

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



Studijní program M 2301 - Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Nanokompozity s termoplastickou maticí pro technologii vstřikování

Nanocomposites with thermoplastic matrix for injection moulding

Václav Bidlas

KSP – TP – 743

Vedoucí DP: doc. Dr. Ing. Petr LENFELD

KSP TUL

Konzultant: Ing. Luboš BĚHÁLEK

KSP TUL

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	81
Počet tabulek	35
Počet příloh	0
Počet obrázků	53
Počet grafů	35

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



Datum: 3.1.2005



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Václav B I D L A S
Studijní program	M 2301 Strojní inženýrství
Obor	2303T002 Strojírenská technologie
Zaměření	Tváření kovů a plastů

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Nanokompozity s termoplastickou maticí pro technologii vstřikování

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznámení se s problematikou nanomateriálů a technologii vstřikování
2. Výběr nanoblendů a typů polypropylénů pro technologii vstřikování
3. Výroba zkušebních těles a recyklace pro stanovené poměry míchání
4. Experimentální měření vybraných vlastností
5. Vyhodnocení výsledků a doporučení pro technologii vstřikování

V 11/05 S

KSP/TKP
81 s.
obr. grafy, tab.

Forma zpracování diplomové práce:

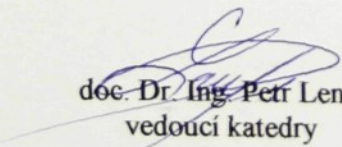
- průvodní zpráva cca 50 stran
- grafické práce

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

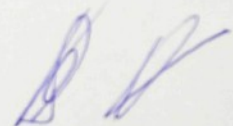
- /1/ KREBS, J. a kolektiv : Termoplasty v praxi, Verlag Dashöffer Praha, 1999
- /2/ HAVELKA, K. : Chemie silikátů a plastických hmot, ČVUT Praha, 1987 [skripta]
- /3/ CRAWFORD, R. J. : Plastics Engineering, Pergamon Press, England, 1987
- /4/ BERHARDT, E. C. : Processing of Thermoplastic Materials, Reinhold Publ. Corp., New York, 2000
- /5/ BEAUMONT, L. : Successful Injection Moulding, Carl Hanser Verlag, 2002
- /6/ Firemní materiály

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Konzultant diplomové práce: Ing. Luboš Běhálek


doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld
vedoucí katedry




doc. Ing. Petr Louda, CSc.
děkan

V Liberci dne 31. 10. 2004

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program : 2301 – Strojní inženýrství

Diplomant: Václav Bidlas

Téma práce: Nanokompozity s termoplastickou matricí
pro technologii vstřikování
Nanocomposites with thermoplastic matrix
for injection moulding

Číslo DP: TP – 743

Vedoucí DP: doc. Dr. Ing. Petr LENFELD

Konzultant: Ing. Luboš BĚHÁLEK

Abstrakt:

Předmětem této diplomové práce je seznámení se s technologií vstřikování termoplastů, s podstatou nanokompozitních materiálů typu polymer/jíl a základními způsoby jejich výroby. Cílem bylo zjištění vlivu příměsi recyklátu na základní mechanické a technologické vlastnosti těchto materiálů. Hodnocení tohoto vlivu je uvedeno v závěru práce.

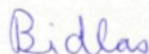
Abstract:

note The subject of this diploma work is the introduction to injection moulding, the principles of polymer/clay nanocomposites and to basic production techniques of these nanocomposites. The aim was to find out the influence of level of regrind on basic mechanical and technological properties of these materials. Evaluation of this influence is stated in the conclusion of the thesis.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 3. ledna 2005


.....

Václav Bidlas

Křišťálová 15

466 02 Jablonec n.N.

Poděkování:

Rád bych poděkoval všem pedagogům, kteří mi v průběhu celého studia předali mnoho užitečných vědomostí a cenných rad.

Děkuji doc. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi za odborné vedení diplomové práce a Ing. Luboši Běhálkovi za pomoc v laboratoři.

Dále bych chtěl upřímně poděkovat celé mojí rodině a přátelům, kteří mne podporovali i v náročných obdobích studia.

OBSAH

Seznam použitých zkratk, značek a symbolů.....	9
1 ÚVOD	10
1.1 KOMPOZITY	10
1.2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	11
2 TEORETICKÁ ČÁST.....	12
2.1 PLASTY	12
2.1.1 Základní rozdělení plastů	12
2.1.2 Vliv přechodových teplot na vlastnosti polymerů	13
2.2 TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ TERMOLASTŮ	16
2.2.1 Vstřikování termoplastů	16
2.2.2 Vstřikovací stroj	16
2.2.3 Princip vstřikování	19
2.2.4 Vstřikovací cyklus	19
2.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU VÝROBKŮ	22
2.3.1 Vliv materiálu	23
2.3.2 Vliv hlavních technologických parametrů.....	24
2.3.2.1 Vstřikovací tlak	24
2.3.2.2 Teplota taveniny	24
2.3.2.3 Teplota formy	25
2.3.2.4 Rychlost plnění dutiny formy	25
2.3.2.5 Dotlak	26
2.3.3 Vliv přísad na vlastnosti výrobků	26
2.3.4 Požadavky kladené na aditiva	26
2.3.5 Rozdělení aditiv	27
2.4 NANOKOMPOZITY	28
2.4.1 Úvod	28
2.4.2 Systémy polymer/jíl	29
2.4.2.1 Modifikace montmorillonitového jílu	30
2.4.3 Základní principy přípravy nanokompozitů typu polymer/jíl	31
2.4.3.1 Polymerizace In-situ	32
2.4.3.2 Roztoková polymerace.....	32
2.4.3.3 Míchání taveniny polymeru	33
2.4.4 Princip funkce nanokompozitů.....	34
2.4.5 Nanoblend koncentráty	34

2.4.5.1	Zpracování Nanoblendů	35
2.4.5.2	Výhody Nanoblend kompozitů	35
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	38
3.1	VOLBA A POPIS ZKOUŠENÝCH MATERIÁLŮ	38
3.1.1	Popis materiálu Stamylan P 108MF10	38
3.1.2	Popis materiálu Stamytec CX02-81	38
3.1.3	Popis materiálu Mosten GH005	39
3.1.4	Popis materiálů Nanoblend 1001 a Nanoblend 1201	41
3.2	POPIS PŘÍPRAVY VZORKŮ A PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK	41
3.2.1	Objemový index toku taveniny	41
3.2.2	Spirálová zkouška zabíhavosti taveniny	42
3.2.3	Příprava vzorků pro zkoušky	43
3.2.4	Zkouška tahových vlastností	44
3.2.5	Zkouška ohybových vlastností	45
3.2.6	Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy	46
3.2.7	Stanovení výrobního smrštění	47
3.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ STAMYLAN P 108MF10+NANOBLEND 1201	48
3.3.1	Objemový index toku taveniny	48
3.3.2	Spirálová zkouška zabíhavosti taveniny	49
3.3.3	Tahové vlastnosti	49
3.3.4	Ohybové vlastnosti	51
3.3.5	Rázová houževnatost metodou Charpy	53
3.3.6	Výrobní smrštění	54
3.4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ STAMYTEC CX02-81+NANOBLEND 1001	55
3.4.1	Objemový index toku taveniny	55
3.4.2	Spirálová zkouška zabíhavosti taveniny	56
3.4.3	Tahové vlastnosti	57
3.4.4	Ohybové vlastnosti	59
3.4.5	Rázová houževnatost metodou Charpy	61
3.4.6	Výrobní smrštění	61
3.5	VÝSLEDKY MĚŘENÍ MOSTEN GH 005 + NANOBLEND 1001	63
3.5.1	Objemový index toku taveniny	63
3.5.2	Spirálová zkouška zabíhavosti taveniny	64
3.5.3	Tahové vlastnosti	64
3.5.4	Ohybové vlastnosti	66
3.5.5	Rázová houževnatost metodou Charpy	68

3.5.6	Výrobní smrštění	69
4	ZÁVĚREČNÁ ČÁST.....	71
4.1	HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ JEDNOTLIVÝCH ZKOUŠEK	71
4.1.1	Objemový index toku taveniny.....	71
4.1.2	Spirálová zkouška zabíhavosti taveniny	72
4.1.3	Tahové vlastnosti	73
4.1.4	Ohybové vlastnosti	74
4.1.5	Rázová houževnatost metodou Charpy	76
4.1.6	Výrobní smrštění	77
4.2	ZÁVĚR	79
5	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	81

Seznam použitých zkratk, značek a symbolů

a_{cu}	[kJ/m ²]	rázová houževnatost Charpy, těleso bez vrubu
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
E_f	[MPa]	modul pružnosti v ohybu
ε_M	[%]	poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu
ε_{fM}	[%]	poměrné prodloužení na mezi pevnosti v ohybu
F	[N]	síla
F_P	[N]	přisouvací síla
F_U	[N]	uzavírací síla
l_1, b_1	[mm]	délka a šířka zkušebního tělesa
l_C, b_C	[mm]	délka a šířka dutiny formy
MVR	[cm ³ ·10min ⁻¹]	objemový index toku taveniny
p	[MPa]	vnější tlak
p_i	[MPa]	vnitřní vstřikovací tlak
S_{MP}	[%]	výrobní smrštění ve směru toku materiálu
S_{MN}	[%]	výrobní smrštění kolmé na směr toku
σ_M	[MPa]	tahové napětí na mezi pevnosti v tahu
σ_{fM}	[MPa]	napětí na mezi pevnosti v ohybu
T	[°C]	teplota
T_b	[°C]	teplota křehnutí
T_f	[°C]	teplota viskózního toku
T_g	[°C]	teplota skelného přechodu (teplota zesklenní)
T_m	[°C]	teplota tání
t_d	[s]	doba dotlaku
t_{ch}	[s]	doba chladnutí
t_m	[s]	manipulační čas
t_{pl}	[s]	doba plastikace
t_{s1}	[s]	strojní čas potřebný na přisunutí, uzavření a uzamknutí vstřikovací formy
t_{s2}	[s]	strojní čas potřebný na přisunutí tavicí komory k formě
t_{s3}	[s]	strojní čas potřebný na otevření formy
t_v	[s]	doba plnění

1 ÚVOD

V průběhu celého 20. století a zejména v jeho druhé polovině se plasty staly rovnocennými a v mnoha aplikacích nenahraditelnými materiály. Jejich použití je díky jejich vlastnostem velmi široké, týká se všech oblastí průmyslové činnosti.

Plasty nacházejí stále širší uplatnění díky svým specifickým vlastnostem, mezi které patří zejména snadná zpracovatelnost, možnost získání finálního výrobku bez nutnosti dodatečných, často nákladných operací, v porovnání s kovy podstatně nižší energetická náročnost při zpracování. Díky nízké měrné hmotnosti (4x-8x nižší než u oceli) je možné vyrábět lehké a poměrně tuhé díly, které navíc mají skvělé estetické vlastnosti (barva, lesk, kvalitní povrch). Některé plasty se navíc vyznačují zvýšenou odolností proti chemikáliím. V praxi jsou též často využity dobré termoizolační a elektroizolační vlastnosti.

Avšak i plasty mají některé negativní stránky, mezi které patří zejména vysoká cena výchozí suroviny, nízké hodnoty mechanických vlastností (zejména u nevyztužených plastů), creep, vyšší koeficient tepelné roztažnosti, degradace v důsledku působení povětrnosti a zvýšených teplot, problematická recyklace odpadů.

1.1 KOMPOZITY

Vlastnosti plastů je možné upravovat přidáním různých přísad, pro zlepšení mechanických vlastností se tak děje přidáním vyztužujícího plniva. Takto vzniklé materiály se nazývají kompozity. Do nedávné doby byla pro tyto účely používána zejména vlákna a textilie. U vláken jsou zpravidla dva rozměry řádově menší než rozměr třetí. Průměr vlákna se pohybuje od 10^{-1} mm do 10^{-3} mm, a proto se v literatuře v souvislosti s klasickým kompozitem setkáváme s pojmem mikrokompazit.

V posledních několika letech probíhá intenzivní vývoj plniva, jehož jednotlivé částčky mají alespoň jeden rozměr v řádu několika nanometrů, tj. 10-9 mm. Takto připravené kompozity se nazývají nanokompozity. Jedná se o nové progresivní a moderní materiály, mezi jejichž hlavní přínosy patří

snížení množství přidávaného plniva a tím snížení celkové hmotnosti dílce, vyšší tuhost a odolnost proti rázu a poškrábání, menší deformace v důsledku tepla, dobrá přilnavost laků u vzhledových dílů. V obalové technice je s výhodou využita výrazně nižší propustnost pro plyny a kapaliny. Z těchto důvodů byla zadána tato diplomová práce.

1.2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jako hlavní cíl této práce je možné označit provedení zkoušek a následné zhodnocení základních mechanických vlastností u tří vybraných materiálů termoplastické matrice, do nichž byla při výrobě inkorporována přísada Nanoblend, vyráběná firmou Nanocor. Zkoušky budou provedeny na sadě těles vyrobených přímo z čerstvého granulátu a dále potom na sadách těles obsahujících vždy 10%, 50% nebo 100% recyklátu stejného materiálu.

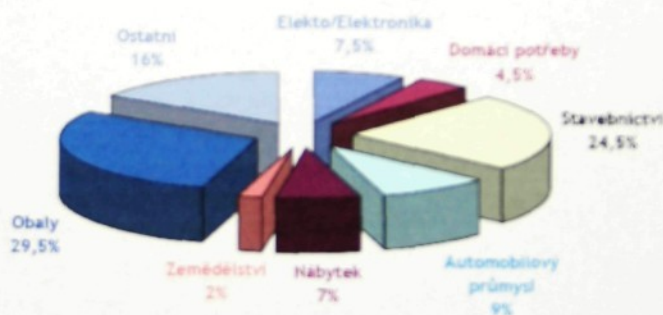
V závěrečné části je uvedeno porovnání všech tří kombinací termoplastické matrice a Nanoblendu, zhodnocení vlivu příměsi recyklátu na sledované vlastnosti a z toho vyplývající doporučení pro technologii vstřikování v praxi.

2 TEORETICKÁ ČÁST

Tato část obecně pojednává o polymerech, technologii vstřikování termoplastů, vlivu přísad a nanomateriálech.

2.1 PLASTY

Plasty jsou makromolekulární látky tvářitelné teplem a tlakem. Slovo makromolekulární znamená látky, které mají molekulovou hmotnost vyšší než 10 000. Z chemického hlediska to jsou organické sloučeniny. Tyto látky vznikají polyreakcemi, což jsou mnohokrát se opakující jednoduché chemické reakce. Teoreticky se mohou opakovat do nekonečna. Opakování reakce je umožněno vlivem vhodné chemické struktury výchozí látky. Existují tři druhy polyreakcí, polymerace, polykondenzace a polyadice. Výchozí nízkomolekulární sloučenině se říká monomer. Polyreakcí vznikne látka naprosto odlišných vlastností než měla látka výchozí – polymer. /1, 3/



Obr. 1: Světová spotřeba plastů dle aplikace. /3/

2.1.1 Základní rozdělení plastů

Polymery lze členit do mnoha skupin podle nejrůznějších hledisek, obvykle se však nejčastěji setkáváme s dělením dle chování při zahřívání a to na tři skupiny: 1. *termoplasty*, 2. *reaktoplasty*, 3. *pryže, kaučuky a elastomery*.

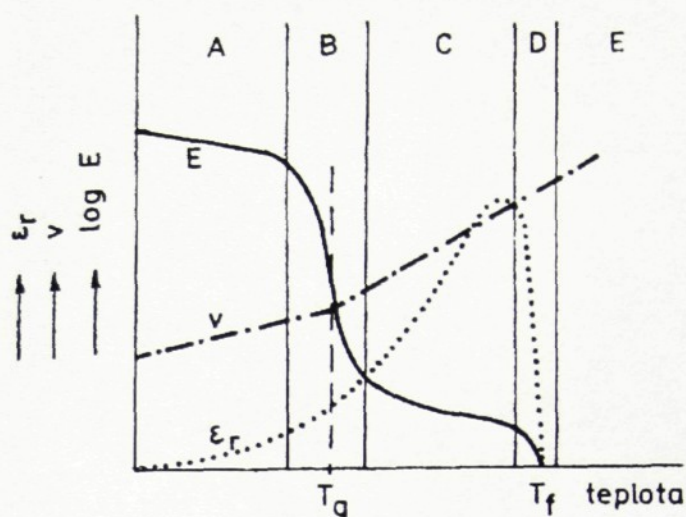
■ **Termoplasty** přecházejí zahříváním do plastického stavu, ve kterém je možné je tlakem tvářet do požadovaných tvarů. Po ochlazení pod určitou teplotu opět získávají své původní vlastnosti. To znamená, že zahřívání ovlivňuje pouze jejich fyzikální vlastnosti, chemická podstata látek zůstává stejná. Z tohoto důvodu je možné u těchto látek opakovat plastikaci a následné tuhnutí teoreticky do nekonečna.

■ **Reaktoplasty** v první fázi zahřívání také přecházejí do plastického stavu, kde je možno je rovněž tvářet, ale jen určitou dobu, neboť se zahříváním rozeběhne polyreakce, vedoucí k tvorbě prostorově zesíťované struktury. Jedná se o vytvrzování a tento děj je nevratný. Vytvrzenou hmotu nelze roztavit ani rozpustit v žádném rozpouštědle.

■ **Pryže, kaučuky a elastomery** vykazují velmi nízký modul pružnosti 1-10 MPa a velké prodloužení dosahující až 1000 %. Elastomery v první fázi zahřívání opět přecházejí do plastického stavu, kde je možné je tvářet. Dalším zahříváním dojde podobně jako u reaktoplastů k polyreakci vedoucí k zesíťované struktuře. Tento děj se nazývá vulkanizace a je to proces nevratný. Kaučuky a pryže mohou být chováním při zahřívání podobné termoplastům. Plastikaci a následné tuhnutí lze opět několikrát opakovat.
/1/

2.1.2 Vliv přechodových teplot na vlastnosti polymerů

Jak bylo zmíněno v předchozím odstavci, plasty jsou materiály, jejichž vlastnosti jsou výrazně závislé na teplotě. Například pevnost v tahu s rostoucí teplotou klesá a naopak měrný objem se zvětšuje. Tyto změny jsou většinou pozvolné, po dosažení určitých teplot se vlastnosti mění skokem. Tyto teploty, nebo lépe intervaly teplot, jsou označovány jako přechodové teploty. V první části je popsáno chování lineárních amorfních polymerů, neboť jejich struktura vykazuje vyšší homogenitu, než u plastů krystalických. Závislost některých vybraných vlastností na teplotě je znázorněna na obr.2.



Obr. 2: Závislost E, v, ε_r lineárního amorfního plastu na teplotě. /1/

Z obr. 3 vyplývá, že první skoková změna nastává v okolí teploty T_g , která je označována jako teplota skelného přechodu. Pod touto teplotou vykazuje materiál vysoký modul pružnosti, je tvrdý a křehký, nachází se v tzv. sklovitém stavu (oblast A). Brownův pohyb se zde neuplatňuje, vnější zatížení způsobí pouze mírné vychýlení segmentů molekul ze své rovnovážné polohy. Přestane-li vnější napětí působit, molekula se ihned vrátí do původního stavu.

Nad teplotou T_g je materiál ve stavu kaučkovitém, a podobně jako u kaučuků i malá napětí způsobí velkou deformaci, až několik set procent (oblast C). Při přechodu přes oblast T_g dochází k uvolňování rotačního pohybu segmentů molekul a materiál tak nabývá kaučkovitou pružností. Těsně nad teplotou T_g se uplatňuje pouze Brownův mikropohyb. Zatěžováním polymeru se molekuly z tvaru nahodile sbalených klubíček rozbalují a nabývají protaženého tvaru. Tento stav opět přetrvává po dobu působení vnější síly. Teplota zesklenní je tím nižší, čím je řetězec ohebnější a čím menší je mezimolekulární soudržnost. T_g je možné ovlivnit přidavkem např. změkčovadel - dochází k jejímu snížení. Experimentální určení T_g je technicky náročné a proto se v praxi někdy určuje teplota křehnutí T_b . Ta, spočívá v nalezení teploty, při které se těleso poruší křehkým lomem. Takto nalezená hodnota bývá mírně vyšší, než T_g .

Pokud je teplota polymeru zvyšována až do roztavení, je možno setkat se ještě s jednou přechodovou oblastí. Jedná se o teplotu viskózního toku T_f . Při přechodu přes tuto oblast ztrácí hmota své kaučukovité vlastnosti, modul pružnosti klesá na nulovou hodnotu a hmota se mění ve vysoce viskózní kapalinu. Určujícím jevem se stává Brownův makropohyb makromolekul. Nad T_f převládají nevratné deformace, avšak vlivem velkých mezimolekulárních sil si látka uchovává určitou elasticitu. Je to oblast zpracovatelnosti polymeru pro technologie, jako jsou vstřikování, vytlačování apod. /1, 2/

Zesíťované amorfní polymery vykazují mírně odlišné chování. Vlivem jejich tuhé sítě chemických vazeb jsou vyloučeny přesuny makromolekul jako celku. Z tohoto důvodu u nich lze při zvyšující se teplotě nalézt pouze náznak kaučukovité pružnosti. Modul pružnosti má stálou hodnotu a zůstává téměř konstantní až do teploty rozkladu. Po jejím překročení dojde k nenávratné změně, zpravidla spálení hmoty.

Semikrystalické polymery vykazují nejrychlejší změny vlastností v oblasti teplot charakterizované teplotou tání T_m . Při této teplotě nabude krystalová mřížka takové vibrace, že se krystality začnou rozpadat, probíhá tání krystalitů. Hmota přechází ze stavu tuhého do stavu kapalného. Vlivem polydisperzity hmoty a také nedokonalostí ve struktuře nepředstavuje T_m jednoznačnou teplotu, neboť k tání dochází v určitém teplotním rozsahu. T_m je proto nutno chápat jako střední hodnotu intervalu. Výše teploty T_m závisí na velikosti makromolekul a na velikosti mezimolekulárních přitažlivých sil. Zvyšováním obou dochází ke zvyšování T_m . U většiny krystalických polymerů je možno ztotožnit T_m a T_f . Oblast zpracování leží nad T_m . /1, 3/

Jelikož semikrystalické polymery vždy obsahují určité množství amorfních podílů, lze i u nich stanovit teplotu zesíťování T_g , charakterizovanou výraznou změnou vlastností. Tyto změny se ovšem týkají pouze amorfní části hmoty, tím pádem jsou tyto změny tím patrnější, čím nižší stupeň krystalinity hmota vykazuje.

2.2 TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ TERMOLASTŮ

Díky jejich povaze lze termoplasty v praxi zpracovávat různými technologiemi, při kterých je na materiál zpravidla působeno teplotou a tlakem. Jedná se v první řadě o vstřikování, dále pak vytlačování, vyfukování, ohýbání, tvarování, válcování, vypěňování atd.

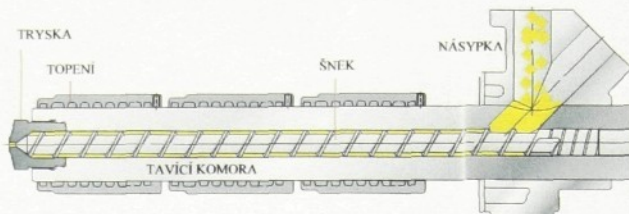
2.2.1 Vstřikování termoplastů

Vstřikování je jednou z nejběžněji používaných technologií zpracování plastů. Principem technologie vstřikování je vstříknutí roztaveného plastu vysokou rychlostí do uzavřené dutiny formy, kde dojde k jeho ztuhnutí. Po zchlazení a otevření formy je výstřik vyjmut nebo vyhazovači vyhozen z dutiny.

Mezi výhody této technologie patří zejména možnost dosáhnout opakované vysoké rozměrové a tvarové přesnosti výrobků, vysoký stupeň automatizovatelnosti a tudíž použitelnost i pro velkosériovou a hromadnou výrobu při vysoké produktivitě práce. Je možno vyrábět jednoduché i tvarově velmi složité výrobky během jedné operace a často bez potřeby následného obrábění a dalších operací, které by prodražovaly výrobu. Při vhodném uspořádání výrobního zařízení (vstřikovací jednotky stroje a vtokové soustavy formy) lze dosáhnout téměř bezodpadové výroby, kdy dojde k úspoře poměrně nákladné vstupní suroviny. Hlavní nevýhodou v porovnání s ostatními metodami zpracování plastů jsou vysoké investiční náklady, dlouhé doby nutné pro výrobu forem a potřeba používat strojní zařízení, které je neúměrně veliké v porovnání s vyráběným dílem. Vstřikování termoplastů je prováděno na vstřikovacích strojích, vstřikovacích lisech.

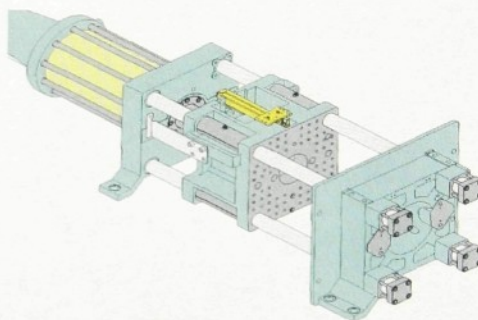
2.2.2 Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroj má dvě na sobě nezávislé jednotky a to *vstřikovací* a *uzavírací*. Úkolem **vstřikovací jednotky** je zajistit dávkování granulátu, jeho plastikaci, vstříknutí roztavené hmoty do formy, provedení dotlaku a zajištění dalších pohybů tavící komory, jako je její odsunutí od formy a přisunutí k formě. Posuv šneku i celé jednotky je hydraulický. Vstřikovací tlak, což je tlak na čele šneku, a rychlost vstřikování se regulují množstvím a tlakem přiváděné hydraulické kapaliny.



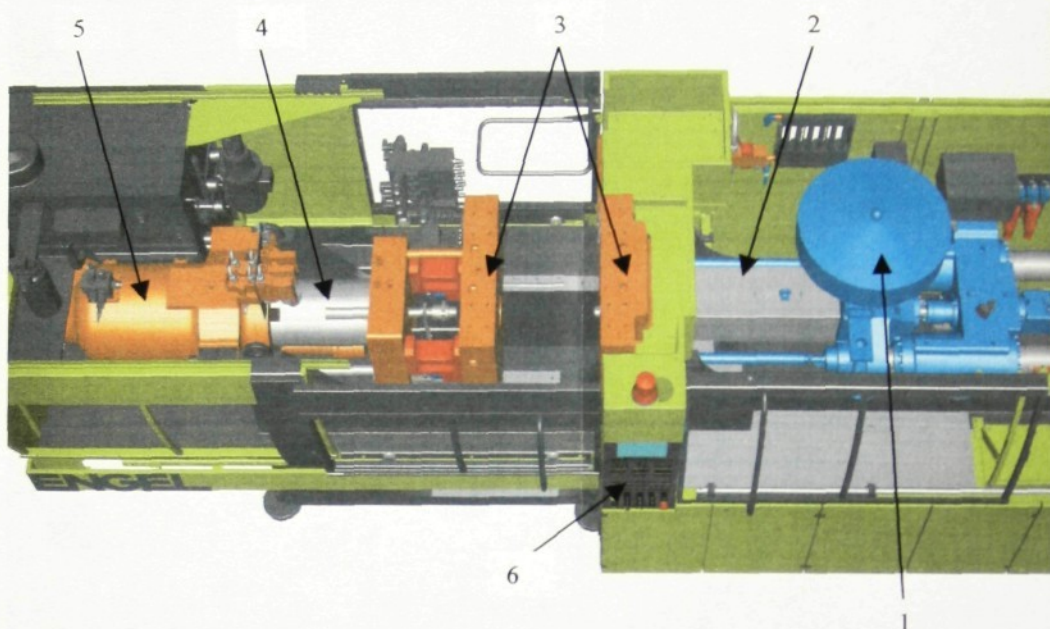
Obr. 3: Vstřikovací jednotka vstřikovacího stroje. /5/

Uzavírací jednotka stroje zajišťuje pevné uzavření vstřikovací formy během plnění a všechny pohyby formy nutné k vyhození hotového výrobku z formy.



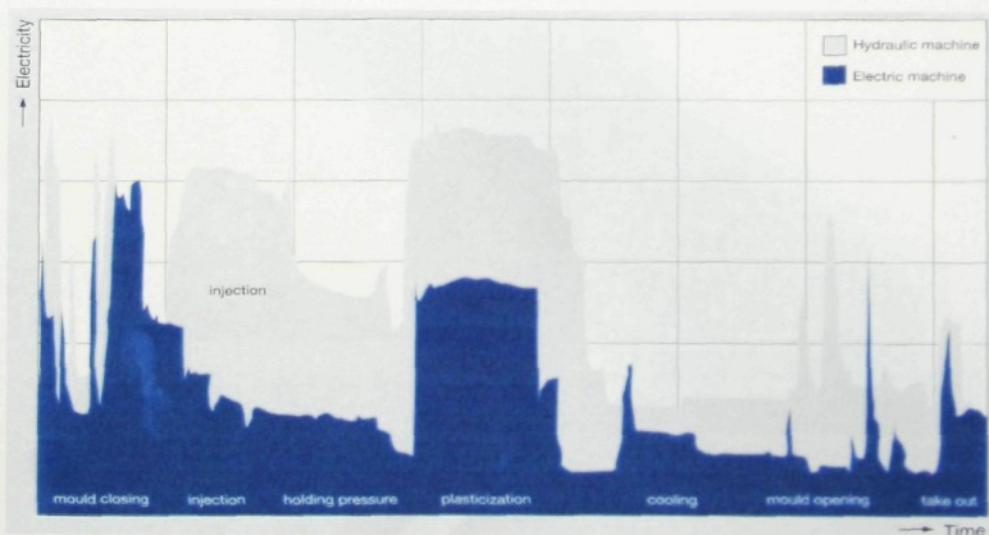
Obr. 4: Uzavírací jednotka vstřikovacího stroje. /5/

Poloautomatický, případně plně automatický provoz stroje zabezpečuje regulační a řídicí zařízení. Toto zařízení také samočinně dodržuje nastavené technologické parametry, k nimž patří teplota vstřikované taveniny, vstřikovací tlak, rychlost vstřikování, teplota formy a časové rozčlenění celého vstřikovacího cyklu. Schéma vstřikovacího stroje je na obr. 5. /1, 4/



Obr. 5: Schéma šnekového vstřikovacího stroje: 1. Násypka, 2. Vyhřívaná tavící komora, 3. Otevřená vstřikovací forma, 4. Píst ovládající uzavírání vstřikovací formy, 5. Hydromotor, 6. Ovládací panel

Vstřikovací stroje používají různé uzavírací systémy, např. hydraulické, mechanické, kombinace hydraulického a mechanického (tzv. závorování) a v současné době je se používají i stroje s ryze elektrickým systémem, a to z důvodu menší energetické náročnosti.



Obr. 6: Porovnání spotřeby energie hydraulického a elektrického stroje. /3/

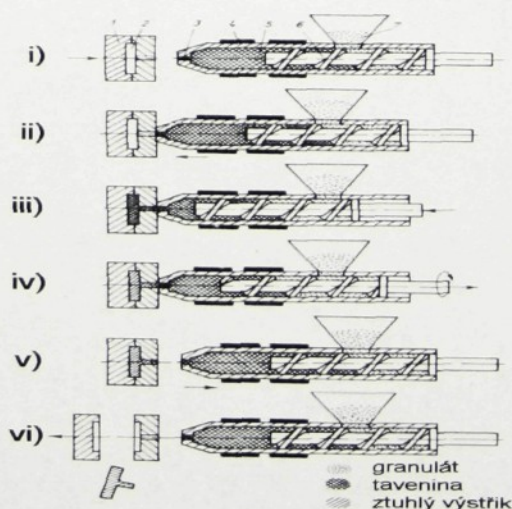
2.2.3 Princip vstřikování

Princip vstřikování termoplastů je následující: Do násypky se nasype plast ve formě granulí, odtud je odebírán otáčejícím se šnekem, který granulát dopravuje do vyhřívané tavící komory. Zde je plast roztaven a jako tavenina je vstříknut do dutiny formy, kterou zcela vyplní a zaujme přesně její tvar. Forma je kovová, chlazená protékající vodou, jež z taveniny odebírá teplo, až dojde ke ztuhnutí hmoty do takové míry, že si materiál uchová požadovaný tvar a rozměr i mimo dutinu formy. Následně se forma otevře a hotový výrobek je vyjmut, příp. vyhozen z dutiny formy. Po uzavření formy se celý cyklus opět opakuje. /1/

2.2.4 Vstřikovací cyklus

Sled všech přesně za sebou jdoucích operací nutných pro zhotovení výstřiku se nazývá vstřikovací cyklus. Počátek cyklu musí být jednoznačně definován, většinou to bývá impulsem k uzavření formy. Činnost stroje během vstřikovacího cyklu je schématicky znázorněna na obr. 5.

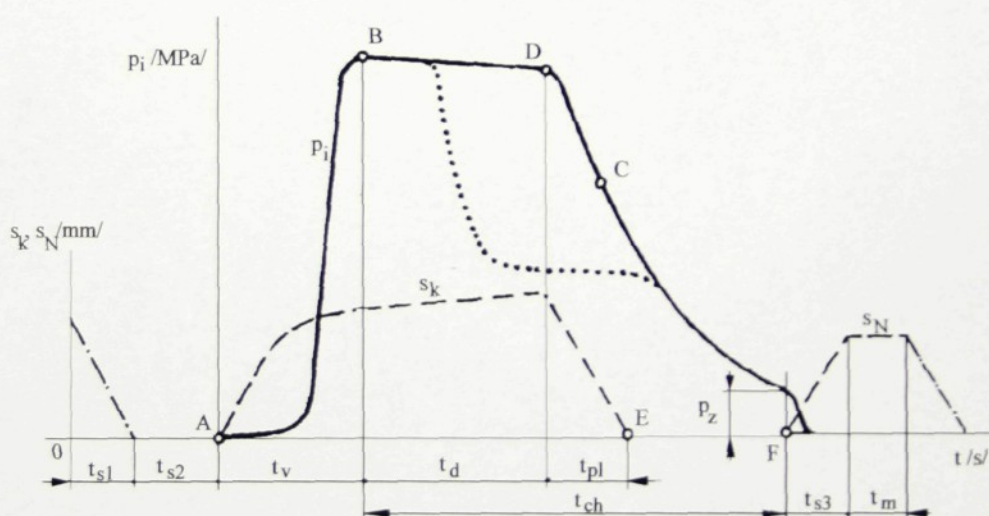
Vlastní princip vstřikování je v podstatě velmi jednoduchý, ale přesto se během něj uplatňuje celá řada faktorů ovlivňujících kvalitu výsledného dílu, produktivitu práce a s tím související ekonomickou stránku výroby. Tyto faktory lze rozdělit do tří základních skupin: vliv zpracovávané hmoty, technologických podmínek a konstrukce stroje a nástroje. /1/



Obr. 7: Schéma činnosti vstřikovacího stroje. /1/

Na obr. 7 i) značí Uzavření formy, ii) Přisunutí vstřikovací jednotky, iii) Plnění dutiny formy a dotlak, iv) Tuhnutí výstřiku a plastikace nové dávky, v) Odsunutí plastikační jednotky, vi) Otevření nástroje a vyhození výstřiku.

Vstřikovací cyklus můžeme posuzovat z hlediska zpracovávaného plastu a s výhodou jej vyjádřit jako závislost tlaku v dutině formy na době. Tento tlak se nazývá *vnitřní tlak* a značí se p_i . Kromě vnitřního tlaku existuje i *vnější tlak*, označovaný p , kterým se myslí tlak vztažený na jednotku plochy průřezu šneku. Závislost vnitřního tlaku na čase se označuje jako tlakový cyklus a je uveden na obr. 8. Plná čára na obrázku znázorňuje průběh tlaku v dutině formy během vstřikovacího cyklu, přerušovaná čára pohyb šneku a čerchovaná čára pohyb formy.



Obr. 8: Průběh vnitřního tlaku p_i v dutině formy během procesu vstřikování.

Na počátku vstřikovacího cyklu je dutina formy prázdná a forma je otevřená. V nulovém čase dostane stroj impuls k zahájení vstřikovacího cyklu. V časovém úseku t_{s1} se pohyblivá část formy přisune k pevné, forma se zavře a uzamkne. Tyto činnosti je nutné odlišit, protože na přisouvání formy se musí vynaložit jen malá *přisouvací síla* F_p , zatímco na uzamknutí je nutno vynaložit značně vyšší *uzavírací sílu* F_u (až třikrát vyšší), neboť musí být zaručeno, že se forma vlivem tlaku taveniny při vstřikování neotevře.

V časovém úseku t_{s2} se k formě přisune tavicí komora. Úseky t_{s1} a t_{s2} představují tzv. *doby činnosti stroje*.

V okamžiku A se dává do pohybu šnek v tavicí komoře a začíná vlastní vstřikování roztavené hmoty do dutiny vstřikovací formy. V této fázi šnek vykonává pouze axiální pohyb, neotáčí se a vlastně plní funkci pístu.

Doba, během níž probíhá plnění dutiny formy se nazývá *doba plnění* nebo doba vstřikování a značí se t_v . Po naplnění formy je tavenina v dutině ještě stlačena a tlak dosáhne maximální hodnoty. Tento děj je ukončen v bodě B . Jakmile tavenina vstoupí do dutiny formy, ihned začne předávat teplo vstřikovací formě a chladne.

Chlazení trvá až do otevření formy a vyjmutí výstřiku a tato doba se nazývá *doba chlazení* a je označena t_{ch} . V praxi se dělí na dobu chlazení při plném vstřikovacím tlaku a na dobu chlazení při klesajícím tlaku. Doba chlazení je závislá na teplotě formy T_F a tloušťce stěny výrobku.

Během chladnutí se hmota smršťuje a zmenšuje svůj objem a aby se na výstřiku netvořily staženiny, je nutno zmenšování objemu kompenzovat dodatečným dotlačením taveniny do dutiny formy. Tento úsek cyklu se nazývá *doba dotlaku* a značí se t_d . Dotlak může být po celou dobu stejně vysoký jako maximální tlak nebo se může po několika sekundách snížit a další chladnutí probíhá při sníženém tlaku. Dotlak se proto rozděluje na izobarický a izochorický. Abychom mohli dotlačovat, musí před čelem šneku zůstat určitý objem plastu - *polštář*, na který bude šnek působit svým čelem. Tento objem nesmí být moc velký (obvykle kolem 10 až 15 %), aby nedocházelo k tepelné degradaci hmoty. Doba dotlaku končí v bodě D , kdy začíná *doba plastikace* t_{pl} nové dávky plastu. Šnek se začne otáčet, pod násypkou nabírá granulovanou hmotu, plastikuje ji a vtlačuje do prostoru před čelem šneku. Současně ustupuje dozadu, přičemž musí překonávat tzv. *protitlak* neboli zpětný tlak. Výška protitlaku ovlivňuje dobu plastikace a tím i kvalitu prohnětení roztaveného plastu. Příliš vysoký protitlak by však mohl způsobit až degradaci plastu. Ohřev plastu během plastikace se děje jednak převodem tepla ze stěn válce, jednak frikčním teplem, které vzniká třením plastu o stěny komory a o povrch šneku a dále přeměnou hnětací práce

šneku v teplo. Jestliže je tavicí komora opatřena samouzavíratelnou tryskou, může plastikace probíhat i při otevřené formě.

Z hlediska vlastností výstřiku je důležitý bod C , označující okamžik zatuhnutí roztavené hmoty ve vtokovém kanálu. Vtokový kanál spojuje dutinu formy s dutinou tavicí komory a dokud je hmota v kanálu ve stavu tekutém, může vstřikovací jednotka ve fázi dotlaku ovlivňovat tlakové poměry v dutině formy. Zatuhnutím hmoty se však spojení mezi tavicí komorou a dutinou formy přeruší a další prodlužování dotlaku se stane bezúčelné. Doba dotlaku tedy skončí nejpozději v bodě C , kdy body D a C splynou v jediný, anebo může skončit ještě před úplným zatuhnutím vtoku. To má potom za následek rychlejší pokles tlaku ve formě, protože nepatrné množství taveniny může vlivem přetlaku v dutině formy vytéci zpět kanálem do tavicí komory. Plastikace je skončena v bodě E a dále může a nebo nemusí následovat odsunutí tavicí komory od formy, označené jako t_k . Během pokračujícího chlazení tlak ve formě dále klesá až na hodnotu zbytkového tlaku p_z , což je tlak, pod nímž se hmota, pochopitelně již ztuhlá, nachází ve formě těsně před jejím otevřením. Příliš vysoký zbytkový tlak je příčinou vysokých vnitřních pnutí ve výstřicích, které u křehkých hmot mohou způsobovat až samovolné praskání výstřiku. Zbytkový tlak lze snížit buď zkrácením doby dotlaku anebo programovaným průběhem tlaku během dotlaku, jak je na obr. 2 znázorněno tečkovanou čarou. Po dokonalém zchladnutí výstřiku se forma otevře (bod F) a výstřik se vyhodí z formy. Na tuto operaci je potřeba *strojní doba* t_{s3} . Je-li výstřik vyjímán z formy manipulátorem, je k tomu navíc vymezena *manipulační doba* t_m . Ta je určena i k případné další činnosti, např. ke vkládání kovových záložek do formy, k očištění formy apod. /5/

2.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU VÝROBKŮ

Výsledné vlastnosti výstřiku ovlivňuje mnoho faktorů. Mezi hlavní a základní patří druh plastu, technologické podmínky vstřikování a konstrukční řešení formy. Vyskytnou-li se v praxi problémy při výrobě určitého dílu, je snaha vyřešit je přednostně změnou materiálu nebo vhodnějším nastavením technologických parametrů, protože tato změna není finančně nákladná. Oproti tomu zásah do nástroje, čili vstřikovací formy, by měl představovat až tu nejkratnější volbu, neboť finanční náročnost je nesrovnatelně vyšší.

2.3.1 Vliv materiálu

Od zpracovávaného materiálu se očekávají jednak dobré zpracovatelské vlastnosti a jednak schopnost umožnit výrobu kvalitních výrobků s požadovanými vlastnostmi. Mechanické a jiné vlastnosti výstřiku jsou určeny především druhem plastu. Výběr druhu plastu do jisté míry ovlivňuje také technologické podmínky vstřikování, konstrukční řešení nástroje a volbu stroje. Z hlediska zpracovatelnosti má hmota umožňovat dosažení homogenní taveniny v co nejkratším čase. Ke zpracování se používá hmota ve tvaru granulí, tzv. granulát. Jednotlivé granule mají mít vhodný tvar a stejnou velikost. V praxi se nejčastěji používá granulát ve tvaru válečků o průměru 1-3 mm a délce 3-5 mm. Tento tvar umožňuje snadnou dopravu potrubím ke stroji, propadávání granulátu násypkou a zároveň je snadno odebírán rotujícím šnekem.

Z technologického hlediska je velmi důležitou vlastností **tekutost**, která rozhoduje o tom, bude-li požadovaný tvar výstřiku vyrobitelný. **Zabíhavost**, či tekutost hmoty, lze ovlivnit teplotou taveniny, neboť rostoucí teplota má za následek pokles viskozity.

Další faktory ovlivňující zabíhavost jsou: vstřikovací tlak, teplota formy a vtokový systém. Pro zpracování není vhodné, mění-li se tekutost s teplotou příliš rychle, neboť to zvyšuje nároky na přesnost regulace. Pro vlastní vstřikování je nežádoucí úzký interval teplot, v němž hmota přechází ze stavu sklovitého do stavu viskózní kapaliny, neboť při styku s chlazenou stěnou formy rychle ztrácí tekutost a výsledkem je nedostříknutý zmetek.

Druhá důležitá vlastnost je dostatečná **tepelná stabilita** v celém rozsahu zpracovatelských teplot. Tento interval je zespoda vymezen teplotou, při níž se hmota mění ve viskózní kapalinu a seshora teplotou rozkladu. Plasty, organické sloučeniny, se při určité teplotě, závislé na chemickém složení, začínají rozkládat. To se projeví zhoršením mechanických vlastností hmoty, zpravidla křehnutím. Stupeň degradace závisí na teplotě, které je polymer vystaven a na době jejího působení. Pro zpracování je samozřejmě žádoucí, aby měl materiál co nejširší teplotní oblast zpracování a umožnil tím dostatečnou variabilnost zpracovatelských podmínek.

Dosažitelná rozměrová přesnost výroby závisí na smrštění výstřiku a proto je žádoucí, aby hmota vykazovala kontrolovatelnou míru **smrštění** (změna rozměrů výrobku oproti rozměrům tvarové dutiny formy). Po ztuhnutí by měl výstřik vykazovat minimální vnitřní pnutí. Zcela logický je požadavek na snadné vyjímání hotového výrobku z formy, to znamená, že se hmota nesmí na stěnu formy lepit. Ve specifických případech je možno požadovat dodržení optických vlastností, stálost barevného odstínu, atd.

2.3.2 Vliv hlavních technologických parametrů

Při výrobě dílů technologií vstřikování ovlivňuje kvalitu výsledného výstřiku celá řada činitelů. Vliv jednotlivých faktorů nelze posuzovat izolovaně, neboť spolu navzájem úzce souvisejí. Nejvýznamnější technologické veličiny jsou vstřikovací tlak, teplota taveniny, teplota formy, rychlost plnění dutiny formy, výše a doba trvání dotlaku.

2.3.2.1 Vstřikovací tlak

Vnější vstřikovací tlak je takový tlak, kterým působí plocha čela šneku na taveninu v tavící komoře. Rozhodující vliv, z hlediska kvality výstřiku, má ovšem vnitřní vstřikovací tlak p_i , který se pohybuje přibližně v rozmezí 30 až 100 MPa. Snížením vstřikovacího tlaku dojde k poklesu rychlosti plnění dutiny formy, dále může dojít ke vzniku nedostříknutého dílu. Vyšší vstřikovací tlak má za následek větší potřebnou uzavírací sílu.

2.3.2.2 Teplota taveniny

Vedle tlaku je další velice důležitou veličinou teplota taveniny. Její změnou je možno snadno měnit zabíhavost plastu. Každý plast je možno vstřikovat při určitém teplotním intervalu. Na teplotě závisí rychlost plnění dutiny formy (díky změně tekutosti), která má být co nejvyšší. Obecně platí, že vyšší teplota taveniny díky větší tekutosti polymeru umožňuje použít nižší vstřikovací tlak a tím pádem dosáhnout menšího vnitřního pnutí ve výrobku. Zvýšení teploty taveniny má ale za následek prodloužení doby chladnutí a zvětšení smrštění. Současně je velice důležitá teplotní homogenita taveniny. Homogenita závisí na konstrukci šneku a na době, po kterou je hmota ve styku se stěnou tavící komory. Zvyšováním teploty taveniny se snižuje

viskozita taveniny, důsledkem čehož se sníží tlakové ztráty v tavící komoře, vtokových kanálech a dutině formy. To způsobí zvýšení tlaku v dutině formy a dotlaku při konstantní hodnotě hydraulického vstřikovacího tlaku. /1/

2.3.2.3 Teplota formy

Vstřikovací forma má za hlavní úkol dát tavenině požadovaný tvar a ochladit ji na teplotu, při které je možno výstřik z formy vyjmout bez nebezpečí jeho deformace. Teplota formy v největší míře ovlivňuje zabíhavost, rychlost a dobu chladnutí, vzhled povrchu součásti(lesk), a další vlastnosti výstřiku. Je nutné volit kompromis mezi ekonomicky výhodnou nízkou teplotou a technologicky výhodnou(hlavně u semikrystalických plastů) vysokou teplotou. Vyšší teplota formy má za následek rovnoměrnější chladnutí a tím pádem vznikne méně vnitřního pnutí a celý výrobek je tak rozměrově stabilnější a má lepší mechanické vlastnosti. Dále také umožní dosažení požadovaného efektu při nižší teplotě taveniny a tím pádem snížíme riziko degradace polymeru.

2.3.2.4 Rychlost plnění dutiny formy

Rychlost plnění dutiny formy se snažíme volit co největší, aby byla dutina formy zaplněna v co možná nejkratším čase. Teplota formy je nižší, než teplota tuhnutí taveniny a proto přiváděný plast při styku s chladnou stěnou ihned ztuhne a na stěně vytvoří nepohyblivou vrstvu. Tato vrstva vykazuje oproti dutině formy výrazně menší teplotní vodivost a chová se tak jako tepelný izolátor. Uvnitř dutiny je zachována tekutá zóna hmoty, která umožňuje další plnění. Tuto zónu označujeme jako plastické jádro. Tavenina je další dávkou hmoty tlačena do vzdálenějších míst formy.

Rychlost čela proudu taveniny by měla být pokud možno konstantní, aby došlo k rovnoměrnému plnění dutiny formy s minimálními tlakovými ztrátami. Konstantní rychlost čela odpovídá pro jednoduché výstřiky konstantní rychlosti posuvu šneku. Pro tvarově složité výstřiky je výhodné průběžně měnit rychlost posuvu šneku. Ideálně má mít rychlost taveniny v počátku plynulý náběh, aby nedošlo ke vzniku velké povrchové orientace, vnitřního pnutí a viditelných tokových čar. V okolí velkých jader je vhodná vyšší rychlost proudění, neboť tím zabráníme vzniku studených spojů. Ke

konci procesu plnění dutiny formy je výhodné rychlost opět snižovat a tak usnadnit unikání stlačeného vzduchu z formy. /2/ Při plnění formy je také nutno kontrolovat teplotu taveniny, aby nedošlo k degradaci materiálu.

2.3.2.5 Dotlak

Po naplnění dutiny formy nastane stlačování hmoty uvnitř. Dojde k prudkému nárůstu vstřikovacího tlaku a současnému snížení vstřikovací rychlosti. Ponechali-li bychom tlak v hydraulickém válci ovládajícím posuv šneku na původní vysoké hodnotě, vznikla by ve formě tzv. tlaková špička. Jejím důsledkem by došlo ke zvýšení hmotnosti výstřiku, zvětšení jeho rozměrů, vzniku přetoku, ale také k nadměrnému namáhání formy, které by mohlo vést až k jejímu pružnému prohnutí, tzv. dýchnutí formy. Aby se zabránilo těmto nežádoucím jevům, je nutné v určitém okamžiku, ještě před dosažením tlakového maxima, snížit tlak ve formě a přepnout na dotlak. Dojde-li k tomuto přepnutí příliš pozdě, dojde k přeplnění formy se všemi výše zmíněnými negativy. Naopak, přepne-li se na dotlak příliš brzy, bude rozměr a hmotnost výstřiku v důsledku nízkého tlaku ve formě menší. Dotlak má za úkol vtlačit do formy taveninu v takovém množství, aby kompenzoval její úbytek v důsledku smrštění materiálu během chladnutí. /1/

2.3.3 Vliv přísad na vlastnosti výrobků

Plasty jako moderní konstrukční materiál jsou využívány pro jejich různé příznivé vlastnosti, avšak plasty mají také některé záporné, pro praxi nevýhodné vlastnosti. Mezi hlavní patří hořlavost, vznik elektrostatického náboje na povrchu, malá odolnost vůči degradaci(stárnutí), malá houževnatost a tvrdost, nepěkný vzhled. Tyto nedostatky plastů je možno částečně nebo někdy i zcela úplně eliminovat. Děje se tak použitím přísad, aditiv.

2.3.4 Požadavky kladené na aditiva

Použitím aditiv sledujeme celkové zlepšení vlastností výrobků. Aby tohoto cíle bylo dosaženo, musí aditiva zajišťovat stabilitu při provozních podmínkách, plnit požadovanou funkci, nesmí proznačovat na povrchu součástí, měla by být bez chuti, zápachu a netoxické, bez nežádoucích vlivů

na vlastnosti polymeru. Zároveň by jejich použití mělo přinést snížení hmotnosti, ekonomickou úsporu a urychlení reakcí.

2.3.5 Rozdělení aditiv

Aditiva je možno dělit podle mnoha různých hledisek. Pro technologii zpracování plastů se jako výhodné jeví rozdělení podle požadovaného účinku přísady.

Plniva jsou látky pevného skupenství, které mohou mít různou formu (vlákna, prášek, tkanina,...), které se dále dělí na plniva s vyztužujícím účinkem a nevyztužující.

Vyztužující plniva mají za úkol zvýšit mechanické vlastnosti materiálu. Jsou to např. skelná, kevlarová, uhlíková vlákna a to jak volná, tak ve formě tkaniny, dále pak různé typy textilií, rohoží apod.

Nevyztužující plniva sledují jako hlavní cíl snížení nákladů na materiál tím, že část drahého plastu je nahrazena přísadou levného plniva ve formě prášku. Mezi nejčastěji používaná patří mletý mastek, talek, břidlice, křída...

Změkčovadla jsou látky, které zvyšují pohyblivost makromolekul což má za následek změnu chování materiálu tak, že z původně tvrdého a křehkého se změní na měkký a ohebný. Změkčovadla posouvají teplotu skelného přechodu materiálu T_g směrem k nižším hodnotám.

Maziva jako přísada mají dvě hlavní funkce. Maziva **s vnějším účinkem** se užívají u silně lepivých plastů tam, kde je obtížné díky velké lepivosti vyjmout, popř. vyhodit ztuhlý výrobek z dutiny formy. Tato maziva jsou v polymeru nerozpustná. Maziva **s vnitřním účinkem** mají za úkol zlepšit tekutost taveniny a tím zlepšit zpracovatelnost materiálu.

Stabilizátory. Tam, kde je plast vystaven působení slunečním paprskům je vhodné přidat **UV** stabilizátory, které svými antidegradační účinky zpomalí stárnutí výrobku a prodlouží jeho životnost. Je-li součást vystavena zvýšeným teplotám, přidavkem **tepelných** stabilizátorů omezíme jejich nepříznivý vliv. V tomto případě je vhodné přidat do plastu i **antioxidant**, který zabrání reakci molekul plastu se vzdušným kyslíkem a tím narušení struktury materiálu.

Nadouvadla. U některých materiálů (např. PS) je možné při zpracování docílit mnohonásobného zvětšení objemu a tím získat velmi lehké, tzv. vypěněné nebo lehčené výrobky.

Retardéry hoření je vhodné přidat do plastu všude tam, kde by jeho hořlavost mohla působit negativně. Plast s přídavkem retardéru hoření má sníženou hořlavost a po oddálení plamene sám zhasne.

Barviva. Jednou z mnoha výhod plastů je to, že je možné docílit mnoha barevných odstínů a efektů právě přídavkem barviv. Barviva jsou buď **anorganická** (sloučeniny kovů..Cr, Ti, Fe), nebo **organická** pro průhledné plasty. V praxi se buď použije již obarvený granulát, nebo se k neobarvenému granulátu přidá určité množství granulí barviva (masterbatch).

Další přísady. Mezi další používané přísady patří např.: grafit, který snižuje koeficient tření, kovové prášky, které vnesou do plastu elektrickou vodivost a zlepši tepelnou vodivost, skleněné kuličky, které v pryskyřicích zvýší tvrdost a pevnost. Do reaktoplastů jsou ještě přidávány iniciátory a urychlovače polyreakcí, tvrdidla.

2.4 NANOKOMPOZITY

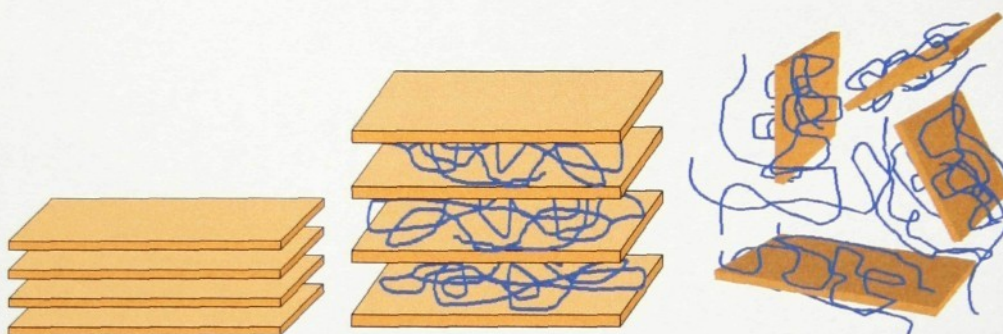
2.4.1 Úvod

K vyztužení kompozitů je užíváno mnoho materiálů. Velmi rozšířená jsou vlákna. Pro vyztužení polymerních matricí jsou též používány materiály globulárního nebo vločkovitého tvaru. Vyvinula se poměrně nová oblast kompozitů, ve které se k vyztužení používají částice o rozměru menším nebo rovném 1nm. Takový kompozit je nazýván nanokompozitem. V nedávné minulosti bylo vyvinuto pouze malé množství komerčně využitelných nanokompozitů, ale jejich potenciál odstartoval bouřlivý výzkum v této oblasti.

/6/

2.4.2 Systémy polymer/jíl

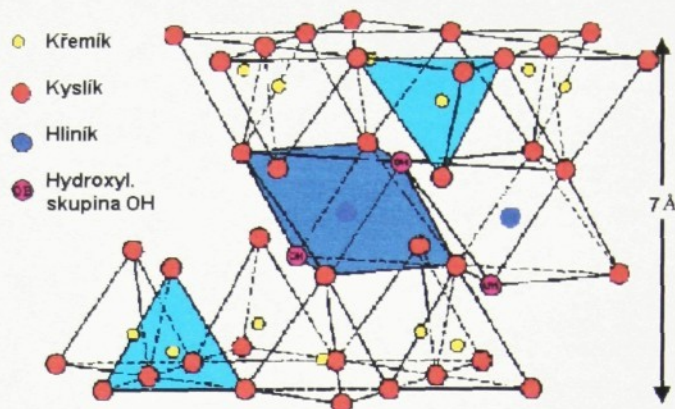
Existuje několik druhů nanokompozitů. Obecně jsou charakterizovány tím, že vyztužující fáze má alespoň jeden z rozměrů v řádu 1nm. V současnosti nejintenzivněji zkoumaný druh nanokompozitů používá jako vyztužující fázi vrstevnaté minerální jíly. Tyto materiály se těší velkému zájmu vědecké i zpracovatelské komunity a to díky dostupnosti daného typu plniva a jeho uplatnění v komoditních polymerech. Mezi neužitečnější jíly v této souvislosti patří ty, jejichž struktura je schopna přijmout malé molekuly, a tak nabobtnat. Jeden takový jíl se nazývá montmorillonit. /6/



Obr. 9: Struktura montmorillonitu(vlevo), interkalovaného(uprostřed) a exfoliovaného nanokompozitu. /6/

Jíl montmorillonit přirozeně vytváří shluky mající destičkovitou strukturu. Každá destička má tloušťku menší než 10 Angströmů(Å), ale je více než 200x širší. Prostory mezi těmito destičkami se nazývají galeriové prostory. Destičkovité útvary jsou extrémně tenké, takže velmi malé množství jílu má neúměrně velkou plochu povrchu.

Při správných podmínkách mohou být galerijní prostory vyplněny monomerem, oligomerem nebo polymerem. Takto dojde ke zvětšení vzdálenosti mezi jednotlivými destičkovitými útvary a nastane nabobtnání jílu. Destičkovité částice jílu nabobtnané polymerem se nazývají interkalované(vmezeřené). Pokud jíl nabobtná tak, že již nadále nemá organizovanou vrstevnatou strukturu, říkáme, že je exfoliován(dojde k odloupení jednotlivých vrstev).

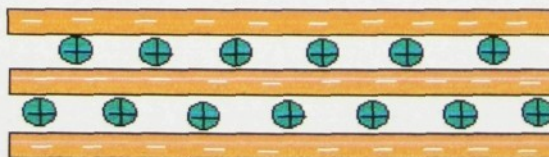


Obr. 10: Atomová stavba montmorillonitu. /6/

Destičkovitý útvar jílu se skládá z jednotek oxidu křemíku (zvýrazněny světle modře) a jednotek oxidu hliníku (zvýrazněny tmavě modře). Tato struktura se opakuje neurčitě dlouho ve dvou osách, ve směru zleva doprava a ve směru předozadním (vystupujícím z nákresny). Tvoří tak ploché, velmi tenké destičkovité útvary.

2.4.2.1 Modifikace montmorillonitového jílu

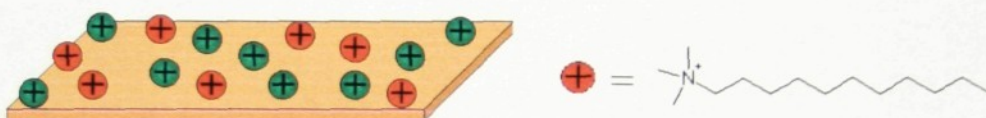
Montmorillonit a další vrstevnaté křemičité jíly jsou od přírody silně hydrofilní (mají schopnost přijímat vodu). Kvůli této vlastnosti jsou velmi nevhodné ke směšování a vzájemnému interakci s většinou polymerních matricí. Kromě toho, shluky jílových destiček jsou pevně drženy pohromadě elektrostatickými silami. Jak je vidět na obrázku č. 11, opačně nabité ionty jsou přitahovány k síti negativního náboje uvnitř destičkovitého útvaru. Opačně nabité ionty mohou být sdíleny dvěma sousedními destičkami, což má za následek to, že jednotlivé destičky jsou pevně drženy pohromadě ve shlucích.



Obr. 11: Princip vazby částic v mezivrství. /6/

Z těchto důvodů musí být jííl upraven před tím, než je možno ho použít k výrobě nanokompozitu. Shluky destiček jsou mnohem větší než 1 nm ve všech třech směrech. Výroba kompozitu z takto neupraveného jíilu by měla za následek velmi neefektivní využití materiálu, protože většina jíilu by byla slepena uvnitř shluků a neměla by tak možnost interakce s matricí.

Populární a relativně snadnou metodou modifikace povrchu jíilu, za účelem zvýšení jeho kompatibility s organickou matricí, je výměna iontů. Kationty nejsou silně vázány k povrchu jíilu a tak mohou být nahrazeny kationty malých molekul. Například na obrázku č.12 jsou zelené ionty sodíku. Některé z nich byly nahrazeny jinými kationty. /6/



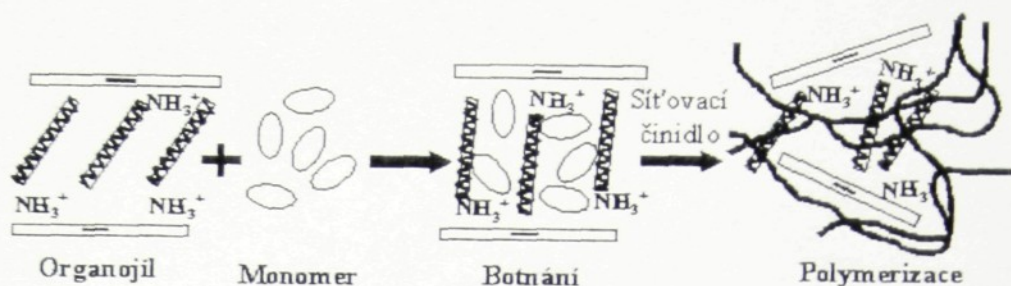
Obr. 12: Modifikace povrchu jíilových destiček. /6/

Pokud budou červenou barvou označené kationty čtyřmocné ionty dusíku s dlouhými alkylovými řetězci, pak takto upravený jííl bude mnohem kompatibilnější s organickou matricí. Tím, že nahradíme ionty přítomné v neupraveném jíilu různými jinými ionty, může být montmorillonitový jííl kompatibilizován se širokou škálou polymerních matric. Zároveň tento proces pomáhá separovat jednotlivé destičky takže mohou být snadněji interkalovány nebo exfoliovány. Z interkalovaných nebo exfoliováných jíilů je pak možné připravit nanokompozity. /6/

2.4.3 Základní principy přípravy nanokompozitů typu polymer/jííl

Obecně jsou známy 3 hlavní způsoby přípravy nanokompozitů a to polymerace in-situ, roztoková polymerace a příprava nanokompozitů mícháním taveniny polymeru. V současnosti věnuje akademická obec velkou pozornost poslední jmenované technice, což je dáno její jednoduchostí a možnostmi využití stávajícího strojního vybavení při přípravě nanokompozitů.

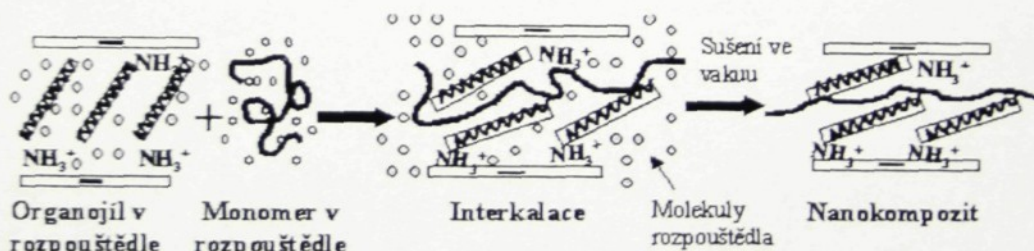
2.4.3.1 Polymerizace In-situ



Obr. 13: Polymerizace in-situ. /7/

Dnes představuje běžný proces pro přípravu nanokompozitů. V prvním kroku je organofil nabobtnán v monomeru. Následuje přidavek síťovacího činidla u termosetů a samotná polymerizace. Polymerizace může být zahájena např. tepelným působením, radiačně, difúzí iniciátoru do mezivrství, apod. Touto technikou lze vyrobit např. nanokompozity na bázi nenasycených polyesterů, polyuretanů, polystyrenu.

2.4.3.2 Roztoková polymerace



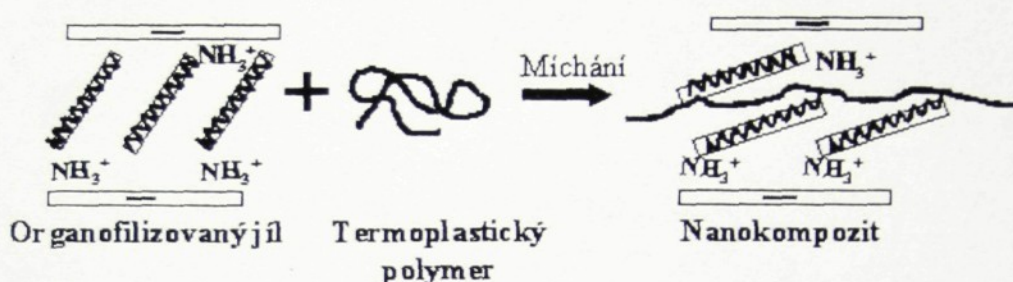
Obr. 14: Roztoková polymerace. /7/

Postup je podobný polymeraci in-situ s tím rozdílem, že místo monomeru je použito rozpouštědlo vhodné pro daný typ polymeru. Organofil je dispergován v polárním rozpouštědle např. toluenu, kde dochází k jeho nabobtnání. Následně je v daném rozpouštědle rozpuštěn polymer. Oba roztoky se smísí a dochází k interkalaci mezi vrstvy organofilu. posledním krokem je odstranění rozpouštědla. Vrstvy jilu se následně znovu seskupí a polymerní řetězce se zafixují v mezivrství. Vzniká tak mnohvrstevná struktura - interkalované nanokompozity. Roztokovou polymeraci je možné

použit například pro přípravu nanokompozitů na bázi polyethylénu nebo polyimidu.

Výhodou je možnost přípravy nanokompozitů, jejichž základem jsou jen málo polární nebo nepolární polymery. Nevýhodou je však použití rozpouštědla, které musí být následně odstraněno a to jak z ekologického tak i z ekonomického hlediska.

2.4.3.3 Míchání taveniny polymeru



Obr. 15: Příprava nanokompozitů mícháním taveniny polymeru. [7]

Podstata tohoto způsobu přípravy nanokompozitů spočívá v míchání roztaveného termoplastu s upraveným organojílem a následném ochlazení směsi (viz obr. 15). V současnosti je výzkumnými týmy připravováno velké množství kompozitů typu polymer jíł od silně polárních PA6 až po polystyren. Problémy přetrvávají u nepolárních polymerů jako je polyetylén a polypropylen. Tímto způsobem lze připravit jak exfoliované tak interkalované struktury. Tento postup je velmi přitažlivý z důvodu jeho jednoduchosti a snadného použití v průmyslu s využitím stávajícího strojního zařízení. Což je ovšem zapláceno velkou obtížností v nalezení způsobu optimální modifikace na mezifázovém rozhraní polymer/jíł. Toto činidlo hraje klíčovou úlohu v procesu přípravy nanokompozitních systémů polymer/jíł. [7]

2.4.4 Princip funkce nanokompozitů

Výrobci kompozitů jsou si dobře vědomi výhod plniva s velkým poměrem ostatních rozměrů ku tloušťce, ale pouze nedávno věda a průmysl objevily efekt kombinace velkého poměru rozměrů plniva a zároveň nano rozměrů. Protože se velikost částice několika nm řádově blíží velikosti

molekuly matrice, je umožněno velmi blízké střetnutí obou materiálů za předpokladu, že povrch částic jílů je důkladně povrchově modifikován. Interakce mezi částicí a molekulou vytváří na povrchu částice vázanou oblast, která znemožní pohyb části polymerní matrice. Uvážíme-li, jak velké množství jednotlivých částic je k dispozici pro interaktivní spojení, může souhrnné procento vázaného polymeru dosáhnout vysokých hodnot. Například u polyamidové matrice může přesáhnout 60% celé matrice. /8/

2.4.5 Nanoblend koncentráty

Nanoblend koncentráty jsou vysoce funkční materiály založené na nanokompozitní technologii. Nové koncentráty nahrazují tradiční minerální nebo skelná plniva a aditiva zvyšující odolnost proti hoření u široké škály směsí. Nanojíly jsou velmi jemné částice o velikosti v řádech nanometru, a tvoří přibližně 40 hm.% Nanoblend koncentrátu. Tento koncentrát napomáhá začlenění a rozptýlení jílu a tím vytvoření nanokompozitní struktury během konečného zpracování. Jemné částice jílu jsou rozptýleny v termoplastické matrici a tvoří tak snadno zpracovatelný granulát.

Použití Nanoblend koncentrátů pomáhá překonat některé dřívější obtíže, které se vyskytly při pokusech inkorporovat nanojíly přímo do směsi. Tento koncentrát je produkt, který může být použit v širokém spektru procesů aniž by bylo nutno dělat ústupky u procesních parametrů. Nanokompozity zlepšují fyzikální vlastnosti polymeru a mohou redukovat množství přísad potřebné k dosažení požadovaných kvalit materiálu a tudíž i snížit celkovou hmotnost v porovnání s tradičními materiály.

Při správné volbě kopatibilizujících chemikálií lze dosáhnout toho, že dochází k jedinečné interakci mezi destičkami nanojílu a polymerem. Aplikace v oblasti obalů zahrnují fólie jak obyčejné, tak i vhodné pro styk s potravinami, a tuhé kontejnery. Co se týče použití v oblasti inženýrských aplikací, tyto materiály připadají v úvahu pro širokou škálu automobilních a průmyslových součástí, kde se využije nízké hmotnosti, odolnosti proti nárazu a poškrábání a proti deformaci v důsledku tepla. /8/



Obr. 16: Příklad použití nanokompozitů – panel zadní čtvrtiny vozu

CADILLAC ESCALADE. /16/

2.4.5.1 Zpracování Nanoblendů

Jednou z největších výhod zpracování nanojílů je to, že není potřeba vynakládat prostředky na zakoupení speciálního vybavení nebo významně měnit podmínky výroby. Ve skutečnosti v mnoha případech mohou být nanojíly snadněji zpracovatelné na stávajícím zařízení než jiná, tradičnější aditiva. Při zpracování technologií vstřikování lze použít standardní stroj na zpracování polyolefinů. Technologické podmínky nejsou závislé na hmotnostním obsahu nanokompozitu v termoplastické matrici. Vstřikovací teplota však nesmí překročit 230°C, jinak by došlo k tepelné degradaci materiálu. Nanoblend koncentráty jsou připraveny s nízkým obsahem vlhkosti a není proto nutno je před zpracováním sušit. V případě, že byl materiál po delší dobu vystaven zvýšené vlhkosti, stačí použít rychlé povrchové sušení při teplotě 80°C po dobu 1 hodiny.

2.4.5.2 Výhody Nanoblend kompozitů

Všeobecně, nanokompozity vykazují přírůstek nepropustnosti, odolnosti proti hoření, strukturálních a tepelných vlastností, avšak bez znatelného snížení rázové odolnosti nebo čírosti. Protože jednotlivé destičky

mají rozměry v jednom směru v řádech nanometrů, jsou exfoliované nanojíly ve většině polymerních systémů transparentní. Nicméně, protože rozměry povrchu dosahují až 1 mikrometru, pevně svázaná struktura s polymerní matricí je neproniknutelná pro plyny a kapaliny a nabízí tak vyšší bariérové vlastnosti než čistý polymer. Nanokompozity rovněž představují vylepšenou odolnost proti hoření a nalézají narůstající použití v oblasti technických plastů. /8/



Obr.17: Principiální rozdíl propustnosti pro plyny a kapaliny u klasických materiálů (vlevo) a nanokompozitů. /9/

U jednotlivých typů plastů a při konkrétní technologii zpracování dochází při použití nanokompozitních materiálů ke zlepšení některých pozitivních vlastností:

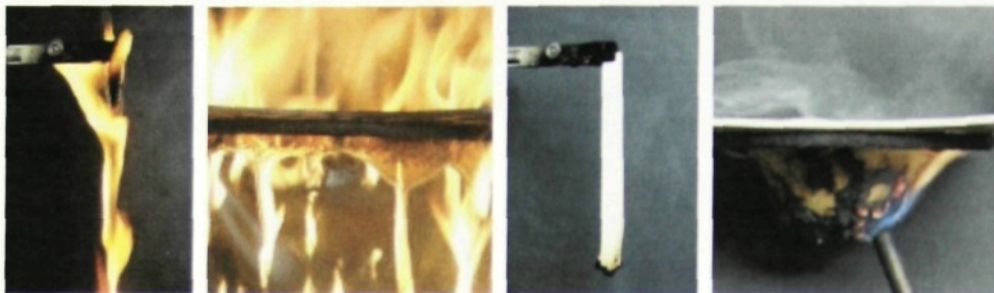
Polyamid 6: fólie a láhve - nepropustnost pro kyslík, CO₂, vodní páry, tepelná stabilita, tuhost, čírost

výstřiky – tepelná stabilita, redukce smrštění a zkroucení, tuhost, odolnost proti rozpouštědlům, nepropustnost paliva, odolnost proti hoření, redukce hmotnosti, snížení příměsí skelných vláken, tenkostěnnost

PET: vícevrstvé filmy a láhve – nepropustnost pro kyslík a CO₂

Polyolefiny: fólie a láhve - nepropustnost pro kyslík a CO₂, tepelná stabilita, tuhost

výstřiky – tepelná stabilita, redukce smrštění a zkroucení, tuhost, odolnost proti rozpouštědlům, nepropustnost paliva, odolnost proti hoření, redukce hmotnosti, snížení příměsí skelných vláken, tenkostěnnost. /8/



Obr.18: Rozdíl mezi neplněným PP(vlevo) a Nanoblendem
při působení plamene po dobu 120 sekund. /8/

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 VOLBA A POPIS ZKOUŠENÝCH MATERIÁLŮ

Jedním z cílů této diplomové práce je zjištění vlivu příměsi recyklátu na základní vlastnosti vybraných nanokompozitních materiálů. Byly vytvořeny tři vhodné kombinace základní termoplastické matrice a příměsi Nanoblend. Tyto komponenty byly (obě ve formě granulátu) smíšeny v hmotnostním poměru 88% matrice + 12% Nanoblend koncentráta a tvoří tyto dvojice:

- 1) Stamylan P 108MF10 + Nanoblend 1201
- 2) Stamytec CX02-81 + Nanoblend 1001
- 3) Mosten GH005 + Nanoblend 1001

Z takto připravené vstupní suroviny byla vyrobena zkušební tělesa pro celou sérii zkoušek (viz bod 3.2.3), a zároveň bylo vyrobeno dostatečné množství desek, které posloužily pro výrobu recyklátu. Recyklát byl poté přidáván do granulátu v předem zvoleném množství tak, aby takto vzniklá směs obsahovala vždy 10, 50 nebo 100 hmotnostních procent recyklátu. Z takto získaných směsí byly opět vyrobeny sady zkušebních těles tak jak je popsáno v bodu 3.2.3.

3.1.1 Popis materiálu Stamylan P 108MF10

Tento materiál byl v současnosti přejmenován na SABIC PP 108MF10. Jedná se o blokový kopolymer polypropylénu s vysokou odolností proti rázu za nízkých teplot, tekutostí a skvělou přilnavostí laku. Tato kombinace vlastností ho dělá obzvláště vhodným pro nárazníky vozů nové generace. Je k dostání i ve verzi s UV stabilizátorem. Je určený pro automobilový průmysl. /10/

3.1.2 Popis materiálu Stamytec CX02-81

Tento materiál byl v současnosti přejmenován na SABIC PP CX02-81. Jedná se o vysoce krystalický kopolymer který nabízí výbornou kombinaci tuhosti, rázové odolnosti, tepelné rozměrové stability a tekutosti na jedné straně a výborných estetických vlastností na straně druhé. Výsledkem toho

je, že tento pro aplikace v interiérech automobilů UV-stabilizovaný materiál je zřejmou alternativou konvenčních kopolymerů plněných talkem, který navíc nabízí významnou úsporu hmotnosti. Je určený pro automobilový průmysl.

Tab.1: Typické hodnoty základních vlastností materiálu Stamylan P 108MF10. /10/

Typical values			
Properties	Unit (SI)	Values	Test methods
Polymer properties			
Melt flow rate (MFR) at 230 °C and 2.16 kg	g/10 min	10	ISO 1133
Density	kg/m ³	905	ISO 1183
Coeff. of linear thermal expansion 23 °C to 80 °C	E-6/K	-	ASTM D 898
-30 °C to 30 °C	E-6/K	120	
Mould shrinkage 24 hours after injection moulding	%	1.5	SABIC method
Mechanical properties			
Tensile test			ISO 527
stress at yield	MPa	19	
stress at break	MPa	18	
strain at break	%	500	
Flexural test			ASTM D 790
Flexural modulus	MPa	950	
Izod impact notched at 23 °C	kJ/m ²	No Break	ISO 180/4A
at 0 °C	kJ/m ²	No Break	
at -20 °C	kJ/m ²	10	
Charpy impact notched at 23 °C	kJ/m ²	No Break	ISO 179/1eA
Charpy impact unnotched at -40 °C	kJ/m ²	No Break	ISO 179/1eU
Hardness Shore D	-	62	ISO 868
Thermal properties			
Heat deflection temperature at 0.45 MPa (HDT/B)	°C	80	ISO 75/B
Vicat softening temperature at 10 N (VST/A)	°C	145	ISO 306/A

3.1.3 Popis materiálu Mosten GH005

Polypropylén Mosten GH 005 je homopolymer určený pro vstřikování. Obsahuje tepelné stabilizátory, které umožňují použití výrobků do teploty 105 °C. Je proto vhodný pro aplikace, kde jsou kladeny vyšší nároky na tepelnou a oxidační stabilitu, jako jsou součásti pro interiéry automobilů, technické díly, součásti přístrojů a zařízení, armatury, apod. Je vhodný pro vstřikování velkorozměrových dílů s dlouhou prodlevou taveniny ve plastifikačním válci. Díky své stabilizaci je typ rovněž vhodný pro výrobu speciálních kompaundů. /11/

Tab. 2: Typické hodnoty základních vlastností materiálu Stamytex CX02-81. /10/

Typical values

Properties	Unit (SI)	Values	Test methods
Polymer properties			
Melt flow rate (MFR) at 230 °C and 2.16 kg	g/10 min	15	ISO 1133
Density	kg/m ³	905	ISO 1183
Coeff. of linear thermal expansion 23 °C to 80 °C	E-6/K	-	ASTM D 898
-30 °C to 30 °C	E-6/K	120	
Mould shrinkage 24 hours after injection moulding	%	1.6	SABIC method
Mechanical properties			
Tensile test			ISO 527
stress at yield	MPa	30	
stress at break	MPa	24	
strain at break	%	600	
Flexural test			ASTM D 790
Flexural modulus	MPa	1700	
Izod impact notched at 23 °C	kJ/m ²	8.5	ISO 150/4A
at 0 °C	kJ/m ²	6.0	
at -20 °C	kJ/m ²	4.5	
Charpy impact notched at 23 °C	kJ/m ²	7.0	ISO 179/1eA
Charpy impact unnotched at -40 °C	kJ/m ²	-	ISO 179/1eU
Hardness Shore D	-	70	ISO 868
Thermal properties			
Heat deflection temperature at 0.45 MPa (HDT/B)	°C	105	ISO 75/B
Vicat softening temperature at 10 N (VST/A)	°C	145	ISO 306/A

Tab. 3: Typické hodnoty základních vlastností materiálu Mosten GH005. /11/

VLASTNOST	JEDNOTKA	TYPICKÁ HODNOTA	ZKUŠEBNÍ METODA
INDEX TOKU TAVENINY (230/ 2,16)	g/10 min	5	ISO 1133
HUSTOTA	kg/m ³	907	ISO 1183
NAPĚTÍ NA MEZI KLUZU	MPa	35	ISO 527
CELKOVÁ TAŽNOST	%	100	ISO 527
OHYBOVÝ MODUL	MPa	1700	ISO 178
VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY 23°C	kJ/m ²	4	ISO 179
VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY -20°C	kJ/m ²	-	ISO 179
TEPLOTA MĚKNUTÍ DLE VICATA	°C	157	ISO 306
TVRDOST SHORE D	-	64	ISO 868

3.1.4 Popis materiálů Nanoblend 1001 a Nanoblend 1201

Nanoblend koncentráty jsou vysoce funkční materiály založené na nanokompozitní technologii. Nanojíly jsou velmi jemné částice o velikosti v řádech nanometru, a tvoří přibližně 40 hm.% Nanoblend koncentrátu. Tento koncentrát napomáhá začlenění a rozptýlení jílů a tím vytvoření nanokompozitní struktury během konečného zpracování. Jemné částice jílu jsou rozptýleny v termoplastické matici a tvoří tak snadno zpracovatelný granulát.



Obr. 19: Granulát (zleva) Stamytec CX02-81, Stamytan P 108MF10, Mosten GH005, Nanoblend 1001, Nanoblend 1201.

3.2 POPIS PŘÍPRAVY VZORKŮ A PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK

3.2.1 Objemový index toku taveniny

Objemový index toku taveniny je velikost objemu taveniny vytlačené zkušebními zařízeními za určitý čas, udává se v $\text{cm}^3 \cdot 10\text{min}^{-1}$. Měření bylo provedeno na vytlačovacím plastometru CEAST. Granule plastu jsou vloženy do vyhřívané tavicí komory a ponechány až se roztaví. Shora je vložen do komory píst. Po přehřátí granulí a jejich roztavení je na píst umístěno závaží a píst začne vytlačovat kalibrovanou tryskou strunu plastu. Poloha pístu je elektronicky snímána. Na jedno naplnění komory bylo provedeno 10 dílčích měření, která pak byla automaticky statisticky vyhodnocena.

Podmínky zkoušek:

Teplota komory	220°C	Hmotnost závaží	2,16kg
Průměr trysky	2,095mm	Délka trysky	8mm



1-ovládací panel
2-tavící komora
3-vytlačovací píst
4-závaží

Obr. 20: Vytlačovací plastometr CEAST

3.2.2 Spirálová zkouška zabíhavosti taveniny

Do vstřikovacího stroje ENGEL ES 25/50 byla vložena forma, jejíž dutina tvoří spirálu. Forma je opatřena značkami délky navzájem vzdálenými 1 cm. Do formy je za přesně daných podmínek vstříknuta tavenina plastu. Po ztuhnutí a vyjmutí výstřiku se podle značek určí délka spirály (Obr. 21)

Technologické parametry vstřiku

Teplota válce a) 150/130/110°C

vstřikovacího stroje b) 170/150/130°C

Vstřikovací tlak 5Mpa

Rychlost vstřiku 2

Doba vstřiku 10s

Doba chlazení 15s

Teplota formy 60°C



Obr. 21: Vzorek ve tvaru spirály

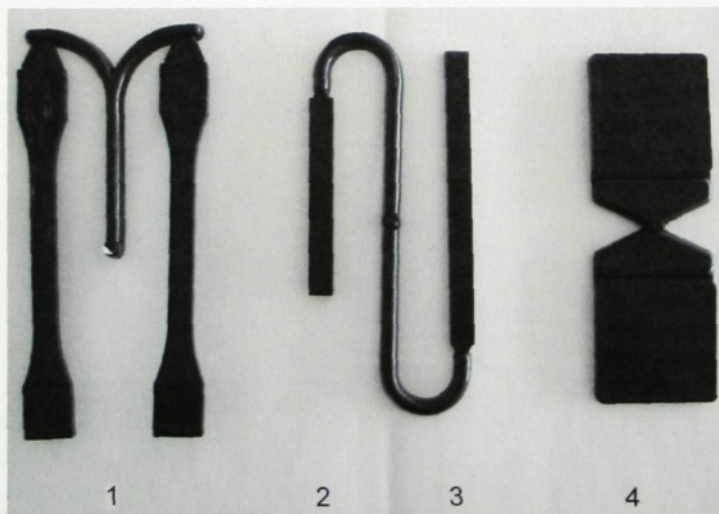
3.2.3 Příprava vzorků pro zkoušky

Pro zkoušky mechanických vlastností a smrštění byla zkušební tělesa připravena vstřikováním na vstřikovacím stroji ENGEL ES 25/50.

Tab. 4: Technologické parametry při přípravě zkušebních těles

	Smrštění	Tah	Ráz+ohyb	Vzhledové desky
Vstřikovací tlak	5MPa			
Teplota válce (°C)	150/130/110			
Doba vstřiku (s)	25	20	20	10
Doba chlazení (s)	10	15	15	15
Teplota formy (°C)	60			
Rychlost vstřiku (-)	7	2	2	2

Byla použita forma s jednou výměnnou deskou, která umožňuje její rychlou a snadnou výměnu. Druhá polovina formy je hladká rovinná deska. Dle požadovaného tvaru zkušebních těles je namontována deska s odpovídající tvarovou dutinou. Vzorky byly vstřikovány až po ustálení všech technologických parametrů, po min. deseti cyklech.



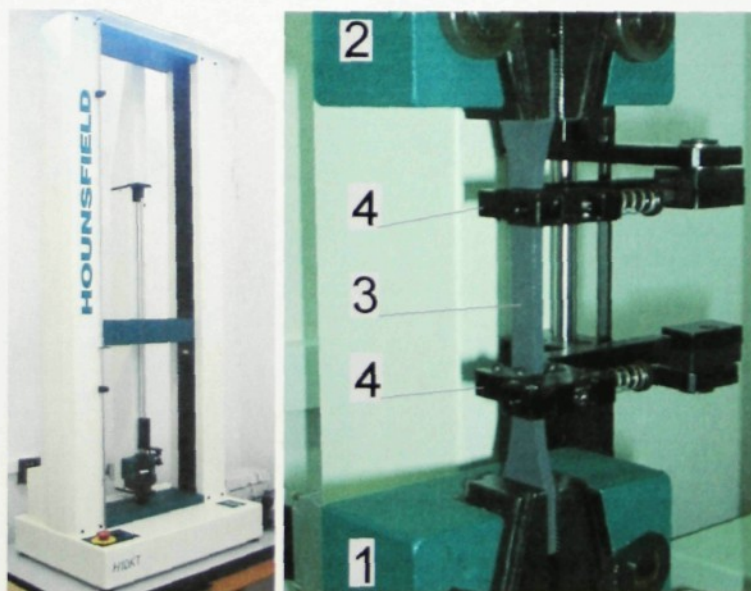
Obr. 22: Zkušební tělesa pro zkoušku tahem(1), rázovou zkoušku Charpy(2), zkoušku ohybem(3) a pro měření smrštění(4).

3.2.4 Zkouška tahových vlastností

Pro stanovení základních mechanických vlastností materiálů byla u každého z materiálů provedena zkouška tahem dle ČSN EN ISO 527-1, 2. Parametry zkoušky byly pro všechny zkoušené materiály stejné:

- zkušební tělesa tvaru 1A dle ČSN EN ISO 527-2, připravená vstřikováním (bod 3.2.3), průřezu 4x10mm
- počet zkoušených těles 10 pro každý z materiálů
- zkoušky byly provedeny na vzorcích, které byly ponechány min. 24 hodin v prostředí zkušební laboratoře (teplota vzduchu 23 ± 2 °C, relativní vlhkost vzduchu 50 ± 5 %)
- zkušební stroj Hounsfield H10KT s průtahoměrem 100RS a PC s programem QMAT (Obr. 23, 24)
- rychlost zkoušení 50 mm.min⁻¹
- datum měření 30. 11. 2004

Pro další hodnocení budou použity pouze zjištěné hodnoty meze pevnosti v tahu σ_M a příslušného poměrného prodloužení na mezi pevnosti ε_M .



Obr. 23, 24: Stroj Hounsfield H10KT (vlevo), detail zkoušeného vzorku(3), pevná čelist(1), pohyblivá čelist(2), průtahoměr(4).

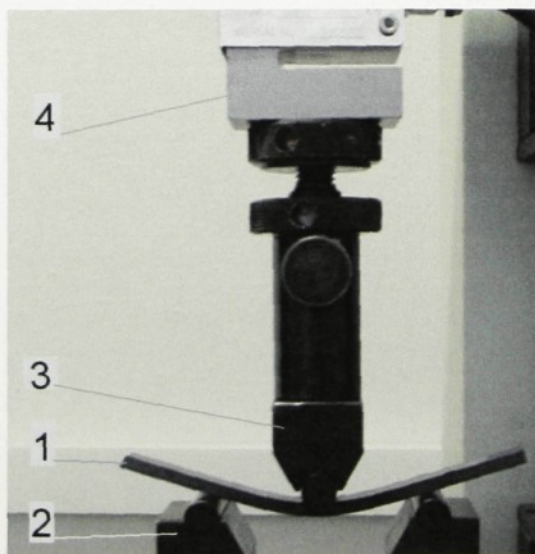
3.2.5 Zkouška ohybových vlastností

Pro stanovení mechanických vlastností v ohybu byla u každého z materiálů provedena zkouška ohybem dle ČSN EN ISO 178.

Parametry zkoušky byly pro všechny zkoušené materiály stejné:

- zkušební tělesa o průřezu 10x4mm, délky 120mm, připravená vstřikováním (bod 3.2.3)
- počet zkoušených těles 10 pro každý materiál
- zkoušky byly provedeny na vzorcích, které byly ponechány min. 24 hodin v prostředí zkušební laboratoře (teplota vzduchu 23 ± 2 °C, relativní vlhkost vzduchu 50 ± 5 %)
- rozpětí podpěr 64mm
- rychlost zkoušení $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- zkušební stroj Hounsfield H10KT a PC s programem QMAT(Obr. 23, 25)
- datum měření 30. 11. 2004

Pro další hodnocení budou použity pouze zjištěné hodnoty meze pevnosti v ohybu σ_{FM} , příslušného poměrného prodloužení na mezi pevnosti ε_{FM} a vypočítaného modulu pružnosti v ohybu E_f .



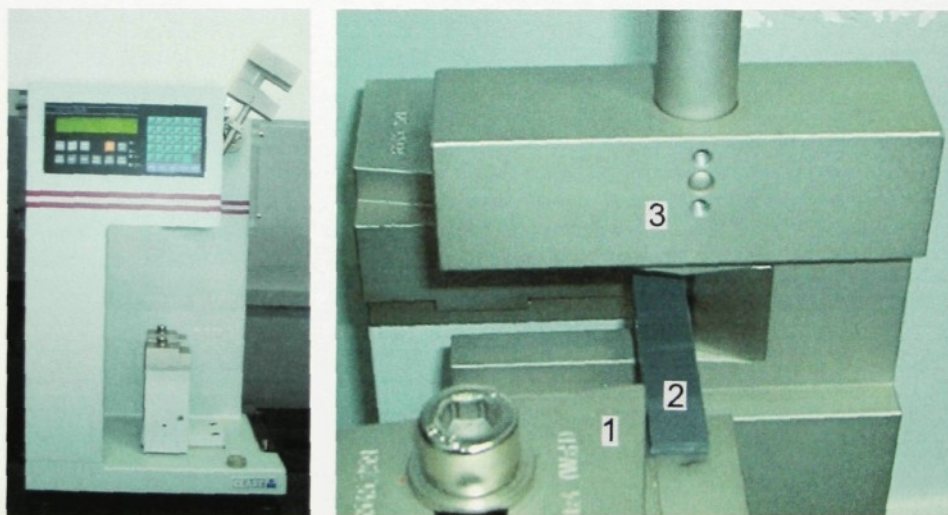
Obr.25: Zkouška ohybem: vzorek(1), podpěry(2), trn(3), snímač síly(4).

3.2.6 Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy

Pro stanovení rázové houževnatosti byla u každého z materiálů provedena zkouška metodou Charpy dle ČSN EN ISO 179.

Parametry zkoušky byly pro všechny zkoušené materiály stejné:

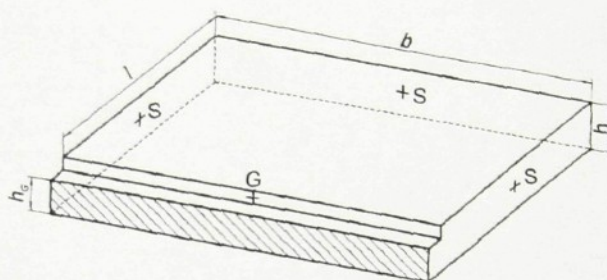
- ISO 179/1eU (těleso bez vrubu, ráz na užší stranu)
- zkušební tělesa o průřezu 10x4 mm, délka 80mm, připravená vstřikováním
- rychlost rázu $2,9 \text{ m.s}^{-1}$
- nominální energie kyvadla 2J
- počet zkoušených těles 10 pro každý materiál
- zkoušky byly provedeny na vzorcích, které byly ponechány min. 24 hodin v prostředí zkušební laboratoře (teplota vzduchu $23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, relativní vlhkost vzduchu $50 \pm 5 \text{ } \%$)
- datum provedení zkoušky 2. 12. 2004
- zkušební stroj CEAST



Obr. 26, 27: Zkušební stroj CEAST(vlevo), detail tělesa(2), podpěry(1), kladiva(3).

3.2.7 Stanovení výrobního smrštění

Měření výrobního smrštění bylo provedeno na vzorcích tvaru desek o rozměrech 50x50mm a tloušťce 2mm, resp. 4mm. Vzorky byly vstřikovány do dvojnásobné formy s filmovým ústím vtoku, a proto rozděleny vždy do dvou skupin A a B podle toho, ze které části formy byly vyjmuty. Délkové rozměry byly měřeny digitálním úchylkoměrem Mitutoyo ID-F150 s dosažitelnou přesností 0,001mm umístěném ve speciálním měřicím přípravku (Obr. 29).



Obr. 28: Perspektivní zobrazení zkušebního tělesa

(vyšrafovaná plocha označuje zbytek ústí vtoku)

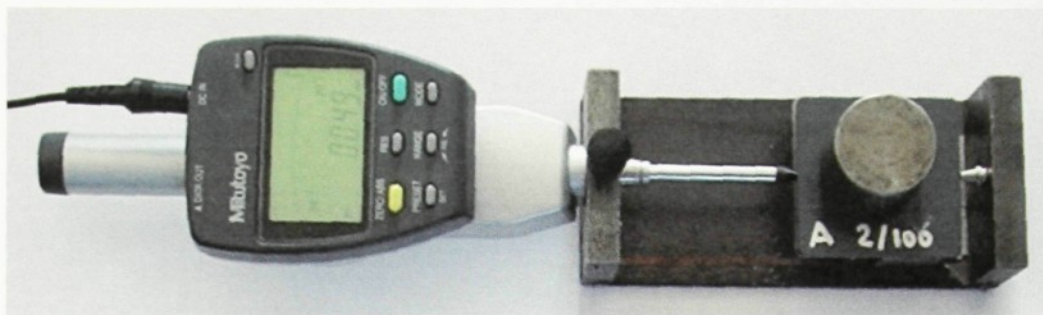
Výrobní smrštění je rozdíl mezi rozměry suchého zkušebního tělesa a rozměry tvarové dutiny, v níž bylo zkušební těleso vstřikováno. Všechny rozměry se měří při pokojové teplotě, po uplynutí nejméně 24 hodin po vyrobení, kdy se předpokládá, že došlo k ustálení rozměrů. Rozměry těles se určují ve středu šířky tělesa (podélné) a ve středu délky zkušebního tělesa v bodech G a S, tak jak je patrné z obr. 28. Výrobní smrštění se pak určí početně ze vztahu (1)-podélné a (2)-příčné:

$$S_{Mp} = 100 \cdot (l_c - l_1) / l_c \quad (1)$$

$$S_{Mn} = 100 \cdot (b_c - b_1) / b_c \quad (2)$$

kde l_c a b_c jsou délka a šířka tvarové dutiny (mm),

l_1 a b_1 odpovídající délka a šířka zkušebního tělesa (mm).



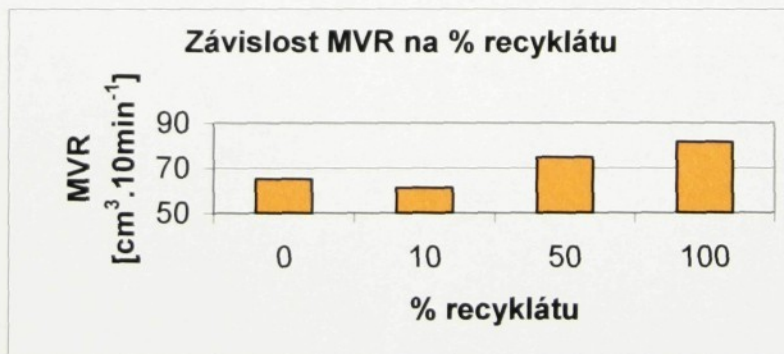
Obr. 29: Zkušební těleso(A) v měřícím přípravku, zatížené válcovým závažím.

3.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ STAMYLAN P 108MF10+NANOBLEND 1201

3.3.1 Objemový index toku taveniny

Tab. 5: Závislost MVR na % recyklátu

% recyklátu	0	10	50	100
MVR [cm ³ .10min ⁻¹]	65,193	61,221	74,859	81,597
směrodatná odchylka	4,058	6,905	3,419	3,672



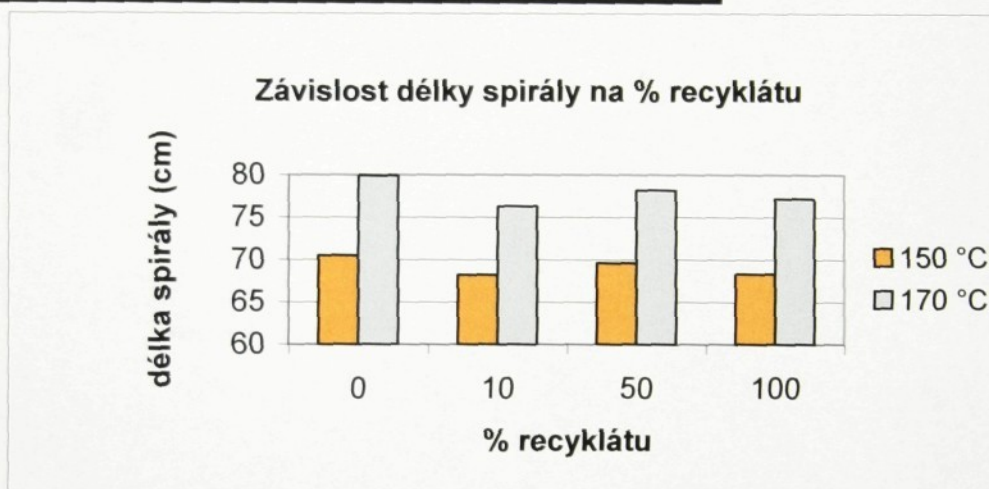
Graf 1: Závislost MVR na % recyklátu.

Diskuse: Se zvyšujícím se procentem recyklátu ve směsi objemový index toku taveniny roste, nejlépe teče tavenina připravená ze 100% recyklátu, a je proto společně s taveninou s 50% recyklátu nejvhodnější pro zpracování.

3.3.2 Spirálová zkouška zabíhavosti taveniny

Tab. 6: Výsledky spirálové zkoušky

% recyklátu	0	10	50	100
150/130/110 °C	70,5	68,2	69,6	68,3
170/150/130 °C	79,9	76,3	78,2	77,2



Graf 2: Výsledky spirálové zkoušky

Diskuse: Při obou teplotách válce vstřikovací jednotky byla nejdelší spirála naměřena u taveniny s 0% recyklátu, dále pak pro 50% recyklátu. Rozdíly mezi minimální a maximální délkou spirály jsou pouze 2,3cm(150°C), resp. 3,6cm(170°C). Lze říci, že procento přidaného recyklátu nemá výrazný vliv na zabíhavost taveniny.

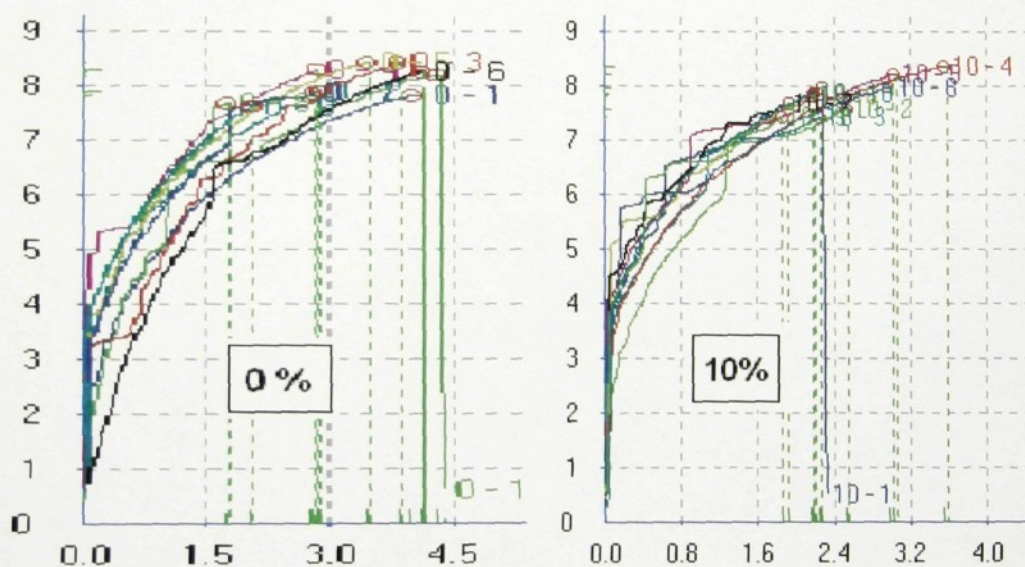
3.3.3 Tahové vlastnosti

Tab. 7: Tahové vlastnosti

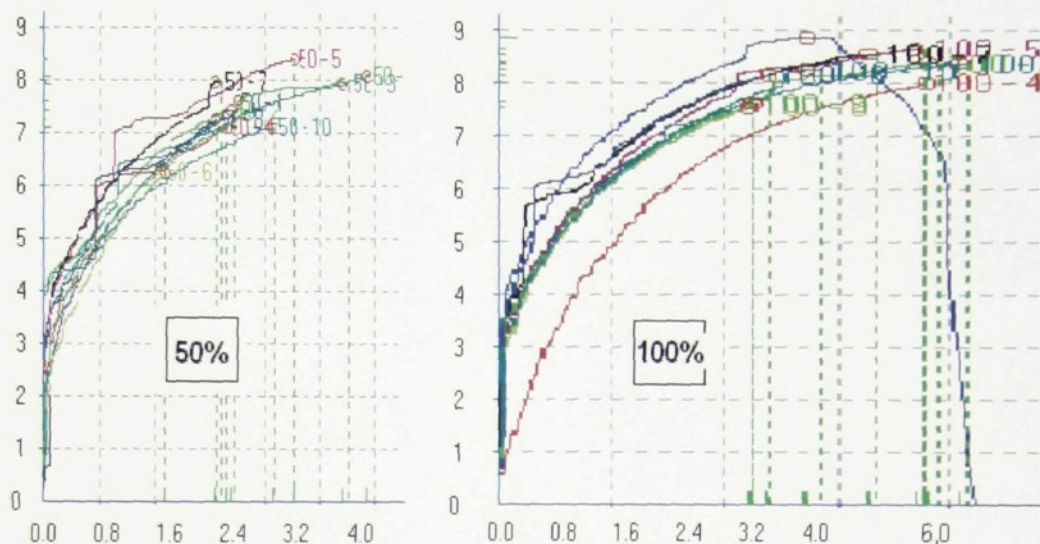
% recyklátu	0	10	50	100
σ_M (MPa)	$8,048 \pm 0,307$	$7,832 \pm 0,313$	$7,505 \pm 0,625$	$8,237 \pm 0,423$
ε_M (%)	$3,188 \pm 0,879$	$2,474 \pm 0,543$	$3,069 \pm 0,902$	$4,633 \pm 1,077$



Graf 3: Tahové vlastnosti.



Obr. 30, 31: Tahové křivky při 0% a 10% recyklátu. (vodorovná osa Deformace %, svislá osa Napětí MPa).



Obr. 32, 33: Tahové křivky při 50% a 100% recyklátu. (vodorovná osa Deformace %, svislá osa Napětí MPa).

Diskuse: Nejvyšší mez pevnosti v tahu vykazují vzorky ze 100% recyklátu, dále pak s 0% recyklátu. Vzorky ze směsí 90/10 % a 50/50% mají mez pevnosti nižší o cca. 4,9%, resp. 8,9% . Procento přidaného recyklátu nemá příliš výrazný vliv na mez pevnosti v tahu.

U těles ze 100% recyklátu bylo většinou meze pevnosti dosaženo při podstatně vyšších hodnotách deformace.

3.3.4 Ohybové vlastnosti

Tab. 8: Ohybové vlastnosti.

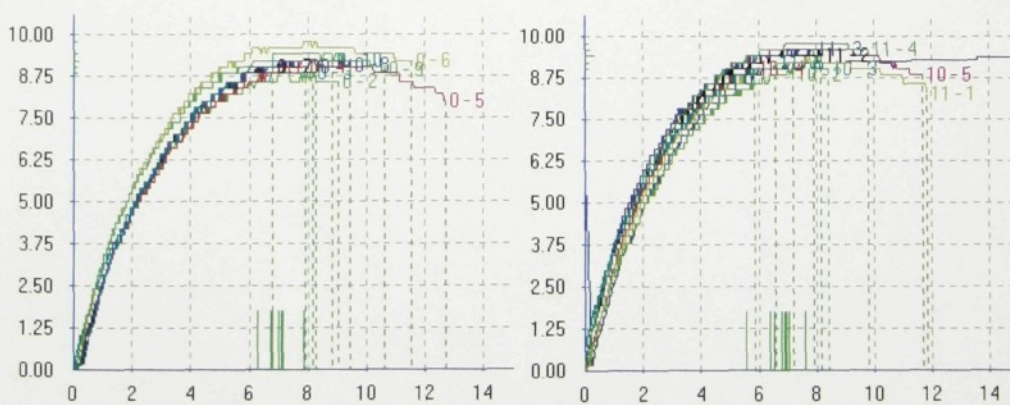
% recyklátu	0	10	50	100
σ_{fM} (MPa)	$9,156 \pm 0,286$	$9,378 \pm 0,274$	$9,080 \pm 0,131$	$10,153 \pm 0,636$
ε_{fM} (%)	$6,977 \pm 0,403$	$7,657 \pm 2,909$	$7,244 \pm 0,541$	$8,148 \pm 3,138$
E_f (MPa)	715 ± 350	1454 ± 307	1334 ± 415	1437 ± 332



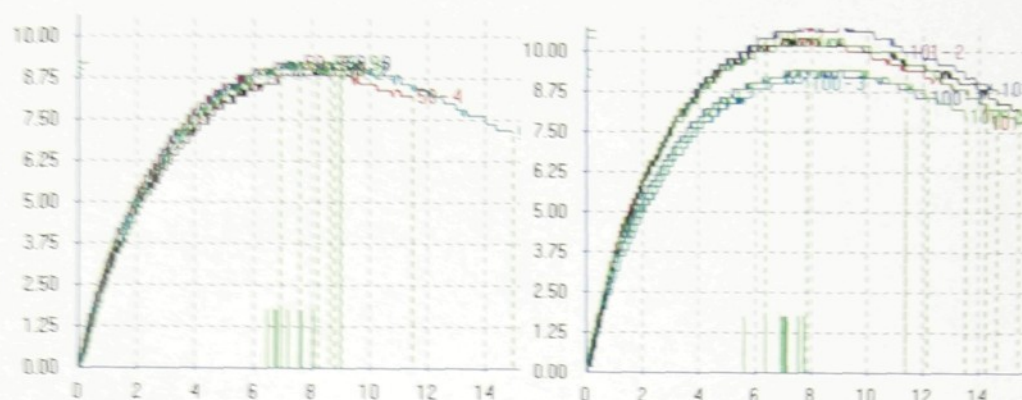
Graf 4: Ohybové vlastnosti.



Graf 5: Modul pružnosti.



Obr. 34, 35: Ohybové křivky při 0% a 10% recyklátu. (vodorovná osa Deformace %, svislá osa Napětí MPa).



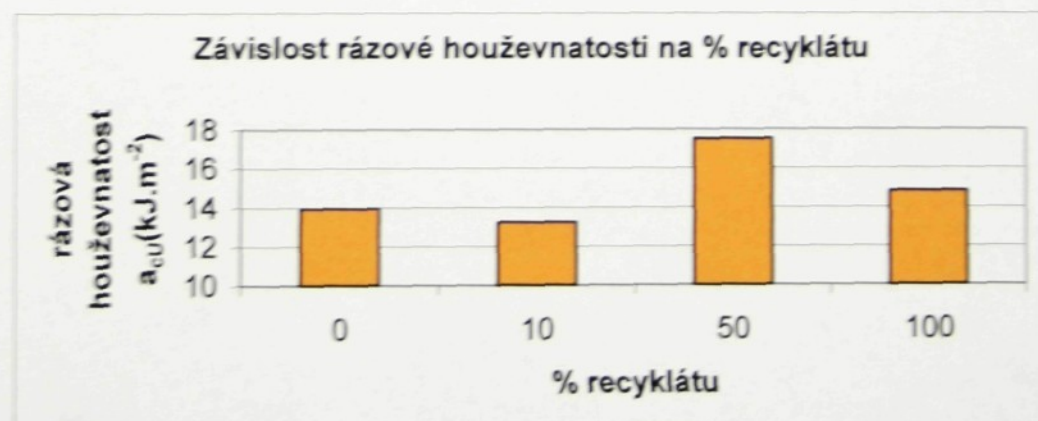
Obr. 36, 37: Ohybové křivky při 50% a 100% recyklátu. (vodorovná osa Deformace %, svislá osa Napětí MPa).

Diskuse: Nejvyšší mez pevnosti v ohybu byla zjištěna u tyček ze 100% recyklátu, o 1Mpa vyšší než u tyček ze směsi 50/50%, které naopak byly nejméně pevné. Z hlediska zkoušky ohybem se proto jako nejlepší jeví 100% recyklát a směs s 10% recyklátu, a to díky vyšším hodnotám meze pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v ohybu.

3.3.5 Rázová houževnatost metodou Charpy

Tab 9: Rázová houževnatost.

% recyklátu	0	10	50	100
$a_{cu} [kJ.m^{-2}]$	13,930	13,240	17,530	14,848
směrodatná odchylka	3,494	4,557	3,580	3,962



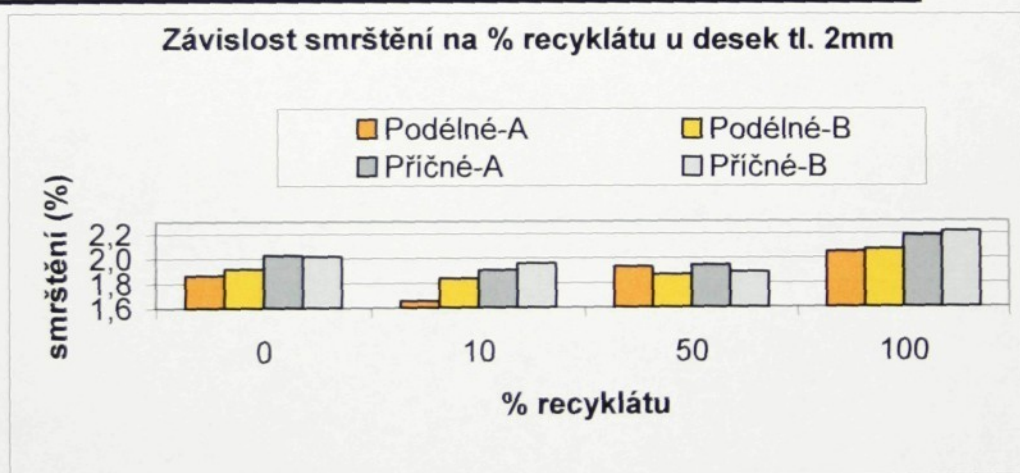
Graf 6: Rázová houževnatost.

Diskuse: U všech vzorků bylo zaznamenáno přeražení typu c, tj. úplné přeražení. Vzorky připravené ze směsi s 50% recyklátu vykazovaly výrazně vyšší rázovou pevnost než ostatní a proto je toto složení nejvhodnější pro aplikace, kde dochází k rázovému namáhání.

3.3.6 Výrobní smrštění

Tab. 10: Výrobní smrštění - tloušťka 2mm.

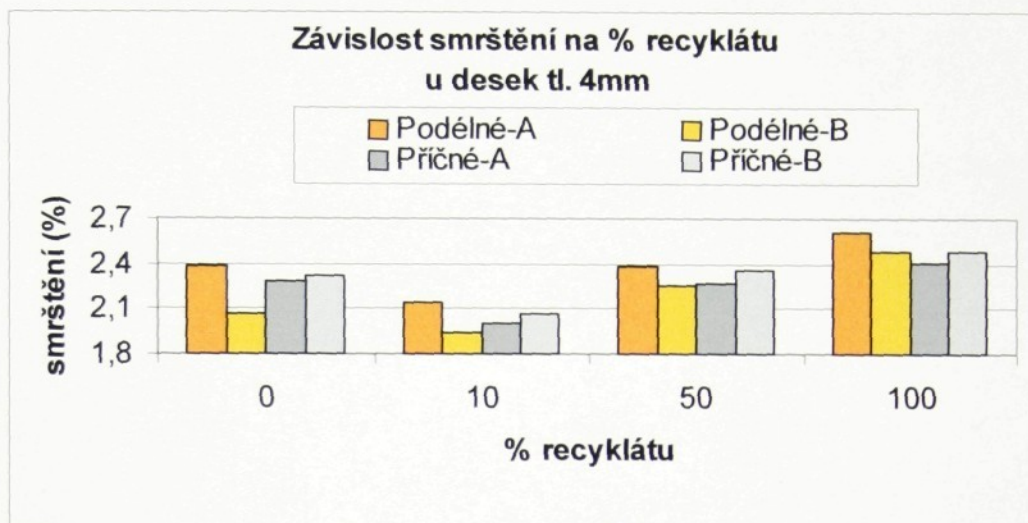
% recyklátu	PODÉLNÉ SMRŠTĚNÍ (%)		PŘÍČNÉ SMRŠTĚNÍ (%)	
	Těleso A	Těleso B	Těleso A	Těleso B
0	1,863 ± 0,079	1,918 ± 0,036	2,028 ± 0,023	2,015 ± 0,017
10	1,654 ± 0,073	1,837 ± 0,083	1,903 ± 0,030	1,958 ± 0,044
50	1,931 ± 0,070	1,866 ± 0,082	1,943 ± 0,042	1,886 ± 0,057
100	2,052 ± 0,078	2,074 ± 0,016	2,186 ± 0,038	2,217 ± 0,066



Graf 7: Výrobní smrštění – tloušťka 2mm.

Tab. 11: Výrobní smrštění – tloušťka 4mm.

% recyklátu	PODÉLNÉ SMRŠTĚNÍ (%)		PŘÍČNÉ SMRŠTĚNÍ (%)	
	Těleso A	Těleso B	Těleso A	Těleso B
0	2,387 ± 0,073	2,062 ± 0,084	2,280 ± 0,003	2,319 ± 0,042
10	2,145 ± 0,090	1,934 ± 0,034	1,998 ± 0,082	2,071 ± 0,074
50	2,385 ± 0,101	2,253 ± 0,035	2,266 ± 0,025	2,353 ± 0,036
100	2,608 ± 0,066	2,487 ± 0,098	2,408 ± 0,027	2,481 ± 0,049



Graf 8: Výrobní smrštění – tloušťka 4mm.

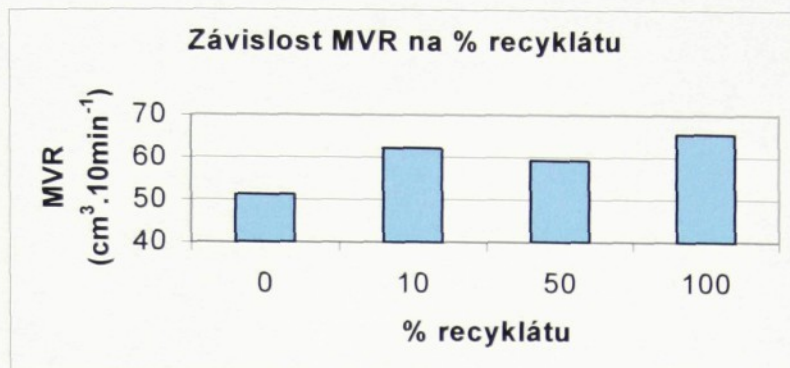
Diskuse: U destiček obou tloušťek bylo zjištěno, že nejnižší hodnoty smrštění (podélného i příčného) vykazuje směs připravená z 10% recyklátu, a tato koncentrace je proto z hlediska smrštění pro aplikaci v praxi nejvhodnější. Naopak nelze doporučit 100% recyklát, neboť tato tělesa vykázala hodnoty smrštění viditelně vyšší, než všechna ostatní.

3.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ STAMYTEC CX02-81+NANOBLEND 1001

3.4.1 Objemový index toku taveniny

Tab. 12: Závislost MVR na % recyklátu.

% recyklátu	0	10	50	100
MVR [cm ³ .10min ⁻¹]	51,184	62,192	59,184	65,483
směrodatná odchylka	7,625	2,904	6,413	1,917



Graf 9: Závislost MVR na % recyklátu.

Diskuse: Z hlediska tekutosti taveniny nejlepší výsledky poskytuje 100% recyklát, dále pak směs 90/10% a 50/50%. V porovnání s nimi je tavenina připravená bez příměsi recyklátu hůře tekutá.

3.4.2 Spirálová zkouška zabíhavosti taveniny

Tab. 13: Výsledky spirálové zkoušky.

% recyklátu	0	10	50	100
150/130/110 °C	58,0	49,5	50,0	51,0
170/150/130 °C	63,5	59,5	55,3	57,9



Graf 10: Výsledky spirálové zkoušky.

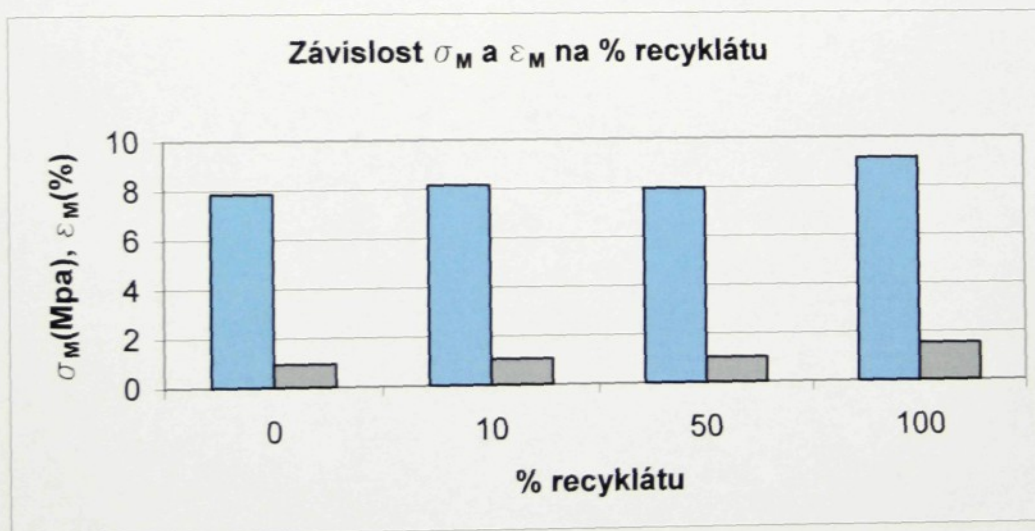
Diskuse: Při teplotě válce vstřikovací jednotky 150/130/110°C byla největší délka spirály naměřena u 0% recyklátu, ostatní kombinace granulát/recyklát vykázaly shodně výsledky o cca 8cm horší.

Při vyšších teplotách nejdále zatekla tavenina ze 100% granulátu bez příměsí recyklátu, ostatní směsi vykázaly zabíhavost mírně menší.

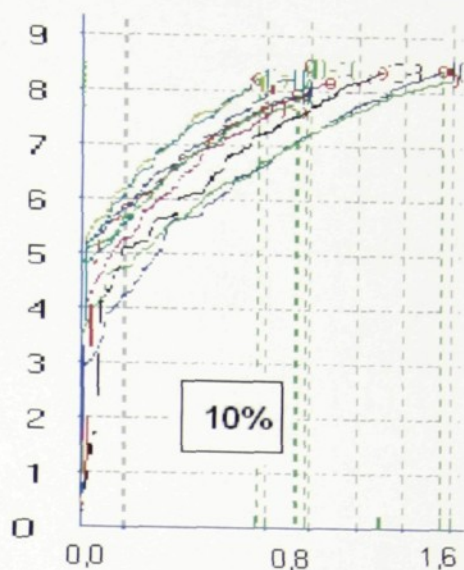
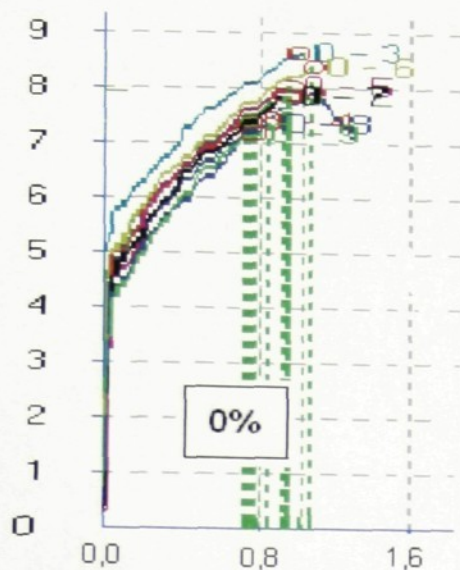
3.4.3 Tahové vlastnosti

Tab. 14: Tahové vlastnosti.

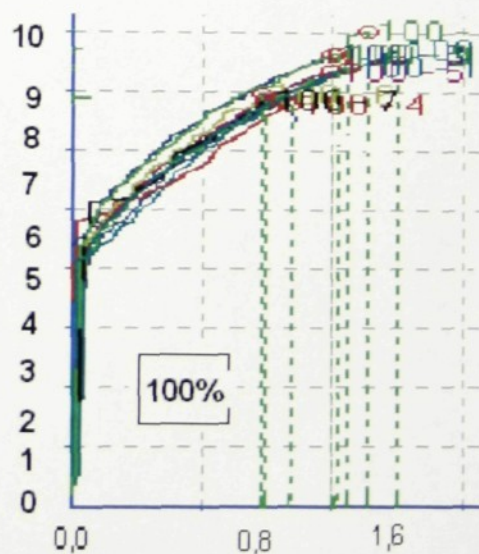
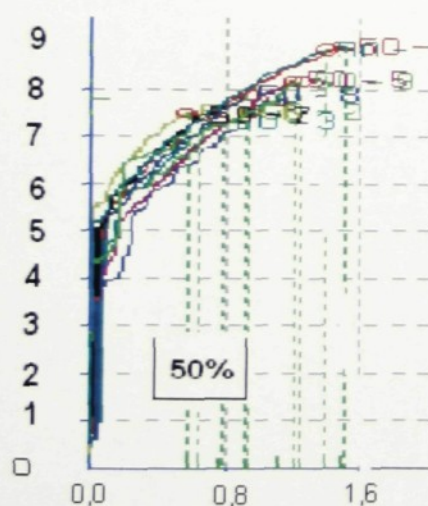
% recyklátu	0	10	50	100
σ_M (MPa)	7,854 ± 0,482	8,162 ± 0,236	7,970 ± 0,574	9,165 ± 0,543
ε_M (%)	0,936 ± 0,119	1,059 ± 0,326	1,026 ± 0,314	1,528 ± 0,276



Graf 11: Tahové vlastnosti.



Obr. 38, 39: Tahové křivky při 0% a 10% recyklátu. (vodorovná osa Deformace %, svislá osa Napětí MPa).



Obr. 40, 41: Tahové křivky při 50% a 100% recyklátu. (vodorovná osa Deformace %, svislá osa Napětí MPa).

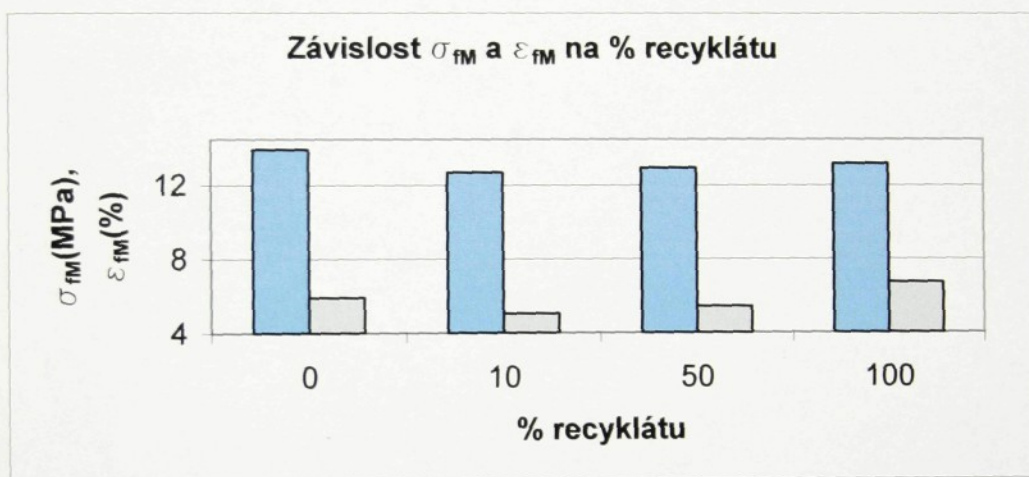
Diskuse: Nejvyšší mez pevnosti v tahu byla zjištěna u vzorků ze 100% recyklátu, ostatní vzorky měly shodně pevnost o cca. 1MPa menší.

Z hlediska velikosti deformace na mezi pevnosti dominuje 100% recyklát. Jeho deformace je o 0,5% vyšší, než u ostatních tří koncentrací, jejichž deformace se shodně pohybuje těsně okolo 1%.

3.4.4 Ohybové vlastnosti

Tab. 15: Ohybové vlastnosti.

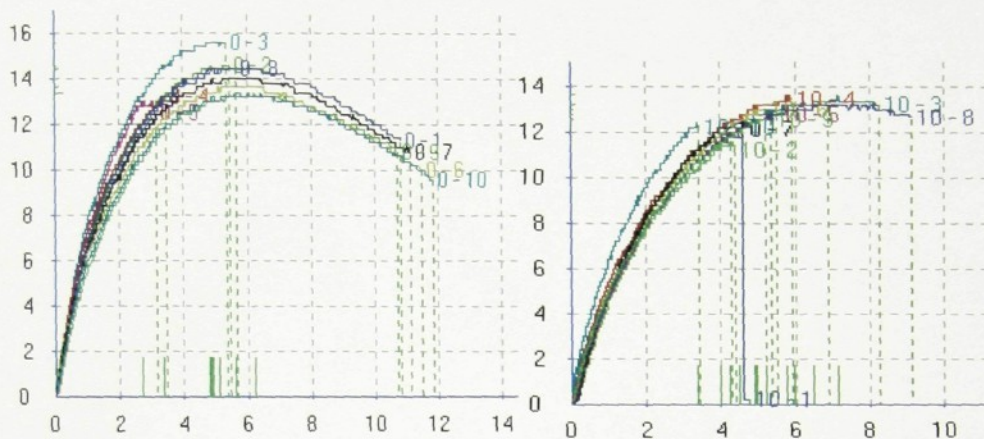
% recyklátu	0	10	50	100
σ_{fm} (MPa)	13,956 $\pm$ 0,797	12,702 $\pm$ 0,679	12,960 $\pm$ 0,470	13,182 $\pm$ 0,057
ε_{fm} (%)	5,909 $\pm$ 1,262	5,054 $\pm$ 1,158	5,430 $\pm$ 1,176	6,730 $\pm$ 0,484
E_f (MPa)	2629 $\pm$ 410	2258 $\pm$ 511	2497 $\pm$ 340	2338 $\pm$ 223



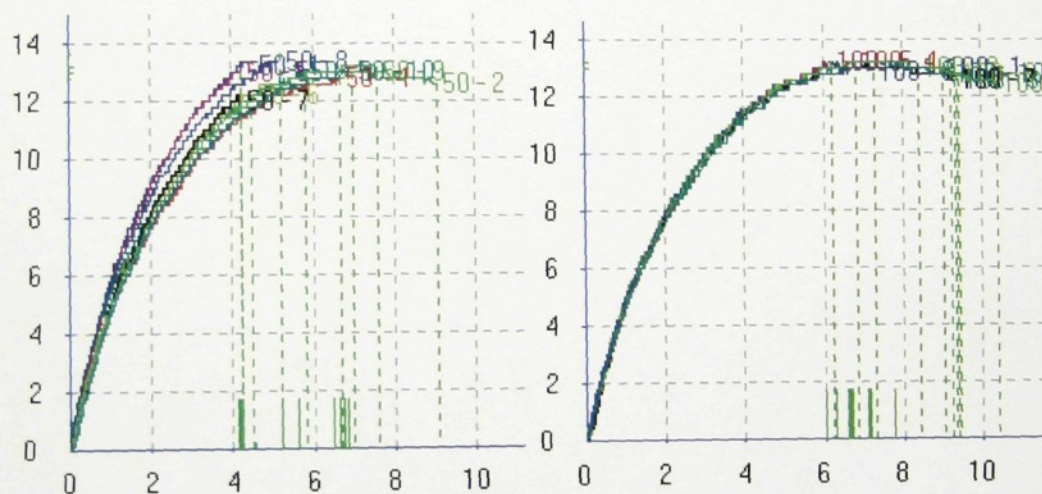
Graf 12: Ohybové vlastnosti.



Graf 13: Modul pružnosti.



Obr. 42, 43: Ohybové křivky při 0% a 10% recyklátu. (vodorovná osa Deformace %, svislá osa Napětí MPa).



Obr. 44, 45: Ohybové křivky při 0% a 10% recyklátu. (vodorovná osa Deformace %, svislá osa Napětí MPa).

Diskuse: Nejvyšší mez pevnosti v ohybu a modul pružnosti v ohybu byly zjištěny u tělísek připravených ze 100% granulátu (bez recyklátu) a proto je tato surovina z hlediska ohybových vlastností nejvýhodnější.

Ostatní tři směsi vykázaly pevnost nižší, vzájemně velmi podobnou. Modul pružnosti těles s 10% a 100% recyklátu byl viditelně nižší, než u těles bez recyklátu a s 50% recyklátu.

3.4.5 Rázová houževnatost metodou Charpy

Tab 16: Rázová houževnatost.

% recyklátu	0	10	50	100
$a_{CU}[kJ.m^{-2}]$	9,805	7,650	7,393	8,365
směrodatná odchylka	1,520	2,102	0,893	1,744



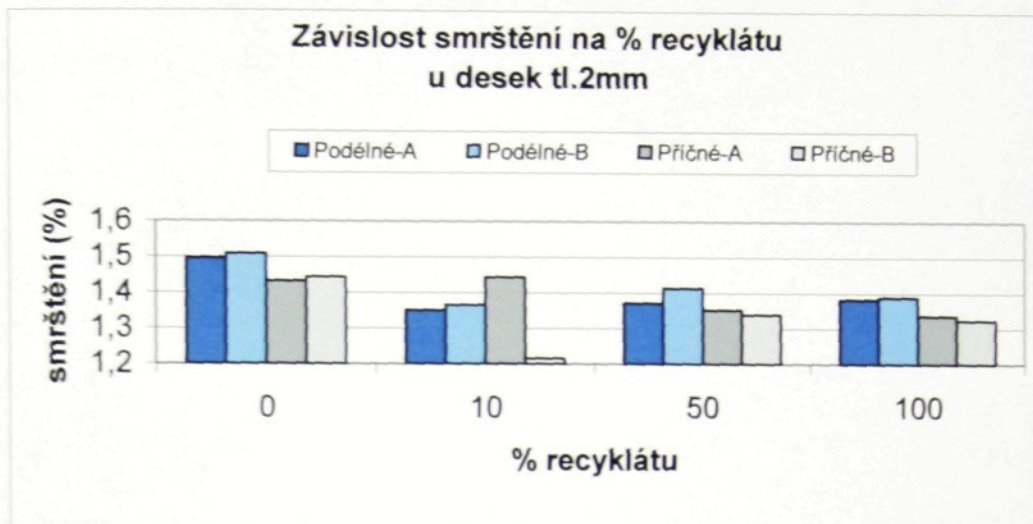
Graf 14: Rázová houževnatost.

Diskuse: U všech těles došlo k přeražení typu c, tj. úplnému přeražení. Nejvyšší rázová pevnost byla zjištěna u tyček ze 100% granulátu, dále pak u 100% recyklátu. Ostatní dvě kombinace jsou rázu méně odolné.

3.4.6 Výrobní smrštění

Tab. 17: Výrobní smrštění - tloušťka 2mm.

% recyklátu	PODÉLNÉ SMRŠTĚNÍ (%)		PŘÍČNÉ SMRŠTĚNÍ (%)	
	Těleso A	Těleso B	Těleso A	Těleso B
0	1,495 ± 0,061	1,509 ± 0,070	1,432 ± 0,023	1,443 ± 0,036
10	1,351 ± 0,114	1,365 ± 0,050	1,444 ± 0,050	1,215 ± 0,052
50	1,371 ± 0,100	1,413 ± 0,054	1,352 ± 0,046	1,339 ± 0,037
100	1,383 ± 0,033	1,389 ± 0,018	1,336 ± 0,033	1,323 ± 0,017



Graf 15: Výrobní smrštění – tloušťka 2mm.

Tab. 18: Výrobní smrštění – tloušťka 4mm.

% recyklátu	PODÉLNÉ SMRŠTĚNÍ (%)		PŘÍČNÉ SMRŠTĚNÍ (%)	
	Těleso A	Těleso B	Těleso A	Těleso B
0	2,371 ± 0,155	2,342 ± 0,114	2,276 ± 0,227	2,387 ± 0,188
10	2,263 ± 0,103	2,054 ± 0,046	1,848 ± 0,201	1,971 ± 0,018
50	2,167 ± 0,089	1,982 ± 0,051	1,872 ± 0,011	1,947 ± 0,011
100	1,935 ± 0,075	1,733 ± 0,023	1,744 ± 0,036	1,815 ± 0,017



Graf 16: Výrobní smrštění – tloušťka 4mm.

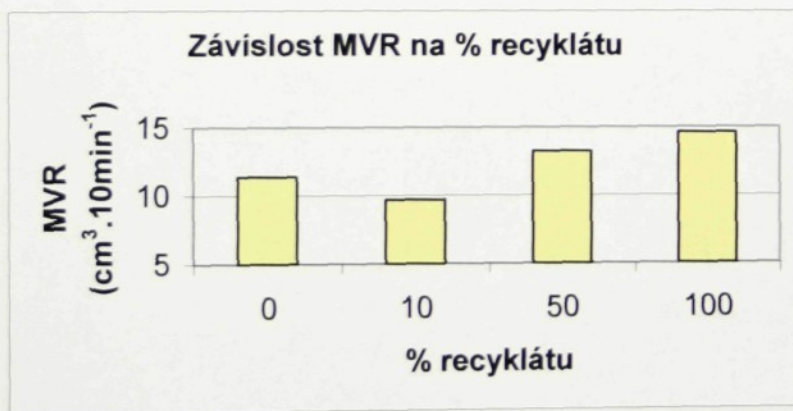
Diskuse: U desek obou tloušťek bylo podélné smrštění nejvyšší u při 0% recyklátu. Příčné smrštění má s narůstajícím % recyklátu klesající tendenci(zejména při tl. 4mm). Z hlediska smrštění se proto jako nejvhodnější pro praxi jeví materiál s 50% a 100% recyklátu.

3.5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ MOSTEN GH 005 + NANOBLEND 1001

3.5.1 Objemový index toku taveniny

Tab. 19: Závislost MVR na % recyklátu.

% recyklátu	0	10	50	100
MVR [cm ³ .10min ⁻¹]	11,382	9,701	13,246	14,620
směrodatná odchylka	0,027	0,184	0,605	0,238



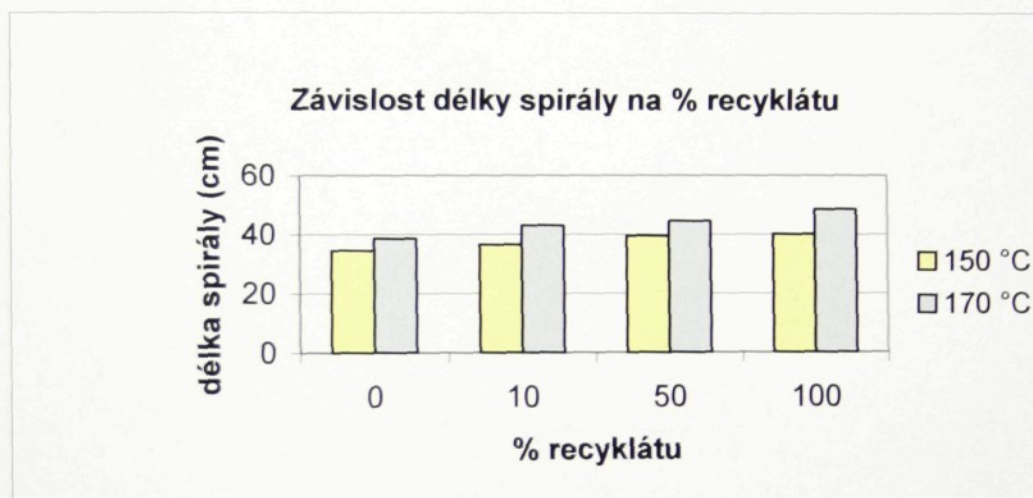
Graf 17: Závislost MVR na % recyklátu.

Diskuse: Měřením bylo zjištěno, že nevíce tekutá je tavenina ze 100% recyklátu a směs s 50% recyklátu. Taveniny zbylých dvou složení vytékaly pomaleji.

3.5.2 Spirálová zkouška zabiřavosti taveniny

Tab. 20: Výsledky spirálové zkoušky.

% recyklátu	0	10	50	100
150/130/110 °C	34,5	36,5	39,5	40,0
170/150/130 °C	38,5	43,0	44,5	48,5



Graf 18: Výsledky spirálové zkoušky.

Diskuse: Při obou teplotách válce vstřikovací jednotky stroje se prokázalo, že zvyšující se procento recyklátu v tavenině má příznivý vliv na zabiřavost taveniny. V obou případech má závislost délky spirály na procentu přidaného

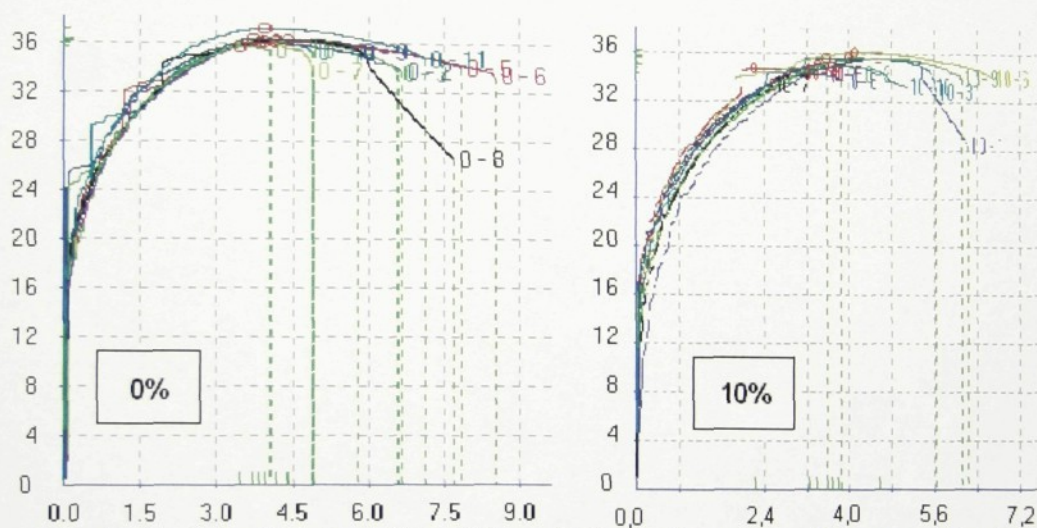
3.5.3 Tahové vlastnosti

Tab. 21: Tahové vlastnosti.

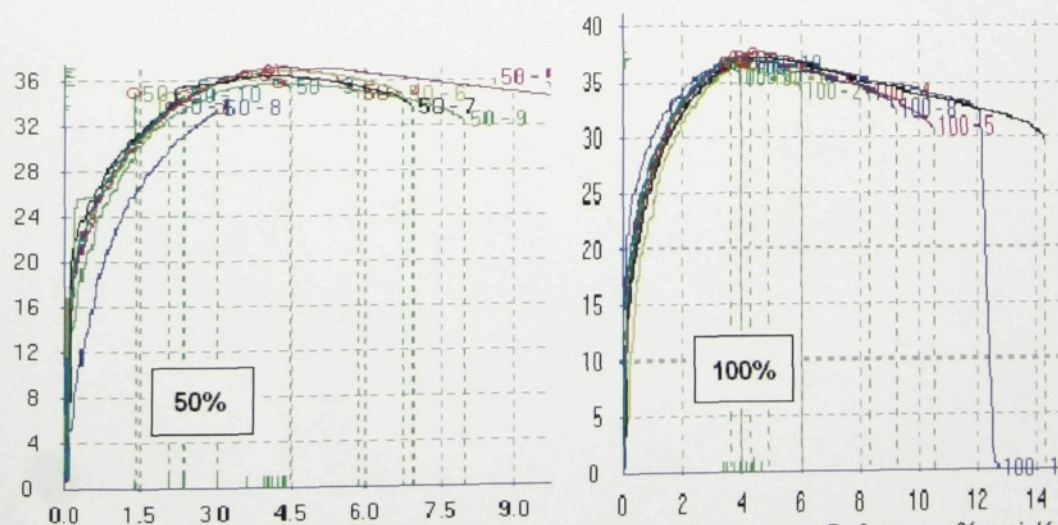
% recyklátu	0	10	50	100
σ_M (MPa)	36,240 ± 0,380	35,060 ± 0,776	35,670 ± 1,311	36,930 ± 0,353
ε_M (%)	3,964 ± 0,273	3,504 ± 0,704	3,331 ± 1,048	3,940 ± 0,443



Graf 19: Tahové vlastnosti.



Obr. 46, 47: Tahové křivky při 0% a 10% recyklátu. (vodorovná osa Deformace %, svislá osa Napětí MPa).



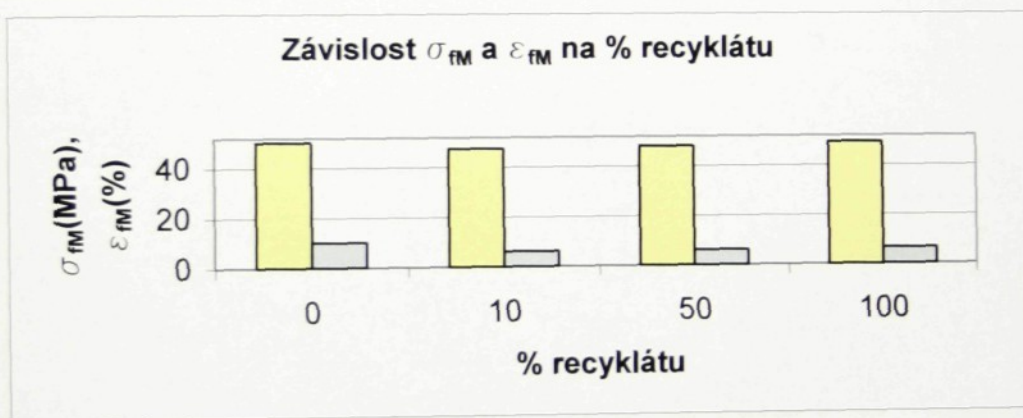
Obr. 48, 49: Tahové křivky při 50% a 100% recyklátu. (vodorovná osa Deformace %, svislá osa Napětí MPa).

Diskuse: Při zkoušce tahem bylo zjištěno, že procento recyklátu přidaného do granulátu nemá výrazný vliv na mez pevnosti v tahu; průměrné hodnoty při všech koncentracích leží v pásmu 2 MPa. Pouze mírně dominuje 100% recyklát. U těles s 0%recyklátu a 100% recyklátu došlo k porušení při mírně vyšších deformacích než u těles ostatních.

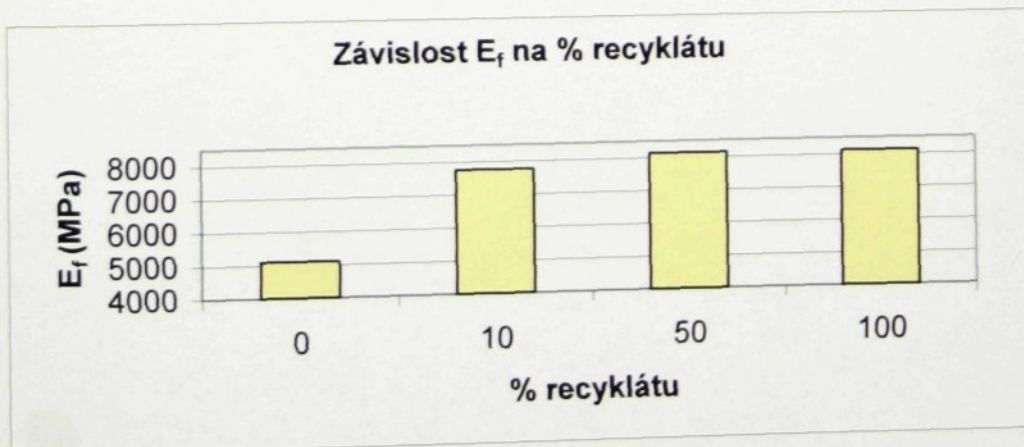
3.5.4 Ohybové vlastnosti

Tab. 22: Ohybové vlastnosti.

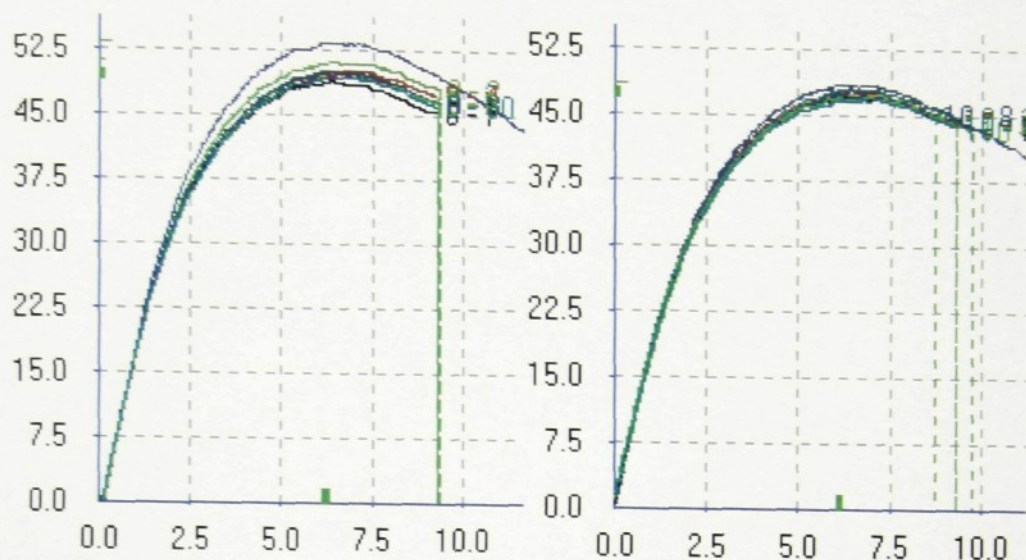
% recyklátu	0	10	50	100
σ_M (MPa)	50,220 $\pm$ 1,268	47,540 $\pm$ 0,487	48,100 $\pm$ 0,838	49,500 $\pm$ 0,392
ε_M (%)	10,079 $\pm$ 2,371	6,141 $\pm$ 0,054	6,163 $\pm$ 0,231	6,498 $\pm$ 0,347
E(MPa)	5100 $\pm$ 691	7760 $\pm$ 266	8142 $\pm$ 239	8125 $\pm$ 305



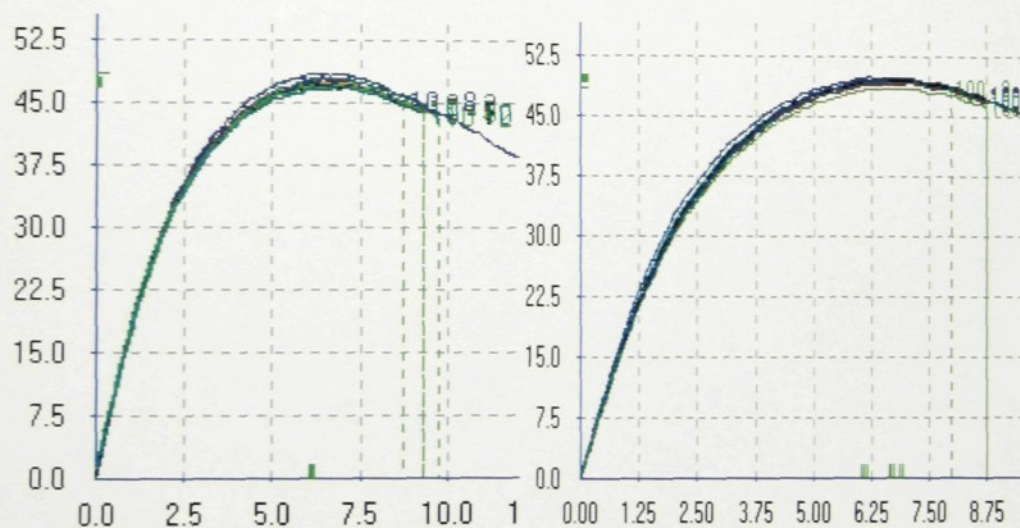
Graf 20: Ohybové vlastnosti.



Graf 21: Modul pružnosti.



Obr. 50, 51: Ohybové křivky při 0% a 10% recyklátu. (vodorovná osa Deformace %, svislá osa Napětí MPa).



Obr. 52, 53: Ohybové křivky při 50% a 100% recyklátu. (vodorovná osa Deformace %, svislá osa Napětí MPa).

Diskuse: pouze u tohoto jediného materiálu vydrželo těleso maximální deformaci, kterou umožňuje uspořádání stroje. V průběhu zkoušky nedošlo k úplnému lomu těles, a proto byla zkouška každého vzorku ukončena po dosažení maximálního napětí.

Z hlediska zkoušky ohybem má procento přidaného recyklátu pouze mírný vliv na mez pevnosti v ohybu. Závislost meze pevnosti v ohybu na %

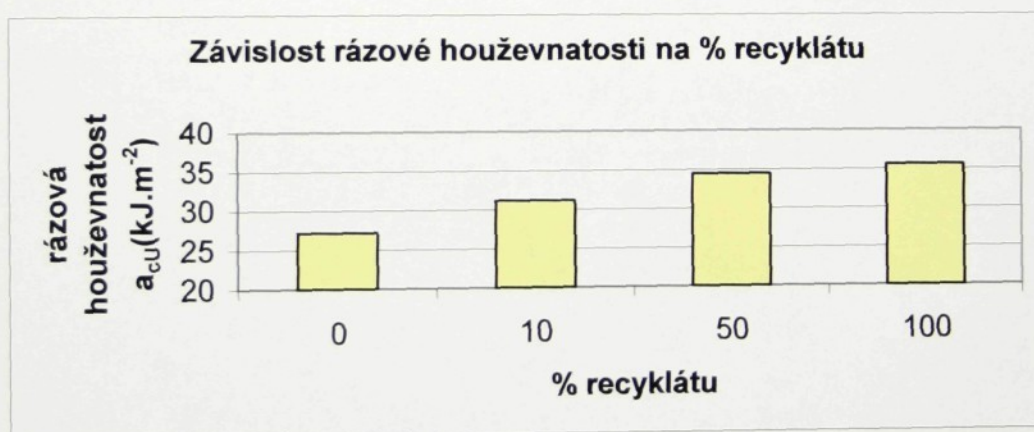
recyklátu má vanový průběh, tj. při 0% a 100% recyklátu je mez pevnosti v ohybu vyšší než při zbylých dvou poměrech míšení.

Deformace na mezi pevnosti u vzorků s 0% recyklátu byla o 3,5-4% vyšší než u vzorků s 10%, 50%, a 100% recyklátu. Zcela opačný průběh má závislost modulu pružnosti v ohybu; při 10%, 50%, a 100% leží jeho hodnota blízko hranice 8000 MPa, kdežto při 0% recyklátu činí pouze 5100 MPa.

3.5.5 Rázová houževnatost metodou Charpy

Tab 23: Rázová houževnatost.

% recyklátu	0	10	50	100
$a_{cU}[\text{kJ.m}^{-2}]$	27,120	31,099	34,456	35,578
směrodatná odchylka	4,589	5,298	4,359	4,244



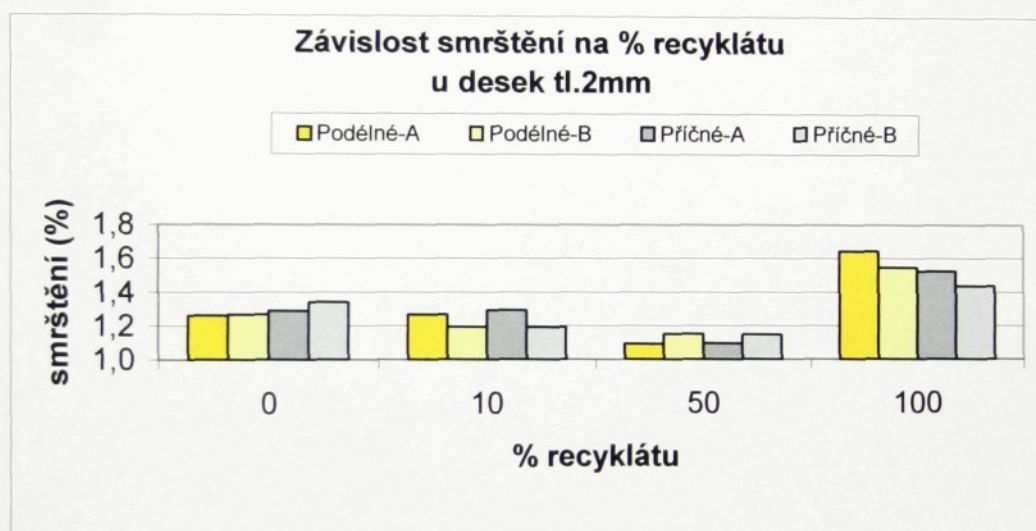
Graf 22: Rázová houževnatost.

Diskuse: U všech těles došlo k úplnému přeražení, lom typu c. Závislost rázové houževnatosti na procentu přidaného recyklátu má rostoucí charakter, nejvyšších hodnot je dosaženo při 100%, resp. 50% recyklátu, kdy dosahuje cca 35 kJ.m^{-2} .

3.5.6 Výrobní smrštění

Tab. 24: Výrobní smrštění - tloušťka 2mm.

% recyklátu	PODÉLNÉ SMRŠTĚNÍ (%)		PŘÍČNÉ SMRŠTĚNÍ (%)	
	Těleso A	Těleso B	Těleso A	Těleso B
0	1,261 ± 0,067	1,268 ± 0,040	1,288 ± 0,077	1,340 ± 0,057
10	1,266 ± 0,070	1,192 ± 0,084	1,292 ± 0,134	1,189 ± 0,110
50	1,091 ± 0,044	1,151 ± 0,014	1,094 ± 0,185	1,147 ± 0,016
100	1,645 ± 0,173	1,546 ± 0,194	1,523 ± 0,121	1,436 ± 0,148

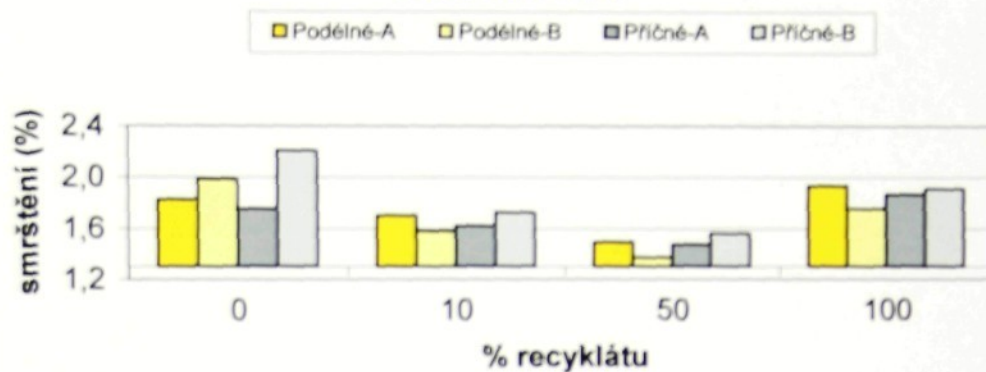


Graf 23: Výrobní smrštění – tloušťka 2mm.

Tab. 25: Výrobní smrštění – tloušťka 4mm.

% recyklátu	PODÉLNÉ SMRŠTĚNÍ (%)		PŘÍČNÉ SMRŠTĚNÍ (%)	
	Těleso A	Těleso B	Těleso A	Těleso B
0	1,828 ± 0,141	1,987 ± 0,593	1,756 ± 0,045	2,213 ± 0,711
10	1,704 ± 0,041	1,577 ± 0,117	1,624 ± 0,032	1,729 ± 0,086
50	1,495 ± 0,020	1,373 ± 0,015	1,478 ± 0,018	1,562 ± 0,009
100	1,936 ± 0,044	1,755 ± 0,039	1,874 ± 0,036	1,914 ± 0,049

Závislost smrštění na % recyklátu u desek tl.4mm



Graf 24: Výrobní smrštění – tloušťka 4mm.

Diskuse: Nejnižší hodnoty smrštění byly určeny u těles s 50% přidaného recyklátu, a dále pak u těles s 10% recyklátu. Naopak desky s 0% a 100% recyklátu vykázaly hodnoty smrštění vyšší, a proto jsou z tohoto hlediska při použití v praxi méně vhodné.

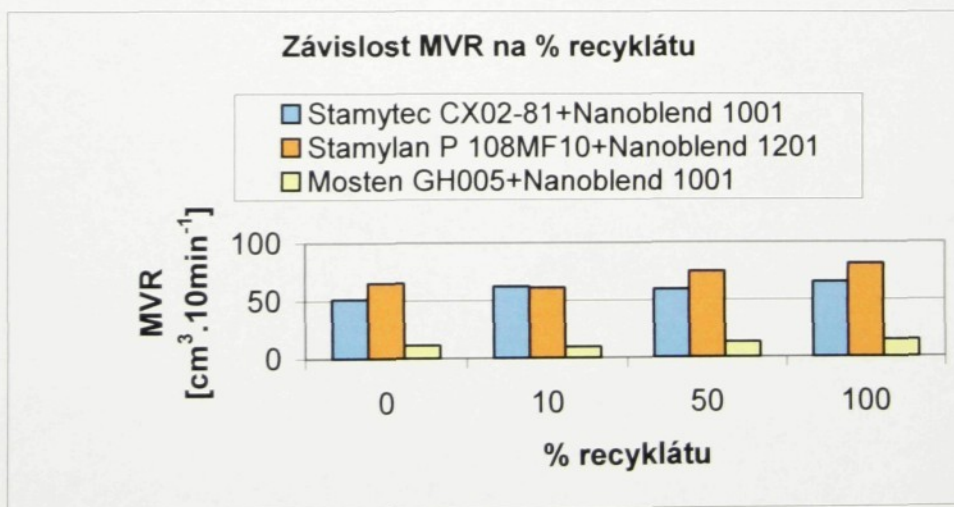
4 ZÁVĚREČNÁ ČÁST

4.1 HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ JEDNOTLIVÝCH ZKOUŠEK

4.1.1 Objemový index toku taveniny

Tab. 26: Závislost MVR na % recyklátu.

% recyklátu	0	10	50	100
Stamyttec CX02-81 + Nanoblend 1001				
MVR [cm ³ .10min ⁻¹]	65,193	61,221	74,859	81,597
směrodatná odchylka	4,058	6,905	3,419	3,672
Stamylan P 108MF10 + Nanoblend 1201				
MVR [cm ³ .10min ⁻¹]	65,193	61,221	74,859	81,597
směrodatná odchylka	4,058	6,905	3,419	3,672
Mosten GH005 + Nanoblend 1001				
MVR [cm ³ .10min ⁻¹]	11,382	9,701	13,246	14,620
směrodatná odchylka	0,027	0,184	0,605	0,238



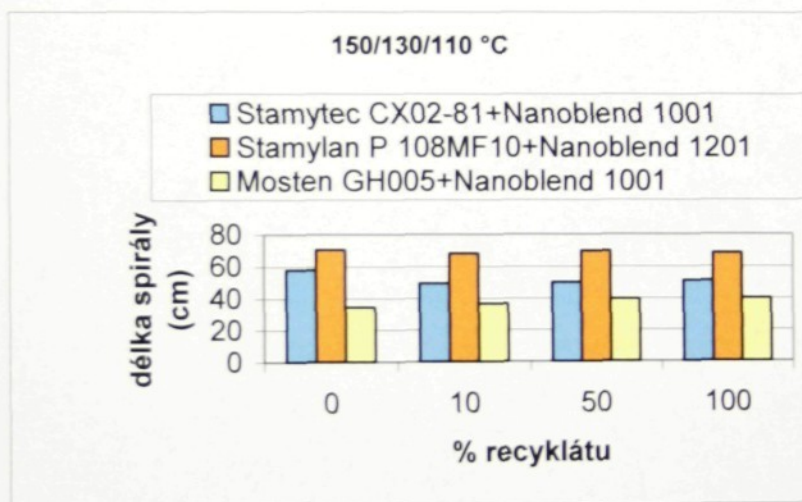
Graf 25: Závislost MVR na % recyklátu.

Diskuse: Při měření bylo zjištěno, že materiály Stamyttec CX02-81 a Stamylan P 108MF10 mají index toku taveniny výrazně vyšší, než Mosten GH005. Je možné očekávat, že tekutější tavenina bude lépe zabíhavá a umožní tak výrobu tenkostěnnějších a tvarově složitějších dílů.

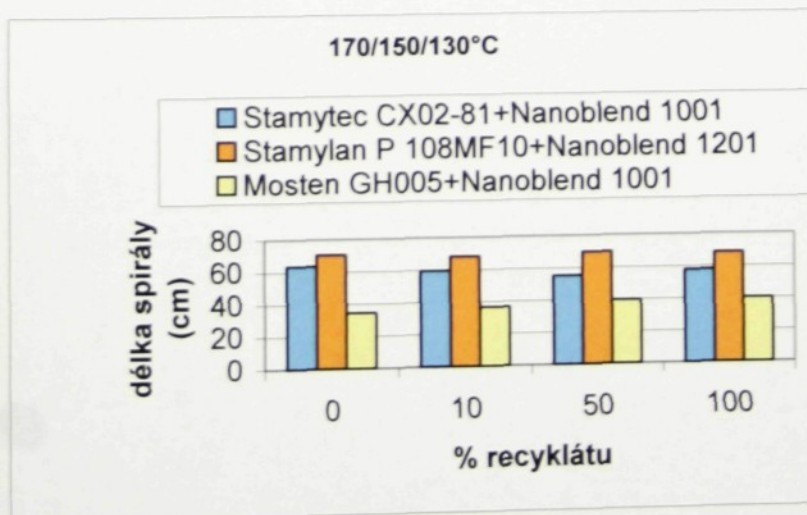
4.1.2 Spirálová zkouška zabíhavosti taveniny

Tab. 27: Výsledky spirálové zkoušky.

Teplota válce	150/130/110°C				170/150/130°C			
% recyklátu	0	10	50	100	0	10	50	100
Délka spirály (cm)	Stamytex CX02-81 + Nanoblend 1001							
	58,0	49,5	50,0	51,0	63,5	59,5	55,3	57,9
	Stamylan P 108MF10 + Nanoblend 1201							
	70,5	68,2	69,6	68,3	79,9	76,3	78,2	77,2
	Mosten GH005 + Nanoblend 1001							
	34,5	36,5	39,5	40,0	38,5	43,0	44,5	48,5



Graf 26: Výsledky spirálové zkoušky při nižších teplotách válce.



Graf 27: Výsledky spirálové zkoušky při vyšších teplotách válce.

Diskuse: Při obou teplotách válce vstřikovací jednotky stroje se potvrdilo, že tekutější plast lépe zabíhá do formy. Nejhorší zabíhavost vykazuje Mosten GH005, Stamytec CX02-81 i Stamylan P 108MF10 zabíhají zřetelně lépe. Rozdíly mezi Mostenem GH005 a zbylými dvěma materiály však nejsou tak výrazné, jako u měření MVR.

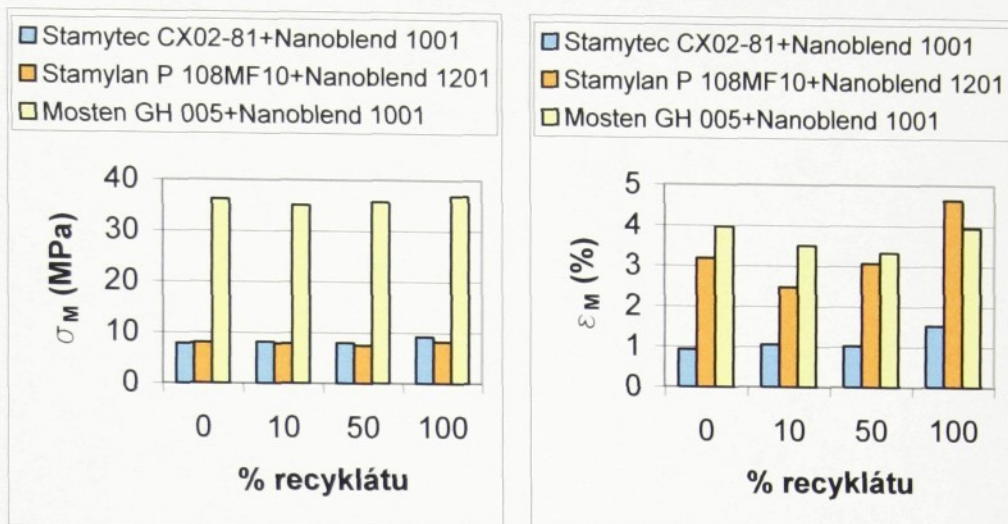
4.1.3 Tahové vlastnosti

Tab. 28: Hodnoty meze pevnosti v tahu.

% recykliátu	0	10	50	100
σ_M (MPa)	Stamytec CX02-81 + Nanoblend 1001			
	7,854 ± 0,482	8,162 ± 0,236	7,970 ± 0,574	9,165 ± 0,543
	Stamylan P 108MF10 + Nanoblend 1201			
	8,048 ± 0,307	7,832 ± 0,313	7,505 ± 0,625	8,237 ± 0,423
	Mosten GH005 + Nanoblend 1001			
	36,240 ± 0,380	35,060 ± 0,776	35,670 ± 1,311	36,930 ± 0,353

Tab. 29: Hodnoty deformace na mezi pevnosti v tahu.

% recykliátu	0	10	50	100
ε_M (%)	Stamytec CX02-81 + Nanoblend 1001			
	0,936 ± 0,119	1,059 ± 0,326	1,026 ± 0,314	1,528 ± 0,276
	Stamylan P 108MF10 + Nanoblend 1201			
	3,188 ± 0,879	2,474 ± 0,543	3,069 ± 0,902	4,633 ± 1,077
	Mosten GH005 + Nanoblend 1001			
	3,964 ± 0,273	3,504 ± 0,704	3,331 ± 1,048	3,940 ± 0,443



Graf 28, 29: Hodnoty meze pevnosti v tahu a deformace na mezi pevnosti v tahu.

Diskuse: Z hlediska meze pevnosti tahem jasně dominuje Mosten GH005, jenž dosahuje pevnosti více než 4x vyšší, než zbylé dva materiály. Deformace na mezi pevnosti Mostenu GH005 a Stamylanu P 108MF10 jsou v porovnání se Stamytcem CX02-81 vyšší, ale Mosten GH005 této deformace dosahuje při řádově vyšším napětí.

Pro výrobu pevných a lehkých dílců lze proto doporučit Mosten GH005.

4.1.4 Ohybové vlastnosti

Tab. 30: Hodnoty mezeí pevnosti v ohybu.

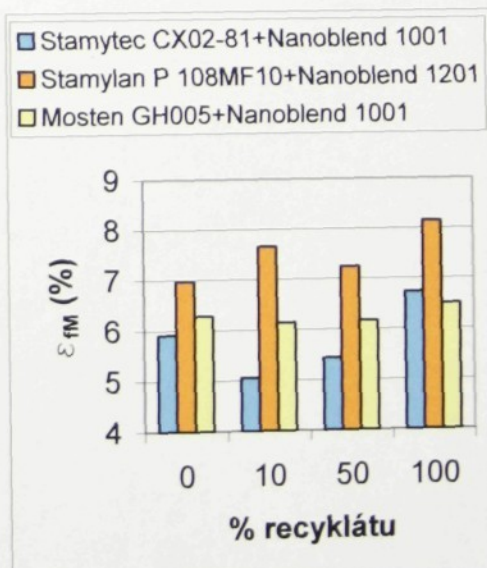
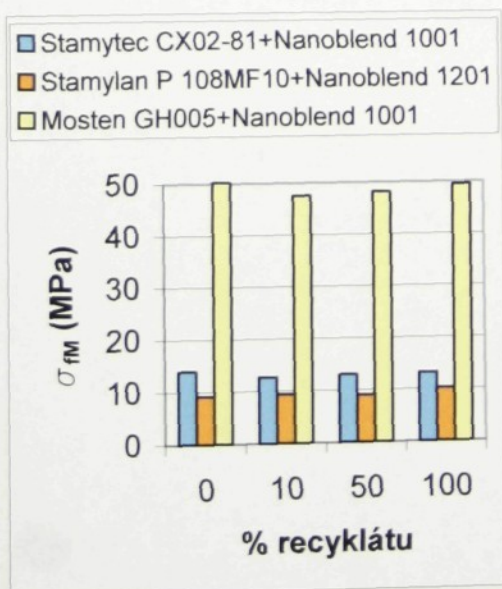
% recyklátu	0	10	50	100
σ_M (MPa)	Stamyttec CX02-81 + Nanoblend 1001			
	13,956 ± 0,797	12,702 ± 0,679	12,960 ± 0,470	13,182 ± 0,057
	Stamylan P 108MF10 + Nanoblend 1201			
	9,156 ± 0,286	9,378 ± 0,274	9,080 ± 0,131	10,153 ± 0,636
	Mosten GH005 + Nanoblend 1001			
	50,220 ± 1,268	47,540 ± 0,487	48,100 ± 0,838	49,500 ± 0,392

Tab. 31: Hodnoty deformace na mezi pevnosti v ohybu.

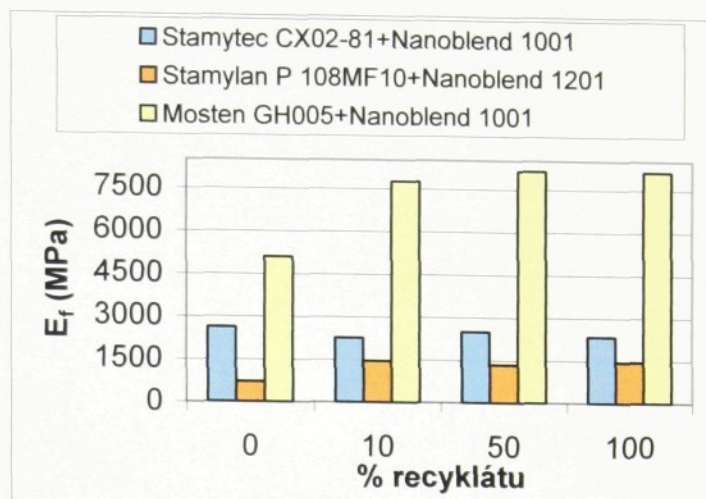
% recyklátu	0	10	50	100
ε_m (%)	Stamytex CX02-81 + Nanoblend 1001			
	5,909 ± 1,262	5,054 ± 1,158	5,430 ± 1,176	6,730 ± 0,484
	Stamylan P 108MF10 + Nanoblend 1201			
	6,977 ± 0,403	7,657 ± 2,909	7,244 ± 0,541	8,148 ± 3,138
	Mosten GH005 + Nanoblend 1001			
	6,280 ± 2,371	6,141 ± 0,054	6,163 ± 0,231	6,498 ± 0,347

Tab. 32: Hodnoty modulu pružnosti v ohybu.

% recyklátu	0	10	50	100
E_m (MPa)	Stamytex CX02-81 + Nanoblend 1001			
	2629 ± 410	2258 ± 511	2497 ± 340	2338 ± 223
	Stamylan P 108MF10 + Nanoblend 1201			
	715 ± 350	1454 ± 307	1334 ± 415	1437 ± 332
	Mosten GH005 + Nanoblend 1001			
	5100 ± 691	7760 ± 266	8142 ± 239	8125 ± 305



Graf 30, 31: Hodnoty meze pevnosti v ohybu a deformace na mezi pevnosti v ohybu.



Graf 32: Hodnoty modulu pružnosti v ohybu.

Diskuse: Průběhy vlastností zjištěné při zkoušce ohybem mají obdobný charakter, jako při zkoušce tahem. Jasně nejvyšší mez pevnosti v ohybu vykazuje Mosten GH005. Vliv recyklátu na mez pevnosti v ohybu je nevýrazný. Deformace na mezi pevnosti je více ovlivněna přidavkem recyklátu. Stamytex CX02-81 a Mosten GH005 mají vanový průběh, nejnižší deformace na mezi pevnosti v ohybu je dosaženo při 10%, resp. 50% recyklátu.

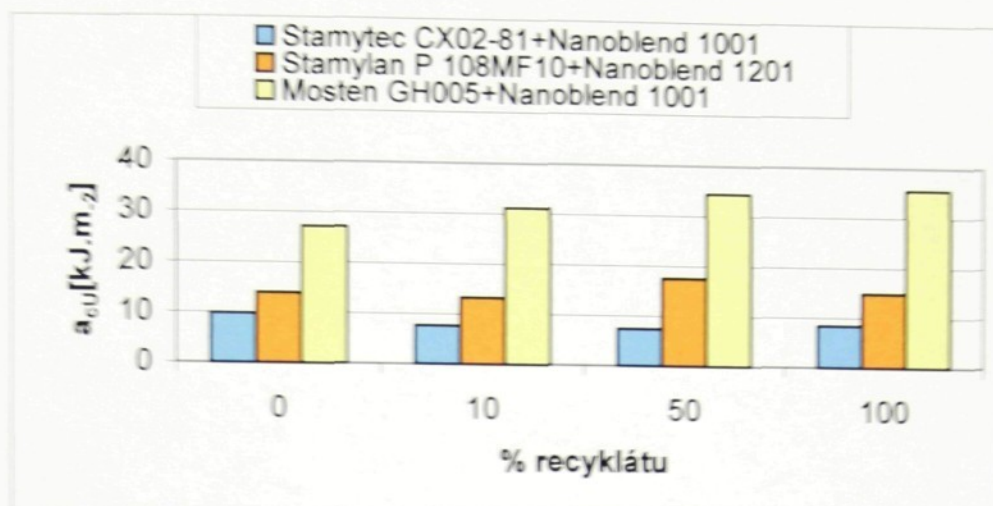
Z hlediska modulu pružnosti v ohybu opět jasně dominuje Mosten GH005, a to zejména při 10%, 50 a 100% recyklátu.

Pro výrobu pevných a lehkých dílů je nejvhodnější Mosten GH005.

4.1.5 Rázová houževnatost metodou Charpy

Tab 33: Rázová houževnatost.

% recyklátu	0	10	50	100
Stamytex CX02-81 + Nanoblend 1001				
$a_{cu}[\text{kJ.m}^{-2}]$	9,805	7,650	7,393	8,365
sm. odchylka	1,520	2,102	0,893	1,744
Stamylan P 108MF10+ Nanoblend 1201				
$a_{cu}[\text{kJ.m}^{-2}]$	13,930	13,240	17,530	14,848
sm. odchylka	3,494	4,557	3,580	3,962
Mosten GH005 + Nanoblend 1001				
$a_{cu}[\text{kJ.m}^{-2}]$	27,120	31,099	34,456	35,578
sm. odchylka	4,589	5,298	4,359	4,244



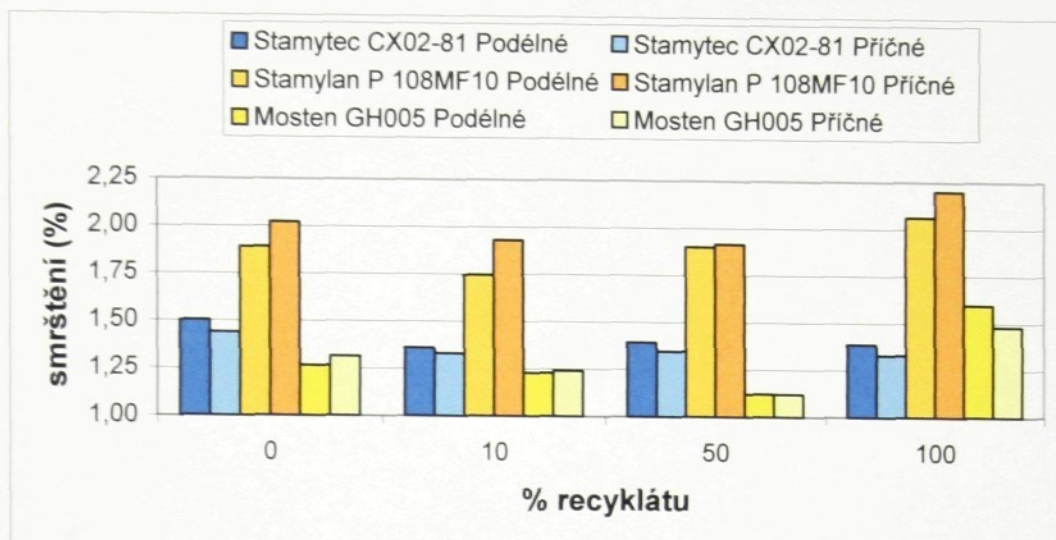
Graf 33: Rázová houževnatost.

Diskuse: U všech vzorků došlo k úplnému přeražení (typ lomu c). Z hlediska rázového namáhání nejlépe obstál Mosten GH005. Stamytec P 108MF10 dosahuje poloviční a Stamytec CX02-81 třetinové rázové pevnosti. Nejlepších hodnot dosahuje Stamytec CX02-81 při 0% a 100% recyklátu, Stamytec P 108MF10 při 50% (při 0% a 100% jsou hodnoty pouze nepatrně nižší), a Mosten GH005 Při 100% a 50% recyklátu. Budou-li vyráběny součásti vystaveny riziku rázového namáhání, jeví se Mosten GH005 jako nejvhodnější materiál.

4.1.6 Výrobní smrštění

Tab. 34: Výrobní smrštění - tloušťka 2mm.

% recyklátu	Stamytec CX02-81 + Nanoblend 1001		Stamytec P 108MF10 + Nanoblend 1201		Mosten GH005 + Nanoblend 1001	
	Podélné	Příčné	Podélné	Příčné	Podélné	Příčné
0	1,502	1,438	1,890	2,021	1,265	1,314
10	1,358	1,330	1,746	1,931	1,229	1,241
50	1,392	1,346	1,899	1,915	1,121	1,120
100	1,386	1,330	2,063	2,202	1,595	1,480

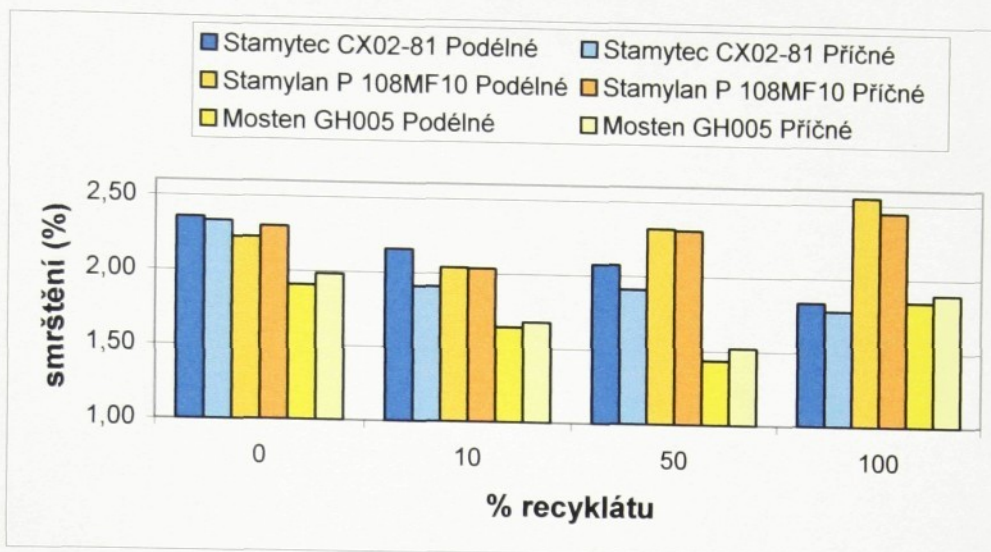


Graf 34: Výrobní smrštění – tloušťka 2mm.

Diskuse: U všech materiálů se ukázalo, že přidavek 10% nebo 50% recyklátu má příznivý vliv na smrštění zkušebních těles tloušťky 2mm. Nejnižších hodnot dosáhl Mosten GH005 (zejména při 50% recyklátu), naopak nejhůře dopadl ve srovnání Stamytec P 108MF10.

Tab. 35: Výrobní smrštění – tloušťka 4mm.

% recyklátu	Stamytec CX02-81 + Nanoblend 1001		Stamytec P 108MF10 + Nanoblend 1201		Mosten GH005 + Nanoblend 1001	
	Podélné	Příčné	Podélné	Příčné	Podélné	Příčné
0	2,356	2,331	2,224	2,299	1,908	1,984
10	2,158	1,909	2,040	2,034	1,640	1,676
50	2,074	1,909	2,319	2,309	1,434	1,520
100	1,834	1,779	2,547	2,445	1,845	1,894



Graf 35: Výrobní smrštění – tloušťka 4mm.

Diskuse: I při tloušťce těles 4mm se prokázal pozitivní vliv příměsi 10% nebo 50% recyklátu. Nejlépe opět dopadl Mosten GH005(při 10 a 50%), jehož hodnoty leží mezi 1,4% a 2,0%. Směs se 100% recyklátu Stamytanu P 108MF10 vykázala podélné smrštění vyšší než 2,5%, a proto je nejméně vhodná pro výrobu rozměrově a tvarově přesných výrobků.

4.2 ZÁVĚR

Diplomová práce byla vypracována v listopadu a prosinci 2004. V úvodní části je čtenář seznámen s významem plastů v dnešní průmyslové výrobě.

Teoretická část pojednává o plastech z hlediska jejich vlastností, způsobech zpracování, zejména vstřikováním. Jsou zde popsány vlivy různých faktorů na kvalitu a vlastnosti výrobků. Poslední část teorie poskytuje stručný výklad podstaty a teorie přípravy nanokompozitních materiálů typu polym/jíl a výhody těchto materiálů oproti klasickým kompozitům.

Následuje experimentální část, kde jsou posány jednotlivé materiály použité pro výrobu zkušebních těles a stručný popis provedených zkoušek. Dále jsou zde uvedeny výsledky jednotlivých zkoušek pro dané dvojice matrice/plnivo Nanoblend.

Tyto jednotlivé výsledky jsou potom souhrnně hodnoceny v závěrečné části, kde jsou uvedeny pro danou zkoušku vždy hodnoty všech tří materiálů

a je tak možné zjistit vliv přísady recyklátu na daný materiál, ale je možné provést i porovnání materiálů mezi sebou.

Z výsledků všech zkoušek vyplývá, že pro přípravu nanokompozitních materiálů typu polymer/jíl se z této trojice zkoumaných materiálů nejlépe hodí kombinace Mosten GH500+Nanoblend 1001.

Homopolymer Mosten GH005+Nanoblend 1001 přesvědčivě překonal kopolymery Stamylen P 108MF10+Nanoblend 1201 i Stamytec CX02-81+Nanoblend 1001 ve většině zkoušek. V porovnání s ostatními dvěma materiály má Mosten GH005+Nanoblend 1001 vyšší hodnoty mechanických vlastností zjištěných při tahové a ohybové zkoušce, 2x až 3x vyšší rázovou pevnost, nejnižší hodnoty výrobního smrštění. Umožňuje tak výrobu pevných a rázu odolných výrobků při současném dodržení rozměrových a tvarových tolerancí.

Jedinou zjištěnou nevýhodou kompozitu Mosten GH005+Nanoblend 1001 oproti zbylým dvěma kombinacím je výrazně nižší tekutost a zabíhavost taveniny. To by mohlo činit problémy při výrobě tvarově složitých tenkostěnných výrobků.

5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- /1/ KREBS, J. : Teorie zpracování nekovových materiálů, část 1. Zpracování plastů, VŠST, Liberec, 1991
- /2/ KREBSOVÁ, M. : Nauka o polymerech, VŠST, Liberec, 1978
- /3/ www.ksp.vslib.cz
- /4/ www.engel.at
- /5/ BEAUMONT, L. : Successful Injection Moulding, Carl Hanser Verlag, 2002
- /6/ www.prsc.usm.edu/macrog/mpm/composit/nano/
- /7/ KALEDOVÁ, A. : Možnosti přípravy nanokompozitních systémů typu polymer/jíl a metody jejich hodnocení, Plasty a kaučuk 41, 2004/03
- /8/ www.nanocor.com
- /9/ LAPČÍK, L. : Nauka o materiálech II, Univerzita Tomáše Bati, Zlín, 2001
- /10/ www.sabic.com
- /11/ www.chemopetrol.cz
- /12/ ČSN EN ISO 527-1, Stanovení tahových vlastností, Část 1: Základní principy, Česká technická norma, 1997
- /13/ ČSN EN ISO 527-2, Stanovení tahových vlastností, Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty, Česká technická norma, 1998
- /14/ ČSN EN ISO 178, Stanovení ohybových vlastností, Česká technická norma, 1998
- /15/ ČSN EN ISO 179, Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy, Česká technická norma, 1998
- /16/ www.gm.com

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 3. ledna 2005

Bidlík

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 3rd January 2005

Bidas