

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

VLIV VSTUPNÍHO MATERIÁLU NA KVALITU VÝROBKU
INFLUENCE OF INPUT MATERIAL ON PRODUCT QUALITY

AUTOR: Bc. Jiří Pecháček

STUDIJNÍ PROGRAM: Strojní inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Elena Čižmárová, Ph.D.

KONZULTANT: Ing. Jaroslav Kropáček

PRAHA 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pecháček** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **370770**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv vstupního materiálu na kvalitu výrobků

Název diplomové práce anglicky:

The influence of input material on product quality

Pokyny pro vypracování:

Cíl:

Cílem práce je zhodnotit vliv vstupních surovin na vlastnosti kelímků.

Postup:

1. Literární rešerše v problematice výroby kelímků.
2. Návrh a provedení experimentu - zjištění mechanických a reologických vlastností.
3. Výsledky a vyhodnocení experimentu.
4. Diskuse a závěry.

Seznam doporučené literatury:

- [1.] ŠTĚPEK, Jiří, Antonín KUTA a Jiří ZELINGER. Technologie zpracování a vlastnosti plastů: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy chemickotechnologické, studijní obor 28-10-8 Technologie výroby a zpracování polymerů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [2.] EDITED BY RICHARD COLES a DEREK MCDOWELL AND MARK J. KIRWAN. Food Packaging Technology. Oxford: Blackwell Pub, 2003. ISBN 9781405147712.
- [3.] ZEMAN, Lubomír. Vstříkování plastů: úvod do vstříkování termoplastů. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 247 s. ISBN 978-80-7300-250-3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Elena Čižmárová Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

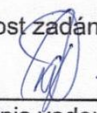
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

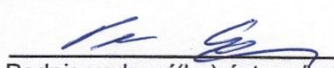
Ing. Jaroslav Kropáček, Greiner Packaging s.r.o.

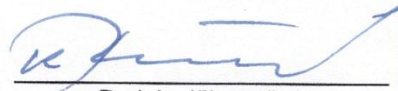
Datum zadání diplomové práce: **24.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2017**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce


Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

25.4.2017

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne

.....

podpis

Anotace

Práce se zabývá vlivem vstupního materiálu vícenásobné extruze na kvalitu výsledného produktu. Dále problematikou výroby tvarově podobných kelímků, které jsou z pohledu výroby i kvality bezproblémové (OK) a problémové (NOK), projevující se vysokou křehkostí.

Klíčová slova: kelímek, polypropylen, extruze, tvarování plastů, DSC, index toku taveniny

Annotation

The thesis deals with the influence of input material multiple extrusion on the final product. Further, the thesis deals with the production issues of shape-like similar cups that are good (OK) and problematic (NOK) in terms of production and quality, which show a high brittleness.

Keywords: a cup, polypropylene, extrusion, plastic thermoforming, DSC, viscosity
index

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí práce Ing. Eleně Čižmárové Ph.D. za cenné rady, podněty a pomoc při vypracování této diplomové práce. Poděkování patří také konzultantovi diplomové práce Ing. Jaroslavovi Kropáčkovi a technologovi Janovi Lískovcovi za užitečné rady ohledně výrobní technologie. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Greiner Packaging Louka u Litvínova, za poskytnutí všech potřebných informací a poskytnutí pracovních podmínek k vytvoření této práce. V neposlední řadě děkuji mé rodině a známým za neutuchající podporu jak při psaní této práce, tak v celém studiu.

Obsah

1	Seznam symbolů	3
2	Úvod.....	5
3	Teoretická část	7
3.1	O společnosti Greiner Packaging	7
3.2	Historie kelímků.....	8
3.3	Technologie výroby fólií.....	9
3.3.1	Technologie vytlačování.....	9
3.3.2	Technologie vyfukování	12
3.4	Tepelné tvarování plastů	13
3.4.1	Metoda Offline/Inline	13
3.4.2	Principy tepelného tvarování	14
3.4.3	Mechanické tvarování.....	15
3.4.4	Pneumatické tvarování.....	15
3.4.5	Pozitivní tvarování	15
3.4.6	Negativní tvarování.....	16
3.4.7	Mechanické předtvarování.....	17
3.4.8	Pneumatické předtvarování.....	18
3.4.9	Kombinované předtvarování.....	19
3.4.10	Kontinuální tvarování	20
3.5	Polypropylen	21
3.5.1	Krystalické modifikace polypropylenu.....	23
3.5.2	Krystalické struktury.....	25
3.5.3	Dodatečná krystalizace	26
3.5.4	Krystalické nadstruktury	26
3.5.5	Nukleační činidla	27

3.6	Zkouška tahem plastů.....	28
3.7	Diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC).....	30
3.8	Stanovení hmotnostního a objemového indexu toku taveniny termoplastů.....	33
4	Experimentální část.....	36
4.1	Cíle experimentu	36
4.2	Experimentální materiál	36
4.3	Výrobní cyklus kelímku	38
4.4	Nastavení stroje a teplot vícenásobné extruze	39
4.5	Index toku taveniny	40
4.6	Hustota	41
4.7	DSC	41
4.8	Tahová zkouška.....	49
4.9	Zkouška houževnatosti na kuličce	56
5	Zhodnocení výsledků.....	57
6	Závěr	62
7	Literatura.....	64

1 Seznam symbolů

A	Plocha	[mm ²]
aPP	Ataktický Polypropylen	
iPP	Izotaktický Polypropylen	
sPP	Syndiotaktický Polypropylen	
DSC	Differential scanning calorimetry	
D	Průměr	[mm]
E	Modul pružnosti	[MPa]
EPM	Kopolymer ethylenu s propylenem	
F	Síla	[N]
HDT	Heat deflection temperature	[°C]
H	Hloubka	[mm]
m	Hmotnost	[g]
m _{nom}	Nominální zatížení	[kg]
MFR	Melt flow rate	[g/cm ³]
MVR	Melt volume-flow rate	[cm ³ /10min]
t	Stanovený čas měření	[s]
A	Průřez pístu a válce	[cm ²]
l	Stanovená vzdálenost	[cm]
PP	Polypropylen	
PS	Polystyren	
PA	Polyamid	
PC	Polykarbonát	

PVC	Polyvinylchlorid	
REM	Elektronová rastrovací mikroskopie	
WAXS	Wide-angle X-ray scattering	
SAXS	Small-angle X-ray scattering	
t	Tloušťka stěny	[mm]
T	Teplota	[°C]
T _{pc}	Teplota krystalizace píku	[°C]
T _{pm}	Teplota tání píku	[°C]
T _f	Teplota viskózního toku	[°C]
T _m	Teplota tání	[°C]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
α	Koeficient významnosti	[-]
ΔG _v	Gibbsova energie	[J]
ΔH	Entalpie tavení	[J/g]
ΔL	Změna délky	[mm]
σ	Normálové napětí	[MPa]
σ _m	Maximální napětí v tahu	[MPa]
σ _y	Napětí na mezi kluzu	[MPa]
σ _b	Napětí při přetržení	[MPa]
ε _m	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti	[%]
ε _y	Poměrné prodloužení na mezi kluzu	[%]
ε _b	Poměrné prodloužení při přetržení	[%]
ρ	Hustota	[g/cm ³]

2 Úvod

Mezi metodami zpracování plastů je tváření za tepla považováno za obor s největším potenciálem růstu. Při tváření za tepla se termoplastický polotovar přetvoří na hotový díl s třírozměrnou geometrií. Ke konkurenčním postupům tváření za tepla patří mimo jiné vstřikové lití a tvarové lisování. V porovnání k těmto oběma metodám vykazuje tváření za tepla řadu výhod:

Pro výrobu extrémně tenkostěnných tvarových dílů se oproti vstřikovému lití nepoužívá materiál s vysokým indexem toku taveniny Melt Flow Rate (MFR). Při tváření za tepla dojde ke kontaktu nástroje až po přetvoření a oproti vstřikovému lití jsou relevantní především reologické vlastnosti pro přetvoření polotovaru.

Rozsah velikostí tvarových dílů se pohybuje od několika milimetrů do několika metrů délky (zahradní rybník, osvětlovací kopule).

Použitím vícevrstvých polotovarů lze cíleně nastavit vlastnosti tvarového dílu (pevnost, svařitelnost, bariérové vlastnosti atd.).

Orientací materiálu při zpracování se zlepšují mechanické vlastnosti tvarových dílů během procesu.

Tváření za tepla vykazuje ovšem také některé nedostatky:

Rozměrově přesně lze ztvárnit pouze stranu polotovaru, která přijde do kontaktu s nástrojem. Rozměr protistrany vyplývá z výsledného protažení a smrštění.

Použité polotovary se musí vyrobit z plastových granulátů vytlačováním fólií nebo desek, což znamená přídatné náklady u výchozího materiálu.

Po vytvarování se musí tvarové díly zvláště vyrazit /vyseknout/, což je spojeno s přídatnými náklady a odpadem. Recyklací odpadů z vysekání se však tato nevýhoda vykompenzuje. Dosažitelná rozměrová přesnost je podstatně nižší, než u vstřikového lití [2, 3].

Ve společnosti Greiner Packaging Louka u Litvínova se vyrábí velká část sortimentu výrobků prostřednictvím tváření za tepla. Největší podíl kelímků se přitom vyrábí z polypropylenu (PP). Nízká hustota $0,9 \text{ g/cm}^3$, vysoká teplota tavení 165° a dobrá chemická odolnost činí z polypropylenu zajímavý materiál pro obor obalového průmyslu.

Proces tváření za tepla se vyvíjí od „empirického“ postupu k řízenému postupu. S použitím regulační technologie se stále zvyšuje počet taktů stroje. S použitím vyšších počtů taktů v procesu tváření PP za tepla však nastávají problémy jako velké smrštění kelímků na svarovém okraji, pýchovací tlak a vysoká křehkost.

V případě pýchovacího tlaku se dosud vycházelo z toho, že ten je hlavně závislý na tloušťce stěny a rozložení tloušťky stěny kelímku a méně na modulu pružnosti. Příslušná tuhost materiálu je v současnosti regulována přidavkem nukleačních činidel a kopolymerů. Vyšší tuhost, která je způsobena nukleačními činidly přináší také vyšší křehkost. Ta se musí opět vyrovnat přidavkem kopolymerů.

V této magisterské práci jsou realizovány následující cíle:

Zhodnocení vlivu vstupního materiálu (granulátu a recyklátu) při vícenásobné extruzi na výslednou kvalitu výrobku (kelímku).

Nalezení možné příčiny praskání kelímku, který je z pohledu kvality problémový (označení NOK) v porovnání s kelímkem který je z pohledu kvality bezproblémový (označení OK).

3 Teoretická část

3.1 O společnosti Greiner Packaging

Společnost Greiner Packaging je jedním z vedoucích výrobců plastových obalů v oblasti potravinářských a nepotravinářských výrobků. Tím, že se drží hesla „od konceptu k hotovému produktu“, výrobce plastových obalů Greiner Packaging poskytuje podporu svým zákazníkům během celého procesu vývoje produktu. Společnost je také známá díky svým dovednostem při poskytování vývoje, návrhu, výroby a dekoračních řešení. [1]

Aplikace širokého spektra technologií pomáhá při doručení „jedinečného návrhu obalů“ pro širokou řadu produktů více než 50 let. Společnost Greiner Packaging, výrobce plastových obalů, disponuje svými třemi divizemi: K, Kavov a Assistec. [1]

Divize K vytváří výhody obalů ve formě plastových kelímků a víček. Je největší z těchto tří divizí a je hybnou silou v neustálém růstu společnosti Greiner Packaging. Posledním příkladem je založení výrobního závodu v USA, který bude dodávat částečně na americký a kanadský trh. Divize K je vedoucím dodavatelem obalů pro mléčné produkty v Evropě. [1]

Její rozmanitá nabídka ve standardní a luxusní řadě splňuje potřeby zákazníků, stejně jako požadavky zákazníků z mlékárenského průmyslu a dalších potravinářských oblastí. [1]

Divize Kavov vytváří výhody obalů ve formě plastových lahví a nádob. Specializace v řešení produktů umožňuje dodávat na širokou řadu trhů: potraviny, zdravotnictví, kosmetika, chemický průmysl a řešení na zakázku. Disponuje širokou řadou výrobních a dekorativních technologií. Počet zpracovávaných materiálů neustále roste. Nejběžněji používané jsou PET, PE, a PP, ale také se používá PA, PES a Tritan™. Tato technologická všestrannost je podporována týmem projektového řízení během celého průběhu projektu. [1]

Divize Assistec, jako partner pro zajišťování zdrojů, který využívá plasty, nabízí rozvoj, výrobu, montáž, logistiku a služby. Dodává na trhy v oblastech kancelářských potřeb a volného času, domácnosti a zahradničení, péče o zdraví a pleť, automobilů a užitných vozidel, stejně jako balení a logistiky. [1]

Společnost Greiner Packaging, je jednou z čtyř poboček Greiner Group. Společnost Greiner byla založena v roce 1868 v Německu a v roce 1899 v Rakousku a od jejího založení je 100% v rodinném vlastnictví. [1]

Společnost Greiner Group provozuje více než 133 závodů (výrobní a distribuční střediska). Využívá kombinace čtyř provozních poboček (Greiner Packaging, Greiner Bio-One International, Greiner Foam International a Greiner Tool.Tec) pod jednou střechou. [1]

3.2 Historie kelímků

Dixie kelímky

Předchůdce moderního plastového kelímku byl Dixie Cups, který byl vyroben v roce 1908. Společnost viděla potřebu jednorázového kelímku a zcela změnila způsob, jakým lidé pili. Před vynálezem těchto kelímků lidé pili z komunálních kelímků nebo vodních sudů, které sebou nesly velké riziko výskytu bakterií, díky čemuž lidé často onemocněli. Tyto šálky obsahovaly na vnitřní straně malý voskovitý povlak, který zabraňoval nasáknutí, přestože byl vyroben z papíru. [2]

Jednorázové kelímky

Od chvíle, kdy byly poprvé představeny Dixie Cups, se staly úspěchem. Železnice, které dříve používaly barely vody, do kterých si cestující ponořili své vlastní poháry, přešly na jednorázové poháry. Nedlouho poté také nemocnice přešly na papírové šálky. To zabránilo křížové kontaminaci a zabránilo šíření nemocí mezi pacienty. [2]

Plastové poháry v šedesátých letech

V šedesátých letech byl první patent na plastový kelímek ve Spojených státech vydán skupině známé pouze jako Price et al. Samotný patent byl jen pro kelímek a byl vydán v roce 1964. Před tím si muž pod jménem Caine, patentoval svojí myšlenku na plastovou nádobu s tenkými stěnami. V podstatě tento šálek byl plastový kelímek, ale tím, že jej nezapsal do patentového úřadu jako takový, využili situace ostatní (skupina Price et al.) a patentovali to jako vlastní verzi plastového kelímku. [2]

Plastové poháry v devadesátých letech

V devadesátých letech bylo zaznamenáno více patentů registrovaných na plastové kelímky než v jakémkoli jiném desetiletí. V roce 1996 Wilson patentoval myšlenku žebrovaného nápojového skla z plastu a žebrovaného bubnu vyrobeného z plastu. Tyto kusy byly těžší a odolnější než plastové kelímky na jedno použití. V roce 1997 zaregistroval Willbrandt patent na plastový kelímek, který se vešel do držáku auta, a v roce 1999 byly zaregistrovány dva patenty na plastové kelímky: Jarvis zaznamenal potahovou bubenku a Hou zaregistroval pohár na pití. [2]

Výrobní proces

Výrobní proces těchto šálek začíná surovým plastem, který je speciálně upraven pro odstranění všech nečistot nebo bakterií. Pak se zahřeje na určitou teplotu a vlije do forem. Teplota je zvláště důležitá, protože pokud je plast příliš horký nebo příliš chladný, může hořet nebo se obrátit na tvrdý plast. Nové technologie umožnily montážním linkám hromadně vyrábět tisíce šálek za jednu hodinu. Jakmile jsou šálky suché, jsou připraveny k balení, skladování a přepravě. [2]

3.3 Technologie výroby fólií

3.3.1 Technologie vytlačování

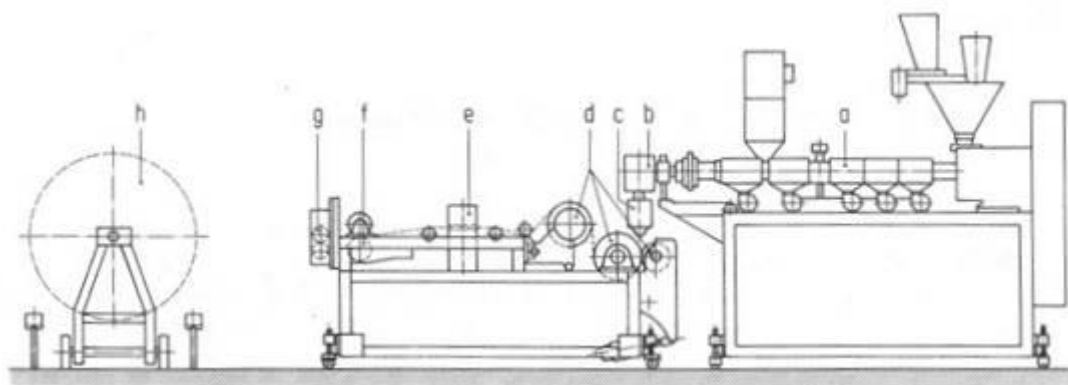
Výroba tenkých fólií

Linka na vytlačování fólií je složena z vytlačovacího stroje s široko-šterbinovou vytlačovací hlavou a vytlačovaným pásem, který je dále odtahován tříválcovým chladicím strojem. Fólie se vytlačuje na chladicí válec. Délku chladicí dráhy lze měnit podle polohy vytlačovací hlavy k chladicímu válci. Povrch válců je leštěn nebo chromován. Válce jsou temperovány na teplotu, která je závislá na druhu zpracovaného materiálu. Vnitřní vestavba chladicích válců se řeší různými způsoby, aby bylo zajištěno rovnoměrné rozložení teplot po délce válce. [3]

Nejčastějšími používanými materiály pro výrobu fólií jsou PP, PS, HDPE, PC, PA a PVC. Technologie vytlačování umožňuje vyrábět fólie složené z více vrstev. Při více vrstvé výrobě do jedné vytlačovací hlavy vstupuje tavenina z více extruderů najednou, tomuto procesu se říká koextruze. [4]

Koextruze je ekonomicky výhodná tím, že na povrchové vrstvy se použije tenká vrstva drahého odolného nebo dekorativního materiálu a středové vrstvy mohou obsahovat levnější variantu plastů. Vzájemná svařitelnost podmiňuje možnost kombinování vrstev. Koextruze se často využívá u zpracování odpadu po tvarování, při vzniku velkého množství recyklátu. [4]

Fólie má po vytlačení vnitřní neuspořádanou strukturu makromolekul a vykazuje standardní pevnostní vlastnosti. Pro zlepšení pevnosti v jednom nebo ve dvou směrech se používá dlužení. Při tvarovací teplotě je tažena fólie jedním nebo dvěma směry. Tažením vzniká molekulárně naorientovaná vnitřní struktura, která je následně ve výrobku zchlazena. Vyšší pevnost má fólie ve směru orientovaných molekul a zároveň je ve výrobku vnitřní tahové napětí. Natažené molekuly se smotávají v případě ohřátí (uvolnění pnutí) a dochází ke smrštění fólie. [4]

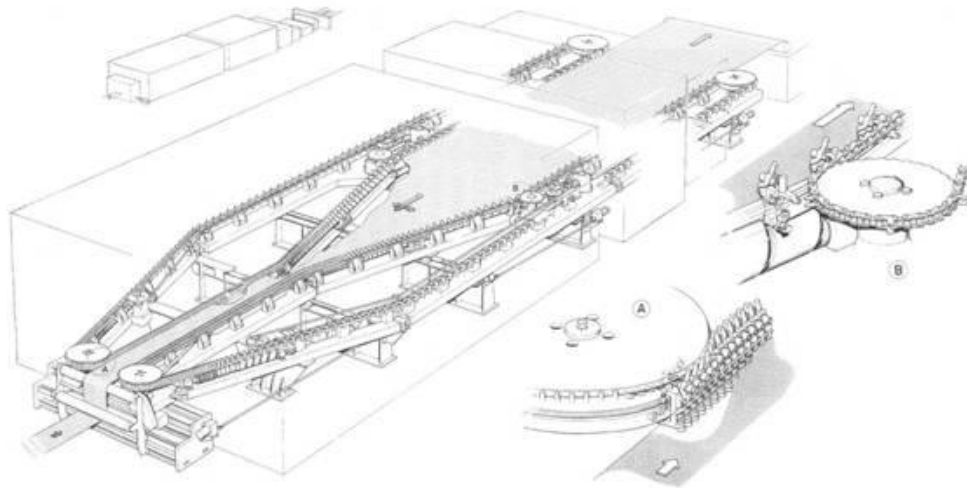


Obr. 1: Linka pro výrobu tenkých fólií vytlačováním [4]

a – vytlačovací stroj, b – adaptér, c – vytlačovací hlava, d – chladicí válce s odtahem, e – měření tloušťky, f – úprava povrchu, g – řezací zařízení, h - navíjení

Výroba orientovaných fólií

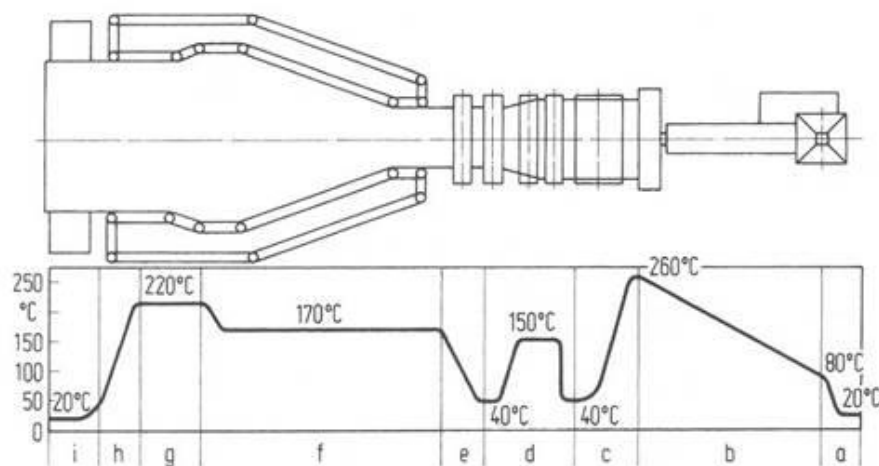
Pro výrobu podélně nebo podlélně i příčně orientovaných fólií se do linky zařazuje za chladicí válce zařízení na monoaxiální (podélný směr) nebo biaxiální (podélný i příčný směr) dlužení fólie. Fólie je předehřáta na vhodnou teplotu, naorientována a ochlazena. Orientace je samostatnou operací nebo je součástí linky. Při monoaxiálním dlužení se znovu nahřátá fólie dluží různou obvodovou rychlostí válců, což způsobuje nárůst pevnosti ve směru dlužení. Výroba biaxiálně dlužených fólií se provádí jednostupňovým nebo dvoustupňovým procesem. [3]



Obr. 2: Dvoustupňový proces dloužení biaxiálních fólií [3]

Při dvoustupňovém procesu se přehřívá monoaxiálně orientovaná fólie zachycuje do svěrek uchycených na dvou nekonečných řetězech, které dále fólii dopravují. Při zvětšování vzdálenosti mezi řetězy se fólie dluží v příčném směru a následně ve směru podélném. Na obr. 3 je zobrazen příklad teplotních profilů. Výhodou dvoustupňového procesu je možnost rozdílného dloužení v podélném a příčném směru, automatizace a jednoduchost linky. [3]

Při procesu jednostupňovém se zvětšuje jak vzdálenost mezi řetězy, tak i vzdálenost mezi jednotlivými svěrkami a tím se dosahuje biaxiálního dloužení. Výhodou je izotropní struktura, nižší spotřeba energie a bezkontaktní proces. [3]

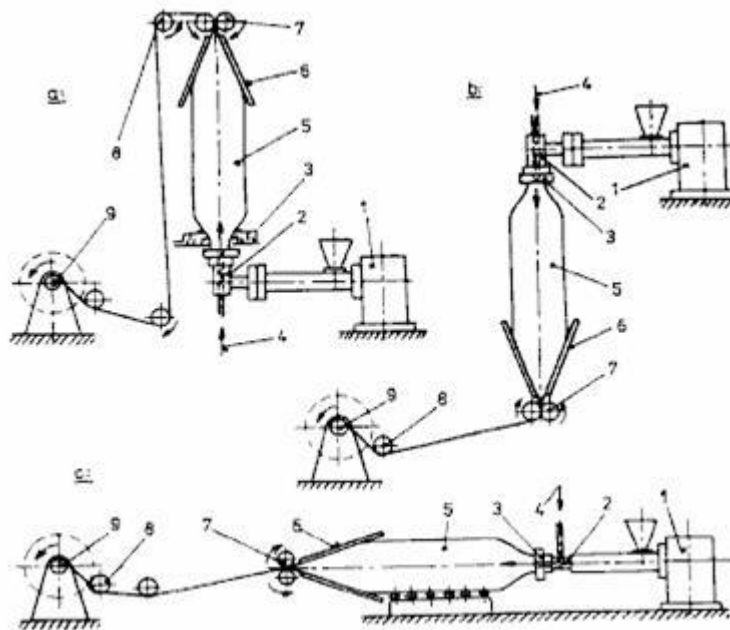


Obr. 3: Teplotní profily při výrobě biaxiálně orientovaných PP fólií [3]

a - přehřev, b - vytlačování, c - chlazení, d - podélné dloužení, e - ohřev, f - příčné dloužení, g - tepelná stabilizace, h - chlazení, i - navíjení

3.3.2 Technologie vyfukování

Technologie vyfukování je založena na tom, že trubka v rozmezí tloušťky stěny 0,5 až 2 mm je v plastickém stavu nafouknuta stlačeným vzduchem a zároveň protažena odtahovacím zařízením. Vyfouknutá fólie o tloušťce stěny do 0,3 mm je ochlazena a navinuta. Vyfukováním lze vyrábět vícevrstvé fólie s různou materiálovou skladbou. Vytlačovací hlavy pro vícevrstvé fólie jsou konstrukčně složité a výroba fólií na nich je náročná na dodržování technologického postupu. V současné době se objevilo na trhu konstrukční řešení, které umožňuje s jedním vytlačovacím strojem vyrábět vícevrstvé fólie. Linka na výrobu fólií vyfukováním může mít v podstatě tři varianty, viz obr. 4. [3]



Obr. 4: Výroba fólií vyfukováním [3]

a – horní odtah, b – spodní odtah, c – horizontální odtah, 1 - vytlačovací stroj, 2 - hlava, 3 - chladičí prstavec, 4 - vstup přetlakového vzduchu, 5 - fólie, 6 - skládací desky, 7 - odtahovací válec, 8 - vodící válečky, 9 – navíjení

Nejčastěji používaná varianta je s horním odtahem fólie. Vytlačovací stroj je osazen vyfukovací hlavou. Vytlačovaná fólie se přetlakem do 1 kPa vyfoukne a chladí vzduchem, přivedený chladičím prstencem, a tím je rovnoměrně po celém obvodu fólii ofukována. Bezproblémové chlazení je důležité pro získání rovnoměrné tloušťky. Přes vytlačovací hlavu se do rukávu přivádí vzduch. Vyfouknutý rukáv se postupně ochlazuje a zplošťuje mezi skládacími deskami a uzavírá odtahovacími válci. Vzdálenost mezi odtahovými válci a vytlačovací hlavou lze nastavit a závisí na tloušťce vyfukované fólie a typu zpracovávaného materiálu. Pro odvod statické elektrické náboje jsou odtahovací válce opatřeny vrstvou pryže. Odtahovou rychlost je možno regulovat a tím ovlivňovat

tloušťku a podélnou orientaci fólie. Ořezávání fólie na vodicím válci může být jednostranné nebo oboustranné. Před vodicí válec je možné zařadit zařízení na povrchovou úpravu fólie pro potiskování. Navíjecí ústrojí se zařazuje na konci linky. Uspořádání linky umožňuje manipulovat v jedné rovině jak s vytlačovacím strojem, tak s navíjením. Nevýhodou je horší chlazení (tepelné působení od vytlačovací hlavy) a obtížnější zavádění fólie. Účinnost chlazení se konstrukčně zvyšuje vodou chlazenými deskami nebo prstenci umístěnými vně rukávu, chlazením chladicího vzduchu nebo odsáváním ohřátého vzduchu z vnitřku rukávu. [3]

Linka se spodním odtahem má uspořádání podobné, obvykle v nižším podlaží. Toto uspořádání usnadňuje zavádění fólie a výhodou je i dokonalejší chlazení rukávu samovolným prouděním vzduchu. Jinak linka obsahuje stejné součásti jako linka s odtahem nahoře. [3]

Linka s odtahem v horizontální rovině se používá především pro zpracování materiálů citlivých na teplotu. Uspořádání linky umožňuje jednoduchou konstrukci vytlačovací hlavy, ale vyfouknutá fólie musí být podpírána vodicími válci. Nerovnoměrné ochlazování rukávu a tíhové zatížení zapříčiňuje nerovnoměrnost tlouštěk fólie. Odstranění nerovnosti v tloušťce fólie bylo dosaženo aplikací rotačního pohybu. Rotačního pohybu lze docílit natáčením vytlačovacího stroje, vytlačovací hlavy, nebo odtahovým ústrojím. Z technických důvodů se rotace vyvolává nejčastěji plynulým otáčením odtahového ústrojí nebo konstrukčním řešením vytlačovací hlavy. [3]

3.4 Tepelné tvarování plastů

3.4.1 Metoda Offline/Inline

Při metodě Offline se fólie po výrobě kompletně ochladí, navine a uloží. V případě potřeby se fólie v tepelném tvarovacím zařízení opět nahřeje a dále zpracuje. Fólie lze vyrábět do zásoby, skladováním však mohou nastat jevy dodatečné krystalizace.

Při metodě Inline se ochladí jen povrch fólie, jádro fólie vnáší teplo z kroku extruze do kroku tvarování. Fólie se přídatně ohřívá před tvarovací stanicí s dohřevem. Odvodem tepla z kroku extruze lze dosáhnout mnohem lepší vytvarování, ve spojení s vyšší energetickou a materiálovou efektivností (odpady z vysekávání jsou vraceny zpět do procesu). Kromě toho odpadají náklady na skladování a přepravu fólie. Pokud však na lince Inline nastane porucha, musí se zastavit celá linka. Přídatně vykazuje extrudér vyšší výkon než tepelná formovací stanice, a proto se musí přiškrtit. [21]

3.4.2 Principy tepelného tvarování

Účinkem tepla se fólie z termoplastické hmoty, sevřená upínacím rámem, vyhřeje na vhodnou tvarovací teplotu a účinkem tlaku zaujme tvar formy, ze které se po ochlazení vyjme. [5]

Při tvarování se musí plast v podobě fólie rovnoměrně zahřát na teplotu, při níž hmota vykazuje dobrou tvarovatelnost. Důležité je stejnoměrné prohřátí desky ve všech místech, které se zúčastní tvarování. Tažnost hmoty dosahuje maxima v určité oblasti teplot, která závisí na druhu plastu. Tato teplota leží u amorfních termoplastů těsně pod teplotou viskózního toku T_f , kdy se hmota nachází v kaučukovitě elastickém stavu, u krystalických plastů těsně nad teplotou tání T_m . Amorfní plasty se ohřívají kratší dobu než semikrystalické. [3]

Je-li teplota tvarování nižší než optimální, je nutno na tvarování vynaložit větší sílu, protože pevnost hmoty se zvyšuje a ve výrobku zůstávají poměrně velká vnitřní pnutí. Po překročení optima plast rychle ztrácí soudržnost a při tvarování se trhá. Tvarování probíhá v chladné formě. Musí proběhnout v co nejkratší době, aby teplota plastu byla během fáze tvarování konstantní. Proto se volí nejvyšší rychlost tvarování, kterou daný plast dovolí. Konečný tvar výrobku, musí být dosažen po jediném zplastikování hmoty v jednom tvarovacím cyklu. Nelze použít postupného tažení. Vnitřní pnutí, způsobené hlavně orientací makromolekul, by totiž při opětovém zahřátí hmoty vyvolalo deformace předtvarovaného dílu, který má snahu vrátit se do původního tvaru desky. Je to důsledek tzv. tvarové paměti. [3]

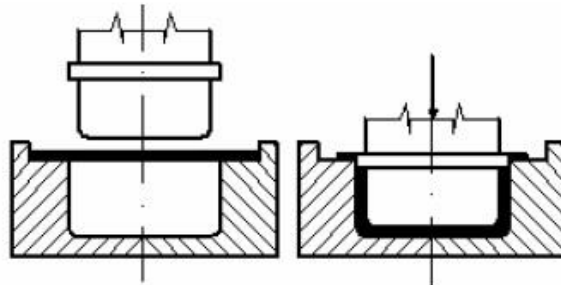
Tvarování lze rozlišit podle použitých tvarovacích prostředků na tvarování mechanické, přetlakové a podtlakové.

Volba tvarovacího postupu se řídí typem zpracovávaného materiálu a požadavkem dosažení rovnoměrné tloušťky stěny hotového výrobku.

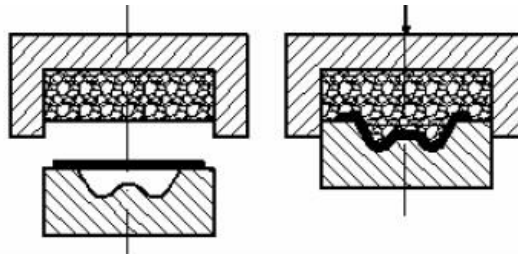
Tvarování za tepla se může provádět různými způsoby. V zásadě se rozeznává tvarování pozitivní a negativní. Častěji se používá tvarování negativní, umožňující širší variabilitu procesu tvarování uplatněním vakua, tlakového vzduchu, předtažení tvárníkem nebo stlačeným vzduchem. [7]

3.4.3 Mechanické tvarování

U mechanického tvarování se změny tvaru daného polotovaru dosáhne přímým působením jednotlivých částí formy na tvarovaný materiál. Na obr. 5 a 6 jsou zobrazeny dva základní způsoby mechanického tvarování. [6]



Obr. 5: Mechanické tvarování - pevný tvárník [6]



Obr. 6: Mechanické tvarování - pružný tvárník [6]

3.4.4 Pneumatické tvarování

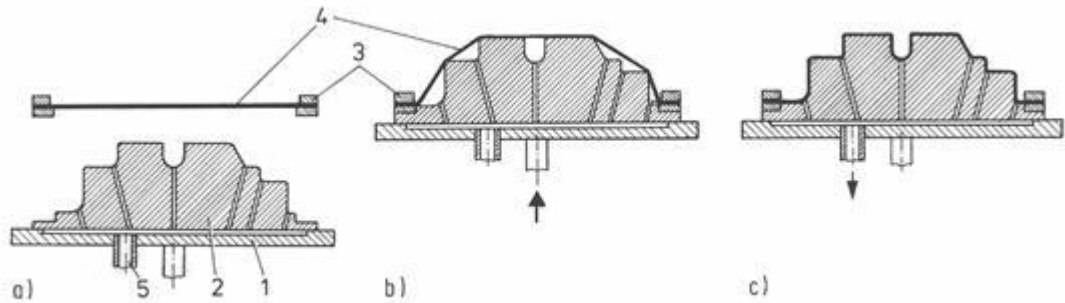
V současnosti je nejrozšířenější podtlakové tvarování. Pro dosažení změny tvaru polotovaru se využívá rozdíl atmosférického tlaku a vakua, které se vytvoří vývěvou v dutině formy. Tlak pro tvarování odpovídá několika desítkám kPa. U přetlakového způsobu se síla k tvarování vyvozuje působením tlakového média (vzduchu), jehož tlak bývá v rozmezí asi od 0,2 do 1 MPa. Přetlakový způsob bývá často v kombinaci s podtlakovým. Tvarováním se zpracovávají fólie od tloušťky 0,3 mm, výjimečně již od 0,1 mm. [3]

Předností podtlakového tvarování je možnost vyrábět tenkostěnné předměty s velkou plochou. Jednoduché, levné tvarovací formy a málo nákladná tvarovací zařízení umožňují ekonomickou malosériovou výrobu. [3]

3.4.5 Pozitivní tvarování

Pozitivní způsob tvarování umožňuje dosáhnout rovnoměrné tloušťky stěny i při hloubce tažení dané poměrem $H/D = 1$. Základem je tvárník, který svým tvarem

odpovídá výrobku. Fólie se upne do rámu a ohřeje se na tvarovací teplotu (a). Po odsunutí ohřívacího zařízení se forma vtlačí do fólie (b) nebo se rám s fólií přetáhne přes nepohyblivou formu. [3]



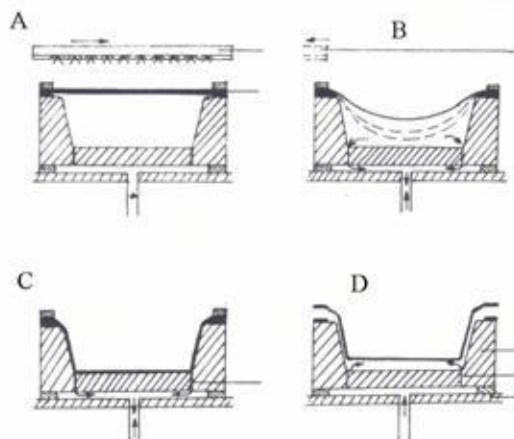
Obr. 7: Princip pozitivního podtlakového tvarování [3]

1 – stůl stroje, 2 – tvárník, 3 - rám stroje, 4 – deska

Fólie se rovnoměrně ztenčuje v místě budoucích bočních stěn výtažku. Konečný tvar získá výtažek po vytvoření vakua mezi fólií a formou (c). U tohoto způsobu tvarování má výtažek nejtlustší dno, což může být výhodné pro zvýšení stability výtažků ve tvaru nádob. [3]

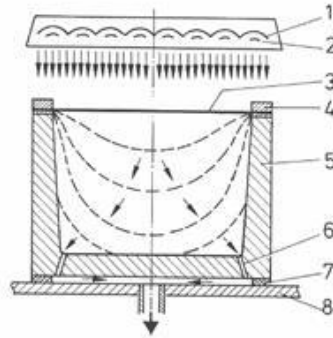
3.4.6 Negativní tvarování

Základem je tvarovací forma s dutinou, která tvarem odpovídá danému výrobku. Fólie se upne do rámu a spojí s formou. Nad fólií se přisune ohřívací zařízení (A) a po dosažení tvarovací teploty, se topení odsune (B) a okamžitě se z dutiny formy odsaje vzduch. Vytvořeným vakuem se plast přitiskne na vnitřní stěnu dutiny formy a přesně okopíruje její tvar (C). Výtažek se ochladí, zruší se vakuum a výrobek se uvolní z formy (D) stlačeným vzduchem, přivedený do formy odsávacími kanálky. [3]



Obr. 8: Princip negativního podtlakového tvarování [3]

Jednoduché negativní tvarování je vhodné jen pro tažení mělkých výtažků, u kterých hloubka H nepřekročí zhruba $0,4$ horního průměru D . Při tažení fólie je ztenčení velmi nerovnoměrně a v tloušťce stěny výtažku jsou velké rozdíly. Ztenčení je tím větší, čím je vyšší poměr H / D . U dna v rozích je stěna nejtenčí. Pro mechanismus ztenčování fólie platí, že tažení se vždy zúčastňuje jen část fólie, která se nedotýká povrchu formy, protože při doteku desky s formou se okamžitě ochladí natolik, že se na dalším tažení již nemůže podílet. Kvalitnější je vnější povrch, který se dotýká formy. [3]

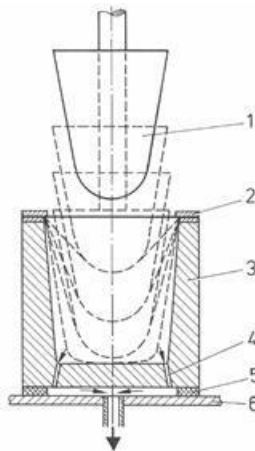


Obr. 9: Proces tvarování [3]

1 – ohřev, 2 – topná spirála, 3 – fólie, 4 – rám stroje, 5 - tvárnice, 6 – odsávací otvory,
7- rozpěrka, 8 – stůl stroje

3.4.7 Mechanické předtvarování

Modifikací jednoduchého negativního tvarování je negativní tvarování s mechanickým předtvarováním. Jedná se o kombinaci způsobu negativního a pozitivního, kdy se fólie po skončení ohřevu nejprve předtvaruje pomocným tvárníkem, který desku vtlačuje směrem do dutiny formy. [3]

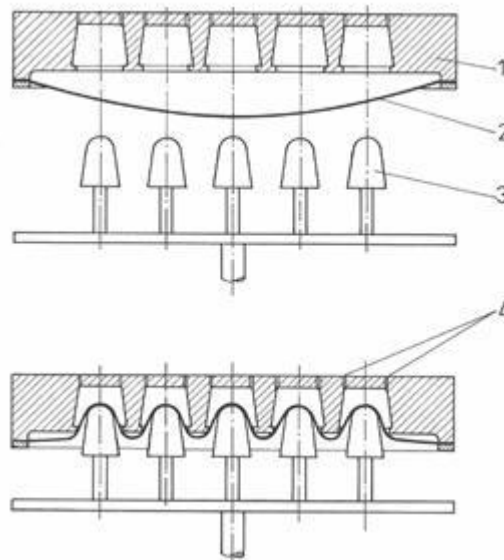


Obr. 10: Princip negativního podtlakového tvarování s mechanickým předtvarováním [3]

1 – tvárník, 2 – rám stroje, 3 – tvárnice, 4 – odsávací otvory, 5 - rozpěrka, 6 – stůl

Když tvárník dosáhne stanovené hloubky, začne odsávání vzduchu. Vytvořeným podtlakem fólie zaujme konečný tvar a výtažek se ve formě ochladí. Tvárník se vyrábí z materiálu se špatnou tepelnou vodivostí, aby plast příliš neochlazoval. Musí to být materiál snášející tvarovací teplotu. Používají se také duté tvárníky, do kterých se vžene teplý vzduch, který vytvoří vzduchový polštář mezi fólií a tvárníkem, zabráňující přímému dotyku desky a tvárníku. [3]

Při zasouvání tvárníku do negativní formy dochází ke zvyšování tlaku vzduchu ve formě. To způsobuje vydouvání volné části fólie vzhůru a její nežádoucí ztenčování. Výhodou je rovnoměrná tloušťka stěny výrobku a možnost použití vícenásobných forem v hromadné výrobě. Nevýhodou je složité a drahé zařízení, které vyžaduje přesné dodržení sledu a doby trvání jednotlivých operací. [3]



Obr. 11: Vícenásobná forma pro negativní tvarování s mechanickým předtvarováním a pohled na tvárník [3]

1 – tvárnice, 2 – deska, 3 – tvárník, 4 – odsávací otvory

3.4.8 Pneumatické předtvarování

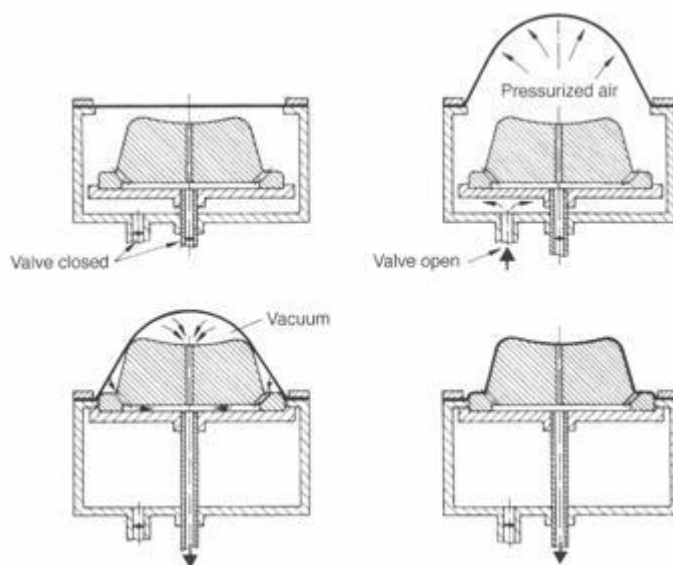
U pozitivního způsobu s pneumatickým předtvarováním je první operací po zahřátí fólie její předtvarování pomocí stlačeného vzduchu. Fólie se vyfoukne do tvaru bubliny po zahřátí na tvarovací teplotu a díky tvarování na vzduchu se ztenčuje rovnoměrně. Stupeň předtvarování se řídí množstvím, tlakem a teplotou vzduchu. Do vytvořené bubliny se zespoda vtláčí pozitivní forma a přesný tvar získá výtažek po aplikaci vakua.

Při tvarování je postup možný několika způsoby:

Ohřátá fólie je předtvarována stlačeným vzduchem a až potom je zdvižena forma. Aby se předtvarovaná fólie neochlazovala, musí být rychlost zvednutí fólie co největší. Když dosáhne forma horní koncové polohy, zapne se vakuum a dochází k vytvarování výlisku. [3]

Nebo se forma zdvihne dříve, než je předtvarování vzduchem ukončeno. Výsledkem toho je, že na vrchní ploše formy se vytvoří malé vzduchové polštáře, které zabraňují dotyku fólie s formou a napomáhají dalšímu předtvarování. [3]

Nebo se předtvarování vzduchem i pohyb formy dějí současně. Takto se vyrábějí výtažky s poměrem $H / D > 2$. Tloušťka stěny je rovnoměrná i v rozích. Nevýhodou je drahé zařízení pracující automaticky tak, aby jednotlivé operace na sebe navazovaly podle předem ověřeného programu. [3]



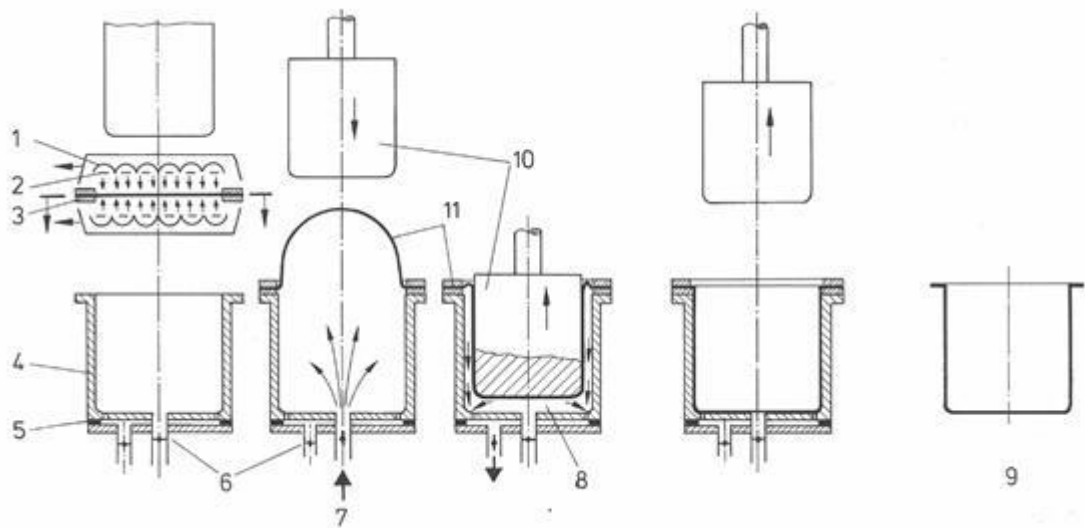
Obr. 12: Princip pozitivního podtlakového tvarování s pneumatickým předtvarováním [3]

3.4.9 Kombinované předtvarování

Dalším způsobem tvarování je tvarování s pneumatickým a mechanickým předtvarováním. Používá se u zvláště hlubokých výtažků s poměrem $H / D > 2$. Forma se vtlačí do předtvarované fólie, následně se uvede do pohybu tvárník a pak je spuštěno vakuum nebo je forma uvedena do pohybu ještě před skončením pneumatického předtvarování a po dosažení konečné pozice formy jsou uvedeny současně v činnost jak tvárník, tak i vakuum nebo jsou současně uvedeny do pohybu forma i tvárník, a při

dosažení konečné pozice je zapnuto vakuum. Zapojením vakua získá výtažek požadovaný tvar. [3]

Tento způsob lze použít i pro výrobu výtažků se zdvojenými stěnami. K tvarování dochází v pozitivně-negativní formě, kde funkčními částmi je vnější povrch tvárníku i vnitřní povrch dutiny. Pohybem vzhůru se forma vtlačí do vyfouknuté fólie, střední část bubliny se přetlačí předtvárníkem do negativní části formy. Zapojením vakua se dokončí tvarování. Je nutná automatizace procesu a regulace teploty plastu, vzduchu, formy a předtvárníku. Podle tvaru výtažku totiž činí konečná tloušťka stěny vzhledem k původní desce jen 20 %. Použitý plast proto musí vykazovat obzvláště vysokou tažnost. Proces tvarování proběhne přibližně ve třech vteřinách. [3]

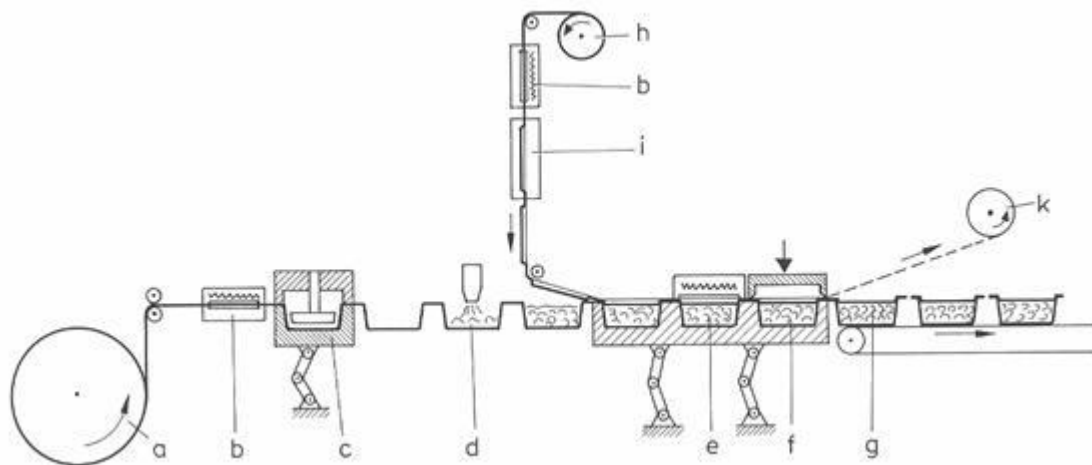


Obr. 13: Princip negativního podtlakového tvarování s pneumatickým a mechanickým předtvarováním [3]

1 – ohřev, 2 – topná spirála, 3 – rám stroje, 4 – tvárnice, 5 - rozpěrka, 6 – odvod vzduchu, 7-
přívod vzduchu, 8 – výška pro dotvarování vakuem, 9 – výtažek, 10 – tvárník pro předtvarování,
11 – fólie

3.4.10 Kontinuální tvarování

Výtažky menších rozměrů, vyrábějících se ve větším množství, se s výhodou vyrábějí kontinuálním tvarováním. Plastová fólie v podobě nekonečného pásu se ze zásobníku odvíjí, předehřívá a přichází do tvarovací formy. Proběhne tvarování (případně potřeby předtvarování), následně proběhne chlazení výtažku proudem vzduchu a poté se výtažek odstříhne od zbytku fólie. Mezitím může být v lince zařazeno plnění a spojování s horní fólií včetně vysekávání. [3]



Obr. 14: Kontinuální tvarování fólií [3]

a - plastová fólie, b - ohřev, c - tvarování, d - plnění, e - uzavírání, f - vysekávání, g - hotový výrobek, h - hliníkové fólie, i - předtvarování s potiskem, k - navíjení zbytku

3.5 Polypropylen

Polypropylen (PP) je jeden z ekonomicky nejdůležitějších termoplastických materiálů. Polypropylen je používán v extrémně široké škále aplikací, ať už průhledný nebo zabarvený pigmenty. Jedná se o semikrystalický termoplast, jehož vlastnosti jsou značně závislé na indexu izotakticity, viz tab. 1. Obchodní produkty polypropyleny obsahují vždy určitý podíl ataktické složky a teplota tání je na rozdíl od čistého izotaktického polypropyleny nižší, ca. $(160 \div 170) ^\circ\text{C}$. Typické vlastnosti komerčního polypropyleny jsou uvedeny v tab. 2. [8, 9, 11]

PP je lineární polymer a je klasifikován jako polyolefin. Charakteristická je methylová skupina ($-\text{CH}_3$). V závislosti na prostorovém uspořádání těchto skupin k hlavnímu uhlíkovému $-\text{C}-\text{C}-$ řetězci rozlišuje se mezi ataktickým PP (aPP) s nepravidelným uspořádáním skupin $-\text{CH}_3$, izotaktickým PP (i-PP) s $-\text{CH}_3$ skupinami na jedné straně uhlíkového řetězce a syndiotaktickým PP (sPP) se střídavým uspořádáním skupin $-\text{CH}_3$. Ataktický polypropylen má velmi nízkou teplotu tání a je prakticky nežádoucím produktem. Vzdávající takticita (pravidelnost $-\text{CH}_3$ uspořádání) vede ke vzrůstu stupně krystalinity, teploty tavení, pevnosti v napětí, pevnosti a tvrdosti. [8, 10]

Tab. 1: Vlastnosti polypropylenu (PP) v závislosti na prostorovém uspořádání substituentů v makromolekule [9]

Polypropylen	Hustota [g/cm ³]	Teplota tání [°C]	Mez Pevnosti [MPa]	Rozpustnost v uhlovodících při 23°C
Izotaktický (čistý)	0,905 – 0,920	176	vysoká	nerozpustný
Syndiotaktický	0,890 – 0,910	135	střední	Středně rozpustný
Ataktický (kašovitý stav)	0,850 – 0,900	nemá	Velmi nízká	Snadno rozpustný

Izotaktický polypropylen je v průmyslu hojně využíván (stupeň krystalinity je až 70%) a je vyráběn v obrovském množství. Výroba syndiotaktického polypropylenu je doposud omezená, ale díky pokroku ve výzkumu metallocenových katalyzátorů se stává možnou. [10, 11]

Tab. 2: Typické vlastnosti polypropylenu (závisí na indexu izotakticity) [9]

Polypropylen	Stupeň krystalinity [%]	Hustota [g/cm ³]	Teplota tání [°C]	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti [MPa]
Izotaktický	60 - 70	0,905 – 0,920	160 - 176	1100 - 1500	34 - 38

Vlastnostmi se polypropylen značně blíží vysokohustotnímu polyethylen. Jde o nepolární plast odolávající polárním rozpouštědlům, kyselinám, zásadám a solím. Tato odolnost je však vyšší než u polyethylenu, zejména pak za vyšších teplot. Jedná se o hořlavý plast. Od vysokohustotního polyethylenu se liší zejména nižší hustotou a menší odolností mrazu (teplota zesklnění je totiž jen cca. -15 °C). Jeho hustota je nejnižší ze všech nelehčených plastů. Má vyšší, tuhost, tvrdost a odolnost proti oděru. Vzhledem k vyšší teplotě tání má lepší tvarovou stálost za zvýšených teplot (dlouhodobě až 100 °C). Lépe odolává vzniku napětíových trhlinek než polyethylen. [9, 11]

Polypropylen neodolává UV záření. Pro venkovní aplikace je potřeba ho stabilizovat. Nestabilizované fólie tloušťky 0,5 mm mají již po měsíční venkovní expozici nulovou mez pevnosti. Přídavek 2,5 % sazí stabilizuje polypropylen pro venkovní použití na dobu 6 let. [9]

Morfologii iPP lze posuzovat na čtyřech rozdílných hierarchických úrovních: makroskopické, sférolitické, lamelární a krystalografické. Na nejmenší krystalografické úrovni se posuzují modifikace stereoizomerie (modifikace α , β a γ smektická fáze iPP).

Na lamelární úrovni se posuzují lamely a svazky lamel, do kterých se seskupují řetězce polymeru částečně krystalických plastů a vedou ke krystalizaci taveniny. Krystalizaci přitom iniciují krystalizační zárodky. Růstem lamel se tvoří nadstruktury (sférolity), které se posuzují na sférolitické úrovni. Na nejvyšší makroskopické úrovni se nakonec posuzují makrostruktury v povrchu a v jádru konstrukčního dílu. [22, 23, 24]

Z polypropylenu se vyrábějí různé předměty spotřebního průmyslu: např. fólie, misky a jiné obalové materiály, vlákna (např. pro koberce), lahve a další duté předměty. Na rozdíl od polyethylenu se vzhledem k jeho lepším mechanickým vlastnostem, příznivé ceně, možnosti kopolymerace, modifikace přísadami nebo jinými polymery, používá na součásti strojů a přístrojů ve strojírenství, k výrobě součástí kuchyňských přístrojů, nárazníků, dílů klimatizačních jednotek v automobilu, pro výrobu trubek a vodních armatur, spoilerů, reflektorů, mřížek chladiče, skříní akumulátorů, vrtulí ventilátorů, na stavbu kanalizačních systémů, nádrží, septiků, malých čističek, ale i bazénů u rodinných domků, přestože pro venkovní aplikace není vhodný. Odolnost vůči sterilizačním teplotám umožňuje také jeho použití k výrobě dílů injekčních stříkaček a jiné zdravotnické techniky (např. systémy dávkování léků, diagnostické kyvety apod.). [9]

3.5.1 Krystalické modifikace polypropylenu

iPP je polymorfní materiál, u kterého se v závislosti na podmínkách krystalizace může vytvořit více krystalických modifikací. U iPP je to modifikace α , β a γ , jakož i smektická fáze. Všechny tyto tvary jsou tvořeny z pravotočivých nebo levotočivých 3_1 šroubovicí s identickou periodou 0,65 nm [22]. Stanovení a změření příslušné modifikace se provádí pomocí WAXS (Wide Angle x-Ray Scattering). [24]

Modifikace α

Elementární mřížka: $a=0,665$ nm, $b=2,096$ nm, $c= 0,65$ nm [25]

Během krystalizace komerčních typů iPP se většinou tvoří termodynamicky stabilní monoklinní modifikace α , která je někdy také provázena modifikací β . Modifikaci α objevil Natta a Carradini. [27]

V závislosti na teplotě tavení se mohou tvořit tři různé typy sférolitů α . Fáze α_I se tvoří při silném podchlazení pod 134 °C a vykazuje pozitivní dvojlom. Fáze α_{II} vzniká při nepatrném podchlazení nebo temperování při vysokých teplotách. Tvoří se při teplotách nad 138 °C a vyznačuje se negativním dvojlomem. Obě fáze vykazují takzvaný typický „maltézský kříž“ pod polarizovaným světlem, což je realizováno uspořádáním lamel ve vzoru „cross-hatch“. Vzor „cross-hatch“ vzniká nárůstem tangenciálních lamel v úhlu 80° na radiální lamelu, která roste paralelně k poloměru sférolitu (homoepitaxie). [27]

V teplotním rozsahu u výše uvedeného se může vytvořit smíšený typ α_m , u kterého nelze pozorovat žádný dvojlom (maltézský kříž). [22, 24]

Modifikace β

Elementární mřížka: $a=1,908$ nm, $b=1,101$ nm a $c=0,65$ nm [24]

Hexagonální modifikace β se vyskytuje značně vzácněji, než modifikace α . Tvoří se pod teplotním gradientem, při vysokém podchlazení nebo v přítomnosti stříhu u určitých typů PP. K tomu náleží zejména PP typy s vysokou molekulovou hmotností nebo s nepatrným podílem etylénových skupin v rámci řetězce PP. [22, 24]

Modifikaci β lze rovněž vytvořit přidavkem nukleačních činidel β . Modifikaci β lze vytvořit dva typy sférolitů: β_{III} (teplota krystalizace <120 °C) a sférolity β_{IV} (teplota krystalizace 128-132 °C). Obě formy lze identifikovat negativním dvojlomem, který je vyjádřen ještě silněji, než u modifikace α . [22, 24]

Za určitých podmínek se přeměňuje modifikace β na modifikaci α . K tomuto přechodu dochází na čele krystalizace sférolitů β , které krystalizovaly mezi $T_{\alpha\beta}=100-110$ °C a $T_{\beta\alpha}=140$ °C a následně byly zahřáty nad $T_{\beta\alpha}$ nebo ochlazeny pod $T_{\alpha\beta}$ (rekrytalizace taveniny). Modifikace β , které nebyly ochlazeny pod $T_{\alpha\beta}$, nejsou citlivé vůči přeměně. Přeměny jsou rozpoznatelné u několika endotermních píků. Modifikace β se rovněž může stát nestabilní během dloužení a transformovat na modifikaci α nebo smektickou formu. [22, 24]

Při transformaci zabraňují krystality α krystalitům β v dalším růstu, což vede k typickým sférolitům β - α . Sférolity α , které vznikly transformací, mají vyšší teplotu tavení než sférolity vzniklé izotermní krystalizací.

Teplota tavení fáze β se pohybuje u 155 °C. [22, 24]

Modifikace γ a smectická fáze

Elementární mřížka: $a=0,650$ nm, $b=2,140$ nm, $c=0,650$ nm. [25]

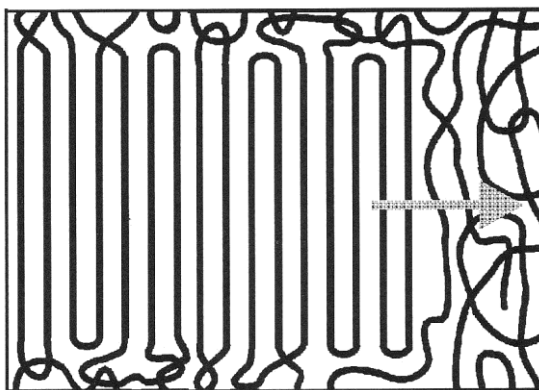
Ortorombická elementární mřížka modifikace γ je tvořena dvojitou vrstvou, kterou opět tvoří dvě rovnoběžné šroubovice 3_1 . Směr os řetězce polymeru je u sousedních dvojitých vrstvách otočen o 81° , což pro polymery představuje jednorázové uspořádání. [23, 24]

Modifikaci γ z iPP lze vytvořit tím, že nastane krystalizace za vysokého tlaku (5000 bar) nebo smyku. Rovněž lze použít speciální druhy iPP s velmi nízkou molekulovou hmotností, které byly vyrobeny pomocí katalyzátorů Metallocen. Za normálních podmínek nemůže dojít k modifikaci γ a proto nemá praktické uplatnění. [23, 24]

Při rychlém ochlazení taveniny PP ve výrobním procesu se u iPP sleduje mezomorfnní nebo smectická fáze [26]. Tato reprezentuje mezistav mezi amorfnním a krystalickým stavem. Smectická fáze se nachází v metastabilním stavu a při teplotách mezi 65 a 120 °C se mění na α -iPP [25]. Vyšetření NMR uvádějí šroubovici 3_1 , která se rovněž vyskytuje u jiných modifikací. [23, 24]

3.5.2 Krystalické struktury

Lamely (pásy o velké krystalinitě) jsou struktury, které vznikají během ochlazení taveniny z částečně krystalických termoplastů. Ve stavu ve formě taveniny existují řetězce molekuly ve tvaru klubek. Během ochlazení se začínají řetězce molekul seskupovat a paralelně se na sebe ukládají. Mezi paralelními úseky řetězce přitom působí van der Waalovy síly. Je-li dostatečně velké podchlazení, rostou krystality ukládáním řetězců polymeru dále ve směru největších teplotních gradientů (viz obr. 15). [24]



Obr. 15: Růst krystalitu v polymerní tavenině, směr růstu označen šipkou [28]

Tloušťka lamely závisí na teplotě a době trvání krystalizace a u iPP činí běžně 10 nm. V závislosti na teplotě krystalizace se více jednotlivých lamel může seskupit do shluků lamel, které v normálním případě vykazují tloušťku 100 nm. Měření lamel se běžně provádí prostřednictvím SAXS (Small Angle x-Ray Scattering). Překročí-li tloušťka svazku lamel 1 μm , je to možné sledovat pod světelným mikroskopem. [23]

Na koncích řetězce nebo obloucích seskupení jsou molekulové řetězce neuspořádané a zůstávají proto v amorfním stavu. Na základě toho nedochází k růstu krystalitu v těchto směrech. [23]

Molekulový řetězec se zapustí do více krystalických lamel. V důsledku toho vznikají "tie" molekuly, které spojují jednotlivé lamely prostřednictvím amorfních oblastí, které se nacházejí mezi lamelami. Počet "tie" molekul se zvyšuje s molekulovou hmotností molekuly [24, 28]. Celková tloušťka bloku lamel se normálně označuje jako dlouhá perioda (součet tlouštěk lamel + vzdálenost mezi dvěma sousedními lamelami). [23]

3.5.3 Dodatečná krystalizace

Pod dodatečnou krystalizací (studená krystalizace) se rozumí zvyšování tloušťky lamel se současným ubýváním amorfní vrstvy. Jev lze sledovat až několik týdnů po zpracování, pokud se teplota polymeru pohybuje nad teplotou zesklivatění. [24]

Zvýšení tloušťky lamel silně závisí na teplotě. Proto lze tento jev sledovat nejlépe po temperování. Dodatečnou krystalizací se zvyšuje hustota a tuhost a snižuje se houževnatost. [24]

Za důvod dodatečné krystalizace lze uvést pomalou krystalizaci těžko krystalizujících komponent nebo zdokonalení již zkrystalizovaných lamel. Jevy dodatečné krystalizace lze sledovat při DSC měření jako exotermní pík během procesu ohřevu. [24]

3.5.4 Krystalické nadstruktury

U krystalizace polymerů z taveniny rostou lamely ze zárodku nukleace radiálně směrem ven a tvoří sférickou (polyedrickou) nadstrukturu, sférolit. Sférolit obsahuje krystalické lamely a amorfní spojovací oblasti v meziprostorech. Sférolity rostou všechny podobnou rychlostí, dokud není růst zastaven sousedním sférolitem. Úzké amorfní oblasti v hraničních plochách mezi sférolity působí jako slabá místa, podobně jako amorfní krycí

vrstvy u krystalitů. Při mechanickém nebo chemickém vlivu tyto oblasti selhávají jako první. U stoupajícího stupně krystalizace dochází k zesílenému smršťování ve sférolitech, což vede k napětím v tahu mezi sférolity. Se stoupající velikostí sférolitu klesá rázová houževnatost, protože tenké amorfnní hraniční vrstvy mezi sférolity nejsou schopné vyrovnat vyskytující se napětí v tahu. Průměry sférolitů se běžně pohybují mezi 0,1 a 1 mm. Sférolity lze prohlížet na snímcích z polarizačního mikroskopu nebo rastrovacího elektronového mikroskopu (REM). U polarizační mikroskopie se provádějí mikrotomové řezy o tloušťce 10 až 15 mm nebo tavenina krystalizuje mezi dvěma sklíčky. U postupu REM jsou vzorky za účelem viditelnosti struktur leptány v roztoku $H_2SO_4/HNO_3/KMnO_4$. [24]

Strukturu PP tvoří většinou krystalická mřížka s velkými sférolity β (rozsah teploty tavení: 147-155 °C) a malými sférolity α (rozsah teploty tavení: 152-162 °C). Sférolity α a β se rozdělují na další podskupiny (viz kapitola 3.5.1).

Výzkumy Aboulfaraj et. al. prokázaly rozdílné chování při deformaci v závislosti na tvaru sférolitu. Sférolity α jsou tak na základě struktury cross-hatch mnohem křehčí, protože tangenciální lamely zabraňují plastické deformaci. Sférolity β se naproti tomu mohou mnohem dále plasticky tvarovat na základě své radiální struktury. [24]

Podmínky extruze a ochlazení, jakož i nukleační činidla a aditivy ovlivňují velikost a počet sférolitů a tím mechanické a optické vlastnosti konstrukčních dílů. Takto se při pomalé rychlosti ochlazování tvoří velké sférolity, protože s nepatrným podchlazením se tvoří jen málo sférolitů a tyto mají více času pro růst. [21, 24]

Při silném podchlazení se naproti tomu tvoří současně více zárodků krystalizace, které v důsledku rychlého poklesu teploty krystalizace mohou tvořit jen malé sférolity. [24]

3.5.5 Nukleační činidla

Krystalizaci PP iniciují zárodky krystalizace, které se vytvořily buď z taveniny (homogenní zárodky) nebo byly do taveniny přidány (heterogenní zárodky). Z krystalizačních zárodků rostou krystalické lamely radiálně směrem ven a tvoří následně sférolity. [24]

V klasické soustavě pro popis krystalizace se tvoří zárodky, pokud fluktuace v podchlazené tavenině překoná energetickou bariéru na povrchu krystalu. Podchlazení

je přitom rozdíl mezi teplotou taveniny a teplotou krystalizace. U iPP se rozlišují čtyři oblasti tvorby zárodku:

- Přímo pod teplotou tavení (165-167 °C) nedochází k nukleaci ani k růstu krystalu, také nukleační činidla nemohou urychlit nukleaci.
- V oblasti mezi 115 a 150 °C vznikají heterogenní zárodky, ze kterých se tvoří normální sférolity. Počet zárodků je omezen.
- Některé heterogenní zárodky se stávají aktivními na základě nepatrné velikosti nebo nedokonalé struktury až při teplotách pod 115 °C. Počet zárodků je v této oblasti rovněž omezen.
- Oblast 85 °C a méně je oblastí homogenní nukleace, přitom s klesající teplotou roste rapidně počet zárodků.

Homogenní zárodky vznikají, pokud dojde k podchlazení polymerní taveniny (pod teplotou tavení a 10-15 °C nad teplotou krystalizace) a určitou dobu je udržováno při konstantní teplotě. Tím se tvoří zárodky, které se při dosažení krystalizační teploty stávají stabilními, tzn., je-li dosaženo kritické velikosti zárodku. Kritická velikost zárodku závisí na povrchové energii a teplotě krystalizace (Gibbsova-Thompsonova rovnice). [24]

$$r_{krit} = \frac{2\gamma}{\Delta G_v} \quad [24] \quad (1)$$

kde γ je povrchové napětí zárodku a ΔG_v je Gibbsova energie

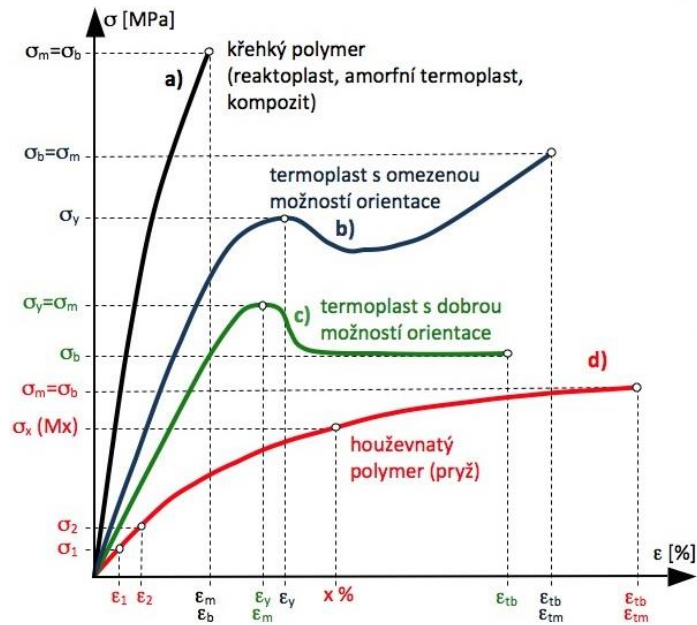
Homogenní zárodky se mohou tvořit při středním ochlazení také z krystalických úlomků z trhlin v povrchu nástroje.

Krystalizaci iPP lze zlepšit přidávkem heterogenních nukleačních činidel. Prostřednictvím heterogenních nukleačních činidel (pevná tělesa, kapaliny nebo plynové bubliny) se snižuje velikost sférolitů, což vede ke zlepšení transparentnosti (Clarifier) a mechanických vlastností, jako je ohybový moment a pevnost v tahu [24].

3.6 Zkouška tahem plastů

Tahové charakteristiky materiálu jsou jeho nejzákladnějšími mechanickými charakteristikami. Jestliže je zkušební těleso vystaveno jednoosému namáhání v tahu, je možné průběh deformace, resp. poměrného prodloužení v závislosti na normálovém napětí sledovat pomocí deformační křivky (viz obr. 16), která poskytuje důležité informace o vlastnostech materiálu. Zkušební těleso je uchyceno do čelistí zkušebního

stroje a na těleso je nasazen průtahoměr. Během zkoušky se zaznamenává závislost působící síly (F), resp. napětí na poměrném prodloužení zkušební vzorku, případně na jmenovitém poměrném prodloužení, určeném z pohybu příčnicku zkušební stroje (používá se u tvárných materiálů). [9]



Obr. 16: Typické deformační křivky plastů

(σ_m - maximální napětí v tahu, σ_y - napětí na mezi kluzu, σ_b - napětí při přetržení, ε_y - poměrné prodloužení na mezi kluzu, ε_m - poměrné prodloužení na mezi pevnosti, ε_b - poměrné prodloužení při přetržení). [9]

Mez pevnosti (σ_m) – je maximální napětí v tahu, které odpovídá největší síle (F_{max}) naměřené v průběhu zkoušky a jeho hodnota je stanovena na základě rovnice (2). [8]

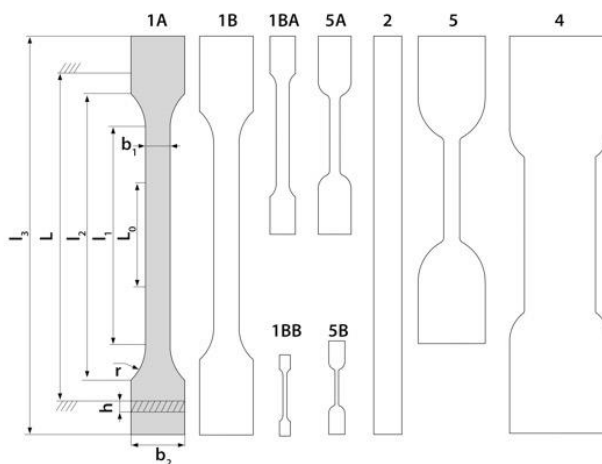
$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{A_0} [MPa] \quad (2)$$

Poměrné prodloužení (ε) – je vztaženo k danému rozměru zkušební tělesa, udává poměr mezi prodloužením (Δl) a původním rozměrem (l_0) a jeho hodnota je stanovena na základě rovnice (3). [9]

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

Tvar a rozměry zkušebních těles jsou přesně definovány normou pro konkrétní materiál. Většinou se však používají tělesa tvaru oboustranných lopatek, takzvaných osmiček, která umožňují dostatečně pevné uchycení vzorku v čelistech, a napětí je přitom

koncentrováno do zúžené části vzorku (viz obr. 17). Pro sledování tahových vlastností kaučuků lze použít také zkušební tělesa ve tvaru kroužků. Pro fólie či desky lze použít pásků. [9]



Obr. 17: Tvary zkušebních těles [9]

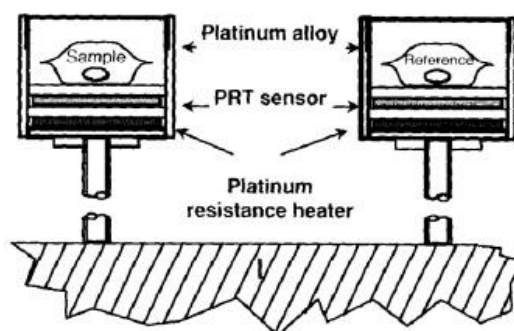
3.7 Diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC)

Diferenční skenovací kalorimetrie je nejpoužívanější metodou termické analýzy. Principem je udržení stejné teploty studovaného a referenčního vzorku, které jsou současně zahřívány pod totožným teplotním programem. [12]

Rozlišují se dva základní typy DSC analyzátorů, a to:

1) DSC s kompenzací příkonu

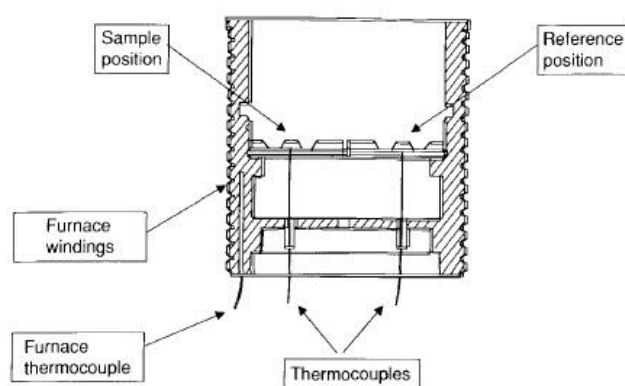
Základem jsou dvě identické kalorimetrické cely, jedna pro vzorek referenční a druhá pro vzorek studovaný. Pokud ve studovaném vzorku neprobíhá žádný děj, tak jsou oba vzorky zahřívány stejnou rychlostí podle zadaného teplotního programu. Pokud ve studovaném vzorku proběhne děj endotermického charakteru, začne jeho teplota zaostávat za teplotním programem (resp. za teplotou referenčního vzorku) a v takovém okamžiku do studovaného vzorku je zvýšen přísun energie a tím je jeho teplota navyšována na úroveň teploty referenčního vzorku. V případě, že probíhá děj exotermický, je teplota studovaného vzorku vyšší ve srovnání s referenčním vzorkem, a pak je do studovaného vzorku dodáváno méně energie, aby došlo k vyrovnání jejich teplot. Kompenzace příkonu vede k zachování stejné teploty obou vzorků. Toto uspořádání umožňuje jak velmi citlivé, tak i velmi rychlé změny teploty a v neposlední řadě je vhodné pro provedení izotermických dějů. [13, 14, 15]



Obr. 18: Schéma diferenčního skenovacího kalorimetru s kompenzací příkonu [14]

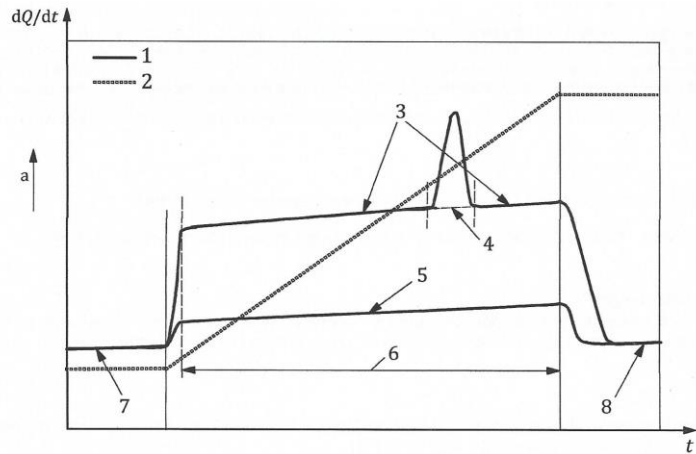
2) DSC s tepelným tokem

Studovaný i referenční vzorek jsou umístěny na samostatných teplotních čidlech ve stejné kalorimetrické cele a jsou spojené tepelným mostem. Při změnách teploty ve studovaném vzorku způsobených exotermickými nebo endotermickými ději, které zapříčiní rozdíl teploty mezi oběma vzorky, je tento rozdíl teplot přístrojem zaznamenán jako tepelný tok mezi nimi a je převeden na energetický ekvivalent, takže výstup z obou typů analyzátorů je analogický a vzájemně porovnatelný. [14, 15]



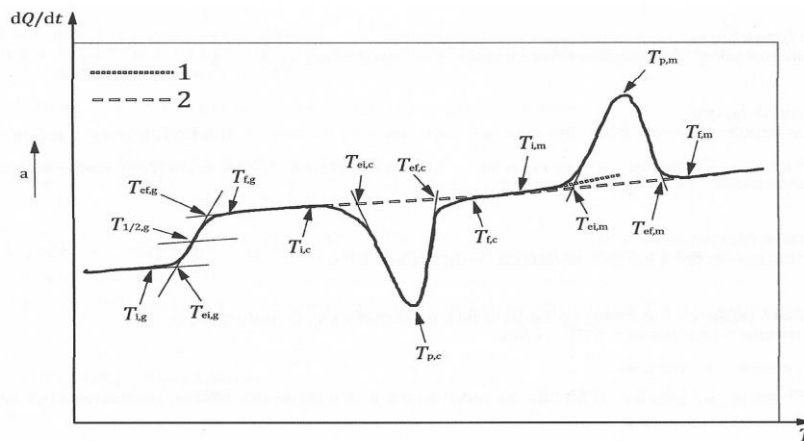
Obr. 19: Schéma diferenčního skenovacího kalorimetru s tepelným tokem [14]

Výstupem DSC je množství energie, které se musí do systému dostat dodat, ať už je to studovaný nebo referenční vzorek. Graficky je to zaznamenáno ve formě DSC-křivky, kde se proti sobě vynáší energie [$\text{mW} = \text{mJ/s}$] v závislosti na teplotě (příp. na čase). Jestli exotermické děje směřují nad základní linii do kladných hodnot nebo pod základní linii k hodnotám záporným záleží na experimentátorovi. Platí však, že by zvolený směr měl být u DSC-křivky. Za charakteristické teploty jednotlivých dějů provázených na DSC-křivce exoefekty a endoefekty opět považujeme extrapolované počátky jednotlivých píků. [14, 15]



- Legenda**
- | | | | |
|-------|----------------------------------|---|-------------------------------------|
| dQ/dt | tepelný tok | 4 | virtuální základní čára |
| T | teplota | 5 | základní čára přístroje |
| t | čas | 6 | kvazistacionární rozpětí |
| 1 | dQ/dt v závislosti na t (nebo T) | 7 | izotermická počáteční základní čára |
| 2 | T v závislosti na t | 8 | izotermická konečná základní čára |
| 3 | základní čáry zkušebního vzorku | a | Endotermický směr |

Obr. 20: Schématické znázornění základních čar [16]



- Legenda**
- | | | | |
|-------|-----------------------|---|-----------------------------|
| dQ/dt | tepelný tok | 1 | extrapolovaná základní čára |
| T | teplota (nebo t, čas) | 2 | interpolovaná základní čára |

Charakteristické teploty

První dolní index nebo dvojice dolních indexů označuje polohu na DSC křivce vzhledem ke skoku nebo k píku:

- | | | |
|--|-----------|--|
| – počáteční teplota | T_i | první pozorovatelné odchýlení křivky od extrapolované počáteční základní čáry; |
| – interpolovaná nebo extrapolovaná počáteční teplota | T_{oi} | (u píku) průsečík interpolované virtuální základní čáry a tečny naryšované v inflexním bodě na levé straně píku nebo (u skoku) průsečík extrapolované počáteční základní čáry a tečny naryšované v inflexním bodě skoku; |
| – teplota uprostřed | $T_{1/2}$ | polovina výšky skoku; |
| – teplota píku | T_p | největší vzdálenost mezi křivkou a virtuální základní čarou píku; |
| – interpolovaná nebo extrapolovaná konečná teplota | T_{ef} | (u píku) průsečík interpolované virtuální základní čáry a tečny naryšované v inflexním bodě na pravé straně píku nebo (u skoku) průsečík extrapolované konečné základní čáry a tečny naryšované v inflexním bodě skoku; |
| – konečná teplota | T_f | poslední pozorovatelné odchýlení křivky od extrapolované konečné základní čáry; |

Druhý dolní index označuje druh přechodu:

- g skelný přechod
- c krystalizace
- m tání
- a Endotermický směr.

Obr. 21: Typická DSC křivka (schématická) [16]

3.8 Stanovení hmotnostního a objemového indexu toku taveniny termoplastů

Index toku taveniny udává množství taveniny v gramech (MFR) nebo v cm^3 (MVR), které proteče tryskou vytlačovacího plastometru za deset minut při předepsaných podmínkách zkoušky (teplotě a zatížení). [17, 19]

MFR [g/cm^3] melt mass-flow rate

MVR [$\text{cm}^3/10 \text{ min}$] melt volume-flow rate

Jedná se o technologickou zkoušku vhodnou k posuzování vhodnosti použití daného materiálu k výrobě dílce daného konstrukčního řešení. Objemový index toku taveniny je obecně vhodný pro porovnání plněných a nenaplněných termoplastů. Tuto metodu nelze použít pro termoplasty, jejichž reologické chování ovlivňují jevy jako je hydrolyza (rozklad sloučenin vodou), kondenzace nebo síťování. [17, 19]

MFR a MVR závisí na smykové rychlosti. Smykové rychlosti jsou při této zkoušce mnohem nižší než při běžných výrobních podmínkách. Hodnoty získané touto metodou pro různé termoplasty proto ne vždy korespondují s chováním těchto materiálů během jejich skutečného používání. Obě metody se používají při kontrole kvality. [17, 20]

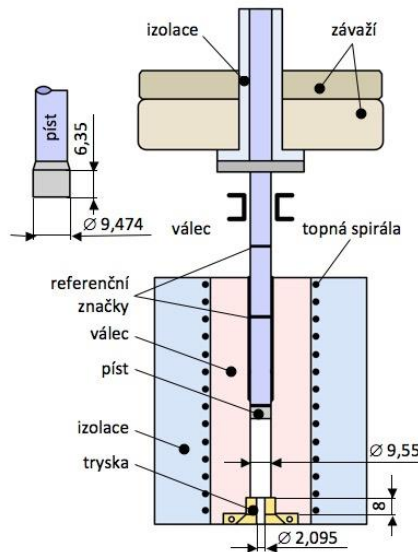
Zařízení

Válec upevněný ve svislé poloze, z materiálu odolného proti otěru a korozi za vyšších teplot. Materiál musí být inertní vůči zkoušenému materiálu. Délka válce je 115-180 mm, vnitřní průměr $9,550 \pm 0,007$ mm. Základna válce je tepelně izolovaná. [20]

Ocelový píst pracovní délka je rovná alespoň délce válce. Hlava pístu má velice přesný rozměr (viz norma), průměr pístu je $9,474 \pm 0,007$ mm. Na horní části pístu je tyč, která podrží snímatelné závaží. Píst musí být od závaží tepelně izolován. V délce pístu jsou vyznačeny dvě tenké kruhové referenční značky ve vzdálenosti 30 mm. [20]

Tryska vyrobená z karbidu wolframu nebo tvrzené oceli, o délce $8,000 \pm 0,025$ mm, nejčastěji o nominálním průměru $2,095 \pm 0,005$ mm (dle druhu polymeru). [20]

Závaží sada závaží, které lze seřadit tak, aby součet hmotností závaží a pístu dal zvolené nominální zatížení.



Obr. 22: Schéma výtlačného plastometru [9]

Metoda A

Před započítáním série zkoušek se válec zahřeje na zvolenou teplotu, na které setrvá alespoň 15 minut. Poté se válec naplní materiálem, dle předpokládané hodnoty indexu toku taveniny (3g – 8g vzorku). Plnění válce, během něhož se vzorek materiálu stlačuje ručně pěchovací tyčkou, by nemělo trvat déle než 1 minutu, aby se, pokud možno zabránilo přítomnosti vzduchu u materiálu, který je náchylný k degradaci vlivem oxidace. Zatížený nebo nezatížený píst, podle indexu toku taveniny materiálu se spustí do válce. V časových intervalech (podle hodnoty MFR) zvolených tak, aby délka odřezku byla alespoň 10 mm (lépe 10-20 mm), shromažďujeme jednotlivé odřezky. Všechny odřezky obsahující viditelné vzduchové bubliny je nutno vyřadit. Po ochlazení se zbylé odřezky zváží (musí být minimálně tři) s přesností na 1 mg a vypočte se průměrná hodnota hmotnosti odřezků. V případě, že se rozdíl mezi maximální a minimální hmotností liší od průměru více jak o 15%, tak se výsledek vyřadí a zkouška se opakuje z nové části vzorku. [17, 19, 20]

Hmotnostní index toku taveniny (MFR) [g/10min] je dán rovnicí:

$$MFR(T, m_{nom}) = \frac{600 \cdot m}{t} \quad (4)$$

Objemový index toku taveniny (MVR) lze vypočítat z hmotnostního indexu taveniny (MFR) pomocí rovnice:

$$MVR(T, m_{nom}) = \frac{MFR(t, m_{nom})}{\rho} \quad (5)$$

Metoda B

Podstatou této metody je stanovení jak hmotnostního (MFR), tak objemového (MVR) indexu toku taveniny, a to jedním z následujících postupů:

- a) Měřením vzdáleností, po které se píst pohybuje stanovený čas
- b) Měřením času, po který se píst pohybuje na stanovenou vzdálenost

Pro dosažení opakovatelného stanovení MFR v rozsahu 0,1-50 g/10min nebo MVR v rozsahu 0,1-50 cm³/10min je nutné měřit pohyb pístu s přesností ±0,1 mm a čas s přesností na 0,1s. [17]

Objemový index toku taveniny (MVR) [cm³/10min] je dán rovnicí:

$$MVR(T, m_{nom}) = \frac{A \cdot 600 \cdot l}{t} = \frac{427 \cdot l}{t} \quad (6)$$

Hmotnostní index toku taveniny (MFR) [g/10min] je dán rovnicí:

$$MFR(T, m_{nom}) = \frac{S \cdot 600 \cdot l \cdot \rho}{t} = \frac{427 \cdot l \cdot \rho}{t} \quad (7)$$

Poměr indexů toku (FRR) mezi dvěma hodnotami MFR nebo MVR stanovenými na zkoušeném materiálu při stejné zkušební teplotě, ale při různých zatíženích:

$$FRR = \frac{MFR(T, m_{0nom})}{MFR(T, m_{1nom})} \quad (8)$$

Obecně tento poměr ukazuje vliv distribuce molekulových hmotností materiálu na jeho reologické chování.

4 Experimentální část

4.1 Cíle experimentu

Cílem práce je zhodnotit vliv vstupního materiálu (granulátu a recyklátu) na výslednou kvalitu výrobku (kelímku). Hodnocení zkoušek mezi kelímkem, který je z pohledu kvality bezproblémový (označení OK) a kelímkem, který vykazuje vysokou křehkosti (označení NOK).

Dále pak zjištění, jaký má vliv vícenásobná extruze, složená ze 4 cyklů, na výslednou kvalitu kelímku. Vyhodnocení na základě získaných informací z mechanických zkoušek (tahová zkouška, pád kuličky), DSC testu a indexu toku taveniny.

Z firmy GPI Louka u Litvínova byly vybrány dva tvarově podobné kelímky, artikl 11 326 (OK) a artikl 11 064 (NOK), lišící se pouze v drobných designových prvcích, přičemž artikl 11 064 vykazuje větší praskavost. V průběhu experimentu se budou porovnávat jejich mechanické vlastnosti.

Dále byly vyrobeny vzorky (artikl 1414), které prošly čtyřmi cykly vícenásobné extruze. Vícenásobná extruze spočívá v opakovaném procesu zahřívání, chladnutí a drcení materiálu Mosten FT005.

4.2 Experimentální materiál

Pro experiment byl vybrán materiál Mosten FT005, který dodává společnost Unipetrol. MOSTEN FT 005 je homopolymer se střední distribucí molekulových hmotností a obsahem antistatického a nukleačního činidla s optickým zjasňovačem. Typ je určen pro výrobu fólií s antistatickou úpravou pro následný termoforming vysoce transparentních obalů s požadavkem na vynikající optické vlastnosti. Typickou aplikací je výroba obalů především pro potravinářský průmysl, jako jsou jogurtové kelímky, obaly tuku, jednorázové nápojové kelímky apod. [18]

Vzhledové vlastnosti

PP Mosten neobsahuje žádné mechanické nečistoty. Je dodáván v podobě přírodního granulátu. Typické rozmezí sypané hmotnosti PP Mosten je $(450 - 600)\text{kg/m}^3$. [18]

Teplotní vlastnosti

PP Mosten se vyznačuje dobrými tepelně-izolačními vlastnostmi. Oblast teplot tání krystalického podílu homopolymerů je (160-168) °C, kopolymerů (125-168) °C. Teplota skelného přechodu T_g homopolymerů je cca -10 °C. Se snižující se teplotou klesá houževnatost materiálu a pod teplotou -20 °C je materiál již značně křehký. V oblasti záporných teplot je vhodnější použít kopolymery, které mají obecně teplotu skelného přechodu T_g posunutou k výrazně nižším hodnotám než homopolymery. V oblasti vysokých teplot lze PP Mosten používat trvale do 100 °C, tepelně stabilizované typy do 105 °C. Stupeň tepelné stability všech typů PP Mosten je takový, že při obvyklém způsobu zpracování nedochází k významné degradaci materiálu. [18]

Fyzikálně-chemické vlastnosti

PP Mosten je díky svému nepolárnímu charakteru v širokém rozsahu teplot a koncentrací chemicky velmi stálý vůči roztokům anorganických solí, kyselin a zásad. Neodolává pouze oxidačním činidlům (např. koncentrovaná kyselina dusičná, oleum, halogeny), v halogenovaných aromatických uhlovodících a v některých rozpouštědlech za zvýšených teplot bobtná. Navlhavost a nasákavost PP Mosten je velmi malá (0,2 %). Sorpce vody se týká pouze povrchu materiálu, je ho proto použít v prostředí s proměnnou relativní vlhkostí, aniž by docházelo k rozměrovým změnám výrobků či změnám mechanických vlastností. [18]

Při zpracování PP Mosten může působit obtíže vlhkost, zkondenzovaná při přenosu materiálu z prostředí chladnějšího do prostředí teplejšího. Při teplotách skladování nižších než 20 °C se doporučuje kondicionovat materiál min. 24 h před vlastním zpracováním ve výrobní hale. [18]

Tab. 3: Materiálové vlastnosti polymeru podle materiálového listu výrobce [18]

MOSTEN FT005		
Parametr	Jednotka	Hodnota
Index toku taveniny (230°C/2,16kg)	g/10 min	5
Výrobní smrštění podélné	%	2,0
Výrobní smrštění napříč	%	1,7
Modul pružnosti v ohybu	MPa	1850
Modul pružnosti v tahu	MPa	1700
Napětí na mezi kluzu	MPa	37
Prodloužení na mezi kluzu	%	9
Celková tažnost	%	100
Vrubová houževnatost Charpy 23°C	kJ/m ²	3,5
Teplot tání (DSC)	°C	168 - 172
Teplota měknutí dle Vicata (VST)	°C	156
HDT (1,8 MPa)	°C	57
Tvrдость Shore D	/	68

4.3 Výrobní cyklus kelímku

Výrobní proces kelímků začíná ve formě granulátu, který je možno skladovat v silech či v pytlech. Formou vakuového potrubí je granulát dopravován do mísících zařízení (MOTAN), kde se mísí různé materiály v určitých procentuálních složení.

Promíchaný surový materiál je následně dopravován do násypky nad extruzní linkou a dále z násypky je materiál dopravován šnekem.

Při hnětení se materiál zahřívá (elektricky vytápěnou stěnou pracovního válce) a stává se z něj tavenina, tavenina je protlačována přes síta k čerpadlu taveniny, čerpadlo tlačí taveninu a pomáhá odstraňovat negativní vlivy během vytlačovacího procesu jako jsou materiálové vlny, následně tlačí taveninu přes statický mísič a přes trysku taveniny (dýzu) kde tavenina dostává potřebný tvar.

Dále vede „hrubá fólie“ přes temperovací (chladicí) zařízení, kde je odlazena na potřebnou kvalitu (správná tloušťka, kvalita fólie a teplota). Poté fólie pokračuje do tvarovacího zařízení, kde je v krocích dopravována ozubeným řetězovým vedením přes

topení (topná tělesa), fólie se zahřívá na tvarovatelnou teplotu v rozmezí 135-146°C, po dosažení potřebné teploty se dostává do tvarovací části (mezi tvarovací formy), kde při jejich zavření začíná tvarovací proces.

Dojde k sevření fólie a nástřihu, začne působit membrána, která ochlazuje lem a dojde k jeho vytvarování. Tvarovací nástroj sjede na předem nastavenou hodnotu a vytvoří základní tvar kelímku. Podle tvaru nástroje docílíme správného rozvrstvení. Se začínajícím pohybem tvarovacího nástroje, se spustí vakuum formy, které odvádí vzduch z prostoru tvarovací vložky a vypomáhá k finálnímu vytvarování kelímků. Tvarovací vzduch stlačí fólii na stěnu tvarovací vložky a dojde ke schlazení. Ke schlazení fólie dochází tehdy, když dojde ke kontaktu fólie s tvarovací vložkou. Po dobu působení tvarovacího vzduchu dochází k přímému chlazení produktu. Poté přestává působit tvarovací vzduch, membrána a tvarovací nástroje se vrací do původní polohy. Následuje vystřížení kelímku a jeho vyhození ze stroje.

4.4 Nastavení stroje a teplot vícenásobné extruze

U prvního cyklu jako vstupní materiál byl použit 100 % granulátu Mosten FT005 a 2,5 % barviva Polich white 170Q. Teplota kalandrovacích válců byla nastavena na 75/75/70°C (horní/prostřední/spodní). Vstupní materiál pro druhý cyklus byl ze 100% drtě z prvního cyklu, nebyly provedeny žádné úpravy nastavení stroje ani teplot. Vstupní materiál pro třetí cyklus sestával ze 100% drtě druhého cyklu. Během třetího cyklu se zvýšila teplota fólie u kalandrovacích válců, pro dosažení kvality byly ubrány teploty na hlavním topení o 10°C. Vstupní materiál čtvrtého cyklu byl ze 100 % drtě třetího cyklu, teplota fólie se již nezměnila, nebyly pozorovány ani jiné odchylky teplot.

TEST-DRTE-CYKLUS 2		thermo runner 5					
Ma být		Ma být	je				
Horní podélné topení - zóna 1	363	Přicné topení - zóna 1	318				
Spodní podélné topení - zóna 1	402	Přicné topení - zóna 2	318				
Horní podélné topení - zóna 2	358	Přicné topení - zóna 3	318				
Spodní podélné topení - zóna 2	387	Přicné topení - zóna 4	318				
Horní podélné topení - zóna 3	323	Přicné topení - zóna 5	318				
Spodní podélné topení - zóna 3	330	Přicné topení - zóna 6	318				
Horní podélné topení - zóna 4	318	Horní predehrev	325	325			
Spodní podélné topení - zóna 4	327	Spodní predehrev	325	325			
Horní podélné topení - zóna 5	318	Chlazení horní formy	18	22,7	l		
Spodní podélné topení - zóna 5	322	Chlazení spodní formy	18	25,8	l		
Horní podélné topení - zóna 6	303	Chlazení vyhazováku	18	14,3	l		
Spodní podélné topení - zóna 6	322	Chlazení membrány	18	14,6	l		
Horní podélné topení - zóna 7	293	Stemply	390	55			
Spodní podélné topení - zóna 7	332	Stemply	90	%	90	%	
Horní podélné topení - zóna 8	278	hloubka	88	mm			
Spodní podélné topení - zóna 8	327	Tvarovací vzduch	8	bar	2	75 mm	
Horní podélné topení - zóna 9	293	Membrána	8	bar	395	95	
Spodní podélné topení - zóna 9	332	Vakuum formy	0		140		
Horní podélné topení - zóna 10	303	Vyhazovák vpřed	70	%	188	248	
Spodní podélné topení - zóna 10	332	Vyhazovák - Vakuum	0		160	0	
Horní podélné topení - zóna 11	303	Dvojitý vyhazovák	188		271		
Spodní podélné topení - zóna 11	337	Posuv fólie	180		350		
Horní podélné topení - zóna 12	313	Posuv fólie délka posuvu			290		
Spodní podélné topení - zóna 12	332	Posuv fólie rychlost			30		
Horní podélné topení - zóna 13	323	Hlavní pohon :	1	2	3	4	5
Spodní podélné topení - zóna 13	332	Rychlost	23	70	70	65	65
Horní podélné topení - zóna 14	379	Pozice změny rychlosti	80	200	272	350	385
Spodní podélné topení - zóna 14	378	Takty při najždění			15		
Horní podélné topení - zóna 15	383	Start pneum. Roztazení			7		
Spodní podélné topení - zóna 15	413	Čas ohřevu fólie			1,6		
		Poslední počet taktu			29,4		

Obr. 23: Nastavení linky pro vícenásobnou extruzi

Špatné nastavení linky vede k velké praskavosti kelímků. Křehkost kelímků může ovlivnit nízká teplota fólie a současně vysoká teplota fólie před tvarováním (vysoké teploty na hlavním topení), což způsobí přepálení fólie. Dále špatný tvar tvarovacího nástroje, kdy příliš úzký tvarovací nástroj natáhne méně materiálu do dna kelímku. Špatná kompozice materiálu nebo vada fólie.

4.5 Index toku taveniny

Stanovení objemového indexu toku taveniny bylo měřeno v souladu s normou ČSN EN ISO 1133.

Specifikace

Testovaný materiál: Polypropylen

Testovací zařízení: Plastometr M 201

- Podmínky měření:
- teplota: 230°C
 - zátěž: 2,16kg
 - doba temperace: 5 min
 - průměr trysky: 2,095±0,0005 mm

Počet měření: čtyři pro jeden materiál

Tab. 4: Výsledky měření objemového indexu toku taveniny

Vzorek	MVR [cm ³ /10 min]
Granulát	7,6±0,8
1. cyklus	9,9±1,1
2. cyklus	14,0±1,1
3. cyklus	9,1±0,8
4. cyklus	12,5±1,6

Mezi hodnotami indexu toku není výrazný rozdíl, nejmenší index toku vykazuje granulát. To může být způsobeno nepřítomností barviva, na rozdíl od všech cyklů, které barvivo obsahují.

4.6 Hustota

Měření hustoty podléhá normě ČSN EN ISO 1183-3. Hustota byla naměřena na hustoměru Electronic Densimeter SD-200L. Vzorky pro měření hustoty byly odebrány ze dna kelímků.

Tab. 5: Naměřené hodnoty hustot kelímků

Vzorek	Hustota [g/cm ³]
OK	0,9232
NOK	0,9225
1. cyklus	0,9412
2. cyklus	0,9273
3. cyklus	0,9264
4. cyklus	0,9310

Hustotu ovlivňuje především takticita a stupeň krystalinity. Čím je takticita a stupeň krystalinity vyšší, tím je vyšší i hustota a dochází i ke zvýšení pevnosti a tvrdosti. Nejvyšší hustota byla naměřena u kelímku z prvního cyklu, naopak nejnižší hodnota u NOK kelímku.

4.7 DSC

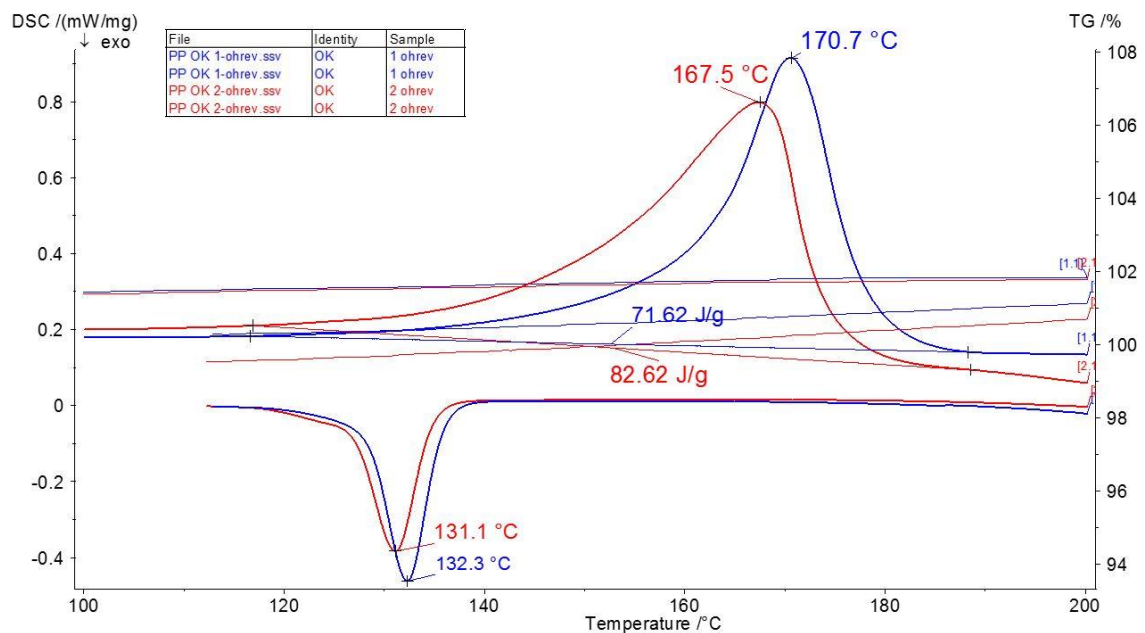
Měření DSC byla provedena na přístroji STA 409 PG firmy NETZSCH. Termogramy DSC byly vyhodnoceny pomocí softwaru Proteus firmy NETZSCH.

Pro stanovení stavu krystalinity a vrcholové teploty kelímků byl použit první i druhý ohřev. Vzorčky pro vícenásobnou extruzi byly odebrány z drtě kelímku a vzorky OK a NOK kelímku byly odebrány z lemu kelímku. Množství navážky vzorků kelímku získaných z drtě nebo vyseknutím z lemu se pohybovalo mezi 15,8 a 24 mg, což je podle normy ČSN EN ISO 11357-1 dostačující k vyšetření postupů tavení a krystalizace.

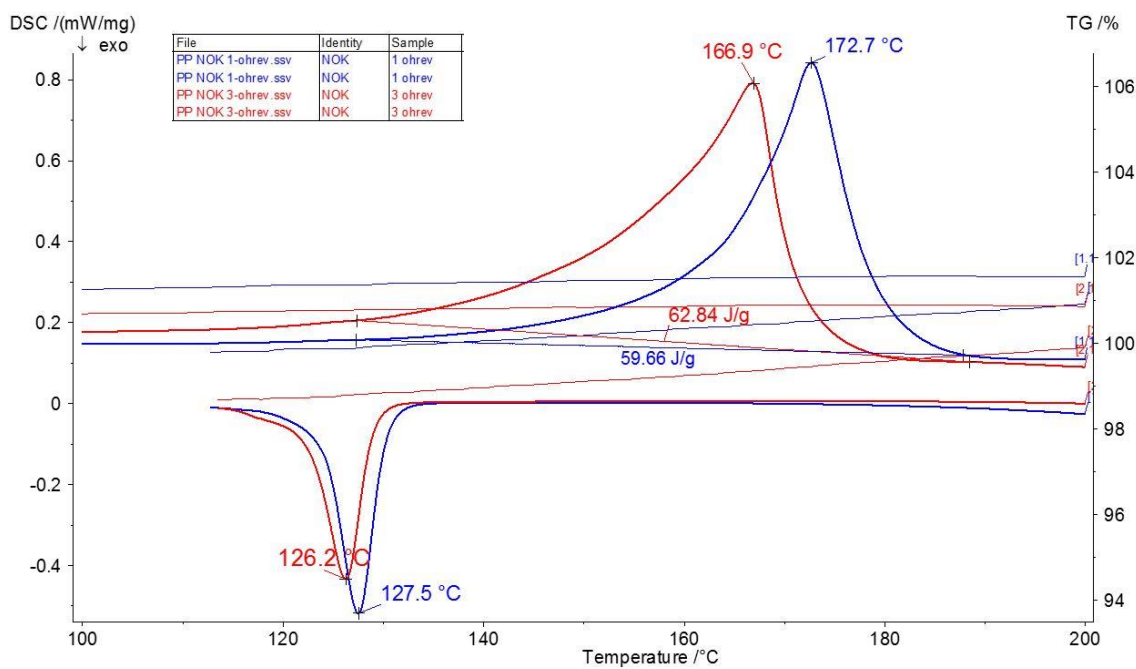
Pro teplotní program byla zvolena rychlost ohřevu 10 K/min a rychlost ochlazování 5 K/min. Měření byla provedena v teplotním rozsahu mezi 25 až 220 °C.

Vyhodnocení entalpie tavení a krystalizace bylo provedeno lineární základní křivkou.

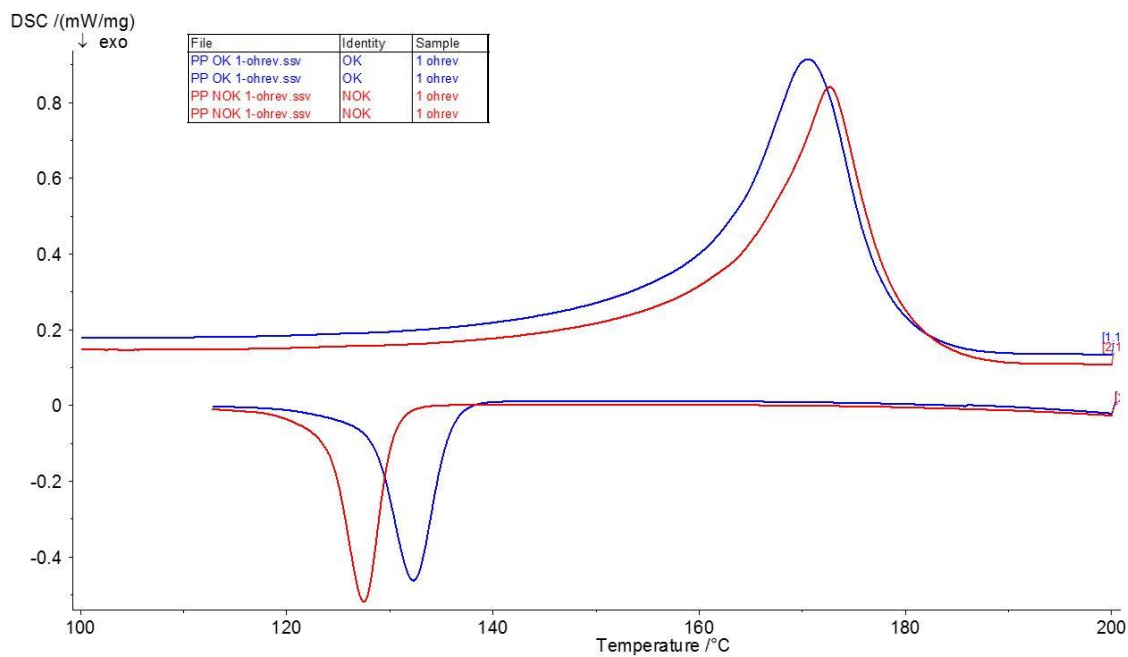
OK a NOK kelímky



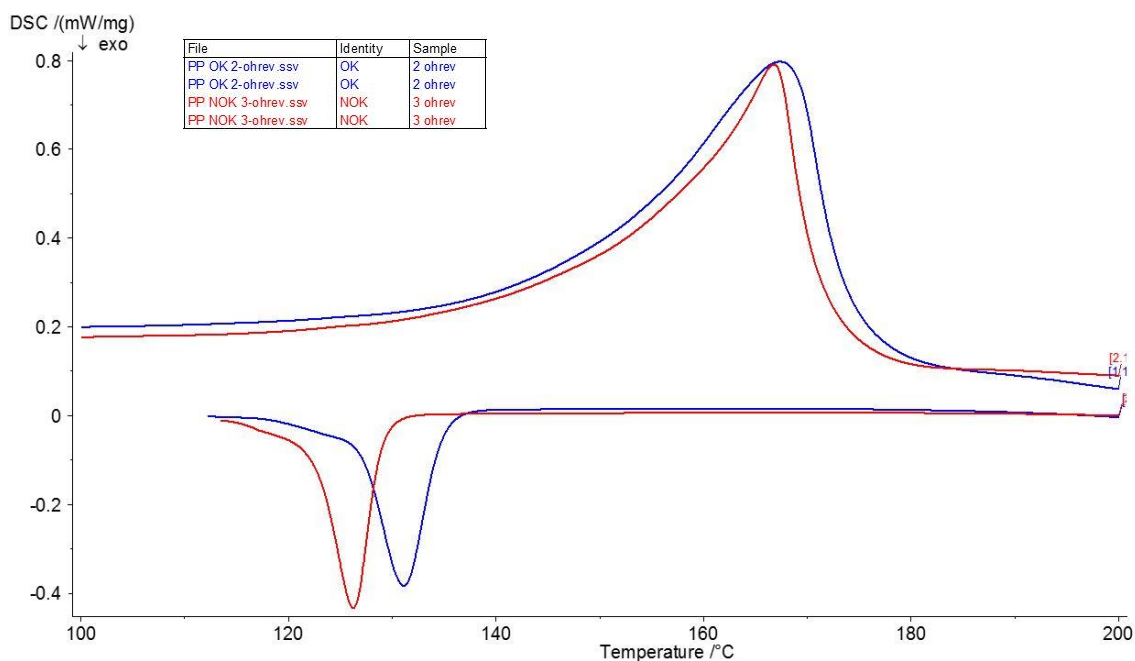
Obr. 24: Termogram DSC vzorek OK, první i druhý ohřev



Obr. 25: Termogram DSC vzorek NOK, první i druhý ohřev



Obr. 26: Termogram DSC vzorků OK a NOK, porovnání prvních ohřevů



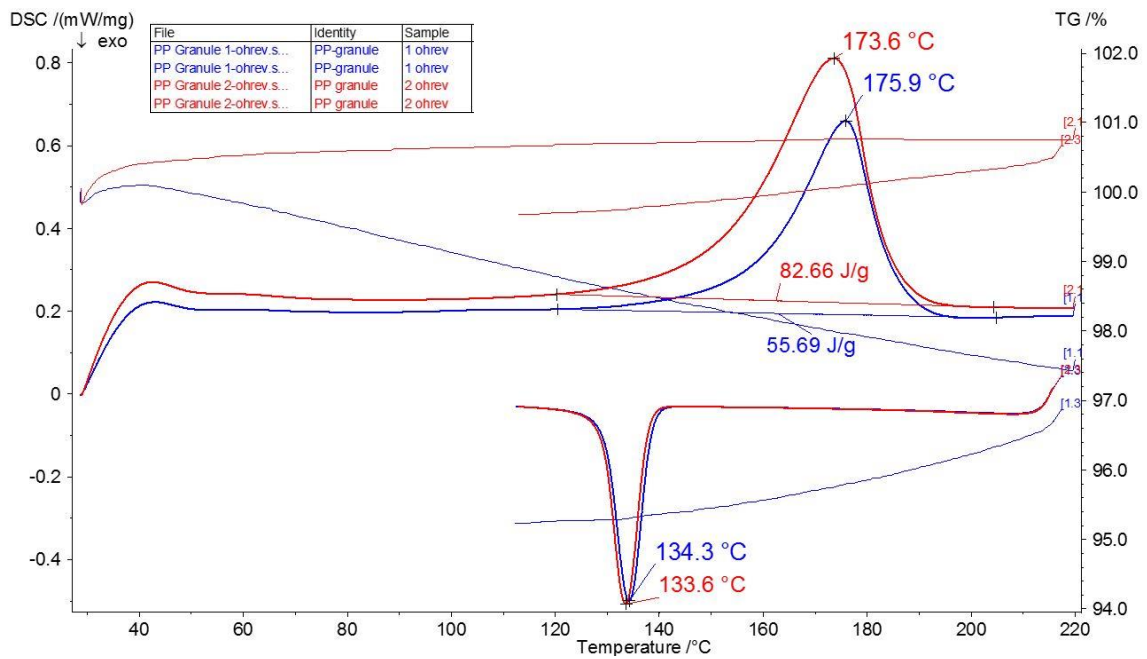
Obr. 27: Termogram DSC vzorků OK a NOK, porovnání druhých ohřevů

Tab. 6: Souhrn výsledků měření DSC OK a NOK kelímku (T_{pm} : teplota tavení píku, T_{pc} : teplota krystalizace píku, ΔH : entalpie tavení)

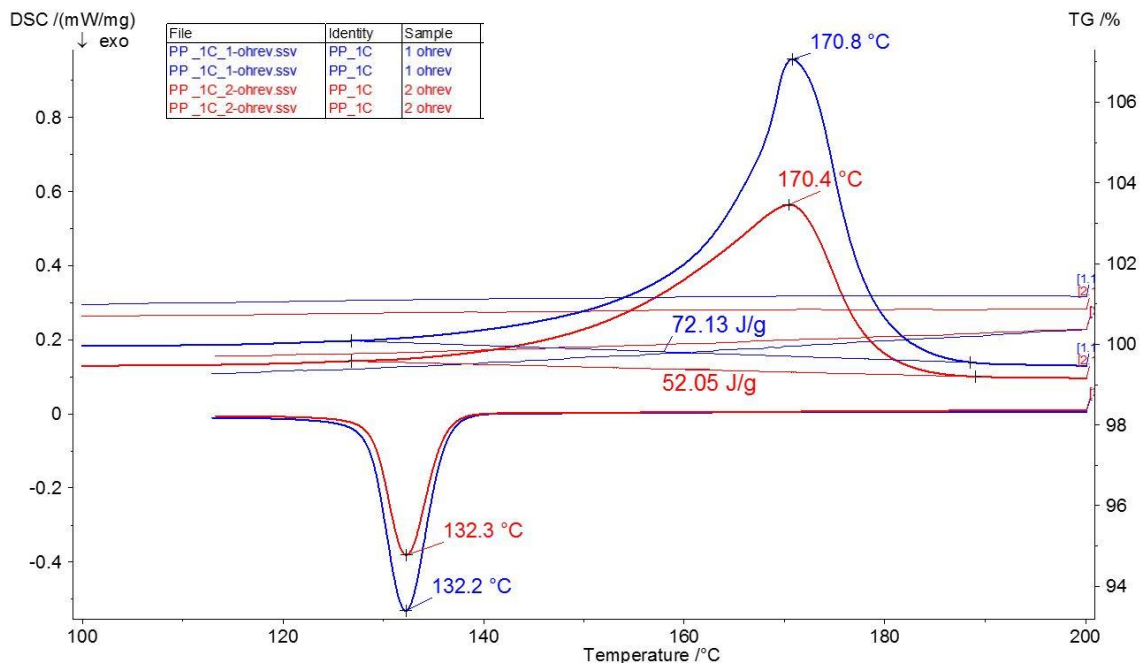
Vzorek	1. Ohřev			2. Ohřev		
	T_{pm1} [°C]	T_{pc1} [°C]	ΔH_1 [J/g]	T_{pm2} [°C]	T_{pc2} [°C]	ΔH_2 [J/g]
OK	170,7	132,3	71,62	167,5	131,1	82,62
NOK	172,7	127,5	59,66	166,9	126,2	62,84

Na základě termogramů DSC bylo zjištěno, že teploty tání T_{pm} OK i NOK kelímku prvního a druhého ohřevu jsou téměř totožné. Rozdíl se však ukazuje v teplotách krystalizace T_{pc} OK a NOK kelímeků, kdy NOK kelímky vykazují nižší teplotu krystalizace.

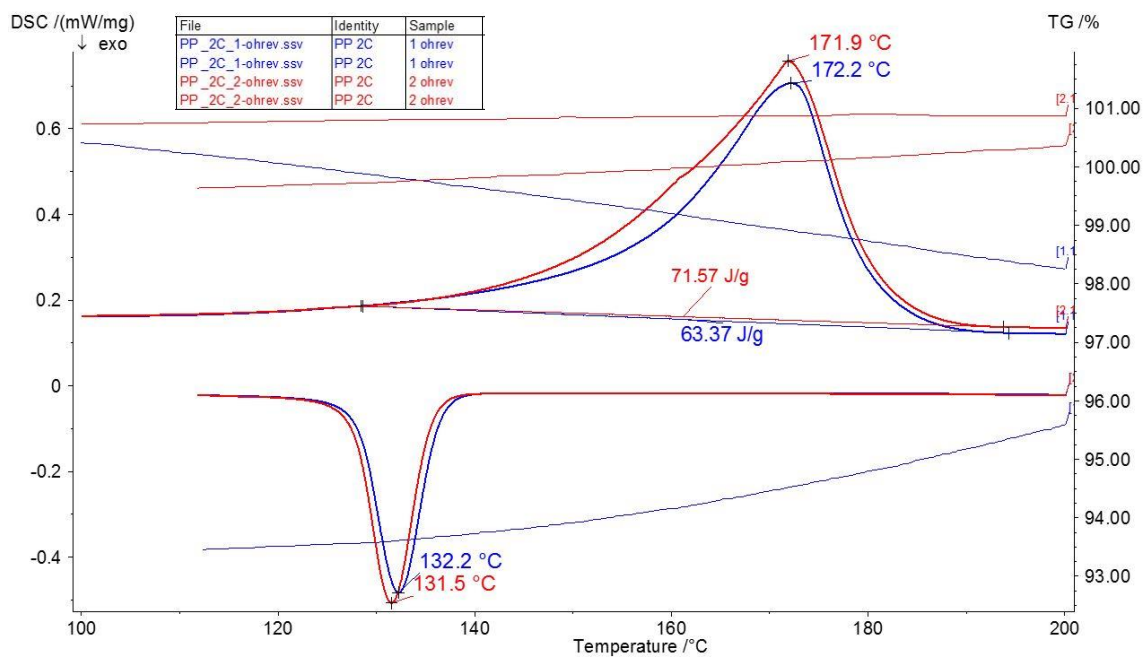
Vícenásobná extruze



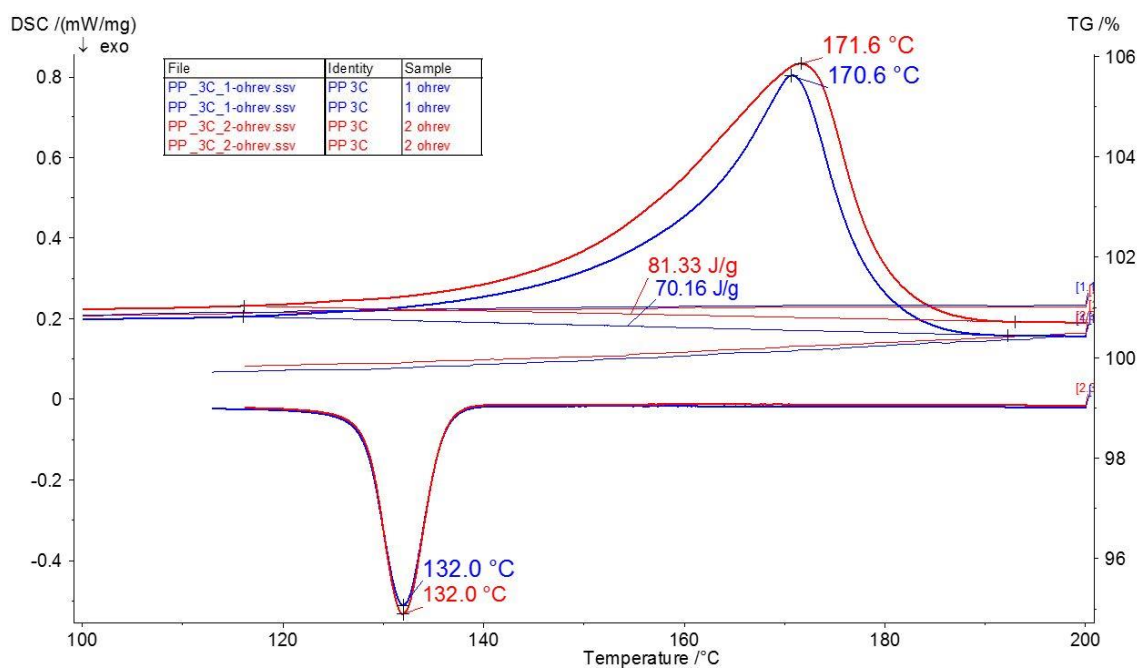
Obr. 28: Termogram DSC vzorek granule první i druhý ohřev



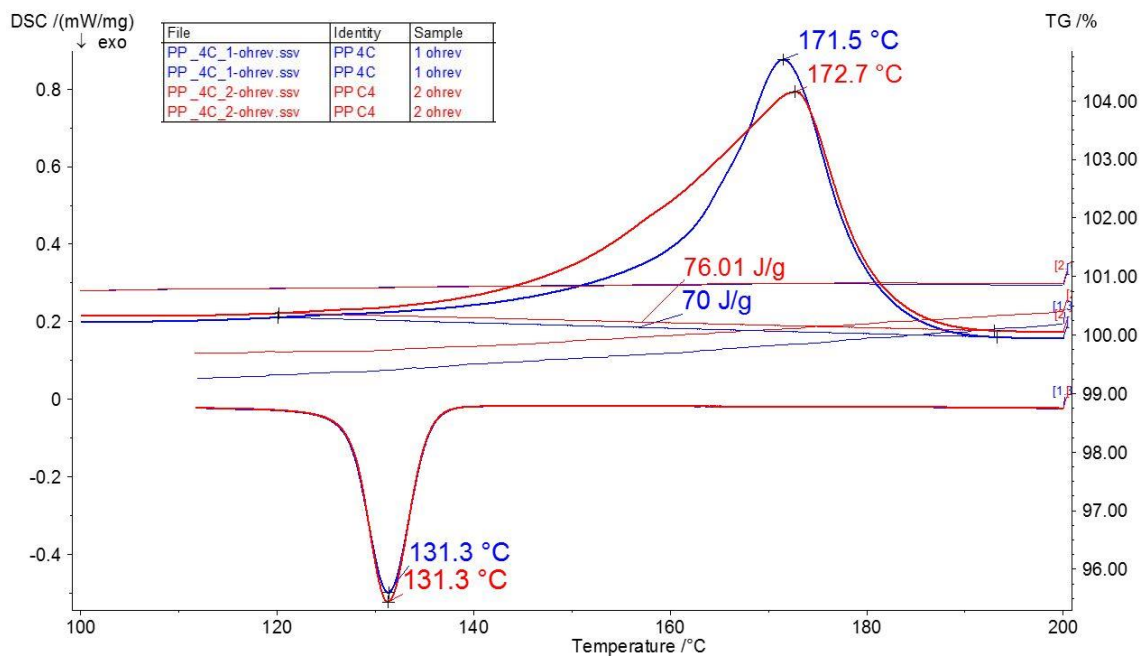
Obr. 29: Termogram DSC vzorek 1. cyklus, první i druhý ohřev



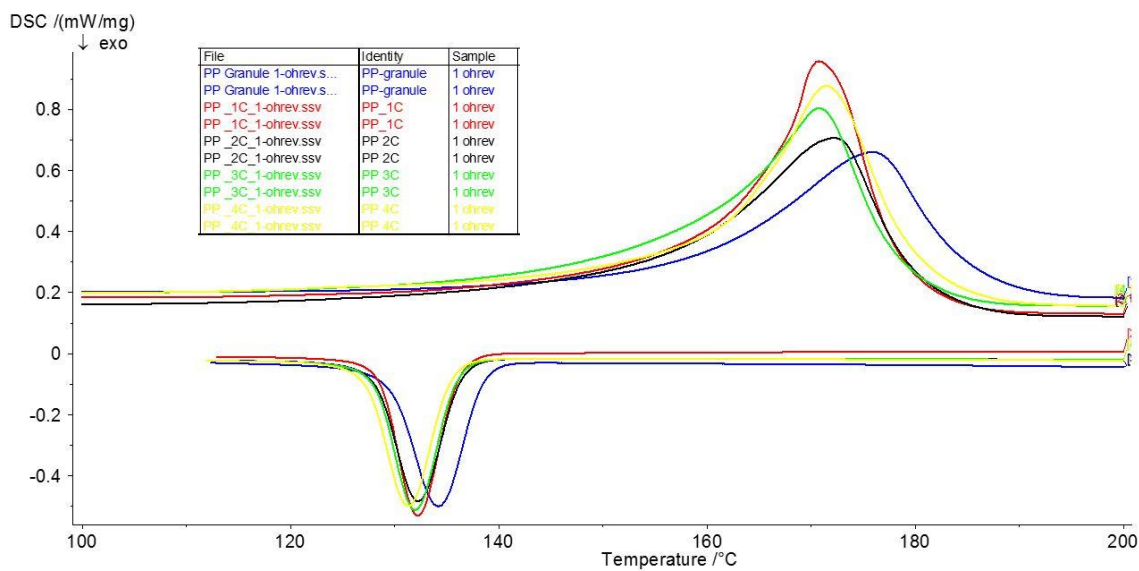
Obr. 30: Termogram DSC vzorek 2. cyklus, první i druhý ohřev



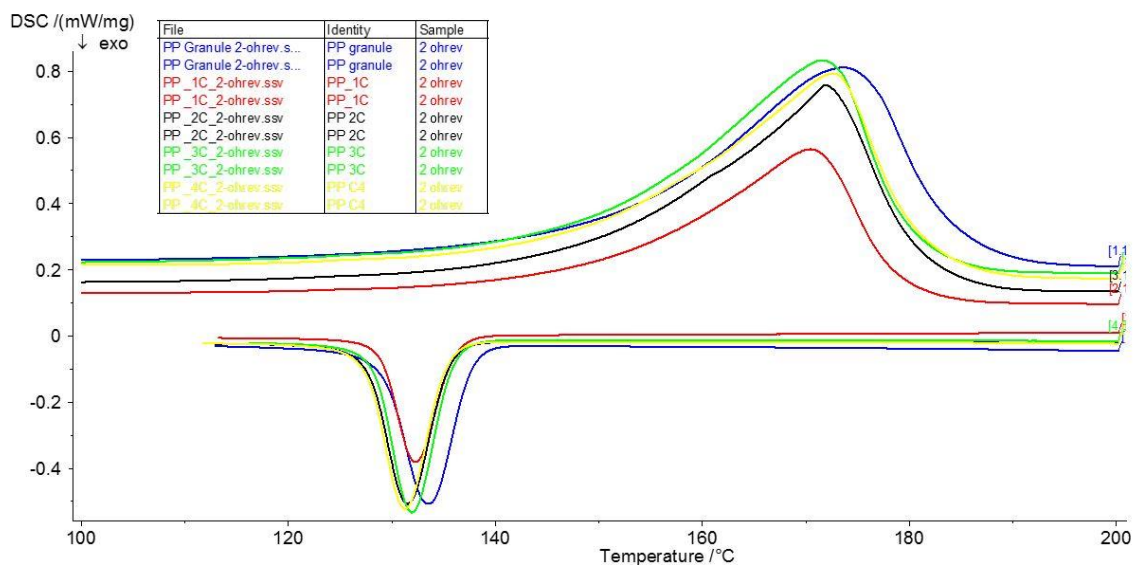
Obr. 31: Termogram DSC vzorek 3. cyklus, první i druhý ohřev



Obr. 32: Termogram DSC vzorek 4. cyklus, první i druhý ohřev



Obr. 33: Termogram DSC vzorků vícenásobné extruze, porovnání prvních ohřevů



Obr. 34: Termogram DSC vzorků vícenásobné extruze, porovnání druhých ohřevů

Tab. 7: Souhrn výsledků měření DSC vícenásobné extruze (T_{pm} : teplota tavení piku, T_{pc} : teplota krystalizace piku, ΔH : entalpie tavení)

Vzorek	1. Ohřev			2. Ohřev		
	T_{pm1} [°C]	T_{pc1} [°C]	ΔH_1 [J/g]	T_{pm2} [°C]	T_{pc2} [°C]	ΔH_2 [J/g]
Granule	175,9	134,3	55,69	173,6	133,6	82,66
1. cyklus	170,8	132,2	72,13	170,4	132,3	52,05
2. cyklus	172,2	132,2	63,37	171,9	131,5	71,57
3. cyklus	170,6	132	70,16	171,6	132	81,33
4. cyklus	171,5	131,3	70	172,7	131,3	76

Z vyhodnocení termogramů DSC je patrné, že teploty tání a krystalizace 1. až 4. cyklu jsou téměř totožné, a to jak při prvním, tak i při druhém ohřevu. Pouze granulát vykazuje vyšší teplotu tavení oproti cyklům vícenásobné extruze.

4.8 Tahová zkouška

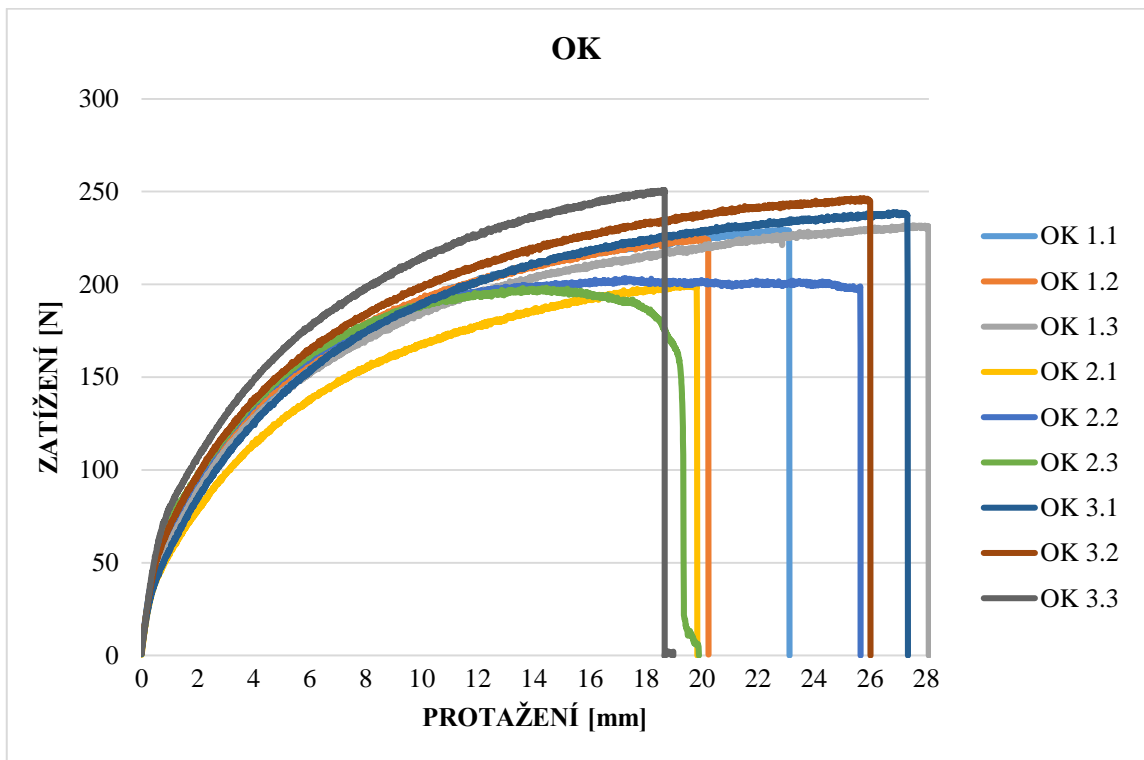
Z kelímků byly vždy odebrány tři zkušební tělesa vyseknutím ze stěny kelímku. První zkušební těleso bylo vždy odebráno naproti hrotu šipky ve dnu kelímku (pozice 1), další dvě s posunutím o 120° (pozice 2 a 3). Obr. 32 představuje polohy odběru zkušebních těles. Tahová zkouška byla provedena na univerzálním trhacím stroji Instron 5582 dle normy ČSN EN ISO 527-1.

Pro přehlednost bylo použito značení vzorků, například označení vzorku 1.1.1. První číslo značí, o jaký se jedná cyklus z vícenásobné extruze (1-4), druhé číslo značí, o jaký kelímek se jedná (pro každý cyklus byly použity 3 kelímky) a třetí číslo označuje pozici, ze které byl vzorek vyseknutý.



Obr. 35: Schéma odběru zkušebních těles

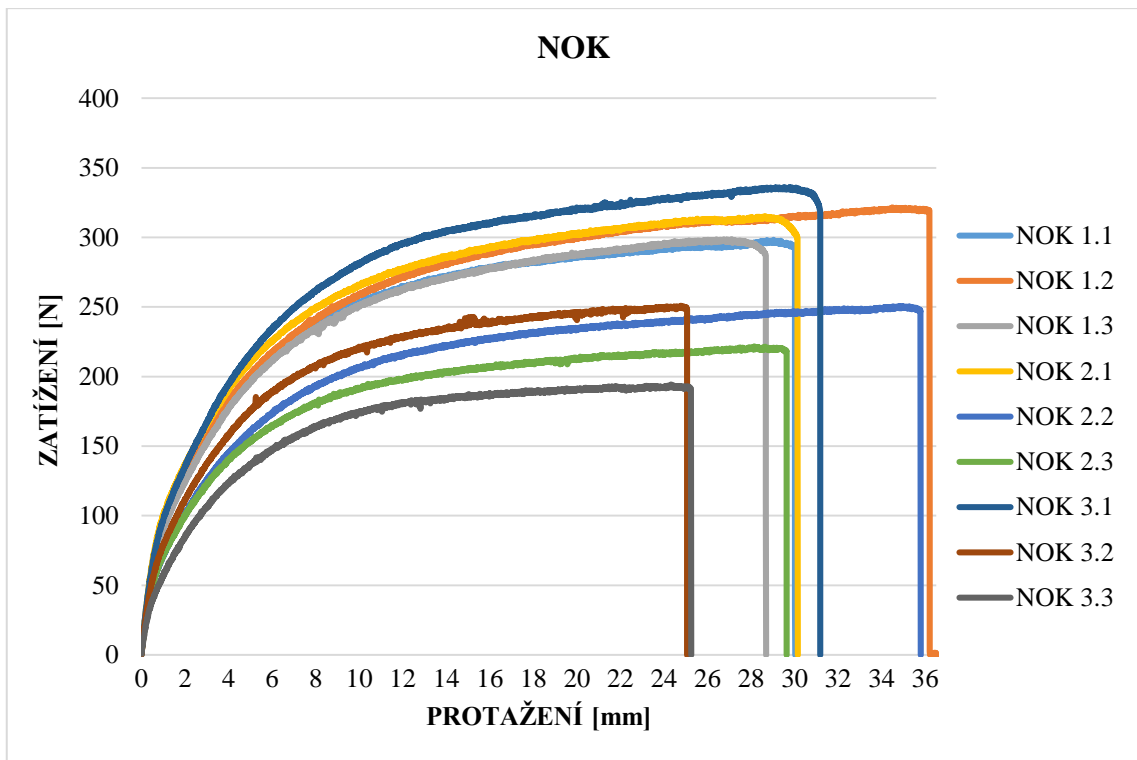
OK a NOK kelímky



Obr. 36: Průběh tahových zkoušek OK kelímků

Tab. 8: Meze pevnosti a zatížení při mezi pevnosti OK kelímků

Vzorek	A [mm ²]	F _m [N]	σ _m [MPa]
OK 1.1	5	228	46
OK 1.2		224	45
OK 1.3		231	46
OK 2.1		200	40
OK 2.2		203	41
OK 2.3		197	39
OK 3.1		239	48
OK 3.2		246	49
OK 3.3		250	50
Aritmetický průměr	5	224±20	45±4

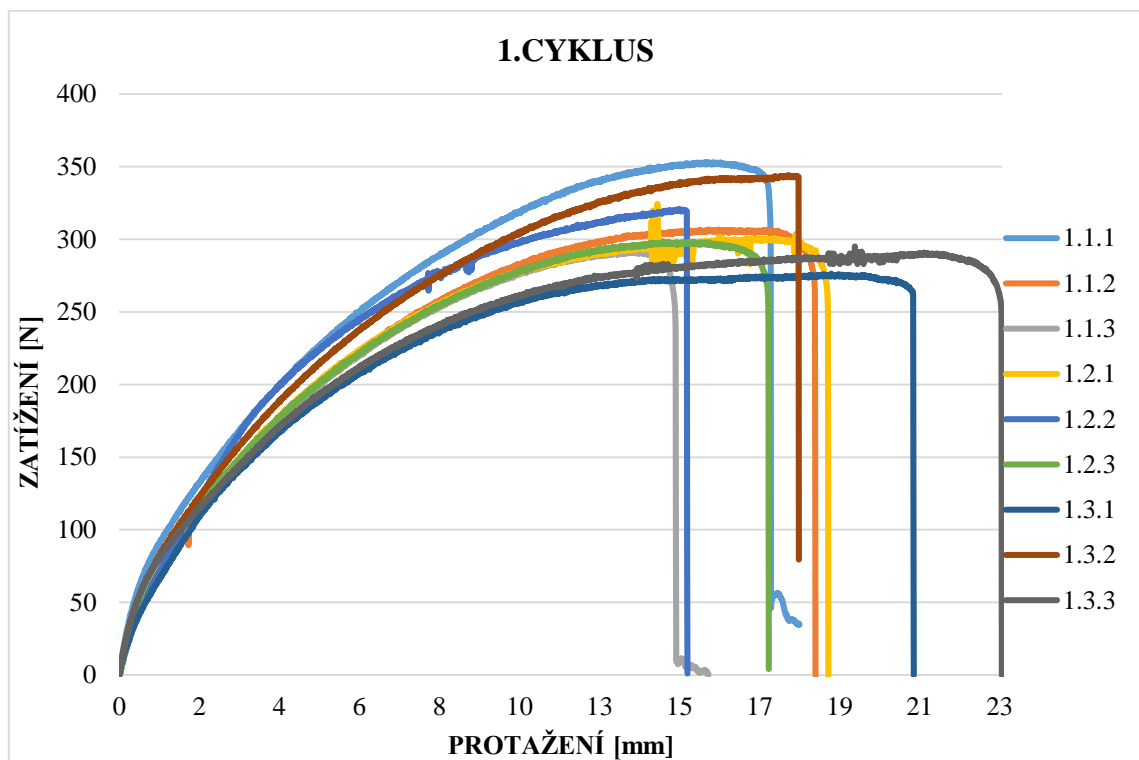


Obr. 37: Průběh tahových zkoušek NOK kelímků

Tab. 9: Meze pevnosti a zatížení při mezi pevnosti NOK kelímků

Vzorek	A [mm ²]	F _m [N]	σ _m [MPa]
NOK 1.1	5	295	59
NOK 1.2		320	64
NOK 1.3		298	60
NOK 2.1		314	63
NOK 2.2		249	50
NOK 2.3		220	44
NOK 3.1		336	67
NOK 3.2		250	50
NOK 3.3		192	39
Aritmetický průměr	5	275±49	55±10

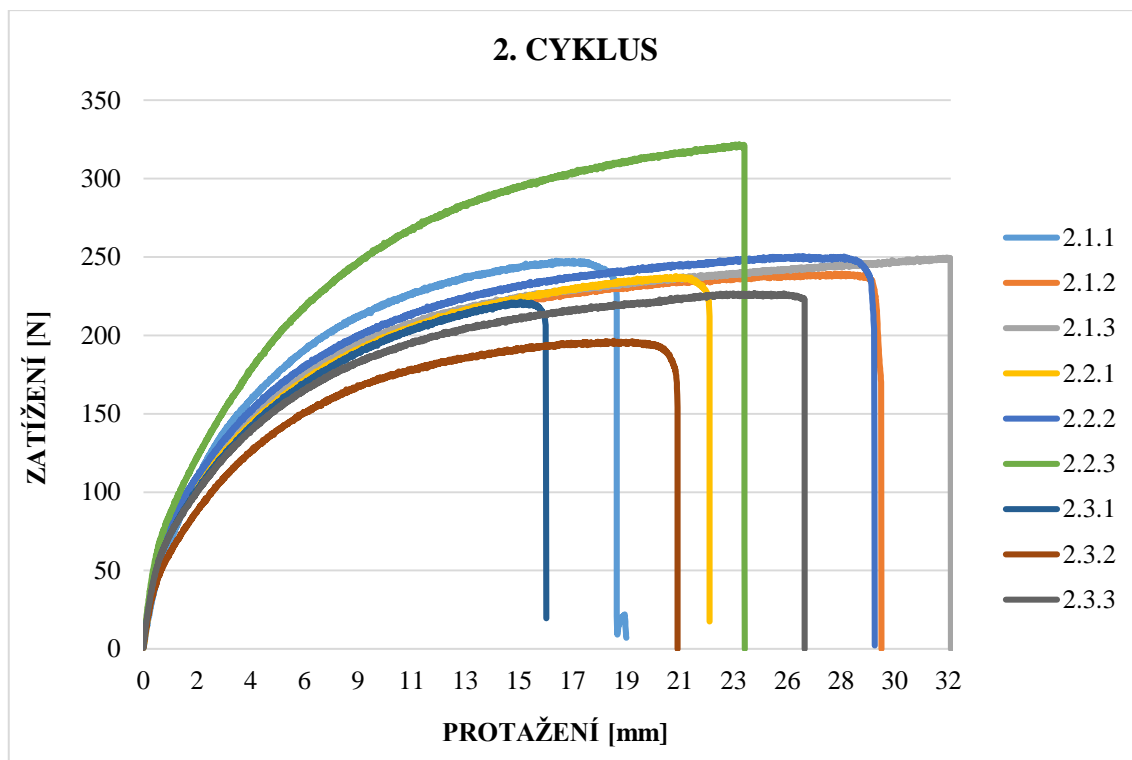
Vícenásobná extruze



Obr. 38: Průběh tahové zkoušky 1. cyklu

Tab. 10: Meze pevnosti a zatížení při mezi pevnosti 1. cyklu

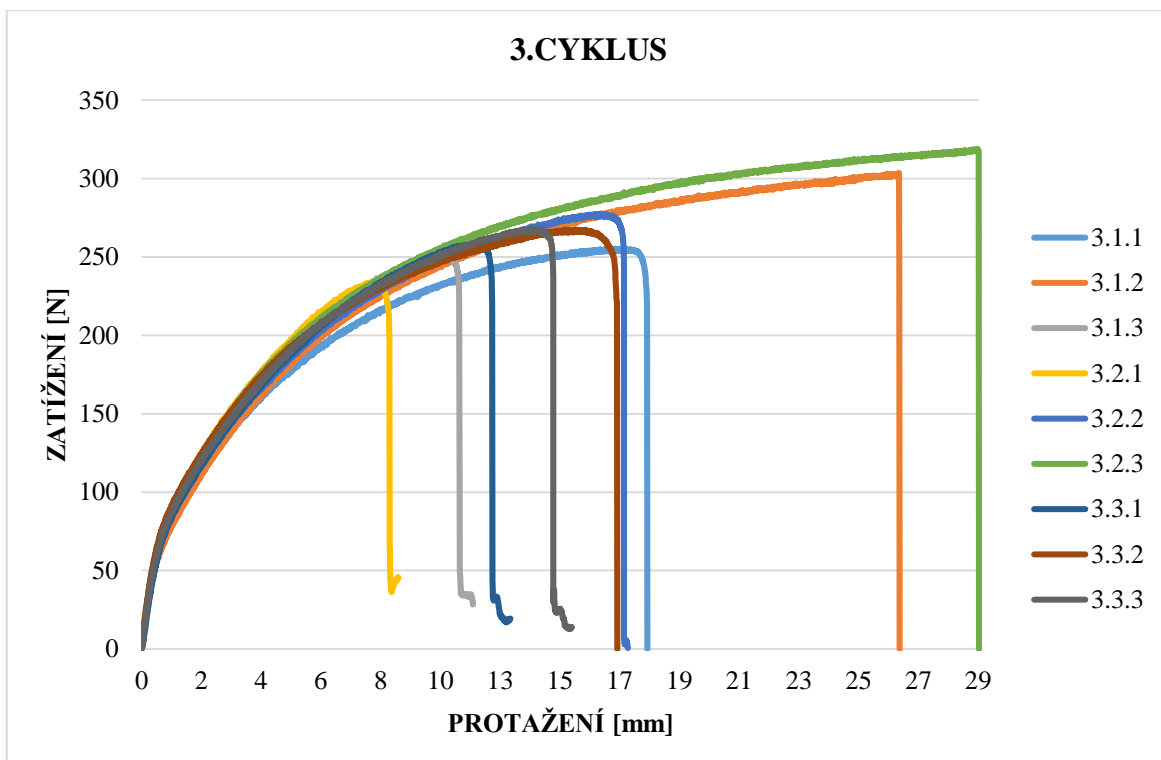
Vzorek	A [mm ²]	F _m [N]	σ _m [MPa]
1.1.1	5	352	70
1.1.2		306	61
1.1.3		289	58
1.2.1		296	59
1.2.2		165	64
1.2.3		297	60
1.3.1		275	55
1.3.2		344	69
1.3.3		290	58
Aritmetický průměr	5	290±54	62±5



Obr. 39: Průběh tahové zkoušky 2. cyklu

Tab. 11: Meze pevnosti a zatížení při mezi pevnosti 2. cyklu

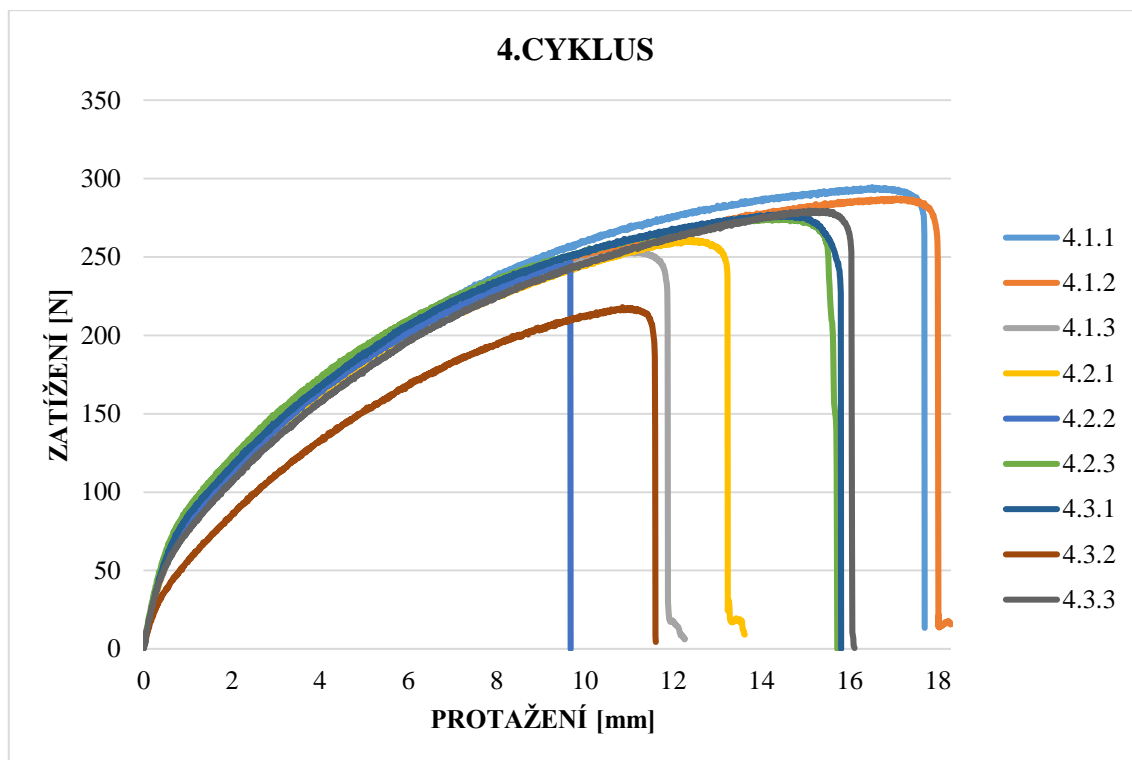
Vzorek	A [mm ²]	F _m [N]	σ _m [MPa]
2.1.1	5	247	49
2.1.2		239	48
2.1.3		249	50
2.2.1		236	47
2.2.2		249	50
2.2.3		321	64
2.3.1		239	48
2.3.2		238	48
2.3.3		271	54
Aritmetický průměr	5	254±27	51±5



Obr. 40: Průběh tahové zkoušky 3. cyklu

Tab. 12: Meze pevnosti a zatížení při mezi pevnosti 3. cyklu

Vzorek	A [mm ²]	F _m [N]	σ _m [MPa]
3.1.1	5	253	48
3.1.2		302	60
3.1.3		246	49
3.2.1		233	47
3.2.2		274	55
3.2.3		318	64
3.3.1		254	51
3.3.2		266	53
3.3.3		265	53
Aritmetický průměr		5	268±27



Obr. 41: Průběh tahové zkoušky 4. cyklu

Tab. 13: Meze pevnosti a zatížení při mezi pevnosti 4. cyklu

Vzorek	A [mm ²]	F _m [N]	σ _m [MPa]
4.1.1	5	292	58
4.1.2		285	57
4.1.3		249	50
4.2.1		256	51
4.2.2		251	50
4.2.3		273	55
4.3.1		276	55
4.3.2		212	43
4.3.3		277	55
Aritmetický průměr		5	263±24

4.9 Zkouška houževnatosti na kuličce

Zkouška pádem kuličky je interní metoda GPI, která se používá pro stanovení houževnatosti kelímků. Odběr vzorku pro zkoušku vrubové houževnatosti metodou Charpy není možný z jednoho kelímku. Proto je houževnatost při rázovém zatížení testována na jednom kelímku. K tomu účelu se použije zařízení pro zkoušku padající kuličkou, které je tvořeno z trubky, ocelové kuličky (průměr: 27 mm, hmotnost: 79 g) a základny se žlábkem pro zafixování kelímku (viz obr. 42).



Obr. 42: Sestava zkoušky pádem kuličky

Kelímek je vložen do základny. Sklopením základny je dosaženo kolmé dopadnutí kuličky na stěnu kelímku. Poté se kulička nechá spadnout trubkou z určité výšky na kelímek. Výsledkem je srovnávací hodnota, která slouží pro odhad houževnatosti.

Pro pokus byla použita výška 60 cm. Bod dopadu kuličky byl nastaven střed kelímku. Z každého cyklu bylo náhodně testováno 10 kelímků.

Tab. 14: Výsledky zkoušky padající kuličkou

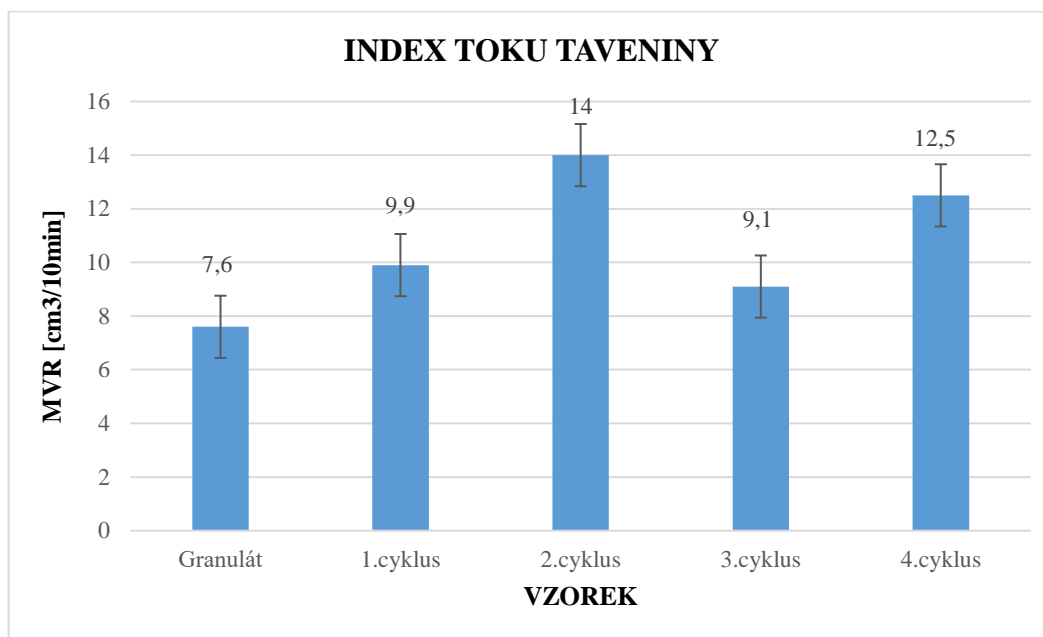
Vzorek	Vyhovuje	Nevyhovuje
OK	10	0
NOK	6	4
1. cyklus	9	1
2. cyklus	10	0
3. cyklus	9	1
4. cyklus	10	0

Z tab. 14 je patrné, že NOK kelímky dosahují vyšší křehkosti a jsou nevyhovující. Všechny ostatní vzorky zkouškou prošly, nebyla u nich zjištěna jakákoliv praskavost a považují se za vyhovující.

5 Zhodnocení výsledků

Tato kapitola obsahuje zhodnocení všech naměřených výsledků z provedených testů. Vyhodnoceny byly index toku taveniny, hustota, DSC termogramy, tahová zkouška a test houževnatosti.

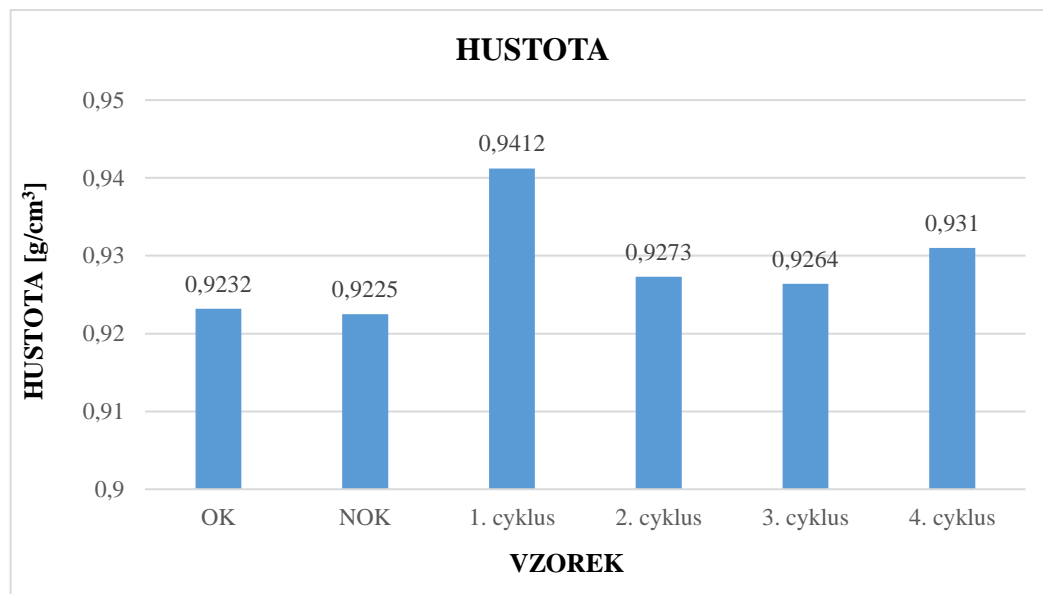
Z obr. 43 je patrné, že nejmenší index toku taveniny byl naměřen u granulátu, který neobsahuje barvivo. Cykly vícenásobné extruze 1 až 4 barvivo obsahují, proto jsou hodnoty indexu toku taveniny vyšší než u granulátu. Výsledky jednotlivých vzorků však nevykazují abnormální rozdíly indexů toku.



Obr. 43: Porovnání indexů toku taveniny vícenásobné extruze

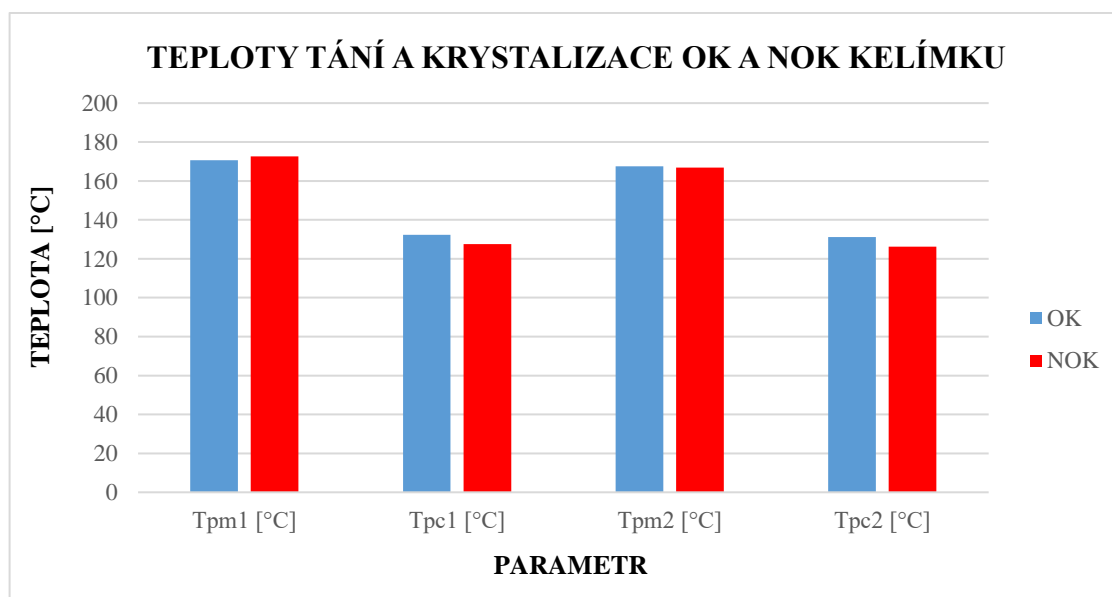
Vzorky pro měření hustoty byly odebrány ze dna kelímků. Hustota izotaktického polypropylenu se uvádí 0,905 – 0,920 g/cm³ [8]. Výsledky hustoty OK a NOK kelímků ukazují téměř stejnou hodnotu a odpovídají izotaktickému polypropylenu (obr. 44). Hustoty vzorků po vícenásobné extruzi jsou také velmi podobné a rozdíly jsou nepatrné,

pouze 1. cyklus vykazuje vyšší hodnotu hustoty, což může být způsobeno vyšším stupněm krystalinity. (viz. obr. 44)



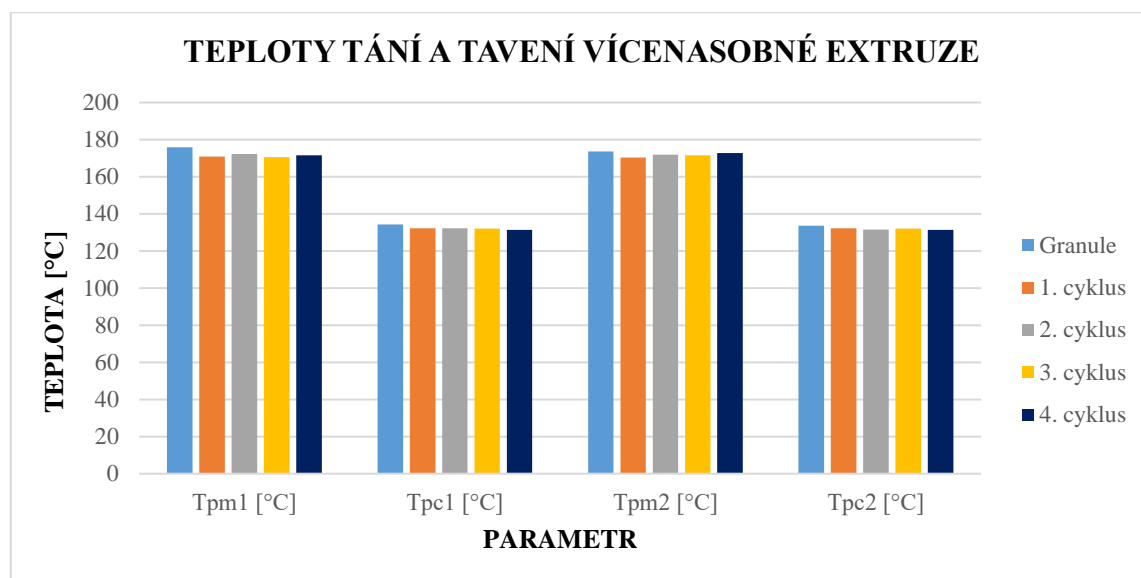
Obr. 44: Porovnání hustot vzorků

Na obr. 45 je porovnání naměřených hodnot teploty tání a krystalizace vzorků OK a NOK. Z výsledků lze konstatovat, že u prvních i druhých ohřevů OK a NOK kelímků je T_{pm} téměř stejná. Výraznější rozdíl je vidět u teplot krystalizace, kdy NOK kelímek vykazuje nižší teploty T_{pc} (o 5°C) při prvním i druhém ohřevu než OK kelímek. Z toho je patrné, že NOK kelímek krystalizuje podstatně dříve a déle, což může být způsobeno příliš vysokou teplotou formy.



Obr. 45: Porovnání teplot tání a krystalizace OK a NOK kelímků

Z výsledků vícenásobné extruze není vidět žádný větší rozdíl teplot tání ani krystalizace, teploty jsou téměř totožné, a to jak při prvním, tak druhém ohřevu (obr. 46). Pouze granulát vykazuje vyšší teploty tavení a krystalizace, což je pravděpodobně způsobeno nepřítomností barviva.



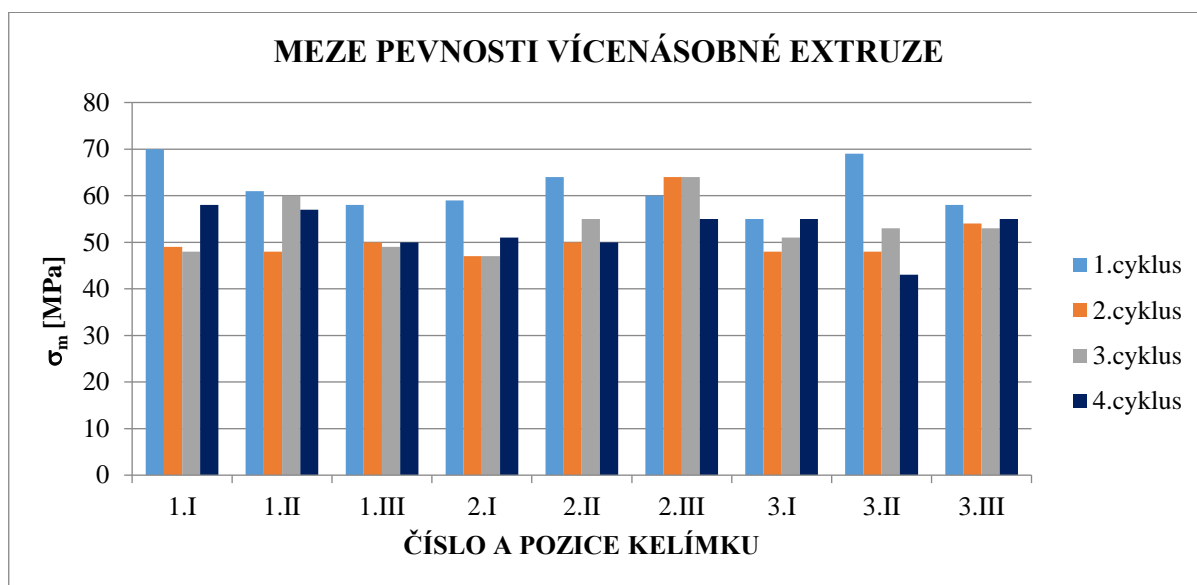
Obr. 46: Porovnání teplot tání a krystalizace vícenásobné extruze

V tab. 15 jsou porovnány meze pevnosti všech vzorků připravených recyklátů. Porovnávají se jak místa odebrání (řádek) tak i jednotlivý výrobní cyklus (sloupec).

Tab. 15: Porovnání mezi pevností σ_m [MPa] jednotlivých cyklů a míst odebrání z kelímku

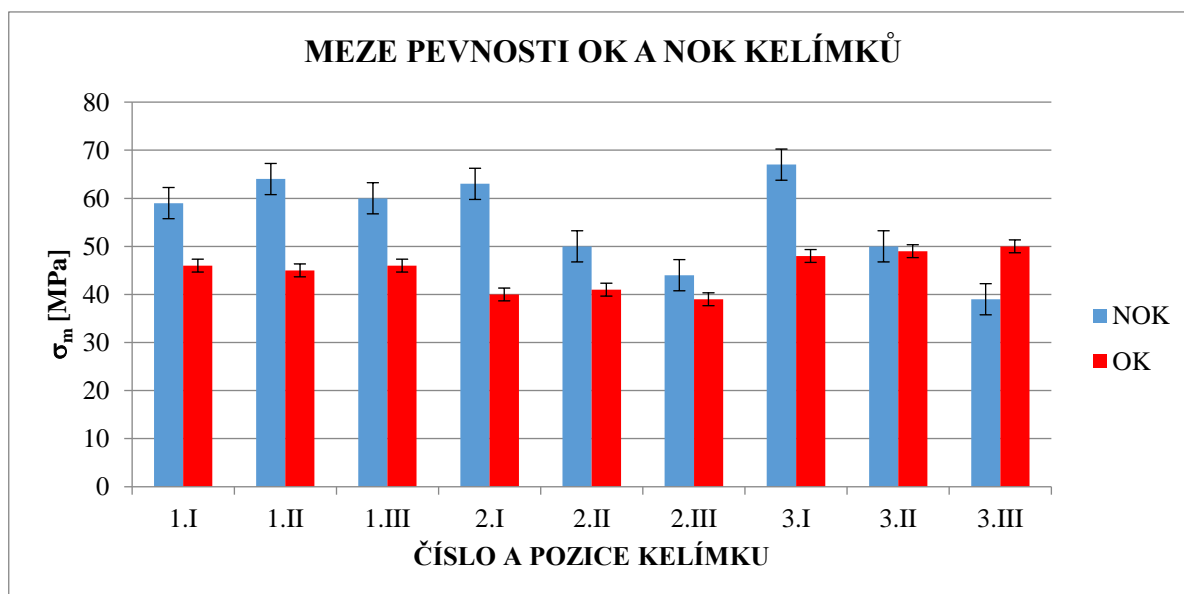
	1.cyklus	2.cyklus	3.cyklus	4.cyklus	Aritmetický průměr
1.I	70	49	48	58	55±9
1.II	61	48	60	57	56±8
1.III	58	50	49	50	52±6
2.I	59	47	47	51	51±8
2.II	64	50	55	50	52±8
2.III	60	64	64	55	54±11
3.I	55	48	51	55	54±7
3.II	69	48	53	43	52±9
3.III	58	54	53	55	52±7
Aritmetický průměr	62±5	51±5	53±6	53±5	

Z obr. 47 lze vyčíst, že z vícenásobné extruze 1. cyklus vykazuje v průměru nejvyšší hodnotu meze pevnosti (62 MPa). Další cykly (2. - 4. cyklus) už mají meze pevnosti téměř shodné. Zvýšená mez pevnosti 1. cyklu se však neprojevila negativně na kvalitě výrobku.

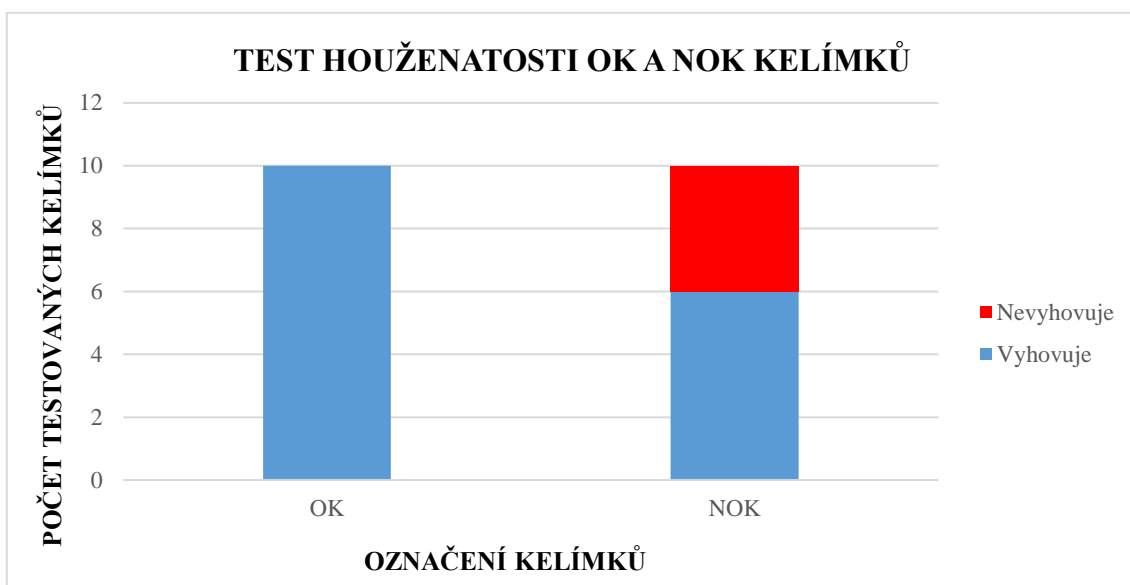


Obr. 47: Porovnání mezi pevnosti vícenásobné extruze

Výsledky ukazují, že NOK kelímek vykazuje v průměru podstatně vyšší mez pevnosti (55 MPa) než OK kelímek (45 MPa). Je patrné, že vyšší pevnost kelímku vede k nižší houževnatosti, resp. vyšší křehkosti. To většinou bývá způsobeno vysokou teplotou při extruzi, tím pádem i ve formě a dojde tak k přehřátí fólie.

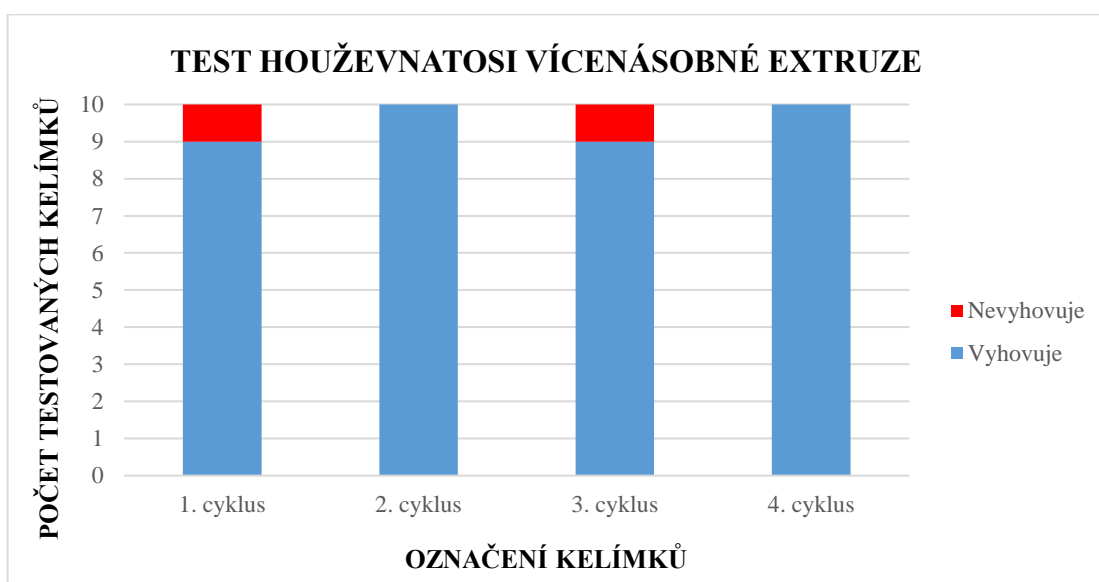


Obr. 48: Porovnání mezi pevnosti OK a NOK kelímků



Obr. 49: Porovnání houževnatosti OK a NOK kelímků

Z porovnání výsledků testu houževnatosti kelímku obr. 49 je zřejmé, že NOK kelímky vykazují podstatně vyšší křehkost a ve 40 % případů došlo k prasknutí kelímku, což je vyhodnoceno jako nevyhovující. U OK kelímku nedošlo ani k jednomu prasknutí a kelímky tedy vyhovují na 100 %.



Obr. 50: Porovnání houževnatosti kelímků z vícenásobné extruze

Test houževnatosti vícenásobné extruze ukazuje, že pouze u 1. a 3. cyklu byl 1 kelímek vyhodnocen jako nevyhovující. Vyhovovalo 90% resp. 100% kelímku u 2. a 4. cyklu (obr. 50). Kelímky jednotlivých cyklů jsou vyhodnoceny jako vyhovující.

6 Závěr

V teoretické části diplomové práce je popsána technologie výroby fólií a tvarování plastů za tepla k pochopení principů výroby kelímku a s nimi spojené problematiky. Dále je v práci popsán polypropylen, jeho fyzikální i mechanické vlastnosti, jakožto největší a nejčastější výrobní skupina jak ve společnosti Greiner Packaging, tak celém potravinářském průmyslu.

Praktická část práce se zabývá zhodnocením, na základě výsledků testů, zda má vstupní materiál jednotlivých cyklů během vícenásobné extruze vliv na výslednou kvalitu vyrobeného kelímku. Dále se praktická část zabývá hledáním příčiny nadměrné křehkosti a praskání NOK kelímku, který je co do podobnosti s OK kelímkem téměř stejný, ale odlišuje se lehkými designovými prvky.

U DSC termogramů bylo zjištěno, že NOK kelímky mají nižší teplotu krystalizace (o 5°C) při prvním i druhém ohřevu než OK kelímkem. NOK kelímkem krystalizuje podstatně dříve a déle, což může být způsobeno příliš vysokou teplotou formy, kdy může dojít k přehřátí fólie. To může mít za následek, že NOK kelímkem má větší mez pevnosti (55 MPa) než OK kelímkem (45MPa), je podstatně křehčí a častěji praská. To potvrzují i výsledky ze zkoušky houževnatosti, kdy 40% NOK kelímku bylo vyhodnoceno jako nevyhovující.

Možnou příčinou by mohlo být i špatné materiálové rozvrstvení kelímku, kdy stěna kelímku v místě prasknutí může být příliš slabá. Doporučením by bylo provést změnu materiálového složení tak, aby nebyly ovlivněny specifikace kelímku dané zákazníkem a pozorovat změny v kvalitě.

Z DSC termogramů granulátu a jednotlivých cyklů z recyklátu nebyly zjištěny žádné rozdíly mezi jednotlivými vzorky. Teploty tání se pohybovaly v průměru 171±1°C a teploty krystalizace 132±1°C. Meze pevnosti všech cyklů byly téměř stejné (cca 52MPa), pouze u prvního cyklu byla naměřena vyšší hodnota meze pevnosti o 10 MPa a stejně tak byla naměřena u prvního cyklu vyšší hodnota hustoty 0,9412 g/cm³, což ale nemělo žádný vliv na praskavost kelímků, kde bylo vyhodnoceno jako vyhovující 100% vzorků. Stejně tak ostatní cykly nevykazovaly zvýšenou křehkost a byly taktéž vyhodnoceny jako vyhovující.

Z vyhodnocení naměřených výsledků můžeme říct, že vstupní materiál MOSTEN FT005 a následná vícenásobná extruze, kdy při po sobě jdoucích cyklech byla vstupním materiálem 100 % drť z cyklu předešlého, nemá žádný negativní vliv na kvalitu výsledného produktu. Teoreticky by bylo možné provádět výrobu kelímku pouze z podrceného odpadu stejného materiálu.

7 Literatura

- [1] **GREINER PACKAGING** [online],
dostupné z: <http://www.greiner-gpi.com/cz/spolecnost/>
- [2] **EBLIN J.**: History of plastics cups [online],
dostupné z: http://www.ehow.com/about_5200516_history-plastic-cups.html
- [3] **LENFELD P.**, Technologie II, tvarování termoplastů, TUL, Liberec, 2005,
ISBN 978-80-73720-37-7
- [4] **AUSPERGER A.**, Technologie zpracování plastů [online], TUL, Liberec, 2014,
ISBN 978-80-88058-77-9, dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Uvod.html>
- [5] **ŠTĚPEK J.**, zpracování plastů, VŠCHT, Praha, 1980
- [6] **TOMIS F., RULÍN F.**, Gumárenské a plastikářské stroje II, Praha, 1981
- [7] **KUTA A.**, Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů, VŠCHT, Praha,
2007, ISBN 978-80-70803-67-7
- [8] **MALPASS D. B., BAND E. I.**, Introduction to industrial Polypropylene, Scrivener
Publishing, Salem, Massachusetts, 2012, ISBN 978-1-118-06276-0
- [9] **BĚHÁLEK L.**, Polymery [online], TUL, Liberec 2014, ISBN 978-80-88058-68-7,
dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Uvod.html>
- [10] **PETROLEUM**, Polypropylen [online]
dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyrobky/polypropylen.aspx>
- [11] **DUCHÁČEK V.**, Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití, VŠCHT,
Praha, 2006, ISBN 80-7080-617-6
- [12] **GRELLMAN, W., SEIDLER, S.**, Polymer Testing, Carl Hanser Verlag, München,
Germany, 2007, ISBN 978-1-56990-410-7
- [13] **BROWN, E. M.**, Introduction to Thermal Analysis : Techniques and Applications,
Kluwer Academic Publisher, Dodrecht, Netherlands, 2001
- [14] **GABBOT, P.**, Principles and Applications of Thermal Analysis, Blackwell
Publishing Ltd, Oxford, United Kingdom, 2008

- [15] **HÖHNE, G. W. H., HEMMINGER, W., FLAMMERSHEIM J.-H.:** Differential Scanning Calorimetry, An Introduction for Practitioners, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996
- [16] **ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA, ČSN EN ISO 11357-1:** Plasty – Diferenciální snímací kalorimetrie (DSC) – Část 1: Základní pojmy, 2017
- [17] **ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA, ČSN EN ISO 1133-1:** Plasty – Stanovení hmotnostního (MFR) a objemového (MVR) indexu taveniny termoplastů – Část 1: Standardní metoda, 2013
- [18] **UNIPETROL RPA,** Materiálový list: PP MOSTEN FT005. Litvínov, 2011.
- [19] **MAŇAS, M., VLČEK, J.** Aplikovaná reologie. UTB, Zlín, 2001. ISBN 80-7318-039-1.
- [20] **MEZGER, T. G.,** The Rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers. 2nd revised edition. Vincentz Network, Hanover, 2006, ISBN 3-87870-174-8
- [21] **THRONE, J., BEINE, J.:** Thermoformen: Werkstoffe, Verfahren, Anwendungen. Carl Hanser Verlag München Wien, 1999; 1. vydání
- [22] **PHILLIPS R.A., WOLKOWICZ M.D.:** Chapter 3. Polypropylene Morphology. In: Polypropylene Handbook (Ed. Pasquini N.). Carl Hanser Verlag München, 2005, 2. vydání
- [23] **RETTENBERGER S.:** Uni- und biaxiales Verstrecken von isotaktischem Polypropylen im teilaufgeschmolzenen Zustand. Dizertace, univerzita Friedrich- Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen 2002
- [24] **VARGA J.:** Spherulitic crystallization and structure. In: "Polypropylene: An A-Z Reference". (Ed.: Karger-Kocsis J.), Kluwer Publishers, Dordrecht, 1999
- [25] **ELIAS H.-G.:** Makromoleküle. Svazek 1. Chemische Struktur und Synthesen. Wiley-VCH, 2000; 6. vydání
- [26] **NATTA G., CORRADINI P.:** Structure and Properties of Isotactic Polypropylene. Il Nuovo Cimento. Supplemento 15 (1960) 40-51
- [27] **LOTZ B., WITTMANN J.C.:** The molecular origin of lamellar branching in the (monoclinic) form of isotactic polypropylene. Journal of Polymer Science B.: Polymer Physics 24; 1986; p. 1541-1558

[28] **STROBL G.:** The Physics of Polymers. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1997,
2. vydání