

Metody chlazení vstřikovacích forem

Dominik Hloušek

Bakalářská práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Dominik Hloušek
Osobní číslo:	T18689
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Metody chlazení vstřikovacích forem

Zásady pro vypracování

- 1) Vypracujte literární studii na téma temperace vstřikovacích forem.
- 2) Uveďte nekonvenční možnosti výroby temperačních elementů.
- 3) Vytipujte kritická místa těchto technologií.
- 4) Ekonomicky zhodnoťte případnou návratnost na simulačním příkladu.

Forma zpracování bakalářské práce: **Tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

YANG, Yi, Xi CHEN, Ningyun LU a Furong GAO. Injection molding process control, monitoring, and optimization. Munich: Hanser, [2016], xvi, 397. Progress in polymer processing series. ISBN 978-1-56990-592-0.

ZHOU, Huamin. Computer modeling for injection molding: simulation, optimization, and control. Hoboken: Wiley, [2013]. DOI: 978-1-118-44488-7.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jakub Huba, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

Ve Zlíně dne 19. února 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce se věnuje tématu metody chlazení vstřikovacích forem. Je zde popsána problematika vstřikování zahrnující strojní mechanické prvky, technologické problémy a používané materiály. Větší pozornost je věnována temperaci forem, způsobům výroby, rozboru konvenčních a nekonvenčních metod temperace a zhodnocení jejich návratnosti. Návrh a rozměrová analýza temperačních systémů byly provedeny v programu Solidworks.

Klíčová slova: vstřikovací formy, konvenční a nekonvenční temperace, konformní chlazení, homogenní teplotní pole

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on injection molding methods. Injection molding including mechanical parts, technology and used materials are described here. More attention is paid to the injection mold tempering, production methods, analysis of conventional and unconventional tempering methods and return of investment. Design and dimensional analysis were made in Solidworks system.

Keywords: injection molding, conventional and unconventional tempering methods, conformal tempering, homogeneous temperature field

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu panu Ing. Jakubu Hubovi, Ph.D. za pomoc, poskytnuté materiály, rady, připomínky a trpělivost.

Rád bych poděkoval také panu Zahrádeckému z firmy Tecron za jeho ochotu, zájem a pomoc při vyjasňování problému z praxe.

Poděkování patří také mému zaměstnavateli a nadřízenému za vstřícnost a pochopení.

Děkuji své rodině, přítelkyni a přátelům za dlouhodobou především psychickou podporu.

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

OBSAH

ÚVOD	9
1 ÚVOD DO TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ	10
2 VSTŘIKOVACÍ STROJE	11
2.1 KLASICKÁ KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍCH STROJŮ	11
2.1.1 Pístové vstřikovací stroje	12
2.1.2 Šnekové vstřikovací stroje	12
2.1.3 Speciální vstřikovací stroje	13
2.2 VSTŘIKOVACÍ JEDNOTKY	15
2.3 UZAVÍRACÍ JEDNOTKA.....	17
2.4 PARAMETRY VSTŘIKOVACÍHO PROCESU	17
2.5 ŘÍZENÍ A KONTROLA.....	19
2.6 POMOCNÁ ZAŘÍZENÍ	19
3 VSTŘIKOVACÍ FORMY	20
3.1 ZÁKLADNÍ KONSTRUKCE	20
3.2 VARIANTY PROVEDENÍ VSTŘIKOVACÍCH FOREM.....	21
3.3 NÁVRH VSTŘIKOVACÍ FORMY	21
3.4 VYHAZOVACÍ SYSTÉM.....	22
3.5 ODVZDUŠNĚNÍ DUTINY FORMY.....	22
3.6 DALŠÍ KONSTRUKČNÍ PRVKY	22
3.7 VÝROBA VSTŘIKOVACÍCH FOREM.....	23
4 TEMPERACE VSTŘIKOVACÍCH FOREM	24
4.1 VLIV TEPLOTNÍ NEHOMOGENITY	24
4.2 TEMPERAČNÍHO SYSTÉMY	27
4.2.1 Temperační kanály	28
4.2.2 Temperační médium:	30
4.2.3 Materiály forem z pohledu temperace.....	30
5 NEKONVENČNÍ METODY TEMPERACE FOREM	32
5.1 KONFORMNÍ CHLAZENÍ	32
5.2 SYSTÉM CONTURA	33
5.3 DMLS (DIRECT METAL LASER SINTERING).....	33
5.4 FDM (FUSED DEPOSITION MODELING).....	36
5.5 TEMPERACE KAPALNÝM PLYNEM	37
6 NÁVRATNOST NEKONVENČNÍ VÝROBY	38
6.1 VÝROBEK	39
6.2 SROVNÁNÍ POTENCIÁLŮ FOREM VĚST TEPLO	40
6.3 VÝPOČET NÁVRATNOSTI	44
7 VSTŘIKOVANÉ MATERIÁLY	46
7.1 ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ	46
7.1.1 Termoplasty.....	46
7.1.2 Reaktoplasty	48
7.1.3 Kaučuky a pryže.....	49

7.1.4	Termoplastické elastomery	50
7.1.5	Polymerní směsi	50
7.1.6	Kompozity	51
7.2	PŘÍPRAVA MATERIÁLŮ	51
7.3	VSTŘIKOVÁNÍ MATERIÁLU	53
7.3.1	Vstřikovací cyklus	53
7.3.2	Fáze vstřikovacího cyklu	53
8	VADY VZNIKÉ PŘI VSTŘIKOVÁNÍ	55
8.1	VADY MECHANICKÉHO CHARAKTERU	55
8.2	VADY ESTETICKÉHO CHARAKTERU	56
	ZÁVĚR	58
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	59
	SEZNAM OBRÁZKŮ	60

ÚVOD

V novém tisíciletí zaznamenaly technologie polymerů velký rozmach. Polymerní výrobky postupně nahrazují výrobky z železnatých i neželeznatých kovů. Prosazují se jako pevnostní prvky i jako estetické. Energetické a materiálové nároky na jejich tavení a zpracování jsou výrazně nižší než na kovy.

Díky masové produkci a uplatnění polymerních výrobků ve všech představitelných oborech jsou polymery na trhu velmi populární téma. Firmy se snaží snižovat výrobní náklady, zrychlovat výrobu, používat účinnější a efektivnější řešení. Toto všechno jsou aspekty pohánějící vědu kolem polymerů.

Nejvyšší podíl na výrobě polymerních výrobků má technologie vstřikování. I přes vysoké pořizovací náklady, nachází uplatnění od malosériových po velkosériové produkce. Touto technologií lze vyrábět výrobky s různorodými vlastnostmi, od kompozitních výrobků se špičkovými mechanickými vlastnostmi přes extrémně levnou masovou produkci až po designové výrobky s promyšlenou výrobní technologií, jejíž výsledkem může být luxusní vzhled, měkký povrch, špičkové optické vlastnosti, atd. atd.

Zařízení pro vstřikování se úmyslně vyrábí z co největšího počtu normalizovaných součástí, aby bylo možné pružně reagovat na změnu požadavků od zákazníka, rychle měnit opotřebované díly a také snížit pořizovací cenu těchto zařízení. Dalším důležitým aspektem technologie vstřikování je její možná úplná automatizace, která také výrazně snižuje výrobní náklady.

Důležitou částí vědy kolem technologie vstřikování jsou technologické parametry vstřikování. Vzhledem k povaze geometrie výrobků se nejedná o jednoduché tvary a ručně počítat průběhy technologických dějů při vstřikování je prakticky nemožné. Možná i díky vývoji výpočetních a simulačních metod se posunula technologie vstřikování tolik dopředu. Právě simulační programy nachází významné uplatnění při návrhu konstrukčních prvků i optimalizaci technologických procesů.

Možná je ale potřeba myslet více na to, jak tyto výrobky nejen špičkově vyrábět, ale také bezpečně a účinně likvidovat.

1 ÚVOD DO TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Technologie vstřikování je nejpoužívanější technologie ke zpracování termoplastů, termoplastických elastomerů, ale i reaktoplastů. Celý výrobní proces je založen na cyklickém opakování jednotlivých fází vstřikování. Tato technologie vznikla postupným zaměřováním vývoje původních lisovacích strojů. Cílem byla hromadná a levná výroba, tedy úspora času a potřebných pracovníků.

Technologií vstřikování lze vyrábět jak polotovary určené k následnému zpracování, tak i hotové výrobky určené k okamžité distribuci. Hmotnosti výrobku se mohou pohybovat od desetin gramů až po kilogramy.

Lze vyrábět také tvarově složité výrobky, které by byly jinými technologiemi buď nevyrobitelné nebo výrazně dražší. Tyto výrobky dosahují vysokou tvarovou a rozměrovou přesnost, vysokou kvalitu povrchu a lze je vyrábět ve stejné kvalitě opakovaně. Každý výrobek má však vysoké vstupní náklady, které tvoří především cena vstřikovacího stroje, plastikační jednotky a formy. Proto nachází technologie vstřikování uplatnění ve velkosériové výrobě.

Technologie vstřikování je založena na vtlačování (vstřikování) roztaveného materiálu do formy. Vstupní fází procesu tvoří zásobník s granulátem, který je přemísťován dopravním mechanismem do plastikační jednotky. V plastikační jednotce dochází k roztavení polymeru a následnému rychlému vytlačení tryskou do dutiny předehřáté vstřikovací formy. Za působení tlaku vstřikovací jednotkou polymer postupně vyplní celou formu a poté za působení dotlaku se poté buď řízeně či neřízeně ochlazuje. Ochladí se i polymer, který ve tvaru dutiny formy ztuhne. Následuje vyhození tuhého výrobku, uzavření formy a celý proces se opakuje.

Tyto hlavní části jsou součástí celku zvaného vstřikovací stroj. Ten celý proces řídí a vyvozuje síly a tlaky potřebné ke správné funkci.

2 VSTŘIKOVACÍ STROJE

Vstřikovací stroj je základní prvek pro technologii vstřikování. Vyvozuje potřebné síly pro uzavírání a otevírání formy, vyhazování a také pro vytlačení roztaveného polymeru z plastikační jednotky. Další jeho součásti tvoří vodní (olejový) okruh určený pro temperaci formy či chlazení stroje, dále pak hydraulický nebo elektrický okruh určený k uzavírání a otevírání formy, případně pneumatický okruh usnadňující vyhazování výrobku. Může být osazen dalšími periferními zařízeními určenými například k manipulaci či sušení polymerů.

Společně se vstřikovací formou a plastikační jednotkou bývá celý systém elektronicky řízen. Mezi základní technologické parametry, které je nutno řídit a nastavovat pro různé materiály a výrobky patří teplota, tlak, čas (uzavírání, ochlazování, otevírání), dráha, rychlost. [1]

2.1 Klasická konstrukce vstřikovacích strojů

Rozdělení vstřikovacích strojů dle konstrukčního řešení:

- dle pohonu hlavním posuvů (vstřikovací jednotka, uzavírání formy)
 - hydraulické pohony
 - elektrické pohony
 - hybridní pohony (snaha o kombinaci výhod předchozích)
- dle typu plastikační jednotky (pohybový člen)
 - pístové plastikační jednotky
 - šnekové plastikační jednotky
- dle orientace uzavírání vstřikovací formy
 - horizontální vstřikovací stroje
 - vertikální vstřikovací stroje

Dále můžeme vstřikovací stroje dělit dle zpracovávaného materiálu, počtu desek ve vstřikovací formě, dle řešení šnekové plastikační jednotky (více šneků, rychlost šneku), dle uzavírací síly [1]

2.1.1 Pístové vstřikovací stroje

Jedná se o nejstarší typ vstřikovacích strojů. Tento typ klade menší konstrukční nároky na celý stroj, jelikož vyžaduje pro správnou funkci vstřikovací jednotky jen vyvození pohybu v jedné ose ve směru pohybu pístu.

Plastikační jednotka funguje tak, že v otevřeném stavu se před píst nasype granulát polymeru, který následně píst tlačí vytápěným válcem na požadovanou teplotu, kde dojde k roztavení polymeru a jeho protlačení k trysce. Z tohoto popisu vyplývá, že je zde problém se správným promícháváním polymeru. Proto je před tryskou umístěno torpédo, které musí roztavený polymer obtékat a alespoň částečně se tak promíchá a sjednotí teplota v daném objemu. Sjednocení teploty a důkladné promíchání polymeru je nutné k dosažení potřebné kvality struktury, povrchu a dodržení rozměrových a geometrických tolerancí. Z důvodu problematického míchání a dalšího řízení tavicího procesu pístové vstřikovací stroje téměř zcela ustoupily šnekovým vstřikovacím strojům. [1]

2.1.2 Šnekové vstřikovací stroje

Jedná se o moderní a v současnosti jeden z nejpoužívanějších typů vstřikovacích strojů. Je charakteristický šnekem, k jehož správné funkci jsou zapotřebí pohyby a síly ve více osách.

Plastikační jednotka funguje tak, že se do násypky sype granulát polymeru, který propadává do drážky šneku a je přemísťován do vyhřívané oblasti jednotky. Zde dochází k tavení polymeru a neustálému promíchávání. Roztavený polymer se po průchodem šnekem hromadí za ním, tedy před vstřikovací tryskou a to za zpětného pohybu šneku. Po roztavení požadovaného množství polymeru se šnek zastaví a dopředným pohybem, podobně jako píst, vtlačí taveninu přes trysku do formy.

Mezi zásadní výhody šnekových vstřikovacích strojů patří:

- homogenizace polymeru (mechanická)
- tepelná homogenizace a ochránění polymeru proti lokálnímu přehřátí
- přesné dávkování a řízení procesu
- úspora času více probíhajícími procesy najednou [1]

2.1.3 Speciální vstříkovací stroje

Jedná se o konstrukce strojů upravené dle aplikace (zákazníka) s cílem zvýšení efektivity, zpracování atypických materiálů, přizpůsobení speciálním požadavkům, atd., např.:

- Bezsloupové vstříkovací stroje – vysoké nároky na tuhost konstrukce – vznik ohybového zatížení stroje (tvar C) – výhodou snadnější přístup do pracovní oblasti stroje
- Vícekomponentní vstříkování – umožňuje na jeden vstříkovací cyklus vstříknutí jednoho materiálu o více barvách nebo i více materiálů v požadovaném pořadí, umístění a množství. Způsoby jak řídit kam se má který materiál dopravit jsou různé, např.: intervalové vstříkování, použití více vstříkovacích jednotek, namíchaný granulát
 - výhodou je úspora výrobních cyklů, času, tedy i nákladů
 - nevýhodou je složitá konstrukce, vysoká pořizovací cena
- GIT/WIT vstříkování s podporou plynu/vody – umožňuje vyrábět výrobky s uzavřenou dutinou. Dutinou při procesu vstříkování vyplňuje voda nebo plyn, volba se provádí dle zpracovávaného materiálu s ohledem na teplotu tavení, náchylnost k hydrolytickému rozkladu plastů, rychlost tuhnutí, ne/stlačitelnost vody/plynu, atd.
 - výhodou je ušetření materiálu v místech, kde neplní mechanickou funkci – neutrální vrstva napětí, nižší hmotnost, nižší náklady na materiál, rychlejší tuhnutí- zkrácení výrobního cyklu, zamezení vzniku deformací a staženin
 - nevýhodou je složitější konstrukce, nutnost přesného načasování vpravení plynu či vody – plyn je lehčí než tavenina, odpařování vody
- Vstříkování vláknou vyztuženým materiálů
 - výhodou je možnost vyrábět výrobky s vysokou tuhostí, houževnatostí a odolností mechanických vlastností vůči vysokým teplotám
 - nevýhoda je nutnost šetrného tavení, použití speciálního šneku
- PIM vstříkování plastů s prášky – technologie spočívá ve smíchání granulátu polymeru společně s práškem kovu, skla, karbidů, keramiky, kde polymer slouží jen jako pojivo, které je později z výrobku odstraněno v peci – polymer vyteče, odpaří se. Následuje spékání výrobku.

-výhodou je výroba tvarů jinak nevyrobitelných z materiálů o vysoké teplotě tavení, pevnosti, tvrdosti

-nevýhodou je vysoké abrazivní opotřebenění všech částí stroje, které jsou ve styku s taveninou. Nutná povrchová úprava styčných ploch s cílem zvýšení tvrdosti, odolnosti proti otěru, abrazi, apod., minimálně kalení, nitridace, většinou ale ochrana povrchu vrstvou karbidu (titan, wolfram)

- Vstřikování reaktoplastů – vyšší nároky na hlídání teploty před plastikací (lokální vysoké tření) – nesmí dojít k započetí chemické reakce a zesíťování – jinak je konstrukce stroje podobná strojům zpracovávajícím termoplasty – rozdílný je šnek (kvůli tření a tlakovým účinkům), ve forma musí být přizpůsobena na odvod plynů vzniklých při chemické reakci. Hlavní rozdíl je při procesu tuhnutí. Oproti termoplastům se forma vyhřívá na vytvrzovací teplotu.
- Vstřikování pryží, elastomerů - probíhá v podstatě totožně jako u termoplastů s rozdílem, že forma musí být ohřívána na teplotu vulkanizace
- Reakční vstřikování – vstřikování nízkým tlakem kapalné směsi (monomeru) o nízké teplotě a viskozitě, reakční se proces se aktivuje ohřátím formy na reakční teplotu či přidáním aktivační látky
 - výhodou jsou nízké nároky na pevnost formy a stroje, tvorba řetězců polymeru až ve formě, tedy nižší deformace a pnutí, možnost přidání vyztužujících vláken
 - nevýhodou jsou především dlouhé reakční časy
- Vstřikování strukturních pěn – do plastů je přidáváno nadouvadlo, které buď chemicky nebo fyzikálně ve formě vytvoří pěnovou strukturu uvnitř a kompaktní strukturu na povrchu. Lze také kombinovat míru zpěnění materiálu a docílit tak různých mechanických vlastností v různých místech výrobku. Je potřeba při ohřívání granulátu hlídat teplotu, aby nedošlo k příliš velkému nadmutí struktury ve vstřikovací jednotce, ale až ve formě.
- Střídavé, cyklické vstřikování – pomocí 2 a více vstřikovacích pístů se řízeně promíchává tavenina ve formě. Používá se především u materiálů s plnivem upravujících mechanické vlastnosti. Minimalizuje pravděpodobnost vzniku propadlin a deformací.
- Technologie zastříkávání umožňuje nanášení vrstvy polymerní taveniny na jiný materiál (plech, folie, textilie) umístěný do dělicí roviny formy. Tento povlak může

sloužit k estetickým účelům, jako antikorozi ochrana. Naopak může plech či folie zlepšovat mechanické vlastnosti výsledného výstřiku. [1]

2.2 Vstřikovací jednotky

Vstřikovací jednotka plní 2 základní úkoly. Plastikovat – tedy přeměňovat granulát na taveninu a vstřikovat - vysokou rychlostí a za vysokého tlaku do dutiny formy. Dříve byly používány pístové vstřikovací jednotky – dnes v drtivé většině případů nahrazené šnekovými vstřikovacemi jednotkami.

Princip funkce šnekové vstřikovací jednotky je charakteristický dvěma pohyby: rotací šneku kolem vlastní osy a pohybem v axiálním směru. Proces plastikace probíhá tak, že přes násypku se dostává granulát do šneku, jímž je odebírán, stlačován (dáno snižujícím se objemem prostoru šneku na jedno stoupání směrem k trysce – snižující se stoupání nebo zvětšující se jádro šneku) a přepravován vyhřívanou komoru směrem k trysce. Ve vyhřívané komoře se za působení vysokého tření granulát taví (až 70% energie potřebné k tavení je dodáno třením). V prostoru trysky se hromadí roztavený materiál a šnek současně ustupuje směrem od trysky. Po nahromadění požadovaného množství taveniny se šnek zastaví a jako píst vtlačí taveninu přes trysku do formy.

Hlavními výhodami šnekových vstřikovacích jednotek je:

- Snadné a velmi přesné řízení plastikace a homogenizace materiálu
- Nedochází k přehřívání či spálení materiálu v tavicí komoře
- Snadné a přesné řízení množství, tlaku a dotlaku vstřikovaného materiálu
- Možnost tavení nové dávky taveniny v průběhu předchozího dotlaku

Vstřikovací jednotka se skládá z:

- Posuvný mechanismus – zajišťuje pohyb a vyvození potřebných sil v axiálním směru šneku. Je ve většině aplikací tvořen přesnými vodícími tyčemi, pouzdry, zdrojem síly (hydraulicky, elektricky, mechanicky). Musí zajistit přesné dosednutí vstřikovací trysky na vtokovou vložku a rovněž může měnit rychlost v průběhu cyklu (snížením času cyklu za bezpečného dosednutí trysky na vtokovou vložku)
- Násypka slouží ke snadnějšímu přivádění granulátu a příp. příměsí do šneku. V případě čistého granulátu se musí samovolně přemisťovat směrem ke šneku, který jej

odebírání. V případě míchání více materiálů dohromady je nutné tuto směs aktivně míchat, aby nedošlo k separování vlivem rozdílné hustoty a snížením homogenity výsledné taveniny.

- Tavicí komora – dochází v ní k tavení plastu. K tavení dochází uvnitř přesně obroběného válce, který je obalen topnými tělesy poté zaizolován. Válec končí vstřikovací tryskou. Uvnitř válce pracuje šnek, i ten musí mít vnější plochu velmi přesně opracovanou. Vůle mezi válcem a šnekem bývá kolem 0,1mm. Především kvůli poměrně dlouhému šneku z toho plynoucího možného průhybu je snaha o minimalizování běhu naprázdno. Pokud je válec plný materiálu, roztavený plast pod tlakem působí jako mazivo podporuje šnek proti průhybu. Běžně je válec vyhříván na 200-300°C dle zpracovávaného termoplastu, v případě elastomerů a reaktoplastů na cca 90°C a např. pro tekuté silikony jen na cca 25°C. V případě takto nízkých teplot se využívá proudící kapaliny na místo odporových topných těles, které mají lepší schopnost tepelné regulace. Tavicí komora může mít další příslušenství dle požadavků aplikace, např.: odvzdušňovací kanál (vlhký granulát), speciální snímače teploty, atd.
- Šnek je hlavní pracovní součást vstřikovací jednotky. Vykonává rotační pohyb kolem vlastní osy a posuv ve směru vlastní osy. Má na sobě závit s proměnnou výškou stoupání a také proměnným průměrem jádra. Kombinace tvaru závitu v uzavřené tavicí komoře a rotace umožňuje přemísťovat, stlačovat a míchat materiál a posuv ve směru osy umožňuje vstřikování a plnění prostoru před tryskou. Šnek se dá rozdělit na 3 oblasti:
 - Dopravní (transportní) – oblast s největším objemem mezi zuby závitu. Slouží k odebírání materiálu z násypky a jeho přesun dále do tavicí komory
 - Stlačovací (kompresní) – v této oblasti dochází nejprve k postupnému zmenšování objemu mezi zuby závitu a tedy k vytlačování vzduchu z granulátu a jeho zhutnění a dalším snižováním prostoru mezi zuby závitu dochází k velkému zvyšování tření a ohřívání granulátu jak od tavicí komory, tak od tření, následuje tavení granulátu.
 - Homogenizační (dosažení stejnorodosti) – v této oblasti již nedochází k dalšímu stlačování taveniny, ale dochází zde k intenzivnímu promíchávání tak,

aby došlo nejen k promíchání mechanickému, ale taky tepelnému. Do prostoru před tryskou se tak dostává materiál o stejném chemické složení a teplotě v celém objemu. [1]

2.3 Uzavírací jednotka

Slouží k upínání částí formy, jejich otevírání, zavírání, vyvozování potřebných sil a to v přesně daných časech tak, aby byla zajištěna správná funkce formy a forma se neotevřela ani pod plným tlakem vstřikovací jednotky. Konstrukce uzavírací jednotky je běžně tvořena vodícím mechanismem – typicky vodící tyče nebo jiný typ lineárního vedení a uzavíracím mechanismem, který vyvozuje potřebnou uzavírací sílu na formu. Vodící mechanismus má za úkol navádět protilehlé části formy přesně na sebe. Musí mít proto přesně tolerované vedení vůči pouzdrům a také samotné díly vedení vůči sobě. Uzavírací mechanismus musí být dostatečně spolehlivý a tuhý, proto se často využívají mechanické kloubové mechanismy nebo hydraulické pohony, naopak pneumatický pohon zde vhodný není. Poslední důležitou částí uzavírací jednotky jsou upínací desky a s nimi související vyhazovací mechanismus. Upínací desky plní funkci kotvení vstřikovací formy (2 částí) k uzavírací jednotce. Upínací desky musí být taktéž velice tuhé, aby se pod tlakem vstřikovací jednotky v dutině formy nedeformovaly. Upínání může být realizováno mechanicky, hydraulicky nebo nejmodernější metodou elektromagneticky. Součástí uzavírací jednotky je také vyhazovací systém, jehož mechanismus je součástí dutiny. Ten přes dorazy na pohybových čepech při otevření formy vyhodí výrobek ven z formy. Alternativou může být také hydraulický vyhovač. [1]

2.4 Parametry vstřikovacího procesu

Mezi nejvýznamnější veličiny uplatňující se při procesu vstřikování patří tlak, síla, teplota, rychlost a to vše v daných místech a časech

- Tlak – k rychlému a úplnému vyplnění vstřikovací formy v požadovaném čase je nutné vyvinout ve vstřikovacím stroji dostatečný tlak, který se dále přenáší na granulát, později taveninu a tlačí taveninu ze vstřikovací jednotky do vstřikovací formy. Během celého procesu plastikace a vstřikování dochází k tlakovým ztrátám. K výsledným ztrátám oproti příkonu celého stroje přispívá již účinnost samotné hydraulické jednotky. Tlakové ztráty začínají vznikat ve válci hydraulické jednotky, k dalším tlakovým ztrátám dochází v pohybových uzlech stroje. Nejvýznamnější ztráty

vznikají v místech kontaktu plastu se strojem a to mezi granulátem, šnekem a válcem, dále třením uvnitř taveniny a tření v trysce, vtokovém systému formy a o stěny formy. Tyto ztráty mohou na konci toku taveniny tvořit až 50% vstřikovacího tlaku. Nejedná se však přímo o energetické ztráty bez dalšího využití. Většina této ztracené tlakové energie se mění na tepelnou a zpomaluje tak chladnutí taveniny během vstřikovacího procesu, ve šneku dokonce tato tepelná energie přispívá k tavení.

- Síla – ke správné funkci vstřikovacího stroje je nutné vyvinout především síly uzavírací a uzamykací. Síla uzavírací nutí k pohybu pohyblivou částí formy. Musí mít tedy dostatečnou velikost, aby překonala odpory v pohybových mechanismech a hmotnost pohyblivé částí formy. Uzamykací síla musí při vstřikovacím procesu udržet formu zavřenou. Tato se síla se počítá jako tlak \times plocha, kde plocha je průmět dutiny formy do dělicí roviny.
- Teplota – ve vstřikovací stroji dochází ke změnám teplot ve několika nezávislých systémech.

Prvním z nich je teplota v hydraulických systémech. Tu si většinou hlídá a reguluje samotná hydraulická jednotka. Při přehřátí nebo podchlazení může docházet k nárůstu odporu nebo ztrátě mazací schopnosti hydraulické kapaliny a s tím související nárůst tlakových ztrát a vyšší opotřebení jednotlivých částí stroje. Nejdůležitější teplotou je teplota vstřikované taveniny. Tuto teplotu je nutné vhodně zvolit vzhledem k technologickým podmínkám stroje. Tavenina při průtoku strojem a formou postupně odvádí teplo do okolí a postupně chladne a zvyšuje viskozitu, tím zpomaluje svůj tok až nakonec ztuhne. Pokud tedy nebude mít tavenina dostatečnou teplotu může dojít k nedotečení nebo studeným spojům 2 zatuhlých čel toku, vzniku propadlin, apod. Pokud bude mít taveniny zbytečně vysokou teplotu, může dojít k jejímu spálení nebo jinému poškození struktury a také bude odvádět do okolí více ztrátového tepla.

Poslední důležitou teplotou je teplota temperační kapaliny. Tato kapaliny proudí formou a udržuje požadovanou teplotu. Před vstřikováním formu ohřívá a poté chladí. Pozn. Vzhledem ke zpracovatelským teplotám plastů dosahujících až ke 400 °C je nutné volit vhodné materiály nástrojů. Při těchto teplotách již může docházet k měknutí povrchu ocelových kalených materiálů (popouštění) a tedy ztrátě jejich mechanických vlastností a zkrácení životnosti.

- Rychlost – ve vstřikovacím stroji dochází k mnoha pohybům, kde lze sledovat rychlost:

Nejdůležitější rychlostí je rychlost taveniny. Ta je vynucena tlakem a rychlostí šneku v jeho axiálním směru. Tak jako klesá tlak taveniny při průtoku systémem klesá i jeho rychlost. Je tedy nutné zvolit vhodnou vstřikovací rychlost, aby došlo ke včasnému vyplnění formy a tavenina předčasně nezatuhla. Mezi další pohyby, kde lze sledovat rychlost patří rychlost otevírání formy, výměny forem a dalších, které nemají přímý technologický vliv na taveninu, ale mohou zrychlit celkové výrobní časy (sériová výroba). [1] [2]

2.5 Řízení a kontrola

Díky moderním technologiím a rozmachu automatizace je dnes většina sériové výroby řízena plně automaticky. O vše se potom stará programovatelná řídicí jednotka, která celý proces řídí a reguluje případné procesní odchylky. V případech menších sérií lze automatizovat jen části procesu a zasahovat do něj. Mezi základní čidla tvořící vstupní parametry řídicí jednotky patří: tenzometry – hlídající síly, teplotoměry – bývají umístěni co nejbližně hlídané části nebo přímo v prostoru taveniny, piezoelektrická čidla hlídající tlak – pod tlakem se deformují a mění el. odpor.

2.6 Pomocná zařízení

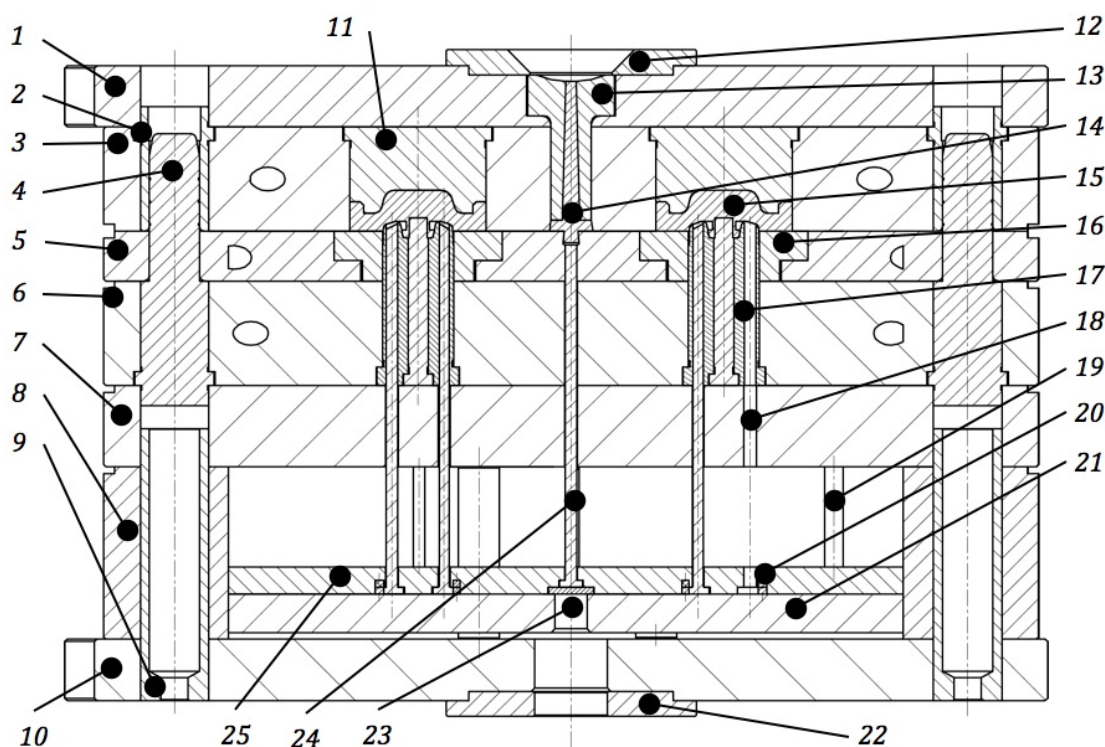
Vstřikovací stroj by nemohl fungovat bez periferních samostatných jednotek sloužících k obsluze potřeb stroje: zásobování vhodným granulátem (velikost, vlhkost, směs, apod.) odebírání výrobků (dopravníky, koše, roboty), temperování provozních kapalin (hydraulická jednotka, ohřev-chlazení temperačního média, výměna forem, atd.

3 VSTŘIKOVACÍ FORMY

Vstřikovací forma je sestava dílů zajišťujících dopravu taveniny do tvarové dutiny, proudění tepelné energie a co nejjednodušší vyjmutí výrobku. [3]

3.1 Základní konstrukce

Nejjednodušší provedení vstřikovací formy je tzv. dvoudesková vstřikovací forma



Obr. 1 - Řez vstřikovací formou

1 – upínací deska pevná, 2 – vodící pouzdro, 3 – tvárnice, 4 – vodící čep, 5 – tvárník, 6 – opěrná deska tvárníku, 7 – podpěrná deska, 8 – rozpěrná deska, 9 – centrovací pouzdro, 10 – upínací deska pohyblivá, 11 – jádro, 12 – středící kroužek, 13 – vtoková vložka, 14 – vtokový systém, 15 – vstřikovaný díl, 16 – vložka pro uložení jádra, 17 – jádro, 18 – vyhazovač, 19 – kolík, 20 – pojišťovací kolík, 21 – opěrná vyhazovací deska, 22 – středící kroužek, 23 – závitový otvor pro připojení vyhazovacího systému, 24 – vyhazovač/přidržovač vtokového systému, 25 – kotevní vyhazovací deska

3.2 Varianty provedení vstřikovacích forem

Dvoudesková vstřikovací forma je jedno z nejjednodušších uspořádání vstřikovacích forem a jsou z ní odvozena další různá konstrukční řešení. Dvoudesková forma je univerzální a z forem i poměrně levné řešení, nicméně má i určitá omezení. Většina těchto omezení plynou z umístění dělicí roviny. Je s ní svázán vtokový systém, omezené použití vícenásobných forem.

Pro realizaci sériové výroby pro výrobky nevyrobitelné na dvoudeskové vstřikovací formě byly vyvinuty další typy vstřikovacích forem. Oproti dvoudeskovému uspořádání mohou mít vyšší produktivitu (vícenásobné formy, účinnější vtokový systém, menší odpad, apod.) nebo výroba složitějších výrobků. Bývají ale dražší vzhledem ke složitější konstrukci. Mezi úpravy nad rámec dvoudeskového uspořádání se řadí například dělicí rovina navíc, poté se jedná o třídeskovou formu nebo např. formy s horkým rozvodem, jejichž hlavní výhodou je schopnost udržet taveninu ve vtoku v tekutém stavu nebo ji i ohřívat. Bývají použity u forem pro tenkostěnné výrobky.

3.3 Návrh vstřikovací formy

Vstřikovací forma musí podléhat systémovému návrhu, kde se přesně definují požadavky na formu. Je nutné zvážit cenu formy a její návratnost, zvolit vhodnou konstrukci a složitost, vhodné materiály a použité výrobní technologie tak, aby se výrobní proces a cena vstupního materiálu minimalizovala. Vyrobena forma by se měla otestovat a výrobek porovnat se zadáním projektu.

Dle složitosti výrobku je nutné zvolit vhodný typ vstřikovací formy, vhodné materiály (kotevní desky, tvárník, tvárnice, čepy, jádra), použití jader, počtu a rozměrů vyhazovačů, vodicích čepů, orientaci výrobku kolem dělicí roviny nebo dalších přidaných desek formy.

Dle tvaru výrobku je nutné vhodně zvolit i vtokové systémy a tvar dutiny formy s ohledem na předpokládaný tok taveniny. V případě vícenásobné formy musí být ke všem jednotlivým výrobkům stejná dráha toku taveniny, aby byla zajištěna stejnorodost výrobků.

3.4 Vyhazovací systém

Vyhazovací systém slouží hlavně k odformování výrobku po otevření formy. Musí být navržen tak, aby při odformování nedeformoval výrobek, toto souvisí i s tvarem formy a teplotou odformování. Pohyb vyhazovacího systému je vyvozen vyhazovacími deskami.

Možná konstrukční řešení:

- Vyhazovací kolíky – nejjednodušší řešení - přímo spojené s vyhazovacími deskami, pohybem v axiálním směru vyhodí výrobek z otevřené formy
- Stírací deska – pro tenkostěnné, duté výrobky, rozkládají vyhazovací sílu na větší plochu
- Trubkové vyhazovače – pro tenkostěnné výrobky – rozklad vyhazovací síly na větší plochu
- Pohyblivá jádra – pro výrobky s bočními otvory, jejich pohyb může být vyvozen buď šikmým kolíkem (rozklad pohybu do dvou směrů) nebo přidaným zařízením na formě, který vyvodí pohyb jádra
- Speciální – například se závitem (vytáčecí systém)

3.5 Odvzdušnění dutiny formy

Standartním základním odvzdušňovacím prvkem je dělicí rovina, kde je úmyslně prostor (setiny mm) pro únik vzduchu. Tloušťka tohoto prostoru je dána materiálem, tedy jeho schopností zaběhnout do úzkých prostorů. Proto se tok vstříkovaného materiálu navrhuje tak, aby před sebou tlačil vzduch směrem k dělicí rovině. Pokud tohoto nelze docílit, je nutné opatřit formu o další odvzdušňovací kanály. Toto ale výrazně zvyšuje složitost a nákladnost formy a také zhoršuje kvalitu povrchu výrobku v místě úniku vzduchu. Pokud má forma špatně navržený odvzdušňovací systém, mohou se na výrobku vyskytnout vady: nedotečeniny, spáleniny (dieselův efekt)

3.6 Další konstrukční prvky

Mezi další konstrukční prvky vstříkovacích forem se řadí prvky, které nejsou nezbytné k výrobě, ale mohou nepřímo i přímo optimalizovat výrobu, usnadňují manipulaci s formou, zrychlují manipulační časy, atd.

- Montážní a upínací prvky ke vstřikovacímu stroji – úkolem je co nejjednodušeji, nejrychleji, ale za dostatečné tuhosti upnout formu do stroje. V případě výměny formy ve stroji se rychlou demontáží a montáží šetří operační časy. Tyto prvky mohou být: mechanické (šrouby, upínky, kloubové mechanismy, atd.), hydraulické, magnetické
- Manipulační prvky jsou vzhledem k obvykle vysokým hmotnostem formy nutné. Typicky závity ve formách přímo pro závěsné oko nebo pro konzolu, atd. pro manipulaci jeřábem. Nebo prvky pro jiné metody přepravy: vysokozdvizný vozík, automatizovaný robot, atd

3.7 Výroba vstřikovacích forem

Při výrobě konvenčních forem se dnes uplatňuje především CNC víceosé obrábění následné obráběcí operace zlepšující kvalitu povrchu. Komponenty (i desky) formy, kde nedochází k přímému kontaktu s taveninou nebo ke styku pohybujících se ploch mohou být vyrobeny z běžných konstrukčních materiálů tak, aby splňovaly požadavky na mechanické vlastnosti (pevnost, tuhost). Vodící pouzdra, pohybové čepy, vtokové vložky, atd je snaha používat normalizované. Nejvyšší nároky na kvalitu výsledného tvaru a povrchu jsou kladeny na dutinu formy pro taveninu, tedy na tvárník a tvárnici, případně tvarová jádra dutiny formy. Zároveň jsou na tyto povrchy i objemy kladeny nejvyšší mechanické nároky, tedy pevnost, tvrdost, odolnost vůči otěru, chemická stabilita, tepelná stabilita, apod... Je zde proto nutné použít lepší materiály o vyšší pevnosti a tvrdosti, což značně zvyšuje nároky na obráběcí stroj a použité nástroje, tedy zvyšuje náklady na výrobu.

4 TEMPERACE VSTŘIKOVACÍCH FOREM

Temperace vstřikovacích forem má velký vliv na výslednou kvalitu výrobku. Uplatňují se zde především tyto parametry: teplota a její rozložení na ploše a v objemu výrobku a schopnost měnit teplotu formy v čase dle požadavků a udržovat tuto změnu po celé styčné ploše s výrobkem a oba tyto procesy přesně řídit. K tomuto je nutné vhodně zvolit temperační médium a konstrukci formy a temperačních kanálů s ohledem na výslednou termodynamiku (schopnost udržovat nebo měnit teplotu formy v čase) formy.

Určením vhodných teplotních podmínek lze ovlivnit tyto mechanické či estetické parametry: rozměrová stabilita, velikost vnitřních napětí, míra deformací a smrštění, stupeň krystalinity, kvalita povrchu, čas vstřikovacího cyklu nebo technologické parametry jako jsou pevnost, houževnatost, kluzné vlastnosti, odolnost proti vodě, UV, atd...

Lze také výrazně ovlivnit ekonomickou stránku a návratnost celé formy. Zde proti sobě stojí tyto parametry: čas X kvalita X cena. U výrobků je důležité zohledňovat: materiál, tvarovou složitost, teplotní uzly, tenkostěnné oblasti, požadovanou kvalitu povrchu nebo další technologické požadavky. Úkolem technologa je proto zhodnotit požadavky na výrobek a nastavit temperační proces tak, aby výsledný výrobek vyhovoval požadavkům, ale výroba nebyla zbytečně nákladná. [3] [4] [5]

4.1 Vliv teplotní nehomogenity

Temperace = změna teploty přivedením nebo odvedením tepla do nebo z dutiny formy. Vzhledem k povaze temperovaného objemu (3D výrobek) se uvažuje 3D teplotní pole. Hlavním cílem a také největším problémem je udržení homogenního teplotního pole při chlazení. Tzn. chlazení celého objemu výrobku rovnoměrně. Při nerovnoměrném chlazení dochází k nerovnoměrnému tuhnutí a nerovnoměrnému vzniku různých strukturálních fází v objemu a tím ke vzniku pnutí v materiálu. Vznik těchto fází lze přímo ovlivnit rychlostí chlazení. V polymerech existují 2 zásadně rozdílné fáze a ve většině polymerů existují vedle sebe v různých podílech.

Struktury s vnitřní neuspořádaností vykazují tzv. izotropní chování, tzn. stejné chování ve všech směrech (mechanické, teplotní, atd). Amorfnní struktury jsou v zásadě izotropní, vzhledem k jejich charakteristické neuspořádanosti.

Struktury s vnitřní uspořádaností se mohou chovat různě. Záleží na podílu krystalické fáze a také na orientaci jednotlivých krystalických útvarů ve struktuře. Monokrystal = v celé struktuře zastoupena jen jediná orientace a struktura makromolekul, jediný nukleační bod tuhnutí, tzn. jednoznačně orientovaná struktura, tzn. různé vlastnosti v různých směrech = anizotropní (např. jiná pevnost a tažnost, ale také teplotní roztažnost materiálu ve směru řetězců polymeru a kolmo na ně).

- Amorfni struktura: struktura bez pravidelného uspořádání, vznikají jen velmi malé shluky pravidelných uspořádání (oproti celému objemu bezvýznamné).
 - Izotropní chování
 - Teplotní smrštění do 1%
- Semikrystalická struktura (čistě krystalická u polymerů nedosažitelná): podíl čisté krystalické fáze až 80%. Krystalické uspořádání má pravidelné uspořádání atomů v celém objemu.
 - Mírně až silně anizotropní chování
 - Teplotní smrštění 1 až 2,5% (dle podílu krystalické fáze)

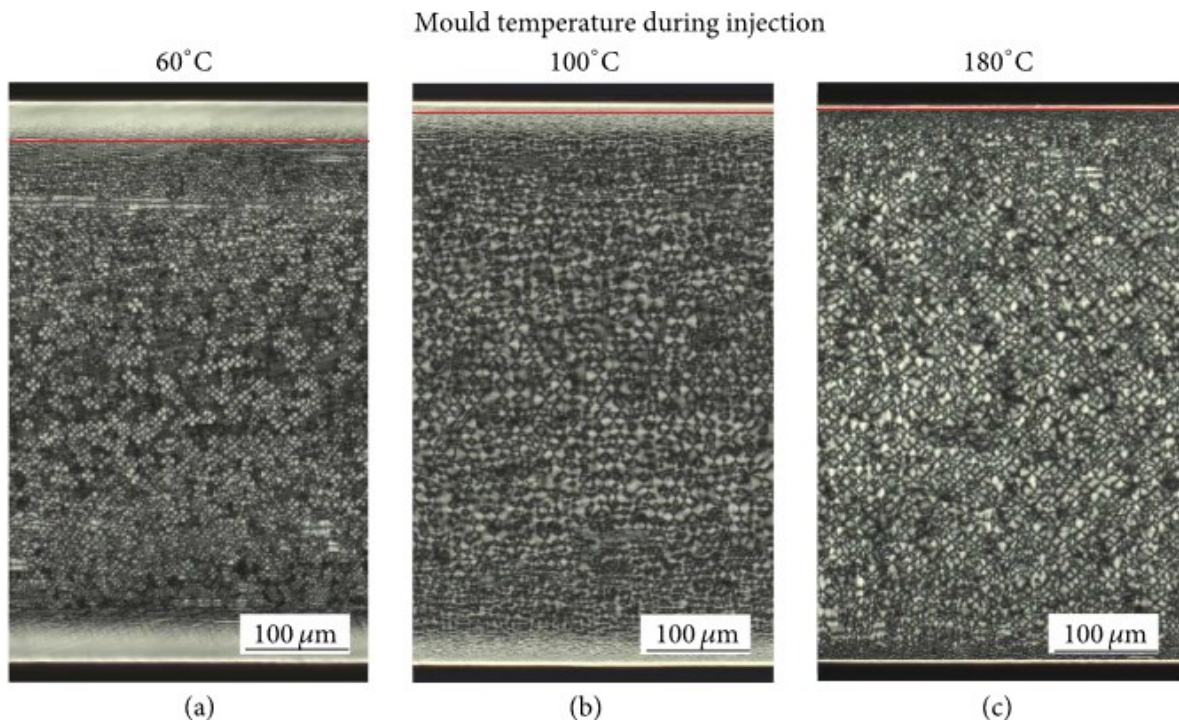
Materiály, u kterých je možný vznik krystalické fáze, potřebují pro krystalizaci vhodné podmínky, tj. především rychlost ochlazování, tedy i tuhnutí. Rychlostí ochlazování lze tedy řídit i výsledné mechanické vlastnosti výrobku. Čím rychlejší ochlazování, tím méně času má materiál na krystalizaci a tím vyšší podíl amorfni fáze v materiálu bude. Z výše uvedeného je zřejmé, že amorfni a krystalická fáze má jiné vlastnosti.

V praxi je snaha o snížení výrobních časů na minimum. Značnou část výrobních časů zabírá chlazení po vstřikování, to lze zkrátit zrychlením chlazení, tzn. nižší teplota chladicího média, vyšší průtok, nižší teplota formy. Tímto zanášíme do materiálu strukturální nehomogenitu. Každý materiál má jinou rychlost krystalizace a jiný dosažitelný podíl krystalické fáze, výsledné struktury si lze rozdělit např. do 4 skupin:

- Bez chlazení, možný ohřev: Materiál dosáhne maximálního podílu krystalické fáze, zbytek je amorfni – extrémně pomalé chlazení, může být i podpořena výdrž na teplotě blízké teplotě tavení, struktura včetně povrchu homogenní
- Pomalé chlazení: Na povrchu materiálu se mírně urychlí tuhnutí a částečně se potlačí vznik krystalické fáze. Tenkou povrchovou vrstvou tedy tvoří amorfni fáze, dále je

materiál přirozeně zkrystalizovaný a tvoří téměř homogenní strukturu. Může vzniknout mírné povrchové napětí

- Střední rychlost chlazení – na povrchu dojde k potlačení krystalizace, vzniká amorfnní povrchová vrstva, poté vzniká semikrystalická vrstva s vyšším poměrem amorfnní fáze oproti krystalické a postupně do hloubky narůstá podíl krystalické fáze v semikrystalické struktuře. Vzniká povrchové napětí, potřeba hlídat možný vznik mírné deformace po odformování
- Vysoká rychlost – vzniká silná amorfnní vrstva, v celém objemu je výrazně potlačen vznik krystalické fáze. Vznik výrazného povrchového napětí, možné deformace po odformování, možné prasknutí výrobku při chlazení



Obr. 2 – Vliv rychlosti ochlazování na strukturu polymeru

Zásadní je při chlazení udržení homogenního teplotního pole, tedy rovnoměrného chlazení po celé styčné ploše formy s výrobkem. Při nedodržení homogenity chlazení vzniká také nehomogenní struktura – struktura není rozdělena do vrstev např. různého zastoupení amorfnní fáze v semikrystalické struktuře, ale vznikají pomaleji chlazené místa a rychleji chlazené. Např. u forem chlazených vrtanými kanály jsou oblasti vzdálenější od temperačních kanálů pomaleji chlazené než oblasti temperačním kanálům blízké. [3] [6] [5]

Obecná rovnice pro přestup tepla: $Q = k \cdot S \cdot \Delta T$

Q... teplo [W]

k... koeficient přestupu tepla [W.m⁻².K⁻¹]

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

λ ... koeficient tepelné vodivosti materiálu formy [W/(m.K)]

δ ... tloušťka stěny [m] formy mezi chladícím médiem a výrobkem

α ... součinitele přestupu tepla [W.m⁻².K⁻¹] mezi výrobkem-formou (1) a chladícím médiem-formou (2).

S... teplosměnná plocha [m²]

ΔT ... [°C] rozdíl teploty mezi výrobkem a chladícím médiem.

4.2 Temperačního systému

Při přenosu tepla se uplatňuje proces přestupu a vedení tepla. U temperačních kanálů je nutné vhodně zvolit temperační médium a jeho průtok. Úkolem technologa a konstruktéra je vhodně navrhnout složitost formy tak, aby splňovala požadavky na výrobek za přijatelné náklady.

Temperační systém musí být navržen tak, aby odváděl teplo rovnoměrně z oblasti kolem povrchu výrobku s ohledem na tuhost a únavovou pevnost formy a umístění dalších konstrukčních prvků jako jsou vyhazovače, jádra, pohybové čepy, kolíky, atd. Vhodný je větší počet kanálů s menším průřezem. Naopak je nutné navrhnout temperační okruh, aby nedocházelo k zastavování proudění, ucpávání nebo přehřívání. Temperační okruh by měl být nastaven tak, aby temperační médium mělo rozdíl teplot na vstupu a výstupu z formy max 5 °C. Je tedy nutné zajistit poměrně vysoký průtok temperačního média, dochází ke vzniku turbulentního proudění, které má vyšší schopnost přestupu tepla, musí být ale zohledněn možný kavitační efekt. [2] [3] [5]

Temperace může být realizována:

- Pasivní – využívána u forem, kde není dostatek místa na temperační kanály, používají se materiály s vysokou tepelnou vodivostí (slitiny mědi a hliníku) nebo naopak materiály izolační – při přehřevu k zamezení úniku tepla do okolí. Pasivní temperační prvky musí být umístěny co nejbližší dutině formy a na druhé straně jsou velmi často napojeny na aktivní temperační okruh. Mohou zastávat temperační funkci pro

celý výstřik nebo jen pro oblasti, kde není možné realizovat aktivní systém, např. vnitřní záhyby, kouty, ztísněné oblasti, atd.

- Aktivní – Použití proudění temperačního média v dutinách formy. Aktivně řízená jeho teplota v čase jak předehřev, tak chlazení.

4.2.1 Temperační kanály

Pro správné proudění temperačního média formou je nezbytné opatřit formu dutinami a kanály. Ty musí mít vhodný průřez, vzdálenost od sebe a umístění vzhledem ke koncentraci tepla v dutině formy. Kruhovitý průřez je nejjednodušší z výrobního pohledu, v případě jednostranného ohřevu ale není tak efektivní, jako plošší tvary – dražší výroba. Velmi důležitá je také plocha průřezu. Obecně by se měl volit menší průřez a více kanálů. Malý průřez kanálu s sebou nese několik provozních problémů a proto je nutné volit průřez s ohledem na: [2] [3] [5]

- Homogenita teplotního pole – více menších dutin = vyšší homogenita tepl. pole
- Viskozita temperačního média – v menším průřezu narůstá odpor proti proudění a dochází k narůstání ztrát
- Průtok a typ proudění – je žádoucí, aby docházelo k turbulentnímu proudění, proto je nutné vhodně zkombinovat tvar, průřez a průtok temperačního média
- Možné ucpávání – menší průřez dutin sice zajišťuje vyšší homogenitu teplotního pole, ale zvyšuje pravděpodobnost ucpání. Proto je nutné buď přizpůsobit průřez dutin použitému temperačnímu médiu nebo opatřit systém o prvky zlepšující kvalitu temperačního média, tj. filtrace mechanických nečistot, pasivace vody (změkčení – snížení obsahu vodního kamene), chemická aditivace vody, čistící kapsy či kanály
- Efektivní spojování jednotlivých ústí – zamezení lámání hadic, zbytečně rychlé změny směru proudění

Výrobní možnosti temperačních kanálů:

- Vrtané hluboké kanály, ucpávky, přípojky, víceokruhové systémy: nejběžnější metoda výroby temperačních kanálů. Do děr se poté vrtají závity pro ucpávky, kterými se určí směr toku temperačního média, následuje montáž přípojek, atd. Pro co nej-

lepší přiblížení homogenní teplotě se používá větší počet užších kanálů v pravidelných rozestupech, případně vzdálenosti přizpůsobit koncentraci tepla v různých místech.

- Standartní šroubovitě vrtáky – omezená hloubka děr vzhledem ke schopnosti chlazení a odvodu tepla a třísek z obrobku
- Vrtáky pro vrtání hlubokých děr – vrtáky jsou opatřeny dutinou pro vstup chladicí kapaliny a ta kolem těla vrtáku odnáší z obrobku třísky a přebytečné teplo. Částo jsou opatřeny vodícím pouzdrem
- Frézované kanály – velkou výhodou je možnost kopírovat tvar výstřiku v dané rovině – homogenní teplotě. Nutné tyto kanály utěsnit mezi vstříkovací vložkou a tvárníkem/tvárnicí nebo přímo tvárníkem a tvárnicí. Lze docílit různých průřezů teplotních kanálů a optimalizovat tak tepelnou výměnu
- Vně frézovaná vstříkovací vložka. Díky vnějšímu frézování lze na moderních obráběcích centrech vyfrézovat prakticky jakýkoliv tvar. Tvar výstřiku se obalí vstříkovací vložkou a velmi snadno docílíme frézováním vně vložky stejné vzdálenosti od dutiny vložky. Nutné těsnění vstříkovací vložky v desce vstříkovací formy.
- Teplotní prvky pro dlouhé a duté výstřiky – U dlouhých a dutých výrobků (např. sud) je nutné docílit homogenního proudění podél vnitřních stěn výrobku. K tomu je nuceno teplotní médium prostřednictvím těchto systémů:
 - Přepážkové systémy – jednoduchý přepad
 - Spirálové systémy – v dutině formy je vyvrtaná válcová díra, kam je vložena spirála – po jedné straně vstupuje a z druhé strany spirály vystupuje teplotní médium
 - Fontánkové systémy – v dutině formy je vyvrtaná válcová díra, kam je vložena trubice, vnitřním otvorem vstupuje a okolo trubice teplotní médium vystupuje
 - Tepelná trubice – teplotním médiem je chlazená jen její část. Trubice je naplněna a natlačována plynem o vysokých výparných a kondenzačních teplotách a teplotních vlastnostech. Jedna strana trubice je chlazená, druhá je ohřívána taveninou, tím dochází k nucenému proudění a neustálé kondenzaci a vypařování média, které tím zároveň odvádí teplo z taveniny

4.2.2 Temperační médium:

- **Voda**
 - + vysoký součinitel přestupu tepla, nízká viskozita, nízká cena, ekologicky nezávadná, se změnou teploty (do 90 °C) bez výrazné změny vlastností
 - způsobuje oxidaci, korozi (omezení aditivací), za atmosférického tlaku teplota varu 100 °C (použitelnost cca do 90 °C) – natlakováním okruhu lze zvýšit teplotu použitelnosti, obsahuje minerály – vodní kámen
- **Olej**
 - + Přírozená konzervace kovů, široký výběr vlastností, existují ekologicky nezávadné, možné temperovat na teploty nad 100 °C
 - vyšší viskozita oproti vodě (nutné hlídat změnu viskozity s teplotou), vyšší cena, nízký součinitel přestupu tepla, možné degradační účinky na některé materiály (gumová těsnění, atd.), změna vlastností cyklickými změnami teplot, vhodná filtrace k zamezení ucpání
- **Roztoky glykolů**
 - + Nemá korozivní účinky, rozpouští nečistoty (neucpává systém), chemická odolnost, součinitel přestupu tepla mezi olejem a vodou
 - Vyšší cena, vyšší viskozita oproti vodě, možná těkavost, v čase ztrácí vlastnosti, možné degradační účinky na některé materiály (gumová těsnění, atd.), ekologicky závadné

4.2.3 Materiály forem z pohledu temperace

Při přenosu tepelné energie z výtříku do temperačního média je důležitý také materiál formy. Ten musí odolávat teplotám tavení vstříkovaných součástí (až 400 °C), musí mít dostatečnou pevnost a tuhost k udržení tlaku vstříkovací jednotky a vykazovat stabilní teplotní roztažnost k možné opakovatelnosti přesné výroby technologií vstříkování. Vzhledem k vysoké úrovni metalurgie železnatých kovů i lehkých kovů je k dispozici široká škála materiálů použitelných pro různé výrobky z různých materiálů. [2] [3] [5]

- **Ocel a její slitiny**
 - + Nízká cena, vysoká pevnost, tvrdost, životnost formy, velmi dobrá odolnost vysokým teplotám

- Nízký součinitel tepelné vodivosti (ve slitinách velmi nízký), vyšší nároky na obrábění, koroduje, oxiduje, vysoká hmotnost
- Měď a její slitiny
 - + Chemická odolnost, nekoroduje, velmi výborná tepelná vodivost (ve slitinách nižší), snadné obrábění, dobrá odolnost vysokým teplotám, lehkost
 - Velmi vysoká cena, nižší pevnost a tvrdost (ve slitinách vyšší), povrchová oxidace, nižší životnost
- Hliník a jeho slitiny
 - + Velmi dobrá tepelná vodivost (ve slitinách nižší), přijatelná cena, snadné obrábění, dobrá chemická odolnost a korozní odolnost, ve slitinách vysoká pevnost, lehkost
 - Povrchová oxidace, možná degradace galvanickým efektem, nízká tvrdost, nižší životnost

5 NEKONVENČNÍ METODY TEMPERACE FOREM

Zásadním problémem vrtaných kanálů pro temperační médium je omezená možnost vytvořit homogenní teplotní pole. Především u tvarové náročnějších výrobků se výrazně mění vzdálenost kanálů od dutiny formy a tím se snižuje účinnost chlazení v těchto oblastech a dochází k nerovnoměrnému tuhnutí a vzniku pnutí, případně deformací. Z běžných metod lze tvar výrobku přesně okopírovat jen frézováním a to jen v dělicí rovině. Pro vznik homogenního teplotního pole je nezbytné přivést temperační médium do míst s konstantní vzdáleností od dutiny formy, případně přizpůsobit tuto vzdálenost místům s vyšší koncentrací tepelné energie. Tento způsob chlazení se nazývá konformní: [7] [8] [5]

5.1 Konformní chlazení

- (konformita = přizpůsobivost) Jedná se o temperační systém, kdy se využívá běžné temperační médium, ale dutiny ve formě, případně ve vložce, jsou vyráběné metodou 3D tisku kovů. Touto metodou lze umístit temperační kanály rovnoměrně a do co nejbližší vzdálenosti od dutiny formy. Uplatnění nachází konformní chlazení u tvarově složitějších výrobků nebo u výrobků s vysokými technologickými požadavky.
 - + Homogenní teplotní pole – rovnoměrná výsledná struktura – výborné mechanické vlastnosti, kvalita povrchu
 - + Zkrácení výrobních časů – díky homogennímu teplotnímu poli lze chladit výrazně rychleji a zkrátit výrobní časy až o 50% (při využití potenciálu technologie)
 - + Nízká energetická náročnost, vysoká účinnost systému
 - + Vysoká spolehlivost systému – minimalizované ostré záhyby dutin, lze vytvořit dutiny pro sběr nečistot, čistící kanály, atd.
 - + návratnost v měsících (při využití potenciálu technologie)
 - Vysoké pořizovací náklady – nákladnost výroby, nutné obrábění povrchu, tepelné zpracování k odstranění vnitřního pnutí, atd.
 - Možná pórovitost – zhoršení kvality povrchu, náchylnost na vznik únavových trhlin

To umožnil vznik technologie 3D tisku kovů. Technologie 3D tisku kovů má téměř neomezené možnosti výsledného tvaru výrobku. Bohužel je ale velice nákladná, vzhledem k pořizovací ceně stroje, prášků, atd. Velikost výrobku je limitovaná operačním prostorem stroje. Hlavním zástupcem 3D tisku používaného v technologii vstřikování je technologie spékání laserem (DMLS). Možné je také použití technologie založenou na principu práškové metalurgie a to technologie vstřikování a následného slinování (FDM). [7] [8] [5]

5.2 Systém Contura

Používá se často ve slepých dutinách, kde by byla jiná běžná metoda chlazení neúčinná. Kolem dutiny formy je nezbytná pevnostní vrstva materiálu formy a pod ní je připravená dutina pro vložení vložky Contura. Vložka Contura má vně obráběné kanály v konstantní vzdálenosti od dutiny formy pro zajištění homogenního teplotního pole. Po vložení vložky do dutiny ve formě dojde k překrytí kanálů a vzniku temperačních kanálů. Vkládání a kotvení vložky Contura se provádí pájením natvrdo za sníženého tlaku. Dělicí rovinu mezi formou a vložkou systému Contura je nutné dále opracovat. Podle toho jestli bude v kontaktu s taveninou nebo jen dosedne na protikus konstrukce formy se obrábí, finišuje, leští, apod.

Výhody systému Contura:

- + Nižší pořizovací cena než u forem vyráběných 3D tiskem
- + Vyšší homogenita teplotního pole než u vrtaných kanálů
- + Povrch dutiny formy bez porozit, apod.
- + Neovlivňuje únavovou pevnost

Nevýhody systému Contura:

- Nelze použít všude, určitá tvarová omezení, nutné vložit systém do formy
- Nižší homogenita teplotního pole než u forem vyráběných 3D tiskem
- V případě kontaktu s taveninou je viditelná dělicí rovina systému Contura a formy

5.3 DMLS (direct metal laser sintering)

= přímé nanášení kovového prášku a následné slinování laserem. Stroj nanáší vrstvy kovového prášku, které jsou následně spékány laserem. Tloušťka vrstvy naneseného prášku

se pohybuje v setinách mm, záleží na požadované přesnosti výrobku a požadovaném výrobním čase. Výsledné výrobky se dají dále obrábět, svařovat, brousit, vrtat, tepelně upravovat, atd. běžně jako polotovary vyrobené běžnými metodami. Používají se prášky na bázi:

- Mědi – výborné tepelné a chemické vlastnosti
- Oceli – široké možnosti legování (běžné, nerezové, martenzitické), dle legur lze docílit vysokou pevnost, tvrdost, korozivzdornost
- Hliníku – nízká hmotnost, vysoká pevnost
- Titanu – špičkové mechanické vlastnosti, chemická odolnost, lidský organismus na ni nereaguje – kloubní a kostní protézy, šrouby, destičky, atd.

Výhody výrobní metody DMLS:

- + Téměř neomezená tvarová, geometrická složitost
- + Použitelnost vysokopevnostních materiálů
- + Nulový odpad – nevyužitý prášek se vrací do oběhu stroje
- + Plnohodnotné pevnostní charakteristiky – nízká porozita
- + Automatizace výroby

Nevýhody výrobní metody DMLS:

- Vysoká cena výrobku (výroba prášku, stroje, laserová technologie)
- Hrubý povrch (až Ra50) – nutné dokončovací operace (dutina formy) – dutiny pro temperační médium mohou zůstat hrubé – podpora turbulentního proudění
- Nutné přizpůsobení dutiny formy následnému opracování – leštící nástroj se musí dostat do všech míst dutiny formy
- Pórovitost (běžně do 5%)
 - + Podporuje odvzdušnění dutiny formy, nemá vliv na pevnost
 - I po obrobení může zhoršovat kvalitu povrchu výstřiku, koncentrátor napětí – snižuje únavovou pevnost (opakované mechanické i tepelné zatěžování)
- Vznik vnitřního pnutí – díky neustálému natavování a tuhnutí každého zrna prášku
- Náchylnost ke vzniku únavových trhlin (cyklickým mechanickým a tepelným zatěžováním)
- Velikost výrobku omezená operačním prostorem stroje

Technologické parametry výroby metodou DMLS – vliv na POROZITU, KVALITU POVRCHU a velikost VNITŘNÍHO PNUTÍ:

- Velikost zrn prášku 0,015-0,1mm a tloušťka nanášených vrstev – ovlivňují výslednou drsnost, porozitu a výslednou pevnost výrobku
- Míra natavení prášku – přímo ovlivňuje energie a zaostření laseru
- Vzdálenost jednotlivých drah laseru

Zvětšením velikosti zrn a tloušťky vrstev lze snížit výrobní náklady a zrychlit výrobu. Vzniká hrubší struktura s vyšší porozitou a výrazně se zhoršuje kvalita povrchu. Zjemněním vrstev a prášku naopak narůstá výrobní čas, ale struktura je podstatně jemnější. Výslednou strukturu lze také ovlivnit množstvím a koncentrací přivedeného tepla. To se nastavuje výkonem, zaostřením laseru a vzdáleností jednotlivých drah laseru od sebe. Tím dokážeme ovlivnit míru natavení prášku (čím vyšší natavení, tím nižší porozita, lepší spojení s předchozí vrstvou, ale zvyšuje se míra zaneseného vnitřního pnutí). Nastavením laseru lze také ovlivnit vznik a typ pórovitosti. Při příliš vysokém výkonu a zaostření laseru dochází k roztavení prášku a odpařování plynů z taveniny a tento plyn může být při následném tuhnutí uvězněn ve ztuhlé tavenině. Druhou možností vzniku pórů je nedostatečné protavení vrstev vedle sebe a tím k lokálnímu odtržení jednotlivých vrstev vlivem teplotní deformace. Vznik vnitřního pnutí je zásadně ovlivněn teplotou a mírou natavení, kterou dosáhne každé zrno prášku. Následná teplotní deformace je přímo úměrná rozdílu teplot mezi ztuhlou vrstvou a natavenou. Na této hranici dochází k nejvyšší koncentrací napětí a možnosti vzniku trhliny již při výrobě případně ke vzniku únavové trhliny. Vznik oblastí s vyšší koncentrací napětí, případně trhlín lze ovlivnit také chemicky, tj. zamezit tzv. precipitací částic. (především u ocelí dochází při tavení ke vzniku různých struktur a vznik strukturální nehomogeneity, kdy každá fáze má jiné teplotně deformační vlastnosti a tím dochází ke zvýšení vnitřního pnutí či vzniku oblastí s vyšší koncentrací napětí. Naopak přivedením malého množství tepla sice do určité míry snížíme vnesené vnitřní napětí, ale může dojít k nedostatečnému protavení vrstev a tím ke snížení výsledné pevnosti výrobku. Nedostatečným protavením může dojít vlivem následného chladnutí i k odtržení neprotavené vrstvy a tím ke zničení výrobku přímo ve výrobě.

Výsledné vnitřní pnutí a náchylnost ke vzniku únavových trhlin lze snížit následným tepelným zpracováním (žiháním). [7] [8] [5]

5.4 FDM (Fused Deposition Modeling)

Jedná se o metodu fungující na bázi FDM, tj vstřikování směsi kovu s pojivem. Princip spočívá v nanášení tenkých vrstev směsi kovového prášku se zplastikovaným pojivem. (podobně jako 3D tisk plastů).

- 1) Plastikace – ve vstřikovací jednotce se za zvýšených teplot a tlaků roztaví pojivo, kovový prášek skupenství nemění a stálým mísením je udržována homogenní složení směsi v celém objemu. Poměr pojiva a prášku musí být vhodně zvolen tak, aby byl zajištěn kontakt mezi zrny, ale aby měl výsledný výtisk dostatečnou soudržnost a bylo technologicky možné směs vytlačovat.
- 2) Vytlačování a 3D tisk – zplastikovaná směs je vytlačovaná do trysky. Průměr trysky až 0,05mm, běžně 0,1-0,2mm. Tryska je CNC řízením vedena po jednotlivých vrstvách výrobku a tiskne tak požadovanou geometrii. Ztuhnutím pojiva je polotovár připraven k manipulaci.
- 3) Odstranění pojiva – chemicky (rozpouštědla, kyseliny) nebo tepelně se odstraní ze struktury pojivo
- 4) Slinování (spékání) – za vysokých teplot (nižších než teplota tavení, ale umožňujících difuzní procesy) dochází k postupnému provazování jednotlivých zrn prášku a díky tomu i postupnému vytlačování volných prostor po pojivu ze struktury. Opakovaným zahříváním je vytlačování porozity účinnější. Obsazením prostor po pojivu kovem provází smrštění výrobku, až 30%. Při slinování jsou také vypáleny zbytky pojiva. I přesto lze touto metodou dosáhnout výsledné přesnosti až 0,1mm.

I u technologie FDM je výsledný povrch drsný a je nutné jeho opracování. Lze ale povrch vyhladit ještě před spékáním. V této fázi jsou požadavky na stroj nižší, jelikož polotovár před spékáním nemá plnohodnotné pevnostní charakteristiky. Metoda FDM je také bezodpadová, automatizace je nutná.

Výhody oproti DMLS:

- + Absence laseru znamená nízké vnitřní pnutí

- + Slinováním se daří dosahovat nižší porozity
- + Nižší cena výroby – použití běžných 3D tiskových metod – dochází ale k vyššímu opotřebení komponent tiskárny vlivem odírání tvrdým práškem o stěny konstrukčních prvků.
- + Širší možnosti použitelného prášku – i s vysokou teplotou tavení, nutná je dostatečná materiálová difuzivita pro vznik vazeb a vytlačení porozity

Nevýhody oproti DMLS

- Delší výrobní čas – především opakovaným slinováním

5.5 Temperace kapalným plynem

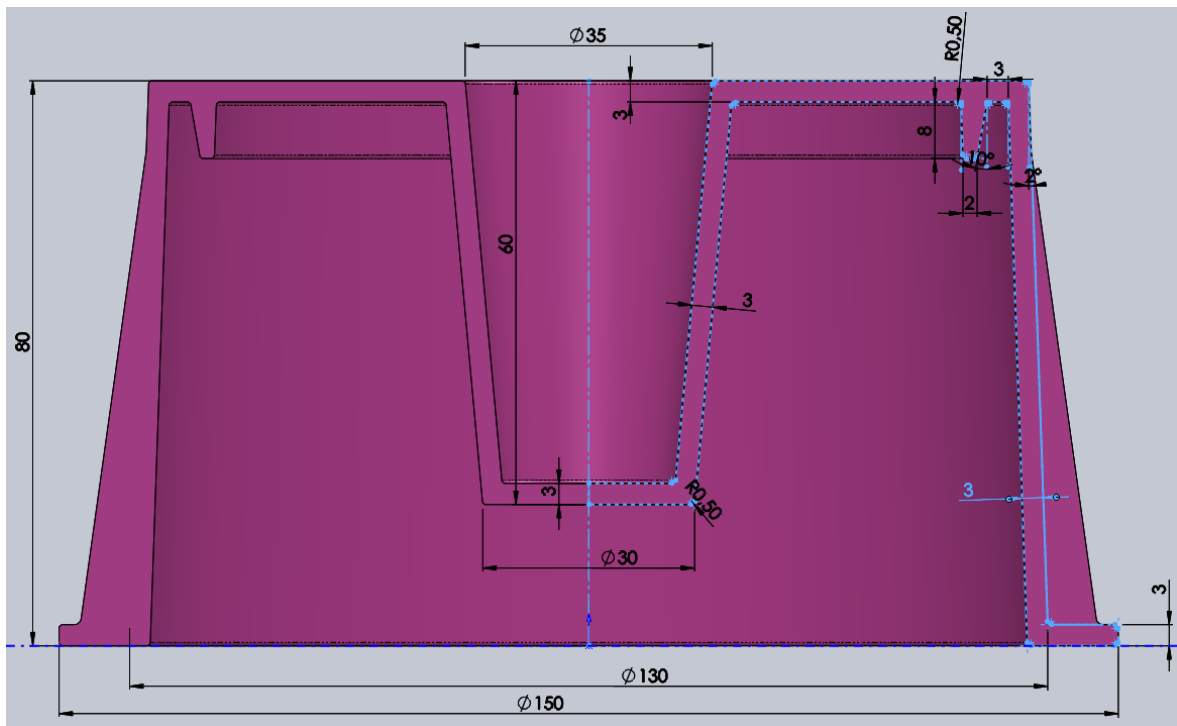
Jako chladivo se využívá plyn s vysokým výparným teplem. Plyn je zkapalněn a stlačen a proudí do expanzních oblastí formy, kde díky snížení tlaku expanduje a tím odebírá velké množství tepla ze svého okolí. Tato technologie se používá v kombinaci s výrobou forem technologií DMLS, kdy jsou expanzní dutiny v konstantní vzdálenosti od dutiny formy a tím se výrazně zvyšuje účinnost systému a zvyšuje se homogenita teplotního pole a tím kvalita výrobku. Existuje také provedení bez expanzních dutin. Metodou FDM se vyrobí pórovitá struktura s kompaktním povrchem dutiny formy a plyn expanduje v pórovitých prostorech. Tím se minimalizuje snižování účinnosti nárůstem vzdálenosti mezi temperačním médiem a dutinou formy. Účinnost se ale snižuje nižším průtokem plynu. [7] [8] [5]

6 NÁVRATNOST NEKONVENČNÍ VÝROBY

Výrobek: VÍKO

Parametry víka:

- Materiál.... Polypropylen
- Hustota.... $\rho = 830 \text{ kg/m}^3$
- Tep. vodivost... $\lambda_v = 0,14 \text{ W/mK}$
- Měr.tep. kapacita... $c_v = 1900 \text{ J/kgK}$
- Teplota tavení... $t_t = 165 \text{ }^\circ\text{C}$
- Teplota taveniny... $t_p = 180 \text{ }^\circ\text{C}$
- Teplota vyhození... $t_v = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
- Doba chlazení... $t_c = 30 \text{ s}$
- Tloušťka stěny... $s = 3 \text{ mm}$



Obr. 3 – Řez výrobkem

Parametry formy:

- Materiál... Martenzitická ocel 1.2709 (DMLS MS1)
- Hustota... $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
- Tep. vodivost... $\lambda_f = 41 \text{ W/mK}$
- Měr.tep. kapacita... $c_f = 420 \text{ J/kgK}$

Parametry temperačního média:

- Materiál... voda
- Hustota... 997 kg/m^3
- Tep. vodivost... $\lambda_m = 0,6 \text{ W/mK}$
- Teplota... $t_m = 40 \text{ }^\circ\text{C}$
- Měr.tep. kapacita... $c_m = 4184 \text{ J/kgK}$
- Průměr temperačních kanálů... $d = 8,5 \text{ mm}$

Pro zjednodušení výpočtu rozdělím výrobek na 3 oblasti. Vypočítám, jakou mají tepelnou energii a tu porovnám se schopností formy (danou temperačním systémem) teplo odvést, odtud dále spočítám potřebný tepelný tok k dosažení potřebné doby chlazení pro formu konvenční a nekonvenční, z nich odvodím účinnosti a úspory.

6.1 Výrobek

Celý výrobek:

- Objem... $V = 170000 \text{ mm}^3$
- Teplosměnná plocha $S = 112000 \text{ mm}^2$
- Hmotnost... $m = 0,15 \text{ kg}$
- Teplo výrobku Q_v , které je nutno odvést:
 - $Q_v = m \cdot c_v \cdot \Delta T = 0,15 * 1900 * 80 = \mathbf{22800 \text{ J}}$

Oblast 1, plášť:

- Objem... $V_1 = 109700 \text{ mm}^3$
- Hmotnost... $m_1 = 0,09 \text{ kg}$
- Teplosměnná pl... $S_1 = 73000 \text{ mm}^2$
- Teplo oblasti Q_1 , které je nutno odvést:

$$\circ Q_1 = m_1 \cdot c_v \cdot \Delta T = 0,09 * 1900 * 80 = \mathbf{13680 \text{ J}}$$

Oblast 2, dno:

- Objem... $V_2 = 41550 \text{ mm}^3$
- Hmotnost... $m_2 = 0,04 \text{ kg}$
- Teplosměnná pl... $S_2 = 28500 \text{ mm}^2$
- Teplo oblasti Q_2 , které je nutno odvést:
 - $Q_v = m_2 \cdot c_v \cdot \Delta T = 0,04 * 1900 * 80 = \mathbf{6080 \text{ J}}$

Oblast 3, vnitřní plášť:

- Objem... $V_3 = 18750 \text{ mm}^3$
- Hmotnost... $m_3 = 0,02 \text{ kg}$
- Teplosměnná pl... $S_3 = 12800 \text{ mm}^2$
- Teplo výrobku Q_v , které je nutno odvést:
 - $Q_v = m_3 \cdot c_v \cdot \Delta T = 0,02 * 1900 * 80 = \mathbf{3040 \text{ J}}$

6.2 Srovnání potenciálů forem vést teplo

Výpočetní model: Tepelný tok stěnou formy

Uvažuji stejný průměr temperačních kanálů, konstatní souč. přestupu tepla α i λ a stejný rozdíl teplot taveniny a temp. média. Měnit se ve výpočtu bude vzdálenost temperačních kanálů od dutiny formy, tj. a účinná délka temperačních kanálů, tedy i teplosměnná plocha temperačních kanálů. Rozdíl teplot je na začátku chlazení $140 \text{ }^\circ\text{C}$ (tavenina $180 \text{ }^\circ\text{C}$ - temperační médium 40°C). Na konci chlazení je 60°C . Proto pro výpočet volím střední rozdíl teplot 100°C . Pro zjednodušení použiji:

Pro prostup tepla stěnou:

$$q = \frac{\lambda_f * S_m * \Delta T}{h}$$

Pro prostup tepla válcovou stěnou:

$$q = \frac{2 * \pi * \lambda * L * \Delta T}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

- **Oblast 1, plášť – KONVENČNĚ**

- Ekvivalentní poloměr kanálů zjištěna v Solidworks aproximací $r_2 = 85\text{mm}$.
- Ekvivalentní poloměr vnější kuželové stěny výrobku $r_2 = 64\text{mm}$
- Ekvivalentní poloměr vnitřní kuželové stěny výrobku $r_2 = 61\text{mm}$
- Délka kanálů = 3000mm

$$q_{out} = \frac{2 * \pi * 41 \text{ W/mK} * 0,077 * 100^\circ\text{C}}{\ln \frac{0,085}{0,064}} = 6623 \text{ W}$$

$$q_{in} = \frac{2 * \pi * 41 \text{ W/mK} * 0,063 * 100^\circ\text{C}}{\ln \frac{0,061}{0,047}} * \frac{244}{295} = 4570 \text{ W}$$

- (Nekratší možná doba chlazení $13680\text{J}/(6623+4570)\text{W} = 1,2\text{s}$)

- **Oblast 1, plášť – NEKONVENČNĚ – 3D tisk**

$$q_{out} = \frac{2 * \pi * 41 \text{ W/mK} * 0,077 * 100^\circ\text{C}}{\ln \frac{0,078}{0,064}} = 9287 \text{ W}$$

$$q_{in} = \frac{2 * \pi * 41 \text{ W/mK} * 0,063 * 100^\circ\text{C}}{\ln \frac{0,061}{0,047}} = 5525 \text{ W}$$

- (Nekratší možná doba chlazení $13680\text{J}/(9287+5525)\text{W} = 0,9\text{s}$)

Účinnost konvenční oproti nekonvenční technologii je: $\mu_1 = 0,76$

- **Oblast 2, dno - KONVENČNĚ:**

- Vzdálenost kanálu od dutiny formy. $h = 10 \text{ mm}$
- Průměrná účinná délka... $L = 82 \text{ mm}$

$$q = \frac{41 \frac{\text{W}}{\text{mK}} * 8 * (\pi * 0,0085\text{m}) * 0,082\text{m} * 100^\circ\text{C}}{0,01\text{m}} = 7176\text{W}$$

- **Oblast 2, dno – NEKONVENČNĚ – 3D tisk**

$$q = \frac{41 \frac{\text{W}}{\text{mK}} * 8 * (\pi * 0,0085\text{m}) * 0,082\text{m} * 100^\circ\text{C}}{0,01\text{m}} = 7176\text{W}$$

- (Nekratší možná doba chlazení $6080J/7176W = 0,86s$)

Účinnost konvenční oproti nekonvenční technologii je: $\mu_2 = 1$

- **Oblast 3, vnitřní plášť – KONVENČNĚ**

$$q_{pl} = \frac{2 * \pi * 41 \text{ W/mK} * 0,043 * 100^\circ\text{C}}{\ln \frac{0,0295}{0,01425}} * \frac{120}{196} = 932 \text{ W}$$

$$q_{podst} = \frac{41 \text{ W/mK} * 0,000078\text{m}^2 * 100^\circ\text{C}}{0,0115\text{m}} = 28\text{W}$$

- (Nekratší možná doba chlazení $3040J/(932+28)W = 3,2s$)

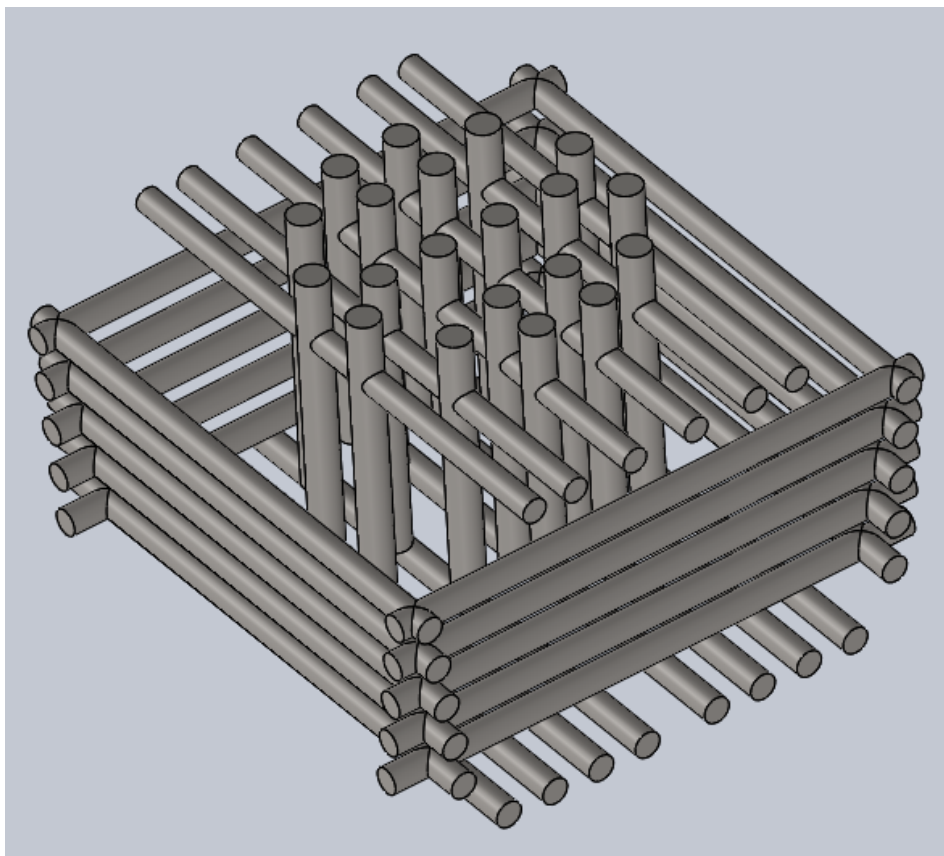
- **Oblast 3, vnitřní plášť – NEKONVENČNĚ – 3D tisk**

$$q_{pl} = \frac{2 * \pi * 41 \text{ W/mK} * 0,043 * 100^\circ\text{C}}{\ln \frac{0,028}{0,01425}} = 1640 \text{ W}$$

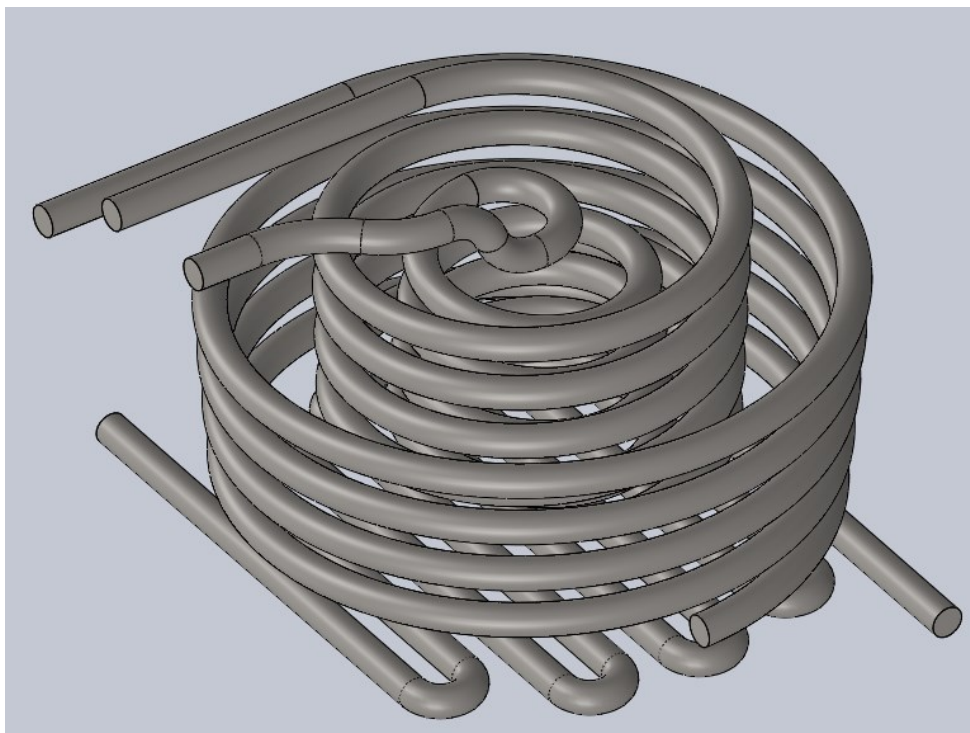
$$q_{podst} = \frac{41 \text{ W/mK} * 0,00129\text{m}^2 * 100^\circ\text{C}}{0,0115\text{m}} = 460 \text{ W}$$

- (Nekratší možná doba chlazení $3040J/(1640+460)W = 1,4s$)

Účinnost konvenční oproti nekonvenční technologii je: $\mu_3 = 0,46$



Obr. 4 – Konvenční temperační systém



Obr. 5 – Nekonvenční temperační systém

6.3 Výpočet návratnosti

- Cena pro výrobu tvárníku a tvárnice od firmy Mnástrojárna s.r.o. **106 000 Kč.**
- Cena od firmy Tecron na DMLS cca = **1 000 000 Kč,**
- Cena od firmy Tecron na FDM cca = **715 000 Kč**

Předpoklady pro výpočet návratnosti:

- Doba chlazení konvenční metodou = 15s
- Výrobní takt = 30s
- 1 výrobní Člověkohodina = 300 Kč
 - 1 Člověkovteřina = $300/3600$ 0,083 Kč
- 1 Kwh (k roku 2020) = 4,9 Kč
 - $1Kws = 4,9/3600 =$ 0,00136 Kč

Výpočet návratnosti za konstantních energetických a tepelných podmínek:

- Doba chlazení nekonvenční metodou = $15s * \mu_3 =$ 6,9s
 - Chlazení zkrácené o dobu = 8,1s
- Výrobní takt = $30s - 8,1s =$ 21,9s
 - Výrobní takt zkrácen o dobu = 8,1s
 - Úspora na 1ks $8,1s * 0,083 =$ 0,672 Kč
- **DMLS oproti konvenci =** 894 000 Kč
 - Návratnost v ks = $894000/0,672 =$ 1 330 357 ks
 - **Návratnost v čase =** $1330357 * 21,9 =$ **337 dní**
- **FDM oproti konvenci =** 609 000 Kč
 - Návratnost v ks = $609000/0,672 =$ 906 250 ks
 - **Návratnost v čase =** $1330357 * 21,9 =$ **230 dní**

Výpočet návratnosti za konstantních časových podmínek:

- Odvedené energie z výstřiku = 22800J
- Chladicí výkon temp. jedn. = $22800J/15s =$ 1520W
 - Spotřeba chlad. energie na 1 výstřik (*15s) = 22800Ws
- Příkon temp. jedn. (účinnost = 0,75) = $1520/0,75 =$ 2026W
 - Spotřeba temp. jedn. na 1 výstřik (*15s)= 30390Ws

- Příkon pro DMLS formu = $2026\text{W} * \mu_3(0,46) = 932\text{W}$
 - Spotřeba temp. jedn. DMLS na 1 výstřik(*15) = 13980Ws
- Úspora energie na 1ks = $30390-13980 = 16\ 410\ \text{Ws}$
 - $\text{Kwh}/3600000 = \text{Ws} = 0,00456\ \text{Kwh}$
- Úspora v Kč na 1ks = $0,022\text{Kč}$
- DMLS oproti konvenci = $894\ 000\ \text{Kč}$
 - Návrstnost v ks = $894000/0,022 = 40\ 636\ 363\ \text{ks}$
 - Návrstnost v čase = $1330357 * 15 = \mathbf{7054\ \text{dní}}$
- FDM oproti konvenci = $609\ 000\ \text{Kč}$
 - Návrstnost v ks = $609000/0,022 = 27\ 681\ 818\ \text{ks}$
 - Návrstnost v čase = $1330357 * 21,9 = \mathbf{4805\ \text{dní}}$

Z tohoto výpočtu jednoznačně vyplývá, že nemá smysl šetřit energii díky vyšší účinnosti zařízení, ale šetřit výrobní čas.

Návrstnost formy vyrobené technologií DMLS je cca 1 rok při provozu 24/7.

Návrstnost formy vyrobené technologií FDM je cca $\frac{3}{4}$ roku při provozu 24/7.

7 VSTŘIKOVANÉ MATERIÁLY

Při rozhodování, jakou technologií bude výrobek z plastu vyráběn se pohlíží na materiál, složitost a výrobní sérii:

- Třískové obrábění – jednotky až desítky kusů
- Kombinace vstřikování (polotovaru) a třískového obrábění – desítky až stovky kusů
- Vstřikování na hotovo – stovky, tisíce a více kusů

Vzhledem k nízké ceně, teplotě tavení, ale také nízké nenucené zabíhavosti jsou to především výrobky z plastů, které se vyrábějí metodou vstřikování. Nejvyšší teploty tavení u plastů se pohybují kolem 400 °C, tudíž zde lze použít stroje a nástroje z ocelí, které těmto teplotám odolají. Např. kovy mají v podobě taveniny podstatně nižší viskozitu a dokáží vyplnit formu jen za působení gravitace.

Konkrétně lze metodou vstřikování zpracovávat tyto materiály:

7.1 Rozdělení materiálů

7.1.1 Termoplasty

- Monomery tvoří dlouhé řetězce polymeru, uplatňují se vazby (Van der Waalsovi síly, vodíkové můstky, dipólová vazba), které slábnou se zvyšující se teplotou. Vratný děj tuhnutí, měknutí až zkapalnění (teoreticky nekonečněkrát opakovatelný). Při tuhnutí se opět tvoří řetězce. Se změnou teploty nedochází k chemickým změnám, jen ke změně uspořádání.
- Pevnostní charakteristiky jsou velice ovlivněny chemickým složením. V závislosti na typu vazeb, délce řetězců, míře zesíťování, atd (amorfní, semikrystalická struktura) může být výsledný materiál křehký, pevný, pružný, průhledný, odolný vůči vnějším vlivům, atd.
 - PE – Polyethylen – semikrystalická struktura charakterizovaná tvarem řetězců. PE-HD vysokohustotní, lineární řetězce, PE-LD nízkohustotní rozvětvené řetězce. Vysoce síťovaný PE-X – ztrácí char. termoplastu, přechází do elastomeru. Chemická odolnost (voda, kyseliny, zásady), pod UV degraduje

- (stabilizace), nižší pevnost, značné tečení, výborná houževnatost, výborné kluzné vlastnosti. Použití: obalové materiály, nádrže, kluzná pouzdra
- PP – polypropylen – semikrystalická struktura charakterizovaná podílem ataktické složky. Chemická odolnost (voda, kyseliny, zásady), pod UV degraduje (stabilizace), oproti PE lepší odolnost zvýšeným teplotám, vyšší pevnost, tuhost, odolnost otěru, nízká hustota. Použití: nárazníky, lana, skříně akumulátorů, zdravotnická technika
 - PTFE – polytetrafluorethylen – amorfni struktura – oproti PE, PP nižší chem, odolnost, samozhášivý, pevný, tvrdý, křehký. Použití trubky, fólie, obaly, podlahové materiály
 - PS – polystyren – nenavlhavý, pod UV žloutne, odolává alkoholu, olejům, neodolá rozpouštědlům, křehký, použití: kelímky, misky. Expandovaný polystyren – tepelná a zvuková izolace, transportní ochrana
 - SAN – amorfni struktura, průhledný, vyšší chemická odolnost, rázová odolnost. Použití: kuchyňské nádoby, kryty světel
 - ABS – akrylonitril-butadien styren – amorfni struktura – vyšší chemická odolnost, vyšší houževnatost, dobrá pevnost, neprůhledný, navlhavý. Použití: skříně elektroniky (monitory, PC, TV, odpady v domácnostech)
 - PMMA – polymethylmethakrylát – amorfni struktura s výbornou propustností světla, výborné mechanické vlastnosti, odolává vzduchu a UV. Použití: aplikace pro průchod světla – kryty svítidel, střechy hal, průhledné protihlukové stěny, umělé zuby
 - PET – polyethylentereftalát – amorfni nebo semikrystalická struktura – pevný, křehký, kluzné vlastnosti, navlhavý, vysoká propustnost světla. Použití: vlákna pro textil, tkaniny, lana, výztuže pneumatik, nápojové lahve
 - PBT – polybuthylentereftalát – semikrystalická struktura – vlastnosmi podobné nebo mírně nižší než PET, ale lépe zpracovatelné. Části vyztužené či aditivované. Použití v elektrotechnice, zásuvky, apod.
 - PC – polykarbonát – amorfni struktura – výborná prostupnost světla, dobrá pevnost, výborná houževnatost, dobrá chemická odolnost. Použití: brýlová skla, čočky, kvalitnější kryty světel, nárazníky.

- POM - polyoxymethylen – semikrystalická struktura s velice nízkým podílem amorfní fáze, vysoká pevnost, tuhost, odolnost nárazům, kluzné vlastnosti, dobrá chemická odolnost, pod UV degraduje. Použití jako konstrukční plast: ozubená kola, spojovací materiál, kryty a skříně strojů,
- PA – polyamid – semikrystalická struktura. Vyrábí se mnoho variant (např.: PA-6; PA-66; PA-610; PA-11; PA-12). Snadno navlhavé, v kyselinách snadno rozpustné. Vysoká pevnost a teplota tavení, nízká houževnatost, lze i na úkor snížení pevnosti zvýšit houževnatost, kluzné vlastnosti. Použití jako konstrukční plast: kluzná pouzdra, kladky, rolny, pedály, kryty [9]

7.1.2 Reaktoplasty

- Zesíťovaná struktura tvořená silnými kovalentními vazbami, které po zreagování (iniciace teplem, tlakem nebo chemickým iniciátorem) nelze zpětně rozdělit, tedy nelze roztavit. Tvarovat lze jen omezenou dobu po spuštění iniciace vytvrzování. Proces zesíťování se nazývá vytvrzování. Jedná se o amorfní strukturu.
- Díky prostorovému zesíťování silnými kovalentními vazbami mají vytvrzené reaktoplasty vysokou teplotní a chemickou odolnost. Mají také vysokou pevnost a tuhost, ale v čisté formě často křehké (lze zlepšit plnivý)
 - Fenolitické pryskyřice (např.: PF - Fenol-formaldehydová pryskyřice). Iniciátorem vytvrzování teplo nebo chemická látka. V čisté formě pevné tvrdé, ale poměrně křehké – přidávají se plniva snižující křehkost. Chemicky odolné, dobré elektroizolační vlastnosti, tmavá barva. Přítomnost Fenolu (vždy zůstane nějaká část nezreagovaná) vylučuje použití v potravinářském, zdravotním, apod. průmyslu. Použití: lepidla, laky, jako pojivo s textiliemi, papírem, skelným vláknem, dřevem, apod. do laminátů, nábytek, pojivo hmot určených k lisování (pískové formy, brusné kotouče, elektrosoučástky, atd.
 - Aminoplasty – velmi podobné vlastnosti a použití, jako fenolitické pryskyřice. Aminoplasty jsou ale zdravotně nezávadné, díky tomu se nabízí použití i pro kuchyňské nádoby.
 - Epoxidové pryskyřice - Iniciátorem vytvrzování teplo nebo chemická látka. Výborná chemická i tepelná odolnost, pevnost, tvrdost, bezbarvé. Z reaktoplastů vynikají přilnavostí k různým materiálům (ocel, keramika, sklo, uhlík,

textil). Použití jako pojivo kompozitů – textilní, uhlíková, textilní vlákna, s tvrdidlem jako lepidla, konstrukční materiál v letectví, apod. Díky průhlednosti plní např. v kombinaci s uhlíkovým vláknem i estetickou funkci.

- Polyesterové pryskyřice – iniciátorem chemická látka. Je levnější než epoxidová pryskyřice. Má nižší tepelnou a chemickou odolnost, ale lepší korozivzdornost a lehkost. Při vytvrzování vykazuje vyšší smrštění. I po vytvrzení je toxická. Použití: pojivo podlahových hmot (minerály, kamenná drť), kompozitů, atd.
- U některých termpolastů (PUR – polyuretan, PE-X – vysoce zesíťovaný polyethylen) lze přidáním vhodných aditiv docílit vzniku struktury (prostorové zesíťování), kterou již nejde zpětně roztavit, případně ani tvarovat za zvýšených teplot. PUR za použití nadouvadecel se vyrábí pěny, lehčené materiály s pevným povrchem, apod.: matrace, sedačky, izolační pěny, ochrana při transportu, atd. PE-X za použití aditiv zvyšující zesíťování, které již nelze zpětně narušit, se zvyšující teplotou materiál jen mírně měkne, netaví se. Zvýšená chemická odolnost, rázová odolnost, nepatrně nižší pevnost a tvrdost oproti běžnému PE. Použití jako vysokonapěťová elektrická izolace, chemický průmysl, ropný průmysl. [9]

7.1.3 Kaučuky a pryže

- Kaučuk je tvořen slabými prostorovými vazbami teplem oslabovanými. Smícháním s příměsí lze strukturu zesíťovat (iniciace chemická či tepelná) – vulkanizovat a vytvořit tak pryž. Pryž má amorfnní strukturu s nízkou teplotou skelného přechodu.
- Čistý kaučuk je houževnatý a lepkavý, vulkanizovaná pryž je především elastická. Po odtížení se vrací do původního tvaru. Pro vulkanizaci je zásadní přidání aditiva (např. síra), která za zvýšených teplot řídce zesíťuje strukturu. Při výrobě kaučuků a pryží se výrazně uplatňuje použití aditiv, stabilizátorů, plniv, antioxidantů, apod. Díky těmto přísadám lze vyrobit materiály se širokou škálou použitelnosti. Jejich původ lze rozdělit na:
 - Přírodní kaučuk – získává se ze stromu kaučukovníku
 - Syntetický kaučuk – výroba z ropy

Z hlediska použití lze kaučuky rozdělit na:

- Kaučuky pro všeobecné použití – přírodní, butadienový kaučuk: Odolávají vodě. Degradují působením olejů, benzínu, UV záření, vysokých teplot, atd. Podléhají stárnutí – vhodné použití stabilizátorů. Jsou odolné otěru a rázům. Použití běžných sírou vulkanizovaných pryží: konstrukční materiály – silent-bloky, tlumící prvky a uložení, obuv, dopravníky, pneumatiky. Použití Ethylen-propylenových kaučuků, vysoká odolnost proti stárnutí: vnější těsnění oken, střešních prvků, vodovodních systémů, atd.
- Kaučuky pro speciální použití – přesně cíleným složením se dosahuje odolnosti proti různým vnějším vlivům. Odolnost vůči olejům, benzínu, kyselinám o různé chemické povaze vykazují kaučuky chloroprenové, akrylátové, fluorovodíkové, polysulfidové. Silikonové kaučuky jsou teplovzdorné, špatně ale za vyšších teplot odolávají vlhkosti, lidské tělo na ně nereaguje, používají se např. v motorech pro vedení vzduchu, těsnění, řemeny, rukavice, kontaktní čočky. [9]

7.1.4 Termoplastické elastomery

- Termoplastické elastomery: jde o směs termoplast a elastomer využívající jejich vlastností. Lze je díky tomu částečně tavit, tedy i vstříkovat – taví se termoplastická fáze, elastomerová fáze zůstává zesíťovaná. Pod teplotou tavení termoplastu drží termoplastické vazby pevně elastomerovou fázi. Kvůli termoplastické fázi nejsou vhodné k použití za zvýšených teplot.
- Obdobně dochází ke kombinaci mechanických vlastností. Vhodně zvoleným poměrem smíchání termoplastické a elastomerní fáze lze docílit různých vlastností. Může dosahovat houževnatost blízko pryži, není ale potřeba procesu vulkanizace a lze je poměrně snadno zpracovávat, za tepla tvarovat a recyklovat. [9]

7.1.5 Polymerní směsi

- kombinace různých délek zesíťování, různých vazeb a prostorového uspořádání řetězců díky smíchání více druhů polymerů s cílem získat unikátní mechanické, chemické či tepelné vlastnosti. Použití: nárazníky, měkčené plasty, chemicky, tepelně, únavově namáhané výrobky, speciální požadavky na tvar - výrobu, atd... [9]

7.1.6 Kompozity

- Kombinace 2 rozdílných fází (zásadně odlišného materiálu, vlákna - plniva s polymerem - pojivem), typické vlastnosti vláken (vysoká pevnost v tahu, tvrdost, rázová odolnost), kolem kterých tuhne pojivo (výsledný tvar, ochrana vláken, houževnatost, atd). Dosažení extrémních pevnosti, tuhosti, rázové odolnosti. Tyto vlastnosti lze koncentrovat do jednoho směru nebo rozptýlit ve všech směrech. Toto lze ovlivnit použitým materiálem vláken, jejich délkou a směrem uložení v matrici. [9]

7.2 Příprava materiálů

Pro docílení požadované kvality výsledného vstříkovaného výrobku je nezbytné materiál před vstupem do vstříkovacího stroje správně připravit.

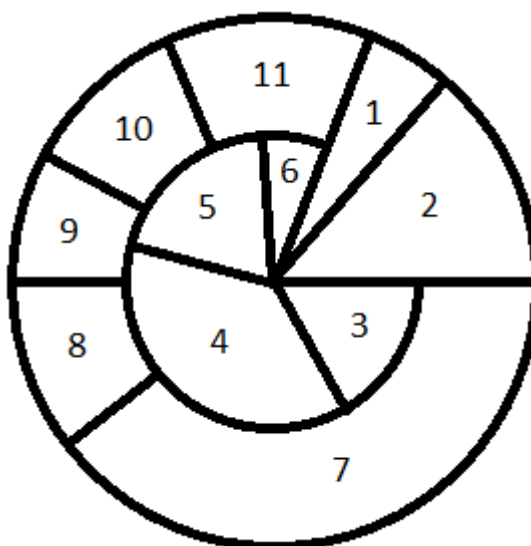
- Granulace – základním vstupním materiálem pro zpracování technologií vstříkování může být granulát (termoplasty), kapaliny (reaktoplasty), pasty, plastické hmoty, (kaučuky), rozemletý recyklát, atd. Granulát je velmi univerzální podoba základního materiálu, pokud v takové podobě může existovat. Snadno se dávkuje, měří množství a mísí.
 - Granulace z pásu – polotovarem je pás materiálu, který je hnán podávacími válci přes řezací válec, který jej podélně nařeže na příčný řezací válec osazený noži, které nařezané pásy nasekají na granule. Nízká produktivita, nevhodné pro tvrdé materiály
 - Granulace ze strun za studena – tavenina materiálu je vytlačována přes hlavici s otvory a vznikají tak jednotlivé struny, které jsou dále chlazeny v lázni a po odstranění přebytečného chladicího média jsou příčným válcem s noži rozsekány na granule. Nutné sušení granulátu v závislosti na navlhavosti materiálu. Vzhledem k povaze pohybu pohybujících se strun hrozí jejich zlomení, roztržení, slepení, atd.
 - Granulace ze strun za tepla – tavenina je vytlačována přes hlavici s otvory, kde vznikají struny, které jsou ale ihned odsekávány nožem rotujícím po čele hlavice. Dle povahy materiálu může být hlavice, případně její okolí chlazené k rychlejšímu ztuhnutí materiálu a snazšímu sekání.

- Doprava materiálu a její forma zásadně závisí na velikosti odběru zpracovatelským subjektem. Granulát lze přepravovat v pytlích až cisternách. Obdobně se přepravují kapaliny a pasty v kbelících, speciálních nádobách či cisternách. Důležité je při přepravě izolovat materiál od vnějšího prostředí (navlhavost granulátu, těkavost přísad, případně reakce s kyslíkem, vodou apod.). Častým způsobem přepravy materiálu ze skladů (sil) po firmě je přetlakové/podtlakové potrubí. Proud vzduchu strhává granulát a přepravuje jej na požadovaná pracovní střediska. Moderní přepravní zařízení dokážou zároveň granulát i míchat s přísadami a lze tak např. ušetřit nebo snížit požadavky na mísení před násypkou nebo v ní.
- Sušení – je proces nezbytný pro dodržení kvality výsledného výrobku. Pokud se dostane přebytečná vlhkost do vstřikovací formy, může v podobě plynné fáze způsobit porozitu, nekvalitní povrch, může dojít ke spálení povrchu výrobku vlivem Diesellova efektu, nebo k chemickému zreagování materiálu s vodou a tím narušení struktury a nedodržení mechanických, chemických či technologických požadavků. K sušení může docházet v samostatných sušících zařízeních, po kterých už ale nesmí materiál přijít do kontaktu s vlhkostí (především navlhavé materiály) nebo může být odplyňovacím zařízením opatřena plastikační jednotka, kterým se přebytečná vlhkost v podobě páry dostane z taveniny pryč. Reálně dosažitelné vysušení materiálu závisí na povaze vlhkosti. Zda je vlhkost jen na povrchu nebo je držena v materiálu kapilárně. Materiály, jejichž vlhkost v přirozené atmosféře je pro zpracování příliš vysoká, je nezbytné po vysušení izolovat, aby nedošlo ke zpětnému navlhnutí.
- Recyklace - Součástí každého výrobního procesu je odpad. Může se jednat buď o odpadový materiál technologický – předem se s ním počítá (vtokové systémy, odstříky, manipulační prvky) nebo se může jednat o zmetkové výrobky. Pokud to materiál umožňuje (např. termoplasty), vrací se tento odpad přes recyklátory, který materiál namele na požadované rozměry, zpět do výroby a použije se na další vstřikování. Komoditní odpady (popelnice na plast) zde nenachází příliš uplatnění vzhledem k vysokému znečištění, nejasnosti materiálu, tudíž nepoužitelnosti pro další zpracování. Materiály zpětně netavitelné (reaktoplasty) lze využít jedině rozemletím na velmi jemné částice a použít je již jen jako netavitelné plnivo. (často u levnějších materiálů) [10] [2]

7.3 Vstřikování materiálu

Nejdůležitějším dějem, který se u technologie vstřikování plastů odehrává, je naplnění formy taveninou. A to v co nejkratším čase, za ideální teploty taveniny i formy, musí dojít k úplnému naplnění formy i s ohledem na tepelnou roztažnost materiálu. Soubor procesů starajících se opakované plnění formy a vyhazování výrobků z ní se nazývá vstřikovací cyklus. [10] [2]

7.3.1 Vstřikovací cyklus



Obr. 6 – Vstřikovací cyklus

1 – vstřikování, 2 – dotlak a doplňování, 3 – odjezd vstřik. jednotky, 4 – plastikace, 5 – prodleva, 6 – příjezd vstřik. jednotky, 7 – chlazení, 8 – otevření formy, 9 – vyhození výstřiku, 10 – příprava formy, 11- uzavření formy

7.3.2 Fáze vstřikovacího cyklu

- 1 – vstřikování: plnění dutiny formy taveninou
- 2 – dotlak a doplňování: s ohledem na smrštění materiálu při chlazení je nutné v průběhu chlazení doplňovat chybějící materiál.
- 3 – odjezd vstřikovací jednotky – po naplnění formy odjíždí vstřik. jednotka mimo formu

- 4 – plastikace – po odjetí začíná vstřík. jednotka plastikovat materiál pro další vstříkování
- 5 – prodleva – vstřík. jednotka čeká na ochlazení výrobku, jeho vyhození, přípravu a uzavření formy. Je neustále vyhřívána a taveninu promíchává.
- 6 – příjezd vstříkovací jednotky – vstříkovací jednotka s taveninou přijíždí k připravené formě
- 7 – chlazení – po vstříknutí a doplnění materiálu dotlakem dochází k řízenému chlazení pomocí proudění temperačního média formou
- 8 – otevření formy - po dostatečném ztuhnutí pro vyhození je forma otevřena
- 9 – vyhození výstřiku – pohybem vyhazovacího systému je výstřík vyhozen z formy
- 10 – příprava formy – očištění dutiny od přebytečných odstříků, vtokových systémů, příp. připálenin a podobných vad, které by snížily kvalitu dalšího vstříkování
- 11 – uzavření formy a její uzamčení uzamykací silou pro další vstříkování [10] [2]

8 VADY VZNIKÉ PŘI VSTŘIKOVÁNÍ

8.1 Vady mechanického charakteru

- Studený spoj – může vzniknout setkáním dvou zatuhlých čel taveniny, nebo setkáním více zchladlých a již nemísitelných proudů – vznik proudnic.
 - Příčina: nehomogenní tavenina, nízká teplota taveniny nebo formy, umístění vtokového systému, malá tekutost taveniny
- Diesel efekt – je způsoben uzavřením vzduchu taveninou ve slepém místě formy a jeho stlačení a prudké zahřátí (princip Dieselova motoru) – dojde ke spálení taveniny a výrobě zmetku
 - Příčina: nedostatečné nebo špatně umístěné odvzdušnění formy, příliš vysoká rychlost či síla vstřikování
- Nedotečeniny – jsou způsobeny nevyplněním formy, zpravidla v nejbzdálenějším místě formy od vtoku nebo v tenké části formy
 - Příčina: nedostatečné množství vstříknutého materiálu, různá tloušťka stěn – příliš úzký prostor, vysoká viskozita taveniny, nízká rychlost nebo teplota taveniny, nízká teplota formy
- Propadliny, staženiny – vznikají v místech s vyšším objemem taveniny nedostatečně zásobovaným taveniny při dotlaku. Po ochlazení dojde ke smrštění a vzniku propadliny, staženiny, ale může dojít i ke vzniku vnitřní porozity či lunkru.
 - Příčina: místa s vyšším objemem taveniny oproti okolí výrobku, nedostatečný dotlak, nízká teplota v jednom místě nebo v celé formě či teplota taveniny
- Vnitřní pnutí – je způsobeno především tepelnou roztažností, resp. smrštěním při chlazení a tuhnutí výstřiku. Smrštění může při tuhnutí dosahovat až 2,4%. V důsledku nehomogenního chladnutí vzniká ve výstřiku pnutí, které se při zatížení v praxi sčítá s vnějším zatížením a může tak oslabit výrobek. Tohoto efektu lze ale i využít a úmyslně zanést do výrobku napětí, které v provozu podporuje funkci výrobku. Vlivem stárnutí a povahou polymerů toto pnutí postupně mizí, lze podpořit zvýšenou teplotou.
 - Příčina: nízký velikost dotlaku, nerovnoměrné chladnutí a tuhnutí, špatně navržená forma,

- Deformace způsobená jednosměrnou orientací makromolekul – při vstřikování taveniny se předurčují směrem toku taveniny směry krystalizace polymeru. V závislosti na orientaci makromolekul nedochází ke smrštění ve všech směrech stejně a může se tak výrobek v některém směru zdeformovat
 - Příčina: špatně zvolený vtokový systém a směr toku taveniny formou, vyšší náchylnost u tenkostěnných výrobků
- Nehomogenní struktura – při nerovnoměrném ochlazování formy může v rychle chladnoucích částech dojít k potlačení vzniku krystalické fáze a zanesení pnutí do struktury. Dochází také k mezifázovému rozhraní, které může mít negativní vliv na mechanické chování výrobku
 - Příčina: nerovnoměrné chlazení formy a výstřiku, nehomogenní tavenina
- Lunkry, dutiny, porozita – vznikají v místech s větším objemem taveniny, kdy kolem něj již všechny cesty taveniny ztuhly a ještě tekutá tavenina v tomto uzlu nemá odkud doplňovat chybějící materiál kvůli tepelnému smrštění.
 - Příčina: nevhodná geometrie výrobku, nízká teplota formy či taveniny, nízká hodnota dotlaku
- Deformace způsobené nevhodným vyhazováním – pro docílení co nejvyšší efektivity vstřikovacího stroje se výstřik vyhazuje z formy co nejdříve. Stanovuje se nejvyšší možná teplota, kdy ale ještě výrobek nemá maximální pevnost. Běžné jsou viditelné stopy na plochách, které jsou k tomu určené. V případě příliš brzkého vyhození nebo použití nevhodného vyhazovacího systému lze výrobek zničit.
 - Příčina: špatně načasované strojní pohyby, použití nevhodného vyhazovacího systému, nevhodný chladicí systém formy [11] [12]

8.2 Vady estetického charakteru

- Přetoky, otřepy, zatečeniny – vznikají vniknutím taveniny do technologických dutin. Např. do odvzdušňovacích dutin – dělicí roviny, kanálů, do dutin vyhazovače
 - Příčina: Nízká viskozita taveniny, vysoká teplota taveniny, vysoká vstřikovací síla, nízká uzamykací síla formy, neslícovaná či opotřebovaná dělicí rovina formy nebo opotřebovaný vyhazovací systém ve formě
- Vměstky – je to jiná částice (fáze) v tavenině, která po ztuhnutí narušuje estetickou stránku výstřiku, ale může narušovat i mechanické parametry.

- Příčina: znečištěný granulát, spáleniny při plastikaci, ocelová tříška ze stroje, atd.
- Proudnice – často směřují od vtoku. Jsou způsobeny předčasným tuhnutím taveniny při plnění formy a proudem z vtoku do všech stran.
 - Příčina: nízká teplota taveniny, nízká teplota formy, nízká rychlost plnění, vysoká viskozita taveniny
- Nedostatečná kvalita povrchu – vzniká ztrháváním tuhnoucí taveniny na povrchu formy. I při mikroskopickém posunutí dojde k malé deformaci povrchu výstřiku a výsledný povrch nevyhovuje požadavkům
 - Příčina: nízká teplota taveniny či formy, vysoká viskozita taveniny, nízká vstřikovací rychlost [11] [12]

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zpracována jako literární rešerše. Jsou zde rozebrány vstřikovací stroje, jednotlivé nezbytné jednotky, systémy, popsány konstrukční prvky, základní funkční principy, atd. Další část je věnovaná technologiím spojeným s temperací forem. Jsou zde popsány metody chlazení, způsoby výroby, temperační média, materiály forem, atd. V závěru práce jsou popsány používané materiály a možné vady vzniklé při vstřikování.

Důležitá je část věnující se temperaci forem. Zde je nejprve obecně popsána funkce, principy jednotlivých systémů, možné výrobní metody, technologie temperace, atd. Dále je popsáno konformní chlazení a možnosti výroby takového temperačního systému. Ten spočívá v metodách Contura, který dokáže vytvořit poměrně homogenní teplotní pole a je vyrobitelný běžnými obráběcími metodami. Dále vytvoření konformního chlazení umožňují metody 3D tisku kovu DMLS a systém založený na principu FDM. Tyto systémy prakticky nemají žádné tvarové omezení. Jsou ovšem výrazně dražší na výrobu než výroba běžnými obráběcími metodami. S tím souvisí i kapitola zhodnocující návratnost investice do formy s konformním chlazením. Forma pro standartní dutý výrobek o průměru 150mm a výšce 80mm vyrobená metodou 3D tisku DMLS má při provozu 24/7 návratnost přibližně rok. Forma vyrobená metodou 3D tisku založenou na principu FDM má při provozu 24/7 návratnost přibližně $\frac{3}{4}$ roku. Pro zajímavost jsem vypočítal návratnost s ohledem na uspořené čas a s ohledem na uspořené energii. Výsledek je jednoznačný a odpovídá obecné situaci ve výrobních firmách na trhu. Nemá smysl šetřit energií díky vyšší účinnosti zařízení, podstatně úspornější pro firmu je díky vyšší účinnosti zařízení zkracovat výrobní časy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] I. M. Seidl, Stroje pro zpracování polymerních materiálů, <https://publi.cz/books/181/>, 2016, ISBN 978-80-88058-71-7.
- [2] L. Zeman, Vstřikování plastů, 2018, ISBN 978-80-247-2819-3.
- [3] P. Ing. Jiří Bobek, Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů, publi.cz/books/179, 2016, ISBN: 978-80-88058-65-6.
- [4] P. a. k. doc. Ing. Martin Hynek, TEMPERACE VSTŘIKOVACÍCH FOREM, 2013.
- [5] Ing. Luboš Běhálek, TEMPERACE VSTŘIKOVACÍCH FOREM SOHLEDEM NA VLASTNOSTI A MORFOLOGII VÝSTŘIKŮ, časopis Strojírenská technologie ročník X–zvláštní číslo, prosinec 2005, s.9-13, vydavatel: ÚTRŮV, UJEP Ústí nad Labem ISSN1211-4162, 2005.
- [6] D. D. a. S. Meister, Correlation of Processing, Inner Structure, and Part Properties of Injection Moulded Thin-Wall Parts on Example of Polyamide 66, 2014.
- [7] I. L. Běhálek, Diplomová práce: Aplikace konformního chlazení vstřikovacích forem v procesu vstřikování plastů, 2012.
- [8] P. Červinková, Diplomová práce: KONFORMNÍ CHLAZENÍ VSTŘIKOVACÍCH FOREM, 2010.
- [9] P. Ing. Luboš Běhálek, Polymery, publi.cz/books/180, 2016, ISBN 978-80-88058-68-7.
- [10] p. D. I. P. Lenfeld, Technologie vstřikování, publi.cz/books/184, 2016, ISBN 978-80-88058-74-8.
- [11] P. Kuchař, VADY PŘI VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ, 2017.
- [12] I. E. Neuhäusl, Vady výstřiků 1.-4. díl, 100307 Vyšlo v MM : 2010 / 3, 03.03.2010 v rubrice Výroba / Plasty, Strana 58.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Řez vstřikovací formou	20
Obr. 2 – Vliv rychlosti ochlazování na strukturu polymeru	26
Obr. 3 – Řez výrobkem.....	38
Obr. 4 – Konvenční temperační systém.....	43
Obr. 5 – Nekonvenční temperační systém	43
Obr. 6 – Vstřikovací cyklus	53