



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta Strojní

Ústav materiálového inženýrství

Ověření vlivu optimalizovaných podmínek na vlastnosti výrobku

Quality control of product after optimization of production cycle

Bakalářská práce

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Zdeňka Jeníková Ph.D.

Konzultant: Josef Hell (společnost DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.)

Štěpán Ježek



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Nemám žádný závažný důvod proti užití školního díla ve smyslu §60 Zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis



Poděkování

Rád bych poděkoval mé vedoucí práce Ing. Zdeňce Jeníkové Ph.D. za pomoc při vytváření této práce, konzultantu Josefu Hell za předané informace, Miroslavu Menšíkovi za pomoc při vytváření vzorků, společnosti DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. za možnost vytvoření BP s praktickým dopadem a mým rodičům, ve kterých jsem měl po celou dobu velikou morální podporu.



Anotace

Ověření vlivu optimalizovaných podmínek na vlastnosti výrobku

Autor: Štěpán Ježek

Vedoucí BP: Ing. Zdeňka Jeníková Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá vlivem optimalizace výrobního procesu na konečnou kvalitu a funkčnost výrobku. Obsah práce je rozdělen do tří částí. První část se teoreticky zabývá obecnými vlastnostmi polymerů. Druhá část se zabývá technologiemi zpracování polymerů včetně detailního popisu technologie vstřikování, využití v této práci. Třetí část práce se zabývá měřením předem stanovených parametrů pro následné zhodnocení vlivu optimalizace procesu na výrobek.

Klíčová slova: polymer, makrostruktura, makromolekula, krystalizace, takticita, vstřikování, deformace

Quality control of product after optimization of production cycle

This bachelor thesis deals with influence of optimization of production cycle to product quality and function. Contents of thesis is divided to three parts. First part deals with theoretic attribute of polymers. Second part deals with technologies used for polymer manufacturing including detailed description of injecting molding used in this thesis. Third part deals with measuring of designed attribute for drawing conclusions of influence of production cycle to product in end of thesis.

Key words: polymer, macrostructure, macromolecule, crystallization, tacticity, injection molding, deformation



Obsah

1. Úvod	8
1.1. Představení společnosti	8
1.2. Cíl práce	8
2. Popis a charakteristika polymerů	10
2.1. Polymery	10
2.2. Použití.....	11
2.3. Obecné vlastnosti.....	11
2.4. Základní dělení.....	11
2.5. Krystalizace.....	15
2.6. Charakteristické teploty polymerů.....	17
3. Technologie zpracování.....	19
3.1. Zpracování polymerů tvářením	19
3.2. Zpracování polymeru vstřikováním.....	21
4. Experimentální část.....	25
4.1. Testovaná kritická oblast obalu klimatizační jednotky.....	25
4.2. Návrh optimalizace.....	26
4.3. Předpoklad výsledků	26
4.4. Použitý materiál.....	26
4.4. Výroba vzorků	27
4.5. Značení vzorků	31
4.6. Měření deformace vzorků pomocí digitálního mikroskopu.....	32
4.7. Měření hustoty materiálu vzorků.....	36
4.8. Měření metodou DSC	42
5. Závěr	46
6. Literatura:	47



Seznam zkratek

- BP - Bakalářská práce
- PP - polypropylen
- PVC - polyvinylchlorid
- PE - polyethylen
- HDPE - high density polyethylen (vysoko hustotní polyethylen)
- LDPE - low density polyethylen (nízko hustotní polyethylen)
- PET - polyethylentereftalát
- DSC - diferenční snímací kalorimetrie
- RPS - referenční měřicí bod
- T_f - teplota tečení
- T_g – teplota skelného přechodu
- T_m – teplota tání krystalického podílu
- T_c – teplota rozpadu polymeru
- E – modul pružnosti v tahu
- G – modul pružnosti ve smyku



Seznam obrázků

Obrázek 1 Světová produkce plastů 1950-2011	10
Obrázek 2 Využití plastů v EU27 + Norsko + Švýcarsko.....	11
Obrázek 3 Lineární makromolekula	12
Obrázek 4 Rozvětvená makromolekula	12
Obrázek 5 Zesíťovaná makromolekula	12
Obrázek 6 Izotaktický polymer.....	12
Obrázek 7 Syndiotaktický polymer	13
Obrázek 8 Ataktický polymer.....	13
Obrázek 9 Semikrystalický termoplast.....	13
Obrázek 10 Reaktoplast	14
Obrázek 11 Elastomer	14
Obrázek 12 Termoplastický elastomer.....	14
Obrázek 13 Sférolit.....	16
Obrázek 14 Závislost modulu pružnosti ve smyku semikrystalických polymerů na teplotě.....	17
Obrázek 15 Závislost modulu pružnosti ve smyku zesíťovaných a amorfních polymerů na teplotě.....	18
Obrázek 16 Příklad procesu lisování	19
Obrázek 17 Příklad strojů používaných při válcování	20
Obrázek 18 Princip technologie vyfukování.....	20
Obrázek 19 Příklad hlavy pro vytlačování	21
Obrázek 20 Vstřikovací cyklus.....	21
Obrázek 21 Schéma vstřikovacího stroje se šnekovou plastikací	22
Obrázek 22 Souřadný systém klimatizační jednotky.....	25
Obrázek 23 Zkoumané RPS body	26
Obrázek 24 Vystříknuté obaly klimatizací před odběrem vzorků	28
Obrázek 25 Vyříznuté části obalů.....	29
Obrázek 26 Řezy RPS bodem.....	29
Obrázek 27 Opracovaný RPS bod rovnoběžně s osou	29
Obrázek 28 Oddělený RPS bod kolmo na osu.....	30
Obrázek 29 Příklad označení vzorku.....	32
Obrázek 30 Vyhodnocování vzorků. Řez vedený rovnoběžně s osou RPS bodu.....	33
Obrázek 31 Vyhodnocování vzorků oddělených kolmo na osu RPS bodu.....	33



1. Úvod

V bakalářské práci (BP) se budu věnovat problematice krystalizace polymerů při sériové výrobě, vlastnostem materiálu a deformaci bodů dosažených po zpracování.

V BP se budu zabývat vstřikováním plastových obalů klimatizačních jednotek, jejichž materiálem je polypropylen (PP) plněný mastkem. Jejich testování bude prováděno v laboratořích společnosti DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. a Ústavu materiálového inženýrství ČVUT v Praze. Dosažené výsledky budou konzultovány s mým konzultantem a s vedoucí bakalářské práce.

Z řezů zvolených kritických oblastí, které povedu pod různými úhly, budu zjišťovat pomocí mikroskopu deformaci vnitřního funkčního tvaru, ke které by mohlo dojít v průběhu upraveného produkčního cyklu. S deformacemi kritických bodů úzce souvisí pevnost budoucího vzniklého šroubového spojení, které by při velké deformaci zvolených bodů nemuselo být funkční, a tím by mohlo ovlivnit bezpečnou a trvalou funkci klimatizační jednotky.

Jedním z testů prováděných v rámci této BP bude také měření hustoty materiálu vybrané části obalu klimatizační jednotky. Hustotu materiálu ovlivňuje nejen změna vnitřní struktury, ale také případné chyby technologického procesu (bubliny ve výrobku). Jedním z předpokladů před začátkem měření je změna vnitřní struktury, kterou budeme moci sledovat již při měření hustoty a následně potvrdit měřením pomocí DSC metody.

1.1. Představení společnosti

Výsledky BP vznikly ve spolupráci se společností DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o., která se zabývá výrobou klimatizačních jednotek do osobních automobilů. Ve společnosti se kompletují klimatizační jednotky, vyrábějí se zde jejich plastové obaly, dále hliníkové součásti včetně výměníků tepla a další důležité hliníkové součásti klimatizačních jednotek.

Jsem rád, že jsem dostal možnost zpracovat BP pro společnost DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o., neboť je to jedna z nejuspěšnějších společností na světě, která se zabývá vstřikováním plastů. V BP budu čerpat z letitých zkušeností zaměstnanců společnosti DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. a použiji je ve zhodnocení výsledků práce.

1.2. Cíl práce

Při zpracování polymeru, stejně jako ve všech dalších výrobcích, je důležitá produktivita práce a množství kvalitně vyrobených kusů. Vedení každé firmy se snaží zrychlovat výrobu až na pokraj výrobních možností podniku, ale se vstřikováním plastů to není tak jednoduché. Potřebujeme, aby si polymer zachoval určité požadované vlastnosti tak, aby výsledný produkt splňoval plánované užité a kvalitativní vlastnosti. Jednou z nejdůležitějších fází výrobního cyklu stroje je proces chlazení výrobku ve formě, které významně ovlivňuje výsledný tvar a strukturu materiálu výrobku. Snižováním délky chlazení ve formě je jednou z možností úpravy času výrobního cyklu, avšak změna ovlivňuje další významné vlastnosti výrobku.

Cílem této práce je optimalizovat výrobní proces společnosti zkrácením doby chlazení, a tím zkrátit celkový čas cyklu a v důsledku zvýšit produktivitu stroje.

Bakalářská práce má sloužit jako podklad pro optimalizaci výrobních procesů ve společnosti DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. pro zrychlení a zkvalitnění výroby. Všechny případné změny výrobních procesů budou podloženy experimentálními daty vzešlých z této práce. Byl



bych rád, kdyby moje BP byla přínosem pro firmu, pomohla s ušetřením zdrojů v důsledku zrychlení výroby nebo alespoň potvrzením správnosti současného nastavení strojů. Cílem každé výroby je spokojený zákazník a každý výrobní podnik by se o to měl snažit.

Možnou úpravu výrobního procesu budu vyhodnocovat podle těchto kritérií:

- Deformace zvolené oblasti na klimatizační jednotce
 - Vizuální kontrola vnitřní deformace ve vhodném řezu
 - Změna vnitřního průměru zvolené oblasti měřená digitálním mikroskopem
- Změna vnitřní struktury
 - Měření hustoty materiálu
 - Měření metodou DSC (Diferenciální skenovací kalorimetrie)

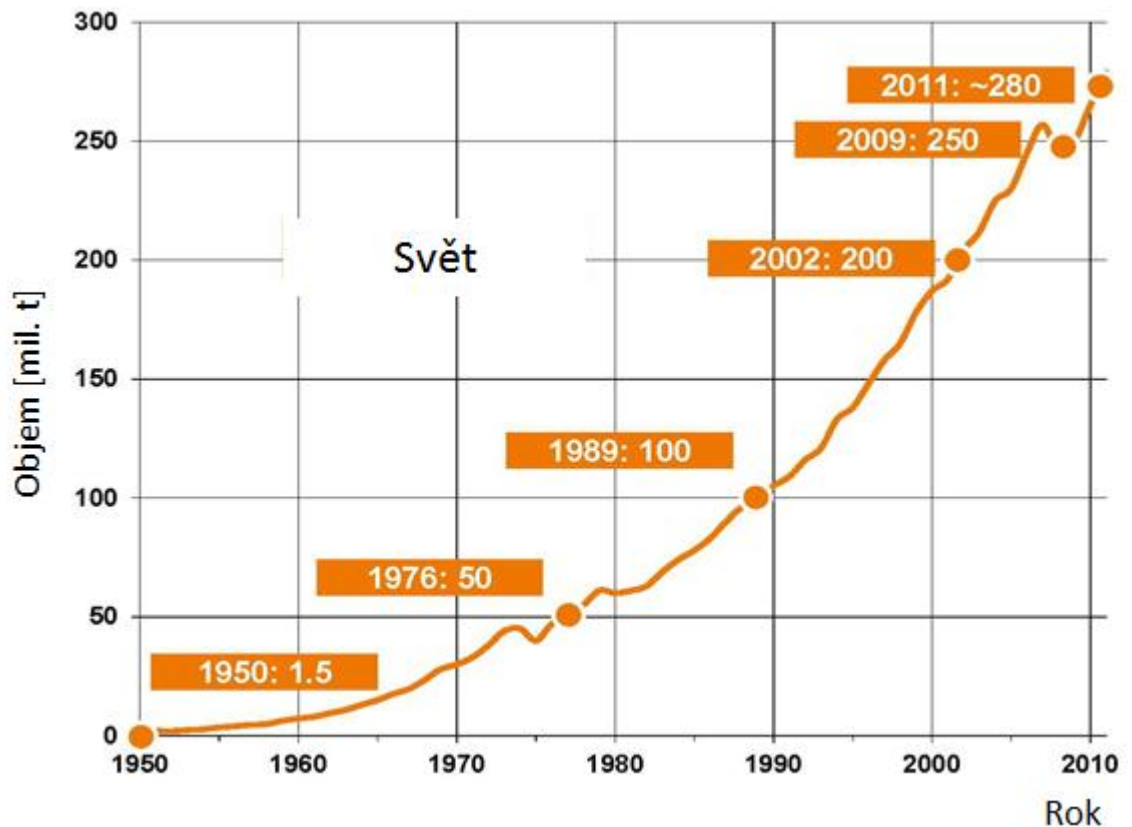


2. Popis a charakteristika polymerů

2.1. Polymery

Polymery jsou nekovové materiály velmi rozdílných vlastností. Jedním z prvních objevených polymerů byl kaučuk v Jižní Americe. Lidé rychle přišli na užité vlastnosti kaučuku po vulkanizaci a začali s jeho sériovým zpracováním a využíváním. S rostoucími nároky na materiály, způsobené technickým pokrokem, se začaly vyvíjet a zkoušet nové synteticky vyrobené polymerní materiály.

Jedním z prvních uměle vyrobených polymerů byl v roce 1925 polyvinylchlorid (PVC). Od té doby množství vynalezených polymerů rychle rostlo a polymerní materiály se začaly uplatňovat v mnoha odvětvích průmyslu. Průběh objemu produkce polymerů můžeme vidět na Obrázku 1. Jejich největší výhodou je relativně snadná výroba, snadné zpracování a hlavně fyzikální a chemické vlastnosti mnohdy mnohem lepší než u kovových materiálů. Tím začala popularita polymerů rychle stoupat a nyní jsou polymery velmi využívaným materiálem. V současné době výzkum polymerů roste, neboť snaha o nahrazení kovových materiálů plastem se zvyšuje. Používané plastové materiály jsou většinou směsí základního polymeru a jednoho či více aditiv. Aditiva se přidávají pro zlepšení užitečných vlastností nebo pro zlevnění výroby. Nejznámějšími aditivy jsou vytvrzovadla, nadouvadla, barviva, retardéry hoření a jiné.

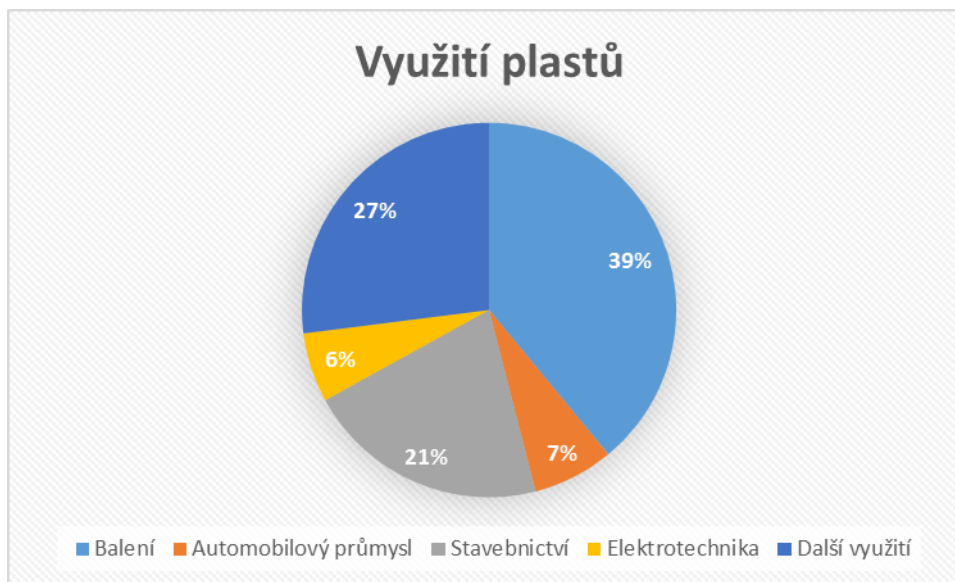


Obrázek 1 Světová produkce plastů 1950-2011



2.2. Použití

Polymery jsou velice rozšířeným materiálem, můžeme je použít jako pevné plasty (obalová technika, stavebnictví, strojírenství, elektronika, výroba nábytku,...), jako nátěrové hmoty, lepidla a tmely, kaučuky a jako vlákna i matrice kompozitu. Rozmanité možnosti využití dokazují, že polymery jsou velice univerzálním materiálem, který lze při správném složení uplatnit téměř ve všech oblastech (Obrázek 2).



Obrázek 2 Využití plastů v EU27 + Norsko + Švýcarsko

2.3. Obecné vlastnosti

Vlastnosti každého polymeru jsou charakterizovány základními znaky. Hlavním znakem polymeru je jeho složení. Na začátku určování vlastností polymeru a jeho vhodného využití je nutné znát chemické složení jeho základní strukturální jednotky, typ a množství aditiv. Všechny tyto složky a jejich vzájemný poměr ovlivňují výsledné vlastnosti. To je také důvod velké popularity využívání polymerů, neboť v současné době jsme schopni si vyrobit polymer vhodný přímo pro naši potřebu využití.

Další charakteristikou je velikost, tvar a takticitu makromolekul. Důležitou vlastností polymerů je jejich tvarová stálost. Z ní plyne dělení na pevné nebo elastické, tvrdé nebo měkké. Další důležitou charakteristikou jsou optické vlastnosti, podle kterých je dělíme na transparentní, průsvitné nebo neprůsvitné. V neposlední řadě je pro nás také důležitá odolnost vůči povětrnostním vlivům a degradaci, odolnost vůči vysoké nebo nízké teplotě, navlhavost, elektrická vodivost a vedení tepla. O příčinách vlastností polymerů se budu v této práci ještě důkladněji zabývat v následující kapitole 2.4. Základní dělení.

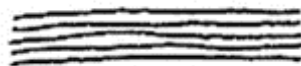
2.4. Základní dělení

Polymery můžeme dělit podle mnoha faktorů, mezi nejdůležitější dělení patří dělení podle tvaru makromolekuly, podle takticity, podle vnitřní struktury a podle typu polymeru. Rozdělení polymerů se budu dále v práci věnovat důkladněji, protože souvisí i s krystalizací, která je v mé práci jedním z hlavních témat.



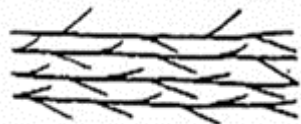
2.4.1. Tvar makromolekuly

Lineární makromolekula (Obrázek 3) je obvyklým tvarem makromolekuly pro termoplasty, její hlavní výhodou je za vhodných podmínek schopnost krystalizace a kvůli sekundárním vazbám (mezi makromolekulami), mající menší energii než vazby primární, je vhodná pro opakované roztavení a tuhnutí. Krystalizaci lineární makromolekuly ovlivňuje také takticita, které se věnuji v kapitole 2.4.2. Tacticita



Obrázek 3 Lineární makromolekula

Rozvětvená makromolekula (Obrázek 4) není vhodná pro krystalizaci, nepřímota a rozvětvení zabraňuje správnému seskupení při krystalizaci, a proto polymery s tímto druhem makromolekuly nekrystalizují.



Obrázek 4 Rozvětvená makromolekula

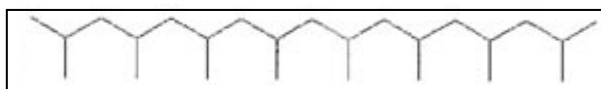
Zesíťovaná makromolekula (Obrázek 5) je typická pro reaktoplasty a elastomery, vzniká při síťovací reakci a potřebnou podmínkou pro úspěšné zesíťování struktury je vhodná dvojná vazba v makromolekule, vhodné síťovací činidlo a dostatečná teplota a tlak. Materiál s již vzniklou zesíťovanou strukturou je nemožné roztavit. Při zvyšování teploty nad T_f dojde ke zničení materiálu. Tento typ polymerů je vhodnější a stálější při používání za vyšších teplot.



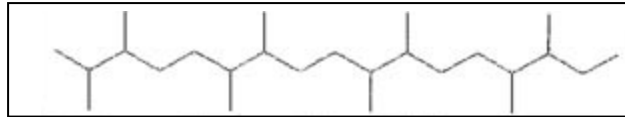
Obrázek 5 Zesíťovaná makromolekula

2.4.2. Tacticita

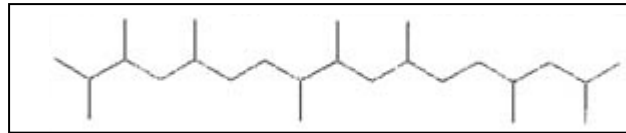
Tacticitu (uspořádání substituentů v makromolekule) rozlišujeme u nesymetrických makromolekulárních řetězců, tacticita ovlivňuje schopnost makromolekuly vytvářet krystalické útvary. Rozeznáváme typy izotaktický (Obrázek 6), syndiotaktický (Obrázek 7) a ataktický (Obrázek 8). Izotaktický materiál je nejvhodnější pro budoucí krystalizaci, syndiotaktický materiál je schopný za vhodných podmínek také krystalizace, avšak ataktický typ makromolekuly je pro krystalizaci nevhodný.



Obrázek 6 Izotaktický polymer



Obrázek 7 Syndiotaktický polymer



Obrázek 8 Ataktický polymer

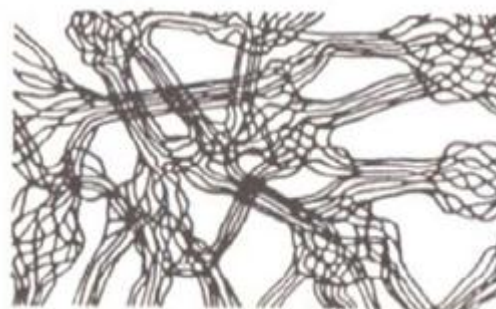
2.4.3. Vnitřní struktura

Polymery rozdělujeme podle vnitřní struktury na **semikrystalické** a **amorfní**, tomuto rozdělení a hlavně otázce krystalizace se budu detailněji věnovat kapitole 2.5. Krystalizace polymerů.

2.4.4. Typ polymeru

Polymery dělíme do tří skupin skupiny – termoplasty, reaktoplasty a elastomery. Každá ze skupin má jinou základní strukturu, která velmi ovlivňuje následné vlastnosti materiálu.

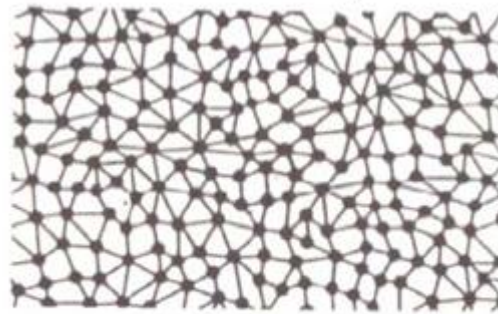
Termoplasty mají lineární nebo rozvětvenou makromolekulu, a to představuje několik velkých výhod. Při zahřátí nic nebrání otáčení makromolekuly kolem své osy (přijaté teplo poruší sekundární vazby mezi makromolekulami), při zahřívání polymer měkne, ale nedochází k degradaci materiálu. Cyklus převodu materiálu z granulátu do taveniny je možné opakovat, a proto je tedy vhodný pro tepelné zpracování. Některé typy termoplastů (např. PP) mají schopnost krystalizace (Obrázek 9). Schopnost krystalizovat závisí na typu polymeru, na takticitě a na technologickém zpracování. Stupeň krystalizace záleží na rychlosti ochlazování. Výrobky z termoplastu jsou vyrobeny nejčastěji vstřikováním plastů do forem požadovaného tvaru nebo nějakou z dalších vhodných technologií pro zpracování termoplastů např. lisováním a válcováním. Tímto typem plastu se zabývám v této BP a detaily o zpracování a vlastnostech testovaného materiálu budu ještě rozebírat v kapitole 3. Technologie zpracování a v kapitole 4. Experimentální část BP.



semikrystalický termoplast

Obrázek 9 Semikrystalický termoplast

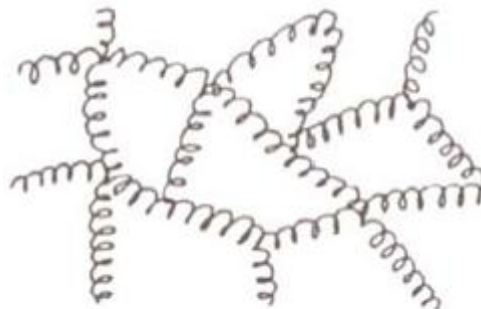
Reaktoplasty mají zasíťovanou strukturu (sekundární vazby mezi makromolekulami jsou větší než u termoplastů), a proto po vytvoření polymeru a zasíťování makromolekul není možnost opětovného převedení na taveninu. Při vyšším zahřátí dochází k degradaci a následnému zničení plastu. K zasíťování dochází při výrobě polymeru v důsledku teploty a tlaku. Rychlost a hustotu zasíťování můžeme upravovat aditivou, tzv. síťovacími činidly.



reaktoplast

Obrázek 10 Reaktoplast

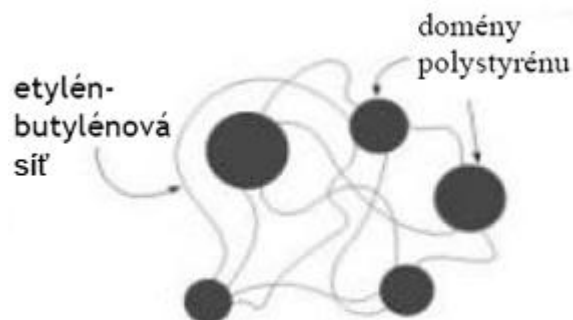
Elastomery mají také síťovanou strukturu vzniklou vulkanizací, s tím rozdílem, že makromolekula je ve tvaru klubka. Tato vlastnost materiálu dovoluje opakované natahování makromolekuly, a tím i výrobku, bez degradace a plastické deformace. Všechny elastomery mají amorfni strukturu, avšak postupem času může dojít k částečné krystalizaci, a tím i ke snížení možnosti elastické deformace (tvrdnutí výrobku).



elastomer

Obrázek 11 Elastomer

Posledním typem polymeru je **Termoplastický elastomer**, který spojuje výhody zpracovatelnosti termoplastů a mechanických vlastností elastomerů.



termoplastický elastomer

Obrázek 12 Termoplastický elastomer

V této práci testuji termoplast s obchodním názvem Hostacom T20H563 (polypropylen s 20 hm.% mastku), využívaném ve společnosti DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.. Přesnější specifikaci materiálu se věnuji v kapitole 4.3. Použitý materiál.



2.5. Krystalizace

Polymerní látky, zejména s lineární a málo větvenou strukturou, jsou schopné krystalizace, a to z roztoků nebo z taveniny. Krystalizace nikdy není úplná, proto mezi uspořádanou krystalickou strukturou bude vždy i neuspořádaná amorfni.

U všech semikrystalických i amorfni polymerů jsou makromolekulární řetězce i jejich části v pevném stavu k sobě vázány mezimolekulárními silami. Na jejich intenzitě jsou závislé hlavně mechanické vlastnosti daného polymeru. Působení mezimolekulárních sil je závislé na vzdálenosti, a proto nejvyšších hodnot nabývají pravidelné krystalické polymery, neboť vzdálenost mezi makromolekulami je nejkratší. Další důležitou vlastností je menší teplotní závislost mechanických vlastností na teplotě (změna modulu pružnosti E), než je tomu u amorfni struktur (viz. Kapitola 2.6. Charakteristické teploty polymerů). Při krystalizaci dochází ke zvýšení hustoty a v důsledku toho k většímu smrštění v důsledku teploty.

Podíl krystalické fáze a typ krystalizačních zárodků závisí na chemické struktuře, z velké části také na zvoleném typu krystalizace (z roztoku či taveniny) a rychlosti chlazení. Pokud budeme vhodný pozorovaný polymer ochlazovat velice prudce, můžeme dostat čistě amorfni a transparentní strukturu. Pokud budeme polymer schopný krystalizace ochlazovat pomaleji, dosáhneme požadované krystalinity.

Pokud makromolekuly nemají schopnost samovolné krystalizace při přechodu z kapalné do tuhé fáze a řetězce zůstávají v nepravidelném stavu v tzv. statistickém klubku i v tuhé fázi, nazýváme je amorfni. Jak již bylo výše zmíněno, amorfni struktury lze dosáhnout i cíleně, zvolením správného způsobu zpracování. Například materiál polyethylentereftalát (PET) je schopný krystalizace, avšak pro potřeby nápojových lahví je vhodnější mít polymer transparentní, a proto je u PET lahví zachována amorfni struktura. Všechny polymery mají ve stavu taveniny strukturu amorfni.

2.5.1. Typy krystalizačních zárodků

Tvar krystalizačních zárodků závisí na typu polymeru, na tvaru makromolekuly a na technologickém zpracování. Pro představu uvádím základní typy.

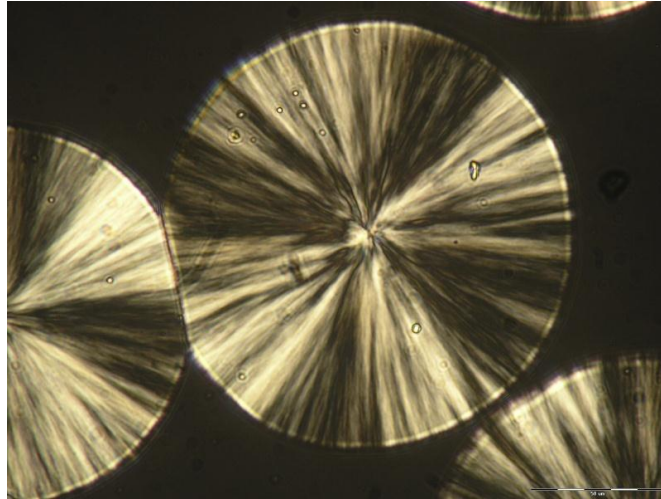
- Amorfni struktura neobsahuje žádné krystalizační zárodky, makromolekula polymeru má tvar statického klubka a nezaujímá žádnou pravidelnou strukturu.
- „*Model úsekové krystalizace, zvaný též model „roztrěpených micel“, je nejstarší a až do padesátých let, kdy byly prostudovány monokrystal, byl považován za jediné možné vysvětlení struktury semikrystalických polymerů. V tomto modelu daný řetězec prochází několika krystalickými a amorfni oblastmi.*“¹
- Krystalická struktura monokrystalického polymeru připraveného ze zředěného roztoku je tvořena pouze lamelami, jejichž výšku λ [nm] ovlivňuje teplota, při které polymer krystalizuje. Při vysoké stálé teplotě krystalizace polymeru je možné dosáhnout výšky lamely λ , která je shodná s celkovou délkou makromolekuly. „*Rozměr, tvar a pravidelnost monokrystalů závisí na typu rozpouštědla, na teplotě, rychlosti růstu i na jiných faktorech. Tloušťka monokrystalů bývá kolem 10 nm, avšak dodatečným temperováním vzroste až na několik desítek nanometrů*“²

¹ Meissner B., Zilvar V., 1987, s. 45

² Meissner B., Zilvar V., 1987, s. 43



- „Při krystalizaci z taveniny a z koncentrovaných roztoků nejsou podmínky pro vznik monokrystalických lamel příznivé. K růstovým plochám tu přistupují molekuly, které jsou propletené se sousedními molekulami, a to je nepříznivé pro vznik zcela pravidelných struktur. Přesto se však polymerní řetězce i při krystalizování z podchlazené taveniny v jistém stupni skládají a vytvářejí lamelární útvary. Krystalické lamely vzniklé ze společného zárodku se rozrůstají v polykrystalických útvarech, z nichž nejtypičtější jsou sférolity.“³ (Obrázek 13)



Obrázek 13 Sférolit

Sférolitickou strukturu můžeme dosáhnout buď homogenní, nebo heterogenní krystalizací.

Homogenní krystalizace je samovolná krystalizace materiálu, který je svým chemickým složením a tvarem makromolekuly schopný krystalizovat. Heterogenní krystalizace je krystalizace umožněná vhodným aditivem, které obsahuje krystalizační zárodky. Teplota začátku heterogenní krystalizace polymeru je vyšší než při krystalizaci homogenní.

Velikost a počet sférolitů závisí na rychlosti ochlazování a na typu krystalizace (homogenní, heterogenní). Pokud budeme jeden stejný typ polymeru chladit rychle, dosáhneme struktury s velkým počtem malých sférolitů. V opačném případě, když budeme stejný polymer ochlazovat pomalu, dostaneme krystalickou strukturu s velkými sférolity. Malé sférolity jsou obdobou malého zrna u ocelí, tzn. struktura tvořená malými sférolity bude mít větší houževnatost než struktura s velkými sférolity.

„Sférolity jsou kulové agregáty krystalických subkultur, které vyrůstají ze středu sférolitu radiálním směrem. Má-li být prostor sférolitu vyplněn, musí se substruktury větvit. Rozměry sférolitu je pohybují od několika mikrometrů až do velikosti několika milimetrů.“⁴

³ Meissner B., Zilvar V., 1987, s. 42

⁴ Meissner B., Zilvar V., 1987, s. 43



2.6. Charakteristické teploty polymerů

Ve všech materiálech částice hmoty konají různé rotační a vibrační pohyby, jejichž intenzita a amplituda je přímo úměrná teplotě – u polymerů se takto pohybují části řetězců.

Při zvyšování teploty se pohyby řetězců zvětšují, což má za následek výraznou změnu mechanických vlastností. Změny jsou vázány na charakteristické teploty, které jsou závislé na složení a struktuře polymeru. Při dosažení teploty skelného přechodu (T_g) dojde ke změně z křehkého sklovitého stavu do stavu viskoelastického. Při této teplotě intenzita pohybu převyší sekundární mezimolekulární síly a řetězce se začnou pohybovat.

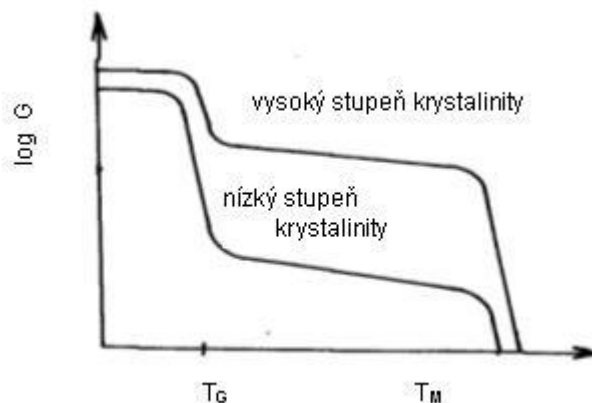
Dalším zvýšením teploty roste amplituda pohybu řetězců, až dojde k jejich pohybu a zejména za působení vnější síly se celé řetězce začnou pohybovat vůči sobě navzájem a dochází k toku materiálu. Tato teplota je označována jako T_f – teplota tečení. Vyskytuje se pouze u amorfních polymerů, ze kterých se nad touto teplotou stane tavenina.

U semikrystalických polymerů nedochází při zvyšování teploty k uvolnění pohybu řetězců, protože mezi makromolekulami působí výrazně větší molekulární síly. K uvolnění těchto sil dochází při zvýšení teploty, kdy se rozpustí krystalická struktura přímo na taveninu. Tato teplota je označována jako T_m – teplota tání krystalického podílu. Protože žádný polymer nemůže být vykrytalizovaný na sto procent, ale jen částečně, mají semikrystalické plasty i amorfní složku, která má svoji teplotu T_g . Poměr poklesu $E(G)$ (modul pružnosti) nad touto teplotou závisí na podílu krystalické struktury v materiálu (Obrázek 14).

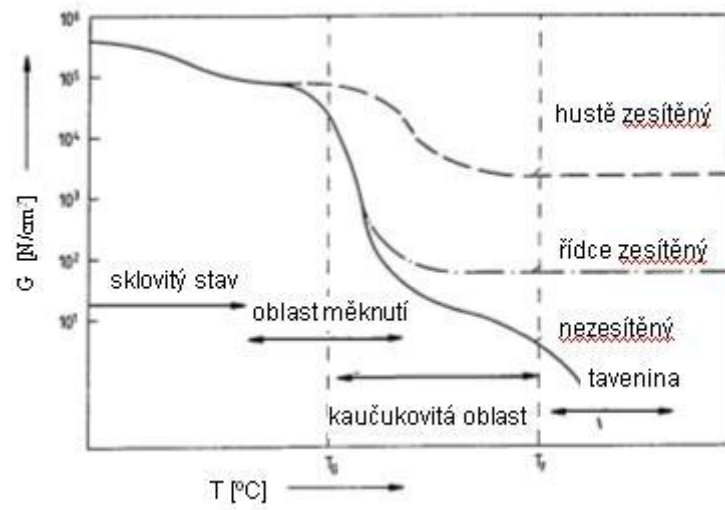
Následným zahříváním se řetězce začnou intenzivním pohybem trhat a dochází k degradaci materiálu. Tato teplota se nazývá T_c – Teplota rozpadu polymeru.

Sít'ované polymery reagují na zvýšení teploty jiným způsobem. Velikost sekundárních sil mezi makromolekulami v důsledku zesít'ování struktury dosáhla podobné velikosti sil primárních, a proto pokles $E(G)$ nad teplotou T_g závisí na stupni zesít'ování polymeru. Pokud máme strukturu se silným zesít'ováním, dochází k malému poklesu $E(G)$. Nad teplotou T_g po snížení $E(G)$ si reaktoplasty zachovávají stejné mechanické vlastnosti až do teploty, při které začíná degradace, a tím zničení polymeru (Obrázek 15), proto je tento typ polymeru vhodnější pro použití za vyšších teplot.

Při navrhování vhodného polymerního materiálu pro určité použití je důležité znát teplotní charakteristiku materiálu a podle toho volit typ. Při konstrukčním použití polymeru se vždy musíme vyhýbat teplotám, kde $E(G)$ není konstantní.



Obrázek 14 Závislost modulu pružnosti ve smyku semikrystalických polymerů na teplotě



Obrázek 15 Závislost modulu pružnosti ve smyku zesíťovaných a amorfních polymerů na teplotě



3. Technologie zpracování

Existuje mnoho způsobů zpracování polymerů, a proto pro konkrétní výrobek musíme určit ideální technologii. Záleží opět hlavně na složení materiálu, na výsledném tvaru, požadovaných vlastnostech produktu a možnostech výrobce.

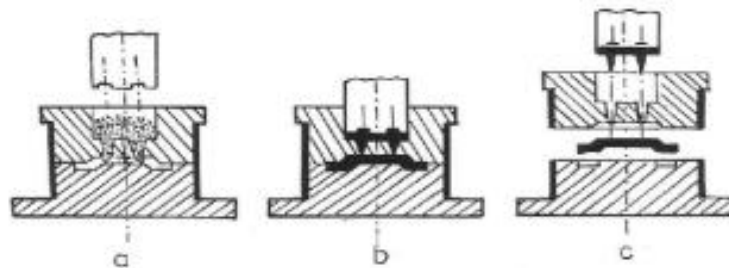
Příklady zpracování polymerů:

3.1. Zpracování polymerů tvářením

Pod pojmem tvářením rozumíme zpracování polymerů v plastickém stavu. Používá se pro všechny druhy plastů (termoplasty, reaktoplasty, elastomery). Při zpracování termoplastů touto metodou je nutné chlazení materiálu před vyjmutím z lisu, aby nedošlo k tvarové deformaci. Během zpracování reaktoplastů a elastomerů dochází k zesíťování struktury, čímž ztratí plastičnost, a tudíž není následné chlazení potřebné. Tento typ zpracování je nejrozšířenější, a proto ke každému příkladu uvádím nejdůležitější informace.

3.1.1. Lisování

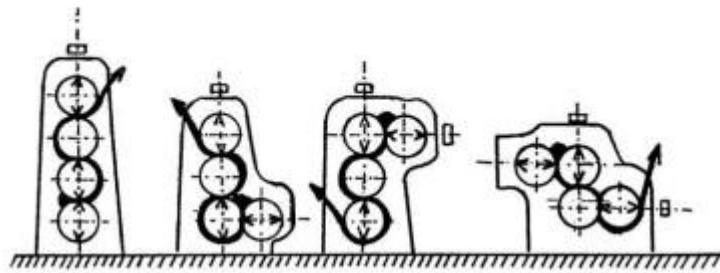
Lisování polymerů je vhodný způsob zpracování pro reaktoplasty (aminoplasty, polyestery, atd.), ale v současné době při snaze o co největší zefektivnění výroby je nahrazováno technologií vstřikování, protože dojde k výraznému zkrácení celkového výrobního procesu. Nástrojem na lisování je temperovaná ocelová forma (Obrázek 16). Lisování můžeme rozdělit podle použitého tlaku na lisování nízkotlaké a na lisování vysokotlaké, přičemž hranice tlaku je 3,5 MPa.



Obrázek 16 Příklad procesu lisování

3.1.2. Válcování

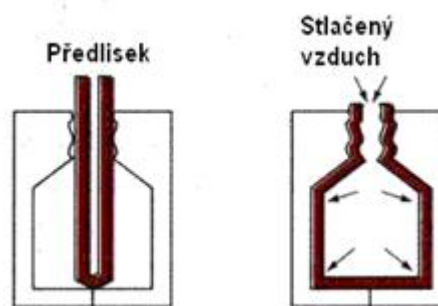
Technologie válcování se využívá pro výrobu fólií, polymerních podlahových krytin, k nanášení polymerní vrstvy, atd. Nejčastěji zpracovávané polymery touto technologií jsou polyvinylchlorid (PVC), vysoko hustotní polyethylen (HDPE) a nízko hustotní polyethylen (LDPE). Princip válcování je jednoduchý. Mezi dvěma temperovanými válci je štěrbinou požadované velikosti, kterou bude mít i finální výrobek (Obrázek 17). Před štěrbinu je přiváděn polymer a pomocí rotace a tlaku válců dochází k hnětení, čímž se zlepšují konečné vlastnosti výrobku. Velikost hnětení je závislá na poměru obvodových rychlostí válců. Kvalita povrchu výrobku souvisí s počtem operací válcování.



Obrázek 17 Příklad strojů používaných při válcování

3.1.3. Vyfukování (výtlačné, vstříkovací)

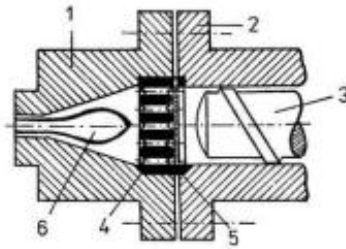
Polotovary jsou do koncové podoby tvarovány přetlakem ve vyfukovací formě do skoro uzavřeného tělesa (Obrázek 18). Hmotu se musí zahřát do plastického stavu, aby měla schopnost nabývat nového tvaru, teplota nemůže být ale příliš vysoká, aby nedošlo k porušení soudržnosti materiálu. Polotovarem může být výrobek vyrobený jednou z výše zmíněných technologií. Tímto způsobem se zpracovává polyetylen (PE), PVC a hlavně PET (recyklovatelné PET lahve na nápoje).



Obrázek 18 Princip technologie vyfukování

3.1.4. Vytlačování

Jedná se o kontinuální proces, při kterém je tavenina polymeru vytlačována přes profilovací zařízení do volného prostoru. Tato technologie je velice podobná vstříkování. Používají se také pístové vytlačovací stroje, pouze místo vstříkovacích trysek je zde vytlačovací hlava ve tvaru profilu (Obrázek 21). Za strojem musí být kontinuálně se pohybující linka, která odebírá vytlačený produkt a následně upravuje jeho povrch a dělí na požadovanou velikost. Při výrobě reaktoplastů touto technologií je potřeba na linku umístit vytvrzovací pec, aby došlo k zesíťování struktury, a tím k udržení rozměrů. Tímto způsobem se zpracovávají hlavně termoplasty a kaučukovité směsi.

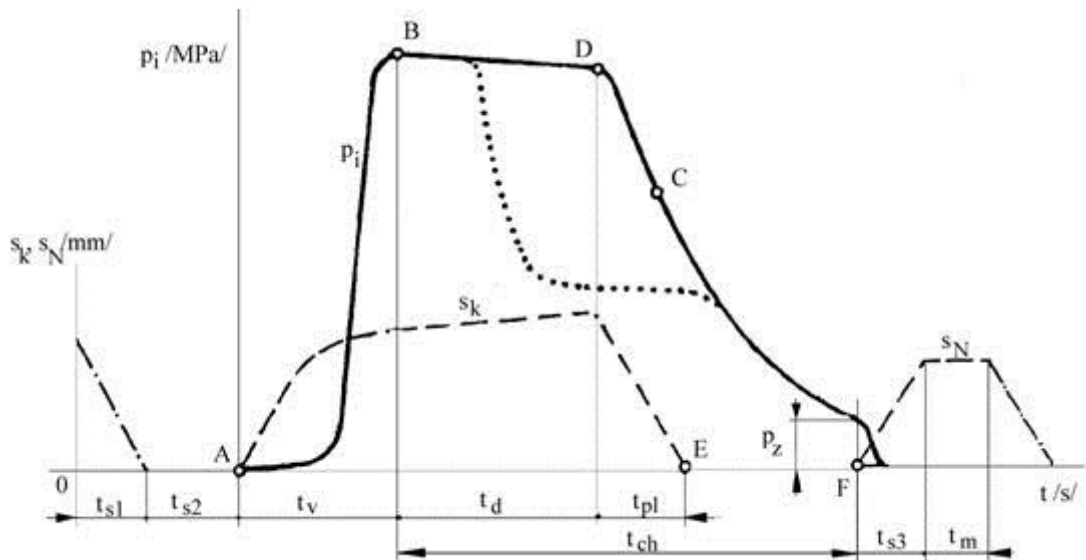


1 -hlava, 2 -válec, 3 -šnek, 4 -lamač, 5 -sito,
6 -dutý trn opatřený přívodem tlakového vzduchu

Obrázek 19 Příklad hlavy pro vytlačování

3.2. Zpracování polymeru vstřikováním

Vstřikování je nejrozšířenějším způsobem zpracování termoplastů. Lze ho ale použít i pro zpracování kaučukovitých směsí a reaktoplasů. Výrobky se vyznačují velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností a stálostí. Je to proces cyklický (Obrázek 19), a proto je pro kvalitu výrobku nutné, aby byl cyklus stabilní, tzn., že je nutné zaručit, aby následný vstřikovací cyklus měl stejný průběh jako cyklus minulý.



Obrázek 20 Vstřikovací cyklus

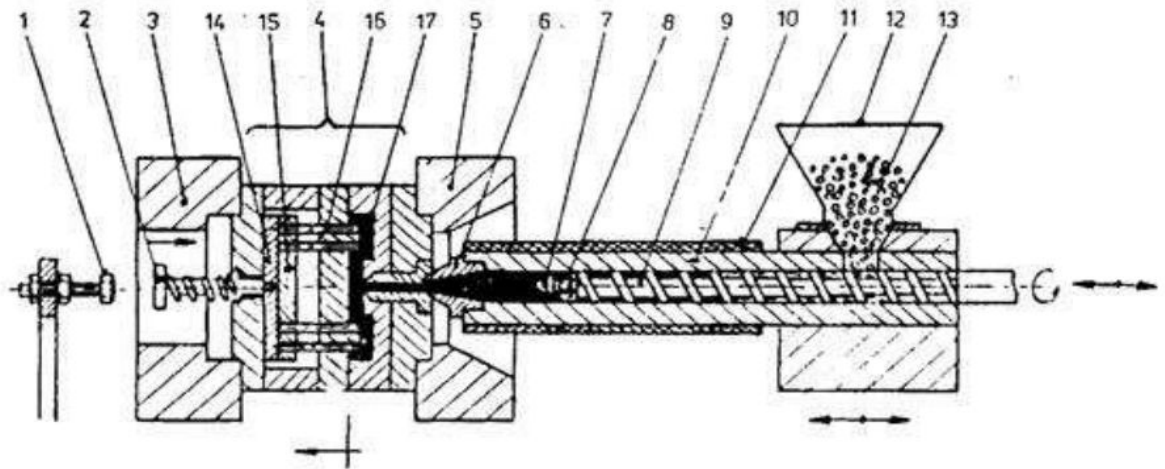
(p_i – tlak ve formě, s_k – pohyb šneku, s_N - pohyb nástroje)

Kvalita koncového výrobku je ovlivněna mnoha faktory, které se na procesu podílí. Nejdůležitějšími faktory jsou vstřikovaný materiál, vstřikovací stroj, další použitá zařízení, se kterými přijdou materiál a výrobek do styku (sušení, zásobování, dávkování materiálu, manipulace s výstřikem, ohřev formy, ...), tvar výstřiku, konstrukce a výroba formy a hlavně technologické nastavení stroje pro vstřikování.

Existuje mnoho typů vstřikovacích strojů. Dělíme je podle pohonu na elektrické, hydraulické a kombinované. Podle typu plastifikační jednotky na pístové a šnekové. Podle stavby na horizontální



a vertikální. Společnost DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. používá šnekové hydraulické stroje, a proto popisují vstřikovací cyklus na těchto strojích (Obrázek 20).



(1 – doraz, 2 – tyč vyhazovače, 3, 5 – upínací desky, 4 – forma, 6 – vstřikovací tryska, 7 – špice šneku, 8 – zpětný uzávěr, 9 – šnek, 10 – tavící komora, 11 – topná tělesa, 12 – násypka, 13 – granule plastu, 14 – deska vyhazovačů, 15 – kotevní deska, 16 – vyhazovače, 17 – výstřík)

Obrázek 21 Schéma vstřikovacího stroje se šnekovou plastikací

Vstřikovací cyklus můžeme rozdělit na základní fáze cyklu, které ovlivňují výslednou kvalitu výstříku. Jednotlivé fáze jsou: uzavření formy, vstřikování, dotlak, plastifikace, ochlazování a vyhození výrobku z formy.

- Uzavření formy

Toto je první fáze, kterou začíná cyklus vstřikování. Na uzavírání formy se podílejí dvě různé síly, síla přisouvací a síla uzavírací. Síla přisouvací je menší než síla uzavírací, pouze přisouvá pohyblivou část formy k pevné a síla uzavírací musí zajistit dostatečné uzavření formy v průběhu cyklu, aby vstřikovaný materiál zůstal uvnitř formy a nevznikly chyby ve vylisku.

- Vstřikování

Tato fáze začíná po uzavření formy a šnek změni svůj pohyb z rotačního na posuvný a stane se z něj píst. Před čelem šneku je nahromaděna termicky a viskózně homogenní tavenina. Tyto vlastnosti taveniny jsou velice důležité pro správnou rychlost proudu taveniny, aby byl v každém místě průřezu formy konstantní. U jednoduchých tvarů výstříků je tento předpoklad reálný, při tvarově složitějších výstřících s rozdílnými tloušťkami stěn velice obtížné, důležité je proto správné umístění vstřikovacích trysek. Z hlediska jakosti výstříku je hlavním parametrem teplota formy.

Rychlost vstřikování je definována jako rychlost posuvu plastifikačního šneku směrem k formě. Rychlost musí být správně zvolena podle polymerního materiálu a složitosti formy. Špatné nastavení vstřikovací rychlosti vede ke snížení kvality výrobku a možnosti vzniku vad.

Po vstříknutí taveniny do formy začíná v místech dotyku polymeru s formou rychlé ochlazování. Při ochlazování dochází k objemovému smrštění, a proto kvůli zachování tvarové přesnosti a předepsané kvality výrobku musí stroj přepnout na dotlak, aby kompenzoval změnu rozměrů. Přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak musí být provedeno tak, aby nedošlo ke skokové změně tlaku kvůli snížení vnitřního tlaku uvnitř materiálu. Předčasné přepnutí na dotlak má za následek pl-



nění dutiny formy nevhodnou rychlostí a při pozdním přepnutí je příčinou zvýšení vnitřního pnutí a může být příčinou zástríků v dělicí rovině formy.

- Dotlak

Jak jsem již zmínil výše, dotlak je důležitý pro zachování tvarové přesnosti a kvality výrobku. Průběh dotlaku, daný velikostí tlaku v dutině formy, se musí volit tak, aby bylo dosaženo požadovaných tvarových a rozměrových přesností. Působení plnicí a dotlakové fáze je možné kontrolovat pomocí tzv. polštáře, což je množství taveniny, před čelem šneku po dokončení vstřiku. Pokud je velikost polštáře na konci cyklu v daných mezích stejná, vypovídá to o tom, že cyklus je plně re-produkovatelný.

- Plastifikace

Plastifikace začíná po dotlaku a probíhá současně s poslední fází chlazení výrobku ve formě. Plastifikační šnek rotačním pohybem odebírá granulát ze zásobníku, posouvá granulát před čelo šneku, za pomoci přejímání tepla z tavicí komory a tření se převádí granulát z pevného stavu do taveniny, kterou můžeme vstříknout do formy. Při rotaci plastifikačního šneku dochází k posunu vzad, tím vzniká před čelem šneku prostor, ve kterém se hromadí natavený materiál. Základní podmínkou pro optimální naplnění formy a vysokou kvalitu výsledného produktu je zajištění termické a viskózní homogenity materiálu před čelem šneku. Ke správnému natavení se používá teplo předané topnými pásy okolo plastifikačního válce a třením granulátu o stěny plastifikačního válce. Případná nehomogenita směsi vede ke snížení kvality výrobku. Plastifikaci a hustotu materiálu před čelem šneku ovlivňuje také rychlost posuvu šneku vzad a rychlost otáčení šneku.

- Ochlazování

Chlazení výlisku uvnitř stroje začíná ihned po začátku plnění dutiny formy taveninou a trvá až do vyhození výstřiku z formy. Chlazení během cyklu tedy probíhá už ve fázi vstřikování, přes fázi dotlaku a nakonec ještě při fázi samotného chlazení. Parametry ochlazování jsou teplota formy, doba ochlazování, teplota ochlazovacího média ve formě, jeho tlak a materiál formy. Minimální doba ochlazování musí zajistit, aby výlisek po vyhození z formy vyhazovačem byl s dostatečnou tvarovou stálostí, vhodnou vnitřní strukturou, bez deformací a vad způsobených vyhazovacím systémem.

Optimalizace doby ochlazování má výrazný vliv na ekonomii výroby (ovlivnění doby vstřikovacího cyklu). Z pohledu kvality výroby by doba ochlazování měla být co nejdelší (rovnoměrná vnitřní struktura, minimalizace vnitřního pnutí...). Z hlediska ekonomického by měla být ale co nejkratší, neboť s kratší dobou cyklu roste produktivita stroje. Proto je velmi důležité určit správný čas, aby náklady na jeden výrobek při daných vlastnostech byly co nejnižší.

Obecně platí, že čím je rychlost ochlazování menší, tak doba ochlazování je delší. Roste u semikrystalických polymerů obsah krystalického podílu. To má za následek větší smrštění materiálu, změnu tuhosti, pevnosti a tvrdosti výstřiků, které souvisí se změnou struktury. Zvýšením teploty formy můžeme také zvýšit kvalitu výrobku a navíc zlepšit povrchové vlastnosti výstřiku, roste lesk a celková kvalita povrchu.

- Vyhození výrobku

Tato fáze začíná otevřením formy (odjezd pohyblivé části formy) na konci fáze chlazení. Výlisek z dutiny formy je vysunut pomocí vyhazovačů a odebrán robotickým manipulátorem. Manipulátor položí výlisek na dopravník, který odveze výlisek k operátorovi u stroje, který provádí



montáž. Během vyhození a manipulace nesmí dojít k poškození výrobku. Po vyhození a odebrání vylisku z prostoru formy dojde opět k uzavření formy a celý vstřikovací cyklus začíná znovu.

Tato technologie je důležitá pro bakalářskou práci, protože právě proces vstřikování plastů bych rád ve společnosti optimalizoval. Všechny vzorky k měření jsou vyrobeny touto technologií.



4. Experimentální část

V experimentální části této bakalářské práce se věnuji sledování vnitřní sktruktury polymeru používaného při sériové výrobě, deformaci zadaných kritických bodů, a tím i vlastnostem budoucího šroubového spoje. Měřením výše uvedených veličin bych rád zhodnotil vliv optimalizace výrobního procesu v společnosti DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o., tím zvýšil možný objem produkce a kladně ovlivnil hospodářský výsledek společnosti.

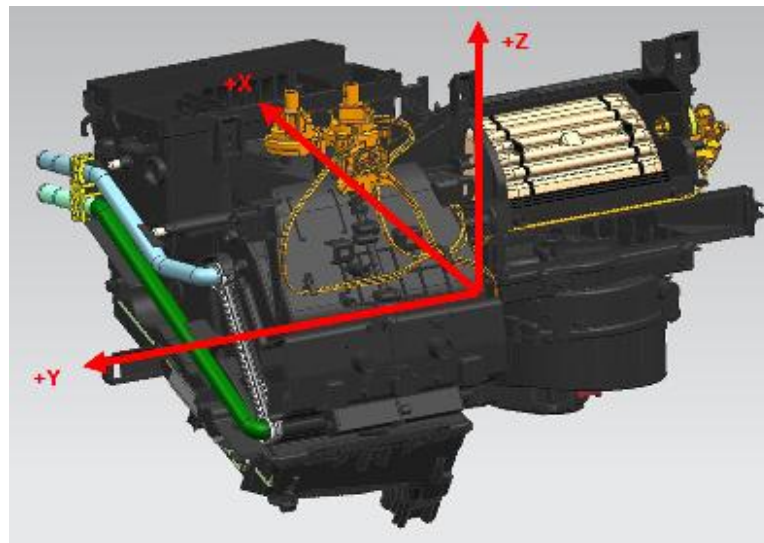
Nejdůležitější podmínkou zadanou při testech pro optimalizaci produkce bylo zachování současné kvality výrobků. Ve společnosti DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. je kvalita na prvním místě, a proto tuto podmínku zohledním v závěru bakalářské práce.

V této bakalářské práci budu testovat:

- Změnu hustoty polymeru v závislosti na rychlosti a způsobu chlazení
- Změnu krystalického podílu ve zvolené oblasti metodou DSC
- Deformace vnitřního průměru kritických bodů

4.1. Testovaná kritická oblast obalu klimatizační jednotky

Zadaná kritická oblast výrobku (RPS bod), kterou se zabývám v této bakalářské práci, je součástí funkčních částí obalu klimatizační jednotky, na který je navázán souřadný systém jednotky (Obrázek 22).



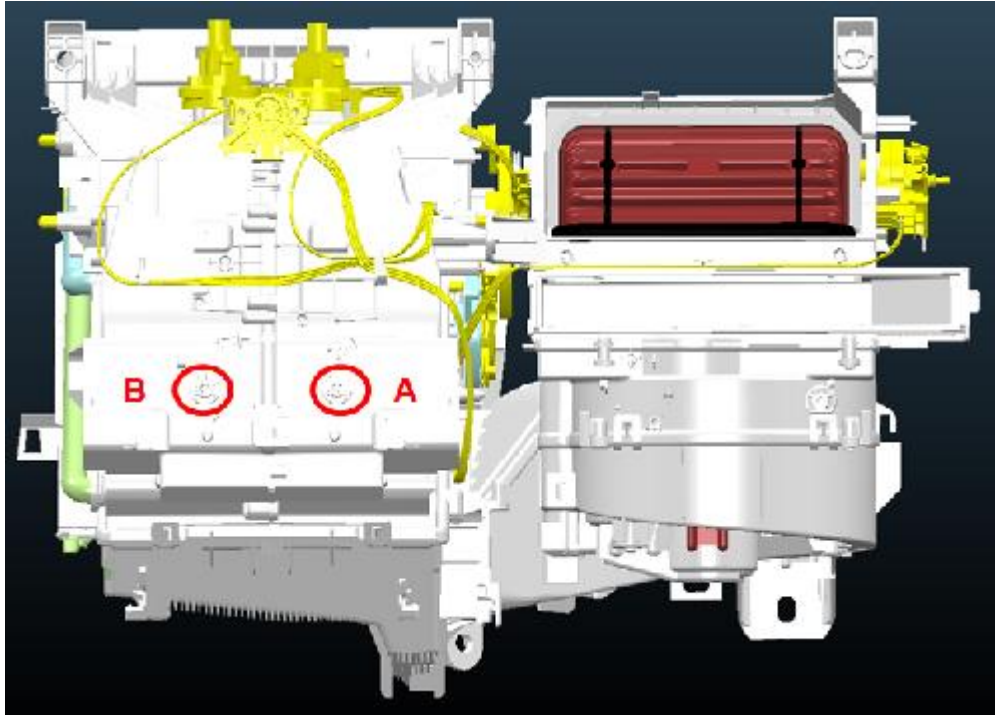
Obrázek 22 Souřadný systém klimatizační jednotky

Na klimatizační jednotce je více takto určených RPS bodů, jejichž hlavní funkcí je uchycení klimatizační jednotky mezi motorový prostor a prostor pro cestující. Další funkcí je snadný popis všech rozměrů jednotky, neboť k poloze těchto bodů jsou v návrhovém výkrese definované další rozměry jednotky.

Mnou sledované a měřené RPS body (Obrázek 23) plní právě tuto upínací funkci, a proto je velice důležité se z budoucího funkčního hlediska vyvarovat deformaci vnitřního průměru



a vzniku nevhodné materiálové struktury, kterou bychom mohli negativně ovlivnit mechanické vlastnosti spoje.



Obrázek 23 Zkoumané RPS body

4.2. Návrh optimalizace

Z nastudovaných materiálů a ze zkušeností mých kolegů v DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. jsem získal základní informace pro optimalizaci výroby a pro správné nastavení stroje pro výrobu testovaných dílů. Z dříve získaných vzorků připravených tak, že jsme produkční dobu chlazení zvýšili o 2 a poté o 4 vteřiny, jsem věděl, že struktura plastového obalu klimatizace se s prodlužováním doby chlazení nemění, a proto jsem se rozhodl, že pro získávání vzorků pro BP budu snižovat čas chlazení až do extrému tj. na hranici materiálové soudržnosti materiálu.

4.3. Předpoklad výsledků

RPS body, kterým jsem se věnoval v této práci, jsou jedním z nejdůležitějších funkčních bodů na celé klimatizační jednotce. Pro uchycení se používají předepsané šrouby s daným průměrem a délkou. Deformací RPS bodu bychom se mohli dostat do situace, že spojení v místě deformovaného RPS bodu bude nemožné a správně vyrobená a funkční klimatizační jednotka nepůjde upnout na správné místo, a tím bude výrobek bezcenný. V BP jsem se snažil přijít na ideální kompromis mezi snížením času cyklu a udržení kvality a funkčnosti výrobku (cílem je RPS bod bez tvarových deformací a strukturálních změn). V RPS bodu je teplotní extrém vstříkovaného kusu, takže na konci výrobního cyklu je to jedno z nejteplejších míst. Proto při snížení doby chlazení RPS bod bude ovlivňován nejvíce a změny struktury a deformace by měly být dobře viditelné.

4.4. Použitý materiál

V této práci pracuji s semikrystalickým polymerem používaným ve společnosti DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. pro výrobu obalu klimatizačních jednotek do osobních automobilů. Materiál má obchodní označení Hostacom T20H563 0907 a do společnosti je dopravován ve formě granulátu.



Použitý materiál je polypropylen s příměsí 20 hm. % mastku, který kladně ovlivňuje pevnost materiálu a snižuje rozměrové změny materiálu při chladnutí po zpracování a černé barvivo pro zlepšení optických vlastností a zvýšení praktičnosti (v motorovém prostoru je černá barva výhodnější než základní bílá).

Tento materiál se používá ve výrobě kvůli odolnosti vůči teplotám, chemickým roztokům, také nulové nasákavosti a malé teplotní roztažnosti. Uvnitř klimatizační jednotky dochází k výkyvům teploty a styku s vlhkostí, a proto je velká teplotní roztažnost, nasákavost a tím i změna rozměrů nežádoucí.

4.4. Výroba vzorků

4.4.1. Výroba vzorků na vstřikovacím stroji

Vzorky pro tuto bakalářskou práci jsem vyráběl ve společnosti DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o. na stroji pro vstřikování plastů, který se používá pro sériovou výrobu obalů klimatizací.

Snížení výrobního času jednoho cyklu jsem chtěl dosáhnout změnou délky chlazení výrobku ve formě, ovšem bez vlivu na celkovou kvalitu výrobku.

Vzorky jsem vyráběl v mezičase v přechodu na jinou produkci projektu. Kvůli promítnutí technologických změn na výrobek jsem jako vzorek bral vždy až 21. vyrobený kus po změně výrobních parametrů stroje. Předchozích 20 kusů by mohlo být ovlivněno setrvačností stroje a změny v nastavení by se do výrobku vůbec nemusely promítnout. Při sériové výrobě se prvních pět kusů při začátku výroby vyhazuje.

Kvůli opakovatelnosti měření jsem vytvořil pět sad vzorků. Každá sada obsahovala 6ks pro objektivnost měření.

Obal klimatizace se vstřikuje do vícenásobné formy, takže se najednou vyrábí levá i pravá část, ovšem tvar RPS bodu se podle strany obalu mění a tak je možné, že na každé straně dostanu jiné výsledky. Pokud by jedna strana při snížení chlazení byla v pořádku a druhá špatná, nelze doporučit snížení výrobního času.

Jako srovnávací vzorek jsem použil obal vytvořený v produkčním nastavení stroje, při kterém probíhá sériová výroba. Čas celého vstřikovacího cyklu při nastavení pro sériovou výrobu trvá 34,1 vteřiny a z toho chlazení výlisku zabere 16 vteřin. Jako extrémní vzorek jsem zvolil po poradě s konzultantem této práce kvůli zachování materiálové soudržnosti minimální čas chlazení 8 vteřin, a tím se pokusil snížit celkový čas cyklu o 8 vteřin. Kvůli vytvoření více sad vzorků a postupnému sledování změn jsem jako krok pro snížení doby chlazení zvolil 2 sekundy. Předpokládal jsem, že u vzorků, které v extrému mají rozdíl v délce chlazení 8 sekund, uvidíme rozdíl ve struktuře a tvaru RPS bodu a deformaci celého obalu.

Z důvodu přerušování výroby na stroji potřebném k výrobě vzorků, jsem i první vzorky odebíral až po vyřazení prvních dvaceti kusů. Pro vytvoření druhé sady vzorků jsem snížil čas chlazení na 14 vteřin, opět vyřadil prvních 20 kusů, a poté odebral vzorky. Toto jsem opakoval u třetí sady vzorků, kde jsem opět snížil čas chlazení na 12 vteřin. Při výrobě čtvrté sady vzorků jsem narazil na dříve nepředpokládaný problém. Celkový čas cyklu už nešlo snížit pouze chlazením, neboť rychlost plastifikace materiálu ve šneku uvnitř stroje nebyla dost rychlá pro plynulý cyklus při chlazení pouze 10 vteřin. Proto jsem se rozhodl, že vzorky vystříknu při produkčním nastavení, avšak cyklus nemohl být plně automatický, neboť jsem musel počkat na dostatečné nastavení materiálu před čelem šneku. Při výrobě vzorků jsem ale pokračoval v předem zavedených pravidlech, opět jsem vyhodil prvních 20 kusů a až následující kusy jsem bral jako vzorky. Úplně stejnou metodou jsem pokračoval při extrémně krátké době chlazení, které trvalo pouze 8 vteřin.



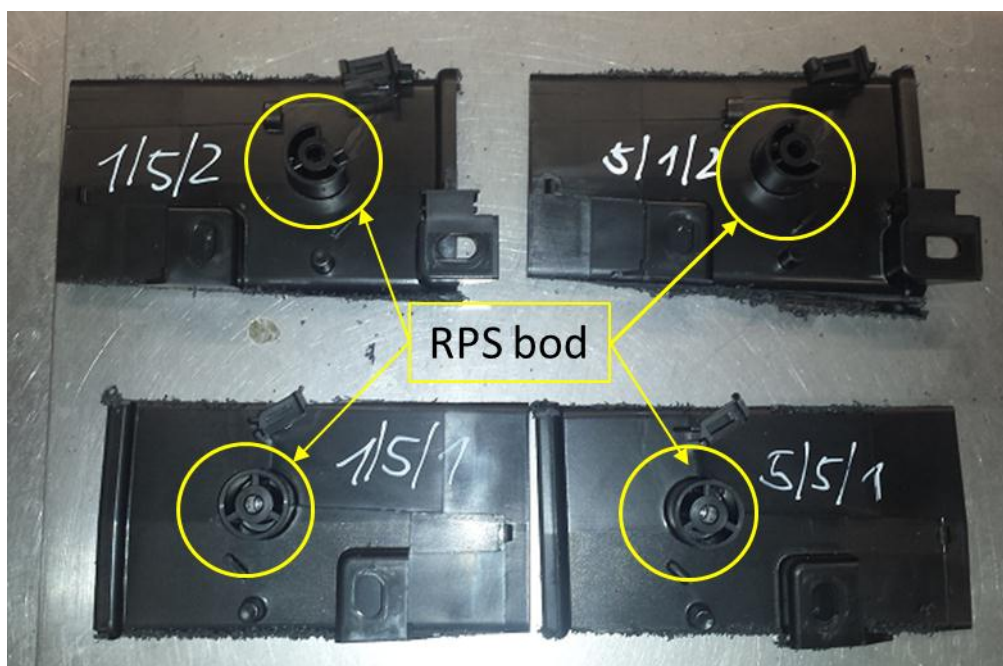
V získávání vzorků v ručním režimu jsem pokračoval z důvodu možného využití v budoucnu. Pokud bych dokázal, že výlisky jsou plně funkční i při extrémně krátké době chlazení, mohl by se mnou testovaný projekt v budoucnu vyrábět na jiném vstříkovacím stroji s vyšším výkonem plastifikace, a tím výrazně zvýšit objem výroby.



Obrázek 24 Vystříknuté obaly klimatizací před odběrem vzorků

4.4.2. Vyřezání a úprava vzorků

Pro získání vzorků na měření vnitřní deformace RPS bodu plastového obalu jsem musel všechny obaly rozřezat na pásové pile. Tím jsem vyřízl měřený bod z obalu (Obrázek 25) i s malým množstvím okolního materiálu, a to z důvodu snížení obtížnosti vyřezání vzorku z obalu, ale i pro lepší následnou manipulaci při přípravě vzorků.

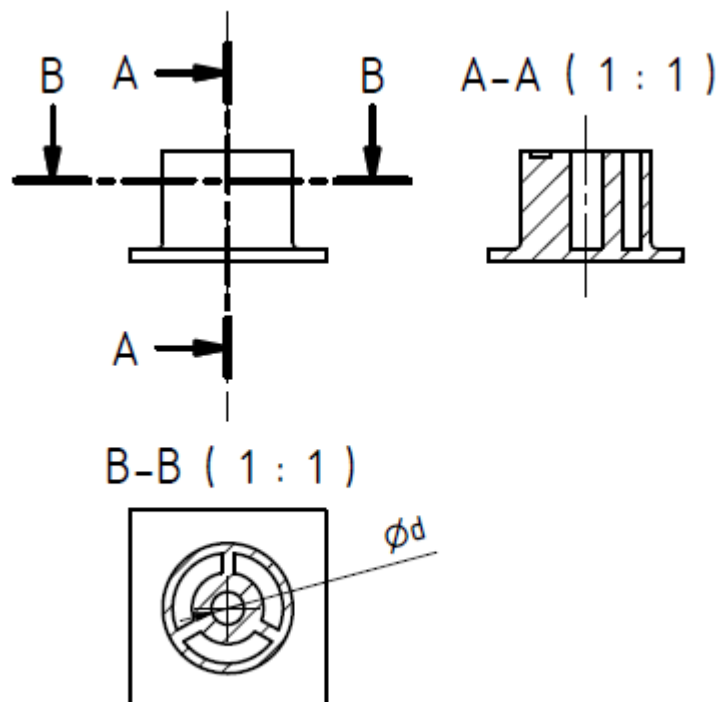




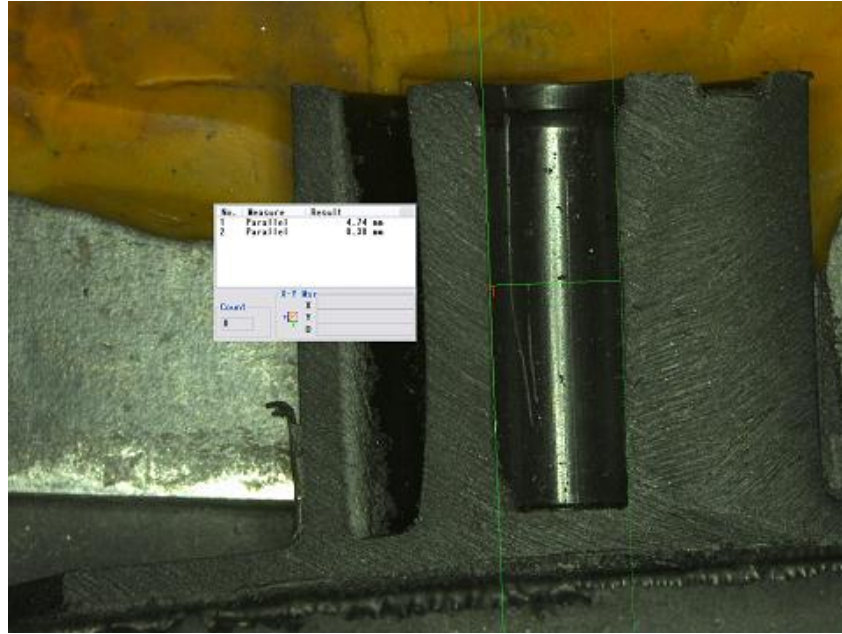
Obrázek 25 Vyřiznuté části obalů

Před vyřezáváním částí obalů z obalu klimatizační jednotky, jsem si všiml výrazné deformace vnitřních částí u všech vzorků se změnou doby chlazení. U minimálního času chlazení byla deformace vnitřních částí tak výrazná, že by následná montáž součástí do jednotky mohla být obtížná, či nemožná. Tuto skutečnost budu brát v úvahu při konečném hodnocení výsledků testů.

Dále jsem upravoval vzorky podle potřeby testování. První dva vzorky ze stejné série jsem rozříznul rovnoběžně s osou RPS bodu (Obrázek 26 - řez A-A, Obrázek 27) pro zkoumání vnitřní deformace. RPS body jsem rozříznul ruční pilou, pomocí pravítka posuvného měřítka jsem si na čelo RPS bosu označil osu a do osy jsem se poté dostal postupným broušením vzorků na brusce. Při broušení vzorků jsem používal chlazení vodou, abych při broušení teplotně neovlivnil vzorky. Pro broušení jsem používal 2 zrnitosti brusných papírů, první na větší ubrání materiálu a druhý pro získání hladkého povrchu řezu.



Obrázek 26 Řezy RPS bodem



Obrázek 27 Opracovaný RPS bod rovnoběžně s osou

Druhé dva vzorky ze série jsem uříznul od obalu klimatizační jednotky kolmo na osu RPS bodu (Obrázek 26 - řez B-B, Obrázek 28). Využil jsem toho, že čelo RPS bodu je kolmé na osu, a proto jsem z tohoto řezu schopný změřit vnitřní deformaci průměru (zvětšení či zmenšení). Odříznutou plochu jsem opět brousil stejným způsobem jako u předchozích vzorků. Otřepů na hraně díry jsem se zbavil odhraňovačem. Mírné sražení hrany neovlivňuje přesnost měření, neboť měřím vnitřní průměr, který se sražením nezmění.



Obrázek 28 Oddělený RPS bod kolmo na osu

Předposlední a poslední vzorek ze série jsem využil pro zvýšení množství naměřených hodnot při měření hustoty RPS bodu, protože hustotu bodu by mohly ovlivnit vzduchové bublinky uvnitř materiálu, jejichž objem lze zjistit optickou metodou velice těžko.



Poslední vzorek jsem také využil pro měření materiálu metodou DSC. Jako vzorek pro toto měření jsem vybral místo, kde je na RPS bodu nejvíc materiálu, kde je dobou chlazení struktura ovlivňována nejvíce.

4.5. Značení vzorků

Z důvodu velkého množství vzorků jsem se rozhodl pro jednoduchý styl značení vzorků. První číslo vždy znamená číslo série, druhé číslo kusu v sérii a třetí číslo stranu obalu klimatizační jednotky. Pro názornost přikládám Tabulku 1 a Obrázek 29 s vysvětlením.

Tabulka 1 Značení vzorků

	Doba chlazení [s]	Číslo v sérii	Označení bodu (obr.23)	Příklad
1. série	16	1-6	Bod A = 1 Bod B = 2	1/1/1
2. série	14	1-6	Bod A = 1 Bod B = 2	2/1/2
3. série	12	1-6	Bod A = 1 Bod B = 2	3/4/1
4. série	10	1-6	Bod A = 1 Bod B = 2	4/1/1
5. série	8	1-6	Bod A = 1 Bod B = 2	5/6/2



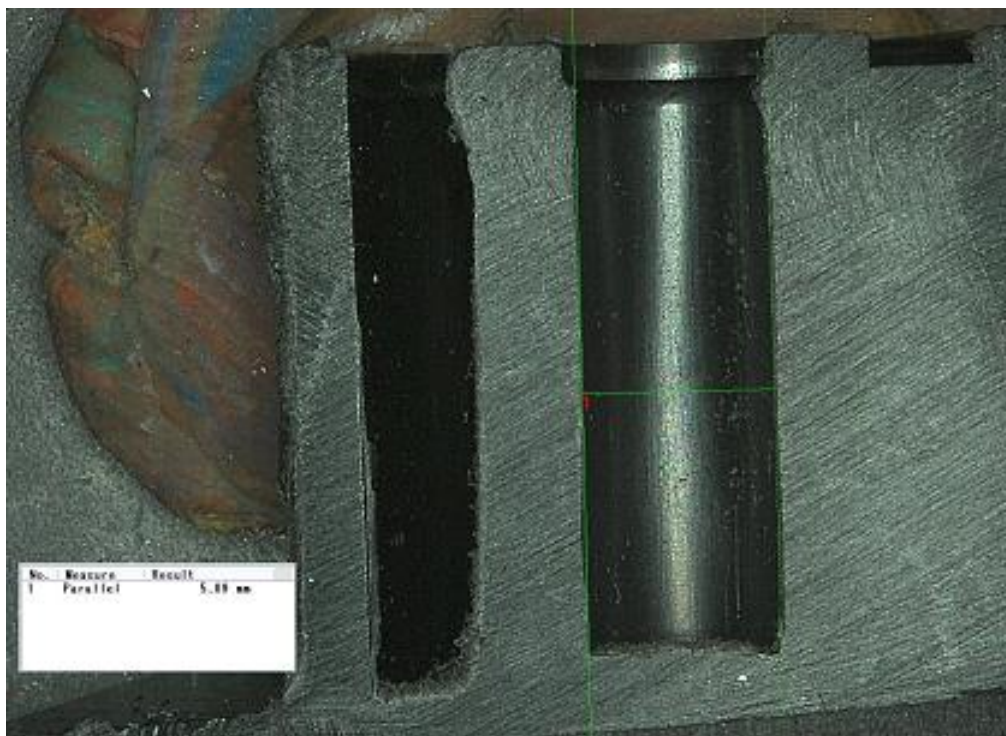
Obrázek 29 Příklad označení vzorku

4.6. Měření deformace vzorků pomocí digitálního mikroskopu

4.6.1. Princip měření

Pro vyhodnocení hodnot deformace RPS bodu jsem využil digitálního mikroskopu s měřícím programem v laboratoři společnosti DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o..

U vzorků rozříznutých rovnoběžně s osou RPS bodu jsem zkoumal viditelnou deformaci vnitřních stěn a rovnoběžnost těchto stran. Při tomto měření rovnoběžnosti přesnost měření ovlivňovala přesnost přípravy vzorků a správné umístění řezu do osy RPS bodu. Vnitřní průměr jsem měřil v tomto řezu z důvodu využití dvou rovnoběžných čar v programu na měření, které při měření názorně ukazovali viditelnou deformaci vnitřního průměru. Přesné hodnoty vnitřního průměru jsem měřil v druhém řezu.

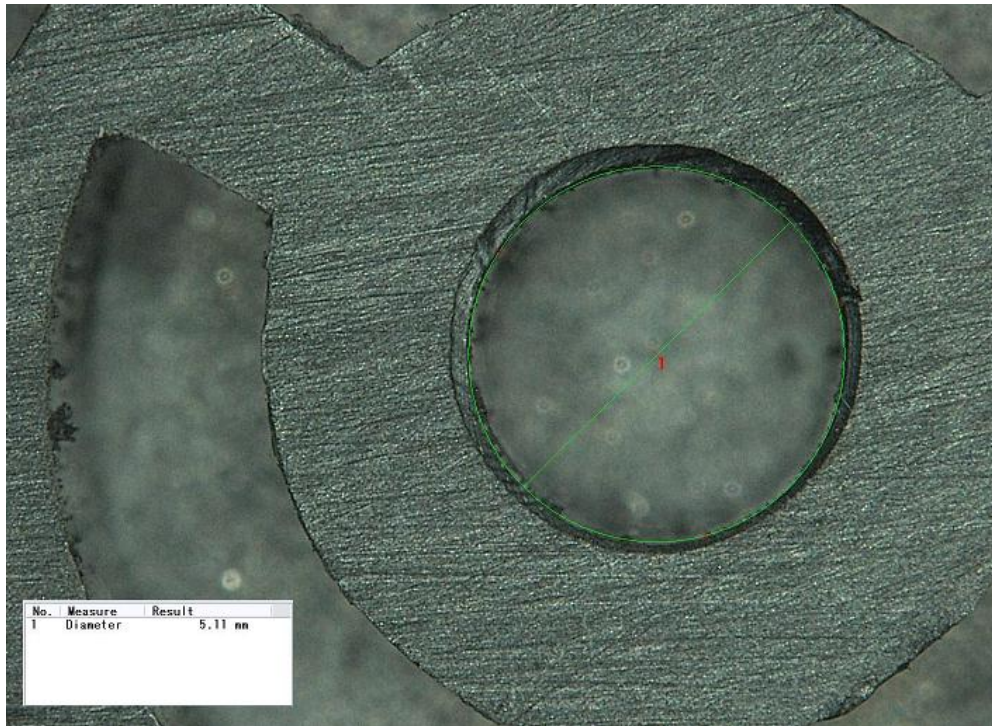




Obrázek 30 Vyhodnocování vzorků. Řez vedený rovnoběžně s osou RPS bodu

Jak je vidět z obrázků, k žádné výrazné tvarové deformaci vnitřní stěny v důsledku stěny nedošlo ani při extrémně krátké době chlazení, a proto je podle tohoto testu snížení produkční doby chlazení možné.

U vzorků s řezem vedeným kolmo na osu jsem měřil vnitřní průměr RPS bodu. Toto měření jsem prováděl podle Obrázku 31, pro každý vzorek vždy 5x z důvodu zvýšení statistických přesností měření.



Obrázek 31 Vyhodnocování vzorků oddělených kolmo na osu RPS bodu

4.6.2. Vyhodnocení naměřených hodnot

Ve výkresové dokumentaci obalu klimatizační jednotky je velikost vnitřního průměru předepsána $5,1 \pm 0,1$ mm. Tuto hodnotu beru jako závaznou pro vyhodnocování deformace vnitřního průměru.

Před měřením vnitřního průměru jsem jeden vzorek oddělený kolmo na osu změřil 15x pro zjištění přesnosti měření. Z naměřených hodnot jsem vypočítal základní statistické veličiny (Tabulka 2) a jako chybu pro následující měření jsem volil $3 \times \sigma_s$

Tabulka 2 Přesnost měření mikroskopem

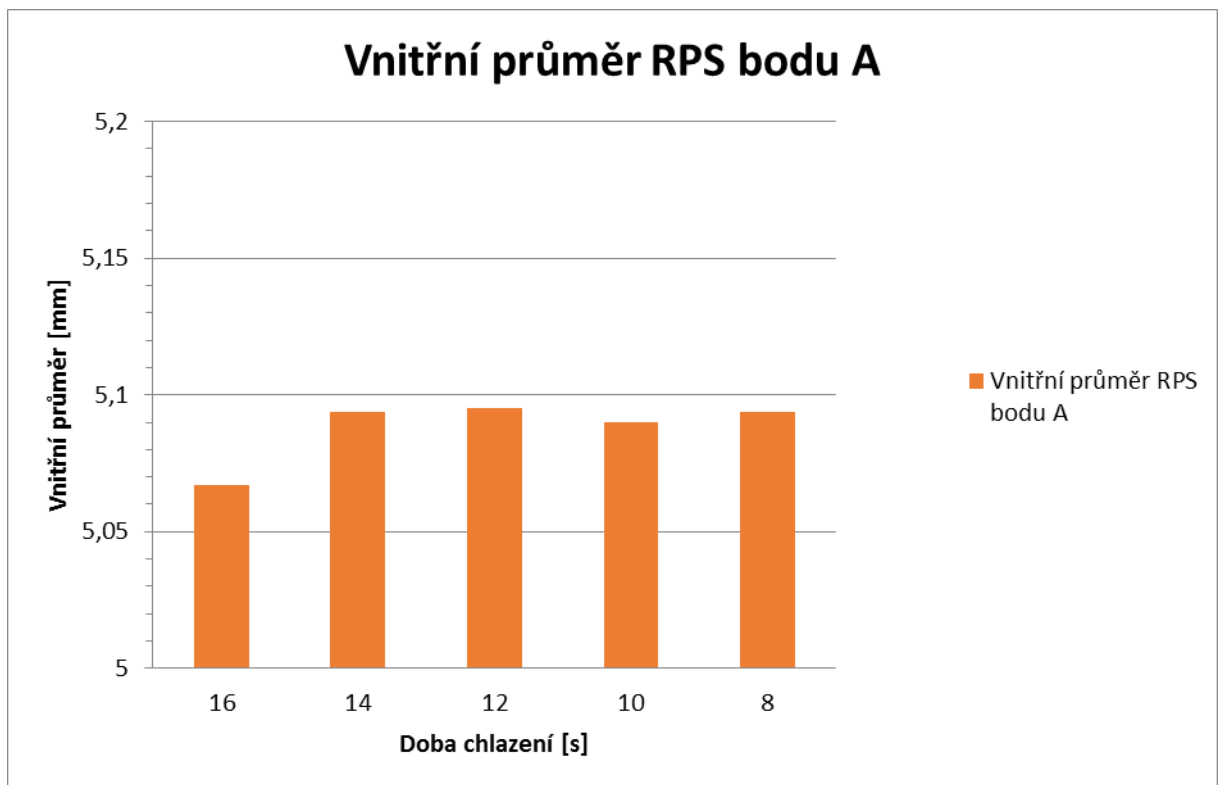
Naměřené hodnoty d [mm]			\bar{d} [mm]	σ_s [mm]	Chyba měření mikroskopem [mm]
5,02	5,04	5,02	5,051	0,036	0,109
5,13	5,08	5,13			
5,04	5,01	5,05			
5,04	5,07	5,01			
5,03	5,06	5,04			



Naměřené hodnoty jsem rozdělil podle série a podle strany obalu klimatizační jednotky, pro názornost výsledků měření jsem vytvořil z průměrných hodnot v každé sérii sloupcový graf, a poté jsem porovnával výsledné hodnoty z obou stran.

Tabulka 3 Hodnoty RPS bod A

RPS bod A	vzorek	Naměřené hodnoty d [mm]					\overline{x}_{RPS} [mm]	$\overline{x}_{série}$ [mm]	Rozsah [mm]
1. série	1/4/1'	5,06	5,05	5,02	5,08	5,08	5,06	5,07	0,03
	1/5/1'	5,08	5,09	5,06	5,11	5,04	5,08		
2. série	2/4/1'	5,06	5,07	5,16	5,16	5,06	5,10	5,09	
	2/5/1'	5,10	5,11	5,08	5,08	5,06	5,09		
3. série	3/4/1'	5,10	5,11	5,07	5,17	5,09	5,11	5,10	
	3/5/1'	5,06	5,10	5,09	5,06	5,10	5,08		
4. série	4/4/1'	5,06	5,01	5,08	5,11	5,07	5,07	5,09	
	4/5/1'	5,11	5,11	5,12	5,11	5,12	5,11		
5. série	5/4/1'	5,13	5,10	5,08	5,11	5,14	5,11	5,09	
	5/5/1'	5,07	5,07	5,07	5,12	5,05	5,08		

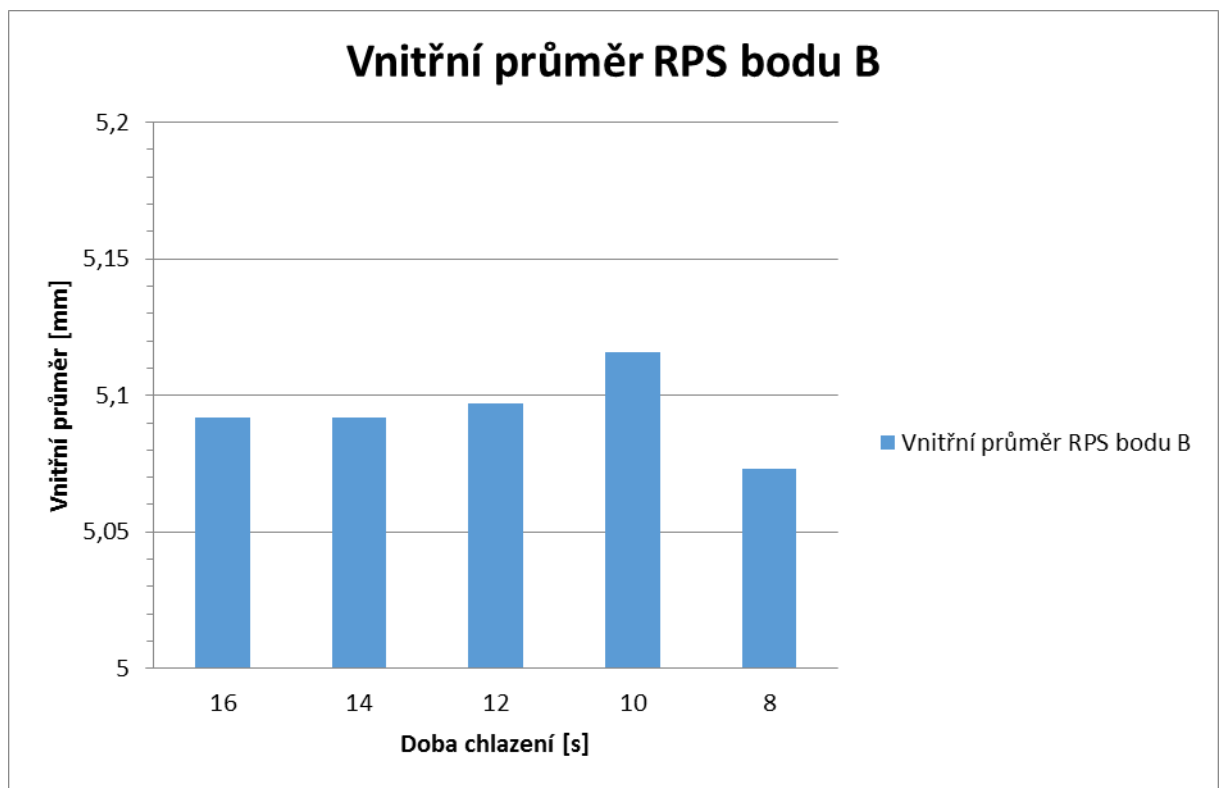


Graf 1 Výsledky měření RPS bodu A

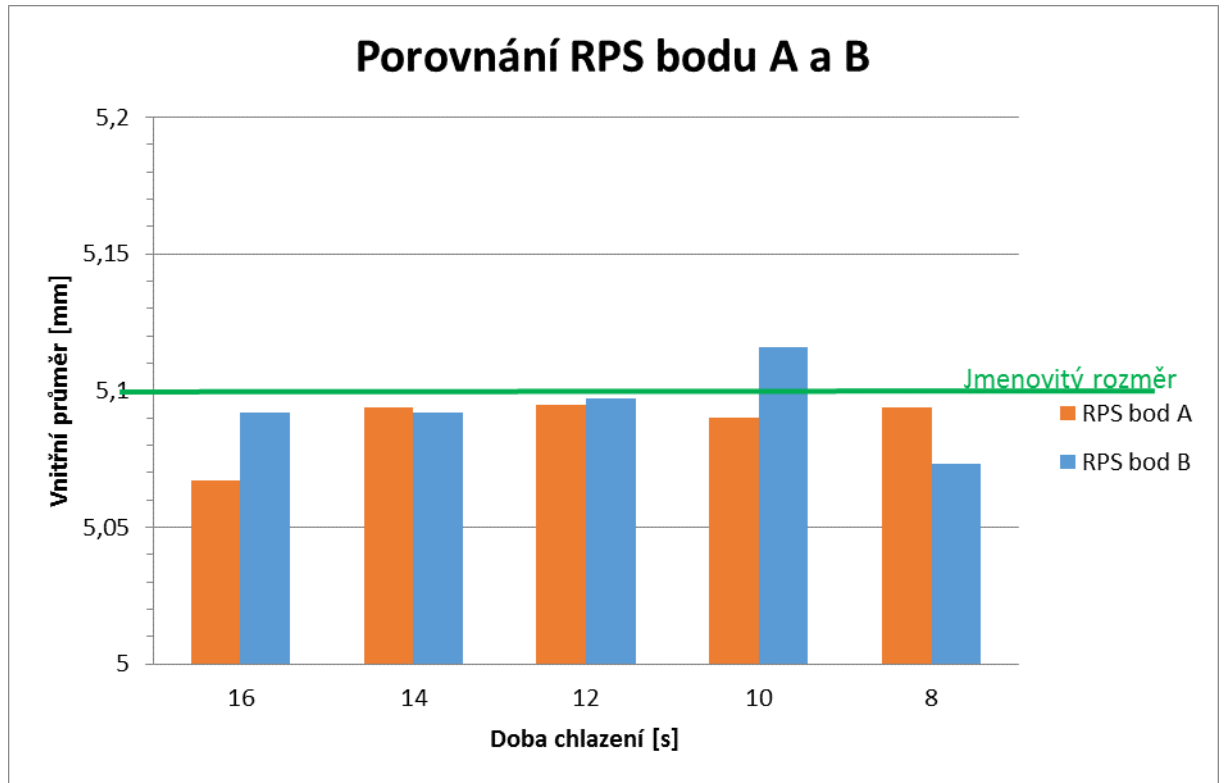


Tabulka 4 Hodnoty RPS bod B

RPS bod B	vzorek	Naměřené hodnoty d [mm]					\bar{x}_{RPS} [mm]	$\bar{x}_{série}$ [mm]	Rozsah [mm]
1. série	1/4/2'	5,06	5,14	5,14	5,06	5,08	5,10	5,09	0,04
	1/5/2'	5,09	5,07	5,09	5,11	5,08	5,09		
2. série	2/4/2'	5,06	5,13	5,11	5,08	5,06	5,09	5,09	
	2/5/2'	5,09	5,09	5,13	5,11	5,06	5,10		
3. série	3/4/2'	5,02	5,09	5,03	5,11	5,06	5,06	5,10	
	3/5/2'	5,17	5,10	5,13	5,13	5,13	5,13		
4. série	4/4/2'	5,10	5,08	5,07	5,20	5,08	5,11	5,12	
	4/5/2'	5,14	5,14	5,08	5,13	5,14	5,13		
5. série	5/4/2'	5,06	5,03	5,05	5,07	5,09	5,06	5,07	
	5/5/2'	5,06	5,07	5,09	5,13	5,08	5,09		



Graf 2 Výsledky měření RPS bodu B



Graf 3 Porovnání RPS bodu A a B

Z naměřených hodnot a z porovnání obou stran je zřejmé, že k žádné veliké změně vnitřního průměru RPS bodu nedošlo ani na jedné straně, a proto podle tohoto testu by bylo možné snížit produkční dobu chlazení na 8 vteřin. Rozsah průměrů je menší než zvolená chyba měření digitálním mikroskopem a vejde se do předepsané tolerance z výkresové dokumentace, takže vnitřní průměr se se změnou produkční doby chlazení nemění.

4.6.3. Použité vzorce

- Aritmetický průměr: $\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

- Směrodatná odchylka:
$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

- Rozsah : $Rozsah = MAX - MIN$

4.7. Měření hustoty materiálu vzorků

Jeden z možných důsledků snížení doby chlazení je vznik bublin uvnitř materiálu. Proto jsem se pokusil vyvrátit tento předpoklad měřením hustoty vzorků. Pokud by se v měřené části obalu klimatizační jednotky vyskytly bubliny, hustota materiálu by se snížila, a poté bych byl jednoduchým výpočtem schopný vyjádřit objemové zastoupení bublin.



4.7.1. Princip měření

Hustotu jsem měřil v laboratořích Ústavu materiálového inženýrství ČVUT v Praze v přístroji na měření hustoty materiálu. Před měřením hodnot hustoty vzorků jsem nejprve změřil 10x hustotu jednoho vzorku, abych zjistil přesnost měření hustoty přístrojem. Tuto naměřenou chybu budu brát v úvahu při vyhodnocování změn hustoty vzorků (Tabulka 5).

Tabulka 5 Přesnost měření hustoty

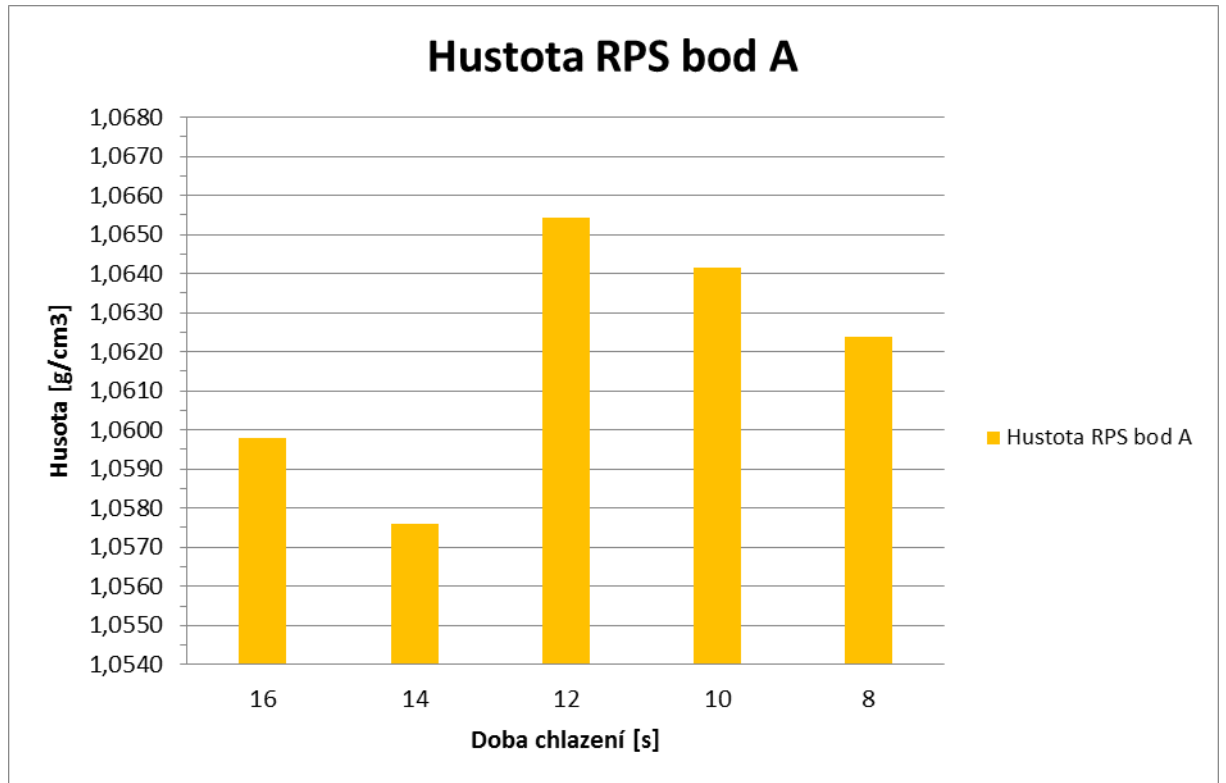
Číslo měření	Naměřené hodnoty [g/cm ³]	Průměr [g/cm ³]	Směrodatná odchylka [g/cm ³]	chyba měření [g/cm ³]
1	1,0701	1,0714	0,0007	0,0020
2	1,0721			
3	1,0720			
4	1,0707			
5	1,0711			
6	1,0713			
7	1,0720			
8	1,0719			
9	1,0715			
10	1,0711			

Měření vzorků jsem prováděl se všemi hotovými vzorky, co jsem měl k dispozici z jedné série a strany. Oddělil jsem výsledky vzorků pro body A a B, neboť každá strana by mohla mít jiné vlastnosti. Následně jsem každý vzorek měřil 3x a ze všech naměřených hodnot udělal průměr. Naměřené hodnoty příkládám v Tabulce 6.



Tabulka 6 Hodnoty RPS bod A

RPS A	Doba chlazení [s]	naměřené hodnoty $[\frac{g}{cm^3}]$			$\bar{\rho}_1[\frac{g}{cm^3}]$	$\bar{\rho}_2[\frac{g}{cm^3}]$	σ_s
1.1.1.	16	1,0438	1,0461	1,0803	1,0567	1,0598	0,0092
1.2.1.		1,0447	1,0551	1,0670	1,0556		
1.3.1.		1,0657	1,0664	1,0612	1,0644		
1.4.1.		1,0534	1,0586	1,0575	1,0565		
1.5.1.		1,0687	1,0570	1,0605	1,0621		
1.6.1.		1,0656	1,0558	1,0690	1,0635		
2.1.1.	14	1,0664	1,0641	1,0632	1,0646	1,0576	0,0059
2.2.1.		1,0493	1,0490	1,0602	1,0528		
2.3.1.		1,0595	1,0531	1,0640	1,0589		
2.4.1.		1,0462	1,0606	1,0582	1,0550		
2.5.1.		1,0575	1,0634	1,0481	1,0563		
2.6.1.		1,0562	1,0598	1,0580	1,0580		
3.1.1.	12	1,0723	1,0515	1,0699	1,0646	1,0654	0,0056
3.2.1.		1,0563	1,0585	1,0588	1,0579		
3.3.1.		1,0680	1,0666	1,0707	1,0684		
3.4.1.		1,0630	1,0661	1,0635	1,0642		
3.5.1.		1,0696	1,0686	1,0680	1,0687		
3.6.1.		1,0675	1,0701	1,0690	1,0689		
4.1.1.	10	1,0704	1,0702	1,0694	1,0700	1,0641	0,0057
4.2.1.		1,0565	1,0582	1,0601	1,0583		
4.3.1.		1,0638	1,0614	1,0633	1,0628		
4.4.1.		1,0576	1,0673	1,0662	1,0637		
4.5.1.		1,0667	1,0673	1,0678	1,0673		
4.6.1.		1,0700	1,0692	1,0492	1,0628		
5.1.1.	8					1,0624	0,0048
5.2.1.		1,0569	1,0582	1,0651	1,0601		
5.3.1.		1,0635	1,0559	1,0608	1,0601		
5.4.1.		1,0668	1,0651	1,0692	1,0670		
5.5.1.		1,0631	1,0519	1,0633	1,0594		
5.6.1.		1,0572	1,0693	1,0697	1,0654		

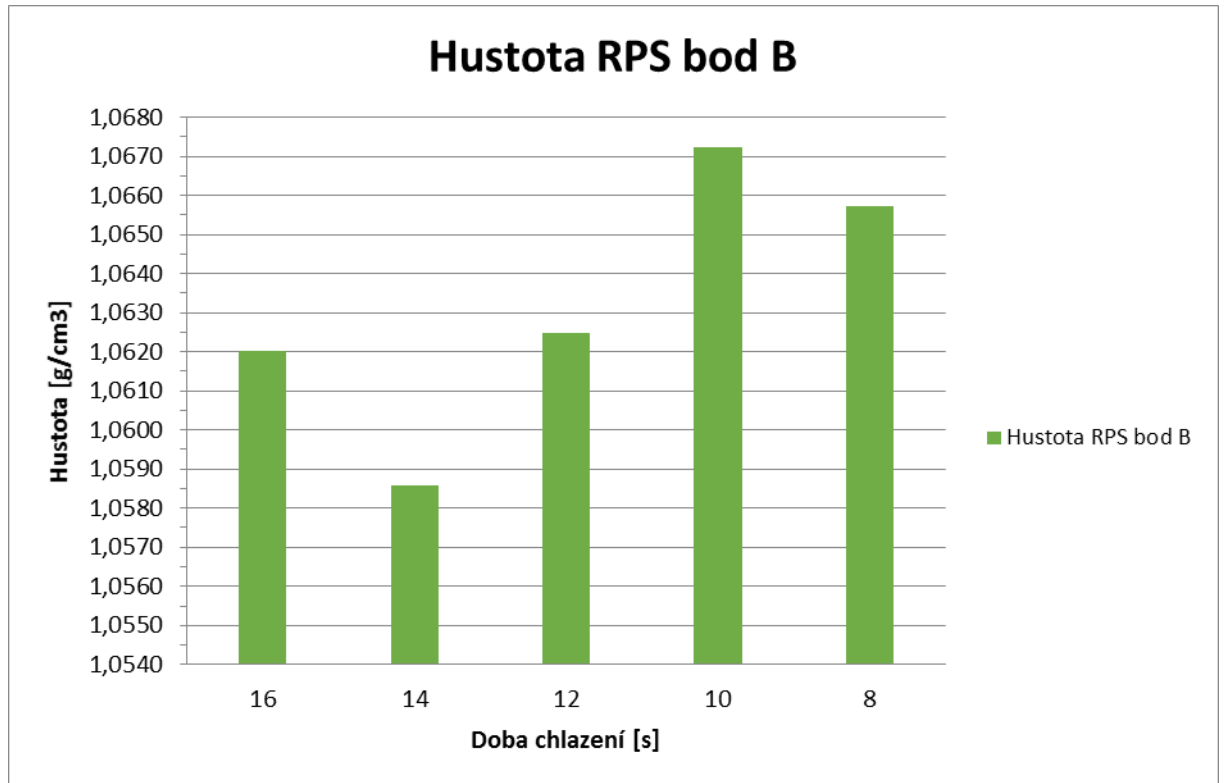


Graf 4 Hustota RPS bodu A

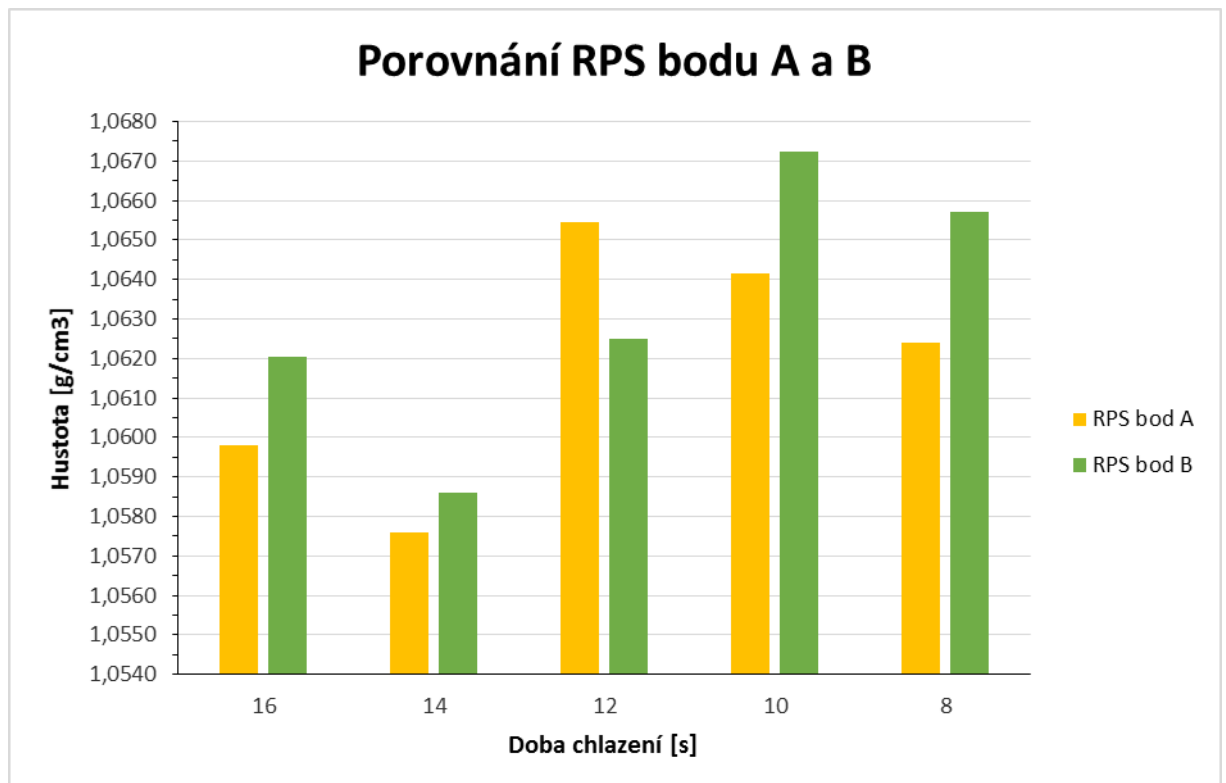


Tabulka 7 Hodnoty RPS bod B

RPS B	Doba chlazení [s]	naměřené hodnoty $[\frac{g}{cm^3}]$			$\bar{\rho}_1[\frac{g}{cm^3}]$	$\bar{\rho}_2[\frac{g}{cm^3}]$	σ_s
1.1.2.	16					1,0620	0,0044
1.2.2.		1,0624	1,0638	1,0681	1,0648		
1.3.2.		1,0628	1,0634	1,0673	1,0645		
1.4.2.		1,0549	1,0608	1,0602	1,0586		
1.5.2.		1,0545	1,0575	1,0614	1,0578		
1.6.2.		1,0682	1,0675	1,0577	1,0645		
2.1.2.	14	1,0582	1,0637	1,0607	1,0609	1,0586	0,0050
2.2.2.		plave	plave	plave			
2.3.2.		1,0544	1,0633	1,0524	1,0567		
2.4.2.		1,0595	1,0518	1,0555	1,0556		
2.5.2.		1,0600	1,0609	1,0656	1,0622		
2.6.2.		1,0483	1,0597	1,0649	1,0576		
3.1.2.	12	1,0568	1,0687	1,0698	1,0651	1,0625	0,0066
3.2.2.		1,0614	1,0426	1,0615	1,0552		
3.3.2.		1,0574	1,0644	1,0662	1,0627		
3.4.2.		1,0590	1,0653	1,0544	1,0596		
3.5.2.		1,0625	1,0649	1,0629	1,0634		
3.6.2.		1,0671	1,0701	1,0699	1,0690		
4.1.2.	10	1,0669	1,0683	1,0708	1,0687	1,0672	0,0025
4.2.2.		1,0659	1,0648	1,0682	1,0663		
4.3.2.		1,0644	1,0636	1,0692	1,0657		
4.4.2.		1,0645	1,0634	1,0670	1,0650		
4.5.2.		1,0646	1,0697	1,0704	1,0682		
4.6.2.		1,0681	1,0710	1,0694	1,0695		
5.1.2.	8	1,0673	1,0681	1,0684	1,0679	1,0657	0,0049
5.2.2.		1,0598	1,0635	1,0658	1,0630		
5.3.2.		1,0686	1,0678	1,0617	1,0660		
5.4.2.		1,0691	1,0695	1,0711	1,0699		
5.5.2.		1,0581	1,0560	1,0574	1,0572		
5.6.2.		1,0716	1,0699	1,0692	1,0702		



Graf 5 Hustota RPS bodu B



Graf 6 Porovnání stran

4.7.2. Vyhodnocení naměřených hodnot

Z naměřených hodnot vychází, že průběh změny hustoty obou stran obalu klimatizační jednotky je podobný, takže neočekávaný průběh nemůže být ovlivněn chybou měření. Tento průběh je mimo mé předpoklady – očekával jsem, že se zkracující se dobou chlazení ve stroji



bude růst teplota výrobku, a tím se zvyšovat vnitřní podíl krystalické fáze. Snížení hustoty při době chlazení 14 vteřin může být způsobeno vznikem bublin uvnitř materiálu.

Vůči produkčnímu času chlazení (16 vteřin) u RPS bodu A se hustota u doby chlazení 14 vteřin snížila o 0,2% a v maximu při době chlazení 12 vteřin se zvýšila o 0,53%. U RPS bodu B se u doby chlazení 14 vteřin snížila hustota o 0,32% a v maximu při době chlazení 10 vteřin se zvýšila o 0,49%. Z výsledků je vidět, že v důsledku změny délky chlazení ve stroji došlo k velmi malé změně hustoty materiálu. Proto bych z pohledu tohoto testu mohl doporučit snížení produkčního času chlazení, neboť změna hustoty měřené oblasti vztažená k prvnímu vzorku je pod 1%.

4.7.3. Použité vzorce

Při vyhodnocování měření hustoty jsem použil stejné vzorce jako při měření deformace vnitřního průměru, které uvádím v kapitole 4.6.3. Použité vzorce.

4.8. Měření metodou DSC

Měření metodou DSC (Diferenční snímací kalorimetrie) jsem použil pro změření energie potřebné k roztavení krystalické fáze, a tím i k určení jejího podílu. Podíl krystalické fáze a změna hustoty spolu souvisí. Předpokládám, že z naměřených hodnot touto metodou bude patrná souvislost s měřením hustoty.

Tento test jsem prováděl v laboratoři na Ústavu materiálového inženýrství ČVUT v Praze.

4.8.1. Princip měření

Měření metodou DSC (Diferenční snímací kalorimetrie) jsem prováděl podle normy ČSN EN ISO 11357-1.

Pro měření metodou DSC jsem zvolil vzorky 1/6/1, 5/6/1, 1/6/2 a 5/6/2 abych porovnal produkční vzorek se vzorkem s nejkratší dobou chlazení ve stroji (8 vteřin). Všechny vzorky byly poslední ze série, takže výrobní proces by měl být už ustálený a v měření by se měla promítnout změna nastavení stroje.

Vzorek o hmotnosti kolem 20 mg jsem bral z nejobjemnější části RPS bodu a z půlky výšky RPS bodu. Díky tomu jsem získal vzorek, který by podle předpokladů měl chladnout nejdéle a jehož teplota byla vždy při vyhození výstřiku z formy nejvyšší.

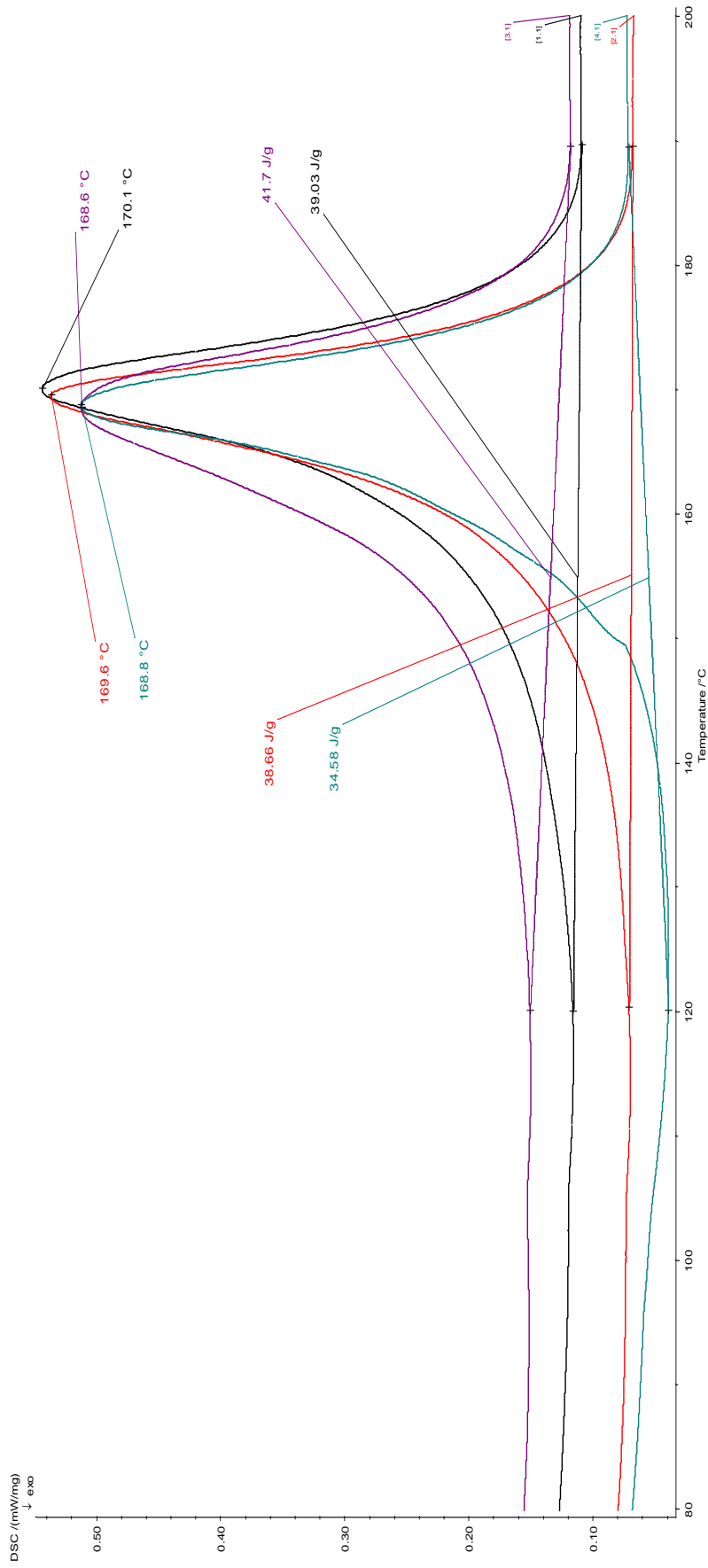
4.8.2. Vyhodnocení naměřených hodnot

Naměřené hodnoty přikládám v grafu

Tabulka 8: Vysvětlivky pro graf DSC

Průběh	Vzorek	Doba chlazení [s]	RPS bod
Červený	1/6/1'	16	A
Modrá	5/6/1'	8	A
Fialový	1/6/2'	16	B
Černý	5/6/2'	8	B







Graf 7 DSC

Z naměřených hodnot vychází, že výrobek s produkčním časem chlazení má vyšší obsah krystalické fáze, i když i u naměřených hodnot hustoty vychází, že by to mělo být naopak. Nižší naměřená hustota u doby chlazení 16 vteřin může být způsobena výskytem bublinek uvnitř materiálu.



5. Závěr

Z naměřených hodnot plyne:

- změna vnitřního průměru zvolených RPS bodů je v předepsané toleranci
- změna hustoty materiálů je proti produkčnímu času chlazení menší než 1%
- z měření metodou DSC vychází, že změna vnitřní krystalické struktury materiálů je minimální

Díky těmto výsledkům můžeme tvrdit, že funkčnost upínacího šroubového spoje na klimatizační jednotce je zachovaná i při nejkratší době chlazení ve stroji. Proto podle měřených vlastností je možné zkrátit čas chlazení o 8 vteřin na dobu chlazení 8 vteřin.

V průběhu výroby testovacích vzorků jsem si všiml že:

- vnitřní části obalu důležité pro správné rozdělení toku vzduchu jsou u všech vzorků kromě produkčního v důsledku dřívějšího vyndání ze stroje zdeformované.
- V rovině sesazení obalu klimatizační jednotky je vůle, která by mohla snížit účinnost jednotky a také zvýšit hluk při používání.

Tento problém je velice závažný a kvůli němu nemohu doporučit trvalé snížení produkčního času chlazení.

Po konstrukční či technologické změně, která by zamezila deformaci vnitřních částí obalu klimatizační jednotky, bychom mohli snížit produkční čas chlazení.



6. Literatura:

- [1] MEISSNER B., ZILVAR V.: *Fyzika polymerů - Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*, Nakladatelství technické literatury, n.p.. Praha 1987
- [2] MLEZIVA J., ŠŇUPÁREK J., *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*, SABOTÁLES, Praha 2000
- [3] PLAST FORM SERVICE: *Plasty - konstrukční materiály a jejich zpracování*. Praha 2009
- [4] PLAST FORM SERVICE: *Vstřikování plastů*. Praha 2009
- [5] ZEMAN L.: *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. BEN - technická literatura. Praha 2009
- [6]http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm - dostupné 4. 6. 2015
- [7]http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01-plasty%20uvod/18-tvar%20makromolekul.jpg - dostupné 4. 6. 2015
- [8]<http://www.petroleum.cz/vyrobky/polypropylen.aspx> - dostupné 4. 6. 2015
- [9]<http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/8960-zdravotni-aspekty-zateplenych-a-pasivnich-budov> - dostupné 4. 6. 2015
- [10] HELL J. (technolog vstřikování plastů - DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.) - konzultace
- [11] Menšík M. (Setter vstřikování plastů - DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.) – konzultace
- [12] ČSN EN ISO 11357-1
- [13] Firemní literatura společnosti DENSO MANUFACTURING CZECH s.r.o.