují. Rozeznáváme plasty neplněné, plněné a vyztužené.

Aditiva svou přítomností v polymeru nesmí způsobovat žádné nežádoucí účinky. Mohou přinášet i ekonomickou úsporu. Obecně přísady dělíme do tří hlavních skupin:

- Příspěvy modifikující fyzikální a mechanické vlastnosti
- Příspěvy modifikující chemickou odolnost
- Plniva nemodifikující žádnou vlastnost

Plniva v podobě podobu prášků, malých částic nebo vláken mají pouze plnící účinek. U některých typů polymerů mohou plniva zaujímat až 30% objemu.

Absorbenty UV záření chrání polymery před degradací způsobenou vlivem UV záření, které způsobuje disipaci tepla z polymeru a změnu mechanických a vzhledových vlastností.

Tepelné stabilizátory zpomalují degradaci polymeru při vysoké teplotě a časově ji oddalují. Velmi důležité při zpracování plastu, kde je důležitá dlouhá výdrž ve stavu taveniny.

Retardéry hoření zpomalují proces hoření plastu. Jsou založeny např. na halogenních, fosforečnatých, chlorečnatých nebo kovových solích. Poskytují větší bezpečnost pro hořlavé případně vznětlivé materiály. Rozlišujeme pak také samozhášivé polymery.

Maziva usnadňují zpracování plastu a ovlivňují viskozitu taveniny. Zapřičiňují lepší kvalitu povrchu plastového dílce a některá maziva usnadňují odformování.

Barviva a pigmenty dodávají plastu barevný odstín. Pigmenty (Pigments) se v plastu nerozpouštějí, zatímco barviva (Dyes) ano a ovlivňují tak částečně jeho vlastnosti. V některých případech i chrání proti degradaci způsobované teplem nebo UV zářením. Ukázka na Obr. 3.17.



Obr. 3.17 Barviva [39]

Změkčovadla zapřičiňují hustější větvení molekul a celkový nárůst objemu polymeru. Zvyšují tak jeho houževnatost, elasticitu a tvárnost. Snižují teplotu skelného přechodu a viskozitu taveniny.

Tvrdidla jsou charakteristická pro reaktoplasty, jsou to tzv. nukleanty, které se do reaktoplastu přidávají za účelem čtenějšího vzniku příčných vazeb při vytvrzování.

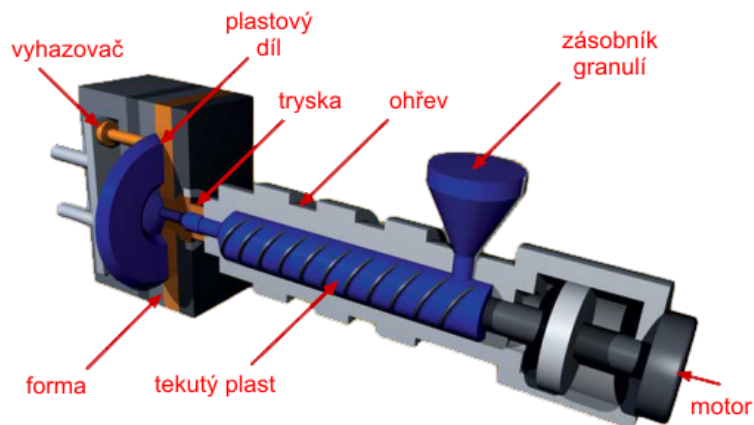
Nadouvadla způsobují vznik lehčených (pěněných) struktur. Z těchto látek se při zvýšené teplotě uvolňují plynné produkty (obvykle CO₂), které pak vytvoří póry.

Vyztužující vlákna slouží pro zlepšení mechanických vlastností některých technických plastů, způsobují však obtíže při jeho následném zpracování. Maximální objem až 30%. Nejčastěji jsou používána minerální nebo skelná vlákna.

4 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ [24] [37] [41]

Vstřikování je nejrozšířenější technologie pro zpracování plastů. Vstřikují se všechny druhy termoplastů a některé druhy reaktoplastů a elastomerů.

Vstřikování (Obr. 4.1) je v podstatě uvedení vysušené dávky plastu, např. ve formě granulí, do stavu homogenní taveniny ve vstřikovacím válci a následné tváření do požadovaného tvaru vstříknutím do formy, kde poté z formy vypadává plastový dílec, nebo více dílců a také případný odpad ve formě vtoků. Jednotlivé fáze vstřikovací tvoří tzv. vstřikovací cyklus.

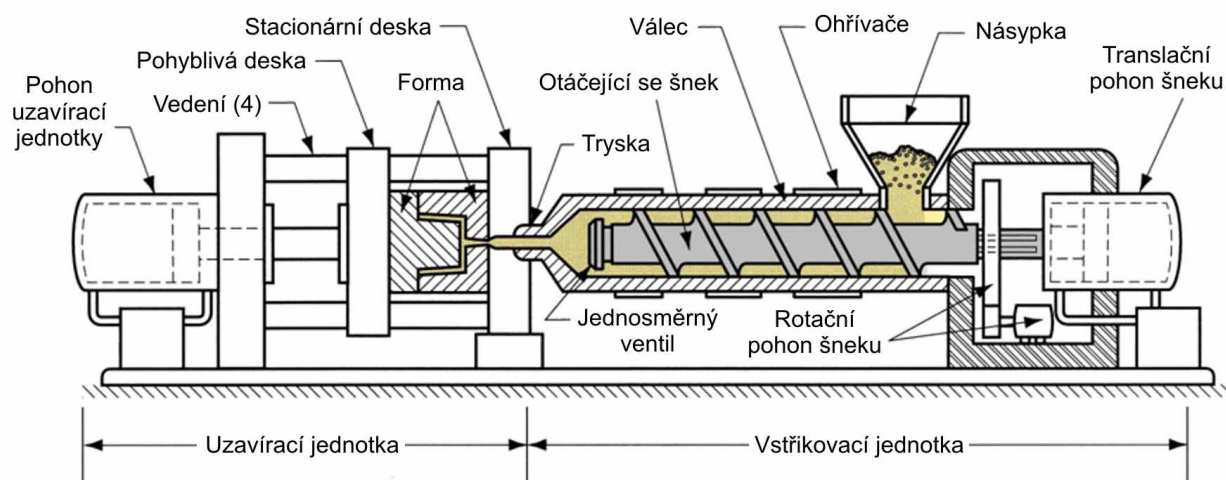


Obr. 4.1 Vstřikování [24]

4.1 Vstřikovací stroj [3] [37] [41] [51]

Vstřikovací stroj (Obr. 4.2) se skládá z:

- vstřikovací jednotky, která se dále skládá z
 - plastikační jednotky, která je tvořena
 - vytápěnou válcovou komorou
 - tryskou
 - šnekem
 - a násypkou
 - pohonu šneku
- uzavírací jednotky, řídící pohyby vstřikovací formy.



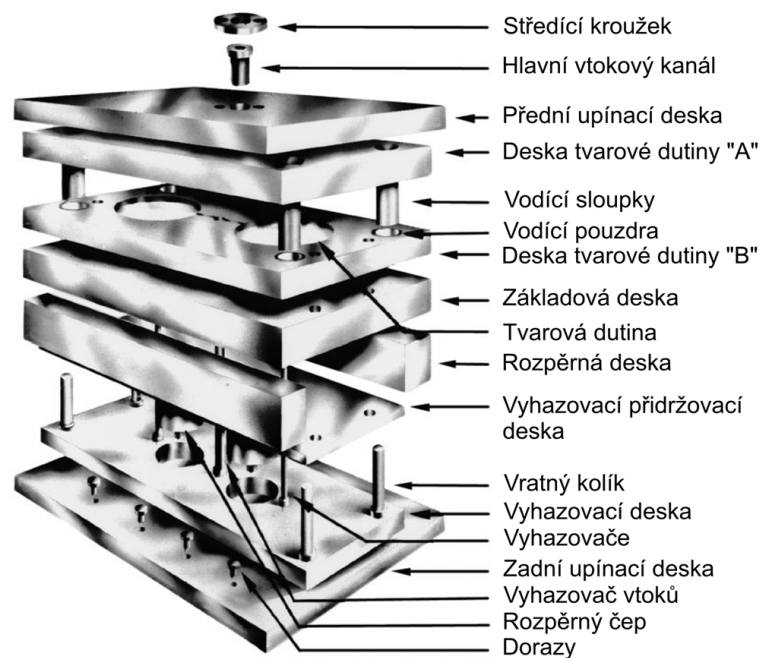
Obr. 4.2 Zjednodušené schéma vstřikovacího stroje [3]

Vstřikovací forma je výměnná část vstřikovacího stroje z důvodu nutnosti dosažení různých tvarů výrobků. Všechny ostatní části jsou univerzální. Každý vstřikovací stroj může pracovat v určitém rozsahu vstřikovacích parametrů.

Na Obr. 4.1 lze vidět schéma řezu vstřikovací jednotkou, pohybovou jednotkou a vstřikovací formou a na Obr. 4.2 lze vidět klasické sestavení šnekového vstřikovacího stroje s jednou vstřikovací jednotkou.

Mezi **vstřikovací parametry** stroje patří:

- vstřikovací rychlost
- vstřikovací tlak
- tvářecí tlak
- dotlak
- zpětný tlak
- teplota taveniny
- doba plastikace
- objem dávky taveniny
- rychlost otáčení šneku
- uzavírací síla
- vyhazovací síla
- aj.



Obr. 4.3 Vstřikovací forma - rozložený pohled a popis [17]

4.2 Vstřikovací forma [1] [13] [17] [37]

Jde o výměnnou sestavu nejčastěji ocelových desek a dalších komponent, vhodně poskládaných a instalovaných do vstřikovacího stroje tak, aby byly schopny dát materiálu plastu požadovaný tvar.

Většina vstřikovacích forem je tvořena deskami z vysoce kvalitní oceli, částečně podle určitých standardů tak, aby odolávaly vysokým vstřikovacím tlakům (až 200 MPa) za zvýšené teploty (zhruba 350 °C) při obvykle rychlém cyklu (jednotky až desítky vteřin u termoplastů), což dělá z technologie vstřikování termoplastů ekonomicky výhodný proces.

Vstřikovací formu (Obr. 4.3) tvoří:

- jedna nebo více tvarových dutin
- vtoková soustava
- temperační systém
- vyhazovací systém
- a jiné vedlejší prvky – vedení (vodící sloupky, středící čepy), prvky pro převod pohybu (klíny), upeňovací elementy (šrouby, kolíky), odvzdušnění, aj.

Nejčastější aplikace technologie vstřikování je vstřikování termoplastů. Diplomová práce se dále zabývá především formami pro vstřikování termoplastů. V plastikářském průmyslu se formy pro vstřikování termoplastů dělí podle počtu vyráběných plastových dílců do tří základních skupin:

- Prototypové formy (25 až 1 000 dílců)
- Produkční formy (1 000 až 10 000 dílců)
- Vysoce produkční formy (10 000 až 2 000 000 dílců)

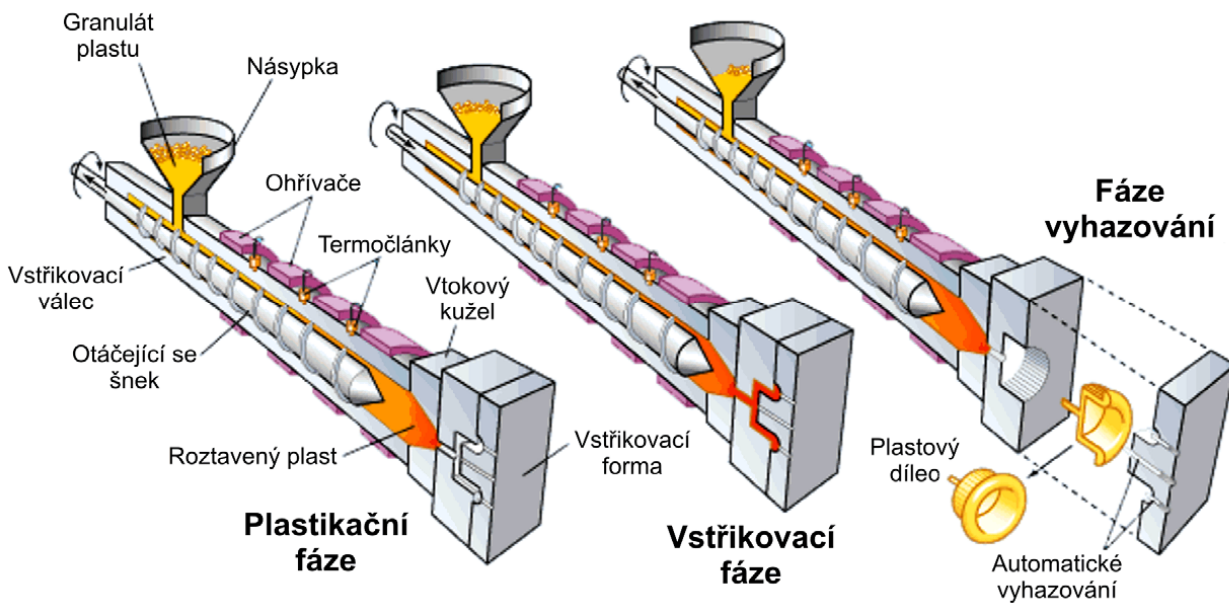
Prototypové formy reprezentují předběžný krok potřebný pro vývoj nových produktů. Především se používají ke zjištění charakteristik vstřikovaného materiálu, smrštění, umístění vtoků, ke kontrole rozměrů plastového dílce a zjištění parametrů vstřikovacího cyklu.

Produkční formy jsou sestaveny ze standardních méně drahých materiálů, tak ať jsou schopny produkovat plastové dílce se stanovenou výkonností. Jde o formy s automatickým vyhazovacím systémem, s odvzdušněním a kontrolou teploty pomocí temperační soustavy.

Vysoce produkční formy jsou kvalitnější produkční formy, s více tvarovými dutinami, vyměnitelnými komponenty nebo s komponenty vyšší kvality, povrchově upravenými ocelovými deskami pro zabránění koroze apod.

4.3 Postup vstřikování [37] [52] [62]

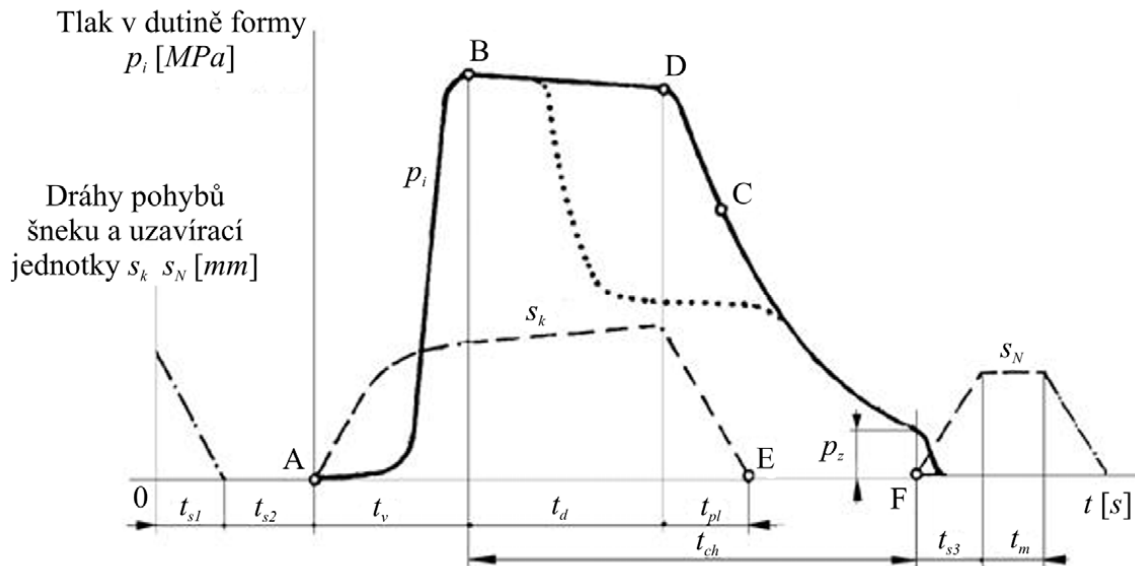
- 1) Plast v podobě granulí nasypaný do násypky je postupně odebírán funkční částí šneku, která dopravuje plast do tavicí komory vstřikovacího válce, kde za současného působení topných těles a tření vzniká tavenina.
- 2) Po uzavření formy se šnek pohybuje dopředu, přičemž před sebou tlačí taveninu a přes trysku ji vstřikuje do tvarové dutiny formy.
- 3) Poté co tavenina zaujme tvar dutiny formy, šnek pokračuje v tlačení taveniny při nižším než vstřikovací tlaku (tzv. dotlaku) a to dokud tavenina ve formě neztuhne.
- 4) Plast předává formě teplo a poté co ztuhne (při teplotě 40-90 °C) je z formy vyhozen v podobě plastového dílce, příp. více dílců s vtokovou soustavou. Následně se celý proces opakuje.



Obr. 4.4 Vstřikovací cyklus [62]

4.3.1 Vstřikovací cyklus [1] [3] [37] [41]

Vstřikovací cyklus (Obr. 4.4) lze posuzovat z hlediska tlaku v dutině formy v závislosti na čase. Tlak ve formě nazýváme *vnitřní tlak* (p_i), průběh na Obr. 4.5. Rozlišujeme také *vnější tlak* (p), což je tlak vztažený k ploše průřezu šneku.



Obr. 4.5 Vstřikovací cyklus v grafu [41]

Uzavření formy: Na začátku je forma otevřená a tvarová dutina formy prázdná. Stroj dostane impuls k uzavření formy a zahájení cyklu. Na přisouvání stačí jen malá *přisouvací síla* (F_p) v porovnání s velikostí *uzavírací síly* (F_u), která může být i několika násobně vyšší.

Plastikace: Ve válci vstřikovací jednotky se z pevných částic plastu ve tvaru granulí produkuje homogenní tavenina polymeru vhodná pro vstřikování. Šnek přitom vykonává rotační pohyb. Při rotaci nabírá pod násypkou granulovaný plast, který plastikuje a vytlačuje do prostoru před čelem šneku při řízeném axiálním pohybu šneku směrem od trysky vstřikovacího válce. Při pohybu dozadu šnek překonává protitlak, tzv. zpětný tlak. Výše protitlaku ovlivňuje dobu plastikace a tím i kvalitu homogenizace taveniny plastu. K ohřevu plastu dochází nejen vlivem ohřivačů, ale také třecím teplem vzniklým třením plastu o stěny tavicí komory a povrch šneku. Minimální velikost *tepla dodaného tavenině* (Q_{tav}) je dána kalorimetrickou rovnicí (vztah 4.1).

$$Q_{tav} = C_p \cdot \rho \cdot V_v \cdot (T_m - T_p) \quad (4.1)$$

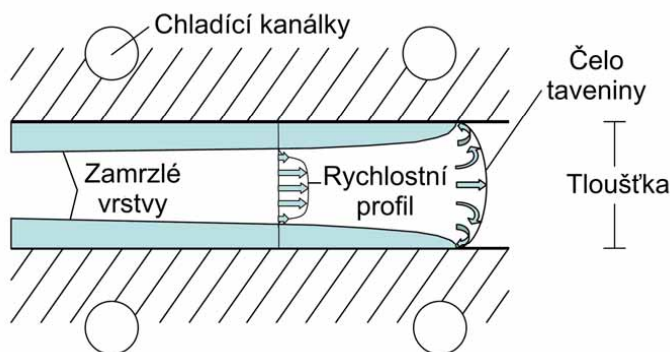
- kde Q_{tav} ... je teplo dodané tavenině [J]
 C_p ... měrná tepelná kapacita polymeru [$J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$]
 ρ ... hustota polymeru [$g \cdot cm^{-3}$]
 V_v ... vstřikovaný objem taveniny polymeru [mm^3]
 T_m ... teplota taveniny polymeru [$^\circ C$]
 T_p ... teplota vysušeného granulátu polymeru [$^\circ C$]

Plnění: Poté šnek ve vstřikovacím válci koná axiální pohyb a začíná vlastní vstřikování taveniny plastu do dutiny vstřikovací formy. Bez ohledu na tvar dutiny, tlak v dutině postupně klesá z hodnoty vstřikovacího tlaku v místě vstřikovací trysky na tlak atmosférický v místech

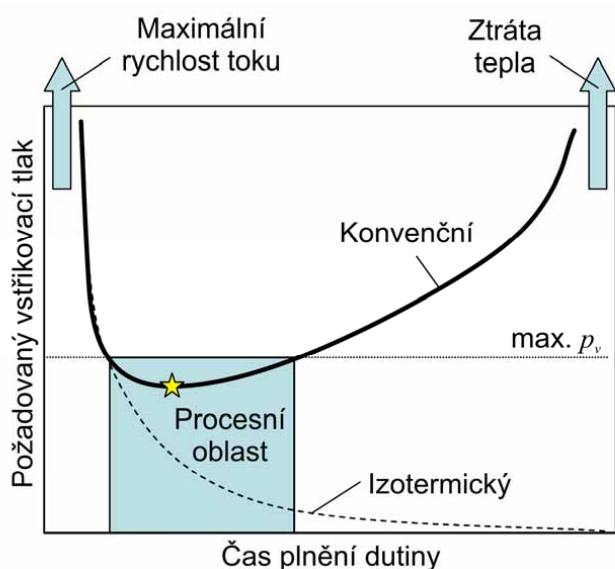
čela taveniny. Pokud uvažujeme tok taveniny dutinou obdélníkového průřezu, pak je *tlak potřebný k vyplnění dutiny* (p_v) dán vztahem 4.2.

$$p_v = \frac{12 \cdot \eta \cdot f_c}{s^2 \cdot t_v} \quad (4.2)$$

kde p_v ... je vstřikovací tlak [bar]
 η ... dynamická viskozita taveniny polymeru [Pa·s]
 s ... tloušťka mezery ve tvarové dutině [mm]
 f_c ... celková délka dráhy toku taveniny [mm]
 t_v ... doba plnění tvarové dutiny [s]



Obr. 4.6 Redukce tloušťky tvarové dutiny [1]



Obr. 4.7 Vhodný rozsah plnicích časů [1]

V praxi je čas plnění dutiny výrazně ovlivněn tloušťkou tokových drah a viskozitou taveniny polymeru. Při dlouhých časech plnění a nízkém objemovém průtoku taveniny přechází teplo z taveniny do stěn tvarové dutiny formy příliš rychle. Na stěnách tvarové dutiny tak vzniká tuhá vrstva polymeru, čímž se výrazně redukuje efektivní tloušťka mezery v dutině formy, kterou tavenina polymeru protýká (Obr. 4.6).

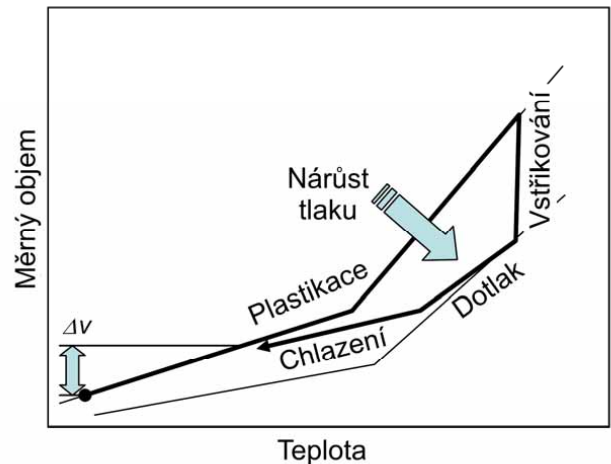
Pro nízké časy plnění je potřeba velmi vysokých vstřikovacích tlaků. Běžně až 200 MPa. Přitom vzniká v tavenině plastu teplo vlivem vnitřního tření, a dochází jen k malým ztrátám tepla odvodem do stěn vstřikovací formy.

Jak je patrné z Obr. 4.7, nepřijatelně vysoké vstřikovací tlaky vznikají při příliš krátkých a příliš dlouhých vstřikovacích časech. Vhodné rozmezí vstřikovacích časů je měřítkem formovatelnosti při dané aplikaci. Často se pro dosažení nižších vstřikovacích tlaků používá střední vstřikovací čas z tohoto rozmezí. V mnoha aplikacích však tyto vazby týkající se vstřikovacího tlaku, a tím i velikosti uzavírací síly, vyžadují použití větších tloušťek tokových drah, ve výsledku tzn. větších tloušťek stěn plastových dílců. Pokud není možno zvětšit tloušťku plastových dílců, lze zavést větší počet vtokových ústí, materiál s nižší viskozitou, anebo vyšší teplotu taveniny plastu a teplotu formy než by bylo žádoucí. To platí především pro tenkostěnné plastové dílce velkých rozměrů.

Dotlak: Ihned poté co polymer zaplní tvarovou dutinu, následuje dotlak, který zapříčiňuje další plnění formy a kompenzuje tak smrštění polymeru během tuhnutí, a zabraňuje tvorbě propadlin a staženin. Dotlak se dále řízeně snižuje. Před čelem šneku musí po vstřiknutí

dávky zůstat určitý objem taveniny plastu, na který šnek svým čelem ve fázi dotlaku působí, tzv. materiálový polštář. Nárůst a pokles tlaku v polymeru sleduje křivka p - v - T diagramu (Obr. 4.8) ze které pak vyplyne hodnota objemového smrštění zapříčiněná následným chlazením plastového výrobku.

Chlazení: Začíná ihned poté, co přijde tavenina plastu do kontaktu se stěnami tvarové dutiny formy, tj. již ve fázi plnění a dotlaku. Řízené chlazení však nastává až po zaplnění tvarových dutin, již ve fázi dotlaku přičemž se temperační soustavou odvádí teplo z dutiny formy zaplněné tuhnoucím plastem a dochází k poklesu tlaku. Při řízeném chlazení dále probíhá plastikace nové dávky plastu. Chlazení trvá až do otevření formy a následného vyhození plastového dílce.



Obr. 4.8 Zhušťování polymeru během Formování [1]

Velikost *odebíraného tepla při chlazení* (Q_{ch}) je opět daná kalorimetrickou rovnicí (vztah 4.3) vztaženou na tloušťku *stěny dílce* (s) namísto celého objemu taveniny, přičemž se plastový dílec v dutině formy ochlazuje na tzv. *teplotu odformování* (T_e).

$$Q_{ch} = C_p \cdot \rho \cdot s \cdot (T_m - T_e) \quad (4.3)$$

kde Q_{ch} ... je teplo odebírané při chlazení [$J \cdot m^2$]
 T_e ... teplota plastového dílce při odformování [$^{\circ}C$]

Poté lze při uvažování doby chlazení určit *chladicí výkon* (P_{ch}) opět vztažený k tloušťce plastového dílce namísto objemu (vztah 4.4).

$$P_{ch} = \frac{C_p \cdot s \cdot \rho \cdot (T_m - T_e)}{t_{ch}} \quad (4.4)$$

kde P_{ch} ... je chladicí výkon [$W \cdot m^2$]
 t_{ch} ... doba chlazení [s]

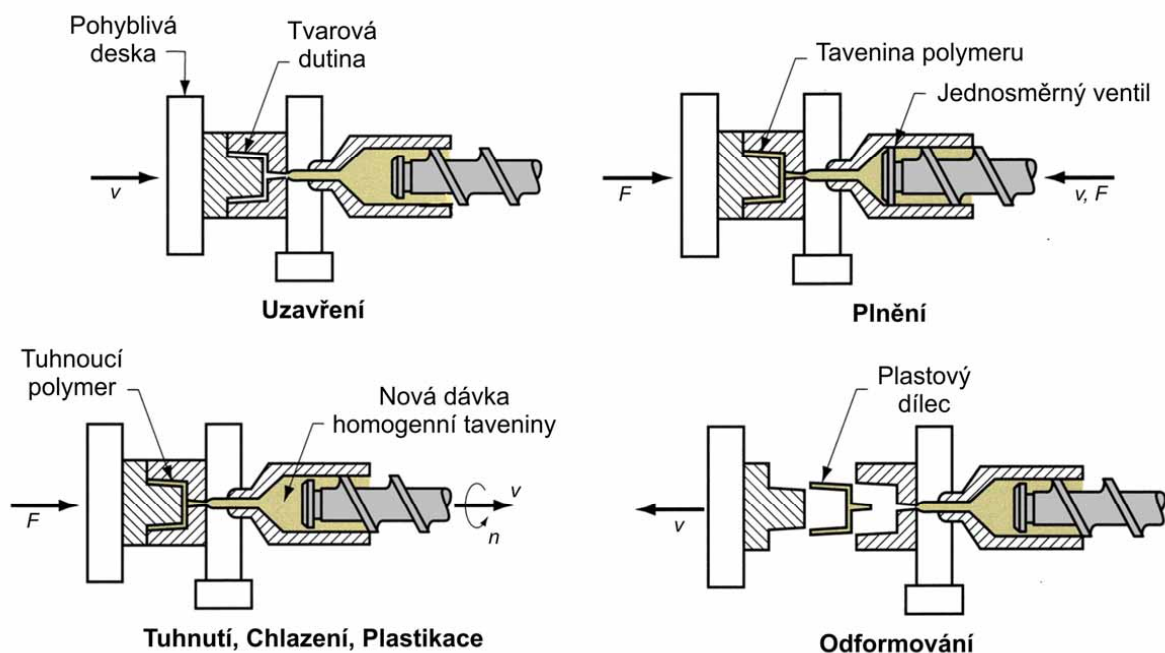
Doba chlazení (t_{ch}) tedy závisí na tloušťce stěny plastového dílce a teplotě vhodné pro odformování. Při uvažování odvodu tepla jedním směrem z dutiny ve tvaru tenkostěnné desky, lze dobu chlazení odhadnout ze vztahu 4.5, přičemž lze pro většinu plastů při běžných procesních podmínkách vztah zjednodušit na 4.6.

$$t_{ch} = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot a_{eff}} \ln \left[\frac{8}{\pi^2} \left(\frac{T_m - T_{fy}}{T_e - T_{fy}} \right) \right] \quad (4.5)$$

kde a_{eff} ... je měrná teplotní vodivost polymeru [$mm^2 \cdot s^{-1}$]
 T_{fy} ... teplota vytemperování formy [$^{\circ}C$]

$$t_{ch} \approx 4 \cdot s^2 \quad (4.6)$$

Odformování: Tlak ve formě během dalšího chlazení, těsně před otevřením formy, klesá až na tzv. *zbytkový tlak* (p_z). Po zchlazení plastu uvnitř dutiny formy se forma otevře a plastový dílec pomocí vyhadzovacího systému z formy vyhodí (celý cyklus viz Obr. 4.9).



Obr. 4.9 Zjednodušená schémata jednotlivých kroků vstřikovacího cyklu [3]

Výhody technologie vstřikování:

- krátký čas cyklu
- možnost vyrábět tvarově velmi složité součásti
- lze vyrábět součásti s velmi dobrou přesností rozměru a povrchovou úpravou
- konstrukční univerzálnost, která umožňuje odstranění nutnosti konečných úprav plastových dílců, např. úpravy povrchu nebo montážních operací

Nevýhody technologie vstřikování:

- vysoké investiční náklady v porovnání s ostatními technologiemi
- dlouhá doba na výrobu forem, potřeba použití k tomu vhodných strojních zařízení a dnes již v drtivé většině případů i výpočetní techniky
- cena formy je neúměrně vysoká oproti ceně vyráběného dílce

4.4 Vlivy plastového dílce na vstřikovací proces [3] [13]

Tato a několik nadcházejících podkapitol diplomové práce se zabývají primárně návrhem forem pro vstřikování termoplastů.

Nejdůležitější vlivy na vstřikovací proces mají především geometrie a materiál plastového dílce. Hlavním požadavkem bývá především funkce a to jak výsledného plastového dílce, tak i efektivní operativnost vstřikovací formy.

Požadavky na návrh plastového dílce zahrnují:

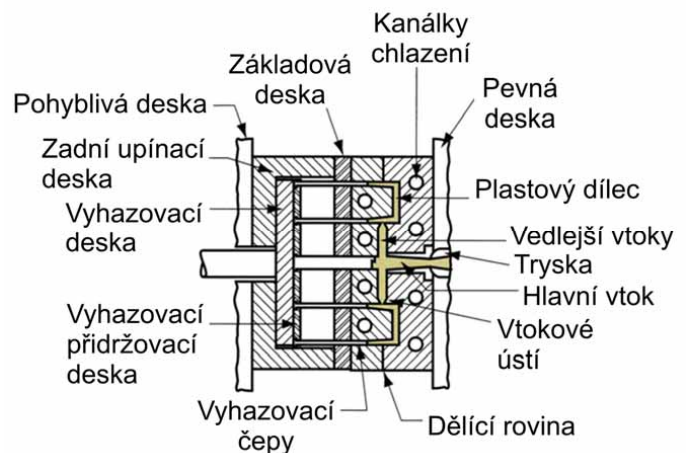
- Stejněměrné tloušťky stěn dílce.

- Vyvážené umístění dělicí roviny, pro možnost odvádění tepla z obou polovin formy stejnoměrně.
- Hladké vnitřní hrany rohy a přechodové tvary.
- Technologické úkosy obvodových stěn ($0,5^\circ$ až 2°) pro snazší vyhození dílce z dutiny formy, u vnitřních obvodových stěn a jader se volí hodnoty úkosů vyšší z tohoto intervalu, z důvodu smršťování dílců ve formě.
- Eliminace hran s ostrými úhly a míst kde se nelze dostat s chladicími kanálky ve formě.
- Eliminace hlubokých a úzkých kapes v dílci (tzn. tenkých jader ve formě).
- Poskytnutí vhodného místa na umístění vtoku.
- Poskytnutí dostatečně velké přístupné plochy pro vyhazovače.
- Specifikování obvyklé tolerance pro plastové součásti.
- Vyhnutí se nutnosti opravovat dutinu formy na vysoký lesk.

Umístění a druh vtokového ústí: Vtokové ústí je důležitou složkou procesu vstřikování. Ovlivňuje druh vstřikovací formy potřebné pro danou aplikaci (dvou desková forma, tří desková forma, forma s horkou vtokovou soustavou, automatické oddělení vtoků). Umístění vtokového ústí (případně více vtokových ústí) ovlivňuje:

- Smrštění (Mold shrinkage)
- Orientaci (Orientation)
- Tok materiálu plastu (Melt flow)
- Rozměry výsledného plastového dílce (Part dimensions)
- Zborcení dílce (Warpage)
- Pevnost studených spojů (Weld lines strength)

Vtokové ústí funguje jako tepelný ventil mezi vtokovou soustavou a tvarovou dutinou formy. V oblasti vtokového ústí (Obr. 4.10) dochází při procesu vstřikování k nárůstu teploty vlivem vstřikovací rychlosti, tlaku a tření v roztaveném polymeru. Po zaplnění dutiny plastem vtokové ústí postupně zatuhne při působení dotlaku.



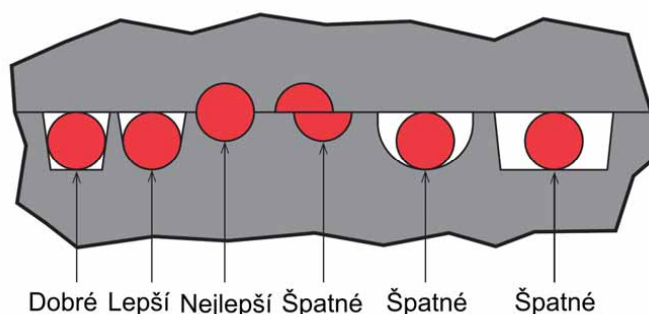
Obr. 4.10 Dvoudesková forma se studenou vtokovou soustavou [3]

4.5 Vlivy konstrukce vstřikovací formy na vstřikovací proces [3] [13] [27] [40]

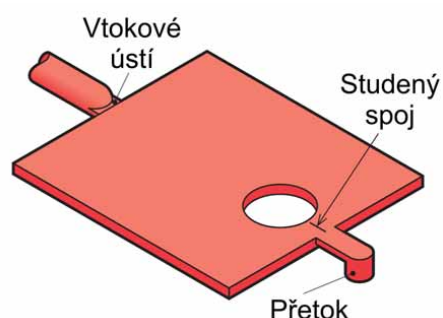
Konstrukce vstřikovací formy (Obr. 4.10) si klade v procesu vstřikování velkou důležitost. Následuje vysvětlení základních soustav obsažených ve vstřikovacích formách.

Vtoková soustava: Slouží pro rozvod taveniny polymeru do tvarových dutin formy. Dobře navrhnutá vtoková soustava zahrnuje správnou geometrii, velikost, rozložení vtoků, chlazení, možnost snadného vyhození z formy a to vše při minimálním objemu vtoků. Kromě jiného také z důvodu následné recyklace. Vyvážená vtoková soustava zapříčiňuje zaplnění všech tvarových dutin formy ve stejném čase, což zabezpečí integritu rozměrů dílců a minimalizuje čas cyklu.

Dlouhé a úzké vtoky např. půlkulovitého průřezu vyžadují dostatečně vysoký vstřikový tlak, aby plast neochladl a nezuhl příliš brzo. To jinak může vést až k neúplnému zaplnění tvarové dutiny formy. Dlouhé vtoky velkého průřezu zvyšují množství plastu k recyklaci a snižují účinnost vstřikovacího procesu. Nejvhodnější, ale také nejnáročnější na výrobu je kruhový průřez vtoků (Obr. 4.11).



Obr. 4.11 Tokové podmínky v tocích různého průřezu [40]



Obr. 4.12 Vtokové ústí a přetok [40]

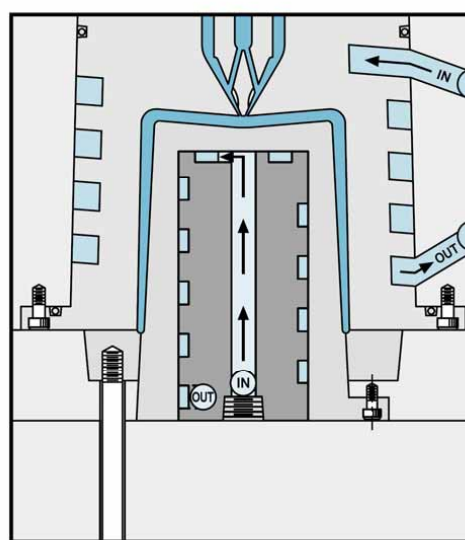
Do míst kde se vtoky kříží, je vhodné umístit kolíkové vyhazovače působící s dostatečnou silou pro vyhození vtokové soustavy. Do vtokové soustavy nebo do tvarové dutiny dílce zavádíme tzv. přetoky, sloužící pro odvod studeného čela taveniny a získání silnějších studených spojů (viz Obr. 4.12). Vtoková soustava by měla být umístěna do stejné poloviny formy jako vyhazovací systém (tj. obvykle pohyblivá strana formy).

kolíkových vyhazovačů. Teplota je důležitá z hlediska integrity rozměrů výsledného plastového dílce, mechanických vlastností, kvality povrchu, zborcení, pevnosti studených spojů a především doby vstřikovacího cyklu.

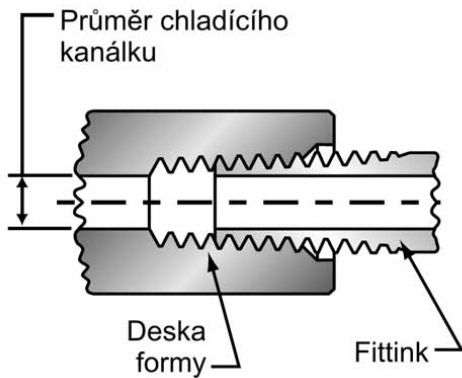
Tvoří ji série kanálků vyrobených v dostatečně blízkosti kolem tvarové dutiny, do kterých se vhání voda, případně olej pokud je potřeba předehřívát tvarovou dutinu nad teplotu varu vody. Příliš dlouhé temperační kanálky podél tvarové dutiny nejsou vhodné z důvodu špatné kontroly nad možným zborcením výsledného dílce. Tvary příčných průřezů a drah kanálků temperační soustavy mohou být na rozdíl od kanálků vtokové soustavy téměř jakékoliv v rámci snadné vyrobitelnosti. Jako je tomu např. na Obr. 4.13., který zobrazuje vnitřní a vnější spirálového chlazení tvarové dutiny.

Vysoký průtočný objem kapaliny a turbulentní proudění jsou žádoucí pro dostatečnou kontrolu nad teplotou dutiny formy. Na ochranu proti korozi temperační kanálky se buď pokovují, nebo se do vody přidávají látky potlačující tvorbu rzi. Lze také vyrábět desky tvarové dutiny a nátrubky z nerez oceli (Obr. 4.14).

Vyhazovací systém: Slouží k vyhození ztuhlých a částečně smrštěných plastových dílců z formy. Rovnoměrné vyhazování vzhledem k ploše plastového dílce je důležité z hlediska



Obr. 4.13 Spirálové chlazení formy [40]



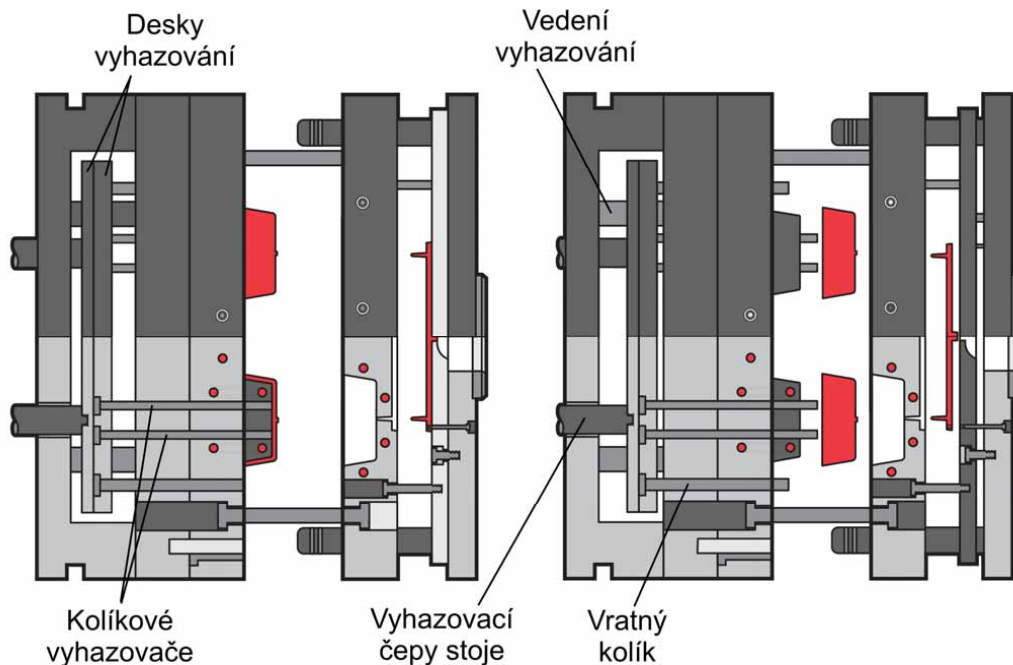
Obr. 4.14 Nátrubek chlazení formy [40]

možného zborcení dílce. Vyhazovací kolíky, pouzdra, kroužky nebo desky musí operovat plynule bez jakýchkoliv překážek.

Obvykle je vyhazovací soustava tvořená dvěma deskami se samostatným vedením. Tyto desky svírají hlavy kolíkových vyhazovačů (Obr. 4.15), jejichž čela při uzavření formy kopírují tvar tvarové dutiny formy.

Systém vracení vyhazovačů do výchozí polohy musí fungovat s dostatečným předstihem a přesností před uzavřením formy. Jinak může dojít ke kolizi vyhazovačů s protější stranou dutiny formy nebo k jejich úplnému nedosednutí do výchozí polohy, což může

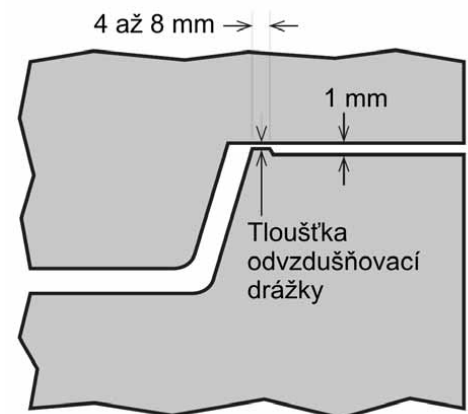
vést k výrazným stopám od vyhazovačů na výsledném plastovém dílci. Pro navrácení vyhazovačů do výchozí polohy se používají tzv. vratné kolíky (viz. Obr. 4.15).



Obr. 4.15 Třidesková vícenásobná forma, pohyb a popis vyhazovacího systému [40]

Speciální systémy vyhazování se používají pro tenkostěnné, hluboké dílce např. krabicovitého tvaru, pro které je potřeba použít vysokých vyhazovacích sil. K vyhazování lze v některých případech použít také stlačený vzduch.

Odvzdušnění formy: Odvzdušnění tvarové dutiny a vtokové soustavy formy slouží k uvolnění uzavřeného vzduchu. Je důležité pro správnou kontrolu vstřikovaného objemu plastu a předcházení s tím souvisejících vad na výsledném vyrobeném dílci. Forma bez odvzdušnění způsobuje mnoho výrobních problémů. Proto se zavádí nejčastěji do dělicí roviny (Obr. 4.16) ve formě drážek o tloušťce obvykle $0,02 \pm 0,04 \text{ mm}$, kte-



Obr. 4.16 Odvzdušňovací drážka [40]

rými se uvolní uzavřený vzduch, ne však tavenina plastu. Nižší hodnoty z intervalu platí pro semikrystalické a vyšší pro amorfni plasty.

Odvzdušňovací drážky by měly být umístěny na koncích toků materiálových drah, špatné umístění může vést k neúplnému vyplnění tvarové dutiny, vzniku studených spojů nízké pevnosti, nerovnoměrnému smrštění, zborcení dílce a potřeby vysokého vstřikovacího tlaku k vyplnění tvarové dutiny.

Další zařízení: Mohou navýšit výrobní cenu formy, a také vytvořit určité komplikace při výrobě plastových dílců. Jedním z příkladů jsou mechanismy, nazývané boční jádra, které sestávají z negativů podříznutých částí tvaru dílce, šibrů/jezdců a čepů/klínů. Pro výrobu mnoha plastových dílců jsou boční jádra nezbytná, zavedení těchto zařízení se však výrazně promítá na ceně údržby formy.

4.6 Konstrukční typy vstřikovacích forem [13] [27]

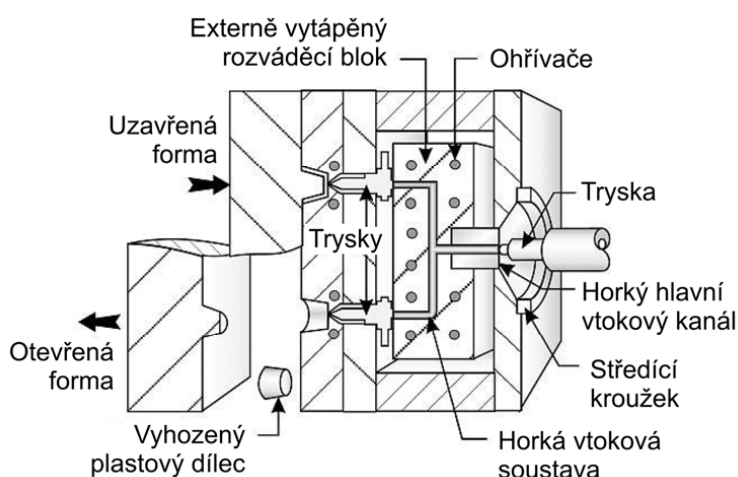
Hlavní prvky vstřikovací formy jsou:

- druh formy (dvou desková, tří desková, atd.)
- formát a tloušťka desek
- násobnost (počet tvarových dutin)
- rozměry, tvar a drsnost povrchu tvarové dutiny
- rozložení vtokové soustavy
- objem produkce
- počet a umístění vtokových ústí
- odvzdušnění
- dělicí rovina
- vyhazovací systém
- tvrdost ocelových komponent
- rozložení temperační soustavy
- aj.



Obr. 4.17 Průnik taveniny do dělicí roviny [27]

Pro formu je důležitá schopnost pracovat při určité výkonnosti, čímž se vystavuje určité námaze. Pokud jsou desky a stěny formy příliš tenké, mohou při své funkci procházet výraznými elastickými deformacemi, anebo se dokonce i porušit. Výrazný průhyb desek může vyústit až k rozevírání dělicí roviny a pronikání taveniny plastu do těchto míst (tzv. flashing, viz Obr. 4.17), dále pak ke změně rozměrů a zhoršení kvality povrchu výsledného plastového dílce. Jediný způsob jak tomu předejít je volba dostatečných tloušťek stěn formy.



Obr. 4.18 Forma s externě vytápěnou horkou vtokovou soustavou [13]

Většina forem pro vstřikování termoplastů spadá do kategorie dvoudeskových. V plastykářském průmyslu se však používá také několik dalších typů forem:

- Dvoudeskové (Two-plate) (Obr. 4.10 a příloha 2)
- S vyměnitelnou tvarovou dutinou (Interchangeable cavity inserts) (příloha 2)
- Se vstřikováním do dělicí roviny (Vertical encapsulation) (příloha 2)
- S vytavitelným jádrem (Lost core)
- Třideskové (Three-plate) (Obr. 4.15)
- S horkou vtokovou soustavou (Hot runner) (externě vytápěná na Obr. 4.18)
- S izolovanými netuhnoucími vtoky (Insulated runnerless) (příloha 2)
- Více forem poskládaných za sebou (Stacked types of molds)

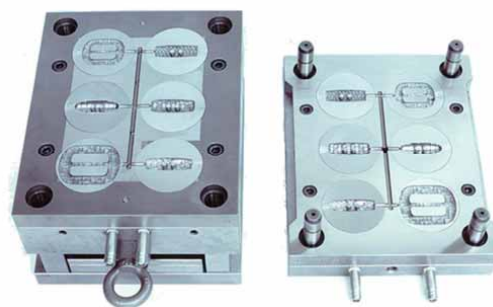
4.7 Oceli pro součásti vstřikovacích forem [2] [9] [13] [23] [34] [36] [39]

Druhy ocelí používané pro vstřikovací formy představují většinou oceli používané pro konstrukci nástrojů jiných technologií (tváření, lití, apod.). Kromě ocelí se používají také slitiny jiných kovů, jako jsou beryliové bronzы, slitiny hliníku, kobaltové a niklové slitiny, a jiné.

Oceli jsou nejpoužívanějšími materiály při konstrukci vstřikovacích forem. Žádný jiný materiál nenabízí podobnou všestrannost svých aplikací. Produkují se ve velkém objemu a široké různorodosti co se týče chemického složení, tepelného zpracování, kvality povrchu, mechanických a elektrických vlastností, korozní odolnosti a technologických vlastností. Dosahují pevnosti v rozmezí od 200 do 2000 MPa a mohou vydržet teploty od kryogenních až do 1100 °C. Výběr u nás nejpoužívanějších druhů ocelí pro vstřikovací formy se stručnou charakteristikou je v Tab. 1 a Tab. 2 v příloze 3.

Faktory ovlivňující optimální výběr oceli pro vstřikovací formy jsou:

- Geometrie, velikost a tolerance jednotlivých částí formy, to vše vzhledem k jejich případnému tepelnému zpracování
- Tvar, velikost, tolerance a požadavky plastového dílce
- Výsledná cena jednoho plastového dílce
- Druh termoplastu – mechanické vlastnosti a procesní charakteristiky
- Procesní podmínky vstřikování
- Počet plastových dílců, které má forma vyrobít
- Kvalita povrchu plastového dílce
- Násobnost a velikost formy
- Temperace a odvodušnění formy
- Velikost a druh kanálek vtokové soustavy (studená nebo horká vtoková soustava, vyváženost vtokové soustavy)
- Technologie výroby tvarové dutiny (frézování, broušení, elektrojiskrové obrábění) sestavené buď z několika částí, nebo jako celek
- Způsoby tepelného zpracování



Obr. 4.19 Vstřikovací forma [39]

Tvrdość zušlechtěných komponent tvarové dutiny dosahuje obvykle 50 až 60 HRC a její povrch může být pokoven buď chromem, nebo niklem s tloušťkou vrstvy 0,05 až 0,15 mm. Výběr ocelí závisí na typu termoplastu, počtu vyprodukovaných plastových dílců a způsobu výroby tvarové dutiny formy.

Slitiny hliníku se používají většinou pro prototypové formy např. AW-6061 (AlMg1SiCu) a AW-7075 (ČSN 42 4222) s pevností v tahu 450 MPa i vyšší, a relativně dobrou abrazní odolností. Mají dobrou tepelnou vodivost, nevýhodou je nízká tuhost. Dále se slitiny hliníku používají na formy pro výrobu dílců z lehčeného polypropylenu (EPP) a lehčeného polystyrenu (EPS), kde se využívá horká pára, která vytváří silně korozní prostředí, pro takové podmínky je vhodné použít materiály jako AW-5086 (AlMg4) příp. AW-5754 (ČSN 42 4413).

Slitiny mědi nebo beryliové bronzy mají vysokou tepelnou vodivost a mohou být vytvrzeny až na 45 HRC. Jejich nevýhodou je velmi špatná obrobiteľnosť, jsou drahé a mají nízkou pevnost a tuhost, takže deformace při obrábění může způsobovat problém. Bronzy se používají v případech kde je potřeba odolnost proti opotřebení v mechanismech formy a výjimečně také jako vložky tvarové dutiny z vedení tepla, příkladem je cínová kompozice ČSN 42 3753 (SnSb10Cu3Ni).

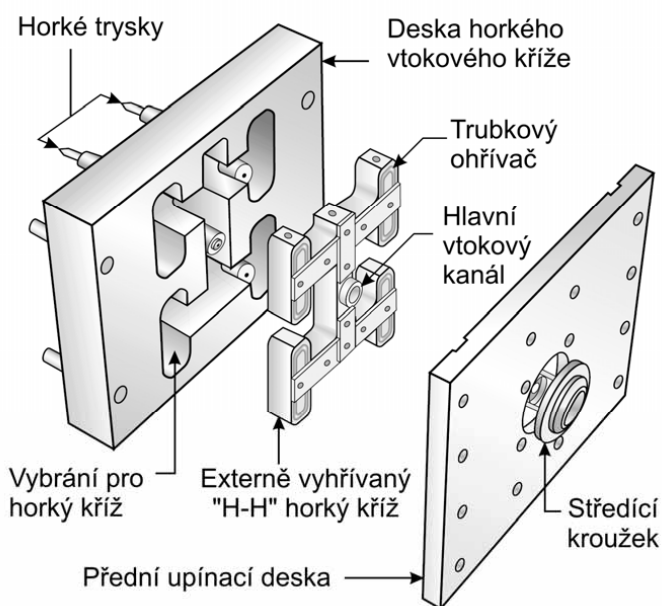
Slitiny titanu se z důvodu nízké teplotní vodivosti používají pro mechanicky namáhané tepelně izolační elementy horkých vtokových soustav vstříkovacích forem. Např. pro distanční podložky se používá slitina titanu s prvky 6Al-4V, s označením dle EN 3.7165.

5 HORKÁ VTOKOVÁ SOUSTAVA [13] [26] [40] [58]

Horká vtoková soustava představuje prodloužení plastikační komory vstřikovacího stroje. Roztavený plast se zde však dále nehomogenizuje, je pouze veden přímo do dutiny formy, případně je tok taveniny rozdělen do více tvarových dutin, přičemž se plast ve vtokové soustavě udržuje stále ve stavu taveniny. Poté co plast dorazí do tvarové dutiny formy, začíná tuhnout.

Vedení taveniny do dutiny formy se realizuje soustavou horkých vtokových kanálků, které taveninu proporcionálně rozdělují přes tepelně kontrolovaná vtoková ústí do tvarových dutin formy. Zavedení horkých vtoků zlepšuje kvalitu výsledných plastových dílců, snižuje čas cyklu, a jelikož s plastovými dílci nevzniká ztuhlá vtoková soustava, není potřeba řešit její oddělení a následnou recyklaci. Dostáváme tedy přímo hotové plastové dílce. Vtokové zbytky vznikají jen v podobě výrazných stop nebo malých zbytků vtoků na plastovém dílci.

Udržování taveniny při konstantní teplotě ve vtokových kanálcích poskytuje stejnoměrnou viskozitu po celou dobu toku a lepší kontrolu vstřikovacího tlaku. Další výhodou oproti studeným vtokům je redukce velikosti vstřikované dávky. Horké vtokové systémy však požadují zařízení na ovládání teploty, dodatečné zaučení obsluhy a nákladnější údržbu.



Obr. 5.1 Externě vyhřívaná horká vtoková soustava [13]

Formy s horkou vtokovou soustavou se od forem se studenými vtoky liší tzv. **horkou polovinou formy**, ve které se plast vstřikovaný ze vstřikovací jednotky stroje dále udržuje ve stavu taveniny o stejné teplotě, se kterou opustil trysku vstřikovacího stroje, a vytápěnými rozváděcími kanálky dopravuje do dutiny formy.

Horká polovina formy sestává z ocelových desek obsahující komponenty horké vtokové soustavy, např. externě vyhřívané horké vtokové soustavy obsahují horké trysky, horký vtokový kužel, horký kříž apod. (viz Obr. 5.1), dále různé druhy kabelů, elektrických přípojek, a pokud jsou obsaženy tak také pneumatické nebo hydraulické mechanismy a hadicové přípojky.

Velmi častým zdrojem problémů horkých vtokových soustav je kontrola teploty. Nezbytný je vysoký stupeň tepelné homogenity v horké vtokové soustavě k zabránění degradace plastu a dosažení rovnoměrného plnění, dotlaku, smrštění, vzhledu, atd., k čemuž se používají různé typy automaticky řízených ohřívačů za pomoci termočlánků.

Horké vtokové systémy se úspěšně používají pro vstřikování dílců malých rozměrů ve vícenásobných formách, např. malá plastová ozubená kola nebo pro vícebodové vstřikování dílců větších rozměrů, např. palubní desky automobilů.

Formy s horkou vtokovou soustavou

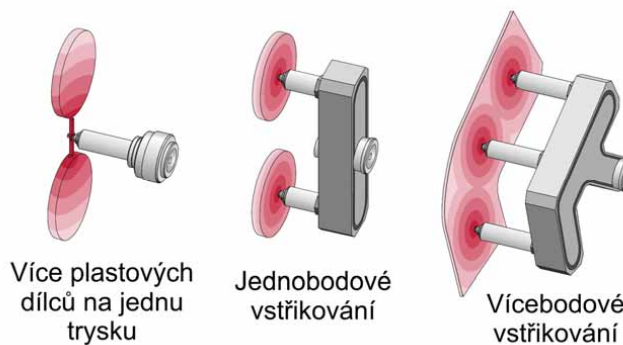
5.1 Typy horkých vtokových soustav [9] [13] [19] [26] [54]

Používají se tři hlavní *typy horkých vtokových soustav*:

- Izolovaná horká vtoková soustava (Insulated hot runner)
- Vnitřně vyhřívána horká vtoková soustava (Internally heated hot runner)
- Externě vyhříváný horký vtokový systém (Externally heated hot manifold)

Horké vtokové soustavy dělit i podle počtu a využití tzv. horkých trysek neboli vtokových ústí vzhledem k počtu vstříkovaných plastových dílců (Obr. 5.2):

- Více než jeden plastových dílců na jednu tryšku – tvoří se část studeného vtoku
- Jeden plastový dílec na jednu tryšku – tzv. jednobodové vstříkování
- Více trysek na jeden plastový dílec – tzv. vícebodové vstříkování



Více plastových dílců na jednu tryšku

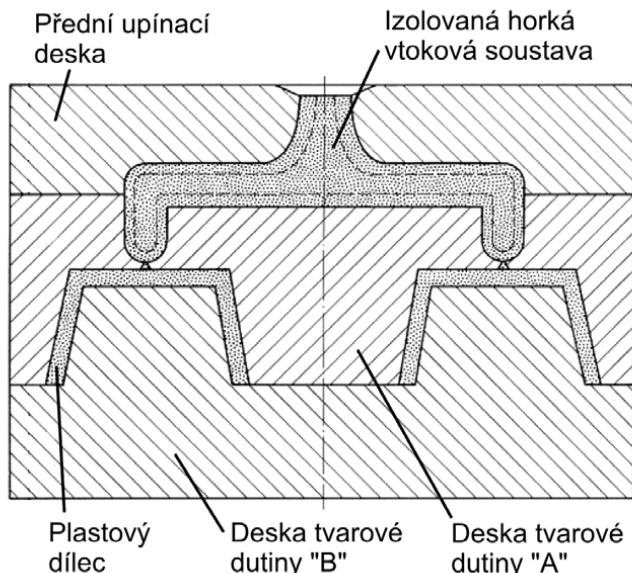
Jednobodové vstříkování

Vícebodové vstříkování

Obr. 5.2 Způsoby využití horkých trysek [54]

Izolovaná horká vtoková soustava jinak nazývaná také jako živá vtoková soustava je velice podobná studené vtokové soustavě třídeskové formy (Obr. 4.15). Kanálky izolované vtokové soustavy mají výrazně širší průměr (10 až 15 mm).

Izolovaná vtoková soustava (Obr. 5.3) je relativně levná na výrobu a ideální pro termoplasty citlivé na degradaci vlivem tepla. Při vstříkování dílců z termoplastu s vysokou teplotou tavení běžně vznikají problémy z důvodu většího rozdílu mezi teplotou taveniny termoplastu a formy. Ne však při použití izolované horké vtokové soustavy, vlivem šířky kanálků izolované vtokové soustavy zůstává termoplast v jádru těchto kanálků dostatečně tekutý, zatímco ztuhlá vrstva termoplastu poblíž stěn vtokové soustavy tvoří tepelnou izolaci horkému jádru vtoku. Při dodržení dostatečně rychle opakujícího se vstříkovacího cyklu jádro vtoku neztuhne, i když jsou stěny formy vtokové soustavy mnohem chladnější. Pro lepší kontrolu nad teplotou taveniny termoplastu lze použít vnitřní vytápění vtokových ústí (viz Obr. 10-24 v příloze 2).

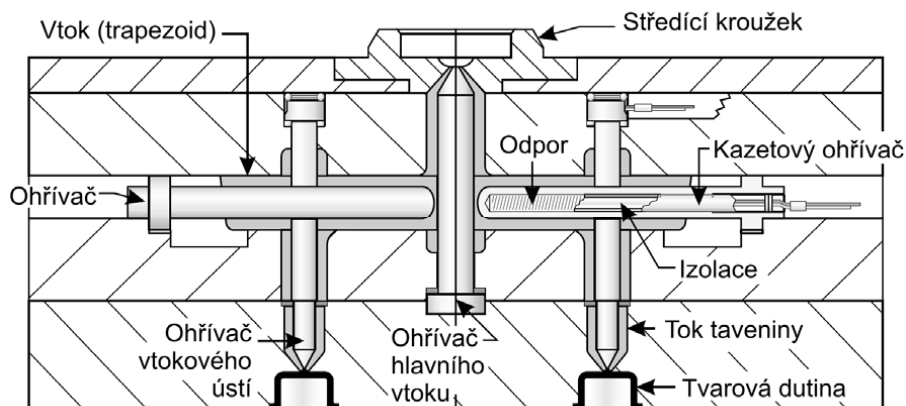


Obr. 5.3 Izolovaná horká vtoková soustava [9]

S výhodou lze izolovanou vtokovou soustavu použít, pokud je potřeba velmi často měnit barvu plastových dílců. Tento systém však netoleruje výraznější prodloužení doby cyklu, jinak termoplast ve vtokové soustavě ztuhne, ten je pak potřeba z formy odstranit a začít znovu. Ačkoliv je odstranění plastu z

izolované vtokové soustavy (viz Obr. 10-25 v příloze 2) oproti druhým dvěma typům horkých vtokových soustav snadné, může to trvat asi 5 až 10 minut.

Vnitřně vyhřívaná horká vtoková soustava (viz Obr. 5.4) je rovněž tvořena širšími vtokovými kanálky, např. kruhového nebo trapezoidového tvaru průřezu, ale s vnitřními topnými vložkami ve všech kanálcích této soustavy. Plast proudící kolem povrchů topných vložek je udržován ve stavu taveniny pomocí kazetových ohřivačů a termočlánků zabudovaných uvnitř těchto vložek.



Obr. 5.4 Vnitřně vyhřívaná horká vtoková soustava [13]

Způsob ohřevu plastu směrem zevnitř ven je velmi efektivní, nedochází zde ke zbytečným ztrátám tepla směrem do desek formy a na rozdíl od externě vyhřívané vtokové soustavy je teplo, které je potřeba dodávat ohřivačům mnohem nižší.

Stěny vtokové soustavy formy není nutné temperovat na příliš vysokou teplotu (obvykle o 100 až 150 °C nižší než vytápěné vložky). Pokud určitá vrstva plastu na stěnách vtokové soustavy ztuhne, slouží stejně jako v případě izolovaných horkých vtokových soustav jako tepelná izolace. Teplejší tavenina poblíž vytápěných vložek může dále proudit až do dutiny formy.

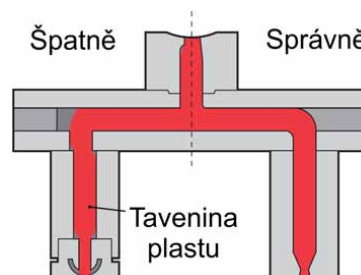
Pro většinu technických plastů je však nepřijatelné pokud v horké vtokové soustavě dochází k tuhnutí taveniny, opětovnému roztavení a následnému obnovení pohybu termoplastu. K tomuto jevu dochází především v tzv. stagnačních zónách, tj. v místech, kde má tavenina plastu po určitou dobu nulovou rychlost toku. Plast při příliš dlouhé výdrž v vtokové soustavě tepelně degraduje. Ve výsledku se tedy výskyt stagnačních zón může negativně promítnout na zcela náhodné části vyrobených plastových dílců.

Nedoporučuje se používat vnitřně vytápěnou horkou vtokovou soustavu pro termoplasty s vysokou teplotou tavení pro inženýrské aplikace. Tento systém je však vhodný pro vysokobjemovou produkci termoplastů, které nejsou natolik tepelně citlivé (např. PE a PP). Cena vnitřně vyhřívaného horkého vtokového systému je nižší než externě vyhřívaného vtokového systému. Čištění vnitřně vytápěné horké vtokové soustavy vyžaduje demontáž formy a výměnu tlakových těsnění vytápěných vložek, přičemž hrozí poškození formy.

5.1.1 Externě vyhřívaná horká vtoková soustava [9] [13] [26] [40] [54] [56] [61]

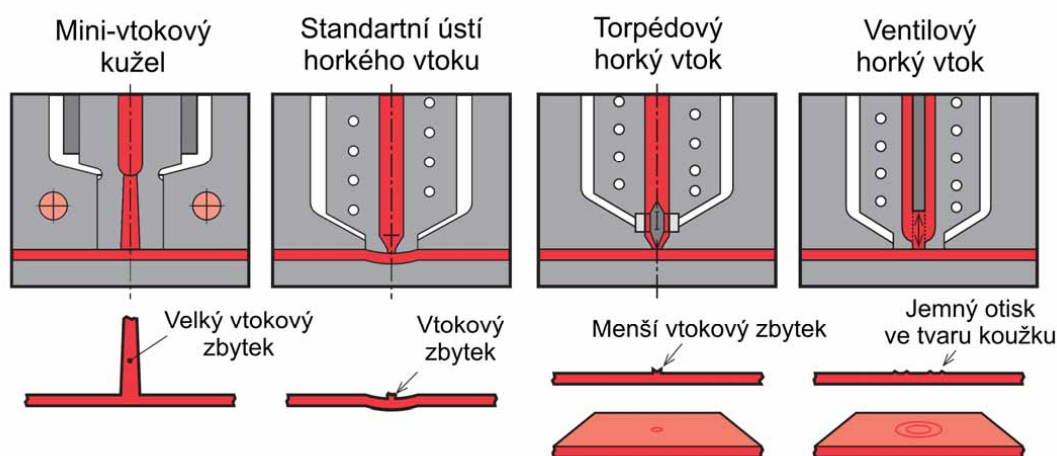
Externě vyhřívaná horká vtoková soustava (viz Obr. 4.18 a 5.1) je obvykle tvořena vyváženými vtokovými kanálky s hladkým povrchem bez tzv. stagnačních oblastí (Obr. 5.5). To vede k vylepšení produkce plastových dílců především, co se týče mechanických vlastností, snížení zmetkovitosti a zamezení příliš přerušování produkce

Využívá se mnoho různých typů systémů pro ohřev, např. kazetové, trubkové ohřívače, ohřívače ve tvaru cívky, ohřívače ve tvaru vložek apod. Slouží k zajištění plného přenosu tepla při dostatečně rychlém náběhu na pracovní teplotu. Jsou navrhovány k přenosu vysokých vstřikovacích tlaku (až 200 MPa) a vysokých teplot s ohledem na rozdílnou teplotní roztažnost částí horké vtokové soustavy a ocelových desek formy, ve kterých je horká vtoková soustava uložena.



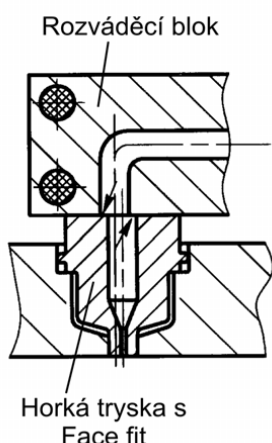
Obr. 5.5 Stagnační zóny v horké vtokové soustavě [40]

Vtokové ústí horkých trysek: V externě vytápěných horkých vtokových soustavách je důležitý především použitý typ trysek (Obr. 5.6). Výběr typu trysky je ovlivněn složitostí plastového dílce, tloušťkou stěn, délkou tokových drah a smykovým napětím vznikajícím v tavenině plastu při toku vtokovým ústím, které je částí horké trysky. Tryska by měla být dostatečně velká vzhledem k velikosti



Obr. 5.6 Typy vtokových ústí externě vyhřívaných horkých trysek [40]

vstřikované dávky a viskozity taveniny plastu. Vzhled vtokového zbytku závisí na typu vtokového ústí, viskozitě taveniny a typu plastu (semikrystalický, amorfni, plněný, neplněný).



Externě vyhřívaná horká vtoková soustava může být jednoduchá s jedním vtokovým ústím, tedy složená z:

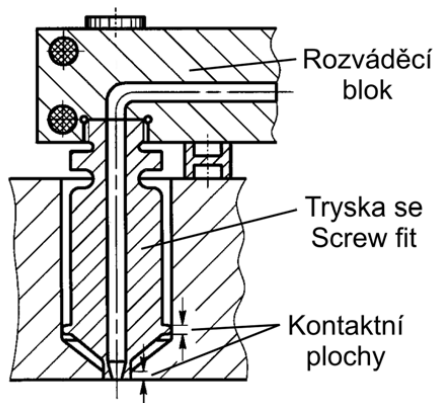
- Horkého vtokového kužele (Hot sprue)
- Horké vtokové trysky (Single nozzle)

Nebo může být tvořena více horkými tryskami (Obr. 5.1), pak jednotlivé elementy horké vtokové soustavy jsou:

- Horkého vtokového kužele jako hlavního vtokového kanálu (Hot sprue)
- Vyhřívaného rozváděcího bloku neboli tzv. horkého kříže (Hot manifold)
- Dvou a více horkých vtokových trysek (Nozzle)

Obr. 5.7 Porušení souososti kanálků při spojení dosednutím čela [61]

Používá se mnoho typů horkých trysek pro externě vyhřívané horké vtokové soustavy. V závislosti na stopě, kterou vtokové ústí na dílci zanechá, na změnách barvy plastu, velikosti vstřikované dávky a celkovém výkonu trysek. Trysky jsou upevněny ve vybrání desky tva-



Obr. 5.8 Spojení horké trysky se závitem [61]

rozváděcím blokem, které tento rozdíl v teplotní deformaci kompenzují, jsou tzv. face fit (Obr. 5.7) a screw fit trysky (Obr. 5.8).

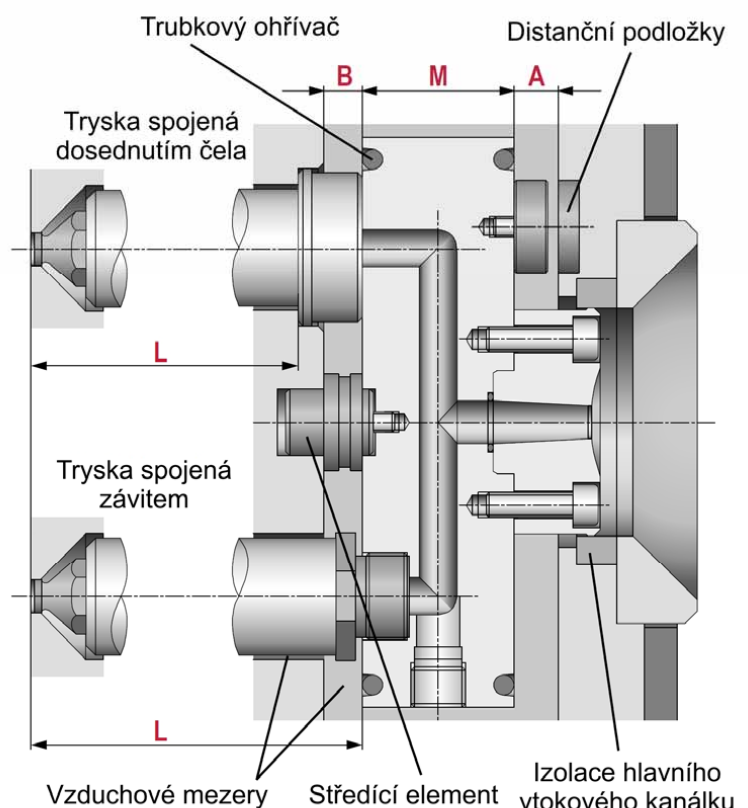
Trysky s *face fit* jsou s rozváděcím blokem spojeny pouze dosednutím čelních ploch a působením tlaku. Tyto trysky vyžadují správný propočít odchylek jednotlivých poloh vůči rozváděcímu bloku za studena, kde je potřeba kanálky trysky a rozváděcího bloku vůči sobě posunout tak, aby byly posléze při zahřátí na provozní teplotu sousedí. Při špatném propočtu teplotních dilatací vznikají v přechodu mezi rozváděcím blokem a tryskami ostré rohy, které pak tvoří stagnační zóny pro taveninu plastu (viz Obr. 5.7). Podle [56] se tyto trysky používají převážně pro vstřikování plastových dílců malého objemu.

Trysky se *screw fit* jsou připevněny k rozváděcímu bloku pomocí závitu. V kontaktu s deskou tvarové dutiny formy jsou pouze poblíž vlastního ústí vtoku (viz Obr. 5.8). Za studena se tyto trysky v sestavě prohýbají. Tento průhyb je dále při zahřátí vtokové soustavy na pracovní teplotu vykompenzován vlivem teplotní dilatace jednotlivých desek. Je zde požadavek na dostatečnou délku těchto trysky, aby při deformaci trysky nevznikalo příliš velké napětí. Dle [56] se tento typ trysky používá převážně pro vstřikování plastových dílců velkých objemů.

Izolace a materiály horké vtokové soustavy: Externě vyhřívané vtokové soustavy vyžadují dostatečnou izolaci jejich komponent od chladnějších částí vstřikovací formy. Určitý způsob oddělení součástí horké vtokové soustavy v otvorech desek

rové dutiny formy, tepelně izolované pomocí vzduchové mezery a je jim zde umožněna teplotní dilatace. Speciálním typem horkých vtokových trysky jsou ventilové trysky, které vyžadují externí mechanismus navíc pro ovládání jehly ventilu, a to buď pneumatický, hydraulický nebo pružinový (příklad na Obr. 5.10).

Spojení horké trysky a rozváděcího bloku horké vtokové soustavy: Protože je při funkci horké vtokové soustavy teplota rozváděcího bloku výrazně odlišná od teploty desky tvarové dutiny, ve které jsou ukotveny horké trysky, dochází k nesouladu poloh kanálků vtokové soustavy v rozváděcím bloku s kanálky horkých trysky. Dva nejčastěji používané způsoby spojení horké trysky s



Obr. 5.9 Tepelná izolace externě vyhřívaných horkých vtokových soustav [54]

formy je potřeba z důvodu udržení adekvátního toku a zabránění tuhnutí taveniny plastu. Všechny komponenty musí být navrženy tak, aby tavenině plastu poskytovaly tok proudnicového tvaru z materiálů vysoce pevných, tepelně vodivých odolných proti tepelné únavě, chemickým vlivům a proti korozi.

Na Obr. 5.9 lze vidět dostatečně odizolovanou externě vyhřívanou horkou vtokovou soustavu pomocí vzduchových mezer. V částech kde horká vtoková soustava přichází do styku s okolními deskami formy, se používají odporové materiály. Nejčastěji slitiny titanu. Trubkový ohřívač horkého rozváděcího bloku se vyrábí nejčastěji ze slitin mědi.

Externě vytápěné horké vtokové systémy jsou dražší než vnitřně vyhřívané nebo izolované vtoky a vyžadují kvalifikovanější personál a údržbu. Také se obtížně čistí, potřebují více času na zahřátí polymeru uvnitř a tedy více času při restartu procesu vstřikování.

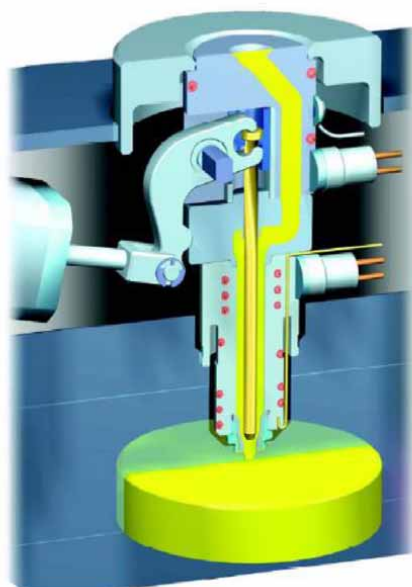
Nejvýhodnější co se týče ceny horké vtokové soustavy a zanechané stopy na plastovém dílci, je externě vyhřívaná horká vtoková soustava s horkými tryskami s torpédovými vtoky (viz Obr. 5.6). Torpédo umístěné ve vtokovém ústí trysky funguje v podstatě jako plovák, který se nadzvedne při působení tlaku směrem z vtokové soustavy. Tlak je vyvozen plastikační jednotkou vstřikovacího stroje. Při poklesu tohoto tlaku se torpédové vtokové ústí samo uzavře. Vlivem tohoto mechanismu je výsledná stopa na plastovém dílci minimální.

5.2 Výhody a nevýhody použití horkých vtokových soustav [9] [26] [59] [61]

Užití horké vtokové soustavy ve vstřikovací formě přináší řadu výhod, ale také dlouhou řadu nevýhod. Mnoho níže zmíněných nevýhod však lze v některých případech ignorovat nebo odbourat správnou volbou typu horké vtokové soustavy pro danou aplikaci.

Přínosy použití horké vtokové soustavy

- Protože vtoková soustava při tuhnutí nevzniká, nemusí být při odformování vyhozena. Z důvodu odbourání chlazení horké vtokové soustavy a snazšího odformování, lze výrazně zkrátit čas vstřikovacího cyklu.
- Odpadá transport, recyklace a následné skladování zbytků vtokové soustavy. Odpadá nutnost použití recyklátu a tedy možnost poklesů mechanických vlastností způsobené vlivem kontaminace recyklovaného plastu.
- Redukce vstřikované dávky plastu, z důvodu nevytváření vtokové soustavy, dává možnost použití vstřikovacího stroje s menší plastikační kapacitou.
- Úspora na vtokové soustavě také redukuje uzavírací sílu vstřikovacího stroje.
- Technologie horkých vtoků poskytuje relativně velkou svobodu. Co se týče konstrukce vtokových ústí, a s tím souvisejících stop po vtokové soustavě na výsledném plastovém dílci.
- Především u vícenásobných forem s široce rozvětvenou vtokovou soustavou, lze použitím horkých vtoků výrazně snížit potřebný vstřikovací tlak. To je dáno nízkou viskozitou



Obr. 5.10 Řez horkou tryskou s vtokovým ústím ovládaným pomocí ventilu [9]

tu, kterou si horká vtoková soustava udržuje. U středně složitých forem lze zavedením horké vtokové soustavy snížit potřebný vstříkovací tlak až o 30 %.

- Zvětšením průřezů horkých vtoků lze dosáhnout redukce smykového tření v tavenině plastu. Tím se však zvýší délka pobytu taveniny plastu v horké vtokové soustavě, kterou je nutné zvážit.
- Správnou volbou horkých vtokových trysek vzhledem k vstříkovanému plastu, velikosti kontaktních ploch v oblastech tepelné izolace, individuálního chlazení vtokových ústí a při použití materiálů s vhodnou tepelnou vodivostí, lze dosáhnout plastových dílců vysoké kvality a snížit velikost výrobního smrštění.
- Možnost pro vstříkování dílců s menší tloušťkou stěny, ekonomičtějšími průřezy stěn založenými spíše na vzhledu dílce, než na tokových podmínkách taveniny.
- Nedochozí k výrazným poklesům teploty a tlaku ve vtokové soustavě a ve výsledku se tak zavádí do plastových dílců méně zbytkových napětí.

Nevýhody použití horké vtokové soustavy

- Obecně zřetelně komplexnější konstrukce vstříkovací formy.
- Vyšší náklady na vstříkovací formu především při použití vtokových ústí uzavíratelných pomocí ventilů.
- Cena energií použitých při samotném vstříkování je dražší, v porovnání se vstříkováním do forem se studenými vtokovými soustavami. Avšak při tomto porovnání je potřeba zvážit cenu energií spojenou s recyklací studených vtokových zbytků. V některých případech dobře tepelně izolovaných forem s horkou vtokovou soustavou tedy nemusí být cena vložených energií dohromady s celkovými náklady na výrobu formy vyšší. Tím pádem cena energií nemusí být vždy nevýhodou. To platí hlavně v případě vysoce produkčních forem.
- Pro minimalizaci tepelného a mechanického poškození vstříkované taveniny plastu, je nutné zajistit vysokou teplotní homogenitu, správné umístění termočlánků a pokud možno laminární proudění taveniny v horké vtokové soustavě.
- V závislosti na velikosti vstříkované dávky, způsobu vstříkování (např. vícebodové) a době vstříkovacího cyklu, může tavenina plastu v horké vtokové soustavě setrvat příliš dlouho, čímž dojde k její tepelné degradaci.
- Způsob ohřevu horké vtokové soustavy (vnitřní nebo externí) může také zapříčinit tepelnou degradaci taveniny plastu.
- Bezproblémové formy s horkou vtokovou soustavou vyžadují častou údržbu, stejně jako vysokou přesnost výroby ze strany výrobce formy. Tím vzrůstá cena výroby a údržby vstříkovací formy.
- Součástí horké vtokové soustavy vystavované vysokému opotřebení (např. vtoková ústí horkých trysek, termočlánky) by měly být snadno údržbě přístupné a pokud možno vyměnitelné i v upnuté formě na vstříkovacím stroji z důvodu zkrácení doby odstávky výroby.
- Pro dosažení optimální tepelné vodivosti a tepelné izolace se v horkých vtokových soustavách používají drahé a špatně obrobitelné materiály jako slitiny mědi a titanu. Navíc je nutné všechny kovové povrchy vystavené degradaci vlivem chemických reakcí s taveninou plastu chránit ochrannou vrstvou. Pro části s nedostatečnou izolací, kde dochází ke kontaktu kov na kov, se používají drahé izolační materiály. Především slitiny titanu, příp. keramika.
- Stagnační zóny v horké vtokové soustavě zapříčiňují degradaci taveniny plastu a znesnadňují případnou výměnu barevného odstínu plastu. S tím dále souvisí problémy spojené s odstraněním těchto stagnačních zón.

- Pokud je povolena jen velmi malá stopa po vtokovém ústí na plastovém dílci, musí mít vtokové ústí tomu odpovídající velikost. Hrozí vznik vysokých třecích napětí v tavenině plastu a její tepelná degradace. Tomu se lze vyhnout použitím ventilových vtokových ústí, které umožňují velký průřez toku. Ventilové trysky však výrazně navyšují cenu vstříkovací formy.
- Rozběh a dostatečné vyladění vstříkovacího cyklu formy s horkou vtokovou soustavou ve vstříkovacím stroji je obecně časově náročnější.

6 POČÍTAČOVÁ SIMULACE VSTŘIKOVÁNÍ [29] [47]

Jde o počítačovou analýzu toku taveniny plastu, jako např. analýzu postupu čela taveniny při plnění, a zjištění vhodných poloh pro umístění odvodušňovacích drážek. Dále analýzu chlazení formy z hlediska odhadu procesních parametrů chlazení, a automatické vytváření grafů pro ilustraci efektu rozsahu parametrů chlazení v závislosti na době chlazení. Za těmito a podobnými účely se používají typy počítačových programů, které jsou vhodné pro ověření konstrukce vstřikovací formy, nebo samotného plastového dílce pro technologii vstřikování ještě před samotnou výrobou vstřikovací formy.

Počítačovou simulaci vstřikování lze dnes již provádět na relativně levných osobních počítačích nebo dražších laptotech a to v přijatelných výpočetních časech. Není potřeba drahých výpočetních stanic.

Počítačová simulace se využívá nejen z hlediska ověření, jak bude vstřikovací forma fungovat při samotné produkci, ale také pro samotný odhad vstřikovacích parametrů pro rychlejší uvedení formy do výroby. Počítačovou analýzou lze docílit odbourání případných úprav během zkoušení formy, a také včasnou předpověď chyb ještě před vyrobením formy. To zase umožní rychlejší uvedení formy do výroby plastových dílců.

Je zde také možnost docílit celkově vyšší kvality plastových dílců. Počítačová analýza toku taveniny poskytuje řešení k mnoha někdy těžce pochopitelným a odhadnutelným jevům v procesu vstřikování:

- Zborcení nebo pokroucení tvaru plastového dílce (Warping)
- Zbytková napětí v plastovém dílci (Molded-in Stress)
- Příliš vysoké vstřikovací tlaky (Excessive Fill Pressures)
- Pronikání plastu do dělicí roviny formy (Flashing)
- Příliš vysoká hodnota smrštění (Too Much Shrinkage)
- Nevyplnění tvarové dutiny (Short Shot)
- Tepelná degradace materiálu (Thermal Degradation)
- Výskyt studených spojů (Weld Lines)

Bez počítačové simulace vstřikování lze ve složitějších případech výroby plastových dílců jen těžko odhadnout vztahy mezi konstrukcí plastového dílce, vstřikovací formy a vstřikovacími parametry samotného procesu vstřikování. Mnohdy pouze samotná praktická zkušenost nestačí. Použitím počítačové simulace lze předejít výrobě mnoha prototypových forem. Dále se lze částečně vyhnout časově náročné korekci finálních vstřikovacích forem, důležité pro úspěšnou výrobu plastových dílců splňujících požadavky jejich následné aplikace.

6.1 Analýza plnění a dotlaku [29]

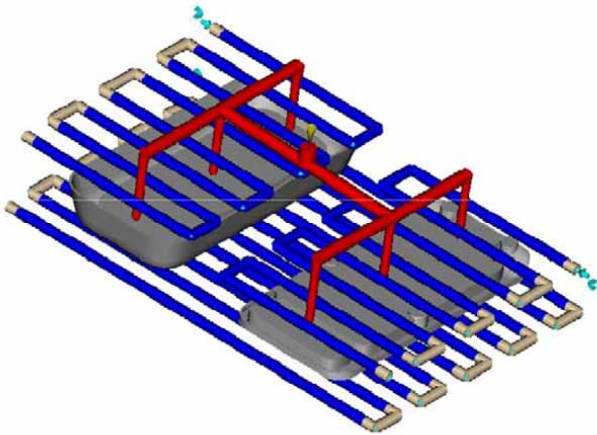
Výpočetní analýza plnění tvarové dutiny formy a tlaku při dotlaku je založena na modelu geometrie tenkostěnné součásti, kde se zanedbává změna tlaku ve směru její tloušťky. Tento koncept je základem mnoha komerčních simulačních programů pro vstřikování plastů a tzv. CAE analýzu. Průběh toku taveniny plastu je možno popsat pomocí řešení rovnic vyjadřujících hmotnost, hybnost a energii taveniny.

Pro získání správných výsledků analýzy plnění a dotlaku se doporučuje vyloučit ze simulace vtokovou soustavu a analyzovat pouze samotný plastový dílec.

6.2 Analýza chlazení [29] [53]

Chlazení formy hraje klíčovou roli, co se týče efektivity výroby a kvality plastových dílců. Obecně se temperačním systémům přisuzuje velmi malá priorita při konstrukci vstřikovací formy. S využitím simulací chlazení lze při optimalizaci zredukovat čas cyklu a dosáhnout nárůstu produktivity formy při výrobě plastových dílců.

Provádí se nejčastěji dva typy analýz temperačních systémů. První se zabývá prouděním temperačního média v kanálcích temperačního systému a druhá analýza se zabývá přenosem tepla z tuhajícího plastového dílce na chladicí medium.



Obr. 6.1 Správné chlazení tvarových dutin formy z hlediska proudění a přenosu tepla [53]

přílišné využívání kapacity čerpadla neefektivní. Ukázka optimálního rozestavení chladících kanálek je na Obr. 6.1.

Odvod tepla z taveniny plastu pomocí temperačního média může být vypočítán např. na základě variační metody konečných prvků (FEM) pro tenkostěnný model, skořepinový model nebo pro obecný třírozměrný model. Obvykle se však pro výpočet používá integrální metoda hraničních prvků (BEM). Tato metoda umožňuje vytvořit analýzu přenosu tepla deskami formy pouze použitím plošné sítě. Na konečné prvky se tedy rozdělují pouze plochy tvořící obvody desek formy, nikoliv jejich vnitřní objemové části, což výrazně usnadňuje výpočet a tedy snižuje výpočetní čas.

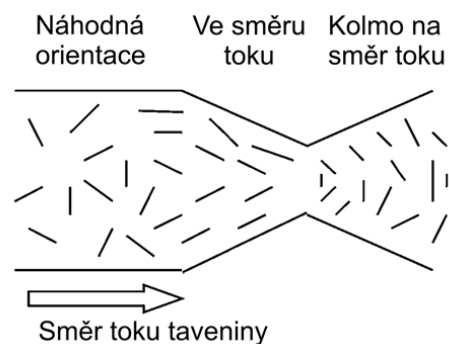
Výsledky analýzy poskytují rozdělení teplot na površích desek formy. Tyto výsledky umožňují konstruktérovi formy, aby rozmístil chladící kanálky dostatečně vhodně pro eliminaci přílišné variace rozdělení teplot a konkrétně zamezil přílišnému rozdílu teplot na jedné straně tvarové dutiny oproti druhé, tak aby nedošlo ke zborcení plastových dílců při výrobě.

Analýza toku temperačního média se provádí na základě konvenční teorie hydrodynamiky. Výsledky zahrnují rychlost toku, požadovaný tlak a Reynoldsovo číslo. Cílem je dosáhnout turbulentního proudění při ne příliš vysoké rychlosti toku temperačního média tak, aby se čerpadlo vstřikovacího stroje příliš při chlazení nenamáhalo. Turbulentní proudění je žádoucí z hlediska efektivnějšího přenosu tepla. Přenos tepla tedy není příliš ovlivněn rychlostí toku temperačního média, ale spíše tím zda jde o proudění turbulentní nebo laminární. Zatímco je důležité dosáhnout turbulentního proudění, je

6.3 Analýza orientace vláken [29]

Přidáním např. minerálních nebo skelných vláken lze zvýšit pevnost a pružnost v tahu materiálu plastu. K tomu je však nutné docílit správné orientace vláken v plastovém dílci. Při tečení taveniny plastu se vlákna orientují podle smyslu proudění, tvaru spáry, ve které tavenina proudí a vzájemné interakce jednotlivých vláken mezi sebou. Finální stav orientace v jednotlivých místech plastového dílce může vést k výrazně anizotropním mechanickým vlastnostem.

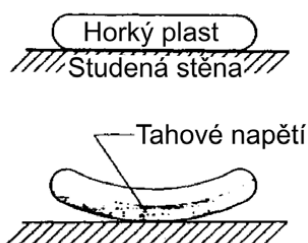
Vlákna se orientují ve směru proudění, pokud proud konverguje, a ve směru kolmém k proudu pokud proud diverguje (viz. Obr. 6.2). S několika vtokovými ústími na jednu dutinu a komplikovanou geometrií plastového dílce, může být výsledné rozdělení orientace vláken v daném objemu velice složité. Počítačová analýza zde napomáhá nejprve určit orientaci vláken, a poté z výsledku odvodit termomechanické vlastnosti plastového dílce.



Obr. 6.2 Natočení vláken nebo molekul podle změny průřezu [29]

6.4 Analýza zborcení dílce [29] [47]

Zborcení je velmi častým problémem zapříčiněným dodatečnou samovolnou deformací plastového dílce po jeho výrobě. Konkrétně po ochlazení (viz Obr. 6.3). Jde o komplexní jev, který je přímým následkem procesních vlivů na zpracovaný materiál. Zborcení je zapříčiněno nerovnoměrným smršťováním plastu a nerovnoměrným rozdělením smrštění vzhledem k jeho objemu. To je dáno vlivem následujících tří typů variací.



Obr. 6.3 Zborcení plastu po chladnutí [47]

při použití vyztužujících vláken, která mohou vést k velmi výrazné anizotropii termomechanických vlastností.

Variace mezi jednotlivými body v tavenině plastu: Je často dáno rozdílem v rozdělení hustoty v celkovém objemu taveniny plastu, které je důsledkem rozdílu rozdělení tlaku a teploty taveniny plastu.

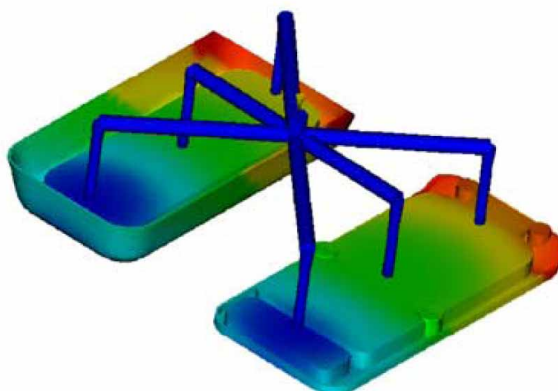
Variace smrštění v různých směrech: Tento typ, taktéž proměnný z bodu do bodu, je dán anizotropií smrštění taveniny plastu v různých směrech. Ta vyplývá z nehomogenity termomechanických vlastností materiálu dané rozdílnou orientací a morfologií molekul. Rozdíly ve smrštění v jednotlivých směrech jsou výrazné především v semikrystalických plastech a jsou častým problémem

Variace smrštění na jedné a druhé straně tvarové dutiny formy: Obvykle způsobená asymetrií toku taveniny a teplotních polí. Většinou zapříčiněné rozdílem teplot na jedné a druhé straně formy.

Odhadnout tvar plastového dílce po zborcení pomocí počítačové analýzy přesně nelze. Výsledek se oproti realitě liší téměř vždy. Je ale možné z rozdílů teplot v teplotním poli posoudit zda ke zborcení dojde či ne. Zborcení závisí na teplotách jednotlivých polovin formy a na poloze dělicí roviny vzhledem k velikosti tvarové plochy formy, která je s tuhnoucí taveninou plastu v kontaktu.

6.5 Optimalizace [29] [53]

Největší zajímavostí počítačové simulace je její optimalizační potenciál. Nejčastěji se řeší optimalizace vstřikovacího procesu samotného, korekce tvaru a tloušťek stěn plastového dílce. Využívá se hlavně při určení velikosti rozváděcích kanálků u vícenásobných forem se stejnými nebo různými tvarovými dutinami, tzv. family forem (viz Obr. 6.4). Vyšetřuje se, zda se jednotlivé dutiny formy vyplní ve stejném čase při změně průřezů jednotlivých kanálků vtokové soustavy.

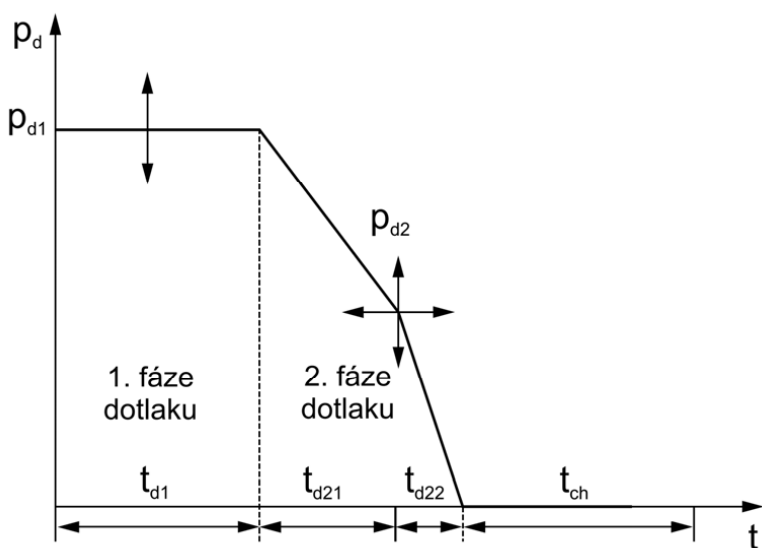


Obr. 6.4 Simulace dynamicky řízeného plnění formy s tvarovými dutinami různého tvaru [53]

Dalším využitím je poskytování informací pro vstřikovací stroje. Přičemž při fázi plnění se uvažuje rychlost pohybu šneku v plastikační jednotce jako funkce polohy a při fázi dotlaku se uvažuje tlak šneku působícího na taveninu plastu v závislosti na čase.

Mnoho povrchových defektů na plastovém dílci může být zapříčiněno náhlými změnami při proudění taveniny plastu při fázi plnění. Je vyžadována konstantní rychlost toku taveniny před čelem šneku, přičemž pohyb taveniny plastu generuje teplo vlivem třecího napětí v materiálu. Toto teplo nesmí být příliš velké, aby neovlivnilo teplotu taveniny v daných mezích. Výhodou simulace je možnost vidět chování taveniny přímo ve formě a případnou výchylku v rychlosti toku způsobené vlivem složitosti tvarové dutiny zaznamenat.

Fáze dotlaku má dramatický efekt na kvalitu, hmotnost, rozměrové tolerance a případné zborcení plastového dílce. Při fázi dotlaku je obvykle cílem dosáhnout správné hustoty plastu,



Obr. 6.5 Optimalizovaný průběh křivky tlaku v závislosti na čase při dotlaku [29]

a rovnoměrného rozdělení této hustoty v celém objemu plastového dílce. Dále je možné minimalizovat rozdíly ve smrštění ve směru a kolmo na směr toku. Výsledkem je tlakový profil křivky v závislosti na čase. Obr. 6.5 ukazuje příklad takové křivky. Podobný profil křivky dotlaku může výrazně zlepšit kvalitu plastového dílce. Tento efekt lze pomocí počítačové analýzy posoudit, zatímco přímo ve výrobě téměř nelze zjistit efekt změny tlaku při dotlaku na konečný plastový dílec.

7 VOLBA MATERIÁLU PLASTOVÉHO DÍLCE

7.1 Popis a vyrobiteľnosť dílce [16] [51]

Zadaný již fyzicky existující plastový dílec (foto na Obr. 7.1), držák uhlíků asynchronního elektromotoru, tmavě oranžové barvy byl změřen v toleranci rozměrů max. 0,5 mm pomocí posuvného měřítka. Poté byl z rozměrů vytvořen virtuální 3D model pomocí CAD softwaru *Autodesk Inventor Professional 2011 Student Version*. Následně byl nakreslen také 2D výkres dílce (viz příloha 4).

Dále pokračuje návrh technologie výroby držáku uhlíků vstřikováním termoplastu ve dvounásobné formě s horkou vtokovou soustavou.



Obr. 7.1 Zadaný plastový dílec

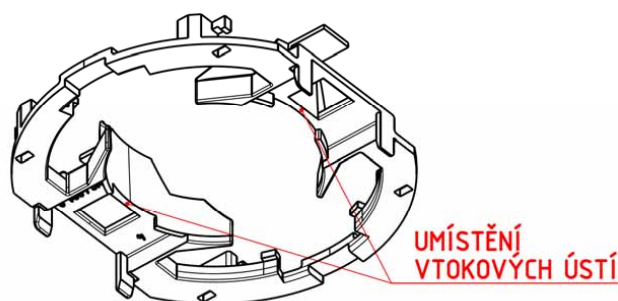
Držáky kartáčů, a také různé další díly elektrických motorů, se z důvodů vysokých nároků na mechanické vlastnosti často v minulosti vyráběly z reaktoplastů. V posledních letech je trend vyrábět tyto díly z termoplastů s vhodnými přísadami pro dosažení potřebných elektrických a mechanických vlastností, z důvodu možné opakovatelné recyklace termoplastů a jejich technologických vlastností. Zadaný plastový dílec je, podle složitosti a tloušťky jednotlivých stěn dílce, pravděpodobně z termoplastu. Hlavními požadavky na materiál dílce jsou tuhost, pevnost, elektrická neprůraznost a samozhášivost.

Příklady některých často používaných termoplastů v elektrotechnice jsou *Crastin®* (PBT), *Rynite®* (PET), *Zytel®* (PA) od firmy *DuPont™* nebo *Lexan®* (PC), *Noryl®* (PPO/PS), *Valox®* (PBT), *Cycloy®* (PC/ABS) od firmy *SABIC Innovative Plastics™*.

Dílec lze vyrobit ve vstřikovací formě bez bočních jader. Navrhovaná místa vstřiku pomocí CAD programu *Inventor 2011* jsou naznačena na Obr. 7.2.

Pro daný držák kartáčů je velmi vhodný *Lexan®* polykarbonát z důvodu těchto materiálových vlastností:

- vysoká houževnatost
- čistota, tuhost a životnost produktu
- vysoká teplotní odolnost
- rozměrová stabilita za vyšších teplot
- samozhášivost
- snadná vyrobiteľnosť



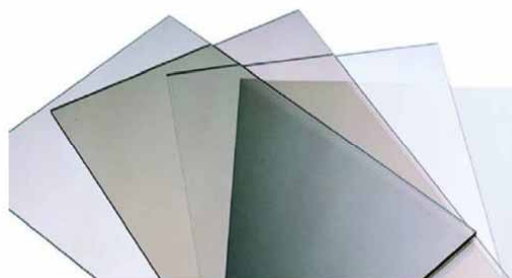
Obr. 7.2 Umístění vtokových ústí vzhledem ke tvaru plastového dílce

7.2 Nemodifikovaný polykarbonát [60] [63]

Polykarbonát (Obr. 7.3), složený z prvků C, H, O, je polyester, jehož struktura je lineární. Tím se liší od reaktoplastický polyesterových pryskyřic, jejichž molekuly jsou zesíťované. Průmyslově se polykarbonáty (dále jen PC) vyrábí polykondenzací, z uhlí a zemního plynu, čímž vzniká vláknovitý produkt.

Čistý PC bez přísad je:

- Čirý jako sklo
- Tvrdý
- Elastický
- Mimořádně houževnatý
- Odolný vůči kyselinám, alkoholu, benzínu a olejům, ne však proti louhům a zásaditým roztokům
- Udržuje si své vlastnosti při vystavení povětrnostním vlivům
- Nehořlavý
- Má vynikající elektroizolační vlastnosti i při zvýšené teplotě a vlhkosti
- Propouští vodní páry a plyny
- Fyziologicky nezávadný



Obr. 7.3 Transparentní Lexan polykarbonát [60]

Mechanické vlastnosti PC lze ještě zlepšit použitím skleněných vláken jako přísady. Dále lze ovlivnit odolnost vůči UV záření, zvýšit stupeň samozhášivosti, a mnohé další. Toho se dosahuje pomocí různých přísad, které však většinou zapříčiňují nárůst viskozity taveniny a tedy zhoršení technologických vlastností PC.

7.3 Vlastnosti Lexanu® (PC) [41] [51]

PC s obchodním označením *Lexan*® je amorfni termoplast s dobrými mechanickými, elektrickými, optickými a tepelnými vlastnostmi. Může být barev široké škály buď průhledný, nebo zakalený. Byl vyvinut společností *SABIC Innovative Plastics*™ pro velký rozsah technologických procesů zahrnující především:

- Vstřikování do formy
- Vytlačování
- Vyfukování
- Výroba pěněných struktur

Charakteristické vlastnosti *Lexanu*® jsou:

- Extrémní tuhost
- Vysoká houževnatost
- Nízké výrobní smrštění
- Rozměrová stálost
- Snadná zpracovatelnost
- Stabilita pod UV zářením
- Nehořlavost
- Teplotní odolnost
- Vynikající elektrická izolace

7.3.1 Houževnatost [51]

Unikátní vlastností *Lexanu*® je velmi vysoká houževnatost z rozmezí teplot pod nulou až do 80 °C (viz grafy na Obr. 1 a 2 v Příloze 5). Vysoká houževnatost *Lexanu*® dělá součásti doslova odolné vůči rozbití. Poskytuje tak dostatečný koeficient bezpečnosti i v méně pohodlných pracovních podmínkách.

Pro velmi nízké teploty může být houževnatost vylepšena spojením PC např. s ABS tak, jako je tomu *Cycoloy*®. Do *Lexanu*® se přidávají modifikátory zlepšující houževnatost. Tímto se zvýší hodnota nárazové práce potřebné pro přelomení vzorku za nižších teplot při rázové zkoušce dle Izoda (graf na Obr. 3 v Příloze 5).

Pro zadaný dílec bude podle výše uvedeného vyhovovat *Lexan*® s modifikací houževnatosti za snížených teplot.

7.3.2 Tuhost [51]

Velmi důležitou vlastností *Lexanu*® je jeho tuhost. Může nabývat rozdílných hodnot v závislosti na modifikaci. Tuhost součásti je dána vztahem mezi mechanickým zatížením a deformací. *Lexan*® si udržuje relativně konstantní tuhost od teplot pod nulou až do 120 °C.

Nejdůležitější charakteristikou tuhosti je křivka závislost napětí a deformace (viz graf na Obr. 4 Přílohy 5). Obecně lze považovat modul pružnosti v tahu za měřítko tuhosti při porovnávání různých druhů materiálů (graf na Obr. 2 v Příloze 5), a to nejen plastů. Tuhost *Lexanu*® je kromě teploty ovlivněná také obsahem skelných vláken, které slouží pro vyztužení (viz grafy na Obr. 4, 5 a 6 v Příloze 5).

Pro zadaný plastový dílec bude podle výše uvedeného vyhovovat *Lexan*® nevyztužený. Tuhost a pevnost nevyztuženého *Lexanu*® je pro danou aplikaci dostatečná.

7.3.3 Nehořlavost [35] [51]

Nejvíce rozšířený standart na posuzování nehořlavosti plastů jsou zkoušky hořlavosti dle UL94. Tyto zkoušky identifikují schopnost materiálu uhasit se poté, co je zapálen. Přehled tříd nehořlavosti viz Tab. 7.1.

Tab. 7.1 Třídy nehořlavosti dle UL94 [35]

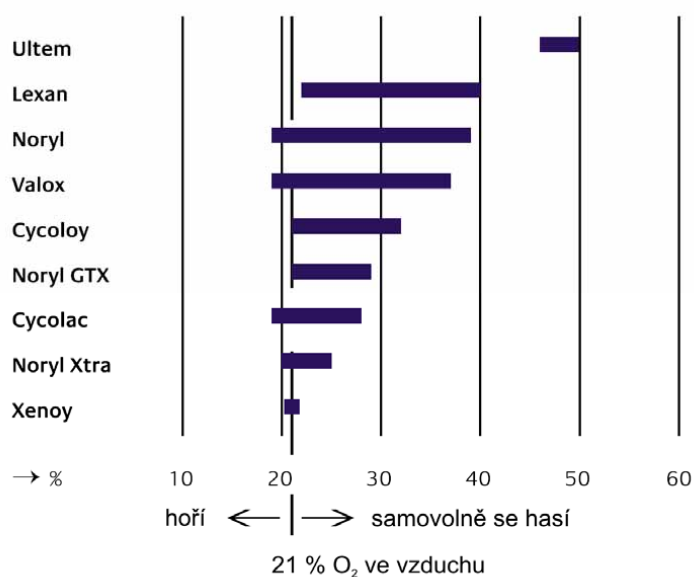
Třída nehořlavosti	Hodnocení
5V	Nejvyšší stupeň
V0	-
V1	-
V2	Pro el. konstrukce
HB	Nejnižší stupeň

Třída při hodnocení nehořlavosti se mění s tloušťkou, a také závisí na použité barvě daného plastu. Podle [35] musí mít všechny součásti používané v elektrických konstrukcích stupeň nehořlavosti V2 nebo vyšší.

Pro zadaný dílec bude podle výše uvedeného vyhovovat modifikace *Lexanu*® se stupněm nehořlavosti alespoň V2 při tloušťce 2.5 mm.

Ve spojení s nehořlavostí se vyjadřuje tzv. limiting oxygen index (LOI), což lze volně přeložit jako limitní kyslíkové číslo. Dle ISO 4589 mají všechny druhy *Lexanu*® pro základní použití LOI v rozsahu 25÷28 %, a také podle ISO 4589 jsou plasty s LOI vyšším než 21 % samozhašitelné. Lze tedy do jisté míry považovat i základní nemodifikovaný *Lexan*® za samozhašitelný.

Diagram na Obr. 7.4 porovnává základní a *Lexan*® různých modifikací s jinými typy plastu od firmy *SABIC Innovative Plastics*™.



Obr. 7.4 Srovnání rozmezí LOI různých typů plastů a jejich modifikací [51]

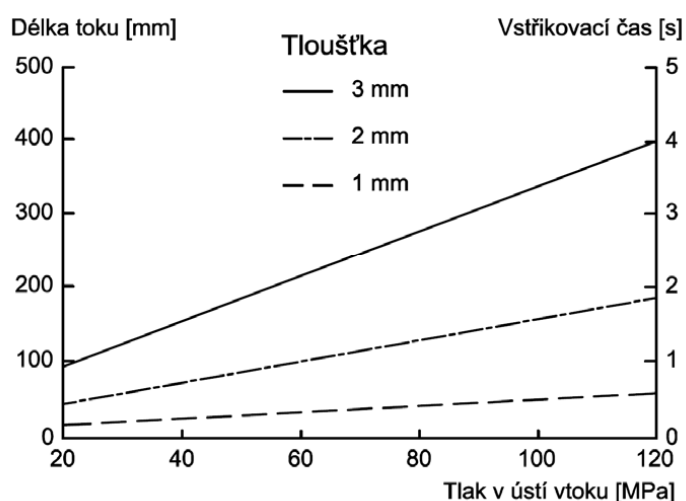
7.3.4 Elektrická izolace [37] [51]

Jakožto organický materiál je *Lexan*® velmi dobrý elektrický izolant. Elektrická průrazová pevnost, tj. schopnost materiálu izolovat elektrické napětí, se mění s tloušťkou materiálu dle grafu na Obr. 7 Přílohy 5. Tento graf platí pro nemodifikovaný *Lexan*®, přičemž elektrická průrazová pevnost *Lexanu*® dosahuje při tloušťce 2,5 mm hodnot zhruba 22 kV. Při srovnání např. s elektroizolační schopností vzduchu, kdy 1 mm suchého vzduchu dosahuje hodnot el. průrazové pevnosti kolem 1 kV, je schopnost elektrické izolace *Lexanu*® velmi dobrá.

7.4 Zpracování Lexanu [26] [27] [37] [42] [51] [60]

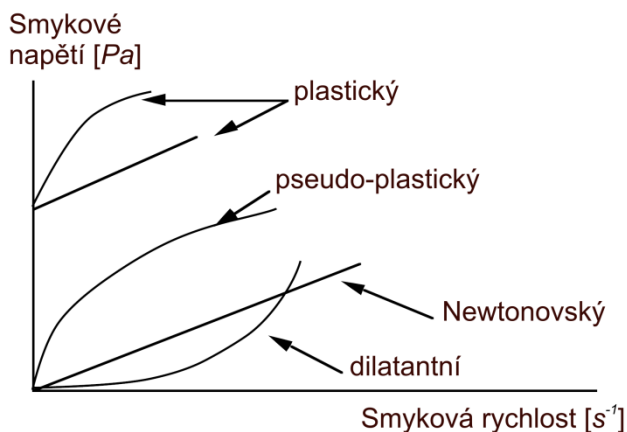
Pro získání dané součásti držáku uhlíku pomocí technologie vstřikování jsou velmi důležité tokové vlastnosti materiálu. Měří se na základě délky tokové dráhy a teploty tavení plastu. Určení tokové dráhy je důležité při odhadu, zda dojde nebo nedojde k vyplnění tvarové dutiny formy.

Jako příklad ukazuje Obr. 7.5 výsledek testu tokových vlastností nevyztuženého *Lexanu*®. Zde je toková dráha poloměrem dílce tvaru kruhového disku určité tloušťky, přičemž místo vstřiku, tedy vtokové ústí, je ve středu tohoto disku.



Obr. 7.5 Určení délky tokových drah taveniny *Lexanu* [51]

Délka dráhy toku plastu je funkcí **viskozity**, tření a teploty. *Lexan*® je dostupný v širokém rozsahu viskozit ve stavu taveniny, čehož se dosahuje výrobou PC z molekulárních řetězců s různými molekulárními hmotnostmi.



Obr. 7.6 Tokové modely různých druhů tekutin [60]

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (7.1)$$

kde τ ... je smykové napětí [Pa]
 η ... dynamická viskozita [Pa·s]
 $\dot{\gamma}$... smyková rychlost [s^{-1}]

Lexan® přitom vykazuje velmi nízký pokles viskozity při zvýšeném třecím napětí v tavenině, tzn. při zvýšené rychlosti toku taveniny. Na rozdíl od ostatních termoplastů PC vykazují téměř Newtonovský průběh viskozity (Newtonův zákon viz vztah 7.1 a průběh v grafu Obr. 8 Přílohy 5). Tzn. viskozita je téměř neovlivněná třením, při smykových rychlostech toku taveniny do $10^3 s^{-1}$. Při vyšších smykových rychlostech, tj. nad $10^3 s^{-1}$, však viskozita *Lexanu*® klesá (viz nehořlavé modifikace na Obr. 6.15).

Dalším velice významným faktorem je výrobní **smrštění**. To může být odlišné v závislosti na geometrii dutiny formy, polohách vtokových ústí a procesním podmínkám při vstřikování.

Jako amorfni termoplast vykazuje *Lexan*® nižší hodnoty smrštění oproti semikrystalickým termoplastům. Hodnoty smrštění ve směru a kolmo ke směru toku taveniny jsou také velmi podobné, z čehož vyplývá snazší vyrobitelnost přesnějších součástí z tohoto typu materiálu.

Vyztužení *Lexanu*® skelnými vlákny zvyšuje jeho **orientaci**, ale snižuje smrštění. Vliv druhu plastu na smrštění se obvykle popisuje pomocí p-v-T diagramů. Graf na Obr. 9 v Příloze 5 ukazuje tento vztah pro nevyztuženou a vyztuženou modifikaci *Lexanu*®. Čím níže je křivka v grafu Obr. 6.16, tím nižší hodnoty výrobního smrštění *Lexan*® dosahuje.

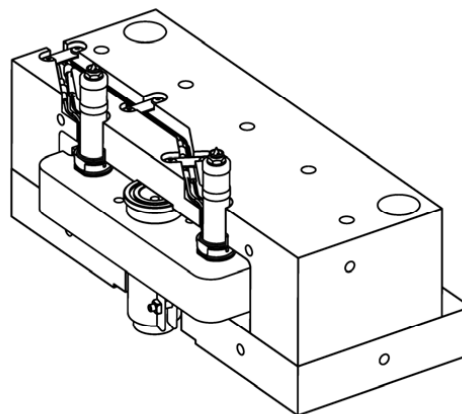
Recyklace: *Lexan*® lze použít pro výrobu plastových dílců pomocí celé řady technologií, z nichž nejvýznamnější je vstřikování. Lze přitom dosahovat velmi krátkých vstřikovacích cyklů. Možný vzniklý odpad ve formě vtoků může být recyklován a znovu použit, pokud nedojde k jeho kontaminaci během výrobního procesu. Regenerát lze použít pro stejné nebo podobné aplikace stejného průmyslu. Alternativně také pro aplikace s nižšími nároky na vlastnosti materiálu.

Předvysušení: Před zpracováním *Lexanu*® pomocí vstřikování je nutné zařadit sušení granulátu. Tak jako většina termoplastů, také *Lexan*® absorbuje vzdušnou vlhkost obsaženou v okolní atmosféře, která pak může způsobit degradaci materiálu při jeho následném zpracování. *Lexan*® tedy musí být předvysušen pro zajištění optimálních vlastností a výsledného vzhledu výsledného dílce. Doporučená teplota sušení je 120 °C, po dobu 2÷4 hodin v závislosti na způsobu sušení. Výsledná vlhkost by měla být maximálně 0,02 %.

K vysušení *Lexanu*® nestačí pouze ventilovaná komora vstřikovacího válce, která slouží k potlačení vlivu vlhkosti na konečný plastový výrobek. Je potřeba speciálního sušícího zařízení, které může sloužit i pro více než jeden vstřikovací stroj zároveň.

Doporučení pro horké vtokové soustavy

- Blok soustavy rozváděcích kanálků neboli horký kříž pokud možno externě vyhříván, tzn. použití externě vyhříváné horké vtokové soustavy (Obr. 7.7). Ohřivače by měly být stejnoměrně rozmístěny pro eliminaci příliš horkých míst v soustavě.
- K dosažení dostatečného ohřátí horké vtokové soustavy je potřeba minimální teplo 50 W na jeden kubický palec oceli.
- Průměry rozváděcích kanálků se nedoporučují použít menší než 12 mm . Větší součásti mohou vyžadovat i širší průměry.
- Rozváděcí kanálky proudnicového tvaru bez mrtvých míst kde hrozí zastavení materiálu a následná degradace. V rozích rozváděcích kanálků je tedy potřeba použít ucpávek odpovídajícího tvaru.
- Horké trysky by měly být přímé a krátké. Pokud je délka trysky větší než 150 mm , je doporučeno vytápění trysky více než jedním topným tělesem.
- Horký kříž a trysky by měly být důkladně tepelně izolovány od přiléhajících ocelových desek vzduchovou mezerou minimálně 1 mm širokou nebo s minimálním kontaktem kov na kov při použití nerezových ocelí případně podpěr ze slitiny Ti.
- Horké trysky by měly mít na svém vstupu externí ohřivač, který začíná zároveň se vstupním vrtáním trysky nebo sahá přes.
- Pro ohřev každé horké trysky by měl být použit odděleně napájený elektrický obvod.
- Teplota taveniny plastu v horké vtokové soustavě by měla být stejná jako ve vstřikovacím válci vstřikovacího stroje.

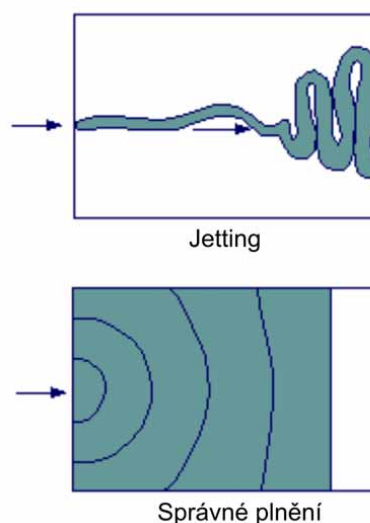


Obr. 7.7 Externě vyhříváná horká vtoková soustava, řez horkou polovinou formy [42]

Poloha vstřikovací jednotky vstřikovacího stroje: Jelikož uvažujeme vstřikovací formu s horkou vtokovou soustavou, vstřikujeme do osy formy, tzn. poloha hlavního vtokového kanálu ve formě je stejná jako např. na Obr. 4.3, 4.10, 4.15 a 4.18. Komponenty těchto typů forem nabízí jako normálie např. německá firma *HASCO* nebo rakouská firma *Meusburger*.

Pozice pro vtoková ústí horkých trysek: Při volbě pozic vtokových ústí horkých trysek je potřeba zvážit některá opatření týkající se horkých vtokových soustav a vtokových soustav obecně.

- Vtoková ústí by měla být pokud možno blízko u sebe. To napomáhá k zabránění ochlazování při plnění tvarové dutiny formy taveninou plastu a také výslednému zvýšení pevnosti studených spojů.
- Velikost vtokových ústí by měla poskytovat plnění tvarové dutiny za rozumných podmínek tlaku a rychlosti vstřikování.
- Délky vtokových ústí v horkých tryskách by měly být co nejkratší.
- Uzavírací vtoková ústí (např. torpédové nebo ventilové horké trysky) napomáhají k předejití tzv. jettingu, ob-



Obr. 7.8 Jetting a správné plnění [27]

vykle způsobeného rychlým tokem taveniny vtokovým ústím malého průřezu (viz Obr. 7.8).

- K zamezení tvorby vzduchových bublin uvnitř dutiny formy je nutné zavést odvzdušňovací drážky ve vhodných místech. Obvykle na konci toku taveniny.
- Vtoková ústí umístěna pokud možno v nejširších částech dílce tak, aby nevznikaly studené spoje v mechanicky namáhaných částech výsledného plastového dílce.
- Pro minimalizaci jetting jevu by trysky měly být vůči rozváděcím kanálkům orientovány pod 90° nebo případně pod úhlem ostrým.

7.5 Užití Lexanu [50] [51]

PC se obecně řadí mezi vysoko viskózní plasty. Byly však vyvinuty i nízko a středně viskózní modifikace *Lexanu*®, vhodné pro užití při výrobě velkoplošných, tenkostěnných dílců.

Lexan® nachází uplatnění především v těchto průmyslových oblastech (Obr. 7.9):

- Elektrotechnika
- Telekomunikace
- Osvětlení, automobilová světla
- Optika
- Domácí spotřebiče
- Sportovní potřeby

Pro elektrotechnický průmysl jsou důležité především tyto vlastnosti *Lexanu*®:

- Vyhovující schopnost snížené hořlavosti pro většinu modifikací přesahujících teplotu 850°C při tloušťce 1 mm při testu vznětlivosti žhavým drátem (Glow wire test)
- Výborné teplotní vlastnosti pro všechny modifikace při teplotě 125°C při zkoušce tlakem kuličkou (Ball pressure test)
- Dobrá odolnost proti průrazu elektrickým proudem (Comparative tracking index CTI $> 175\text{ V}$)
- Vysoká houževnatost a tuhost
- Dostatečné elektroizolační vlastnosti v agresivním prostředí
- Vlastnosti týkající se vzhledu – vysoký lesk, možnost vytvoření textury



Obr. 7.9 Příklady užití Lexanu [50]

7.6 Volba modifikace Lexanu [48] [51]

Kombinace všech výše popsaných vlastností dělá z *Lexanu*® ideální materiál pro zadanou součást. S ohledem na požadavky na nehořlavost plastových součástí v elektromotorech volíme pro zadanou součást modifikaci *Lexan*® 945A. Jde o nevyztužený polykarbonát, tzn. bez skleněných vláken. Lze jej zpracovat pomocí technologie vstřikování, je samozhášivý bez přísad chloru a bromu. *Lexan*® 945A je technický materiál navržený pro obecné použití.

Kromě výše zmíněných, doplňujícími vlastnostmi *Lexanu*® 945A jsou:

- Třída nehořlavosti V2 při tloušťce 3 mm
- Zvýšená odolnost proti degradaci pod vlivem UV záření
- Dostupný v průhledných nebo zakalených odstínech různých barev
- Vhodný také pro aplikace ve venkovním prostředí, kde může být vystaven např. povětrnostním vlivům počasí, vlhkostí i při nízkých teplotách

Lexan® 945A je tedy velmi vhodný pro zadanou aplikaci a výrobu dílce technologií vstřikování.

7.7 Procesní parametry vstřikování Lexanu [37] [41] [51]

Teplota taveniny

- Teplota materiálu těsně před čelem šneku, při vstřikování do dutiny formy se teplota snižuje.
- Při příliš dlouhé časové prodlevě na této teplotě může dojít k degradaci plastu.
- Pro *Lexan®* je maximální čas prodlevy na této teplotě mezi 6 až 12 minutami, v závislosti na výši teploty tavení.
- Nevzdušený *Lexan®* má nižší teplotu tavení než vzdušený.
- Čas prodlevy lze snížit například vstřikováním menší dávky taveniny, zavedením vícebodového vstřikování

Vstřikovací tlak

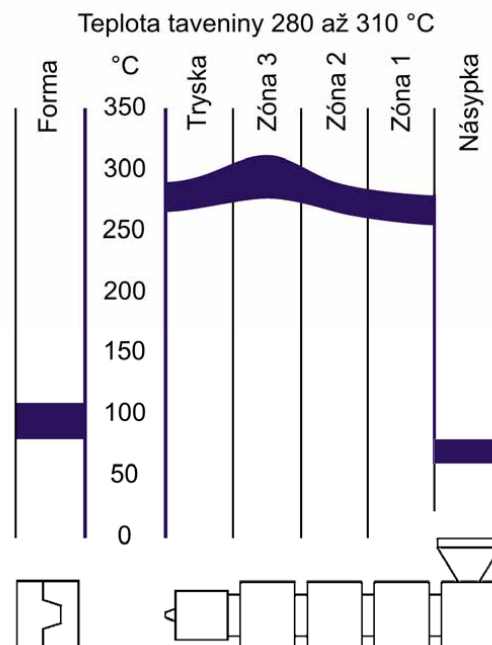
- Tlak taveniny před čelem šneku v průběhu plnění tvarové dutiny. V podstatě jde o poměr síly k ploše čela šneku.
- Vstřikovací tlaky *Lexanu®* se pohybují obvykle v rozmezí 40-50 MPa. Pro složité tenkostěnné výstřiky někdy dosahují hodnot až do 80 MPa.
- Pro rychlé vstřikování pod vysokým tlakem je třeba zvolit odpovídající konstrukci vstřikovacího stroje a formy

Dotlak

- Tlak vyvozený šnekem na materiál po zaplnění tvarové dutiny taveninou až do okamžiku zatuhnutí materiálu. Kompenzuje objem ztracený při smrštění dílce při jeho chladnutí.
- Navazuje na vstřikovací tlak, má nižší hodnoty než vstřikovací tlak a trvá delší dobu.
- Na dotlak je potřebný objem taveniny o velikosti zhruba 5 až 10 % vstřikované dávky.

Protitlak (také zpětný tlak)

- Následuje po dotlaku, slouží pro zabránění dekomprese.
- Jde o tlak vyvozený na dutinu formy při plastikaci a homogenizaci nové dávky.
- Je doporučen zpětný tlak 10 barů pro vytvoření kvalitní taveniny *Lexanu®* a dodržení odpovídající, snáze měřitelné velikosti dáv-



Obr. 7.10 Teploty pro zpracování základní modifikace Lexanu pomocí technologie vstřikování [51]

ky taveniny.

Dekomprese (také zbytkový tlak)

- Je to tlak těsně před otevřením formy.
- Příliš vysoký zbytkový tlak je příčinou vnitřních pnutí ve výsledném plastovém dílci, což může způsobit praskání hlavně u vyztužených typů *Lexanu*®.

Rychlost otáčení šneku

- Jde o obvodovou rychlost otáčení šneku.
- Při zpracování *Lexanu*® by neměla překročit rozsah hodnot 250-300 mm/s, tj. max. 18 m/min, což je hranice za kterou dochází k porušení vazeb molekul v termoplastech
- Pro nevyztužený *Lexan*® jsou doporučeny vyšší hodnoty z daného intervalu.

Materiálový polštář

- Vrstva materiálu plastu mezi čelem šneku a tryskou vstříkovací jednotky, chrání tyto dvě části proti opotřebení.
- Doporučená tloušťka vrstvy pro *Lexan*® je 3 až 10 mm. Bez této vrstvy materiálu by neměl dotlak žádný efekt.

Vstříkovací rychlost

- Udává se cm^3/s jako rychlost proudu taveniny vzhledem k otvoru v trysce. V podstatě jde o objemový tok taveniny v místě výstupního otvoru trysky vstříkovací jednotky.
- Při vstříkování *Lexanu*® by měla být co nejvyšší, z důvodu rychlé změny procesních podmínek, hlavně při použití vyztužené modifikace *Lexanu*®.
- Neodmyslitelné je adekvátní odzdušnění formy při vstříkování vysokou rychlostí.

Teplota formy

- Teplota, na kterou se forma vytemperuje před samotným vstříkováním taveniny plastu.
- *Lexan*® je nutné vždy zpracovávat v temperovaných formách (~100 °C), pro zabránění zborcení dílce a minimalizaci smrštění.
- Vysoká teplota formy je žádoucí pro dosažení optimálních tokových vlastností, minimálního smykového napětí v tavenině a optimálního vzhledu konečného dílce.
- Průběh teplot *Lexanu*® pro běžné použití ve formě a vstříkovací jednotce viz Obr 7.10.

7.8 Přerušování výroby a čištění vstříkovací komory [51]

Přerušování výroby: Obecně se nedoporučuje *Lexan*® uchovávat uvnitř vstříkovací komory např. přes noc nebo přes víkend. Pokud jsou však odstávky produkce nevyhnutelné, doporučují se následující opatření:

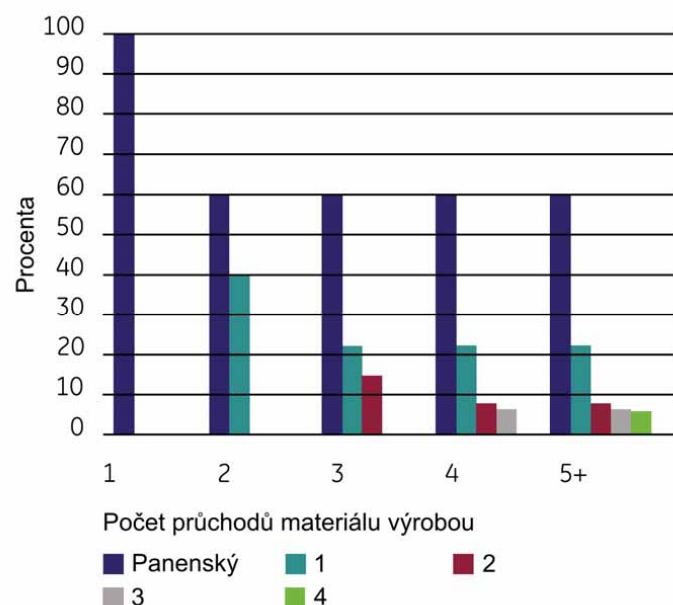
- Snížit teplotu vstříkovacího válce na 170 až 180 °C a nechat ohřívače v provozu
- Ujistit se, že teplota vstříkovacího válce neklesne pod 160 °C, jinak může dojít k přilnutí *Lexanu*® ke stěnám válce vstříkovací komory. To může dále vést k následnému oddělování kovových částic ze stěn válce a degradaci *Lexanu*® při chladnutí. Dále ke kontrakcím způsobeným vlivem poklesu teploty. Důsledkem toho mohou být černé skvrny na plastových dílcích vyrobených ihned poté, co se výroba znovu rozběhne.
- Při přerušování produkce se doporučuje vyčistit vstříkovací komoru

Čištění vstříkovací komory: Je vyžadováno při změně materiálu nebo dlouhodobém přerušování výroby. Nejlepší čistící materiál pro vyčištění komory vstříkovací jednotky od *Lexanu*®

je PMMA. Nedoporučuje se užití PA nebo ABS ihned po použití *Lexanu*®. Teplota vstřikovacího válce musí být nejprve snížena, což může vést k degradaci *Lexanu*®.

7.9 Recyklace Lexanu [49] [51]

Vtokové zbytky a špatné dílce mohou být rozemlety a tím znovu recyklovány s minimálním poklesem původních materiálových vlastností. Je však nutné dbát na to, aby byl recyklát zbaven nečistot, nebo nedošlo k jeho kontaminaci a stejně jako při použití původního materiálu také správně předvysušen.



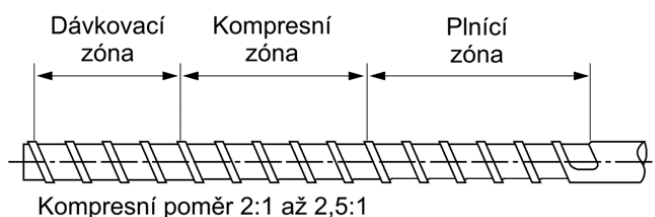
Recyklovaný *Lexan*® se s tzv. panenským, tj. prvně používaným *Lexanem*® mísí před dalším vstřikováním v poměru 20:80. Při tomto poměru se prvotní recyklát z výroby úplně vyfiltruje po zhruba 10 cyklech znovu namíchání a využívání panenského materiálu s recyklátem. Pro ilustraci je na Obr. 7.11 znázorněn scénář vývoje materiálu s recyklátem při poměru 40:60. Lze použít také směs s vyšším poměrem recyklátu *Lexanu*®, neměla by však být použita pro rázově namáhané dílce, ale pouze pro méně náročné aplikace.

Recyklovaný *Lexan*® se s tzv. panenským, tj. prvně používaným *Lexanem*® mísí před dalším vstřikováním v poměru 20:80. Při tomto poměru se prvotní recyklát z výroby úplně vyfiltruje po zhruba 10 cyklech znovu namíchání a využívání panenského materiálu s recyklátem. Pro ilustraci je na Obr. 7.11 znázorněn scénář vývoje materiálu s recyklátem při poměru 40:60. Lze použít také směs s vyšším poměrem recyklátu *Lexanu*®, neměla by však být použita pro rázově namáhané dílce, ale pouze pro méně náročné aplikace.

Obr. 7.11 Vývoj materiálu při užití 40% recyklátu [48]

7.10 Vybavení vstřikovacího stroje [49] [51]

Pro vytvoření homogenní taveniny *Lexanu*® se doporučuje použít třípásmové šneky s poměrem L/D 20:1 až 25:1 a kompresním poměrem 2:1 až 2,5:1 (viz Obr. 7.12). Konvenční konstrukční materiály šneku a válce vstřikovací komory jsou dostatečné pro zpracování *Lexanu*®. Především pro *Lexan*® vyztužený skleněnými vlákny jsou preferovány šneky a válce bimetalového typu s vysokou abrazní odolností a odolností proti korozi.



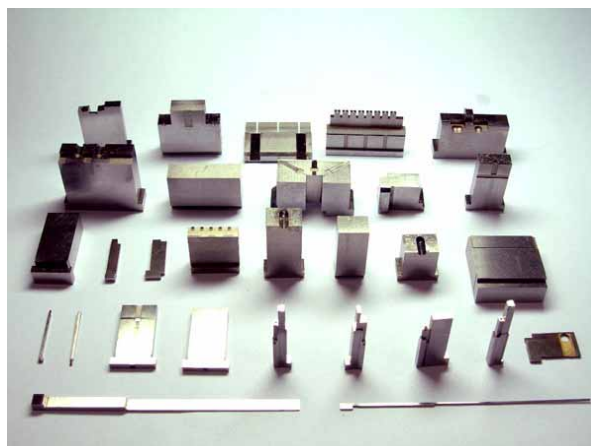
Obr. 7.12 Šnek plastikační jednotky vhodný pro amorfní plasty [49]

Doporučuje se použití typu trysky vstřikovací jednotky pro volný jednosměrný průtok taveniny s vlastním samostatně ovládaným ohřivačem. Otvor trysky se doporučuje co největší možný.

8 KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY [13] [45] [61]

Konstrukce vstřikovacích forem je důležitá z hlediska výkonu formy při produkci plastových dílců. Pokud jsou desky formy při své funkci příliš namáhány, může dojít k jejich elastické deformaci anebo dokonce k porušení. Přílišný průhyb desek formy může vést až k tzv. flashingu, tj. průniku taveniny plastu do dělicí roviny, dále k problémům s kontrolou rozměrů nebo špatné kvalitě povrchu plastových dílců. Tomu lze předejít pouze volbou dostatečné šířky desek. Příliš malé tloušťky vložek (Obr. 8.1) tvarové dutiny vyžadují větší opatrnost při tepelném zpracování, kde hrozí jejich zkroucení.

Při konstrukci formy s horkou vtokovou soustavou je velice důležitá optimální tepelná izolace vstřikovací formy, z důvodu vysokého teplotního gradientu mezi rozváděcím blokem horké vtokové soustavy a okolními deskami formy. Zvolený typ horké vtokové soustavy a případně druh horkých trysek má zásadní vliv na konstrukci vstřikovací formy.



Obr. 8.1 Příklady vložek tvarové dutiny formy [45]

Vysoký teplotní gradient při produkci je zapříčiněn vysokým rozdílem teplot mezi součástmi horké vtokové soustavy a deskami vstřikovací formy. Tento rozdíl teploty vede k vyšší teplotní roztažnosti součástí horké vtokové soustavy, která musí být konstrukcí formy umožněna. Pokud deformace vlivem teplotní roztažnosti umožněna není, může dojít k porušení horké vtokové soustavy a tečení taveniny plastu z porušených míst při funkci vstřikovací formy.

8.1 Předběžný návrh vstřikovací formy [13]

Návrh vstřikovací formy obvykle vychází z virtuálního 3D modelu plastového dílce, případně 2D výkresu. Pokud není 3D model od návrháře plastového dílce poskytnut, vytvoří se podle daného 2D výkresu. Tento 3D model reprezentuje tvar a požadované rozměry plastového dílce 24 hodin po procesu vstřikování.

Náležitosti předběžného návrhu formy jsou následující:

- Velikost formátu desek, tloušťka desek a zdvih vyhazovačů
- Rozmístění a počet tvarových dutin a velikost jejich bloků
- Umístění, druh a rozměry temperačních kanálků
- Rozložení vtokové soustavy, typ a počet vtokových ústí
- Pozice a počet rozpěrných sloupků/desek
- Velikost a poloha vyhazovacích kolíků
- Návrh dělicí roviny
- Zdvih desek formy a pozice vodících elementů
- Požadavky na automatizaci
- Posouzení vhodnosti použití horké vtokové soustavy

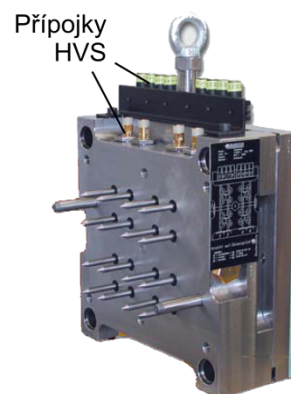
Pro volbu vhodného typu vstřikovacího stroje a volbu všech ostatních periférií potřebných pro vstřikování do formy s *horkou vtokovou soustavou* je důležité nejprve zvolit rozměry desek formy. Již ve fázi návrhu je nutné uvažovat velikost a rozložení horké vtokové soustavy v horké polovině vstřikovací formy.

8.2 Detailní konstrukce vstřikovací formy [12] [13] [20] [26] [43] [54] [55] [61]

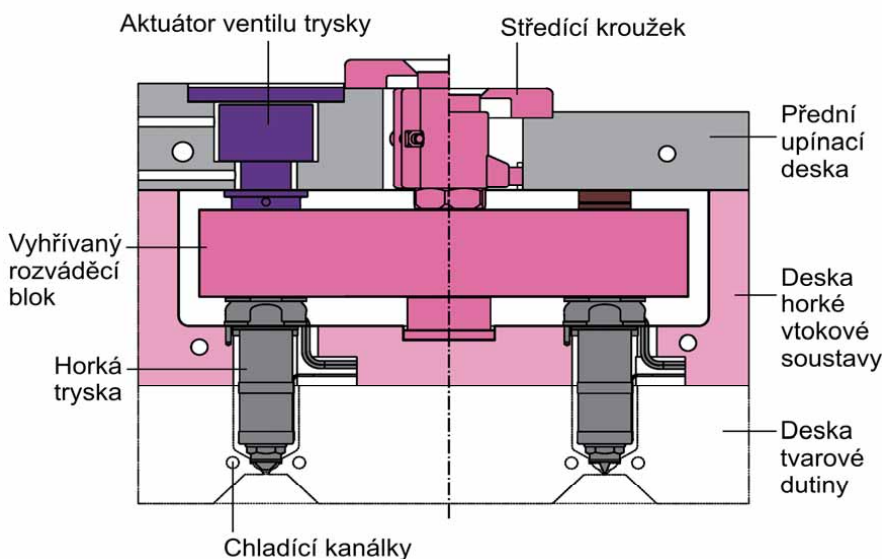
Zde jsou uvažovány již i technologické vlivy při požadavcích všech výše zmíněných systémů formy dohromady (rozmístění a velikosti desek, vtoková soustava, temperační soustava, vyhadzovací systém, kvalita povrchu tvarové dutiny a odzdušnění formy).

Základními náležitostmi detailní konstrukce formy jsou:

- Specifikace typu desek a upínání formy vzhledem ke vstřikovacímu stroji.
- Pro optimalizaci ceny údržby formy se části tvarové dutiny formy vyrábějí z bloků a vložek z nástrojových ocelí, zatímco samotné rozměrné desky z konstrukčních ocelí.
- Ve vícenásobných formách tvarové dutiny vhodně rozmístěny pro správné vyvážení vtokové soustavy o co nejkratší délce.
- Volit vhodné typy ocelových a jiných materiálů vzhledem k funkci, způsobu obrábění, rozměrové stabilitě, předepisovaným tolerancím, opotřebení, tuhosti a pevnosti.
- Komponenty formy jako např. hlavní vtokový kanál, jádra, vložky a bloky tvarových dutin pokud možno tzv. kódovat tak, aby se při montáži formy nedaly otočit nebo mezi sebou zaměnit.



Obr. 8.2 Elektrické přípojky na horké polovině formy [20]



Obr. 8.3 Rozdíl v konstrukci horké poloviny formy při použití ventilových horkých trysek [43]

- Montáž a demontáž formy co nejsnazší. Jednotlivé komponenty si nesmí navzájem překážet.

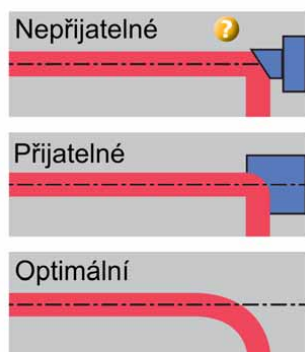
- Vložky tvarové dutiny dostatečně široké s hladkými rádiusovými přechody na hranách, pro zvýšení jejich únavové životnosti.

- Vyhazovače by měly mít pouze dostatečnou délku tak, aby plastový dílec z formy volně vypadl. Příliš

dlouhé pohyby vyhadzovacího systému zapříčiňují nárůst délky doby vstřikovacího cyklu.

Navíc u dlouhých vyhadzovačů s malou plochou příčného průřezu hrozí pod působením vstřikovacího tlaku v dutině formy vznik příliš vysokého napětí při namáhání na vzpěr.

- Náležité odvodušnění tak, aby nedocházelo ke korozi ocelových částí tvarové dutiny formy, nevyrábět odvodušňovací drážky příliš velké, aby nedocházelo k tzv. flashingu. Šířka odvodušňovacích drážek závisí na viskozitě taveniny plastu. V případě tvarové složitých plastových dílců se odvodušnění zavádí až po odzkoušení formy.
- Vytvoření správných rozměrů děr pro uložení horké vtokové soustavy v horké polovině formy, drážek pro kabeláž a zvolit polohy pro umístění přípojek pro zařízení potřebné k funkci horké vtokové soustavy (Obr. 8.2), v případě použití vnitřně nebo externě vytápěné horké vtokové soustavy.
- Volba typu trysek externě vyhřívané horké vtokové soustavy má výrazný vliv na konstrukci desek vstřikovací formy (viz Obr. 8.3).



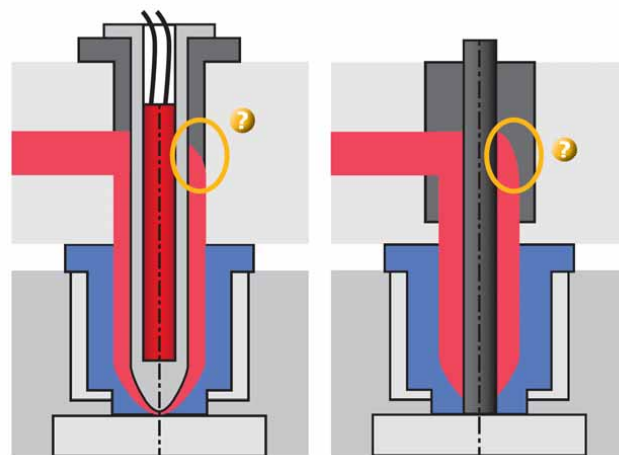
Obr. 8.4 Různé tvary rozváděcích kanálků ve vyhřívaném bloku horké vtokové soustavy [12]

Normálie horkých vtokových soustav: Speciálně v případě vstřikovací formy s horkou vtokovou soustavou je velmi vhodné zvážit použití již navržené a odzkoušené konstrukce horkého vtokového systému přímo konkrétní firmou, která se těmito komplexními systémy zabývá.

Horká vtoková soustava se při zahřátí deformuje v jiném poměru než přiléhající ocelové desky. S uvažováním tepelné izolace a šíření tepla v horké vtokové soustavě a do okolí, lze bez experimentů, i při znalosti geometrie a druhu použitých materiálů, jen těžko posoudit chování těchto systémů při deformaci vlivem tepla. Z důvodu zajištění dostatečné tepelné vodivosti jsou preferovány materiály mědi a jejich slitin. Všechny funkční povrchy by měly mít ochranný povlak z důvodu ochrany proti možným chemickým reakcím s taveninou plastu. Tyto mohou vést až k poškození horké vtokové soustavy.

Při špatném návrhu horké vtokové soustavy hrozí při její následné funkci porušení vlivem teplotní roztažnosti. Proto je vhodné použít již navržený systém od firmy, která má tyto systémy již experimentálně ověřeny, a koeficienty teplotní roztažnosti soustavy při daných podmínkách přesně stanoveny. Návrh horké vtokové soustavy sebou nese i potřebu dostatečného vybalancování vtoků a problémy s tzv. stagnačními zónami místy (viz Obr. 8.4 a Obr 8.5).

Pro *Lexan*® se nedoporučují používat vnitřní topná tělesa právě z důvodu výskytu oblastí s nulovou rychlostí toku taveniny a vysokého poklesu tlaku daného velikostí těchto systémů. Může tím dojít k prodloužení doby průchodu taveniny horkým vtokovým systémem a případné degradaci materiálu. Dále k výskytům tlakových špiček, nezaplnění tvarové dutiny formy nebo tvorby zmetků vlivem poklesu mechanických vlastností materiálu.



Obr. 8.5 Stagnační zóny v horké vtokové soustavě při užití vnitřního topného tělesa (vlevo) a při užití externě vyhřívané ventilové trysky (vpravo) [12]

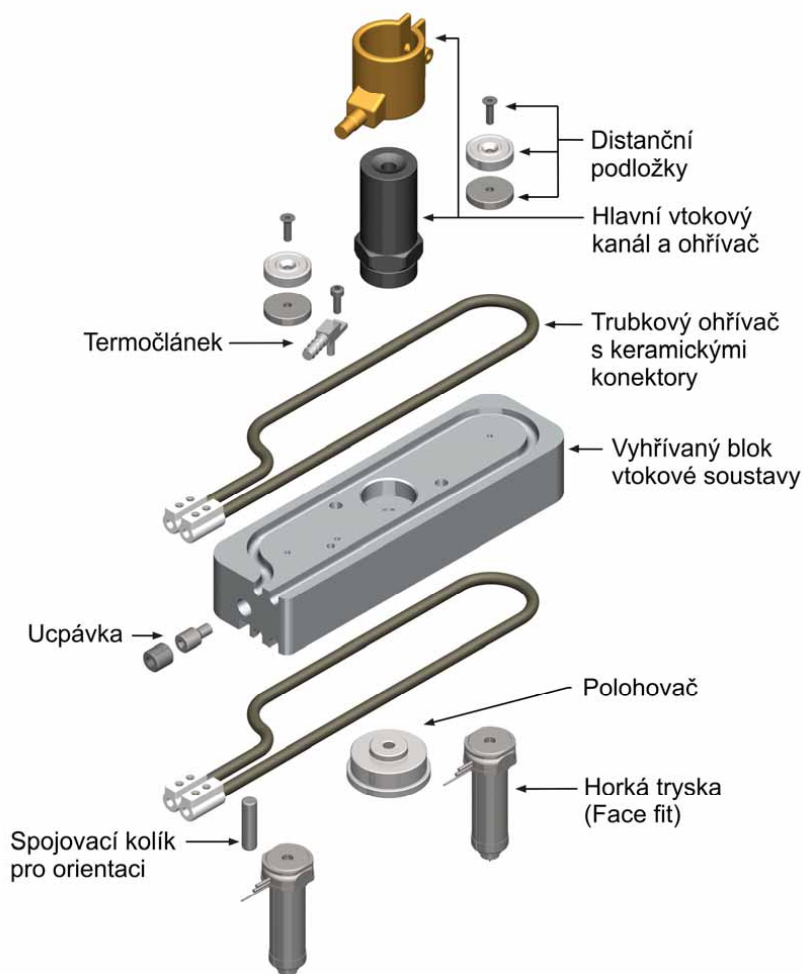
Při použití externě vyhříváné horké vtokové soustavy pro zpracování *Lexanu*® se nedoporučuje použití většího průměru vrtání horkých trysek než 12 mm. V závislosti na typu trysky se ve vtokovém ústí vrtání zužuje. Pokud je potřeba vstříkovat velký objem taveniny, se namísto volby větších rozměrů horkých trysek, doporučuje použít vícebodové vstříkování s individuálně ovládanými ohříváči jednotlivých horkých trysek. Příklad sestavy horké vtokové soustavy na Obr. 8.6.

Hlavní důvody pro použití největších možných průměrů rozváděcích kanálků jsou:

- Malá ztráta tlaku
- Nízké hodnoty smykových rychlostí

Naproti tomu hlavní důvod použití nejmenších možných průměrů rozváděcích kanálků je:

- Krátký čas pobytu taveniny v horké vtokové soustavě



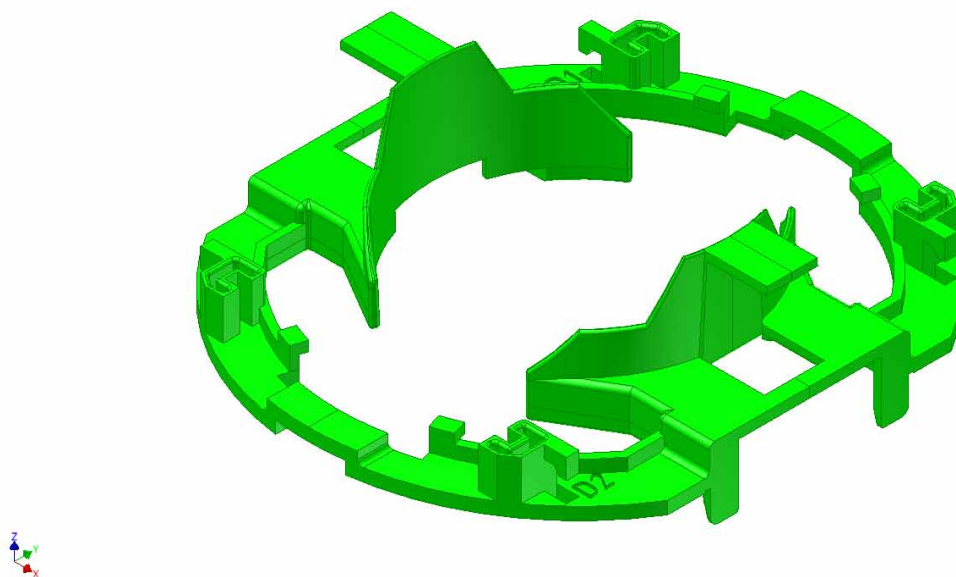
Obr. 8.6 Rozložený pohled a popis sestavení horké vtokové soustavy [43]

Normálie desek a vodících elementů vstříkovacích forem: Před samotným výpočtem vstříkovacích parametrů a volbou typu a velikosti vstříkovacího stroje, dále výpočtu a volby tloušťek jednotlivých desek formy, je vhodné zvolit formát velikosti desek podle některého z prodejců normálií pro formy. Podle velikosti formátu desek se odvíjí následná volba vstříkovacího stroje a pevnostní výpočet.

Firmy, jako např. *HASCO*, dodávají desky podle požadavků již obroušené a s výrobními otvory pro upevňovací a vodící elementy, případně drážkami pro upínací elementy pro některé typy vstříkovacích strojů.

Pro samotnou konstrukci formy s horkou vtokovou soustavou je důležité poskytovat dostatečnou tuhost při dostatečné tepelné izolaci a rovnoměrné teplotě tvarové dutiny formy. Je nutné zavést temperační kanálky také v blízkosti vtokových ústí. Navíc konstrukce musí umožnit dilataci součástí horké vtokové soustavy.

8.3 Konstrukční návrh vstřikovací formy pro zadaný dílec [6]



Obr. 8.7 Virtuální 3D model plastového dílce pro návrh vstřikovací formy

Vycházíme z 3D virtuálního modelu (viz Obr. 8.7) vymodelovaného před začátkem psaní diplomové práce v CAD softwaru *Autodesk Inventor Professional 2011 Student Version* (dále jen *Inventor*). Tento 3D model je pouze hrubý výstup z měření zadané součásti bez technologických úkosů a s mnoha ostrými hranami a rohy. To je pro technologii vstřikování nepříjemné, pro samotný prvotní návrh to však stačí.

Psaní diplomové práce předcházela také volba CAD softwaru pro tvorbu 3D modelů a výkresové dokumentace. Výsledek výběru viz níže.

Cílem návrhu formy je:

- Volba dělicí roviny
- Rozdělení a rozmístění tvarových dutin, bez uvažování chladících kanálků temperanční soustavy
- Volba velikosti a umístění horké vtokové soustavy
- Odhad velikosti formátu desek formy

8.3.1 Volba CAD softwaru pro návrh a tvorbu vstřikovací formy [6] [15] [30]

Studentská verze *Inventoru* má v sobě obsaženy nástroje pro usnadnění tvorby vstřikovacích forem z výchozího 3D modelu plastového dílce. Co se týče editace vytvořeného návrhu formy a dopracování do konečné podoby je však *Inventor* nevyhovující. Konkrétně z důvodu předpokládané změny referenčního 3D modelu plastového dílce.

Inventor je parametrický CAD software s omezenou možností změny výchozích referencí při tvorbě modelů. V případě vstřikovací formy jde ve výsledku o komplexní virtuální sestavu, kde jakákoliv změna v referenčním 3D modelu může vyústit v kolaps celé této sestavy. S nejvyšší pravděpodobností by tedy bylo nutné začít s modelováním vstřikovací formy po

změně referenčního 3D modelu znovu. Proto od použití *Inventoru* při návrhu formy ustupujeme.

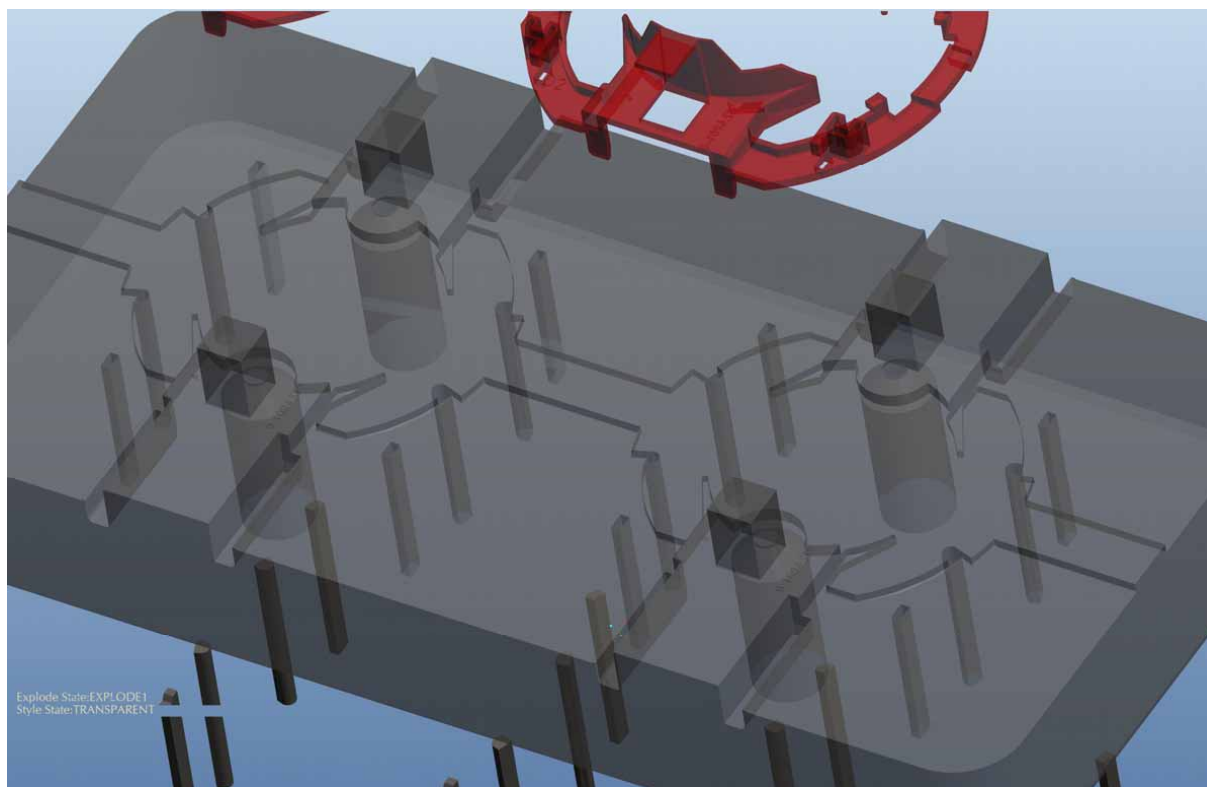
Ve studentské verzi *Inventoru* je však možno provést odhad vstřikovacích parametrů a simulaci plnění tvarové dutiny, kteréžto v diplomové práci dále využijeme. V kapitole 7.1 byl simulační modul *Inventoru* využit k odhadu umístění vtokových ústí (viz Obr. 7.2), na základě kterého je dále proveden návrh vstřikovací formy s horkou vtokovou soustavou.

Pro tvorbu návrhu vstřikovací formy použijeme profesionálnější CAD software a to *Pro/Engineer Wildfire 5.0 Schools Edition* (dále jen *Pro/E*). Školní verze *Pro/E* však neobsahuje modul pro tvorbu vstřikovacích forem, negeneruje tedy tvarovou dutinu ani desky formy automaticky. Je nutné vše vymodelovat tzv. ručně. 3D modely samotných holých desek a jiných normalizovaných součástí z katalogů, však lze nechat vygenerovat například pomocí softwaru *HASCO Digital Lite R1/2011* (dále jen *HascoDigital*). Ukázky uživatelských prostředí jednotlivých programů lze nalézt v Příloze 6.

Samotný návrh v *Pro/E* je použitelný a lze s ním dále pracovat. To mimochodem platí i v případě použití komerční verze *Pro/E*, kde nadstavba pro tvorbu vstřikovacích forem, konkrétně nazývaná *Pro/MOLD*, obsažená je.

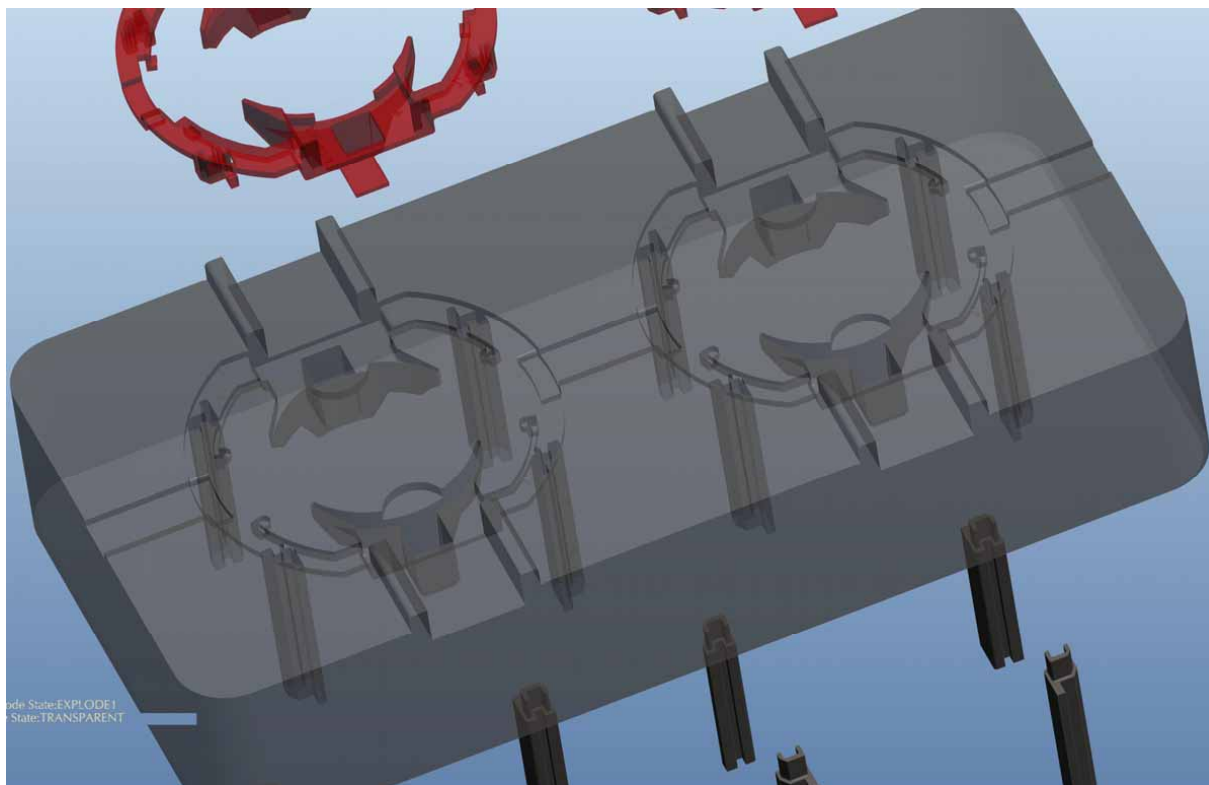
8.3.2 Volba dělicí roviny a rozdělení tvarových dutin

Zadaný plastový dílec obsahuje relativně složitý otvor. Je nutné volit kromě vnější dělicí roviny také vnitřní dělicí rovinu. To lze provést několika způsoby. Při návrhu vnitřní dělicí roviny uvažujeme polohu otvorů pro horké trysky (viz Obr. 8.8) dle poloh vtokových ústí navrhovaných při popisu dílce v kapitole 7.1.



Obr. 8.8 Návrh horního bloku tvarové dutiny

Tvar dělicí roviny je ovlivněn také tvarem vložek tvarové dutiny. Zavádíme je pro možnost snazší a levnější výroby tvarové dutiny. V návrhu chybí kanálky temperační soustavy, které případně ovlivní dělení horního a dolního bloku tvarové dutiny na vložky.



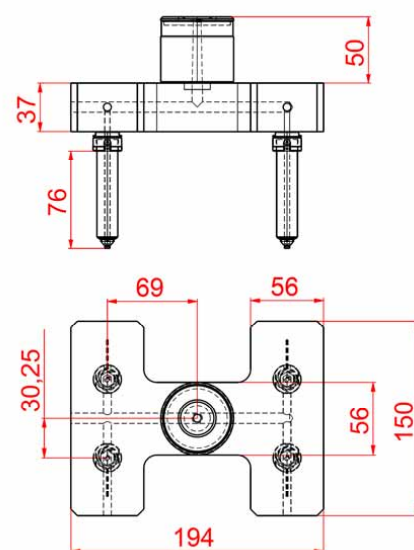
Obr. 8.9 Návrh spodního bloku tvarové dutiny

Forma je dvojnásobná, byl navrhnut horní i spodní blok tvarové dutiny jako dva celistvé kusy společné pro obě tvarové dutiny (Obr. 8.8 a 8.9).

8.3.3 Volba velikosti a umístění horké vtokové soustavy [54] [55] [57] [61]

Horkou vtokovou soustavu uvažujeme jako nakupovanou sestavu od firmy *Synventive molding solutions s.r.o* (dále jen *Synventive*). Zde lze, při specifikaci rozměrů poloh trysek vůči hlavnímu vtokovému kanálu, externě vyhřívanou horkou vtokovou soustavu zakoupit. Je nutné specifikovat také typy horkých trysek dle katalogu firmy *Synventive* a typ plastu, tedy PC.

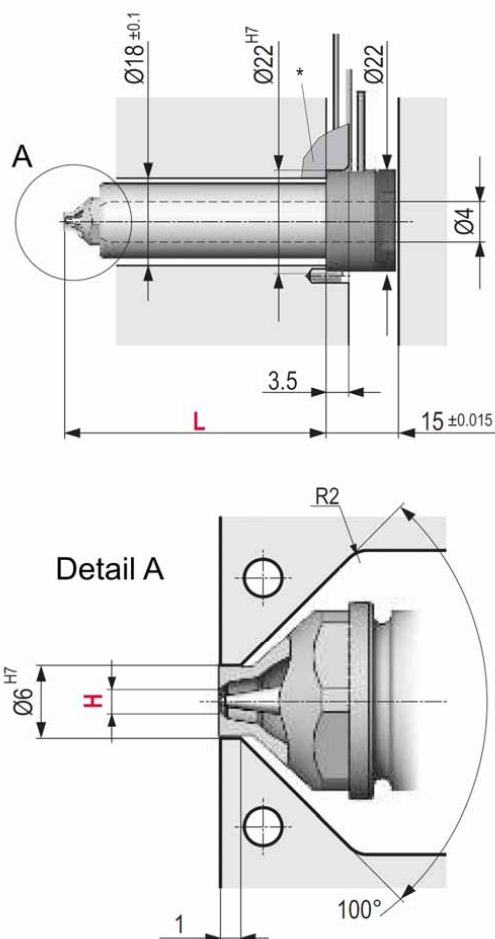
Firma *Synventive* na svých webových stránkách neposkytuje dostatek informací o přesných rozměrech jednotlivých komponent horkých vtokových soustav. Poskytuje pouze přesné informace o velikosti otvorů v ocelových deskách vstřikovací formy, které jsou požadovány pro montáž horké vtokové soustavy do formy. Dále jsou požadovány tvrdosti jednotlivých funkčních částí těchto otvorů v okolí hodnot 51 HRC.



Obr. 8.10 Skica horké vtokové soustavy

Horké trysky rozmístíme podle zvolených míst vtokových ústí a poloh rozmístění tvarových dutin. Polohy trysek vůči hlavnímu vtokovému kanálku jsou dány dle Obr. 8.10. Tato skica může sloužit jako hlavní část specifikace pro firmu *Synventive* při objednání horké vtokové soustavy. Rozměry uvedené na skice platí pro zahřátou vtokovou soustavu na svou funkční teplotu.

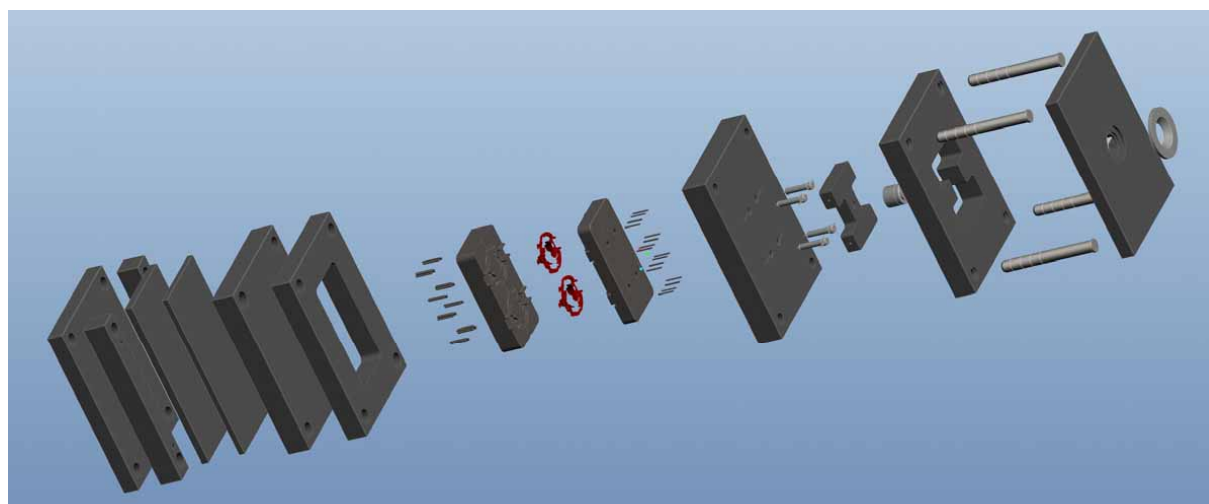
Zvolený typ horkých trysek, na základě vstřikované dávky 8 gramů na jednu trysku a druhu materiálu PC, dle katalogu *Synventive* [54] a [57] nese označení *API 04 C01 Y10T* (rozměry na Obr. 8.11). Jde o trysky s torpédovým vtokovým ústím a s tzv. face fit. Tyto trysky dosedají svým čelem k horkému rozváděcímu bloku a nejsou k němu připevněny žádným spojovacím elementem, čímž je umožněn vzájemný pohyb při teplotní dilataci horké vtokové soustavy. Délka trysky v zahřátém stavu je zvolená 76 mm, tj. rozměr kóty *L* na Obr. 8.11. Průměr vtokového ústí, tedy rozměr *H* na Obr. 8.11 byl dle katalogu zvolen 1,8 mm.



Obr. 8.11 Schéma zvoleného typu externě vytápěné horké trysky [57]

8.3.4 Volba velikosti desek vstřikovací formy [22]

Byl zvolen základní formát desek dle katalogů firmy *HASCO* s rozměry 346x496 mm. Tloušťky desek voleny odhadem s ohledem na rozměry tvarových dutin a rozměry horké vtokové soustavy.



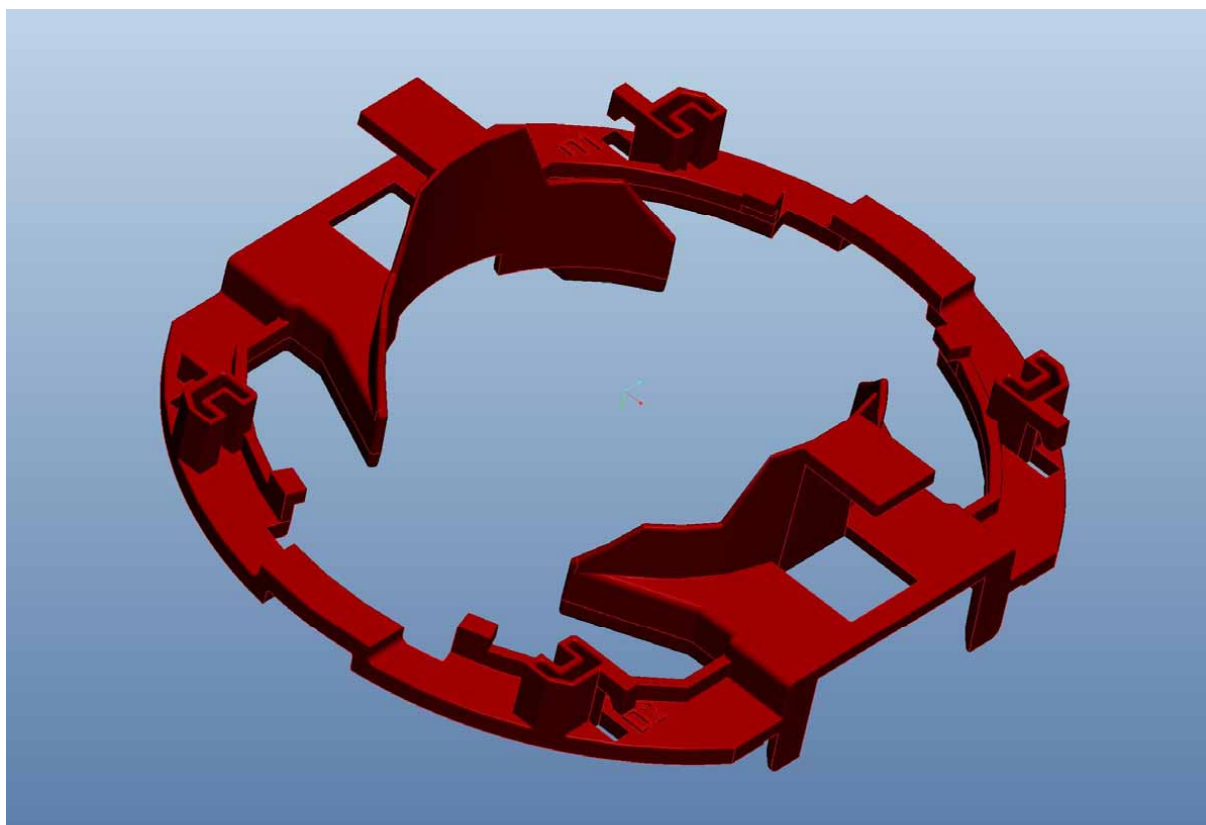
Obr. 8.12 Návrh vstřikovací formy, rozložený 3D pohled

Řešení případných upínacích drážek následuje až po volbě vstřikovacího stroje. Rozložený pohled na návrh formy lze vidět na Obr. 8.12.

Kromě spojovacích prvků atd., chybí v návrhu vodící pouzdra. Jsou zde pouze otvory v deskách.

8.4 Úprava referenčního 3D modelu plastového dílce

Pro další analýzu, technologické výpočty a samotnou konstrukci formy byl vstupní 3D model plastového dílce jen kosmeticky předělán do tvaru vhodnějšího pro technologii vstřikování (viz Obr. 8.13).



Obr. 8.13 Upravený 3D model plastového dílce s úkosy a zaoblenými hranami

Provedené změny jsou:

- Zaoblení ostrých hran s poloměrem $0,2 \text{ mm}$. Hrany navazující na dělicí rovinu ponechány ostré.
- Přidání úkosů $0,5^\circ$, 1° a 2° na většině vnitřních ploch kolmých na dělicí rovinu. Stěny na vnějším obvodu dílce ponechány kolmé.

Na základě uvedených změn je dále vypočítán objem plastového dílce a další technologické parametry pro vstřikování

8.5 Technologické výpočty vstřikovacích parametrů [37] [51]

Protože je zadaný plastový dílec tvarově složitý, byla pro porovnání s ručním výpočtem použita simulace plnění jedné tvarové dutiny v programu *Inventor*. Knihovna materiálů uvnitř *Inventoru* nezahrnuje modifikaci *Lexanu 945A*, proto byla pro porovnání zvolena modifikace

Lexan 940. Tato má nižší viskozitu, proto vychází hodnoty všech parametrů ve výstupním protokolu z Inventoru nižší (viz Příloha 7). Volby všech součinitelů při výpočtu dle tabulek v příloze 8.

1) Výpočet objemu V [cm^3] plastového dílce z *Inventoru*

$$V = 14,86 \text{ cm}^3$$

2) Výpočet hmotnosti m_d [g] plastového dílce

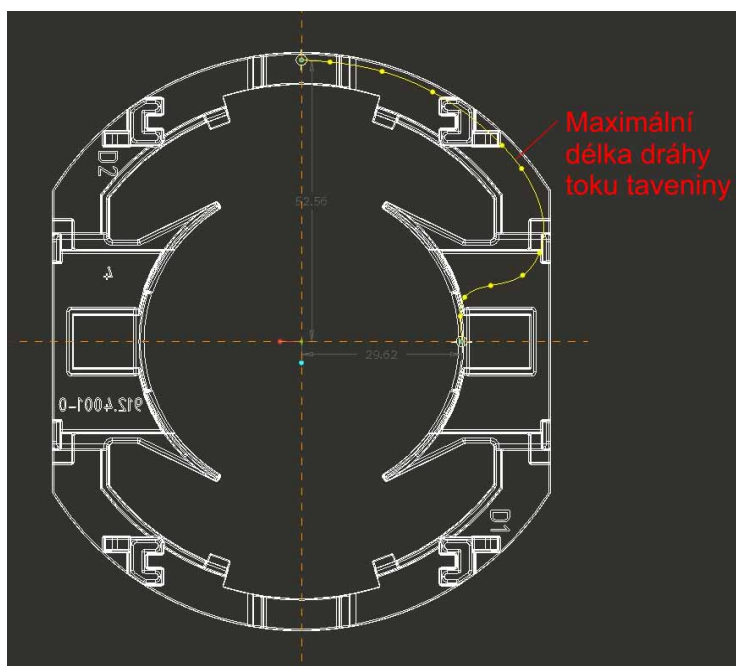
$$m_d = \rho \cdot V = 1,2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 14,86 \text{ cm}^3 = 17,83 \text{ g}$$

kde ρ ... je hustota Lexanu 945A [g/cm^3]

3) Kontrola délky dráhy toku taveniny f_c [mm]

$$f_c = 88 \text{ mm}$$

Odhad délky dle skici křivky na Obr. 8.14. Uvažujeme pouze tokové dráhy uvnitř dutiny dílce, ne dráhy ve vtokové soustavě kde z důvodu užití horké vtokové soustavy tavenina netuhne.



Obr. 8.14 Maximální dráha toku taveniny vyznačená žlutou křivkou

4) Výpočet velikosti dávky (vstříkovaného objemu) taveniny V_D [cm^3]

$$V_D = \frac{n \cdot m_d}{K_a} = \frac{2 \cdot 17,83 \text{ g}}{1,03 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 34,63 \text{ cm}^3$$

kde K_a ... je faktor navýšení objemu taveniny Lexanu [g/cm^3]
 n ... násobnost vstřikovací formy [-]

5) Výpočet minimálního plnicího (vstřikovacího) tlaku p_f [bar]

$$p_f = 3 \cdot K_f \cdot f_c \cdot s^{-1,6} = 3 \cdot 5,2 \cdot 88 \cdot 2,5^{-1,6} = 316,89 \text{ bar}$$

kde K_f ... je faktor schopnosti tečení Lexanu [bar/mm]
 s ... tloušťka plastového dílce [mm]

6) Stanovení doporučeného (obvyklého) vstřikovacího tlaku p_v [bar] z tabulky hodnot tlaků pro vybrané materiály. Musí být splněna podmínka $p_v > p_f$

Byl zvolen tlak $p_v = 400 \text{ bar}$

7) Výpočet plochy průmětu jedné tvarové dutiny A_{proj} [cm^2] do dělicí roviny

Dle výpočtu z Inventoru $A_{proj} = 36,27 \text{ cm}^2$

8) Výpočet uzavírací (přidržovací) síly F_u [kN]

$$F_u = n \cdot A_{proj} \cdot \frac{p_A + 100}{100} = 2 \cdot 36,27 \cdot \frac{400 \text{ bar} + 100}{100} = 362,7 \text{ kN}$$

9) Určení optimálního průměru šneku D_s [mm] vstřikovacího stroje

$$7,5 \cdot \sqrt[3]{V_D} < D_s < 10,5 \cdot \sqrt[3]{V_D}$$

$$7,5 \cdot \sqrt[3]{34,63} < D_s < 10,5 \cdot \sqrt[3]{34,63}$$

$$24,45 < D_s < 34,23$$

Průměr šneku volíme z řady průměrů: 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90 mm.
 Byl zvolen průměr šneku $D_s = 35 \text{ mm}$

10) Stanovení délky dráhy pohybu šneku L_S [mm] pro vstřikování dávky V_D [cm^3]

$$V_D = \frac{\pi \cdot D_s^2}{4 \cdot 10^3} \cdot L_S \Rightarrow L_S = 1273 \cdot \frac{V_D}{D_s^2} = 1273 \cdot \frac{34,63 \text{ cm}^3}{30^2 \text{ mm}^2} = 35,99 \text{ mm}$$

Současně musí být splněna podmínka

$$D_s < L_S < 3 \cdot D_s$$

$$35 < 35,99 < 105$$

Zároveň se při zpracování Lexanu doporučuje poměr $L_S/D_S < 1,5$

$$\frac{L_S}{D_S} = \frac{35,99 \text{ mm}}{35 \text{ mm}} = 1,03 < 1,5$$

11) Určení otáček šneku n_S [min^{-1}] vstřikovacího stroje při plastikaci dle vzorce z maximální obvodové rychlosti šneku v_S [m/s]

$$n_S = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot v_S}{\pi \cdot D_S} = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot 0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\pi \cdot 35 \text{ mm}} = 163,7 \text{ min}^{-1}$$

12) Výpočet doby chlazení t_{ch} [s]

$$t_{ch} = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot a_{eff}} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_m - T_{fy}}{T_e - T_{fy}} \right)$$

$$t_{ch} = \frac{2,5^2 \text{ mm}^2}{\pi^2 \cdot 0,112 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{290 \text{ }^\circ\text{C} - 100 \text{ }^\circ\text{C}}{120 \text{ }^\circ\text{C} - 100 \text{ }^\circ\text{C}} \right) = 11,54 \text{ s}$$

kde a_{eff} ... je měrná teplotní vodivost Lexanu [mm^2/s]
 T_m ... teplota taveniny Lexanu 945A [$^\circ\text{C}$]
 T_{fy} ... teplota vytemperované vstřikovací formy [$^\circ\text{C}$]
 T_e ... teplota vyhazování plastových dílců z formy [$^\circ\text{C}$]

Hodnoty a_{eff} , T_m , T_f , T_e z tabulky materiálových hodnot vybraných technických plastů.

13) Výpočet doby vstřikování (plnění dutiny formy) t_v [s]

$$t_v = 0,04 \cdot V^{0,834} \cdot \log \left(\frac{\eta}{10} \right) = 0,04 \cdot 14,86^{0,834} \cdot \log \left(\frac{600}{10} \right) = 0,68 \text{ s}$$

Doba vstřikování t_v [s] se stanoví na základě velikosti dávky V_D [cm^3] a viskozity materiálu η [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]. Dynamická viskozita odhadnuta z Obr. 8 v příloze 5.

14) Ověření délky dráhy toku taveniny f_c [mm]

Na základě grafu na Obr. 7.5 při hodnotě vstřikovacího tlaku $p_v = 40 \text{ MPa}$, tloušťky stěny dílce $s = 2,5 \text{ mm}$ a doby plnění tvarové dutiny $t_v = 0,68 \text{ s}$ **uvažovaná délka dráhy toku taveniny** Lexanu $f_c = 88 \text{ mm}$ **vyhovuje s velkou rezervou**. Tavenina Lexanu tedy při vypočítaných technologických podmínkách vyplní objem tvarových dutin.

15) Výpočet doby vstřikovacího cyklu t_c [s]

$$t_c = t_v + t_{ch} + t_n = 0,68 \text{ s} + 11,54 \text{ s} + 3 \div 4 \text{ s} = 16 \text{ s}$$

Vedlejší čas t_n [s] se volí v rozmezí 3 až 4 s.

16) Výpočet vstřikovací rychlosti v_v [cm^3/s]

$$v_v = \frac{V_D}{t_v} = \frac{40,43 \text{ cm}^3}{0,68 \text{ s}} = 51,28 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

17) Výpočet průchodu materiálu (taveniny) \dot{G} [kg/hod] ze stroje do formy

$$\dot{G} = \frac{3,6 \cdot V_D \cdot \rho}{t_c} = \frac{3,6 \cdot 34,63 \text{ cm}^3 \cdot 1,2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{16 \text{ s}} = 9,35 \frac{\text{kg}}{\text{hod}}$$

18) Výpočet tepla Q [kJ/hod] vneseného taveninou plastu do formy

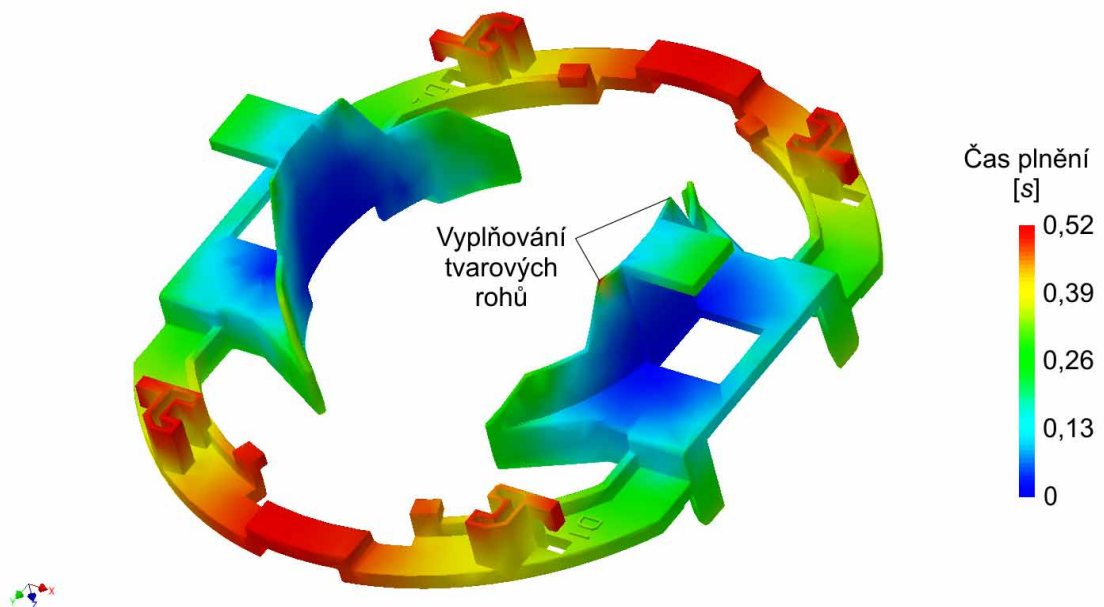
$$Q = \dot{G} \cdot \Delta h = 9,35 \frac{\text{kg}}{\text{hod}} \cdot 350 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 3272,54 \frac{\text{kJ}}{\text{hod}}$$

kde Δh ... je rozdíl entalpií použitého plastu mezi teplotami T_m a T_e [kJ/kg]

8.6 Simulace plnění tvarové dutiny formy

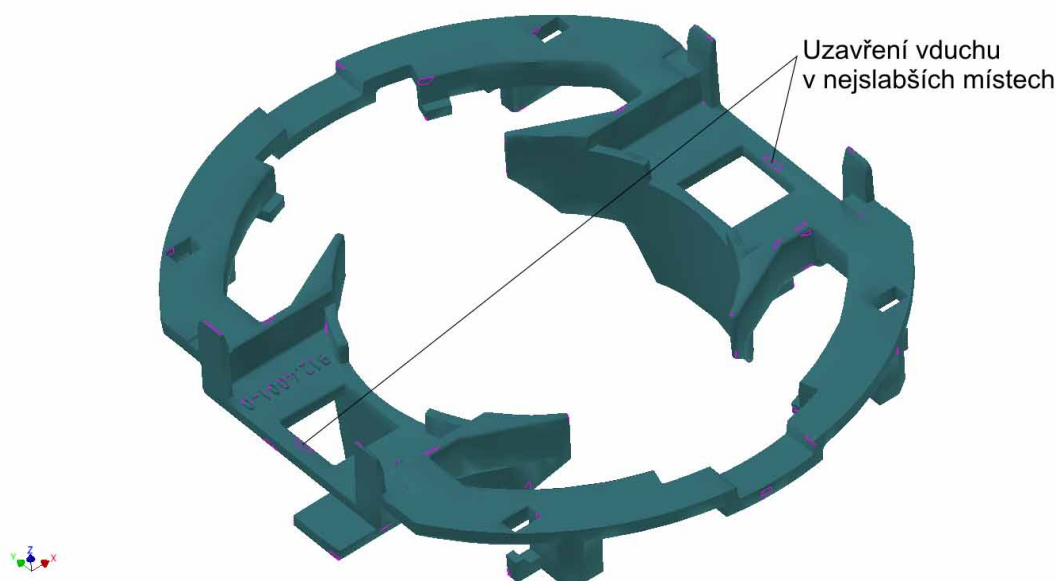
Program *Inventor* umožňuje rámcovou simulaci fáze plnění tvarové dutiny. Konkrétně vyhodnocení času zaplnění jednotlivých míst tvarové dutiny, poloh uzavřeného vzduchu hromadícího se před čelem toku taveniny, poloh studených spojů a předpověď kvality plastového dílce v jednotlivých místech. Neurčuje rozložení teplot, tlaků, zborcení dílce ani orientaci vláken nebo molekul. Při simulaci není uvažována horká vtoková soustava, pouze tvar plastového dílce a ústí vtoku ve tvaru bodů.

Simulace fáze plnění byla provedena pro modifikaci Lexanu 940, která má nižší viskozitu než zvolený materiál Lexan 945A, je tedy nutné brát jakoukoliv sebemenší vadu zjištěnou touto simulací jako závažnou. Volba umístění vtokových ústí je stejná jako v návrhu vstřiko-



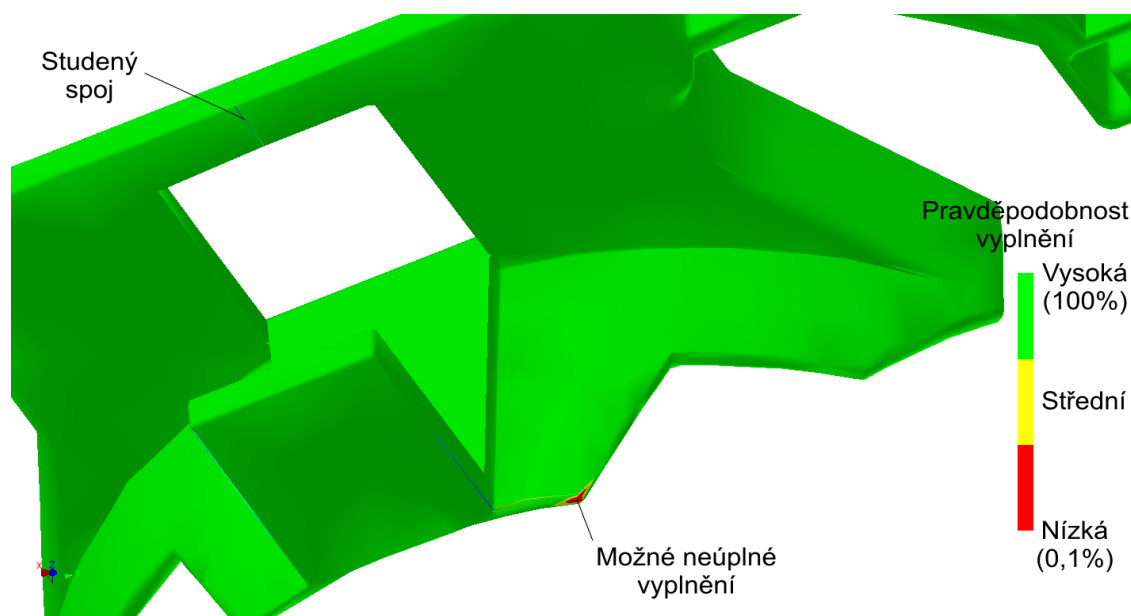
Obr. 8.15 Čas plnění

vací formy, tedy dle Obr. 7.2. Umístění vtokových ústí je parametr, který budeme pro dosažení lepších vlastností plastového dílce měnit. Pro tuto aplikaci použitý simulační software plně vyhovuje.



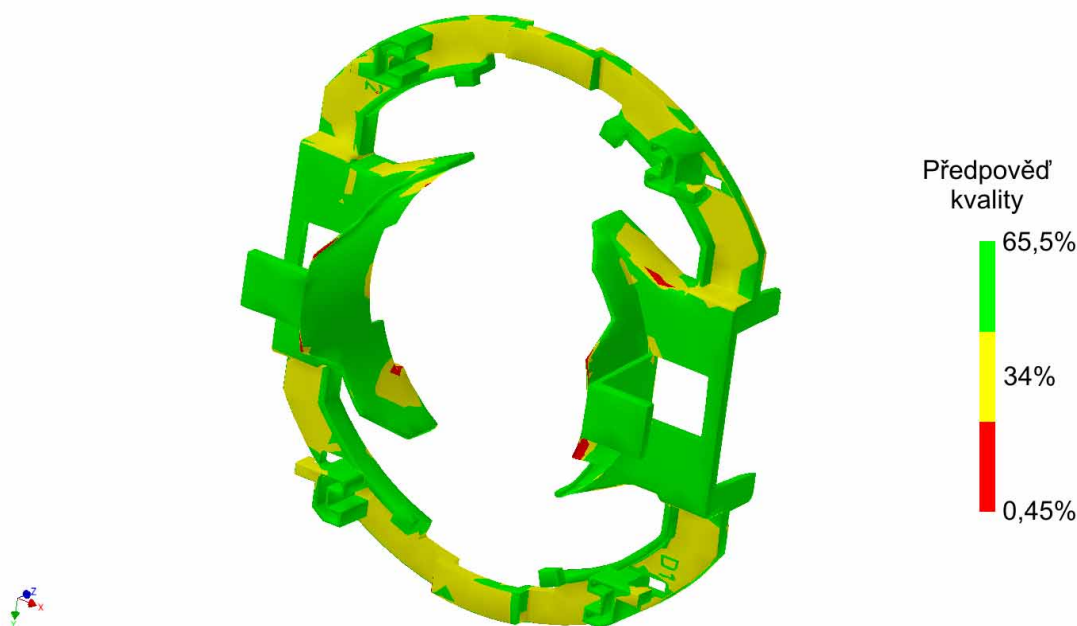
Obr. 8.16 Místa uzavření vzduchu

Už při odhadu času plnění jednotlivých míst dutiny formy (viz Obr. 8.15) je vidět možný problém s nedotečením taveniny plastu do tvarových rohů, které nejsou v dělicí rovině. Z toho plyne problém se zavedením odvodu vzduchu do těchto míst. Obr. 8.16 ukazuje shluky vzduchu v uvedených místech. Ty jsou v obrázku vyznačeny fialovou barvou. Výrazně oslabují pevnost dílce ve velmi úzkém místě. Tvoří se vlivem pohybu čel taveniny na slabých místech dílce. To nejlépe ukazuje studený spoj na Obr. 8.17.



Obr. 8.17 Poloha studeného spoje a pravděpodobnost vyplnění

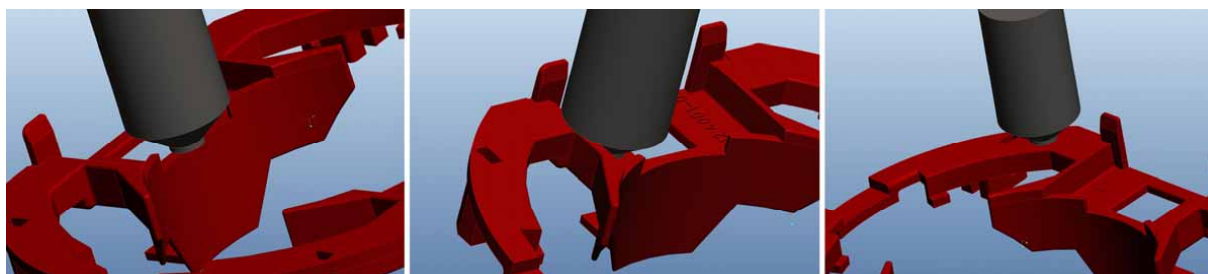
Posledním výsledkem simulace je předpověď kvality (viz Obr. 8.18), která se ale očividně orientuje jen a pouze podle doby zaplnění jednotlivých míst tvarové dutiny a už ne podle tvorby studených spojů nebo vzduchových bublin. Je tedy pro posouzení volby umístění vtokových ústí nerelevantní.



Obr. 8.18 Předpověď kvality plastového dílce

8.6.1 Volba nové polohy vtoků

Posunutím vtokových ústí se změní délka rozváděcích kanálků horké vtokové soustavy, která však neovlivní výpočet technologických parametrů vstřikování. Zůstáváme u použití dvou vtokových ústí na jednu tvarovou dutinu, protože je to nejvhodnější z hlediska možného zborcení tvaru dílce a uniformního smrštění.



Obr. 8.19 Volba polohy vtokových ústí

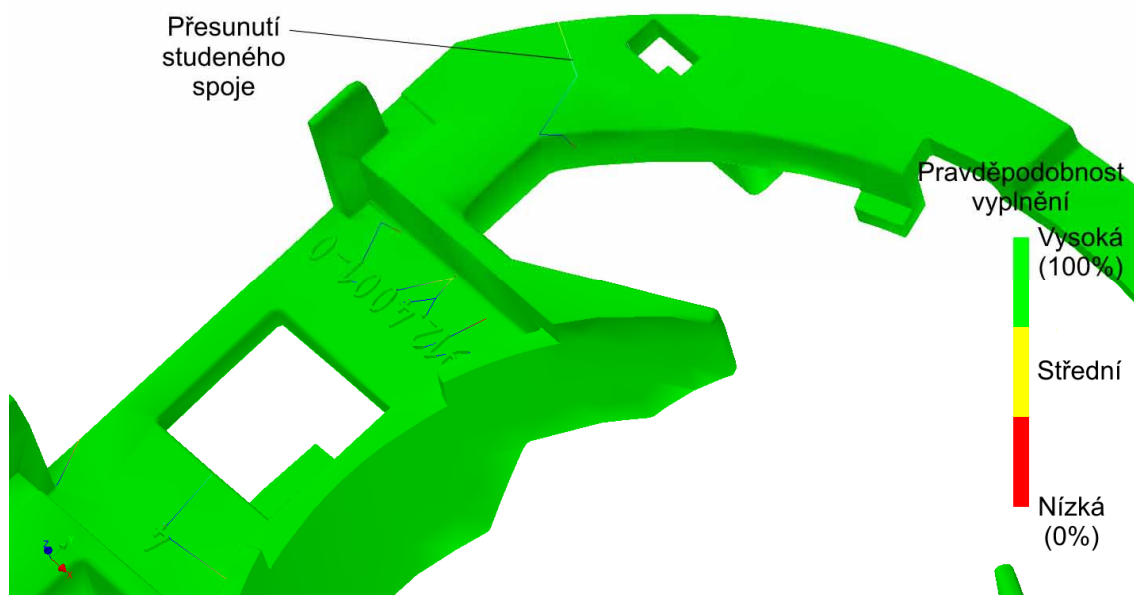
Na Obr. 8.19 lze vidět různé polohy otvoru pro horkou trysku v desce vstřikovací dutiny vzhledem k tvarové dutině formy. Poloha druhého vtoku je vždy symetrická vzhledem ke středu dílce. Obrázek vlevo ukazuje původní umístění vtoku. Obrázek uprostřed demonstruje přijatelnou polohu, co se týče toku taveniny, ale nepříjemnou co se týče konstrukce. A nakonec obrázek vpravo znázorňuje novou zvolenou polohu vtokových ústí, pro které je dále provedena nová simulace plnění tvarové dutiny.

8.6.2 Výsledek optimalizace polohy vtoků

Posunutím vtoků se podle simulace v *Inventoru* odsunuly nejpozději vyplněná místa do dělicí roviny (Obr. 8.20) a je tak umožněn odvod vzduchu z tvarové dutiny formy pomocí odvodušňovací soustavy.

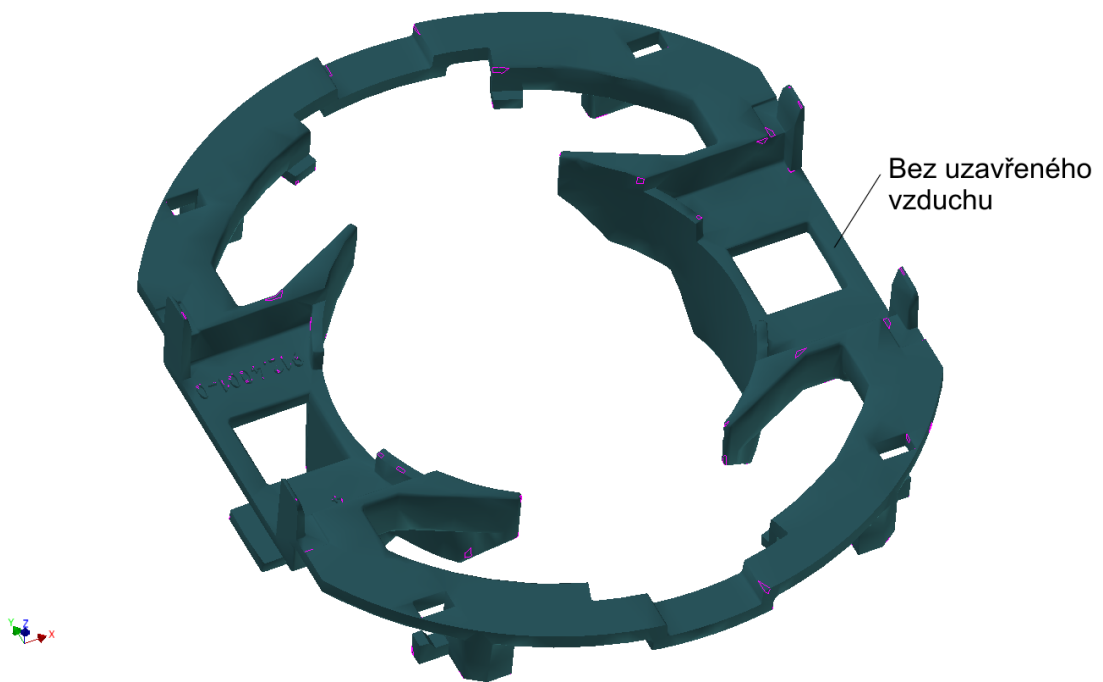


Obr. 8.20 Čas plnění - po posunutí vtoků



Obr. 8.21 Poloha studeného spoje a pravděpodobnost vyplnění - po posunutí vtoků

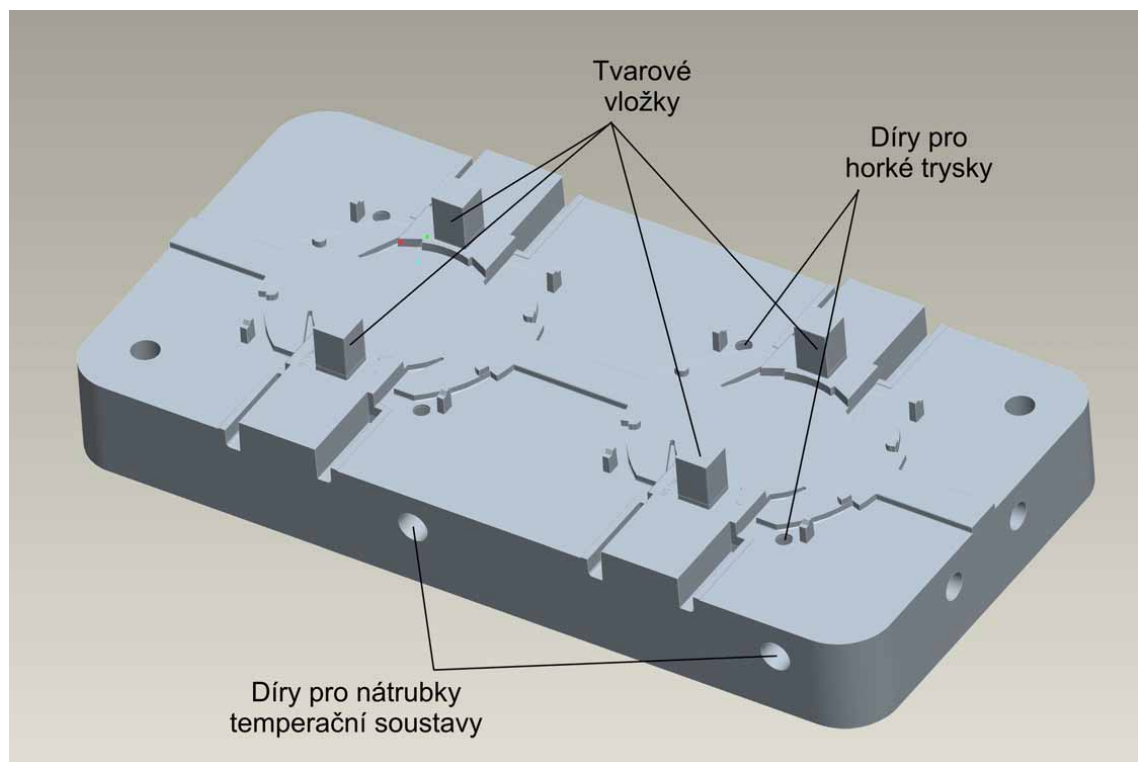
Studené spoje se posunuly do silnějších míst plastového dílce (viz Obr. 8.21), což přispívá k celkově lepším mechanickým vlastnostem dílce. Dále byla eliminována tvorba vzduchových bublin v nejslabším místě plastového dílce (viz Obr. 8.22).



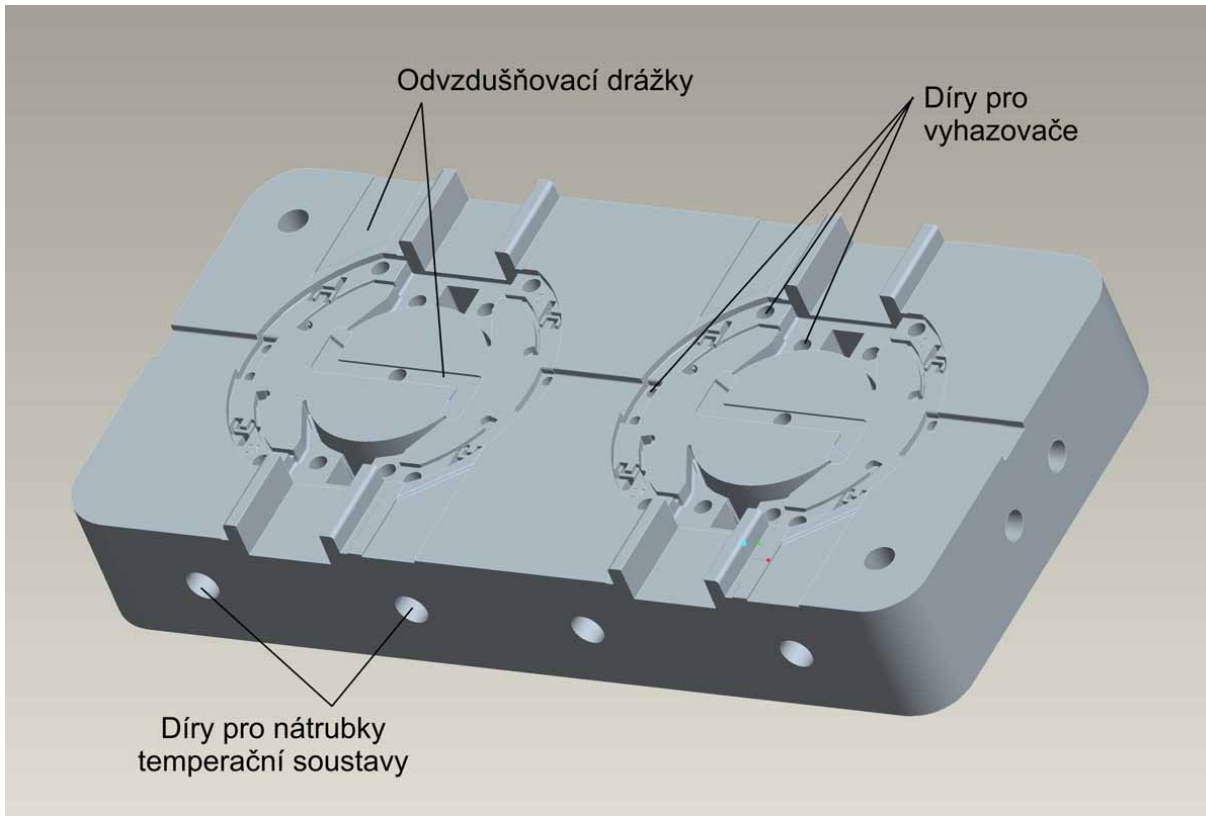
Obr. 8.22 Vzduchové bubliny - po posunutí vtoků

8.7 Konstrukce vstřikovací formy

Konstrukce formy vychází opět z referenčního modelu plastového dílce zvětšeného o smrštění 0,06 %. Tvar dělicí roviny je zachován stejný jako v návrhu formy a obě tvarové dutiny jsou v jednom tvarovém bloku.



Obr. 8.23 Horní polovina bloku tvarové dutiny (Core)

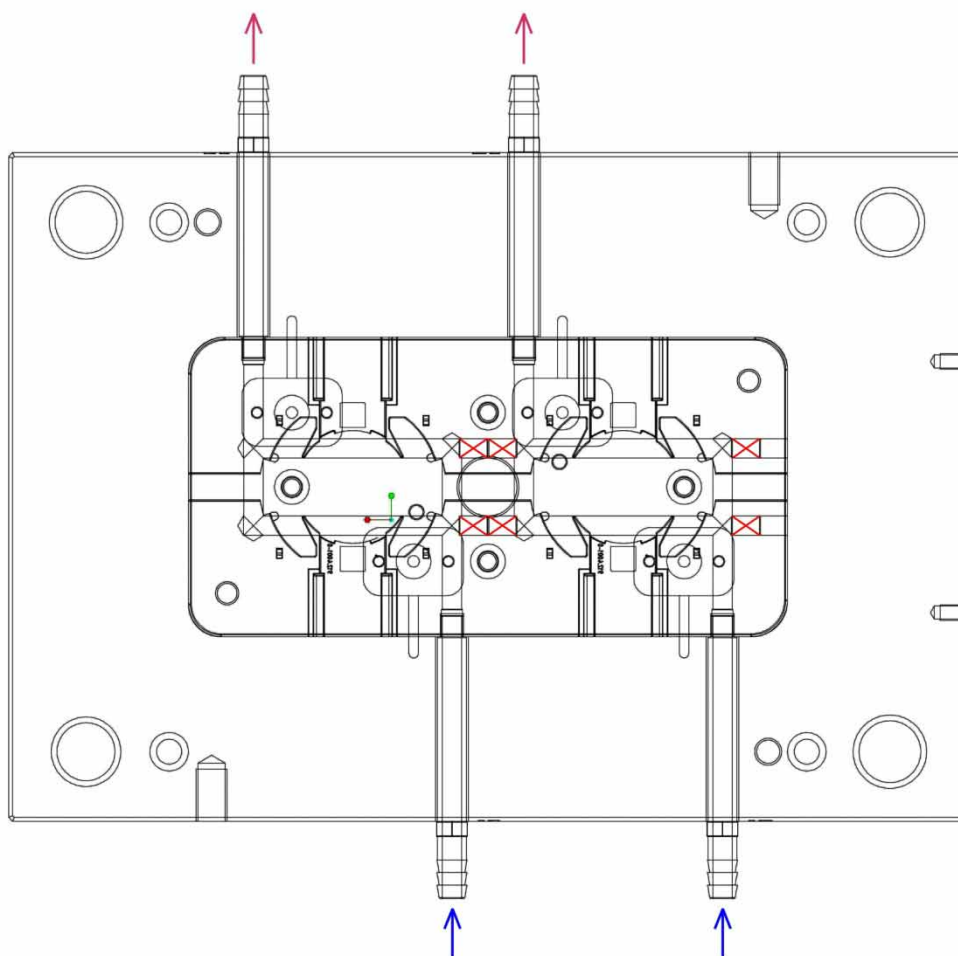


Obr. 8.24 Spodní polovina bloku tvarové dutiny (Cavity)

Na Obr. 8.23 lze vidět horní část bloku tvarových dutin. Tentokrát se na vložky dělí nejvyšší výstupky tohoto tvaru. To je výhodné z hlediska objemu obráběného materiálu při výrobě tvaru.

Obr. 8.24 ukazuje spodní část bloku tvarových dutin. Zde jsou již vymodelovány odvzdušňovací drážky ve vnitřní i vnější dělicí rovině. Výroba odvzdušnění se provádí obvykle až po odzkoušení formy. Polohu odvzdušňovacích drážek však lze odhadnout z předešlé simulace plnění (viz Obr. 8.20). Podle toho je v tomto případě zvolena poloha drážek. Funkční rozměr, tedy šířka odvzdušnění je 0,035 mm.

Pro oběh temperační soustavy jsou pro horní polovinu formy využity dva temperační okruhy vstřikovacího stroje (viz Obr. 8.25). V této konfiguraci je využit paralelní způsob temperace každé tvarové dutiny zvlášť. Ucpávky kanálků temperační soustavy jsou označeny červeným křížkem.

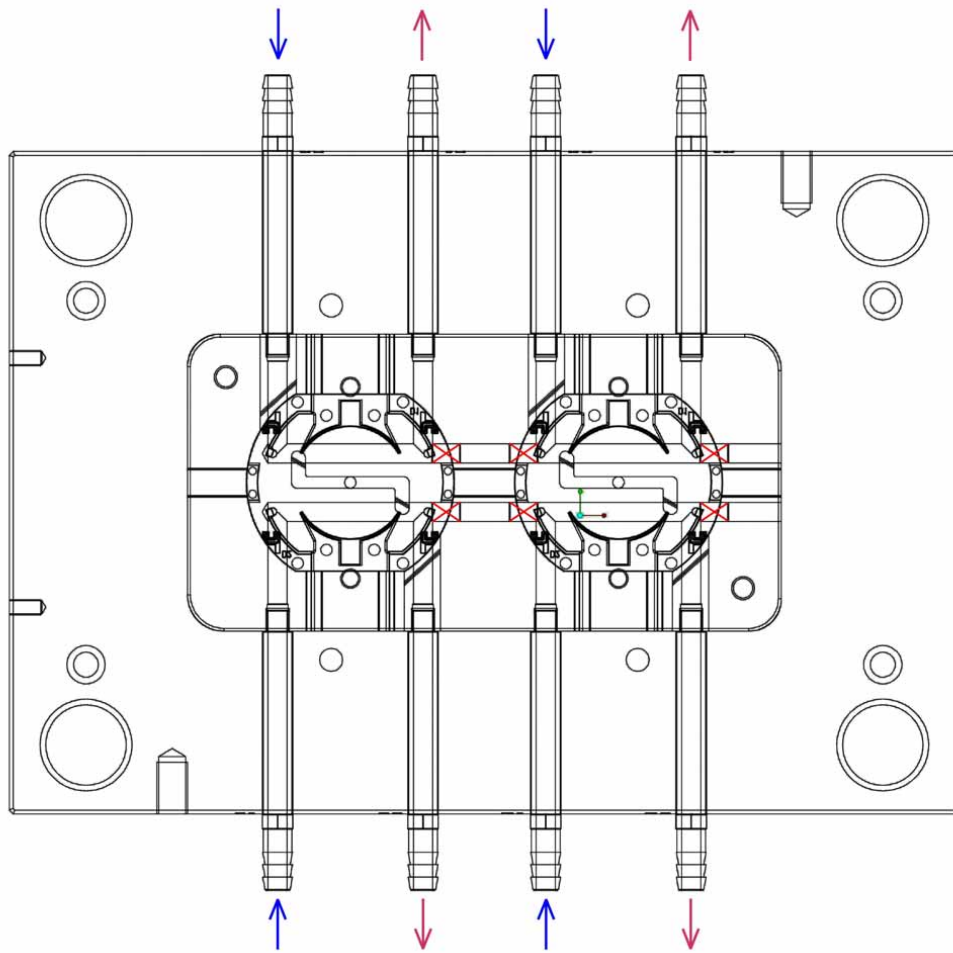


Obr. 8.25 Chlazení horní poloviny formy

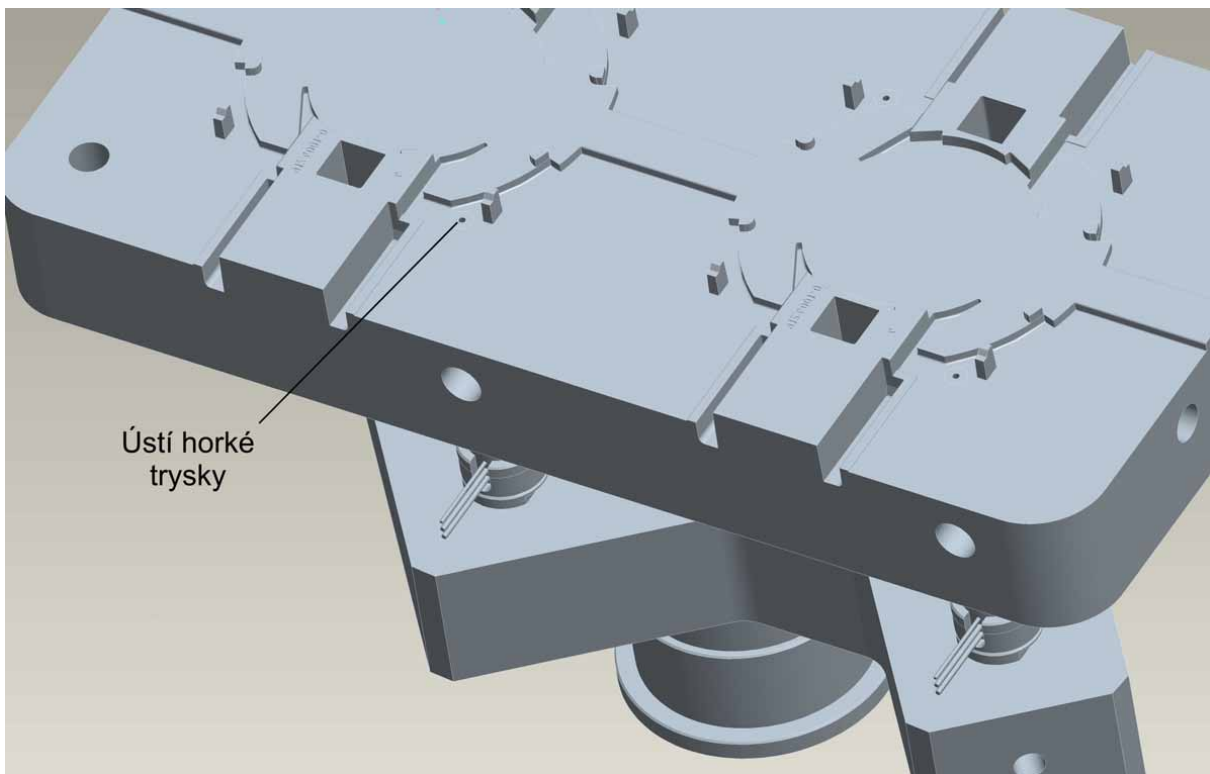
Pro spodní polovinu formy jsou využity 4 temperační okruhy vstřikovacího stroje. Jde o přímé chlazení každé tvarové dutiny zvlášť dvěma okruhy (viz. Obr. 8.26).

Obr. 8.27 ukazuje v detailu horní část tvarových dutin bez vložek a horkou vtokovou soustavu. Jsou zde vidět polohy vtokových ústí trysek.

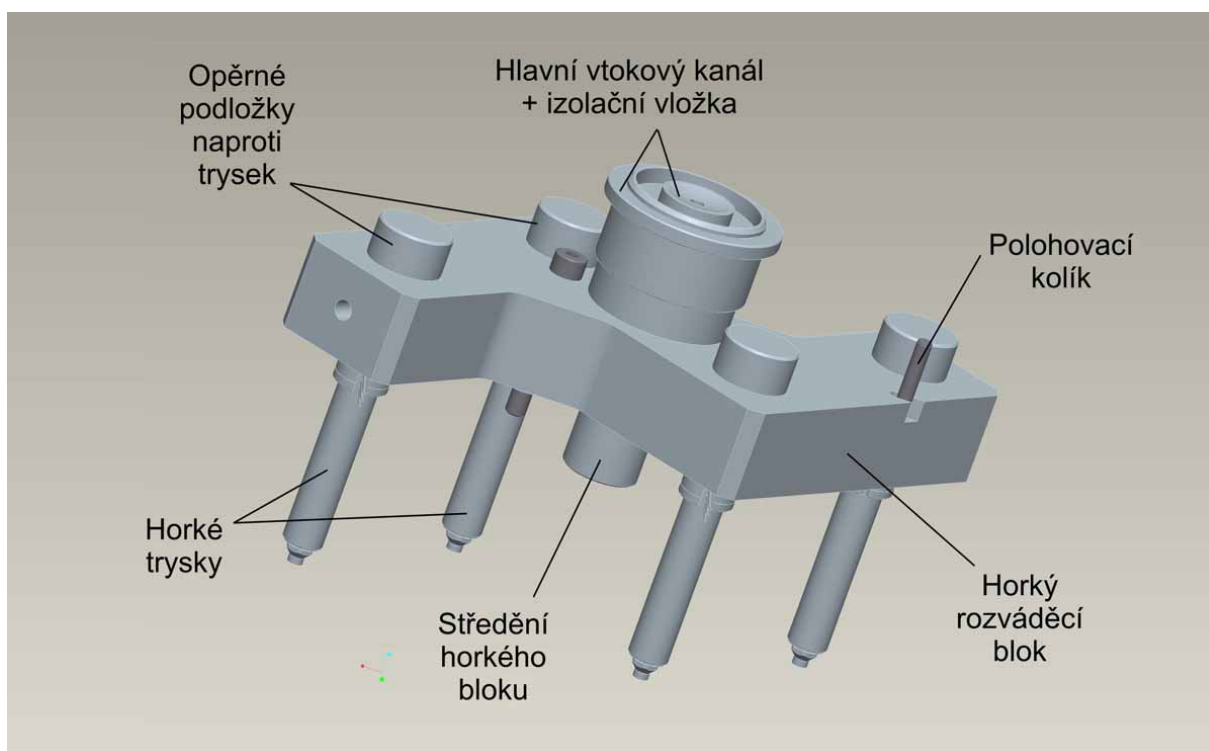
Na Obr. 8.28 je pouze návrhově vymodelovaná horká vtoková soustava. Tato slouží pouze pro správnou volbu velikostí a poloh děr v okolních deskách formy. Chybí zde především trubkové ohřívače horkého rozváděcího bloku, dále termočlánky a mnoho různých izolačních prvků. Do detailu se tato sestava zpracovává firmou Synventive, která ji dodává jako komplet na zakázku.



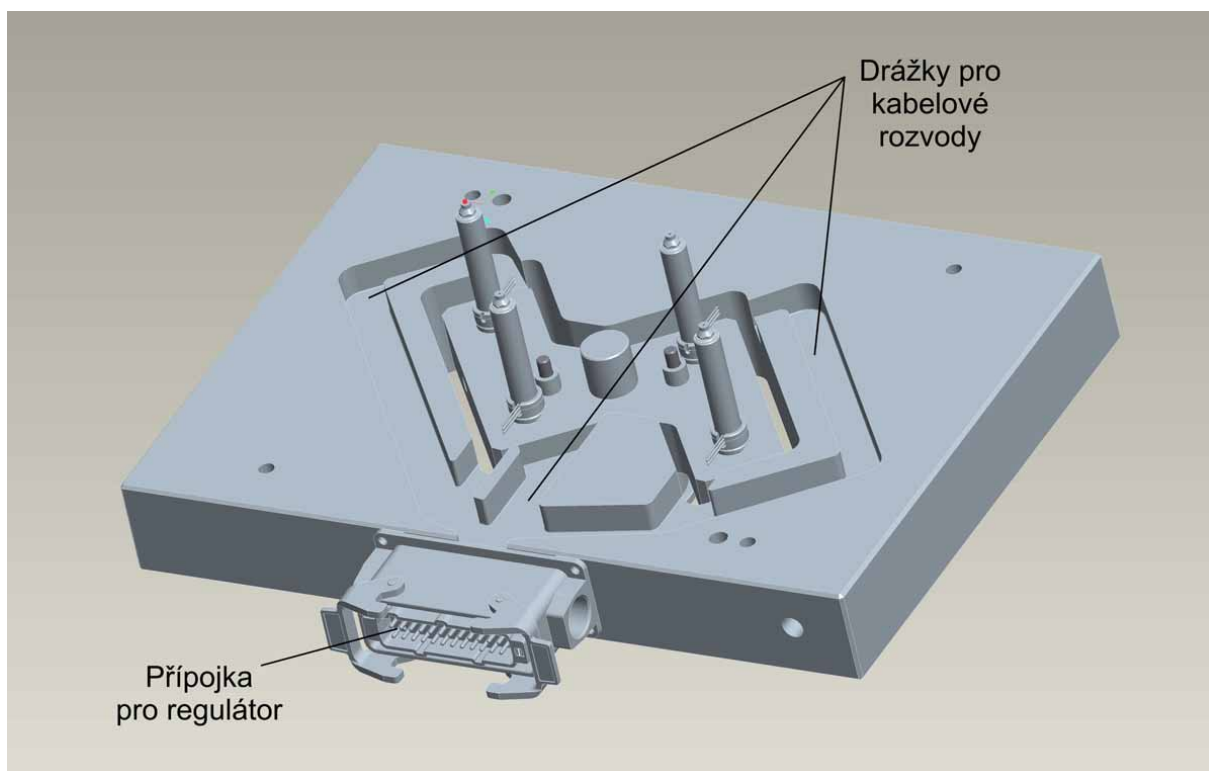
Obr. 8.26 Chlazení spodní poloviny formy



Obr. 8.27 Horní polovina tvarových dutin a horká vtoková soustava

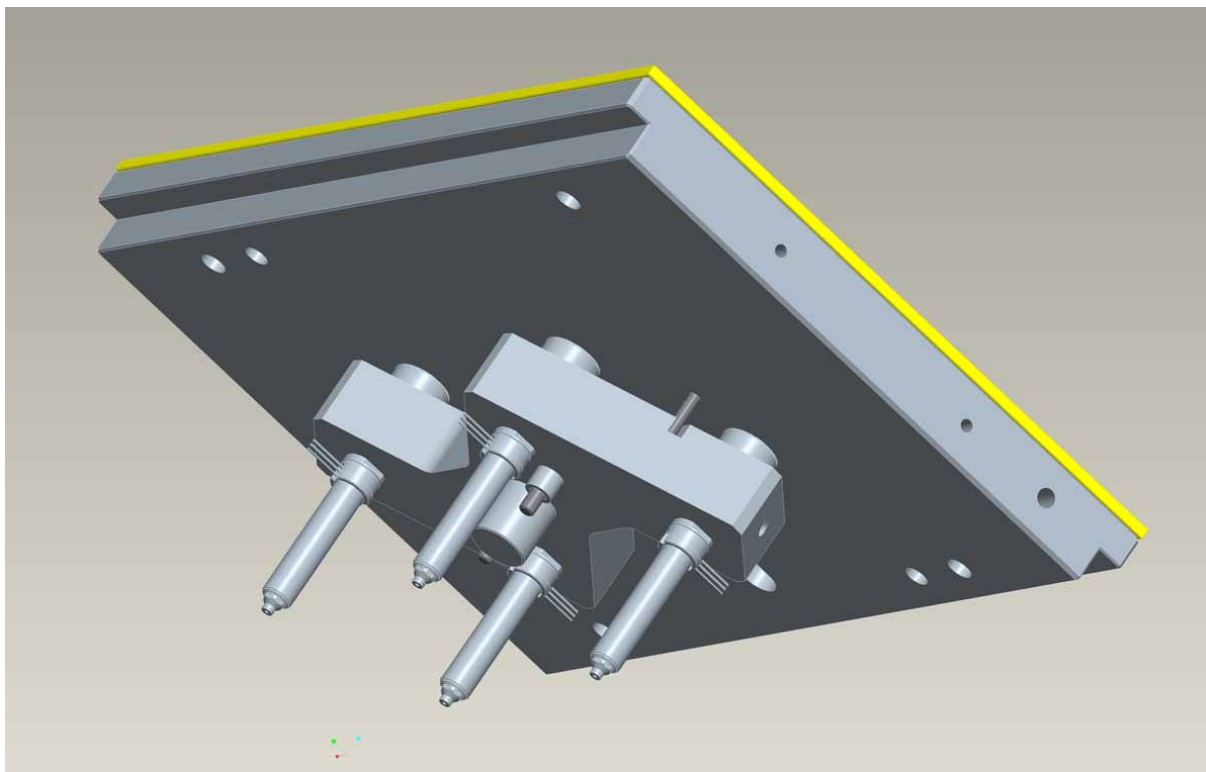


Obr. 8.28 Schematická sestava horké vtokové soustavy



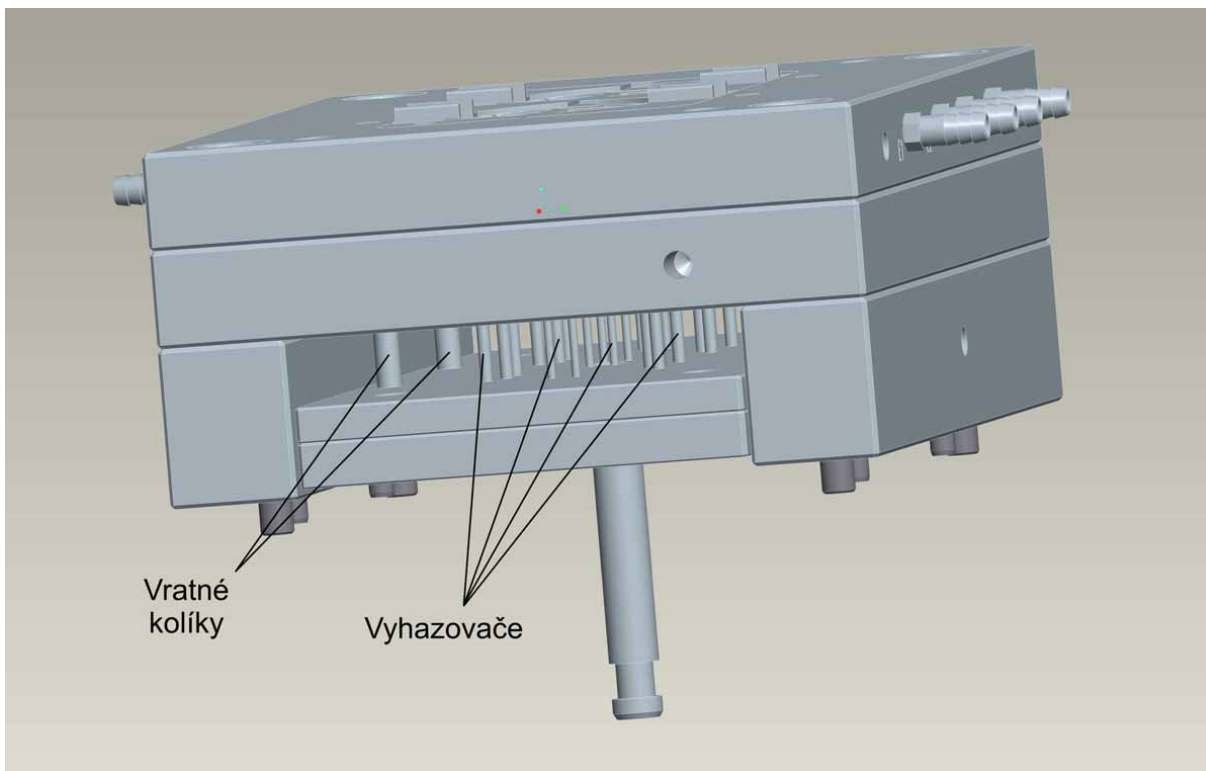
Obr. 8.29 Otvor a drážky pro horkou vtokovou soustavu

Dále je na Obr. 8.29 zobrazena deska horké vtokové soustavy s vymodelovanými drážkami pro kabeláž horké vtokové soustavy a z boku je přidělaná elektrická přípojka. Tato přípojka je zde pouze pro ilustraci. Tvar a velikost přípojky také určuje firma Synventive.



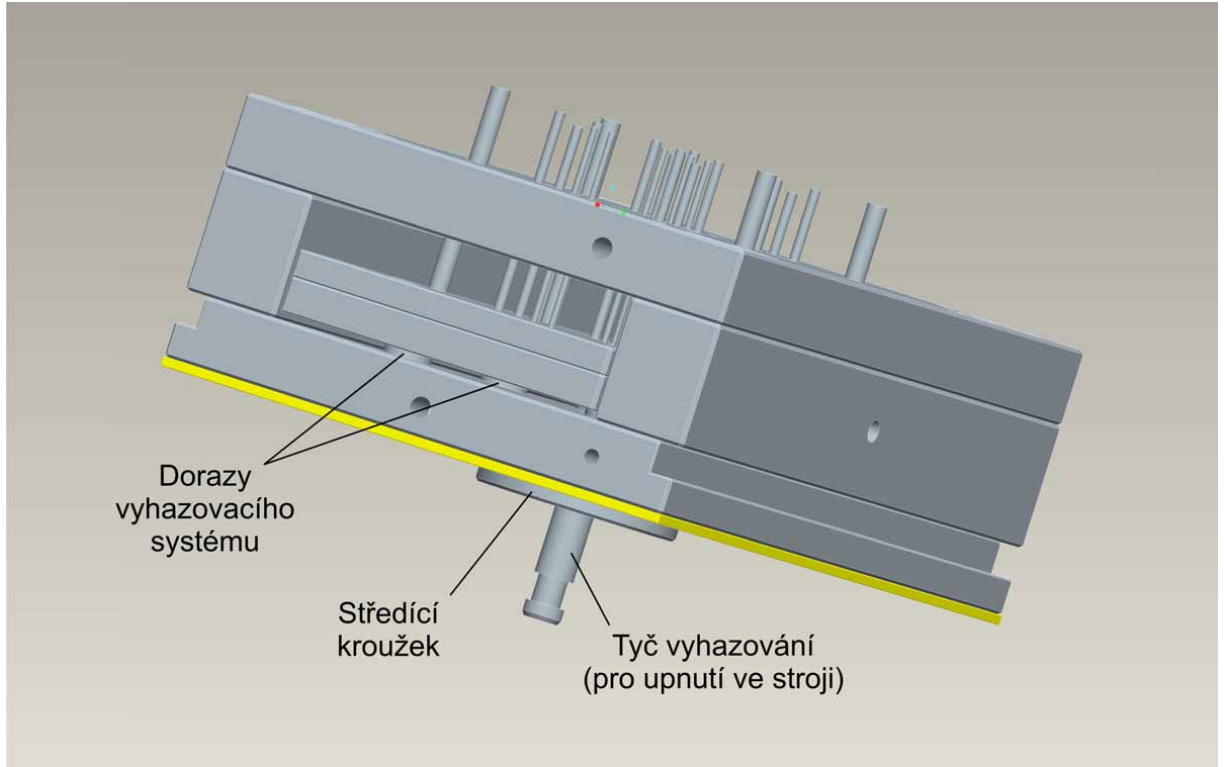
Obr. 8.30 Horká vtoková soustava jako prodloužení plastikační jednotky

Horká vtoková soustava je ve své podstatě prodloužením plastikační komory vstřikovacího stroje. Na Obr. 8.30 ji lze vidět s upínací deskou. Žlutou barvou je zobrazena izolační deska z reaktoplastu, která brání přechodu tepla z upínací desky formy do upínací desky vstřikovacího stroje.



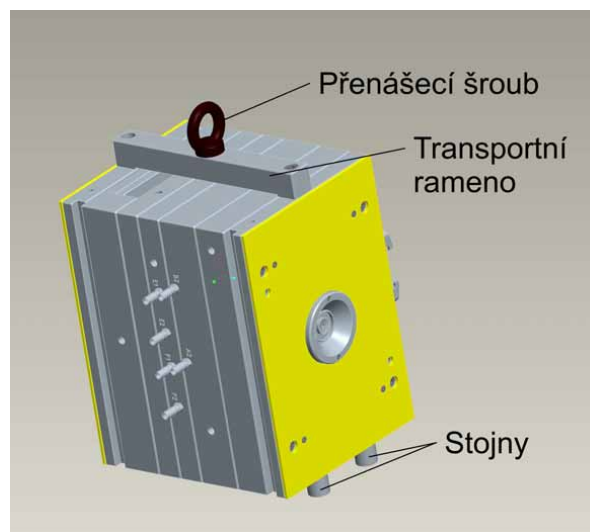
Obr. 8.31 Vyhazovací systém ve studené polovině formy

Vyhazování (viz Obr. 8.31) je řešeno pomocí kolíkových vyhazovačů upnutých mezi přidržovací a opěrnou vyhazovací deskou. Použité vyhazovače jsou průměru 4 a 6 mm. Výška zdvihu vyhazovacího systému je 33 mm. Tato výška je odvozena od výšky vyráběného plastového dílce. Pro jistotu návratu vyhazovačů do zadní polohy před vstřikováním další dávky jsou zde zavedeny 4 vratné kolíky Ø12 mm.



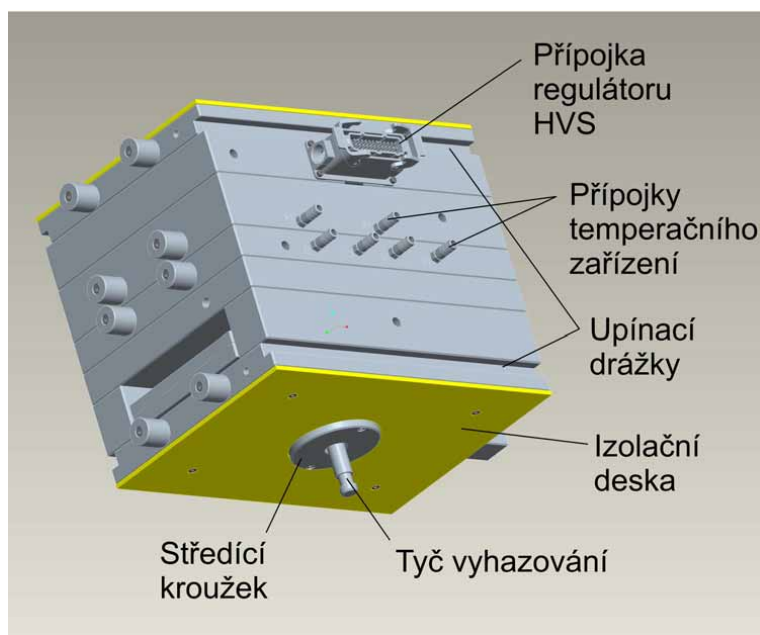
Obr. 8.32 Vyhazovací systém ve studené polovině formy (2)

Vyhazovače a vratné kolíky jsou v základové desce uvolněny. Tedy jsou vedeny pouze otvory ve spodním bloku tvarových dutin, příp. desky spodní poloviny tvarových dutin. Rozměry středícího kroužku a tyče vyhazovacího systému (Obr. 8.32) jsou dány typem zvoleného vstřikovacího stroje (viz níže).



Obr. 8.33 Vstřikovací forma - přenášečí prvky

Na Obr. 8.33 lze vidět již celou vstřikovací formu s popsány manipulační prvky. Je zde použit jeden přenášečí šroub $M24$ pro jeřáb a transportní rameno připevněno k upínacím deskám obou polovin formy šrouby $M16$.



Obr. 8.34 Vstřikovací forma - upínací a připojovací prvky

Nakonec je na Obr. 8.34 ukázáno upínání vstřikovací formy. Dále pak elektrické přípojky pro regulátor horké vtokové soustavy a přípojky pro temperační zařízení vstřikovacího stroje.

8.8 Konstrukční výpočty horké vtokové soustavy [54] [61]

1) Rozdíl teplot horké vtokové soustavy a zahřáté formy ΔT_1 [°C]

$$\Delta T_1 = T_m - T_f = 290 \text{ °C} - 100 \text{ °C} = 190 \text{ °C}$$

2) Délka zahřátých horkých trysek L [mm] na pracovní teplotu T_m [°C]

Délka horkých trysek zvolená dle katalogu firmy *Synventive* [54] $L = 76 \text{ mm}$

3) Délka nezahřátých horkých trysek L_r [mm]

$$L_r = \frac{L}{1 + (\Delta T_1 \cdot \alpha_1)} = \frac{76 \text{ mm}}{1 + (190 \text{ K} \cdot 12,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1})} = 75,81 \text{ mm}$$

kde α_1 ... je koeficient teplotní roztažnosti oceli $1.2311 \text{ [K}^{-1}\text{]}$

4) Rozdíl teplot horké vtokové soustavy při teplotě tavení plastu a za studena ΔT_2 [°C]

$$\Delta T_2 = T_m - T_0 = 290 \text{ °C} - 23 \text{ °C} = 267 \text{ °C}$$

5) Šířka rozváděcího bloků M [mm] horké vtokové soustavy

Dle katalogu firmy *Synventive* [54] byla zvolena šířka $M = 37 \text{ mm}$

6) Mezera mezi distančními podložkami Z [mm] horkého rozváděcího bloku

$$Z = M \cdot \Delta T_2 \cdot \alpha_1 - 0,05 \text{ mm} = 37 \text{ mm} \cdot 267 \text{ K} \cdot 12,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} - 0,05 \text{ mm} = 0,08 \text{ mm}$$

7) Objem taveniny v kanálcích horké vtokové soustavy V_h [cm³]

$$V_h = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot \left(\frac{M}{2} + l_1 \right) + \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot (2 \cdot l_2 + 4 \cdot l_3) + \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \cdot 4 \cdot \left(\frac{M}{2} + 15 \text{ mm} + L \right)$$

$$V_h = \frac{\pi \cdot 8^2}{4} \cdot \left(\frac{37}{2} + 50 \right) + \frac{\pi \cdot 8^2}{4} \cdot (2 \cdot 70 + 4 \cdot 49,8) + \frac{\pi \cdot 4^2}{4} \cdot 4 \cdot \left(\frac{37}{2} + 15 + 76 \right)$$

$$V_h = 26,00 \text{ cm}^3$$

Délky a průměry kanálků uvažovány dle skicy pro *Synventive* v Příloze 9.

8) Doba setrvání taveniny v horké vtokové soustavě t_{hvs} [s]

$$t_{hvs} = \frac{V_h}{n_T \cdot V} \cdot t_c = \frac{26 \text{ cm}^3}{2 \cdot 14,86 \text{ cm}^3} \cdot 16 \text{ s} = 14,00 \text{ s}$$

kde V ... je objem taveniny v jedné tvarové dutině vstříkovací formy [cm³]

9 TECHNOLOGICKÁ ČÁST

9.1 Volba vstřikovacího stroje [4] [5] [7] [32] [44] [51]

Pro výrobu dané série plastových dílců je zvolen vstřikovací stroj *Allrounder 370 U 700-290* od německé firmy *Arburg* s přidavným zařízením pro ohřev externě vytápěné horké vtokové soustavy. Regulátor horkých vtoků *Multibox* (viz Příloha 10) od firmy *HTH8 s.r.o.*

Allrounder 370 U (Obr. 9.1) je univerzální hydraulický vstřikovací stroj s širokou možností přestavitelnosti dané modulární konstrukcí stroje, kde lze využít příslušenství založené také na elektrické úrovni. Pro danou aplikaci je zvolena konfigurace stroje se dvěma hydraulickými čerpadly bez elektrických pohonů. Volba uvedené konfigurace stroje dle katalogu [5] je na Obr. 9.2.

Tab. 9.1 Kontrola parametrů vstřikovacího stroje *Allrounder 370 U 700-290* [4] [50]

Technologický parametr	Hodnota daná výpočtem nebo konstrukcí formy	Možnosti vstřikovacího stroje
Uzavírací jednotka		
Uzavírací síla [<i>kN</i>]	362,7 <i>kN</i>	700 <i>kN</i>
Výška formy [<i>mm</i>]	403 <i>mm</i>	min. 200 <i>mm</i>
Rozevření [<i>mm</i>]	453 <i>mm</i> (potřebný odjezd + výška formy)	max. 600 <i>mm</i>
Rozměr desek [<i>mm</i>]	346x496 <i>mm</i> (formát desek formy)	370x370 <i>mm</i> (rozměr mezi sloupy) 510x510 <i>mm</i> (velikost desek uzavírací jednotky)
Zdvih vyhazovačů [<i>mm</i>]	33 <i>mm</i>	125 <i>mm</i>
Hydraulický pohon		
Rychlost otevření a uzavření uzavírací jednotky [<i>mm/s</i>]	100 <i>mm</i> za 3÷4 <i>s</i>	259 <i>mm</i> za 1,9 <i>s</i>
Celkový příkon stroje [<i>kW</i>]	-	23,9 <i>kW</i>
Plastikační jednotka		
Průměr šneku D_s [<i>mm</i>]	35 <i>mm</i>	35 <i>mm</i>
Poměr efektivní délky šneku k průměru šneku L/D	20÷25 (doporučení pro Lexan)	20
Zdvih šneku [<i>mm</i>]	35,99 <i>mm</i>	150 <i>mm</i>
Velikost vstřikované dávky [<i>cm</i> ³]	34,63 <i>cm</i> ³	144 <i>cm</i> ³
Hmotnostní tok materiálu [<i>kg/hod</i>]	9,35 <i>kg/hod</i>	10,5÷20,5 <i>kg/hod</i>
Vstřikovací tlak [<i>bar</i>]	400 <i>bar</i>	2000 <i>bar</i>
Obvodová rychlost šneku <i>v</i> [<i>m/min</i>]	18 <i>m/min</i>	54 <i>m/min</i>



Obr. 9.1 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 370 U [7]

Uvedený typ vstřikovacího stroje byl zvolen na základě vypočítaných technologických parametrů a velikosti vstřikovací formy dané její konstrukcí. V Tab. 9.1 je uvedeno porovnání těchto parametrů a rozměrů. Nejkritičtějšími jsou rozměry desek uzavírací jednotky stroje formy a dále hmotnostní tok materiálu, který je schopna plastikační jednotka vyprodukovat.

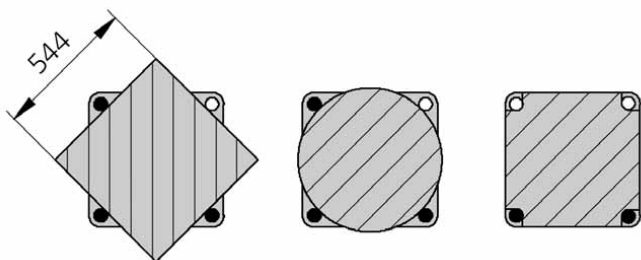
Dle Tab. 9.1 není pro vstřikovací formu mezi sloupy uzavírací jednotky dos-

Vzdálenost mezi vodicími sloupy						Uzavírací síla	Vstřikovací jednotka							
570 x 570	520 x 520	470 x 470	370 x 370	270 x 270	170 x 170		30	70	100	170	290	400	800	1300
							15	18	20	25	30	35	45	55
							18	22	25	30	35	40	50	60
								25	30	35	40	45	55	70
						125/150/180								
						250/350/400								
						500/600/700								
						800/1000/1100								
						1300/1500/1600								
						1600/2000/2200								

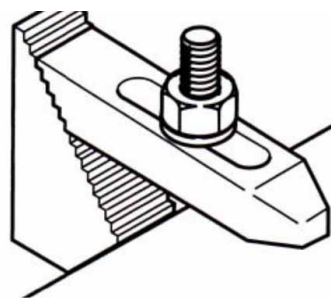
Obr. 9.2 Volba vstřikovacího stroje Arburg Allrounder řady U [5]

tatek místa, to však lze obejít správnou volbou polohy přednášecího šroubu na vstřikovací formě (viz Obr. 8.33). Rozměr formy 346 mm je uvažován pouze jako čistý rozměr desek. Nejsou zde uvažovány přípojky temperační soustavy a elektrické přípojky horké vtokové soustavy, které výrazně přecházejí. Z tohoto důvodu bude při upínání vstřikovací formy na stroj nutné vyjmout jeden sloup uzavírací jednotky (viz Obr. 9.3).

Upínání formy k deskám uzavírací jednotky je řešeno pomocí klasických upínek, kde jsou podle závitových děr M12 v deskách uzavírací jednotky zvoleny patřičné šrouby (viz Obr. 9.4).



Obr. 9.3 Použitelná plocha stolu po vyjmutí sloupů [4]



Obr. 9.4 Stupňovitá upinka [44]

V Tab. 9.1 je pro hmotnostní tok materiálu, který je vstřikovací stroj schopen vyprodukovat, je uveden interval, kde daná hodnota závisí na typu materiálu plastu. Pro *Lexan* uvažujeme nejnižší hodnoty z tohoto intervalu.

9.2 Technologický postup [5] [37] [51]

Tab. 9.2 Parametry vstřikování [37] [51]

Nastavovaný parametr	Hodnota
Vstřikovací tlak p_v	400 bar
Dotlak p_d	200 bar
Protitlak p_z	100 bar
Vstřikovaná dávka V_D	34,63 cm ³
Teplota granulátu v násypce	80 °C
Teplota 1. pásma plastikačního válce	280 °C
Teplota 2. pásma plastikačního válce	290 °C
Teplota 3. pásma plastikačního válce	310 °C
Teplota taveniny v trysce	290 °C
Temperační teplota formy	100 °C
Délka zdvihu šneku	35,99 mm
Otáčky šneku n_s	163,7 min ⁻¹
Vstřikovací rychlost v_v	51,28 cm ³ /s
Doba vstřikovacího cyklu t_c	16 s
Doba plnění tvarových dutin formy t_v	0,68 s
Doba chlazení t_{ch}	11,54 s
Uzavírací síla F_u	363 kN
Vyhazovací síla F_e	30 kN
Zdvih vyhazování	33 mm

- 1) Vysušení granulátu v uzavřené sušící jednotce napojené na plastikační jednotku vstřikovacího stroje. Maximální vlhkost granulátu 0,02 %.
- 2) Zapnutí vstřikovacího stroje.
- 3) Vytemperování vstřikovací formy na 100 °C.
- 4) Nastavení parametru na stroji dle Tab. 9.2, puštění automatického cyklu naprázdno bez fáze plnění a postupné vyladění pohybů pohonů plastikační jednotky zároveň s pohyby pohonů uzavírací jednotky tak, aby se dosáhlo co nejkratšího cyklu.
- 5) Spuštění automatického cyklu i s fází plnění, dotlaku a chlazení.
- 6) Kontrola vzhledu výstřiku, případná změna technologických parametrů.

- 7) Transport výstřiků na pracoviště kontroly.
- 8) Kontrola rozměrů výstřiku a přípustnosti případných vad.
- 9) Balení plastových dílců do krabic a export.

Parametry se nastavují v určitých intervalech dle zkušenosti operátora stroje a řídicí systém vstřikovacího stroje si je v průběhu jednotlivých cyklů optimalizuje sám.

10 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ [61]

Při užití technologie vstřikování do formy s externě vyhřívanou horkou vtokovou soustavou s torpédovými vtoky nevznikají žádné vtokové zbytky. Tím odpadá nutnost tyto zbytky recyklovat a znovu v procesu využívat, což je výhodné nejenom z hlediska výsledných mechanických vlastností vyrobených plastových dílců, ale také z ekonomického hlediska.

Nevýhodou externě vyhřívané horké vtokové soustavy z ekonomického hlediska je její neustálý potřebný ohřev pomocí přídavného zařízení, které není součástí vstřikovacího stroje. Při použití vhodných konstrukčních prvků a materiálů pro izolaci vstřikovací formy proti uniku tepla z horké vtokové soustavy však lze do jisté míry tvrdit, že náklady na ohřev horké vtokové soustavy se do jisté míry přibližují nákladům spojeným s recyklačním hospodářstvím, které se při použití vybraného typu horké vtokové soustavy odbourává. Uvedené tvrzení však není nikde v dostupné literatuře fakticky podloženo.

10.1 Výpočet ceny plastového dílce [33]

1) Strojní náklady, sazba za hodinu provozu stroje M_S [Kč/hod]

$$M_S = \frac{P_S \cdot C_E}{K_S} = \frac{23,9 \text{ kW} \cdot 3,3 \frac{\text{Kč}}{\text{kWh}}}{0,8} = 98,59 \frac{\text{Kč}}{\text{hod}}$$

kde P_S ... je příkon stroje [kW]
 C_E ... cena elektrické energie [Kč/kWh]
 K_S ... koeficient opotřebení stroje [-]

2) Strojní čas, doba chodu stroje T_S [hod]

$$T_S = t_c \cdot \frac{N}{n} = 15,24 \text{ s} \cdot \frac{1\,200\,000 \text{ ks}}{2} = 2\,536,14 \text{ hod}$$

kde t_c ... je čas vstřikovacího cyklu [s]
 N ... výrobní série [ks]
 n ... násobnost formy [-]

3) Náklady na celou sérii plastových dílců, závislé na dílci K_D [Kč]

$$K_D = C_M \cdot m_d \cdot L = 32 \frac{\text{Kč}}{\text{kg}} \cdot 17,83 \text{ g} \cdot 1\,200\,000 \text{ ks} = 684\,794,88 \text{ Kč}$$

kde C_M ... je cena materiálu Lexanu [Kč/kg]
 m_d ... hmotnost jednoho plastového dílce [g]

4) Náklady na vstřikovací formu W_F [Kč]

$$W_F = W_{HVS} + W_{ZF} = 210\,000 \text{ Kč} + 700\,000 \text{ Kč} = 910\,000 \text{ Kč}$$

kde W_{HVS} ... je cena horké vtokové soustavy [Kč]

W_{ZF} ...cena výroby desek, ostatních součástí formy a normálií [Kč]

5) Obecné, společné náklady, režie a další náklady N_R [Kč]

$$N_R = 10\,000 \text{ Kč}$$

6) Odpisy z pořizovacích nákladů vstřikovacího stroje N_{OSR} [Kč/rok]

$$N_{OSR} = \frac{N_S}{T_{ZS}} = \frac{1\,390\,800 \text{ Kč}}{6 \text{ let}} = 231\,800 \frac{\text{Kč}}{\text{rok}}$$

kde N_S ... jsou pořizovací náklady vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 370 U [Kč]
 T_{ZS} ... předpokládaná doba životnosti stroje [rok]

Cena vstřikovacího stroje dle Přílohy 10.

7) Doba výroby, zhotovení celé série plastových dílců T_P [hod]

$$T_P = \frac{N \cdot t_c \cdot K_Z}{n \cdot K_{\check{c}}} = \frac{1\,200\,000 \text{ ks} \cdot 15,22 \text{ s} \cdot 1,01}{2 \cdot 0,85} = 3\,013,53 \text{ hod}$$

kde N ... je velikost výrobní série [ks]
 t_c ... čas vstřikovacího cyklu [s]
 K_Z ... koeficient zmetkovitosti [-]
 $K_{\check{c}}$... koeficient využití času [-]

8) Odpisy z pořizovacích nákladů vstřikovacího stroje po dobu výroby série N_{OS} [Kč]

$$N_{OS} = N_{OSR} \cdot T_P = 231\,800 \frac{\text{Kč}}{\text{rok}} \cdot 3\,013,53 \text{ hod} = 79\,700 \text{ Kč}$$

9) Výpočet vlastních nákladů na jeden plastový dílec S [Kč/ks]

$$S = \frac{M_S \cdot T_S + K_D + W_F + N_R + N_{OS}}{N}$$

$$S = \frac{98,59 \frac{\text{Kč}}{\text{hod}} \cdot 2\,540,3 \text{ hod} + 684\,795 \text{ Kč} + 910\,000 \text{ Kč} + 10\,000 \text{ Kč} + 79\,700 \text{ Kč}}{1\,200\,000 \text{ ks}}$$

$$S = 1,61 \frac{\text{Kč}}{\text{ks}}$$

10) Výpočet konečné ceny plastového dílce C [Kč/ks]

$$C = \frac{S \cdot N \cdot \left(1 + \frac{Z_C}{100}\right)}{N} \cdot \left(1 + \frac{Q_C}{100}\right) = \frac{1,61 \frac{\text{Kč}}{\text{ks}} \cdot 1\,200\,000 \text{ ks} \cdot \left(1 + \frac{15\%}{100}\right)}{1\,200\,000 \text{ ks}} \cdot \left(1 + \frac{100\%}{100}\right)$$

$$C = 3,71 \frac{\text{Kč}}{\text{ks}}$$

kde $Z_C \dots$ je výrobní zisk [%]

$Q_C \dots$ obchodní přírážky (+) nebo srážky (-) z ceny [%]

10.2 Výpočet doby splnění dodávky

1) Doba potřebná pro konstrukci vstřikovací formy t_K [dnů]

Doba pro vypracování 3D modelů a výkresové dokumentace je odhadována na:

$$t_K = 7 \text{ dnů} = 168 \text{ hod}$$

2) Doba výroby vstřikovací formy t_F [hod]

$$t_F = T_F \cdot n^{0,7} = 336 \text{ hod} \cdot 2^{0,7} = 545,83 \text{ hod}$$

kde $T_F \dots$ je doba výroby formy s násobností 1 [hod]

$n \dots$ násobnost vstřikovací formy [-]

3) Doba splnění dodávky t_D [dnů]

$$t_D = t_K + t_F + t_P = 168 \text{ hod} + 546 \text{ hod} + 3\,014 \text{ hod} = 3\,728 \text{ hod} = 156 \text{ dnů}$$

11 ZÁVĚR

Technologie vstřikování plastů je proces obvykle vysoké produkce plastových dílců složitých tvarů v relativně krátkém čase. Velkou výhodou plastových materiálů je jejich nízká zpracovatelská teplota. Za nízkých teplot nedochází k příliš rychlému opotřebení funkčních částí formy. S výhodou se tedy zavádí různé druhy materiálů vhodné pro jednotlivé součásti vstřikovací formy.

Při návrhu vstřikovacího procesu je velmi často nutné zvážit několik různých, někdy i protichůdných parametrů. Především jsou to výsledná kvalita produktu, optimální rozložení vtoků, minimální zkroucení plastového dílce, čas vstřikovacího cyklu, výše ceny formy, vzhled produktu a v neposlední řadě také posouzení zda se bude jednat o plně automatický proces výroby či ne.

Technologie horkých vtoků se vyznačuje zvláštními požadavky na materiál plastu, které je nutné posoudit. Při procesu vstřikování totiž hrozí tepelná degradace plastu, která je většinou důsledkem buďto špatné volby konstrukce horké vtokové soustavy, nebo nevhodné volby materiálu plastu. V dnešní je nutné, aby se na celém procesu vstřikování podíleli jak designér plastového dílce, konstruktér vstřikovací formy, výrobce formy a výrobce horkého vtokového systému, tak také dodavatel materiálů. Ten zná chování a vlastnosti plastových materiálů nejlépe. Tyto jednotlivé subjekty si musejí vyměňovat zkušenosti tak, aby došlo k minimalizaci poruchovosti vstřikovacího procesu. Obvyklou chybou je dávání zodpovědnosti za vstřikovací proces jen jednomu subjektu.

Diplomová práce se nejprve zabývá teoretickým popisem plastů, technologií vstřikování s využitím horkých vtoků a optimalizací procesu pomocí počítačové simulace. V další části pak výrobou konkrétního dílce pomocí technologie vstřikování, kde hlavní části řešení jsou především výběr materiálu plastu, konstrukce vstřikovací formy s horkou vtokovou soustavou, optimalizace umístění vtoků a volba vstřikovacího stroje.

Po provedení dvou jednoduchých simulací plnění tvarové dutiny došlo k přesunutí pozic vtokových ústí z původních míst nefunkčních ploch uvažovaných v návrhu konstrukce formy na místa do funkčních ploch výsledného plastového dílce. Což je nežádoucí, protože zvolený typ torpédové horké trysky částečně zanechá na funkční ploše plastového dílce stopu. Tato tryska je částí horké vtokové soustavy, jejíž výroba se z důvodu komplexnosti problému uvažuje jako kooperace s firmou Synventive. Pro odstranění předpokládaných stop neznámé velikosti na funkčních plochách plastového dílce je tedy nutné nejprve formu odzkoušet. Poté případně poupravit podložky horké vtokové soustavy a zahloubení v desce formy tak, aby došlo k dostatečnému zasunutí horkých trysek do plastového dílce a tím eliminaci stopy jinak vyčnívající přes funkční plochu dílce (viz Obr. 5.6).

Výkresová dokumentace obsahující výkresy sestavení, tvárník a tvárnici formy je k nalezení v příloze.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY [14]

1. ABBOTT, Richard, Richard COMBS, David KAZMER. *Elimination of Process Constraints in Plastics Injection Molding* [online]. Department of Plastics Engineering, University of Massachusetts, Lowell. 2002 [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <http://www.thermoceramix.com/docs/Elimination_of_Process_Constraints.pdf>.
2. ALUMINIUM CENTRUM s. r. o. [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. Aluminium, hutní materiál, tyče, desky přířezy, hliníkový materiál, Dostupné z WWW: <<http://www.aluminiumcentrum.com/normy.html>>.
3. ARAMPHONGPHUN, Chuckaphun. *Shaping Processes for Plastics*. Prezentace [online]. b. r. [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <http://pirun.ku.ac.th/~b4754239/Data%20Sheet/206311-1-50_ch13.ppt>.
4. ARBURG GmbH + Co KG. *Allrounder 370 S: Technical data* [online]. 2010 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <http://www.arburg.com/com/common/download/Web_527555_EN_GB.pdf>.
5. ARBURG GmbH + Co KG. *Allrounder S: Hydraulické vstřikovací stroje pro univerzální využití* [online]. 2010 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <http://www.arburg.de/com/common/download/web_525296_cz.pdf>.
6. *Autodesk Education Community* [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <<http://students.autodesk.com/>>.
7. *Azom.com* [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. Arburg Demonstrate Versaitlity of Modular Injection Molding Machines. Dostupné z WWW: <<http://www.azom.com/news.aspx?newsID=12241>>.
8. BĚHÁLEK, Luboš. *Reologie tavenin plastů v průmyslové praxi*. Prezentace [online]. Oddělení tváření kovů a plastů, Katedra strojírenské technologie, Fakulta strojní, TU Liberec. 2008 [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Reologie.pdf>>.
9. BĚHÁLEK, Luboš. *Vstřikovací formy: Vtoková soustava*. Prezentace [online]. Oddělení tváření kovů a plastů, Katedra strojírenské technologie, Fakulta strojní, TU Liberec. 2010 [cit. 2011-05-19]. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/c8/VS.pdf>.
10. *BicycleBuys.com* [online]. 2006 [cit. 2011-05-18]. Haro Recycled Pedals. Dostupné z WWW: <<http://www.bicyclebuys.com/pedals/PedalsReg/0404844PART>>.
11. BOBČÍK, Ladislav. *Formy pro vstřikování plastů: I.díl - Vstřikování plastů*. Rekreační 1,635 00 Brno-Kníničky: [s.n.], 1998. 134 s.

12. BROUWERS, Xavier a Philippe MINIQU. *Hot Runner Manifold, nozzle and gate design considerations for successful molding of semi-crystalline polymers* [online]. European Technical Center. Geneva, Switzerland. 2010 [cit. 2011-05-19]. Dostupný z WWW: <http://www2.dupont.com/Plastics/en_US/assets/downloads/processing/Tips_hot%20runners_July2010.pdf>.
13. CAMPO, Alfredo. *Complete Part Design Handbook: For Injection Molding of Thermoplastics* [online]. Hanser Publishers. 2006 [cit. 2011-05-18]. Dostupné z WWW: <http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=1528&VerticalID=0>. ISBN 978-1-56990-375-9.
14. *Citace 2.0* [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. Vše o citování literatury a dokumentů. Dostupné z WWW: <<http://www.citace.com/>>.
15. *Creo Elements/Pro Schools Edition* [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <<http://communities.ptc.com/groups/hezky-cesky/blog/2011/02/28/creo-elementspro-studenty>>.
16. DuPont Engineering Polymers. *Engineering Polymers for electric motors* [online]. Printed in Switzerland: DuPont registered trademark. 1998 [cit. 2011-05-18]. Dostupné z WWW: <<http://plastics.dupont.com/plastics/pdflit/europe/markets/EMotors.pdf>>.
17. DuPont Engineering Polymers. *DuPont™ Delrin® acetal resin: Molding Guide* [online]. Printed in the U.S.A.: DuPont registered trademark. 2006 [cit. 2011-05-18]. Dostupné z WWW: <http://www2.dupont.com/Plastics/en_US/assets/downloads/processing/DELFIN_Mold_Guide_11_06.pdf>.
18. DURAIRAJ, Raj. *Polymer Additives* [online]. Resorcinol: Chemistry, Technology and Applications. Springer Berlin Heidelberg. 2009 [cit. 2011-05-18]. s. 527-631. Dostupné z WWW: <<http://www.springerlink.de/content/p0r6047mp3325667/>>. ISBN 978-3-540-28090-3.
19. Eurotool CZ. *Temperované vstřikovací systémy. Články*. 1995.
20. EWIKON Heißkanalsysteme GmbH & Co. KG. *EWIKON Hot Runner Systems: Product Guide* [online]. b. r. [cit. 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.ekoform.fi/download/productguide.pdf>>.
21. Fakulta strojní, Západočeská univerzita v Plzni. *Plasty*. Prezentace [online]. b. r. [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.ateam.zcu.cz/download/plasty.pdf>>.
22. FCPK Bytów Sp. z o.o. *Korpusy do form* [online]. Bytów, Poland. b. r. [cit. 2011-05-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.cecho.cz/data/ramy-forem.pdf>>.
23. *Ferona a. s.* [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. Velkoobchod s hutním materiálem. Dostupné z WWW: <http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php>.

24. FOŘT, Petr a Michal PROKEŠ. *K plastovému dílu cesta dlouhá* [online]. 2006 [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.designtech.cz/c/plm/k-plastovemu-dilu-cesta-dlouha.htm>>.
25. FREUDENBERGER, Jens, Joachim GÖLLNER, Martin HEILMAIER, Gerhard MOOK, Holger SAAGE, Vivek SRIVASTAVA, Ulrich WENDT. *Materials Science and Engineering* [online]. Springer Handbook of Mechanical Engineering, Part B. 2009 [cit. 2011-05-18]. s. 73-222. Dostupné z WWW: <<http://www.springerlink.de/content/n1546511t6714828/>>. ISBN 978-3-540-30738-9_3.
26. GE Engineering Thermoplastics. *Injection Molding Processing Guide* [online]. General Electric Plastics trademark. 1998 [cit. 2011-05-18]. Dostupné z WWW: <<http://gaetanmabile.free.fr/process/Engineering%20Thermoplastics%20Injection%20Molding%20Processing%20Guide%20-%20GE%20plastics.pdf>>.
27. Green Vitality Industry Co., Limited. *Designing for Moldability*. b. r.
28. HANDS, Philip, Stephen MORRIS, Carrie GILLESPIE, Damian GARDINER, Qasim MALIK, Catherine DOBSON. *Materials: Introduction to liquid crystals* [online]. Centre of molecular materials for photonics and electronics. Department of Engineering, University of Cambridge. b. r. [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www-g.eng.cam.ac.uk/CMMPE/lcintro.html>>.
29. HARPER, Charles. *Modern Plastics Handbook* [online]. Modern Plastics. McGraw-Hill. 2000 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=1008&VerticalID=0>. ISBN 978-0-07-026714-5.
30. *HASCO/.../HascoDigital.exe* [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <http://www.hasco.com/sk/Services-Downloads/Downloads-Documents/Standards-module/Hasco-Software/node_11804/HascoDigital.exe>.
31. *HSM Wishsino* [online]. b. r. [cit. 2011-05-18]. Polycarbonate Injection Molding. Dostupné z WWW: <<http://www.injection-molding-manufacturers.com/Polycarbonate-Injection-Molding-c16.html>>.
32. *HTH8* [online]. b. r. [cit. 2011-05-18]. MULTIBOX: Regulační jednotka pro 2 až 6 pásem. Dostupné z WWW: <<http://hth8.com/files/multibox.pdf>>.
33. *Independent Plastic, Inc.* [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. Lexan offers. Dostupné z WWW: <<http://www.independentplastic.com/documents/04-04-promo.pdf>>.
34. INKOSAS, a. s. *Titan Grade 5: Slitina titanu s prvky 6Al-4V* [online]. 2010 [cit. 2011-05-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.inkosas.cz/download/titanove-slitiny-grade/titan-grade-5.pdf>>.

35. I-Spec.com Ltd. *Compliance with IEC60950, product safety standart for IT equipment* [online]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2004 [cit. 2011-05-18]. Flammability, 3 s. Dostupné z WWW: <<http://www.i-spec.com/>>.
36. JKZ Bučovice a. s. [online]. 2010 [cit. 2011-05-19]. Dodavatel nástrojových a konstrukčních ocelí. Dostupné z WWW: <<http://www.jkz.cz/cs>>.
37. KANDUS, Bohumil. *Technologie zpracování plastů (HTZ)*. Přednášky a cvičení. Odbor technologie tváření kovů a plastů, Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojního inženýrství VUT Brno. 2009.
38. KAZMER, David. *Design with Plastic Focus: Injection Molding*. Prezentace [online]. Department of Plastics Engineering, University of Massachusetts, Lowell. b. r. [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <http://www.strojnistvo.com/arhiv/baza_znanja/Design%20with%20Plastics.pdf>.
39. LANXESS Inc. *Engineering Plastics: Material Selection* [online]. LANXESS registered trademark. Printed in U.S.A. 2007 [cit. 2011-05-18]. 72 s. Dostupné z WWW: <http://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/docguard/Material_Selection_Guide.pdf?docId=77017>.
40. LANXESS Inc. *Engineering Plastics: Part and Mold Design* [online]. LANXESS registered trademark. Printed in U.S.A. 2007 [cit. 2011-05-18]. 168 s. Dostupné z WWW: <http://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/docguard/Part_and_Mold_Design_Guide.pdf?docId=77015>.
41. LENFELD, Petr. *Technologie II: Zpracování plastů*. Skripta [online]. Oddělení tváření kovů a plastů, Katedra strojírenské technologie, Fakulta strojní, TU Liberec. 2001 [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/>.
42. Mastip Technology Ltd. *Mould Design Recommendations for Hot Runner Applications* [online]. Mastip registered trademark. 2011 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <http://www.mastip.com/ENG/Downloads/MouldDesignRecommendations_V1.02.pdf>.
43. Mastip Technology Ltd. *System Selection Guide* [online]. Mastip registered trademark. 2011 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <http://www.mastip.com/ENG/Downloads/SystemSelectionGuide_V2.05.pdf>.
44. *Praktické Náradie* [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. Stupňovité úpinky frézované z ocele. Dostupné z WWW: <<http://www.prakticke-naradie.sk/product/stupnovite-upinky-frezovane-z-ocle-931/>>.
45. *PRECEDE Group of Companies* [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. Maker of die sets, mold cavity, mold inserts Dostupné z WWW: <<http://www.precedegroup.com/products.php>>.

46. PTÁČEK, Luděk. *Úvod do materiálových věd a inženýrství (BUM): Stavba hmoty*. Přednášky [online]. Ústav materiálových věd a inženýrství, Fakulta strojního inženýrství VUT Brno. b. r. [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <ime.fme.vutbr.cz/Files/Vyuka/BUM/01-BUM.ppt>.
47. ROSATO, Dominick, Donald ROSATO, Marlene ROSATO. *Injection Molding Handbook (3rd Edition)* [online]. Springer - Verlag. 2000 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=1009&VerticalID=0>. ISBN 978-0-7923-8619-3.
48. SABIC Innovative Plastics. *Lexan* Resin 945A* [online]. SABIC Innovative Plastics trademark of SABIC Holding Europe BV. 2002 [cit. 2011-05-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.plastoplan.com/datasheets/GE-Plastics/945A.pdf>>.
49. SABIC Innovative Plastics. *Injection molding processing guide* [online]. SABIC Innovative Plastics trademark of SABIC Holding Europe BV. 2008 [cit. 2011-05-18]. Dostupné z WWW: <http://kbam.geampod.com/KBAM/Reflection/Assets/Thumbnail/12364_13.pdf>.
50. SABIC Innovative Plastics. *Lexan* EXL resin: Extreme performance to beat every environment* [online]. SABIC Innovative Plastics trademark of SABIC Holding Europe BV. 2008 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <http://kbam.geampod.com/KBAM/Reflection/Assets/Thumbnail/10845_12.pdf>.
51. SABIC Innovative Plastics. *PC Resin Product Brochure: Lexan* resin* [online]. SABIC Innovative Plastics trademark of SABIC Holding Europe BV. 2008 [cit. 2011-05-18]. Dostupné z WWW: <http://kbam.geampod.com/KBAM/Reflection/Assets/Thumbnail/6217_22.pdf>.
52. SAECHTLING, Hansjürgen, Wilbrand WOEBCKEN. *Saechtling International Plastics Handbook: For the Technologist, Engineer and User*. Třetí vydání. Cincinnati: Hanser/Gardner Publications, Inc., 1995. 644 s. ISBN 1-56990-182-1.
53. SPINA, Roberto. *Injection moulding of automotive components: comparison between hot runner systems for a case study* [online]. Journal of Materials Processing Technology, Volumes 155-156, Proceedings of the International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies: Part 2, 30 November 2004 [cit. 2011-05-19], s. 1497-1504, ISSN 0924-0136. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TGJ-4CMW2FH-4/2/6a80806378bcf1f355f2a2515808f4e4>>.
54. Synventive Molding Solutions. *Hot runner guide: Layout and Design* [online]. Trademark of Synventive Molding Solutions. 2008 [cit. 2011-05-18]. Dostupné z WWW: <http://www.synventive.com/uploadedFiles/Products/Hot_Runner_Systems/Manifolds/PDFs/MK-PRM.BRM.GB-P.HRGD01.pdf>.

55. Synventive Molding Solutions. *Hot Runner System Solutions: Instruction Manual* [online]. 2011 [cit. 2011-05-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.synventive.com/hot-runner-instruction-manual.aspx>>.
56. Synventive Molding Solutions. *Hot Runner Technology: Examples of Hot Runners in use* [online]. Trademark of Synventive Molding Solutions. 2008 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <http://www.synventive.com/uploadedFiles/Products/Hot_Runner_Systems/Manifolds/PDFs/MK-PRM.BRM.GB-HRAPPL.pdf>.
57. Synventive Molding Solutions. *Series 04 C01: Manifold Nozzles, Face Fit* [online]. Trademark of Synventive Molding Solutions. 2009 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <http://www.synventive.com/uploadedFiles/Products/Hot_Runner_Systems/Nozzles/PDFs/MK-PRM.BRM.GB-P.I04C01.pdf>.
58. ŠVORČÍK, Václav. *Polymery „stručně“* [online]. Ústav inženýrství pevných látek, Fakulty chemické technologie, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. b. r. [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>>.
59. Technology Upgradation and Skill Development Company. *Multi-cavity Molds* [online]. 2010 [cit. 2011-05-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.tusdec.org.pk/projects/gtdmc/solutions/tutorials/tl/tl-3.pdf>>.
60. The University of Sydney. *Multi-cavity Molds* [online]. Australia. 2006 [cit. 2011-05-19]. Dostupný z WWW: <http://www.physics.usyd.edu.au/super/life_sciences/PM/PM5.pdf>.
61. UNGER, Peter. *Hot Runner Technology* [online]. Hanser Publishers. 2006 [cit. 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=3563&VerticalID=0>. ISBN 978-1-56990-395-7.
62. VALDIVIA, Peter. *Fabrication of Plastics* [online]. 2009 [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.petervaldivia.com/technology/plastics/fabrication-of-plastic.php>>.
63. VANĚK, Vladimír. *Materiály a Technologie I: Plasty* [online]. Katedra technické pracovní výchovy, Pedagogická fakulta, Ostravská Univerzita. 2005 [cit. 2011-05-18]. 60 s. Dostupné z WWW: <http://files.pazderalev.webnode.cz/200000145-01a2b029c2/Textov%C3%A1_opora-PLASTY2005.doc>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
2D	Dvou dimenzionální	[-]
3D	Tří dimenzionální	[-]
ABS	Termopolymer akrylonitrilu, butadienu a styrenu	[-]
a_{eff}	Měrná teplotní vodivost polymeru	$[mm^2 \cdot s^{-1}]$
aj.	a jiné	[-]
apod.	a podobně	[-]
A_{proj}	Plochy průmětu jedné tvarové dutiny do dělicí roviny	$[cm^2]$
atd.	a tak dále	[-]
BEM	Boundary element method	[-]
C	Výpočet konečné ceny plastového dílce	$[Kč/ks]$
CAD	Computer-aided design	[-]
CAE	Computer-aided engineering	[-]
C_E	Cena elektrické energie	$[Kč/kWh]$
C_M	Cena materiálu Lexanu	$[Kč/kg]$
C_P	Měrná tepelná kapacita polymeru	$[J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}]$
CTI	Comparative tracking index	[-]
DCS	Differential scanning calorimetry	[-]
DOP	Dioktylfталát	[-]
D_s	Průměr šneku vstřikovacího stroje	$[mm]$
EUROMAP	European Plastics and Rubber Machinery	[-]
f_c	Celková délka dráhy toku taveniny	$[mm]$
FEM	Finite element method	[-]
F_p	Přisouvací síla	$[kN]$
F_u	Uzavírací síla	$[kN]$
G	Modul pružnosti ve smyku	$[MPa]$
\dot{G}	Průchodu taveniny ze stroje do formy	$[kg/hod]$
HDPE	High density polyethylene	[-]
K_a	Faktor navýšení objemu taveniny Lexanu	$[g/cm^3]$
$K_{\check{c}}$	Koeficient využití času	[-]
K_D	Náklady na celou sérii plastových dílců, závislé na dílci	$[Kč]$
K_f	Faktor schopnosti tečení Lexanu	$[bar/mm]$
K_S	Koeficient opotřebení stroje	[-]
K_Z	Koeficient zmetkovitosti	[-]
L	Délka zahřátých horkých trysek na pracovní teplotu T_m	$[mm]$
LDPE	Low density polyethylene	[-]
LOI	Limiting oxygen index	[-]
L_r	Délka nezahřátých horkých trysek	$[mm]$
L_S	Délka dráhy pohybu šneku	$[mm]$
m_d	Hmotnost jednoho plastového dílce	$[g]$
M	Šířka rozváděcího bloků horké vtokové soustavy	$[mm]$
M_S	Strojní náklady, sazba za hodinu provozu stroje	$[Kč/hod]$
n	Násobnost vstřikovací formy	[-]
N	Velikost výrobní série	$[ks]$
N_{OS}	Odpisy z pořizovacích nákladů stroje po dobu výroby série	$[Kč]$
N_{OSR}	Odpisy z pořizovacích nákladů vstřikovacího stroje	$[Kč/rok]$
N_R	Obecné, společné náklady, režie a další náklady	$[Kč]$

Označení	Legenda	Jednotka
n_s	Počet otáček šneku vstřikovacího stroje při plastikaci	$[min^{-1}]$
N_s	Náklady na vstřikovací stroj	$[Kč]$
p	Vnější tlak	$[MPa]$
PA	Polyamid	$[-]$
PA6	Polyamid 6	$[-]$
PA66	Polyamid 66	$[-]$
PBT	Polybutylen tereftalát	$[-]$
PC	Polykarbonát	$[-]$
p_{d1}	Tlak v první fázi dotlaku	$[MPa]$
p_{d2}	Tlak ve druhé fázi dotlaku	$[MPa]$
PE	Polyetylen	$[-]$
PET	Polyethylentereftalát	$[-]$
p_f	Minimální plnicí tlak	$[bar]$
PF	Fenoplast	$[-]$
P_{ch}	Chladicí výkon	$[W \cdot m^2]$
p_i	Vnitřní tlak	$[MPa]$
PMMA	Polymethylmetakrylát	$[-]$
PP	Polypropylen	$[-]$
PPO	Polyfenylenoxid	$[-]$
PS	Polystyren	$[-]$
P_s	Příkon stroje	$[kW]$
PTFE	Polytetrafluoretylen	$[-]$
PUR	Polyuretan	$[-]$
p_v	Vstřikovací tlak	$[bar]$
PVC	Polyvinylchlorid	$[-]$
p_z	Zbytkový tlak	$[MPa]$
Q	Teplo vnesené taveninou plastu do formy	$[kJ/hod]$
Q_C	Obchodní přírážky (+) nebo sražky (-) z ceny	$[\%]$
Q_{ch}	Teplo odebírané při chlazení	$[J \cdot m^2]$
Q_{tav}	Teplo dodané tavenině	$[J]$
s	Tloušťka plastového dílce/ mezery ve tvarové dutině	$[mm]$
S	Výpočet vlastních nákladů na jeden plastový dílec	$[Kč/ks]$
SAN	Styrenakrylonitril	$[-]$
SBR	Butadien-styrénový kaučuk	$[-]$
s_k	Dráha pohybu šneku	$[mm]$
s_N	Dráha pohybu nástroje	$[mm]$
t	Čas	$[s]$
T	Teplota	$[°C]$
t_d	Doba dotlaku	$[s]$
t_D	Doba splnění dodávky	$[dnů]$
t_{d1}	Doba první fáze dotlaku	$[s]$
t_{d21}	Doba první části druhé fáze dotlaku	$[s]$
t_{d22}	Doba druhé části druhé fáze dotlaku	$[s]$
T_e	Teplota plastového dílce při odformování	$[°C]$
T_f	Teplota viskózního toku	$[°C]$
T_{fy}	Teplota vytemperované vstřikovací formy	$[°C]$
t_F	Doba výroby vstřikovací formy	$[hod]$
T_F	Doba výroby formy s násobností 1	$[hod]$
T_g	Teplota skelného přechodu	$[°C]$

Označení	Legenda	Jednotka
t_{hvs}	Doba setrvání taveniny v horké vtokové soustavě	[s]
t_{ch}	Doba chlazení	[s]
t_K	Doba potřebná pro konstrukci vstřikovací formy	[dnů]
t_m	Doba po kterou je nástroj otevřen během vyhazování	[s]
T_m	Teplota taveniny polymeru	[°C]
t_n	Vedlejší čas	[s]
T_p	teplota vysušeného granulátu polymeru	[°C]
T_P	Doba výroby, zhotovení celé série plastových dílců	[hod]
t_{pl}	Doba plastikace	[s]
T_S	Strojní čas, doba chodu stroje	[hod]
t_{s1}	Doba uzavírání nástroje	[s]
t_{s2}	Doba po uzavření nástroje a před počátkem plnění	[s]
t_{s3}	Doba otevírání nástroje	[s]
t_v	Doba plnění tvarové dutiny formy	[s]
tzň.	to znamená	[-]
$T_{\text{ŽS}}$	Předpokládaná doba životnosti stroje	[rok]
UV	Ultraviolet	[-]
v	Měrný objem	[cm ³ /g]
V	Objem taveniny v jedné tvarové dutině vstřikovací formy	[cm ³]
V_D	Velikost vstřikovaného objemu taveniny	[cm ³]
V_h	Objem taveniny v kanálcích horké vtokové soustavy	[cm ³]
V_v	Vstřikovaný objem taveniny polymeru	[mm ³]
v_v	Vstřikovací rychlost	[cm ³ /s]
W_F	Náklady na vstřikovací formu	[Kč]
W_{HVS}	Cena horké vtokové soustavy	[Kč]
W_{ZF}	Cena výroby desek, ostatních součástí formy a normálií	[Kč]
XRD	X-ray diffraction	[-]
Z	Mezera mezi distančními podložkami rozváděcího bloku	[mm]
Z_C	Výrobní zisk	[%]
α_1	Koeficient teplotní roztažnosti oceli 1.2311	[K ⁻¹]
$\dot{\gamma}$	Smyková rychlost	[s ⁻¹]
δ	Úhlu zkroucení vzorku	[°]
Δh	Rozdíl entalpií plastu mezi teplotami T_m a T_e	[kJ/kg]
ΔT_1	Rozdíl teplot horké vtokové soustavy a zahřáté formy	[°C]
ΔT_2	Rozdíl teplot rozváděcího bloku při prac. teplotě a za studena	[°C]
$\varepsilon_{0,05}$	Poměrné prodloužení 0,05 %	[%]
$\varepsilon_{0,25}$	Poměrné prodloužení 0,25 %	[%]
η	Dynamická viskozita taveniny polymeru	[Pa·s]
v_S	Maximální obvodová rychlost šneku	[m/s]
ρ	Hustota polymeru	[g/cm ³]
ρ	Hustota Lexanu 945A	[g/cm ³]
$\sigma_{0,05}$	Napětí při 0,05 % poměrného prodloužení	[MPa]
$\sigma_{0,25}$	Napětí při 0,25 % poměrného prodloužení	[MPa]
τ	Smykové napětí	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1.1	Plastové dílce vyrobené vstřikováním polykarbonátu [10] [31]	11
Obr. 2.1	Popis zadané součásti, držáku uhlíků	12
Obr. 3.1	Názvosloví plastů [38]	14
Obr. 3.2	Rozdělení technických materiálů [37]	15
Obr. 3.3	Molekuly plastů [21]	15
Obr. 3.4	Přerušení Van der Waalových vazeb [24]	16
Obr. 3.5	Vznik PET při polykondenzaci [25]	16
Obr. 3.6	Mikrostruktura plastů [38]	17
Obr. 3.7	Sférolitická struktura semikrystalických plastů [25] [41]	18
Obr. 3.8	Schéma orientace struktur [28]	18
Obr. 3.9	Průběh ohřevu semikrystalického plastu [25]	18
Obr. 3.10	Porovnání přechodových teplot termoplastu [21] [37]	19
Obr. 3.11	Změna rozměrů plastového dílce v čase vlivem smrštění [11]	20
Obr. 3.12	Vliv vybraných činitelů na velikost smrštění [11]	20
Obr. 3.13	El. modul vs. hustota [25]	21
Obr. 3.14	El. modul vs. nárazová práce [25]	21
Obr. 3.15	Modul pružnosti vs. poměrné prodloužení [25]	21
Obr. 3.16	Modul pružnosti vs. teplota [25]	22
Obr. 3.17	Barviva [39]	23
Obr. 4.1	Vstřikování [24]	24
Obr. 4.2	Zjednodušené schéma vstřikovacího stroje [3]	24
Obr. 4.3	Vstřikovací forma - rozložený pohled a popis [17]	25
Obr. 4.4	Vstřikovací cyklus [62]	26
Obr. 4.5	Vstřikovací cyklus v grafu [41]	27
Obr. 4.6	Redukce tloušťky tvarové dutiny [1]	28
Obr. 4.7	Vhodný rozsah plnicích časů [1]	28
Obr. 4.8	Zhušťování polymeru během	29
Obr. 4.9	Zjednodušená schémata jednotlivých kroků vstřikovacího cyklu [3]	30
Obr. 4.10	Dvoudesková forma se studenou vtokovou soustavou [3]	31
Obr. 4.11	Tokové podmínky v tocích různého průřezu [40]	32
Obr. 4.12	Vtokové ústí a přetok [40]	32
Obr. 4.13	Spirálové chlazení formy [40]	32
Obr. 4.15	Třidesková vícenásobná forma, pohyb a popis vyhazovacího systému [40]	33
Obr. 4.14	Nátrubek chlazení formy [40]	33
Obr. 4.16	Odvzdušňovací drážka [40]	33
Obr. 4.17	Průnik taveniny do dělicí roviny [27]	34
Obr. 4.18	Forma s externě vytápěnou horkou vtokovou soustavou [13]	34
Obr. 4.19	Vstřikovací forma [39]	35
Obr. 5.1	Externě vyhřívaná horká vtoková soustava [13]	37
Obr. 5.2	Způsoby využití horkých trysek [54]	38
Obr. 5.3	Izolovaná horká vtoková soustava [9]	38
Obr. 5.4	Vnitřně vyhřívaná horká vtoková soustava [13]	39
Obr. 5.5	Stagnační zóny v horké vtokové soustavě [40]	40
Obr. 5.6	Typy vtokových ústí externě vyhřívaných horkých trysek [40]	40
Obr. 5.7	Porušení sousosty kanálků při spojení dosednutím čela [61]	40
Obr. 5.8	Spojení horké trysky se závitem [61]	41
Obr. 5.9	Tepečná izolace externě vyhřívaných horkých vtokových soustav [54]	41
Obr. 5.10	Řez horkou tryskou s vtokovým ústím ovládaným pomocí ventilu [9]	42

Obr. 6.1 Správné chlazení tvarových dutin formy z hlediska proudění a přenosu tepla [53] ..	46
Obr. 6.2 Natočení vláken nebo molekul podle změny průřezu [29].....	47
Obr. 6.3 Zborcení plastu po chladnutí [47].....	47
Obr. 6.4 Simulace dynamicky řízeného plnění formy s tvarovými dutinami různého tvaru [53]	48
Obr. 6.5 Optimalizovaný průběh křivky tlaku v závislosti na čase při dotlaku [29].....	48
Obr. 7.1 Zadaný plastový dílec.....	49
Obr. 7.2 Umístění vtokových ústí vzhledem ke tvaru plastového dílce	49
Obr. 7.3 Transparentní Lexan polykarbonát [60]	50
Obr. 7.4 Srovnání rozmezí LOI různých typů plastů.....	52
Obr. 7.5 Určení délky tokových drah taveniny.....	52
Obr. 7.6 Tokové modely různých druhů tekutin [60].....	53
Obr. 7.7 Externě vyhřívaná horká vtoková soustava, řez horkou polovinou formy [42]	54
Obr. 7.8 Jetting a správné	54
Obr. 7.9 Příklady užití Lexanu [50].....	55
Obr. 7.10 Teploty pro zpracování základní modifikace Lexanu pomocí technologie vstřikování [51].....	56
Obr. 7.11 Vývoj materiálu při užití 40% recyklátu [48].....	58
Obr. 7.12 Šnek plastikační jednotky vhodný pro amorfní plasty [49].....	58
Obr. 8.1 Příklady vložek tvarové dutiny formy [45]	59
Obr. 8.2 Elektrické přípojky na horké polovině formy [20].....	60
Obr. 8.3 Rozdíl v konstrukci horké poloviny formy při použití ventilových horkých trysek [43].....	60
Obr. 8.4 Různé tvary rozváděcích kanálků ve vyhřívaném bloku horké vtokové soustavy [12]	61
Obr. 8.5 Stagnační zóny v horké vtokové soustavě při užití vnitřního topného tělesa (vlevo) a při užití externě vyhřívané ventilové trysky (vpravo) [12].....	61
Obr. 8.6 Rozložený pohled a popis sestavení horké vtokové soustavy [43]	62
Obr. 8.7 Virtuální 3D model plastového dílce pro návrh vstřikovací formy	63
Obr. 8.8 Návrh horního bloku tvarové dutiny	64
Obr. 8.9 Návrh spodního bloku tvarové dutiny	65
Obr. 8.10 Skica horké vtokové soustavy	65
Obr. 8.11 Schéma zvoleného typu externě vytápěné horké trysky [57].....	66
Obr. 8.12 Návrh vstřikovací formy, rozložený 3D pohled	66
Obr. 8.13 Upravený 3D model plastového dílce s úkosy a zaoblenými hranami.....	67
Obr. 8.14 Maximální dráha toku taveniny vyznačená žlutou křivkou	68
Obr. 8.15 Čas plnění	71
Obr. 8.16 Místa uzavření vzduchu.....	72
Obr. 8.17 Poloha studeného spoje a pravděpodobnost vyplnění	72
Obr. 8.18 Předpověď kvality plastového dílce	73
Obr. 8.19 Volba polohy vtokových ústí.....	73
Obr. 8.20 Čas plnění - po posunutí vtoků.....	74
Obr. 8.21 Poloha studeného spoje a pravděpodobnost vyplnění - po posunutí vtoků.....	74
Obr. 8.22 Vzduchové bubliny - po posunutí vtoků	75
Obr. 8.23 Horní polovina bloku tvarové dutiny (Core).....	75
Obr. 8.24 Spodní polovina bloku tvarové dutiny (Cavity)	76
Obr. 8.25 Chlazení horní poloviny formy	77
Obr. 8.26 Chlazení spodní poloviny formy	78
Obr. 8.27 Horní polovina tvarových dutin a horká vtoková soustava	78
Obr. 8.28 Schematická sestava horké vtokové soustavy	79

Obr. 8.29 Otvor a drážky pro horkou vtokovou soustavu	79
Obr. 8.30 Horka vtoková soustava jako prodloužení plastikační jednotky	80
Obr. 8.31 Vyhazovací systém ve studené polovině formy	80
Obr. 8.32 Vyhazovací systém ve studené polovině formy (2).....	81
Obr. 8.33 Vstřikovací forma - přenášeční prvky	81
Obr. 8.34 Vstřikovací forma - upínací a připojovací prvky.....	82
Obr. 9.1 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 370 U [7].....	85
Obr. 9.2 Volba vstřikovacího stroje Arburg Allrounder řady U [5].....	85
Obr. 9.3 Použitelná plocha stolu po vyjmutí sloupů [4]	86
Obr. 9.4 Stupňovitá upínka [44]	86

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Vybrané fyzikální, mechanické a procesní vlastnosti [8] [48]	12
Tab. 3.1 Vybrané příklady široce používaných polymerů a jejich označení [25] [63]	14
Tab. 3.2 Stupeň krystalinity polymerů [25]	17
Tab. 3.3 Hlavní teploty vybraných plastů [25]	19
Tab. 7.1 Třídy nehořlavosti dle UL94 [35]	51
Tab. 9.1 Kontrola parametrů vstřikovacího stroje Allrounder 370 U 700-290 [4] [50]	84
Tab. 9.2 Parametry vstřikování [37] [51]	86

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Tabulky složení, označení a vlastností plastů [25]
Příloha 2	Vybrané druhy konstrukcí vstřikovacích forem [13]
Příloha 3	Oceli používané pro součásti vstřikovacích forem [36]
Příloha 4	Výkres zadaného plastového dílce
Příloha 5	Grafické znázornění vybraných vlastností Lexanu [51]
Příloha 6	Pracovní prostředí programů Pro Engineer, Inventor a HascoDigital
Příloha 7	Výstupní protokoly ze simulací plnění tvarové dutiny
Příloha 8	Materiálové hodnoty pro technologický výpočet vstřikování [37]
Příloha 9	Skica pro Synventive
Příloha 10	Multibox: Regulátor pro ohřev externě vytápěných vtokových soustav [32]
Příloha 11	Ceny vstřikovacích strojů ARBURG řady U (2010)

SEZNAM VÝKRESŮ

4-DP-6/00-D	Výkres plastového dílce
1-DP-6/00-H	Výkres sestavy horké poloviny formy
1-DP-6/00-S	Výkres sestavy studené poloviny formy
4-DP-6/00-K	Listy kusovníku
2-DP-6/08	Výkres spodní části tvarového bloku
2-DP-6/09	Výkres horní části tvarového bloku

Příloha 1 – Tabulky složení, označení a vlastností plastů [25]

Table 3.44 Examples of widely used polymer materials and their abbreviations, characteristic backbone units, element groups within the backbone, and trademarks

Polymer	Backbone unit	Backbone	Trademarks
Organic polymers			
Polyethylene (PE)	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	$-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-$	Polythen, Lupolen, Hostalen
Polypropylene (PP)	$-\text{CH}_2-(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-$	$-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-$	Hostalen, PPH, Luparen
Polyvinylchloride (PVC)	$-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$	$-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-$	Hostalit, Vinidur, Vinylite
Polystyrene (PS)	$-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-$	$-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-$	Styroflex, Vestyron, Styropor (foam)
Polytetrafluorethylene (PTFE)	$-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$	$-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-$	Teflon, Hostaflon
Polyamide (PA)	$-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_6-$	$-\text{C}-\text{N}-\text{C}-\text{C}-$	Nylon, Perlon
Polyethylene terephthalate (PET)	$-\text{O}-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	$-\text{C}-\text{O}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-$	Trevira (fiber), Diolen, Mylar (folie)
Polyurethan (PUR)	$-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-$	$-\text{C}-\text{C}-\text{N}-\text{C}-\text{O}-\text{C}-\text{C}-$	
Polycarbonate (PC)	$-\text{O}-\text{CO}-\text{O}-\text{R}$	$-\text{C}-\text{O}-\text{C}-\text{C}-$	
Polyphenylene sulfide (PPS)	$-\text{C}_6\text{H}_4-\text{S}-$	$-\text{C}-\text{S}-\text{C}-$	Noxon, Ryton, Sulfar (fiber)
Inorganic polymers			
Polyphosphazene	$-\text{N}=\text{PCL}_2-$	$-\text{N}=\text{P}-$	
Polysiloxane (polydimethylsiloxane)	$\text{O}-\text{Si}(\text{CH}_3)_2-\text{O}-$	$-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$	
Polysilane		$-\text{Si}-\text{Si}-\text{Si}-\text{Si}-$	

Table 3.48 Selected standard mechanical testing methods for polymer materials

Standard	Testing method
ISO 178:2001	Plastics – Determination of flexural properties
ISO 179-1:2000	Plastics – Determination of Charpy impact properties; Part 1: Noninstrumented impact test
ISO 179-2:1997	Plastics – Determination of Charpy impact properties; Part 2: Instrumented impact test
ISO 180:2000	Plastics – Determination of Izod impact strength
ISO 527-1:1993	Plastics – Determination of tensile properties; Part 1: General principles
ISO 527-2:1993	Plastics – Determination of tensile properties; Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics
ISO 527-3:1995	Plastics – Determination of tensile properties; Part 3: Test conditions for films and sheets
ISO 6721-1:2001	Plastics – Determination of dynamic mechanical properties; Part 1: General principles
ISO 6721-2:1994	Plastics – Determination of dynamic mechanical properties; Part 2: Torsion-pendulum method
ISO 899-1:2003	Plastics – Determination of creep behavior; Part 1: Tensile creep
ISO 899-2:2003	Plastics – Determination of creep behavior; Part 2: Flexural creep by three-point loading
ISO 8256:2004	Plastics – Determination of tensile-impact strength
ISO 2039-1:2001	Plastics – Determination of hardness; Part 1: Ball indentation method
ISO 868:2003	Plastics and ebonite – Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)

Table 3.49 Properties of common polymer materials

Material	Density (g/cm ³)	Young's Modulus (GPa)	Ball indentation hardness	Izod A at room temperature (kJ/m ²)
LDPE	0.92	0.2	50 *	2–35
HDPE	0.95	1	50 *	2–35
PP	0.9	1.5	70	3–10
PA 6,6	1.1	3	160	5–90
PVC	1.4	3	110	4; 40–70 **
PS	1.05	3.2	150	2–15
PC	1.2	2.5	110	80
ABS	1.05	3	95	10–35
PMMA	1.19	3.3	200	3
PTFE	2.1	0.75		16

* Shore D; ** with plasticizer

Příloha 2 – Vybrané druhy konstrukcí vstřikovacích forem [13]

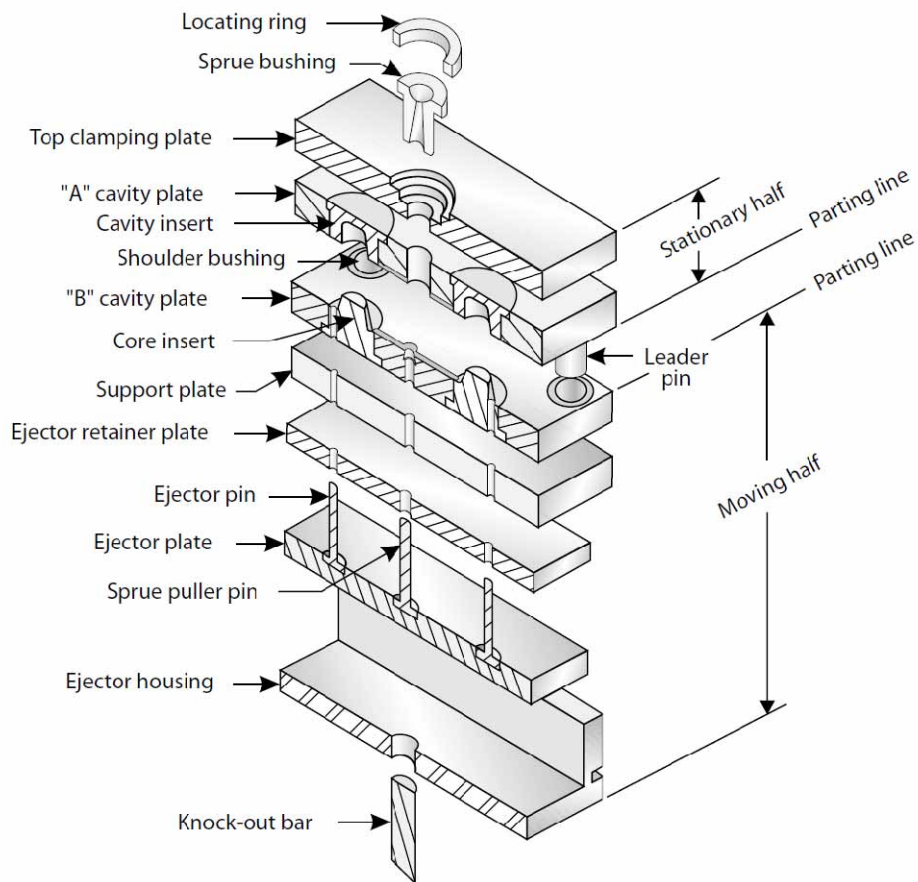


Figure 10-7 Two-plate mold and components (cross section)

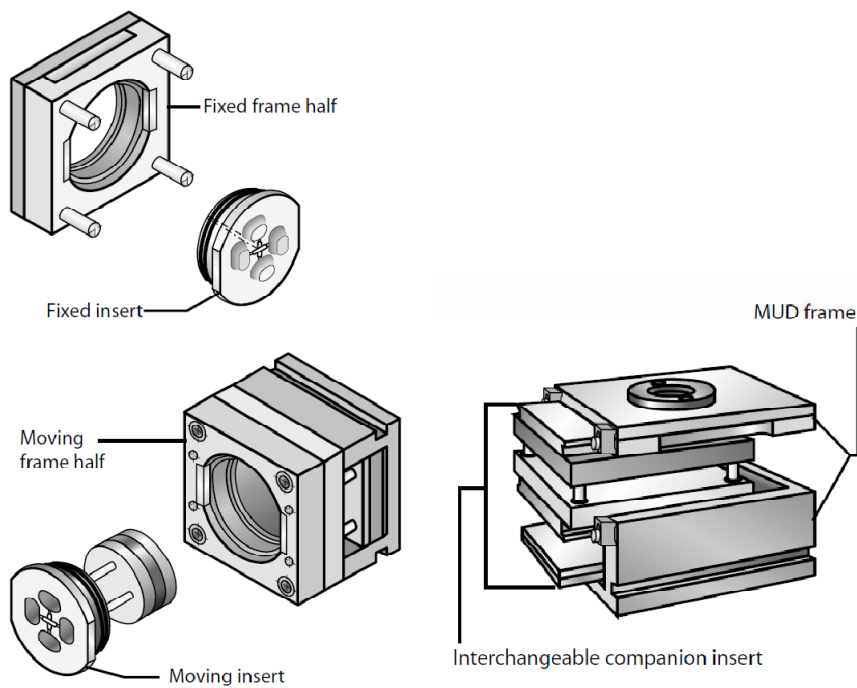


Figure 10-8 Round Mate® frame and interchangeable cavity inserts

Figure 10-9 MUD mold frame and interchangeable cavity inserts

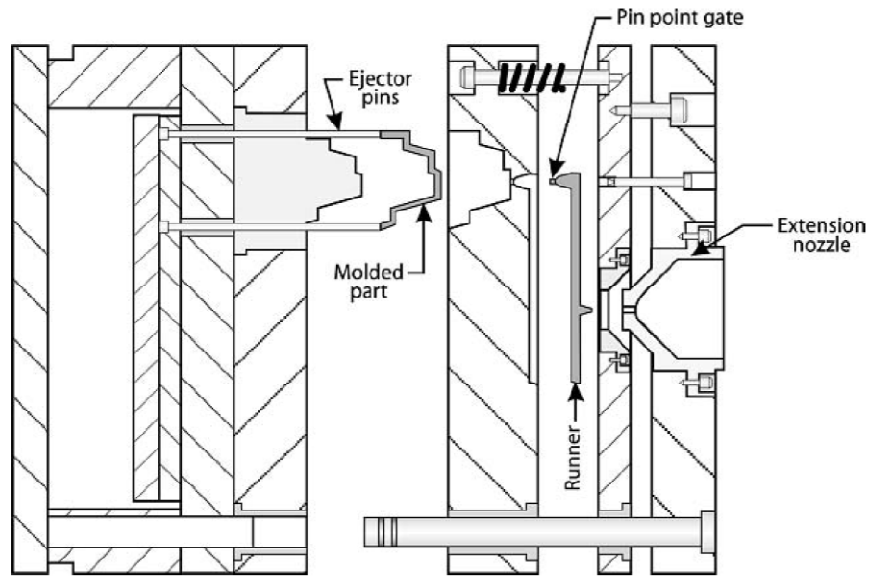


Figure 10-10 Three-plate mold cold runner system

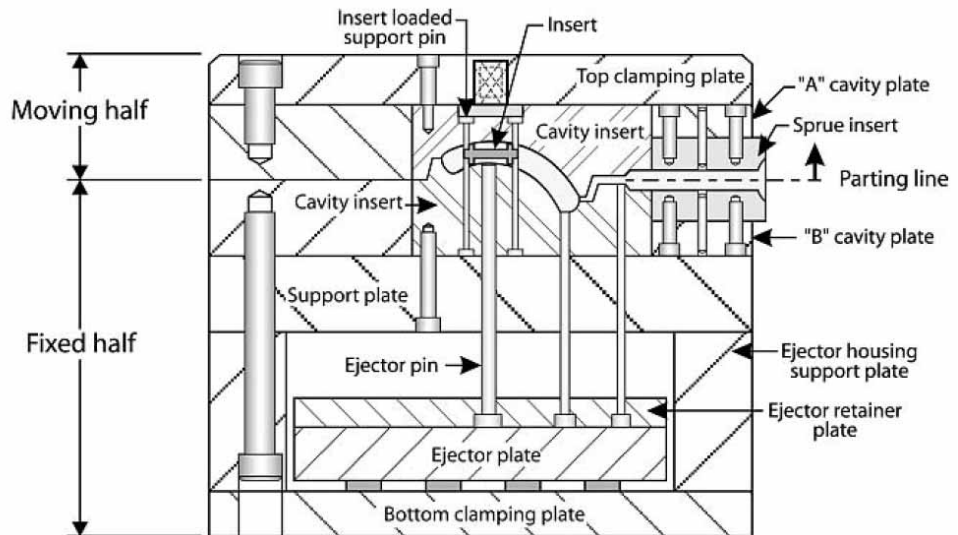


Figure 10-12 Vertical clamp, horizontal injection unit

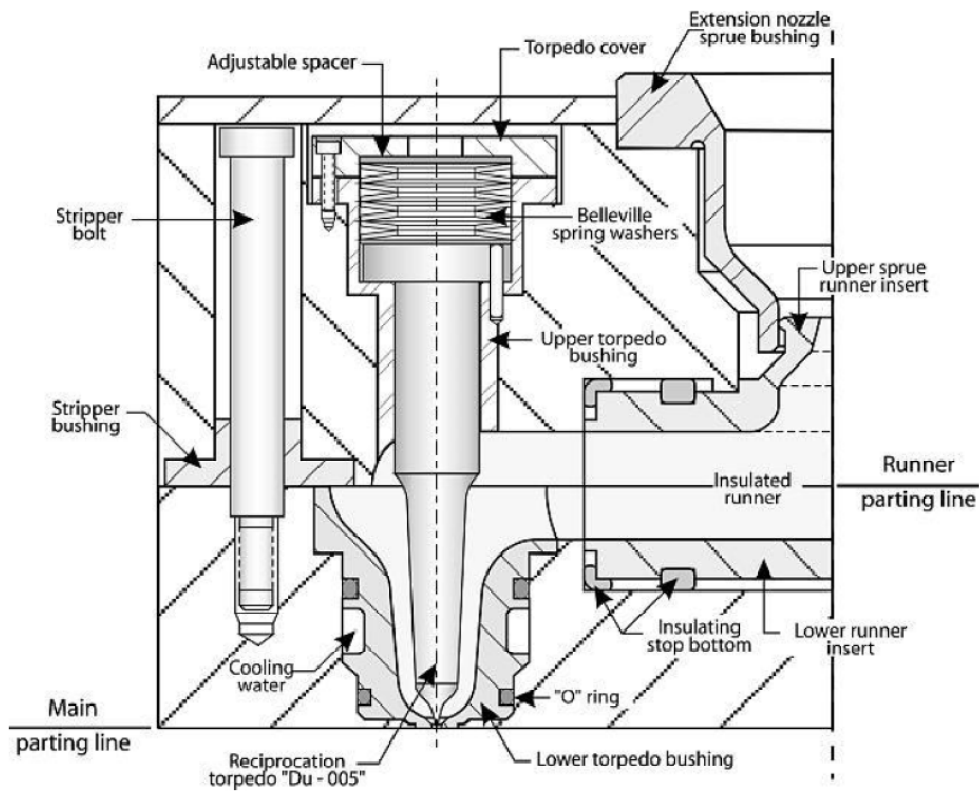


Figure 10-24 Du Pont insulated hot runner reciprocating system

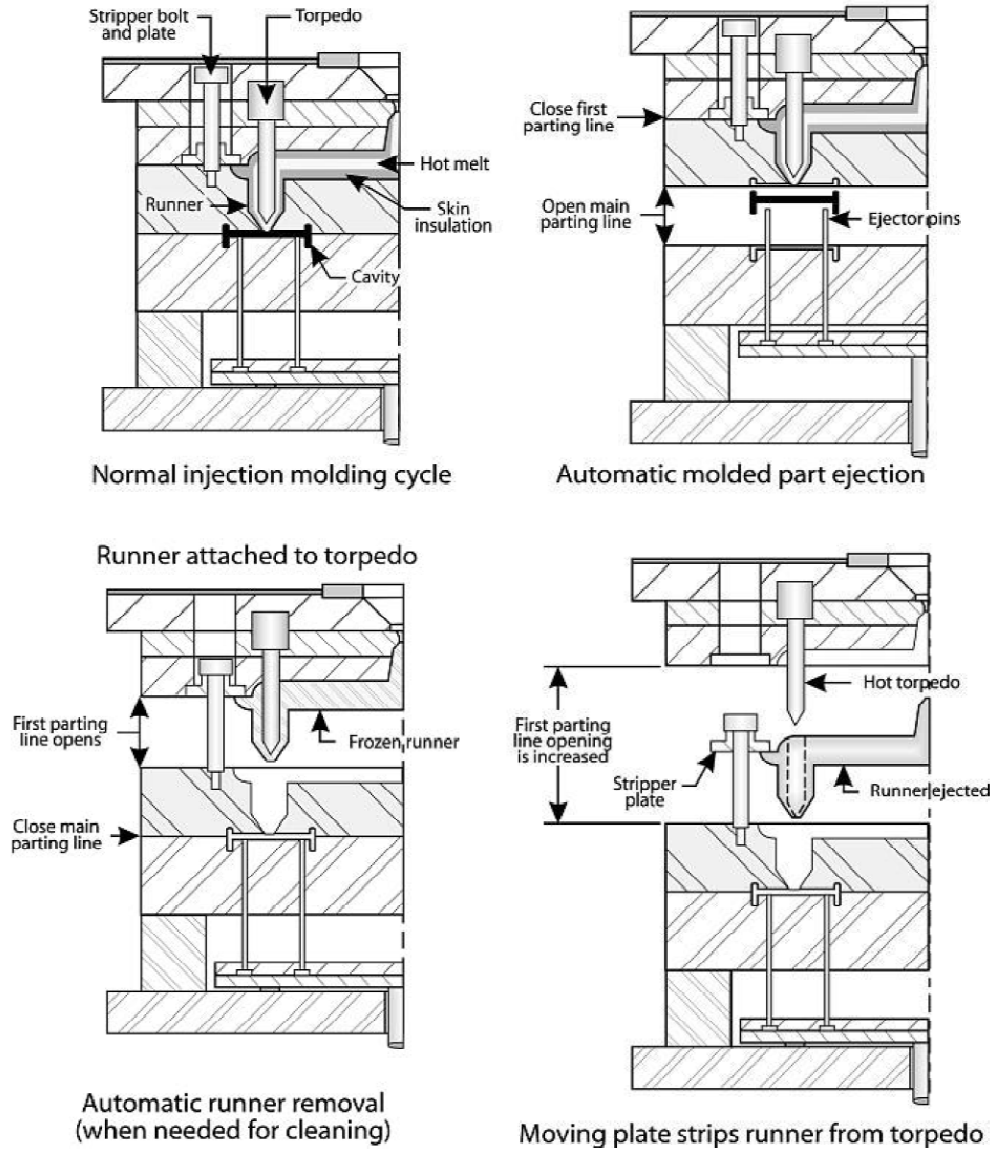


Figure 10-25 Du Pont insulated runner mold operational sequence

Příloha 3 – Oceli používané pro součásti vstřikovacích forem

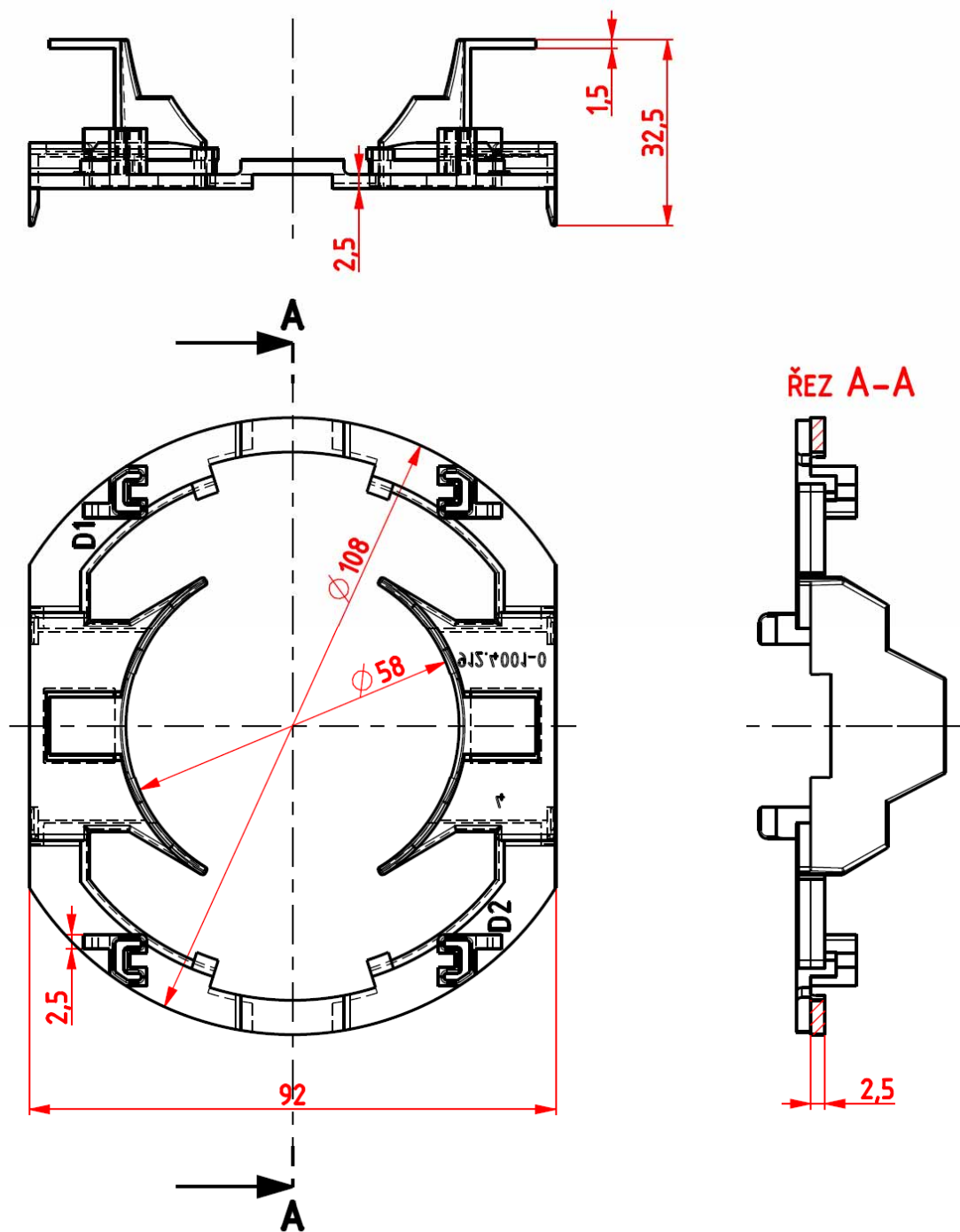
Tab. 1 Vybrané nástrojové a konstrukční oceli pro součásti vstřikovacích forem [36]

Označení číselné a podle chemického složení, příp. mechanických vlastností dle EN		Označení dle ČSN	Charakteristika a použití
1.2083	X42Cr13	17 024	Korozivzdorná, martenzitická ocel s vysokým obsahem chromu. Vykazuje výbornou odolnost proti opotřebení, dobrou obrobiteľnosť a leštiteľnosť. Formy pro zpracování chemicky agresivních plastů.
1.2316	X36CrMo17	17 137	Cr-Mo ocel ke kalení v oleji s dobrou pevností za tepla. Korozivzdorná s výbornou odolností proti opotřebení, dobrou obrobiteľností a leštiteľností. Použití pro formy pro zpracování chemicky agresivních plastických hmot, pro rozváděcí bloky horkých vtokových soustav.
1.1730	C45W	19 083	Uhlíková nástrojová ocel vyznačující se dostatečnou tvrdostí zákalné vrstvy, vysokou houževnatostí, a dobrou obrobiteľností v žíhaném stavu. Na kalené součásti forem např. upínací desky, rozpěrky, pouzdra, sloupky, dorazy, pružící součástky a výrobky apod.
1.2842	90MnCrV8	19 312	Mn-Cr-Va ocel ke kalení v oleji, zvláště dobrá stálost rozměrů při tepelném zpracování, dobrá odolnost proti opotřebení, dobrá leštiteľnosť a dobrá obrobiteľnosť v žíhaném stavu. Malé dílce forem pro tváření plastů a pryže.
1.2210	115CrV3	19 421	Cr-Va ocel ke kalení v oleji a ve vodě, poměrně dobrá houževnatost při vysoké tvrdosti, dobrá odolnost proti opotřebení a dobrá obrobiteľnosť v žíhaném stavu. Na pomocné části forem např. vyhazovače, kolíky apod.
1.2162	21MnCr5	19 487	Mn-Cr ocel k cementování, s velkou tvrdostí cementované vrstvy, s vysokou pevností v jádře, dobrou obrobiteľností v žíhaném stavu a dobře se leští. Pro formy pro tváření plastů a pryží s požadavkem na vyšší pevnost v jádře.
1.2311	42CrMnMo7	19 520	Cr-Mn-Mo ocel ke kalení na vzduchu s dobrou pevností za tepla. Je dobře tvárná za tepla a dobře obrobiteľná ve stavu žíhaném na měkko. Vhodná pro tepelně namáhané rozváděcí bloky horkých vtokových soustavy vstřikovacích forem.
1.2312	40CrMnMoS86	19 520	Cr-Mn-Mo ocel ke kalení na vzduchu nebo v oleji s dobrou pevností za tepla, dobře obrobiteľná jak ve stavu žíhaném na měkko, tak i ve stavu zušlechťeném. Má dobrou leštiteľnosť a lze ji cementovat. Velké a střední formy pro zpracování plastů pod tlakem.

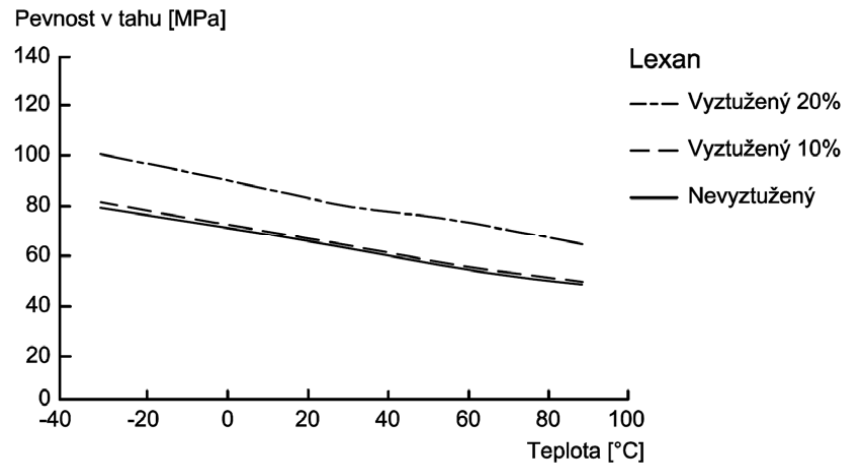
Tab. 2 Vybrané nástrojové a konstrukční oceli pro součásti vstřikovacích forem – pokr. [36]

Označení číselné a podle chemického složení, příp. mechanických vlastností dle EN		Označení dle ČSN	Charakteristika a použití
1.2343	X38CrMoV51	19 552	Cr-Mo-Si-Va ocel ke kalení v oleji a na vzduchu, vysokou pevností za tepla a odolností proti popuštění, velmi dobrou houževnatostí, s velmi malou citlivostí na prudké změny teploty, dobře obrobitelná v žíhaném stavu. Pro formy na pevné a pohyblivé díly, jádra a jiné části forem.
1.2344	X40CrMoV51	19 554	Cr-Mo-Va-Si ocel ke kalení v oleji a na vzduchu, s vysokou pevností za tepla a odolností proti popuštění i otěru, velmi dobrou houževnatostí, dále odolnosti proti vzniku trhlinek tepelné únavy, dobře obrobitelná v žíhaném stavu. Vhodná pro funkční části forem, jako jádra.
1.2379	X155CrVMo121	19 573	Cr-Mo-Va ocel ke kalení v oleji a na vzduchu, se zvlášť vysokou odolností proti opotřebením, dobrá řezivost, velmi vysoká pevnost v tlaku, nižší houževnatost, vhodná k nitridování, má zhoršenou obrobitelnost v žíhaném stavu. Pro velmi namáhané části forem.
1.2767	X45NiCrMo4	19 655	Cr-Ni-W-Mo ocel ke kalení v proudu vzduchu, vysokou tvrdostí po kalení, zvlášť dobrou houževnatostí, poměrně dobrou odolnost proti opotřebením stálostí rozměrů při tepelném zpracování a mírně zhoršenou obrobitelností v žíhaném stavu. Pro velké tvárnice a tvárnice forem na plasty, a dále elementy horkých vtokových soustav.
1.0553	S355J0	11 523	Nelegovaná konstrukční jemnozrnná ocel vhodná ke svařování. Pro méně namáhané části forem.
1.1191	C45E	12 050	Uhlíková ocel k zušlechťování a povrchovému kalení. Vhodná pro spojovací součásti, apod.
1.7131	16MnCr5	14 220	Ušlechtilá konstrukční Mn-Cr ocel k cementování, dobře obrobitelná a svařitelná, pro zušlechťování do průměru 35 mm. Pro sloupky a pouzdra forem.

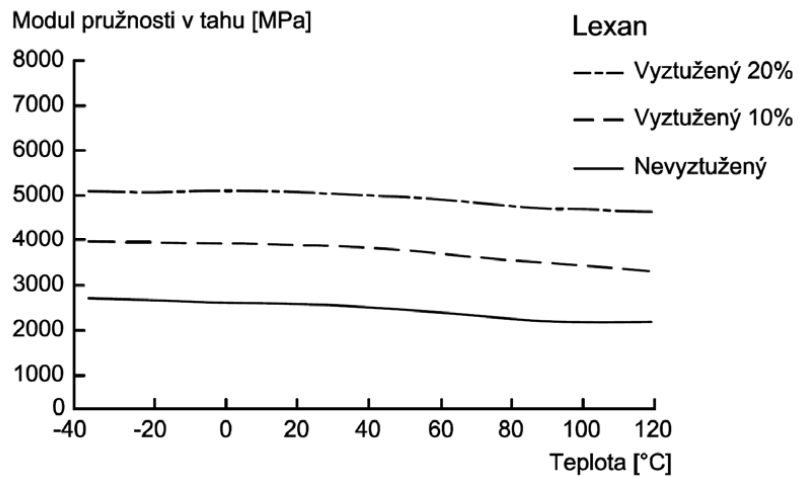
Příloha 4 – Výkres zadaného plastového dílce



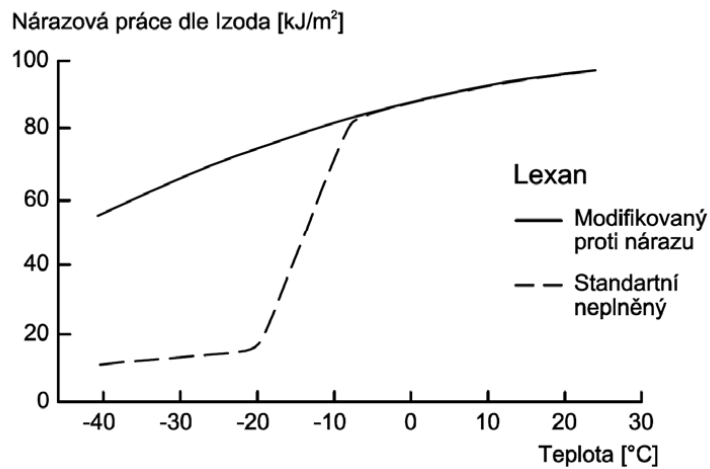
Příloha 5 – Grafické znázornění vybraných vlastností Lexanu [51]



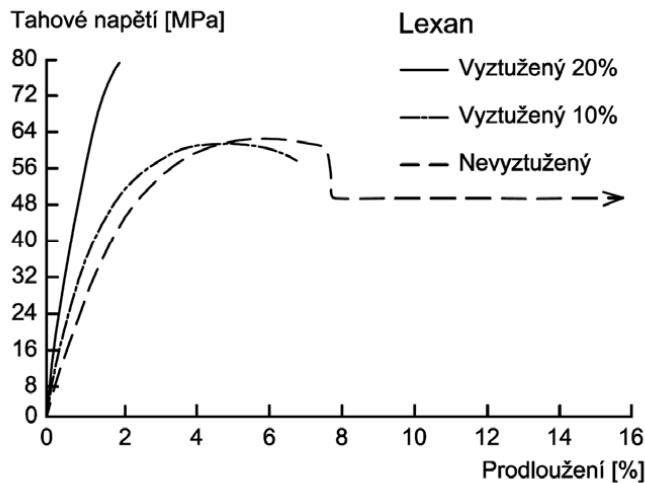
Obr. 1 Pevnost v tahu Lexanu jako funkce teploty [51]



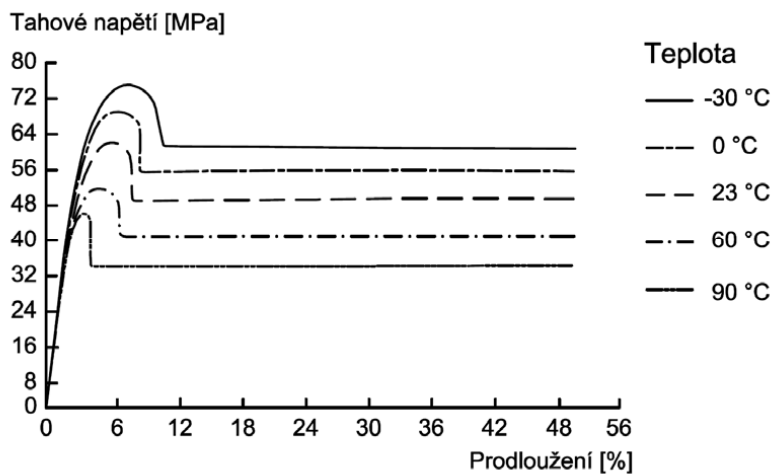
Obr. 2 Modul pružnosti v tahu Lexanu v závislosti na teplotě [51]



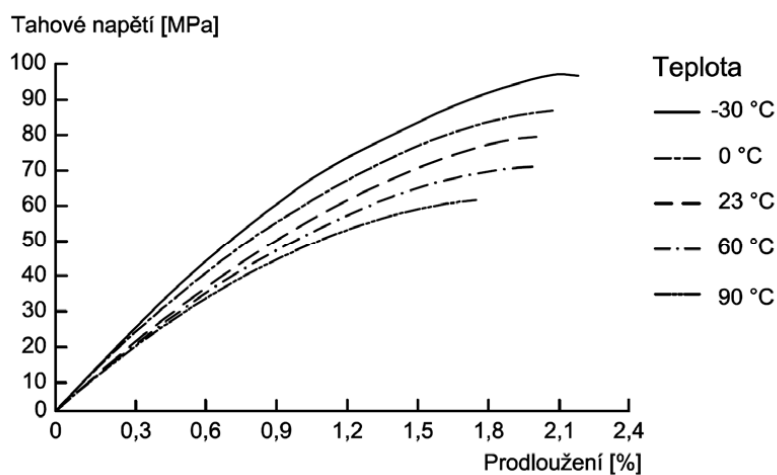
Obr. 3 Nárazová práce Lexanu vs. teplota [51]



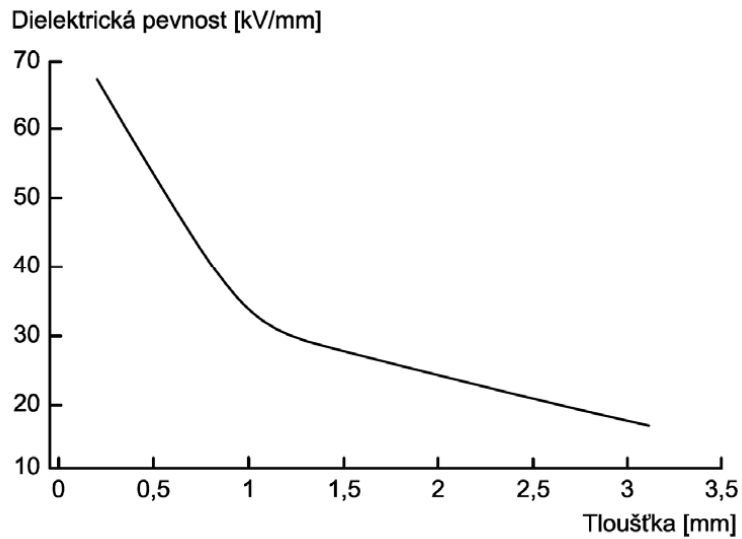
Obr. 4 Křivky napětí-deformace pro vyztužený a Lexan [51]



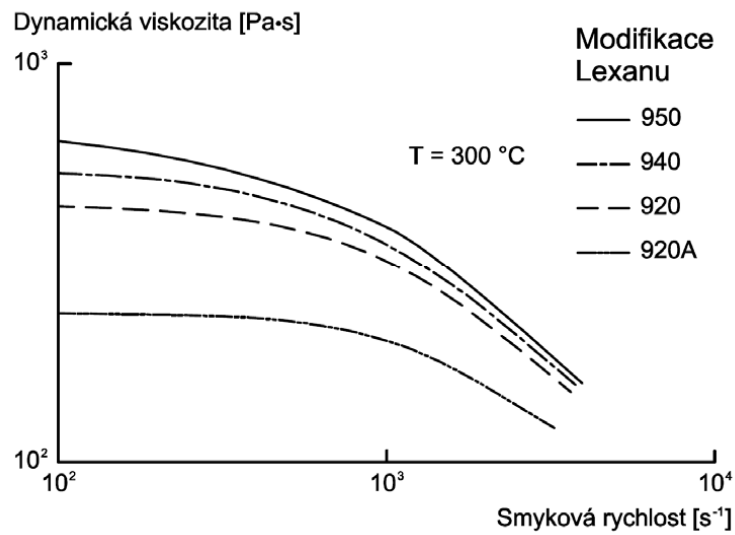
Obr. 5 Křivky napětí-deformace nevyztuženého Lexanu při různé teplotě [51]



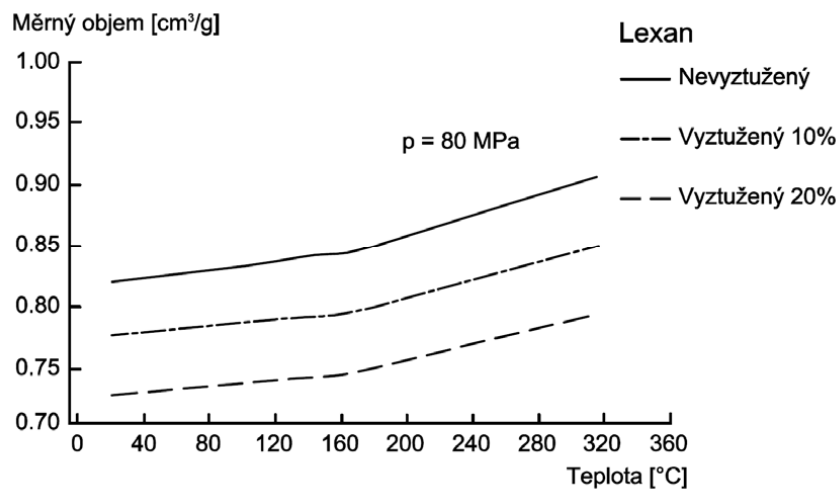
Obr. 6 Křivky napětí-deformace 20% vyztuženého Lexanu při různé teplotě [51]



Obr. 7 Dielektrická pevnost neplněného Lexanu v závislosti na jeho tloušťce [51]

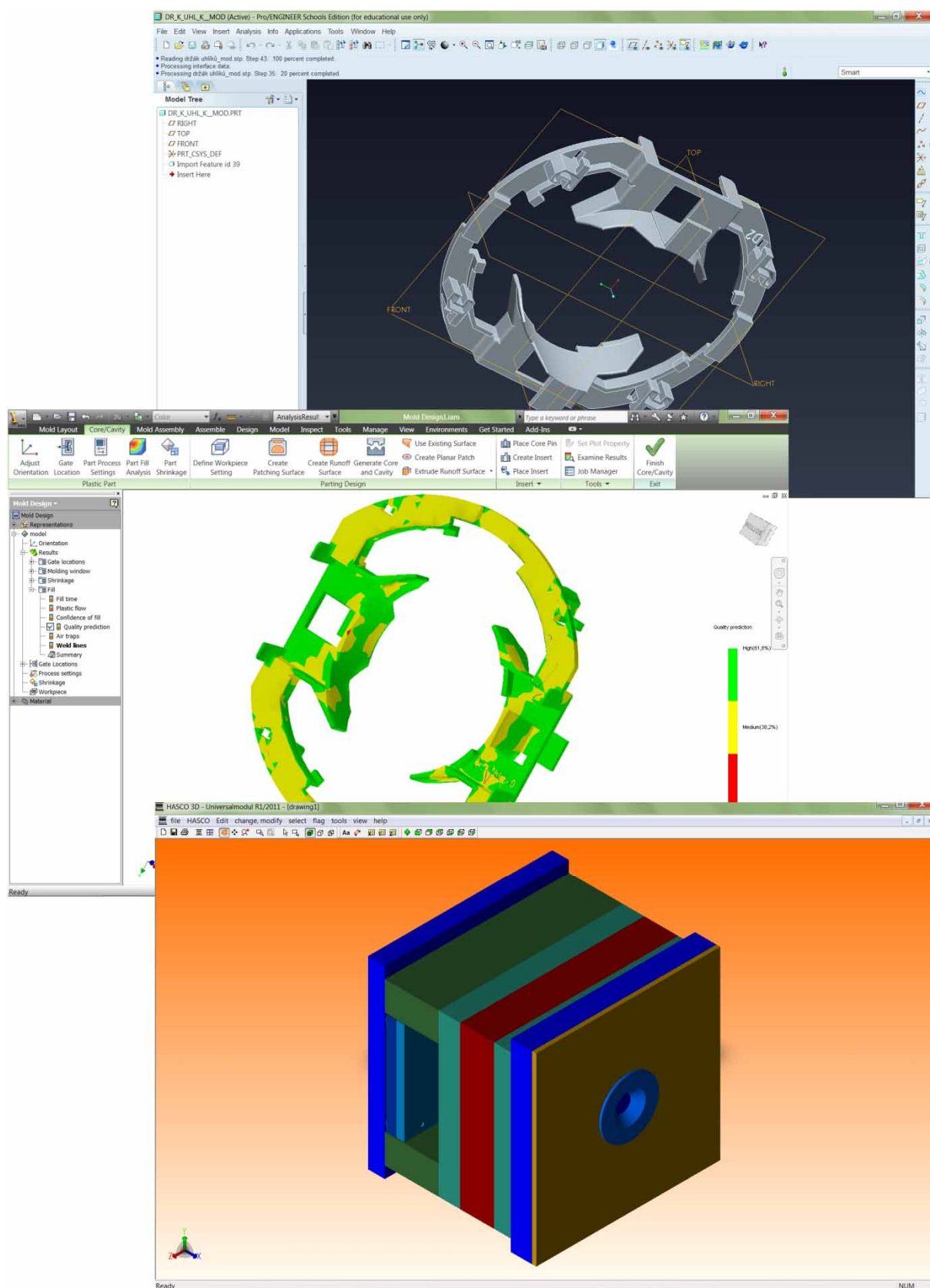


Obr. 8 Dynamická viskozita vybraných nehořlavých modifikací Lexanu jako funkce smykové rychlosti [51]



Obr. 9 p-v-T diagram vyztuženého a nevyztuženého Lexanu [51]


Příloha 6 – Pracovní prostředí programů Pro Engineer, Inventor a HascoDigital




Obr. 1 Pracovní prostředí programů Pro Engineer, Inventor a HascoDigital

Příloha 7 – Výstupní protokoly ze simulací plnění tvarové dutiny


Výsledky při uvažování polohy vtokových ústí dle Obr. 7.2


 General


Study name	simulace1_5fdrzak_5fuhliku_5fmp_2eipt_fill.sdy	
Study location	D:\Download\Diplomka\simulace_v_Inventoru\Simulace1\AITMold\Moldflow\Simulace1_2Eiam\simulace1_5fdrzak_5fuhliku_5fmp_2eipt_fill.sdy	
Part name	Simulace1_5Fdrzak_5Fuhliku_5FMP_2Eipt_fill	
Model suitability	The imported model is thin walled, and is appropriate for Dual Domain analysis.	
Analysis resolution	Default	

Material	
Material manufacturer	SABIC Innovative Plastics US, LLC
Material trade name	Lexan 940
Environmental impact	

Melt temperature	302.1 (C)
Mold temperature	88.1 (C)
Injection locations	2
Max. machine injection pressure	180.000 (MPa)
Injection time selected	0.45 (s) (Specified)
Velocity/pressure switch-over	Automatic

 Fill Analysis time: 77.27 (s)

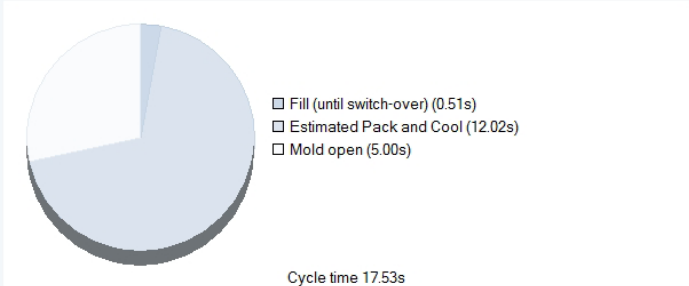
 Your part may be difficult to fill and part quality may be unacceptable.

 View the Confidence of Fill plot and use the Results Adviser to get help on how to improve the filling of the part.

Actual filling time	0.52 (s)
Actual injection pressure	28.017 (MPa)
Clamp force area	36.2679 (cm ²)
Max. clamp force during filling	5.533 (tonne)
Velocity/pressure switch-over at % volume	98.92 (%)
Velocity/pressure switch-over at time	0.51 (s)
Estimated cycle time	17.53 (s)
Total part weight	15.053 (g)
Shot volume	14.0861 (cm ³)

Clamp force estimate during packing using:	
20% of the injection pressure	2.072 (tonne)
80% of the injection pressure	8.287 (tonne)
120% of the injection pressure	12.430 (tonne)

Cycle time breakdown



- Fill (until switch-over) (0.51s)
- Estimated Pack and Cool (12.02s)
- Mold open (5.00s)

Cycle time 17.53s

Výsledky po změně polohy vtokových ústí



General

Study name	simulace1_5fdrzak_5fuhliku_5fmp_2eipt_fill.sdy
Study location	D:\Download\Diplomka\simulace_v_Inventoru\Simulace1 VAIT\Mold\Moldflow\Simulace1_2Eiam\simulace1_5fdrzak_5fuhliku_5fmp_2eipt_fill.sdy
Part name	Simulace1_5Fdrzak_5Fuhliku_5FMP_2Eipt_fill
Model suitability	The imported model is thin walled, and is appropriate for Dual Domain analysis.
Analysis resolution	Default

Material	
Material manufacturer	SABIC Innovative Plastics US, LLC
Material trade name	Lexan 940
Environmental impact	

Melt temperature	302.1 (C)
Mold temperature	88.1 (C)
Injection locations	2
Max. machine injection pressure	180.000 (MPa)
Injection time selected	0.39 (s) (Specified)
Velocity/pressure switch-over	Automatic



Fill

Analysis time: 84.72 (s)



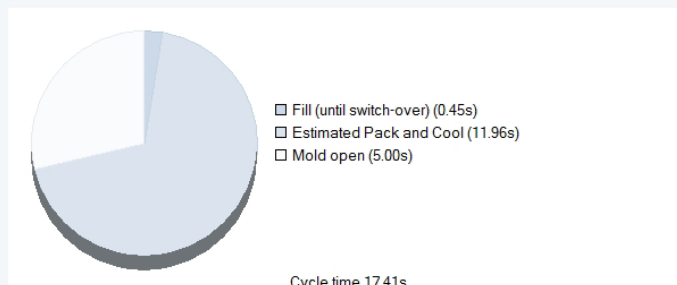
Your part can be filled easily but part quality may be unacceptable.

View the Quality Prediction plot and use the Results Adviser to get help on how to improve quality of the part.

Actual filling time	0.46 (s)
Actual injection pressure	30.472 (MPa)
Clamp force area	36.2682 (cm ²)
Max. clamp force during filling	7.566 (tonne)
Velocity/pressure switch-over at % volume	99.11 (%)
Velocity/pressure switch-over at time	0.45 (s)
Estimated cycle time	17.41 (s)
Total part weight	15.079 (g)
Shot volume	14.0857 (cm ³)

Clamp force estimate during packing using:	
20% of the injection pressure	2.253 (tonne)
80% of the injection pressure	9.013 (tonne)
120% of the injection pressure	13.519 (tonne)

Cycle time breakdown



Příloha 8 – Materiálové hodnoty pro technologický výpočet vstřikování [37]

Materiál	Teplota taveniny T_M [°C]	Teplota formy T_W [°C]	Střední vyhazovací teplota T_E [°C]	Měrná teplotní vodivost a_{eff} [mm ² /s]	Hustota ρ [g/cm ³]
PS	270	60	80	0,086	1,05
ABS	250	80	90	0,084	1,06
PVC hart	200	50	80	0,073	1,40
PVC weich	180	40	80	0,072	1,28
PMMA	250	80	90	0,074	1,18
PC	310	120	130	0,112	1,20
PE - HD	270	50	80	0,078	0,95
PE - LD	220	40	70	0,087	0,92
PP	270	50	80	0,067	0,90
PA 6	260	80	100	0,089	1,13
PA 6.6	290	80	120	0,089	1,14
POM	210	100	130	0,059	1,41
PBT	260	80	120	0,089	1,31

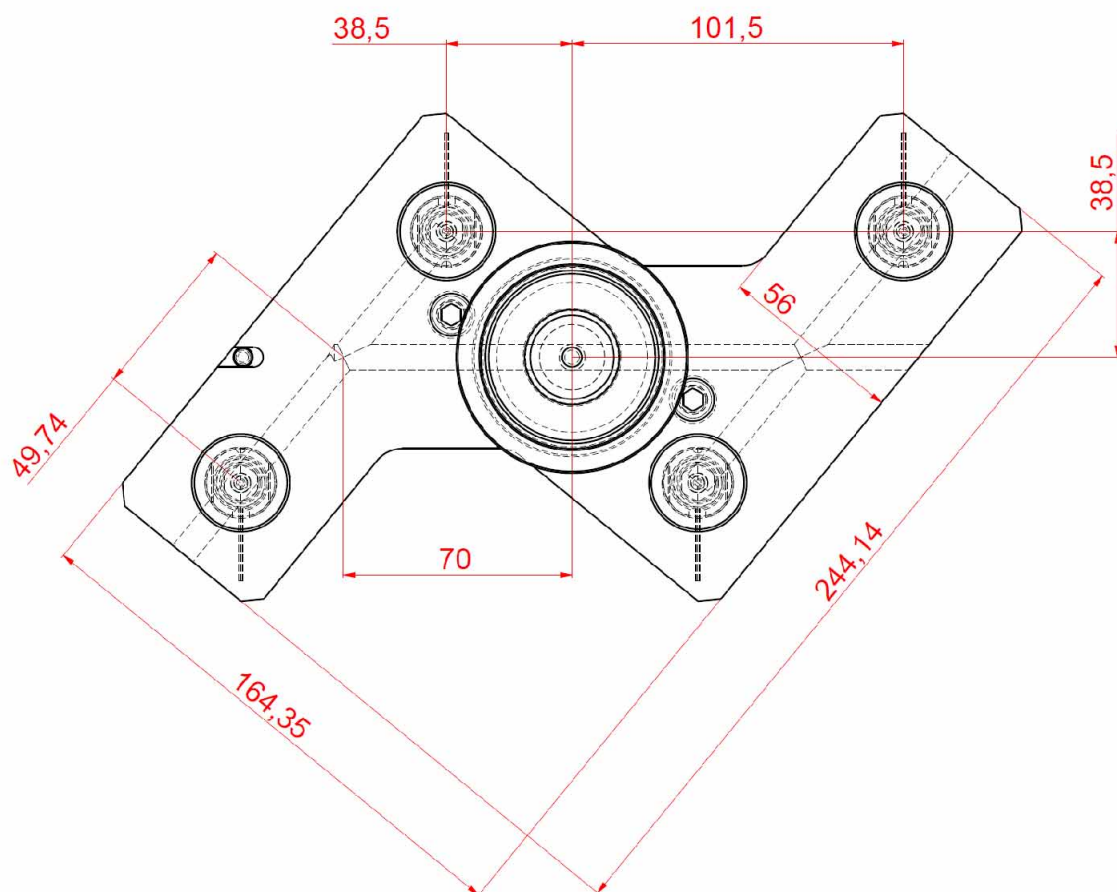
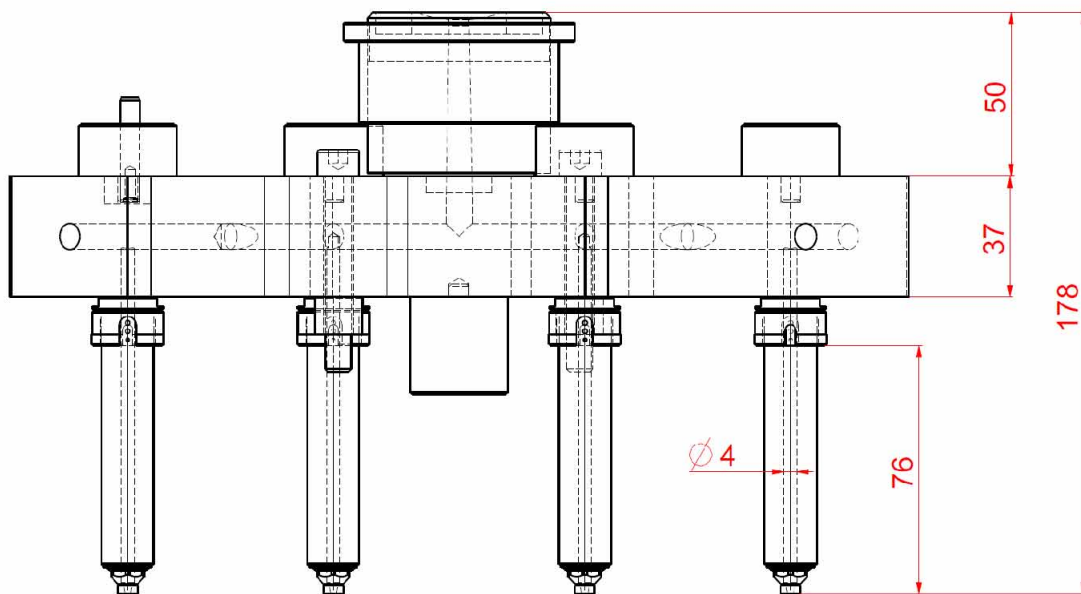
Materiál	Vstřikovací tlak p_v [MPa]	Dotlak p_d [MPa]	Zpětný tlak p_z [MPa]
PS	100	60	6
ABS	90	50	6
PVC hart	120	70	6
PVC weich	80	40	6
PMMA	120	80	10
PC	130	90	10
PE - HD	100	60	8
PE - LD	60	40	6
PP	110	80	8
PA 6	90	60	6
PA 6.6	90	60	6
POM	130	80	6
PBT	110	80	10

Vstřikovaný objem [cm ³] přes – do	Doba vstřikování [s]		
	Nízkoviskozní materiál	Středněviskozní materiál	Vysokoviskozní materiál
1 – 8	0,2 – 0,4	0,25 – 0,5	0,3 – 0,6
8 – 15	0,4 – 0,5	0,5 – 0,6	0,6 – 0,75
15 – 30	0,5 – 0,6	0,6 – 0,75	0,75 – 0,9
30 – 50	0,6 – 0,8	0,75 – 1,0	0,9 – 1,2
50 – 80	0,8 – 1,2	1,0 – 1,5	1,2 – 1,8
80 – 120	1,2 – 1,8	1,5 – 2,2	1,8 – 2,7
120 – 180	1,8 – 2,6	2,2 – 3,2	2,7 – 4,0
180 – 250	2,6 – 3,6	3,2 – 4,5	4,0 – 5,5
250 – 500	3,6 – 4,8	4,5 – 6,0	5,5 – 7,5

Viskozita	Vstřikovaný materiál
Nízká	PE-LD, PA 6, PA 6.6, PA 6.10, PA 11, POM, PET, PBT
Střední	PS, ABS, PPO, PVC weich, PE-HD, PP, PA 12
Vysoká	PVC hart, PMMA, PC

	Jednotka	9	10	11	12	13	14	15	16
Zkratka plasty		PA6 GF	PA66	PA66 GF	PC	PC GF	PBT	PBT GF	PET GF
Výrobce		BASF	BASF	BASF	GE	GE	BAYER	BAYER	DUPONT
Obchodní název		Ultramid	Ultramid	Ultramid	Lexan	Lexan	Pocan	Pocan	Rynite
Typ		B 3 WG7	A 3K	A 3 WG7	101	3413 R	B 1505	B 4235	530 NC-10
Plnivo a jeho podíl	%	35 GF	-	35 GF	-	30 GF	-	30 GF	30 GF
Struktura		K	K	K	A	A	K	K	K
Hustota při 23 °C	ρ	1,41	1,13	1,41	1,2	1,44	1,3	1,65	1,56
Teplota měknutí dle Vicata	°C	220	250	250	144	147	180	210	228
Viskozita při smyk. rychlosti 1000 s ⁻¹	η	130	105	124	576	421	414	382	168
a teplotě tavení materiálu (taveniny)	°C	280	290	290	300	300	250	250	280
Faktor schopnosti tečení	K_f	1,7	1,5	1,7	5,2	4,0	3,9	3,7	2,0
Koeficient rovnice dráhy toku	m	120	130	120	40	50	50	50	100
Exponent rovnice dráhy toku	n	1,75	1,79	1,77	1,70	1,76	1,82	1,87	1,76
Teplota taveniny	T_M	280	290	290	310	310	260	260	290
Teplota formy	T_F	90	80	90	120	120	80	80	120
Teplota odformování	T_E	100	120	120	130	130	120	120	140
Max. obvodová rychlost šneku	v	0,6	0,8	0,6	0,4	0,6	0,2	0,2	0,6
Faktor navýšení objemu taveniny	K_a	1,22	0,97	1,23	1,03	1,25	1,11	1,44	1,36
Efektivní teplotní vodivost	a_{eff}	0,088	0,083	0,088	0,11	0,11	0,09	0,123	0,132
Rozdíl entalpií	Δh	550	550	550	350	350	370	370	440
Smrštění nebo \perp ke směru tečení	%	0,25 / 0,75	1,0 / 1,2	0,25 / 0,65	0,5 / 0,7	0,1 / 0,4	1,9 / 1,9	0,3 / 1,2	0,2 / 0,9
Absorpce vlhkosti	%	2	2,8	1,6	0,15	0,11	0,2	0,1	0,2
Teplota předsušení granulátu	°C	80	80	80	120 – 130	120 – 130	120	120	120
Doba Přesušení granulátu	hod	5 – 10	5 – 10	5 – 10	2 – 4	2 – 4	2 – 3	2 – 3	4

Příloha 9 – Skica pro Synventive



Příloha 10 – Multibox: Regulátor pro ohřev externě vytápěných vtokových soustav [32]



Příloha 11 - Ceny vstřikovacích strojů ARBURG řady U (2010)

	Typové označení	Cena dle rozsahu výbavy
1	Allrounder 170 U	33 000 – 38 000 €
2	Allrounder 270 U	40 000 – 46 000 €
3	Allrounder 370 U	50 000 – 57 000 €
4	Allrounder 470 U	62 000 – 70 000 €
5	Allrounder 520 U	80 000 – 90 000 €
6	Allrounder 570 U	98 000 – 112 000 €