

Vliv teploty na mechanické chování polymerů a kompozitů

Bc. Zbyněk Lutonský

Diplomová práce
2007



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2006/2007

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zbyněk LUTONSKÝ**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Vliv teploty na mechanické chování polymerů
a kompozitů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Příprava zkušebních tělísek
3. Experimentální studium závislosti mechanických vlastností na teplotě
4. Vyhodnocení experimentálně získaných dat

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Milan Žaludek, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

13. února 2007


Termín odevzdání diplomové práce:

25. května 2007

Ve Zlíně dne 17. ledna 2007


prof. Ing. Ignác Hoza, CSc.
děkan




doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá vlivem teploty na mechanické chování polymerů a kompozitů.

V teoretické části je práce zaměřena na popis a rozdělení polymerních a kompozitních materiálů, mechanické vlastnosti polymerů a jejich zkoušení a tepelné vlastnosti polymerů.

V praktické části diplomové práce se nachází popis a technické parametry použitých materiálů a zařízení, vyhodnocení tahových zkoušek provedených v teplotní komoře a porovnání naměřených výsledků s FEM modelem pro krátkovláknový kompozitní materiál.

V příloze práce jsou uvedeny vstřikovací podmínky při výrobě zkušebních těles.

Klíčová slova: polymery, kompozity, vlákno, matrice, teplota, mechanické vlastnosti, tahová zkouška

ABSTRACT

This diploma work is about the temperature influence on mechanical behavior of polymers and composites.

In theoretical part the work is intended on description and partition of polymers and composites materials, mechanical properties of polymers and their testing and heat properties of polymers.

In practical part of diploma work there is a description and technical parameters of used materials and machines, evaluation of tensile testing performed in a temperature chamber and comparison of measured results with FEM model for short-fiber composite materials.

In the appendix of this work there are injection specifications at production of testing specimens.

Keywords: polymers, composites, fiber, matrix, temperature, mechanical properties, tensile test

Děkuji mému vedoucímu Ing. Milanovi Žaludkovi, Ph.D., za odborné vedení a ochotu, kterou mi věnoval při vypracování diplomové práce.

Také bych chtěl poděkovat Mgr. Romanu Dlabajovi, Ph.D. a firmě ITC a. s. Zlín, za poskytnutí testovacích přístrojů.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího diplomové práce a ředitele ústavu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 20. 05. 2007

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY	10
1.1 ROZDĚLENÍ A CHARAKTERISTIKA	10
1.2 STRUKTURA POLYMERŮ	11
2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	15
2.1 DEFINICE A DĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	15
2.1.1 Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie výztuže	16
2.2 KRÁTKOVLÁKNOVÉ KOMPOZITY	18
2.2.1 Teorie přenosu napětí	18
2.2.2 Výpočet elastických konstant krátkovláknových kompozitů	23
2.2.3 Termomechanické a elastické konstanty krátkovláknových kompozitních struktur	24
2.2.4 Tok taveniny při plnění formy	26
2.2.5 Hodnocení standartních tahových testů polymerů plněných krátkými vlákny modelováním elastických konstant	28
3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ	32
3.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ	32
3.2 DRUHY ZKOUŠEK MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	33
3.3 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	33
3.4 ZKOUŠKA TAHEM	36
3.5 ZKOUŠKA OHYBEM	43
4 TEPELNÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ	47
4.1 TRVALÁ TEPELNÁ ODOLNOST	48
4.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ ZÁVISLÉ NA TEPLOTĚ	50
4.3 TEPELNÉ STÁRNUTÍ	52
4.4 TEPLOTNÍ ZÁVISLOST MODULU PRUŽNOSTI	54
4.4.1 Amorfnní termoplastické polymery	54
4.4.2 Semikrystalické polymery	55
4.4.3 Sesítěné polymery	56
4.4.4 Teplota skelného přechodu	56
4.5 PŘÍKLADY MECHANICKÉHO CHOVÁNÍ POLYMERŮ ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT	57
II PRAKTICKÁ ČÁST	59
5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	60
6 POPIS A TECHNICKÉ PARAMETRY POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ	61

6.1	ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK	61
6.2	TEPLOTNÍ KOMORA ZWICK	62
6.3	VSTŘIKOVACÍ STROJ ARBURG.....	64
7	POPIS POUŽITÝCH MATERIÁLŮ	65
8	EXPERIMENT A VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	70
8.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	70
8.1.1	Vstřikovací podmínky	70
8.2	TAHOVÁ ZKOUŠKA.....	71
8.3	VÝPOČET EFEKTIVNÍHO MODULU PRUŽNOSTI VRSTEVNATÉ STRUKTURY PRO PP+30% GF	96
	DISKUSE VÝSLEDKŮ	99
8.4	PŘEHLED VÝSLEDKŮ MODULU PRUŽNOSTI V TAHU V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ 99	
8.5	PŘEHLED VÝSLEDKŮ MEZE PEVNOSTI V TAHU V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ	100
8.6	PŘEHLED VÝSLEDKŮ POMĚRNÉHO PRODLOUŽENÍ V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ	101
8.7	GRAFICKÉ POROVNÁNÍ S MODELEM PRO KRÁTKOVLÁKNOVÝ KOMPOZITNÍ MATERIÁL PP+30% GF.....	102
	ZÁVĚR	105
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	106
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	108
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	112
	SEZNAM TABULEK	116
	SEZNAM PŘÍLOH	118

ÚVOD

Rozvoj výroby a zpracování plastů předstihuje v posledních letech rozvoj většiny jiných oborů. Je to dáno jejich velmi širokou použitelností pro technické i netechnické účely, snadnou zpracovatelností a výhodnými specifickými vlastnostmi. Výrobky z plastů se uplatňují stále více ve spotřebním průmyslu, kde nahrazují materiály klasické.

Mezi hlavní způsoby zpracování polymerů patří vstřikování. Význam této technologie stále roste a umožňuje produkovat ekonomicky kvalitní a rozměrově přesné výrobky v jedné operaci. V současné době se vstřikováním zpracovává více než čtvrtina polymerů. Vstřikování má tedy značnou produktivitu a představuje úsporu lidské práce a snížení spotřeby energie při výrobě.

Současný sortiment plastů představuje širokou paletu od základních plastů širokého použití až po speciální konstrukční plasty s význačnými vlastnostmi, zejména s vyšší pevností a tuhostí i za zvýšených teplot a se zvýšenou odolností proti účinkům agresivních látek. Nejrůznější polymerní směsi, kopolymery, plněné a lehčené polymery umožňují přizpůsobit vlastnosti materiálu požadavkům kladeným na určitý druh výrobku. Lze například zvyšovat tuhost a pevnost, snižovat křehkost při nižších teplotách, výrazně zlepšit odolnost proti povětrnostním a chemickým vlivům, odolnost proti hoření, tepelnou a elektrickou vodivost, tvarovou stálost za tepla aj. V praxi se pak používají čisté typy materiálů a plněné typy. Plněné plasty se nazývají částicovými kompozity - částice plniva jsou rozptýleny v polymerní matrici. Jako plniva se používají krátká skleněná vlákna, mletá minerální plniva, skleněné mikrokuličky, grafit aj., a to v různých koncentracích. Tuhé částice obecně zvyšují tuhost, méně již pevnost, zhoršují houževnatost plastu oproti např. kaučukovým inkluzím. Zvláštním případem částicového kompozitu jsou pak lehčené plasty, užívané zejména pro své tepelně izolační vlastnosti a nízkou hmotnost.

Při použití plastů pro konstrukční dílce nás bude zajímat vedle jiných vlastností, jako je chemická odolnost, stárnutí apod., také i rozsah teploty, při které bude změna strukturních vlastností tak malá, že nám neovlivní požadované mechanické hodnoty.

Diplomová práce se zabývá studiem vlivu teploty na mechanické chování polymerů a kompozitů a srovnává experimentálně zjištěné hodnoty s hodnotami získanými z namodelované struktury.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

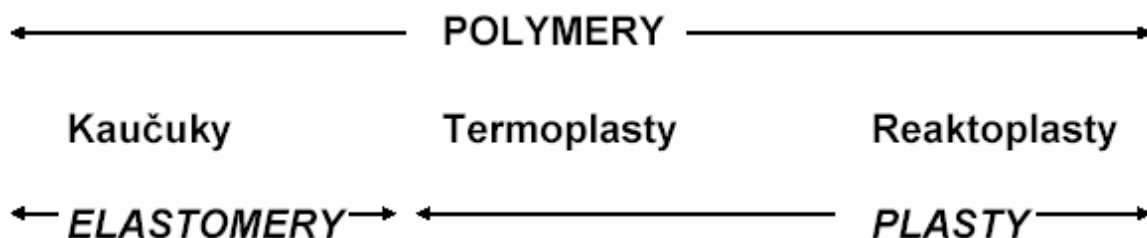
Plasty jsou makromolekulární látky, které se dají formovat do požadovaného tvaru teplem nebo tlakem, popř. oběma činiteli současně. Jsou pevné a dobře tvarovatelné, lehké, snadno se obrábějí a většinou mají dobré i tepelně-izolační vlastnosti. Ve srovnání s kovy téměř nepodléhají korozi, což je výhodné z hlediska trvanlivosti výrobků z nich zhotovených, ale nevýhodné z hlediska ekologického, protože odpad z plastů se v přírodě jen pomalu rozkládá.

Podstatnou složkou jsou makromolekulární organické sloučeniny přírodního nebo syntetického původu, tvořené atomy uhlíku a vodíku, k nimž přistupují atomy dalších prvků. Další důležitou složkou jsou tzv. příměsi, které často označujeme přímo účelem, za kterým se do makromolekulárních látek přidávají (plniva, změkčovadla, stabilizátory, maziva, ...).

Užité vlastnosti polymerů je možno v široké míře měnit plnivý. Plniva snižují cenu výrobků, ale také mění mechanické vlastnosti. Rozdělujeme je na nevyztužující, která jsou obvykle prášková (např. grafit), mající vliv na kluzné a tepelné vlastnosti a na vyztužující (vláknité, např. sklo, tkaniny), jež zvyšují především pevnost při současném zvýšení modulu pružnosti. [1]

1.1 Rozdělení a charakteristika

Polymery jsou chemické látky, které vykazují díky svým obrovským molekulám neobvykle širokou škálu vlastností. Polymery se dělí na elastomery a plasty. Rozdělení plastů: termoplasty a reaktoplasty.



Obr. 1. Rozdělení polymerů

Elastomer je vysoce elastický polymer, který lze za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení. Tato deformace je převážně vratná. Dominantní skupinou elastomerů jsou kaučuky, z nichž se vyrábí pryže.

Termoplasty lze opakovaně ohřevem převést do stavu taveniny nebo viskózního toku a ochlazením nechat ztuhnout při teplotách, které jsou charakteristické pro daný typ termoplastu. Základ recyklačních technologií termoplastů.

Reaktoplasty procházejí při zpracovatelském procesu chemickou reakcí a účinkem tepla, záření nebo síťovacích činidel vytvářejí husté, prostorově sesíťované struktury, v nichž jsou původní molekuly vzájemně pospojovány kovalentními vazbami. Tento proces se nazývá vytvrzování. Reaktoplast je ve vytvrzeném stavu netavitelný a nerozpustný. Recyklace reaktoplastů je proto obtížnější než u termoplastů a vyžaduje jiné postupy.

Jiné dělení polymerů vychází ze způsobu jejich vzniku:

- *polymery přírodní* (bílkoviny, škrob, celulóza, kaučuk a látky syntetické, ale přírodním polymerům podobné (celuloid, vlnitina, viskóza, umělé hedvábí, umělá rohovina apod.)

- *polymery syntetické* (polyetylén, polyvinylchlorid, atd.)

Dále můžeme dělit polymery podle způsobu jejich použití a to na: vlákna, fólie, desky, trubky, laky, elastomery (kaučuky), lepidla, maziva, apod.

Z chemicko – technologického hlediska dělíme polymery na: polymeráty, polykondenzáty a polyadukty. [2]

1.2 Struktura polymerů

Polymery jsou tvořeny tzv. makromolekulami, složenými z jednotlivých opakujících se dílců – monomerů. Podle jejich seřazení dělíme polymery na:

Lineární polymery

V tomto případě jsou jednotlivé monomery seřazeny za sebou, viz *obr. č.2(a)*, takže vytvoří jednoduchý řetězec. Mezi těmito pružnými řetězci působí slabé Van der Waalovy vazby (patří sem polyetylén, polyvinylchlorid, polystyrén, polymethylmetakrylát, nylon a též např. fluorokarbyny).

Rozvětvené polymery

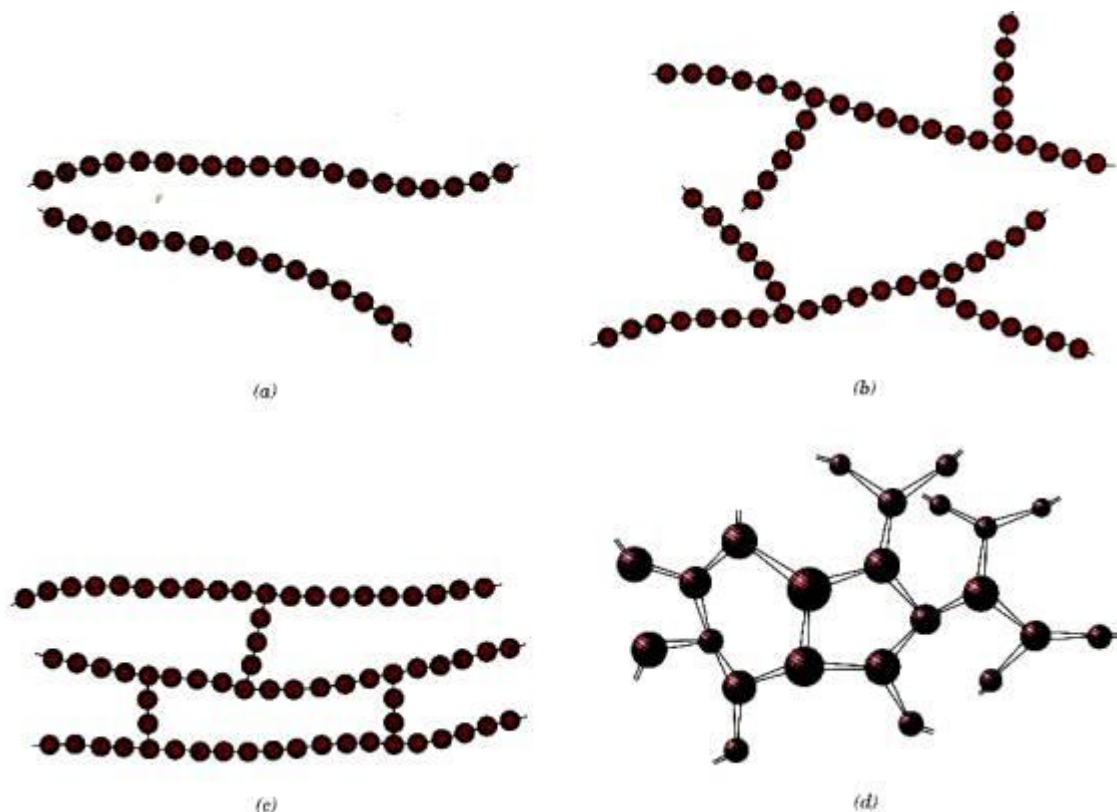
Struktura těchto polymerů je schematicky znázorněna na *obr. č.2(b)*. Jejich makromolekula se vyznačuje hlavním řetězcem, z něhož vystupují postranní „větve“. Celá struktura má menší hustotu, než lineární polymery.

Polymery se zkříženými články

Schematický obrázek takových polymerů je uveden na *obr. č.2(c)*. Z obrázku plyne, že sousední řetězce těchto polymerů jsou mezi sebou propojeny články, které jsou vázány pomocí silné kovalentní vazby. Sem patří různé elastické materiály, jako je např. přírodní i syntetický kaučuk.

Sít'ované polymery

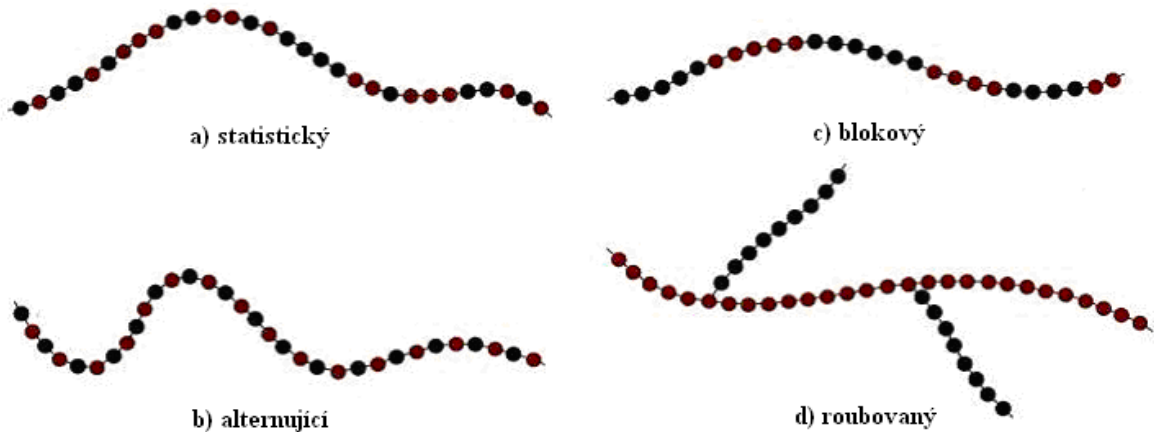
Trojrozměrné monomery, které mají tři aktivní kovalentní vazby vytvářejí trojrozměrnou síť viz *obr. č.2(d)*. Tyto polymery mají zajímavé mechanické vlastnosti. Patří sem epoxidy a fenolformaldehydy.



Obr. 2. Struktura polymerů

Kopolymery

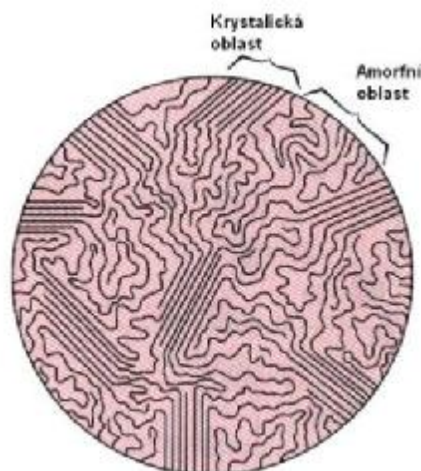
Tyto polymery vznikají polymerací více než jednoho druhu monomerů. Tyto monomery se mohou střídat buď náhodně, nebo střídavě. Různé struktury kopolymerů jsou znázorněny na *obr. č.3*.



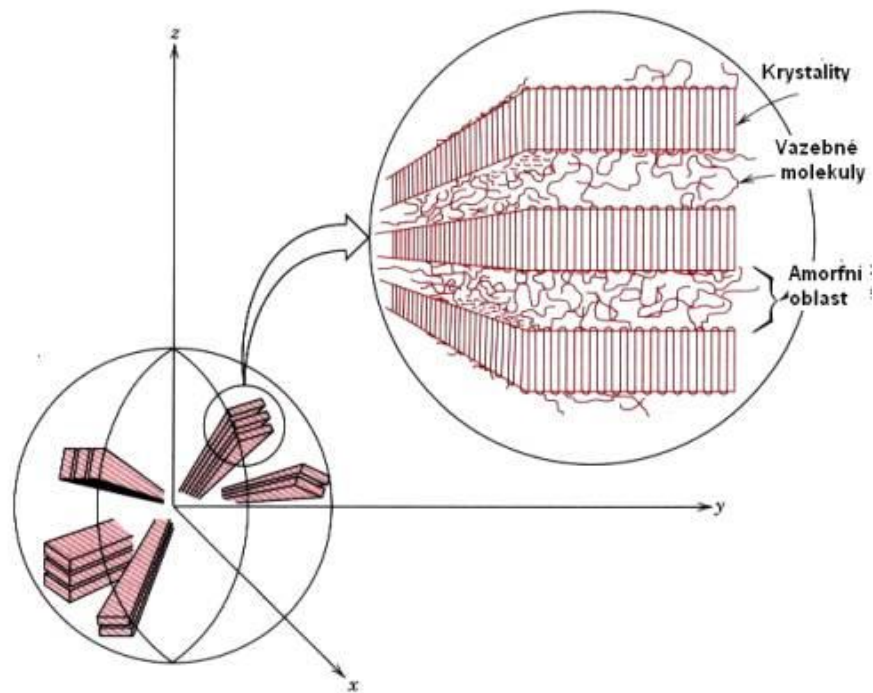
Obr. 3. Struktura kopolymerů

Krystalické a semikrystalické polymery

Velká délka makromolekul je na překážku jejich úplné krystalizaci. Přesto i u polymerů pozorujeme krystalický stav takový, že makromolekuly jsou pravidelně uspořádány v omezeném objemu (*obr. č.4*). Protože jsou uspořádány jenom částečně, hovoříme také o semikrystalickém stavu. Mnohé polymery, krystalizující z taveniny, vytvářejí tzv. sférolity (*obr. č.5*), které mají, jak zní jejich název kulovitý tvar. [2]



Obr. 4. Semikrystalický polymer



Obr. 5. Sfěrolit

2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Složené neboli kompozitní materiály mají před homogenními materiály řadu předností. Kombinací dvou nebo více materiálů, případně několika fází, lze výhodně kombinovat i jejich vlastnosti. Často se tak dosahuje lepších výsledných vlastností, než by odpovídalo prostému součtu vlastností složek. Kompozity mohou být lehké a přitom si zachovat pevnost a tuhost. K tomu přistupuje vyšší houževnatost, tepelná odolnost, rozměrová stálost, odolnost proti oděru a také nižší cena. Jsou to materiály, jejichž význam ve všech oblastech techniky neustále roste. [3]

2.1 Definice a dělení kompozitních materiálů

Kompozitem rozumíme materiál, který je složený z matrice neboli pojiva (tato fáze je v kompozitu spojitá) a z výztuže ve formě částic nebo vláken. Obvykle jsou použity částice nebo vlákna tužší a pevnější než matrice, takže zvyšují její tuhost a pevnost, mluvíme proto o vyztužujících elementech. V tzv. hybridních kompozitech se kombinuje společná matrice s vyztužujícími elementy různého typu (kombinují se tak různé druhy vláken nebo vláken a částic). [3]

Při rozšiřujících se možnostech kombinování složek, které kompozity vytvářejí, stává se jejich členění komplikované. Kompozity se nejčastěji člení:

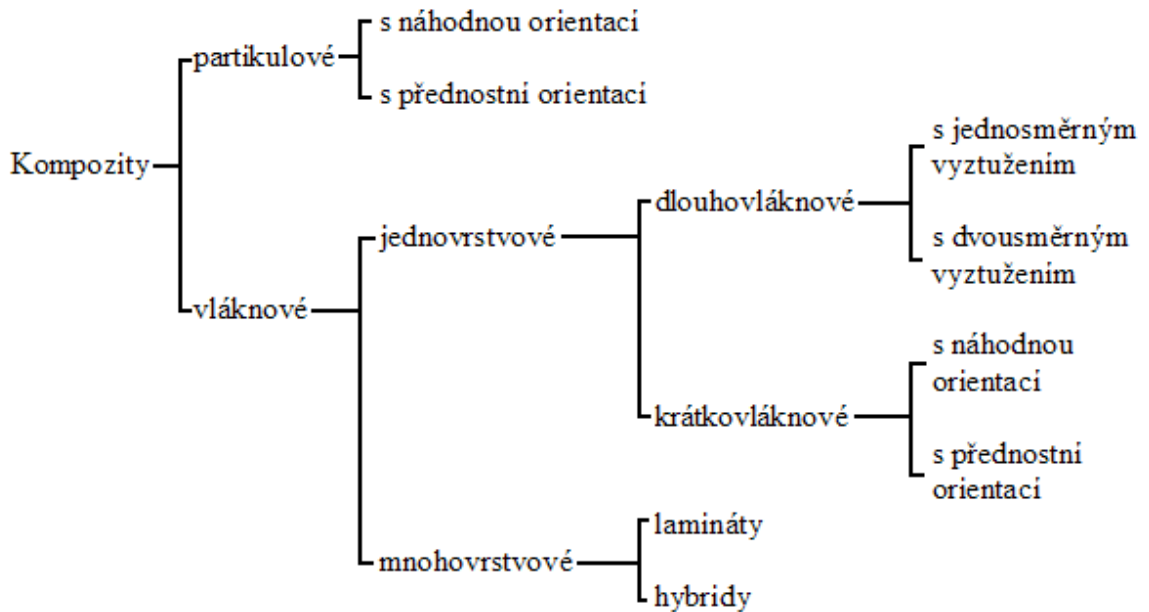
a) podle materiálu matrice na:

- kovové kompozity (např. slitiny, kovy zpevněné disperzemi, kovy vyztužené částicemi, kovy vyztužené vlákny),
- polymerní kompozity (termoplasty, reaktoplasty),
- keramické kompozity a ostatní organické kompozity (obvykle na silikonové, vápenaté nebo síranové bázi),

b) podle druhu zpevňující fáze:

- kompozity s kovovou zpevňující fází,
- kompozity se skleněnou zpevňující fází,
- kompozity s keramickou zpevňující fází,
- kompozity zpevněné vláknovými monokrystaly (whiskery),

c) podle tvaru výztuže plniva:



d) podle použití:

- vysokopevné kompozity pro použití při běžných teplotách,
- žárupevné kompozity pro použití při vysokých teplotách,
- speciální složené materiály. [4]

2.1.1 Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrie výztuže

Při geometrickém popisu systému je třeba uvažovat jednak charakteristiky dispergované fáze, zejména:

- tvar částic,
- velikost a distribuci velikosti částic,

jednak charakteristiky systému, tj.:

- koncentraci a koncentrační distribuci částic,
- orientaci částic,
- topologii částic. [4]

Tvar částic – základních idealizovaných tvarů částic plniva je pět: sférický (kulovitý), kubický (kostkový), pinakoidální (hranolový), lamelový (šupinkovitý), jehlicovitý (fibrilární, vláknitý). Většina reálných plniv má však částice, které se navzájem liší tvarem a velikostí. Tvar částic se mění od pravidelných krystalických forem až po celkem nepravidelné zrnité a vláknité formy, které vznikají při úpravě např. drcením a mletím.

Velikost a distribuce velikosti částic určují texturu materiálu a spolu s objemovým poměrem fází také vnitřní povrch, který je důležitý pro interakční chování fází. Distribuce velikosti částic je charakterizována kvantitativním zastoupením jednotlivých velikostí částic ve vzorku plniva. Granulometrické složení plniva se znázorňuje obvykle distribuční křivkou.

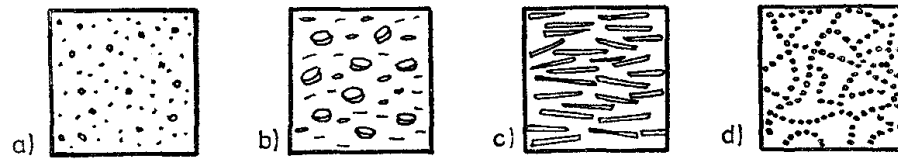
Koncentrace je objemová část dispergované fáze. Někdy se uvádí jako hmotnostní podíl, avšak s ohledem na rozdílné měrné hmotnosti fází a různé povrchy jsou takové údaje téměř bezcenné pro popis a predikci chování kompozitu.

Koncentrační distribuce popisuje rozsah smíšení fází a lze ji považovat za nejdůležitější jednotné měřítko quazihomogenity systému (*obr. č.6*). Každá jiná nezávislá geometrická proměnná, která může být popsána distribuční funkcí je nezávisle ovlivněna smíšením a zpracováním a je zvláštním kritériem quazihomogenity.



Obr. 6. Různé koncentrační distribuce

Orientace částic ovlivňuje izotropii systému. Výrobní technologie míšení, válcování, lisování, vytlačování atd. budou v případě nekulových částic způsobovat neplánovanou orientaci částic, a tím budou vytvářet anizotropii (*obr. č.7*). Vznik nechtěné orientace je jedním z hlavních problémů průmyslové výroby kompozitů. Zamýšlená orientace naproti tomu přináší jednu z největších výhod při návrhu konstrukcí z kompozitu.



Obr. 7. Některá možná uspořádání částic

- a) náhodně uspořádané koule,
- b) orientované destičky,
- c) orientovaná diskontinuální vlákna,
- d) řetězcově agregované koule.

Topologií částic rozumíme jejich vzájemný prostorový vztah. Např. disperze stejných kulových částic tvoří agregát, v němž jsou částice v dotyku, může vzniknout i při značně rozdílných koncentracích. [4, 11]

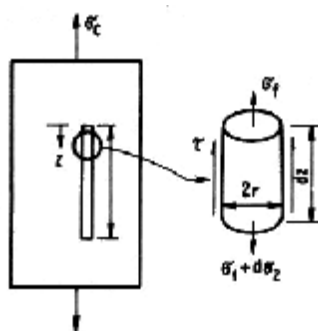
2.2 Krátkovláknové kompozity

Aplikace, kde napjatost nelze předem kvalitativně posoudit, nebo kde je známo, že napětí jsou stejná ve všech směrech, vyžadují kompozity, které mají přibližně stejnou pevnost ve všech směrech. V některých aplikacích je výhodné použít lamináty, které mají každou svou vrstvu izotropní. Účinným způsobem zhotovení izotropní vrstvy je použití náhodně orientovaných krátkých vláken jako výztuže. Tvářecí směsi s obsahem krátkých vláken poskytují vesměs izotropní kompozity a mohou být snadno vstřikovány nebo vtlačovány do forem [11].

2.2.1 Teorie přenosu napětí

V kompozitech nepůsobí zatížení přímo na vlákna, nýbrž je zaváděno do matricového materiálu a přenášeno do vláken prostřednictvím jejich konců, jednak též válcovým povrchem vlákna v okolí jeho konců. Je-li délka vlákna mnohem větší než délka, přes níž se

přenos napětí děje, mohou být koncové účinky zanedbány a vlákno uvažovat jako spojitě. U krátkovláknových kompozitů nemohou být účinky konců zanedbány a vlastnosti kompozitů jsou funkcí délky vlákna. Konce ovlivňují výrazně chování a zpevňovací účinky kompozitů s diskontinuálními vlákny. Rozdělení napětí podél vlákna lze jednoduše pochopit uvažováním rovnováhy malého prvku vlákna (obr. č.8).



Obr. 8. Rovnováha na elementu diskontinuálního vlákna uloženého rovnoběžně se směrem zatížení

Rovnováha sil na elementární délce dz je vyjádřena vztahem:

$$(\pi \cdot r^2) \cdot \sigma_f + (2\pi \cdot r^2 \cdot dz) \cdot \tau = (\pi \cdot r^2) \cdot (\sigma_f + d\sigma_f), \quad (1)$$

po úpravě

$$\frac{d\sigma_f}{dz} = \frac{2\tau}{r}, \quad (2)$$

kde σ_f – napětí vlákna v osovém směru,

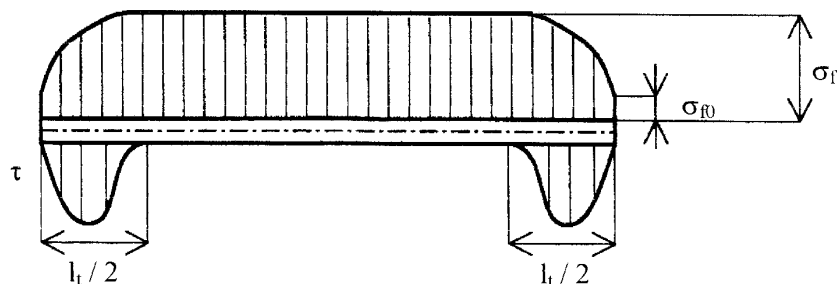
τ – smykové napětí na rozhraní válcové vlákno – matrice,

r – poloměr vlákna.

Napětí vlákna na průřezu ve vzdálenosti z od konce vlákna dostaneme integrací vztahu (2):

$$\sigma_f = \sigma_{f0} + \frac{2}{r} \cdot \int_0^z \tau dz, \quad (3)$$

kde σ_{f0} – napětí na konci vlákna.



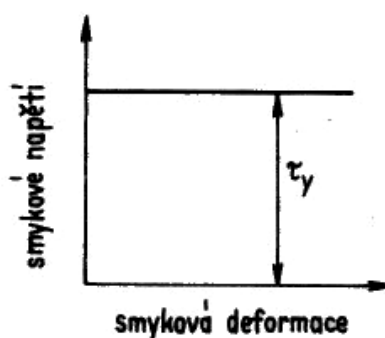
Obr. 9. Typický průběh normálového napětí s_f a smykového napětí t po délce vlákna

V řadě analýz je σ_{f0} zanedbáváno, neboť dochází ke kluzu matrice přiléhající ke konci vlákna nebo k separaci konce vlákna a matrice v důsledku velkých koncentrací napětí. Pak lze rovnici (3) psát:

$$s_f = \frac{2}{r} \cdot \int_0^z t dz \quad (4)$$

Chceme-li získat analytické řešení, je nezbytné přijmout předpoklady o deformaci materiálu obklopujícího vlákno a o podmínkách pro konec vlákna. Může se např. předpokládat, že smykové napětí na rozhraní v polovině délky vlákna a normálové napětí na konci vlákna je nulové. Běžně používaná přibližná metoda určení napětí vlákna předpokládá, že materiál matrice v okolí vláken je tuhý ideálně plastický, jak ukazuje obr. č.10. V tomto případě je smykové napětí na rozhraní konstantní a je rovno napětí na mezi kluzu ve smyku τ_y matrice. Pak integrací rovnice (4) dostáváme vztah:

$$s_f = \frac{2t_y \cdot z}{r} \quad (5)$$



Obr. 10. Idealizovaná křivka smykového napětí – smyková deformace pro matrici

U krátkých vláken vzniká maximální napětí vláken v polovině délky (tj. $z = l/2$). Pak platí:

$$(\sigma_f)_{\max} = \frac{t_y \cdot l}{r}, \quad (6)$$

kde l – délka vlákna.

Mezní hodnota napětí vlákna je napětí, které by přeneslo spojitě vlákno při zatěžování napětí namáhajícím kompozit. Za použití předpokladu, že $e_c = e_f = e_m$ (pro spojitá vlákna zatížená podél jejich osy) je maximální napětí vlákna dáno vztahem:

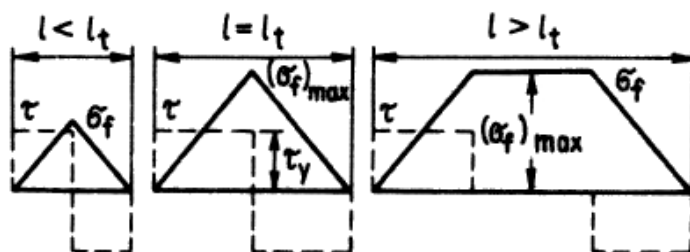
$$(\sigma_f)_{\max} = \frac{E_f}{E_c} \cdot \sigma_c, \quad (7)$$

kde σ_c – zatěžovací napětí kompozitu,

E_c – modul pružnosti kompozitu, který může být vypočten směšovacím pravidlem.

Přenosová délka vlákna l_t je definovaná jako minimální délka vlákna, nezbytná k tomu, aby napětí vlákna dosáhlo svého maxima $(\sigma_f)_{\max}$. To znamená, že touto délkou vlákna se převede zatížení z matrice do vlákna a je dána vztahem:

$$\frac{l_t}{d} = \frac{(\sigma_f)_{\max}}{2t_y} \quad (8)$$



Obr. 11. Průběhy napětí vlákna a smykového napětí na rozhraní pro různé délky vlákna

Kritická délka vlákna l_c je definována jako minimální délka vlákna, na které se dosáhne meze pevnosti vlákna σ_{pf} . Je dána vztahem:

$$\frac{l_c}{d} = \frac{s_{pf}}{2t_y} \quad (9)$$

Kritická délka vlákna je maximální hodnota přenosové délky, je to důležitá vlastnost systému a ovlivňuje mezní vlastnosti kompozitu. Někdy se jako přenosová délka a kritická délka rozumí neúčinná délka, neboť na tuto vzdálenost přebírá vlákno menší zatížení než činí jeho maximální napětí.

Poměr (l_c / d) označujeme jako kritickou štíhlost vlákna. Je-li štíhlost vlákna vyšší než kritická hodnota, dochází při dosažení meze pevnosti kompozitu k lomu, při němž dochází k přetržení jednotlivých vláken. Jednoduchý odhad pevnosti vychází ze vztahu pro podélnou pevnost v tahu polymeru jednosměrově vyztuženého dlouhými vlákny:

$$\sigma_{pc} = \sigma_{pf} \cdot V_f + \sigma_m(\epsilon_{pf}) \cdot V_m \quad (10)$$

Pro odhad pevnosti orientované krátkovláknové struktury se provede korekce vztahu (10) na střední osové napětí krátkého vlákna:

$$s_{stř} = s_{pf} \cdot \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right), \quad (11)$$

takže platí:

$$s_{pc} \approx s_{pf} \cdot \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) \cdot V_f + s_m(\epsilon_{pf}) \cdot V_m. \quad (12)$$

Pokud je délka $l < l_c$ dochází při porušení výrobku pouze k povytažení vláken z matrice. Pro odhad pevnosti pak platí vztah:

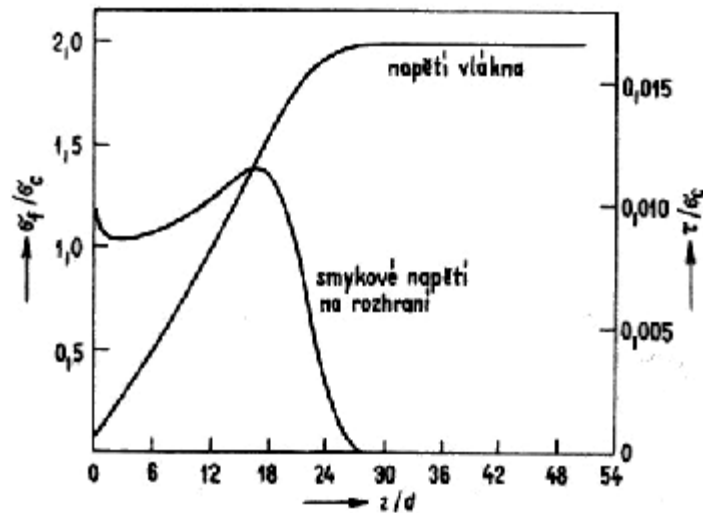
$$s'_{pc} \approx s'_{stř} \cdot V_f + s_{pm} \cdot V_m, \quad (13)$$

kde

$$s'_{stř} = \frac{t_y \cdot l}{d}. \quad (14)$$

Rozdělení napětí v *obr. č.11* jsou přibližná, neboť byla získána za předpokladu, že materiál matrice je ideálně plastický. Ve skutečnosti většina matricových materiálů vykazuje

pružně plastické chování. Přesný průběh napětí lze tedy obdržet pouze za předpokladu, že matrice je pružně plastická. Tato situace je znázorněna na *obr. č.12*.



Obr. 12. Průběhy napětí vlákna a smykového napětí na rozhraní podél vlákna (pružně plastické chování)

2.2.2 Výpočet elastických konstant krátkovláknových kompozitů

U krátkovláknových kompozitů s orientací vláken lze použít pro výpočet Youngova modulu pružnosti směšovací pravidlo:

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (15)$$

Lze ho obecně považovat za horní hranici modulu či jiné fyzikální vlastnosti kompozitního materiálu.

Další možností je Halpin – Tsaiova rovnice:

$$\frac{N_c}{N_M} = \frac{1 + A \cdot B \cdot V_f}{1 - B \cdot V_f}, \quad (16)$$

$$\text{kde } B = \frac{\frac{N_f}{N_m} - 1}{\frac{N_f}{N_m} + A}, \quad (17)$$

proměnná A nabývá hodnot v závislosti na tom, pro kterou konstantu je rovnice použita.

$$\text{Pro potřebu } E_L \quad A = \frac{2 \cdot l}{d}$$

$$E_T \quad A = 2$$

$$G_{LT} \quad A = 1$$

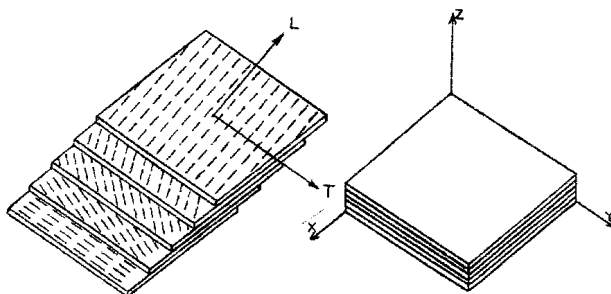
$$\nu_{LT} \quad A = \infty$$

Tyto rovnice ukazují, že příčný modul usměrněného krátkovláknového kompozitu není ovlivněn štíhlostním poměrem l/d a jeho hodnota je stejná jako hodnota příčného modulu kompozitu vyztuženého dlouhými vlákny. Podélný modul je ovlivněn štíhlostním poměrem [11, 13].

2.2.3 Termomechanické a elastické konstanty krátkovláknových kompozitních struktur

Stěna výrobku z krátkovláknového kompozitu představuje makroskopicky homogenní, avšak obecně anizotropní kontinuum. Míra a typ anizotropie závisejí na typu technologie a technologických podmínkách výroby.

Plošnou, obecně anizotropní strukturu stěny relativně tenkostěnného výrobku lze myšleně idealizovat soustavou určitého počtu ekvidistantních monotropních vrstev s určitými orientacemi materiálových souřadných systémů L , T (obr. č.13).



Obr. 13. Laminátový model krátkovláknové plošné struktury

Jsou-li známy hodnoty elastických a termomechanických konstant totálně usměrněné struktury jako funkce objemové koncentrace a štíhlostního poměru vláken, lze z takto sestaveného laminátového modelu určit rovinnou matici tuhosti resp. poddajnosti dané anizotropní plošné struktury jako matici membránové tuhosti laminátové stěny jednotkové tloušťky. Matice je typu 3×3 , takže vzhledem k její symetrii je výsledkem 6 nezávislých elastických konstant.

Vstupními parametry jsou elastické a termomechanické vlastnosti jednotlivých lamin a jejich orientace. Pro případ monotropní struktury s jednosměrně orientovanými vlákny je:

– matice poddajnosti:

$$[C] = \begin{bmatrix} 1/E_L & -n_{TL}/E_T & -n_{TL}/E_T & 0 & 0 & 0 \\ -n_{LT}/E_L & 1/E_T & -n_{TT}/E_T & 0 & 0 & 0 \\ -n_{LT}/E_L & -n_{TT}/E_T & 1/E_T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{LT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{LT} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{TT} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

kde v důsledku symetrie platí:

$$n_{LT}/E_L = n_{TL}/E_T \quad (19)$$

a smykový modul pružnosti v rovinách příčné izotropie je určen vztahem:

$$G_{TT} = E_T / 2 \cdot (1 + n_{TT}) \quad [14] \quad (20)$$

– sloupec složek koeficientů teplotní roztažnosti:

$$(a) = \begin{pmatrix} a_L \\ a_T \\ a_T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

Ve zvláštním případě, kdy jsou materiálové souřadné systémy jednotlivých lamin v rovině prvku vzájemně pootočený o úhel $180^\circ/n$, je výsledné makroskopické chování izotropní, tj. efektivní matice poddajnosti bude mít tvar:

$$[C] = \begin{bmatrix} 1/E & -n/E & 0 \\ -n/E & 1/E & 0 \\ 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix}, \quad (22)$$

kde v důsledku izotropie:

$$G = E/2 \cdot (1+n) \quad (23)$$

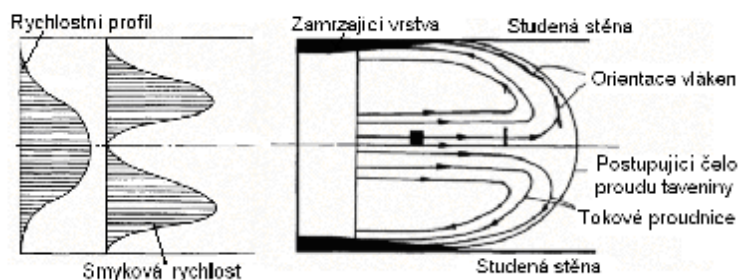
a sloupec složek koeficientů teplotní roztažnosti [14,15]:

$$(\alpha) = \begin{pmatrix} \alpha \\ \alpha \\ 0 \end{pmatrix} \quad (24)$$

2.2.4 Tok taveniny při plnění formy

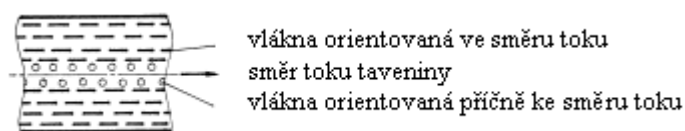
Jakmile proud taveniny vstoupí do formy, tenká vrstva na styku s jejím chladným povrchem okamžitě ztuhne a vytvoří nepohyblivou vrstvu. Proud taveniny se pak pohybuje uvnitř tohoto nepohyblivého obalu tzv. fontánovým tokem. Fontánový tok je jedním z nejdůležitějších faktorů uplatňujících se při plnění formy, které podstatně ovlivňují mikrostrukturu a vlastnosti výstřiku.

Při fontánovém toku taveniny vzniká v oblasti uzavřené nepohyblivou povrchovou vrstvou rychlostní profil (obr. č.14). Elementy ve středové části proudu taveniny se tak budou pohybovat rychleji než průměrnou rychlostí až do okamžiku, kdy dosáhnou čela taveniny. Zde začnou být tokové elementy rozháněny do stran, směrem ke stěnám formy. Elementy jsou zároveň protahovány. Jakmile se pak dostanou ke stěnám formy, respektive těsně pod nepohyblivou povrchovou vrstvou, tuhnou a vzniká tak silně orientovaná povrchová vrstva.



Obr. 14. Fontánový tok při plnění dutiny formy

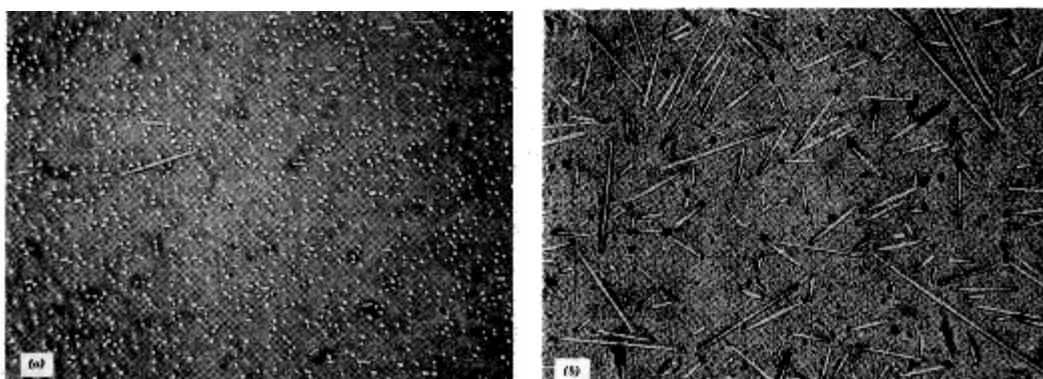
Je zřejmé, že ve výstřiku budou vznikat vrstvy s různou předností orientace vláken. Na povrchu je vrstva, v níž jsou vlákna uložena zcela chaoticky a nevykazuje tedy žádnou přednostní orientaci. Maximální stupeň orientace do směru toku se nachází v určité vzdálenosti pod povrchovou vrstvou, kde je dosaženo maximální hodnoty smykové rychlosti mezi tekoucí a pevnou vrstvou. Třetí, přechodová vrstva, je opět bez přednostní orientace a uprostřed se nachází vrstva, ve které jsou vlákna orientována kolmo ke směru toku vlivem příčného proudění. Vlivem vyšších rychlostí taveniny je vytvořena struktura „sendvičového“ typu, sestávající ze dvou krajních vrstev relativně značné tloušťky a střední vrstvy malé tloušťky viz *obr. č.15* [16].



Obr. 15. Orientace vláken ve stěně

S orientací vláken vyztužených dílců souvisí jejich tuhost a pevnost. To vysvětluje rozdíly v tahu a ohybu v porovnání s izotropním materiálem nebo s homogenně vrstveným vláknitým materiálem.

Výsledné vlastnosti výstřiku závisí na poměru tlouštěk vrstev s podélnou a příčnou orientací. U tenkostěnných výrobků převládá vliv podélně orientovaných vláken. Výstřiky s vláknitým plnivem vykazují vysokou anizotropii vlastností. Vytvořenou orientaci vláken nelze ovlivnit relaxačním procesem, narozdíl od orientace makromolekul [16].



Obr. 16. Polyamid 66 vyztužený krátkými skleněnými vlákny

a) řez částí, kde mají vlákna preferovanou orientaci

b) řez částí, kde mají vlákna náhodnou orientaci

2.2.5 Hodnocení standartních tahových testů polymerů plněných krátkými vlákny modelováním elastických konstant

Jsou-li známy hodnoty elastických a termomechanických konstant totálně usměrněné struktury jako funkce objemové koncentrace a štíhlostního poměru vláken, lze na základě „laminátového“ modelu sestavit matici tuhosti dané anizotropní vrstevnaté struktury.

Uvádíme dále nejdříve zkušenosti a výsledky, dosažené na našem pracovišti v mikromechanice totálně usměrněné 3D krátkovláknové struktury. Tyto výsledky pak aplikujeme na sestavení makroskopického modelu vstříkovaného vzorku namáhaného jednoosým tahem. Prostřednictvím takto sestaveného modelu jsou potom hodnoceny tahové testy vzorků polymerů plněných krátkými vlákny s různými stupni orientace.

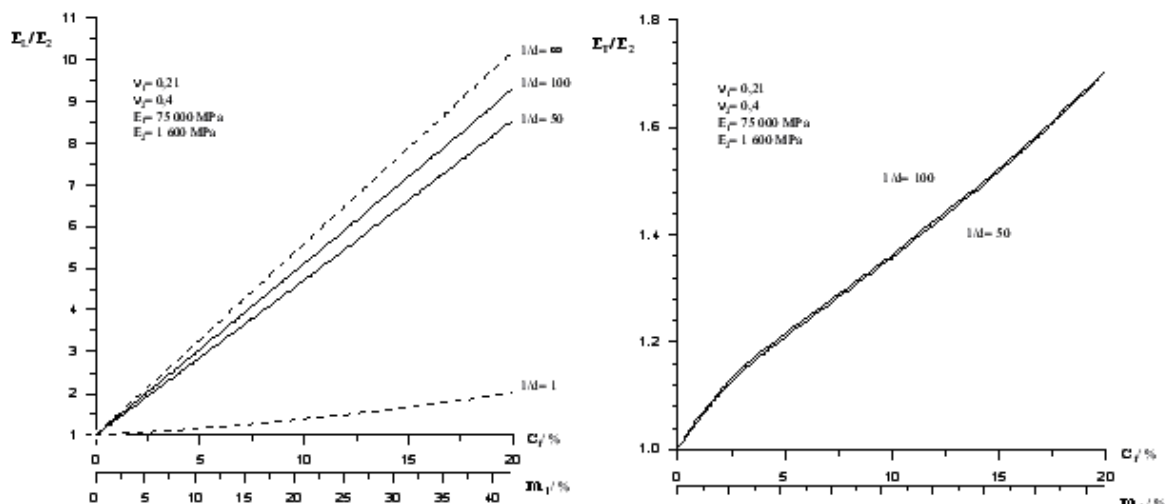
Modelování elastických konstant částicového kompozitu s totálně orientovanými vlákny

Modelová struktura kompozitu s usměrněnými krátkými vlákny představuje tzv. reprezentativní objem („buňku“). Buňka sestává z vnitřního válcového objemu V_1 se štíhlostí odpovídající průměrné štíhlosti vláken a vnějšího obalu o objemu V . Poměr V_1/V odpovídá poměrné objemové koncentraci vláken c_1 . Modelovému objemu jsou předepsány okrajové podmínky, které vyplývají z požadavku, aby se při vnějším zatížení přetvářel jako součást efektivního kontinua, jímž je myšleně obklopen.

Vystavíme-li modelový objem určitému stavu makronapětí, jsou řešením příslušné hodnoty makrodeformací.

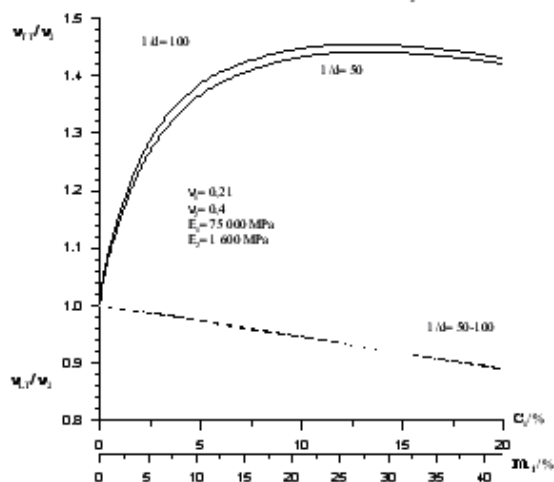
K řešení jednotlivých zátěžných stavů modelového objemu jsme použili konečněprvkový softwarový systém COSMOS/M firmy SRAC, USA. Výsledky ve formě závislostí elastických konstant usměrněné krátkovláknové struktury na objemové koncentraci vláken uvádíme v následujících diagramech. Výsledky jsou poplatné výchozím předpokladům idealizované struktury, izotropie obou složek a ideální tuhé vazby mezi nimi, takže je lze v jistém smyslu označit za limitní. Hodnoty elastických konstant byly vypočteny pro Poissonova čísla složek $n_1 = 0,2$, $n_2 = 0,4$ a pro poměr modulů pružnosti složek $E_1/E_2 = 50$, což odpovídá např. systému sklo - PP.

Závislosti efektivních elastických konstant na objemové koncentraci a štíhlostním poměru vláken jsou vyneseny na následujících diagramech. [17]



a) Modul pružnosti ve směru vláken E_L v závislosti na objemovém zlomku c_f a štíhlostním poměru.

b) Modul pružnosti ve směru příčném k orientaci vláken E_T v závislosti na obj. zlomku c_f a štíhl. poměru.



c) Poissonovo číslo ν_{TL} v závislosti na obj. zlomku c_f a štíhlostním poměru vláken.

Obr. 17. Závislosti efektivních elastických konstant na objemové koncentraci a štíhlostním poměru vláken

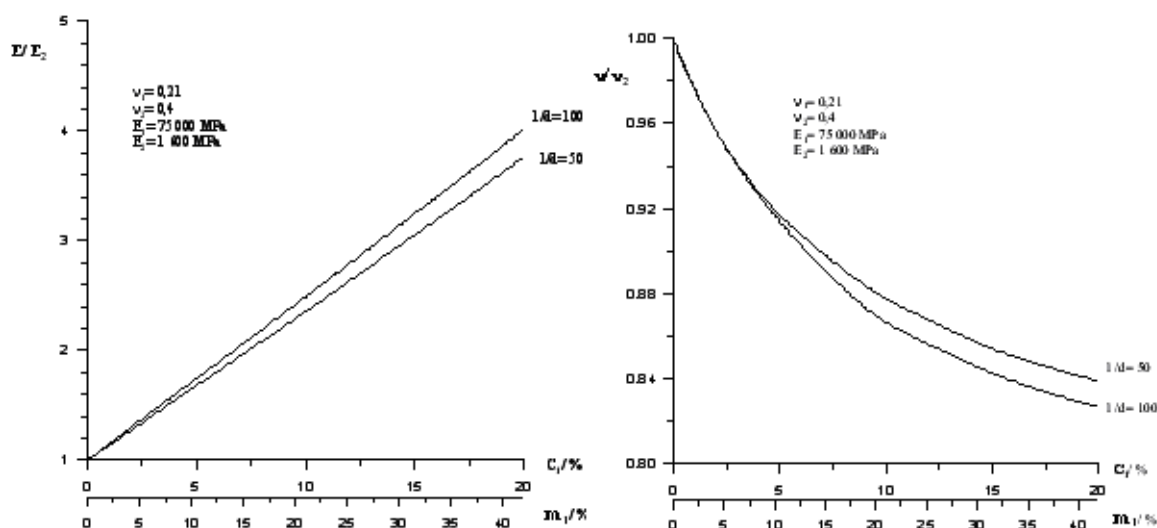
Jak patrně, vykazují jednotlivé elastické konstanty zcela rozdílné závislosti jak na koncentraci, tak štíhlosti vláken. V některých případech je závislost jak na koncentraci, tak na štíhlostním poměru výrazná, v jiných nikoliv. Na obr. č.17a) je vynesena závislost longitudinálního modulu pružnosti i praktické oblasti rozmezí štíhlostního poměru vláken 50-100. Pro srovnání jsou uvedeny i krajní hodnoty E_L , a to na jedné straně pro kontinuální vláknovou výztuž, na druhé straně pro štíhlost 1, tj. pro jednoparametrické částice.

Jak patrně, jsou závislosti E_L jak na koncentraci, tak na štíhlosti vláken značně výrazné. Patrná je blízkost hodnot E_L pro štíhlost $l/d=100$ hodnotám E_L pro kontinuální vláknovou výztuž.

Výsledek na obr. č.17b) pro příčný modul potvrzuje známou zkušenost, že E_T prakticky nezávisí na štíhlosti vláken. Na obr. č.17c) jsou vyneseny hodnoty Poissonových čísel. Zatímco u n_{LT} se uplatňuje výztužný účinek vláken na koncentraci ve směru L , efektivní Poissonův poměr v rovině příčné izotropie n_{TT} , je v celém rozsahu koncentrací větší než Poissonovo číslo matrice.

Elastické konstanty plošného prvku s neusměrněnými vlákny

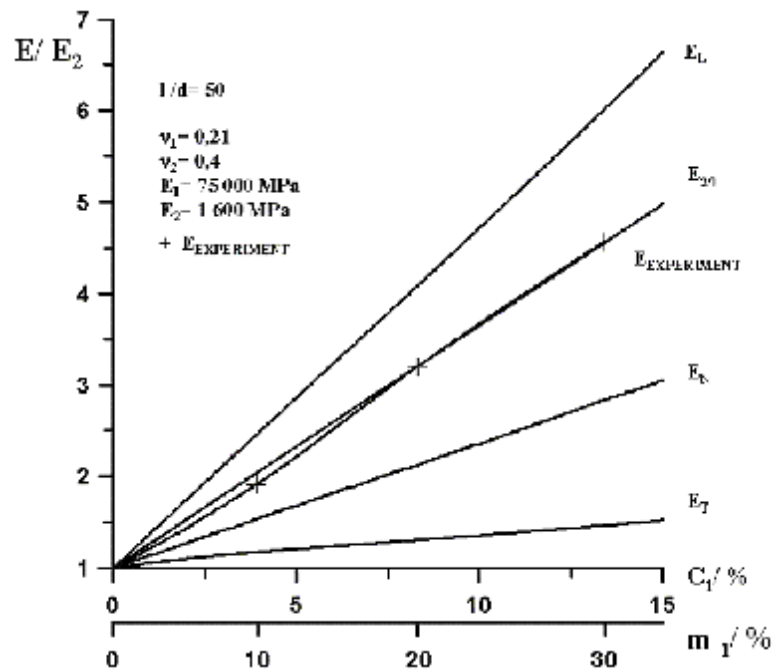
Laminátové „zkušební těleso“ představovalo čtvercovou desku sestavenou z laminátových konečných prvků programu COSMOS/M. Těleso bylo modelově zatěžováno v tahu, a z výsledných deformací byly určeny příslušné efektivní elastické konstanty. Výsledné závislosti modulu pružnosti a Poissonova poměru na objemové koncentraci a štíhlostním poměru vláken jsou znázorněny na obr. č.18. Dosažené relativní zvýšení tuhostí je pro vyšší štíhlostní poměry a obj. koncentraci 20% cca čtyřnásobné.



Obr. 18. Závislost modulu pružnosti a Poissonova čísla plošné struktury s neusměrněnými krátkými vlákny na obj. koncentraci a štíhlostním poměru vláken

Porovnání experimentálně naměřených elastických vlastností s modelovanými výsledky- modul pružnosti v tahu E_L a E_T .

Protože vstřikovací technologií nelze vyrobit zkušební tělísko tak, aby v něm byla vlákna uspořádána jenom v podélném či příčném směru, nelze také z tahové zkoušky přímo naměřit modul pružnosti ve směru vláken E_L nebo napříč E_T .



Obr. 19. Srovnání závislosti modelovaných výsledků pro modul pružnosti v tahu

Jak je z uvedených výsledků na obr. č.19 patrné, tuhost v tahu zjištěná z experimentálního měření se pohybuje mezi modelovými výsledky pro E_L a E_K krátkovláknové usměrněné a neusměrněné kompozitní struktury. [17]

3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ

3.1 Mechanické vlastnosti polymerů

Tuhost

vyjadřuje sílu, kterou je nutno vynaložit pro deformaci tělesa v pružné oblasti deformací. Mírou této síly je modul pružnosti ve smyku a v tahu.

Pevnost

polymerů se liší v návaznosti na jejich molekulární i nadmolekulární strukturu. Tvary tahových křivek se liší podle toho, zda daný polymer se nachází v oblasti teplot pod či nad teplotou skelného přechodu T_g . U amorfních polymerů pod T_g dochází k přetržení tělesa ihned po překonání pružné deformace. Některé semikrystalické polymery mají schopnost se dále zpevňovat po překonání meze kluzu a napětí na mezi pevnosti pak může být i několikrát větší než napětí na mezi kluzu.

Tvrдость

je složitou veličinou, která souvisí jak s kvalitou povrchu tak s vnitřními vlastnostmi polymeru. Zejména u elastomerů existují empirické vztahy přepočtu mezi tvrdostí a modulem pružnosti ve smyku. Literatura uvádí tvrdosti, které jsou obvykle používány pro charakterizaci elastomerů, dále tvrdosti HRC pro tvrdé polymerní materiály pod T_g a nejobsáhleji používané tvrdosti vtiskem kuličky.

Houževnatost

je důležitou vlastností materiálu, která vyjadřuje množství práce nutné na vznik nového povrchu. Tuto vlastnost materiálu lze nejlépe vystihnout hodnotou lomové houževnatosti K_c a hnací síly trhliny G . Tyto údaje se naneštěstí v literatuře nevyskytují a jsou předmětem dalších zkoušek. Většinou je nutné se omezit na údaje, které poskytují plastikářské zkušební metody, t.j. rázová houževnatost metodou Charpy a Izod s vrubem a bez vrubu. Vzhledem k tomu, že pro vysoce houževnaté materiály je nutné použít tělesa s jiným tvarem vrubu než u méně houževnatých materiálů, je vzájemné srovnání na základě číselných údajů o vynaložených energiích složité. [5]

3.2 Druhy zkoušek mechanických vlastností

Při technickém použití plastů nás obvykle zajímá jejich mechanická pevnost proti různým působením síly. Používané zkušební metody můžeme rozdělit do tří skupin:

Statické zkoušky – při těchto zkouškách je materiál namáhán pomalu se měnícími silami. Síla se zvyšuje rovnoměrně pomalu, obvykle do okamžiku porušení tělíska.

Dynamické zkoušky – působením síly se mění buď rázem, nebo za velmi krátký časový úsek. Někdy se pracuje také tak, že působení síly je dlouhodobé, ale její velikost se mění periodicky v extrémně krátké době.

Únavové zkoušky – Mechanické vlastnosti se zkoušejí dlouhodobě za předepsaných podmínek časově proměnného namáhání, obvykle až do porušení materiálu. Pro jednotlivé druhy plastů tyto zkoušky bývají rozličné.

Mechanické zkoušky většinou neprovádíme na samotné součásti, ale na zkušebních vzorcích předepsaného tvaru a rozměrů. [6]

3.3 Příprava zkušebních těles

Výsledky mechanických zkoušek jsou závislé nejen na vlastnostech polymeru, tj. chemické složení, molekulové hmotnosti, krystalinitě, obsahu nečistot apod., ale ve značné míře i na režimu zpracování a způsobu přípravy zkušebních tělísek. Pro přípravu zkušebních tělísek neexistuje jednotný předpis pro všechny polymery, nebo pro všechny zkoušky. Zde je možno vysvětlit jen obecné zásady a v jednotlivých konkrétních případech je nutné se řídit materiálovými nebo zkušebními normami.

V principu se zkušební vzorky připravují buď:

1. *Přímo ze zkoušené suroviny*

Používá se metod vstřikování, lisování, nebo vytvrzování v příslušných formách. Při každém způsobu je nutný určitý dohodnutý systém. Při vstřikování do chladné formy dojde na stěnách k prudkému ochlazení taveniny a tělísko má pak na povrchu převážně amorfní strukturu, do středu přibývá krystalické struktury a zvláště u silnostěnných tělísek jsou vyvinuté i sférolity. Ve výstřiku se pak ještě dlouhou dobu po vytažení z formy vyvíjí krystalická struktura a je proto pro zkoušky nevhodný. Při vstřikování do teplé formy

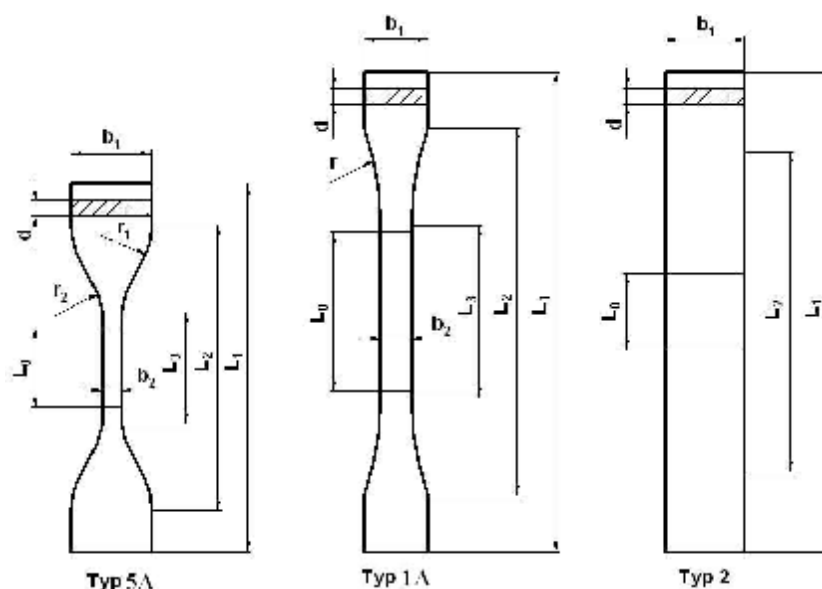
tavenina chladne pomalu a vyvíjí se dobře krystalická struktura. Tělísko je buď již s krystalickou strukturou, nebo se růst krystalinity dokončí při kondiciování.

Jiným způsobem přípravy zkušebních tělísek je vytvrzování v příslušných formách. Provádí se to např. pro epoxidové kompozice. Epoxidová pryskyřice (tekutá) s tvrdidlem se vlije do formy. Vzhledem k tomu, že epoxidové pryskyřice mají vynikající přilnavost ke kovům, vznikají problémy s vyjmutím tělísek. Formy jsou proto poteflonovány nebo se používá silikonových seperátorů.

2. Vyřiznutím a strojním opracováním

V některých případech se zkouší jakost výrobků tak, že na předem určených místech se část vyřízne a strojně opracuje. Musí se opět dbát na to, aby při strojním opracování nedošlo k mechanickému porušení, tj. štípání, tavení apod. Zkušební tělíška se pak ještě jemně dobrušují a leští.

Zkušební tělíška ať jsou již připravena jakýmkoliv způsobem, mívají různé tvary buď podle předepsané zkoušky nebo podle druhu materiálu. Bývají to tvary: různé kroužky, tyčinky, destičky, tvary lopatiček, válečky apod. V EN ISO 527-2 jsou normalizována tělíška pro zkoušky tahem. Na obr. č.20 jsou pro názornost uvedeny tvary, v tab. č.1 pak příslušné rozměry v mm.



Obr. 20. Tvary zkušebních tělísek pro zkoušky tahem

Tab. 1. Rozměry zkušebních tělísek

Rozměr v mm	Typ 5A	Typ 1A	Typ 2
Celková délka L_1	75	150	250
Vzdálenost označující hrany čelistí L_2	50 ± 2	110 ± 5	170 ± 5
Délka pracovní části L_3	25 ± 1	$80 \pm 0,5$	-
Počáteční měřená délka L_0	$20 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$	50 ± 1
Šířka upínací hlavy b_1	$12,5 \pm 1$	$20 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$
Šířka pracovní části b_2	4 ± 1	$10 \pm 0,5$	-
Velký poloměr zakřivení r_1	$12,5 \pm 1$	-	-
Malý poloměr zakřivení r_2	$8 \pm 0,5$	-	-
Poloměr zakřivení r	-	20-25	-
Doporučená tloušťka d	$4 \pm 0,2$		

3. Kondicionování

Při přípravě zkušebních vzorků se tělíska obvykle vystaví podmínkám, které neodpovídají ustálenému stavu. Je to např. otázka krystalinity při vstřikování, dále vznik mechanického napětí při opracování, vysušení apod. Proto se musí tělíska upravit do standardního stavu.

Často je problémem úprava vlhkosti vzorku. Pokud mají polymery nepatrnou nasákavost, postačí obvykle uložení na 24 hodin v klimatizační skříni. Během této doby dojde k vyrovnání vlhkosti, smrštění, částečně i vyrovnání pnutí apod. Složitější situace je u polymerů, které přibírají větší množství vlhkosti. Pozvolné vyrovnání na standardní hladinu v klimatizační skříni by trvalo neúměrně dlouho. Zatím co některým materiálům postačí jen několik minut (tenký papír, textil), některé potřebují týdny (lisovací hmoty), nebo i měsíce (tvrzený kaučuk). Proto se doporučuje některý z těchto způsobů úprav tělísek:

- a) zkoušení ihned po vstřikování
- b) úprava 50 hodin klimatizací při 23°C a 60% relativní vlhkosti vzduchu, to je zhruba při standardních laboratorních podmínkách.
- c) úprava vzorku vařením ve vodě po dobu 5 hodin a pak kondicionováním na vzduchu.

- d) úprava ve vodných roztocích některých solí, např. v koncentrovaném roztoku octanu draselného ve vodě. [6]

3.4 Zkouška tahem

Jednou z nejdůležitějších zkoušek materiálu hodnotících jeho pevnost je tahová zkouška. Při zkoušce tahem je materiál namáhán silou tak, že dojde k jeho porušení. Kdyby byl materiál isotropní, bylo by napětí v celém průřezu zkušebního tělesa rozloženo rovnoměrně. V praxi se tento ideální stav nevyskytuje, vlastnosti plastů se v různých místech liší a tahové napětí je rozloženo nerovnoměrně. Vznikají tím smyková napětí.

Je nutné si předem uvědomit pochody při namáhání tahem. Jestliže budeme působit na průřez tělesa S silou F , bude osově napětí působící v průřezu zkušebního tělesa při tahové zkoušce $s = \frac{F}{S}$. Průřez tělesa se nám při zkoušce však bude měnit až do okamžiku, kdy se dosáhne rovnováhy mezi deformací a napětím. Při dalším zatěžování síly se dostaneme do okamžiku, kdy se těleso přetrhne. Protože průřez tělesa se při zkoušce stále mění, je zjišťování skutečného napětí obtížné. V praxi se obvykle pracuje s tak zvaným **smluvním napětím**, což je síla vztažená na počáteční průřez zkušebního tělesa:

$$s = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (25)$$

Tento způsob vyjadřování je vžitý pro kovy a byl také převzat pro plasty. Tam, kde dochází k malým deformacím jako jsou reaktoplasty, polystyren apod., tento stav ještě vyhovuje. U elastomerů, kde nastává prodloužení o několik desítek procent, je však již potom podstatné zmenšení průřezu tělesa a tím i velký rozdíl mezi napětím na začátku a na konci zkoušky.

S prodlužováním tělesa se mění jeho původní délka l_0 na l a vyjadřujeme ji jako **poměrné nebo relativní prodloužení (deformace v tahu)**:

$$e_l = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad [-] \quad (26)$$

A také, s prodlužováním zkušebního tělesa nastává i zmenšování průřezu:

$$e_s = \frac{S_0 - S}{S_0} = \frac{\Delta S}{S_0} \quad [-] \quad (27)$$

Relativní změna průřezu v závislosti na relativní změně délky se nazývá **Poissonovo číslo**:

$$m = \frac{e_s}{e_l} \quad [-] \quad (28)$$

Pro změnu objemu při prodloužení byl odvozen tento vztah:

$$\frac{\Delta V}{V_0} \approx (1 - 2m) \cdot \frac{\Delta l}{l_0} \quad [-] \quad (29)$$

Podle tohoto vzorce může Poissonovo číslo dosáhnout maximálně hodnoty 0,5.

Pro zkoušky v tahu v počáteční části křivky platí Hookův zákon, který říká, že deformace je úměrná použité síle:

$$e = K \cdot s \quad [-] \quad (30)$$

kde: ε - poměrné prodloužení

K - součinitel úměrnosti

σ - napětí v tahu

Součinitel úměrnosti K udává poměrnou změnu délky při jednotkovém napětí. Je to cotg úhlu, který svírá tečna křivky v diagramu napětí – poměrné prodloužení s osou ε . Protože takto vycházejí velmi malé hodnoty, používá se v praxi jeho převrácená hodnota

$$\frac{1}{K} = E \quad [\text{MPa}] \quad (31)$$

E je **modul pružnosti**, také nazývaný Youngův modul.

Výše uvedené vztahy platí přibližně, protože přísně lineární závislost prodloužení na napětí není dodržena u žádného materiálu. Proto se v praxi objevují menší nebo větší odchylky od Hookova zákona. Průběh křivek až po mez úměrnosti v tahu je však velmi podobný. Rozlišení nastává až po překročení této meze.

Obecná tahová křivka polymerů je velmi podobná tahovým křivkám kovů. Idealizovaně je nakreslena na *obr. č.21*. V průběhu zkoušky se trvale měří síla a prodloužení zkušebního tělesa. Z křivky „síla – prodloužení“ se vyhodnocují charakteristické veličiny ze zkoušky tahem. [6]

Horní mez kluzu

Bod na křivce, do kterého se zvyšovalo prodloužení se stoupajícím napětím. Za touto horní mezí se dále zvyšuje deformace, přičemž napětí poklesne. Pokles napětí pokračuje až k dolní mezi kluzu. Deformace přestává být homogenní. V jednom místě tělesa se vytvořilo tenčí místo nazývané krček. Krček má menší průřez nežli původní vzorek a v souvislosti s tím napětí v této oblasti protažení klesá, protože průřez krčku se zmenšuje. Současně však dochází k orientaci molekul v místě krčku a tím se jeho odpor proti deformaci zvětšuje. Postupně dosáhne deformační zpevnění krčku takového stupně, že jeho tuhost je větší než tuhost neprodloužené části tělesa. Proto se průřez krčku již téměř nemění a dochází k prodloužení částí tělesa, při němž se délka krčku zvětšuje.

Dolní mez kluzu

Tento bod udává na křivce kam až pokračuje pokles napětí při dalším prodlužování vzorku. Od tohoto bodu napětí opět stoupá, protože bylo celé těleso zpevněno orientací. Dochází k homogennímu protahování vydlouženého tělesa.

Smluvní mez kluzu

Stanovuje se v případech, kdy zkoušený materiál nemá mez kluzu. S_x se stanovuje graficky jako průsečík křivky „síla – prodloužení“ s přímkou vedenou rovnoběžně s počáteční přímkovou částí této křivky a vytínající na ose úseček prodloužení odpovídající poměrnému prodloužení, např. 1% (viz obr. č.21, křivka 2).

Mez pevnosti v tahu

Takto je označováno maximální napětí, resp. síla vztažená na plochu počátečního průřezu tělesa S_0 , naměřené v průběhu zkoušky tahem. Do výpočtu se dosazuje vždy maximální hodnota síly, i když k destrukci (vlastnímu přetržení) došlo později v okamžiku σ_r za nižšího napětí. Podobně jako u jiných materiálů je skutečná pevnost plastů mnohem menší než pevnost vypočítaná teoreticky na základě mezimolekulárních vazebných sil. Příčina spočívá v přítomnosti defektů ve struktuře, které představují místa s nižší pevností, než má okolní hmota. Při zatěžování mohou v těchto místech vznikat taková napětí, která překračují hodnotu kohezní pevnosti, čímž dochází ke vzniku mikrotrhliny. Ta se šíří dále až dojde k lomu tělesa v makroměřítku. [6]

Mez pevnosti v tahu při přetržení S_r

Napětí, při kterém se těleso přetrhlo.

Poměrné prodloužení při přetržení e_r

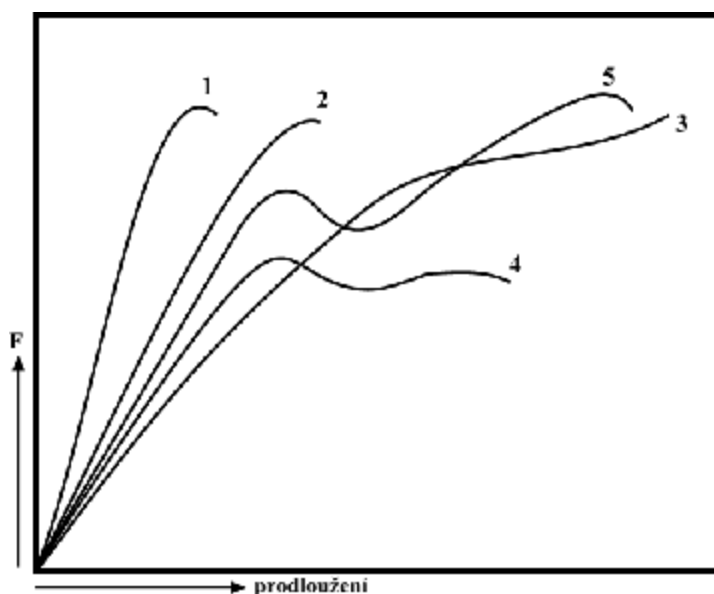
Je to poměrná změna délky při zkoušce tahem v okamžiku přetržení. Vyjadřuje se v procentech měřené délky:

$$e_r = \frac{(l - l_0) \cdot 100}{l_0} = \frac{\Delta l \cdot 100}{l_0} \quad [\%] \quad (32)$$

Poměrné prodloužení při největší síle e_z

Změna délky Δl v okamžiku dosažení největší síly F_{\max} vztažená na počáteční měřenou délku l_0 zkušebního tělesa.

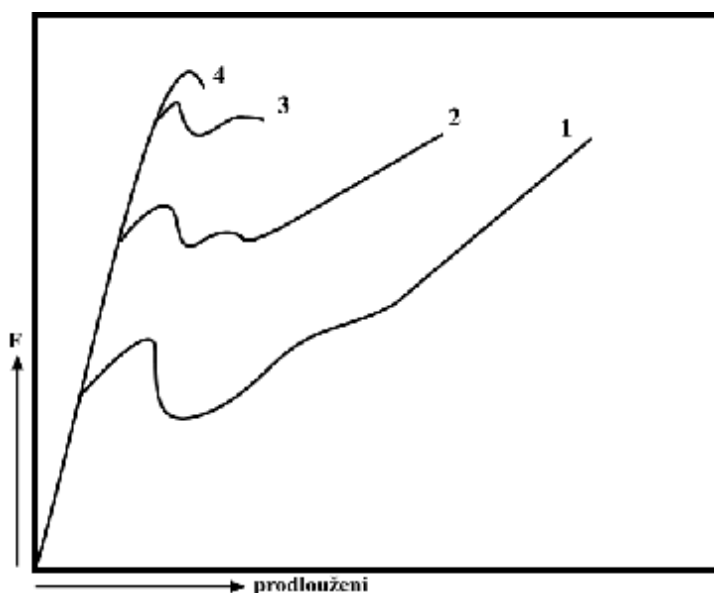
Různé materiály mají své charakteristické tahové křivky, které odpovídají mechanickým vlastnostem. Na obr. č.22 křivka 1 odpovídá materiálu s malou průtažností (reaktoplasty, jako epoxidové pryskyřice, bakelit), křivka 2 odpovídá houževnatějšímu materiálu (např. neměkčený PVC), křivka 3 odpovídá materiálu s velkou průtažností. Křivka nemá mez kluzu, sem patří měkčený PVC. Křivka 4 má dolní a horní mez kluzu, typický je polyethylen a polypropylen. Křivka 5 odpovídá polyamidu, u kterého se prodloužením mechanické vlastnosti zlepšují.



Obr. 22. Charakteristické křivky různých materiálů

- 1 - materiál s malou průtažností (epoxidové pryskyřice, bakelit)
- 2 - houževnatý materiál (PVC)
- 3 - materiál s velkou průtažností
- 4 - materiál s dolní a horní mezí kluzu (PE, PP)
- 5 - materiál zlepšující mechanické vlastnosti prodloužením (polyamid)

Obr. č.23 znázorňuje, jak průběh tahové křivky může být ovlivněn způsobem provedení. Z podmínek při provádění je nejdůležitější teplota a rychlost deformace. Proto pokud není pro daný materiál určena rychlost deformace, je nutné ji volit co nejmenší, aby se projevíly charakteristické vlastnosti polymeru.

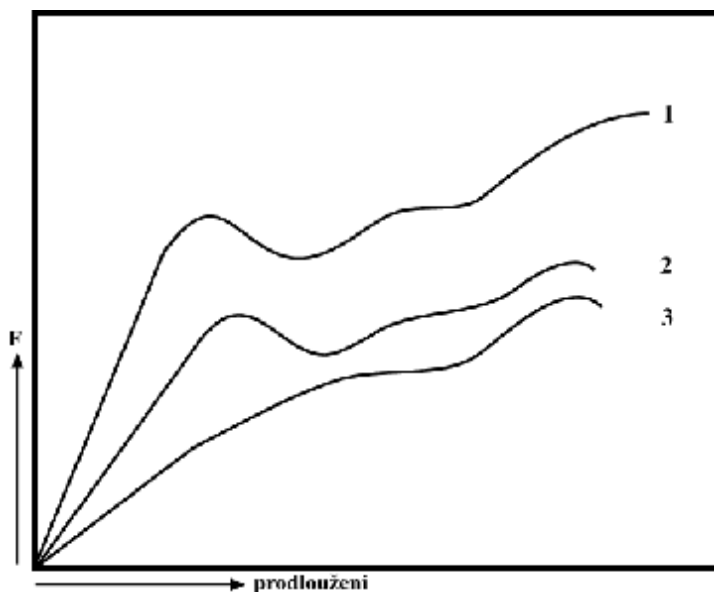


Obr. 23. Závislost síly na rychlosti deformace u polypropylenu

(1 - 2,6 mm/min, 2 - 15 mm/min, 3 - 52mm/min, 4 - 300mm/min)

Voda působí v polyamidu jako změkčovadlo nebo mazivo makromolekul, které se pak po sobě snadněji posouvají. Vytvoření krčku je doprovázeno zvýšením teploty v zúženém místě, což je jednou z příčin poklesu napětí za mezí kluzu.

Vymizení meze kluzu vlivem vlhkosti u PA 6 je dokumentováno na obr. č. 24.



Obr. 24. Tahové křivky polyamidu s různou vlhkostí

(1 - do 2% vlhkosti, 2 - do 3% vlhkosti, 3 – do 5% vlhkosti)

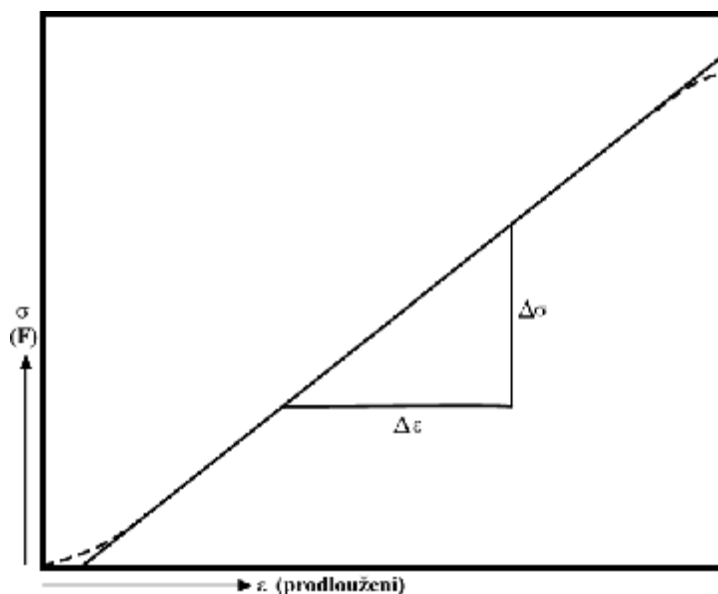
Modul pružnosti v tahu E

Je podíl napětí v tahu σ_t a poměrného prodloužení ϵ_t v oblasti, ve které existuje lineární závislost mezi napětím a prodloužením.

$$E = \frac{S_t}{e_t} \quad [\text{MPa}] \quad (33)$$

Jako počátek pro stanovení poměrného prodloužení k vyjádření modulu pružnosti je možno brát průsečík prodloužení počáteční přímkové části závislosti „síla – prodloužení“ s osou prodloužení, obr. č.25. Experimentální chyby a nevyhnutelné nedokonalosti zkušebního zařízení jsou příčinou toho, že přímka proložená počáteční oblastí hodnot neprochází počátkem.

Při použití zkušebního zařízení s automatickým zápisem je možno přímo použít záznam zapisovače k proložení přímkou grafickou cestou. Jestliže není k dispozici grafický záznam, doporučuje se vypočítat předem parametry přímkové alespoň z 10 dvojic naměřených hodnot regresní metodou. [6]



Obr. 25. Závislost „napětí – poměrné prodloužení“ ,počáteční oblast

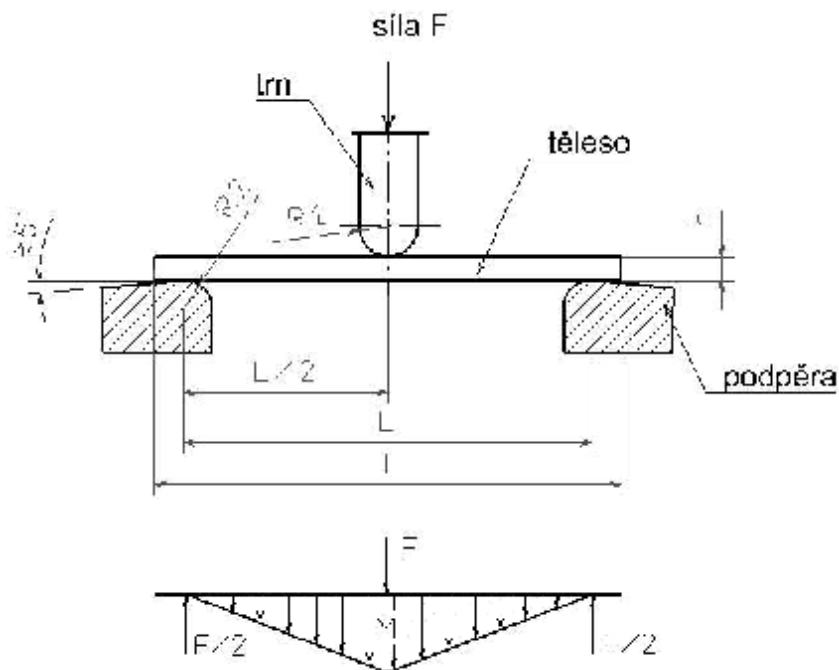
3.5 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem dává důležité konstrukční podklady pro ty polymerní materiály, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb, což je velmi častý případ. Jsou to nejen nosníky, ale např. samonosné střešní konstrukce z laminátů, obkladový materiál ve stavebnictví, který se prohýbá svou vlastní vahou, střešní krytiny, apod. Ohybová zkouška také umožňuje stanovit modul pružnosti E u materiálů, u kterých to nelze dostatečně přesně určit z tahových nebo tlakových zkoušek.

Při ohybu je napětí v principu rozloženo tak, že v horních vrstvách je tahové a směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tlakové.

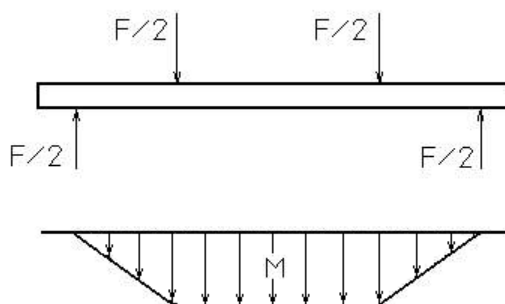
Rozlišujeme tříbodovou a čtyřbodovou zkoušku ohybem.

Při **tříbodové** zkoušce (obr. č.26) je zkušební těleso podepřeno jako nosník dvěma podpěrami a konstantní rychlostí prohýbáno trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud se těleso nezlomí nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty [8].



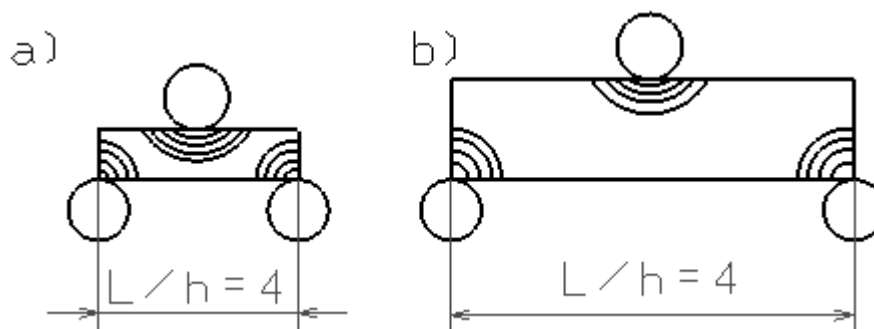
Obr. 26. Schéma tříbodového zatěžování se znázorněním rozložení ohybového momentu.

Při **čtyřbodové** zkoušce je zkušební těleso prohýbáno dvěma trny působícími v jedné třetině nebo jedné polovině vzdálenosti podpěrných trnů. Hodnoty pevností v ohybu jsou nižší než u tříbodového systému a je i jiné rozložení ohybového momentu viz obr. č.27. Jeho rovnoměrnější působení v celé délce zkušebního tělesa vedlo k tomu, že se modul pružnosti stanovuje hlavně tímto způsobem.



Obr. 27. Schéma čtyřbodového zatěžování se znázorněním rozložení ohybového momentu.

Přechod ke čtyřbodovému systému je dán především snížením celkové koncentrace napětí v místech styku vzorku s trny jak podpěrnými tak zatěžovacími, což umožňuje testování tenčích vzorků ve srovnání s tříbodovým ohybem (obr. č.26).



Obr. 28. Efekt koncentrace napětí u vzorků rozličné tloušťky (a: tenký vzorek, b: tlustý vzorek)

Způsob přípravy zkušebních těles, jejich rozměry, rychlost zatěžování, rozměry podpěrných i zatěžovacích trnů a další náležitosti ohybových zkoušek jsou uvedeny pro daný typ materiálů v příslušných normách. [8]

Výpočet a vyjádření výsledků

Napětí v ohybu

Vypočte se napětí v ohybu σ_f , vyjádřené v MPa, použitím následujícího vztahu:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad [\text{MPa}] \quad (34)$$

kde: F - zatěžující síla

L - rozpětí podpěr

b - šířka zkušebního tělesa

h - tloušťka zkušebního tělesa

Modul pružnosti v ohybu

Pro stanovení modulu pružnosti v ohybu se vypočítají průhyby s_1 a s_2 odpovídající daným hodnotám deformace ohybem $\varepsilon_{f1} = 0,0005$ a $\varepsilon_{f2} = 0,0025$ podle vztahu:

$$s_i = \frac{e_{fi} \cdot L^2}{6 \cdot h} \quad (i=1,2) \quad [\text{mm}] \quad (35)$$

kde: s_i - je jednotlivá hodnota průhybu

ε_{fi} - odpovídající deformace ohybem

L - rozpětí podpěr

h - tloušťka zkušebního tělesa

Modul v ohybu E_f , vyjádřený v MPa, se vypočítá podle vztahu:

$$E_f = \frac{S_{f2} - S_{f1}}{e_{f2} - e_{f1}} \quad [\text{MPa}] \quad (36)$$

kde: σ_{f1} - napětí v ohybu, stanovené pro průhyb s_1

σ_{f2} - napětí v ohybu, stanovené pro průhyb s_2 [8]

Způsob výpočtu modulu pružnosti v ohybu je obdobný jako u modulu v tahu. Hodnotu modulu je možno vypočítat z oblasti namáhání, v níž je lineární závislost průhybu na zatížení. Průhyb nemá obecně překročit hodnotu 4,5 h, která odpovídá poměrnému prodloužení, resp. stlačení povrchových vláken o 0,5 % za popisovaných podmínek. Platí zde rovněž *obr. č.28*. Vzorec pro modul pružnosti v ohybu je odvozen za předpokladu zachování rovinnosti průřezu, platnosti Hookova zákona a zanedbání vlivu posouvajících sil. Tyto předpoklady jsou dostatečně splněny u štíhlých nosníků, je-li průhyb relativně malý.

Pro houževnaté materiály, jako jsou např. polyamidy, silně změkčené epoxidové pryskyřice, změkčený PVC apod., nemá zkouška v ohybu tak jak se běžně provádí žádný význam. Zkušební těleso se při této zkoušce nezlomí, ale prohýbá se tak dlouho, až vyklouzne z podpěr. V takových případech je nutno provádět tzv. *smluvní zkoušku*, tj. např. stanovit napětí, při kterém dojde k předepsanému průhybu např. rovném 1,5 násobku tloušťky zkušebního tělesa. Touto zkouškou je možno rozlišit od sebe jednotlivé typy určitého polymeru. [6]

4 TEPELNÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ

Tepelné vlastnosti polymerů jsou určovány především strukturou makromolekul. Rozhodujícím způsobem ovlivňuje tepelné vlastnosti poměr hlavních vazebných sil působících podél molekulárních řetězců k vedlejším vazebným silám, které působí mezi atomy sousedních molekul.

Polymery s lineárními řetězci mají makromolekuly navzájem vázány vazbami, jejichž pevnost se stoupající teplotou rychle klesá. U prostorově vázaných polymerů (patří sem především polykondenzáty) jsou makromolekuly vzájemně vázány vazbami, jejichž pevnost se v širokém rozmezí teplot nemění.

Velký význam má tvar jednotlivých makromolekul, jejich vzájemné uspořádání (amorfní nebo částečně krystalická struktura), pohyblivost molekul a molekulárních segmentů atd.

Proto z výsledků o chování plastů za tepla lze vyvozovat závěry o struktuře makromolekulární látky, o molekulové hmotnosti, o vlivu předchozího zpracování, znečištění apod.

Z hlediska zkušebnictví neexistuje žádná metoda, která by obecně hodnotila závislost mechanických vlastností na teplotě. Dosud vypracované metody jsou příliš jednostranné, to znamená, že zkouší sledovanou vlastnost po určité teplotě nebo po určité době tepelného namáhání při určité teplotě, určitém teplotním spádu apod.

Jednotlivé metody lze v postatech rozdělit do tří skupin, které vyplývají především z dostupnosti zkušebního zařízení:

1. Zkušební tělesa se temperují na zkušební teplotu dostatečně dlouho, pak se co nejrychleji upevní do měrného zařízení a odzkoušejí.
2. Zkušební tělesa se temperují upnutá již v přístroji a po určité době se zkouška provede.
3. Zkušební tělesa se umístí i se zkušebním přístrojem v termostatu a po vytemperování se odzkoušejí.

Při porovnání těchto tří metod je zřejmé, že první metoda je zatížena chybou chlazení po temperaci. Třetího způsobu lze však zase použít jen tehdy, jestliže zkušební zařízení je malé a snese příslušnou teplotu.

Fyzikálně mechanické vlastnosti se zjistí při řadě teplot a vynesou se do grafů v závislosti na teplotě. Pro hodnocení tepelné odolnosti lze využít většiny fyzikálně mechanických nebo elektrických vlastností. [6]

4.1 Trvalá tepelná odolnost

Obecně lze říci, že s teplotou se mění všechny mechanické vlastnosti jak kovů, tak i plastů. U plastů však dochází k výrazným změnám jejich mechanických vlastností již při teplotách, při kterých jsou tyto změny u kovových materiálů prakticky neměřitelné. To souvisí kromě jiného i s tím, že teplotní oblast použití plastů leží zpravidla o několik desítek stupňů pod jejich teplotou skelného přechodu (příp. teplotou tání u krystalických polymerů), zatímco stejná teplotní oblast leží u kovových materiálů o několik set stupňů pod jejich teplotou tání. Přesto při srovnání lze nalézt značnou podobnost. Polymery (hlavně termoplasty) jsou však velmi náchylné k tečení při zvýšených teplotách. To vyvolává výraznou závislost důležitých konstrukčních veličin, jako např. pevnost v tahu a modulu E na teplotě, takže znalost teplotních závislostí je podmínkou konstrukčního využití plastů.

Při použití plastů pro konstrukční dílce nás bude zajímat vedle jiných vlastností, jako je chemická odolnost, stárnutí apod., také i rozsah teploty, při které bude změna strukturních vlastností tak malá, že nám neovlivní požadované mechanické hodnoty. Trvalá tepelná odolnost se nejlépe zjišťuje dlouhodobou krípkovou zkouškou tahu, ohybu nebo tlaku. Pracuje se obvykle při určitém napětí za různých teplot. Sestrojením takových křivek lze zjistit napětí, za kterého nedochází za dané teploty k nežádoucím krípkovým jevům. Výsledky zkoušek mají pro praxi význam jen tehdy, jestliže zkoušené napětí odpovídá podmínkám namáhání v praxi. Takto prováděné zkoušky jsou poměrně časově náročné.

Podle DIN 7 705 se trvalá tepelná odolnost vyjadřuje teplotou, která způsobí pokles mechanických vlastností nejvýše o 10 %. Zkouší se pevnost v ohybu a rázová houževnatost na zkušebních tělesech zahřívaných 200 hodin při zvolené teplotě.

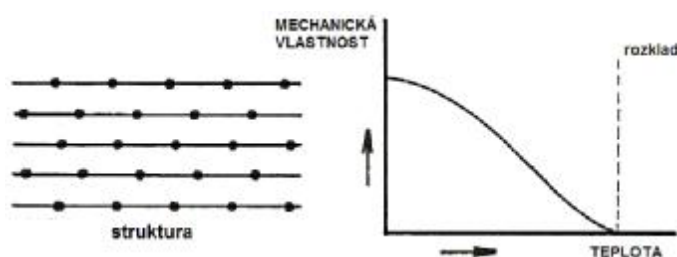
Tepelnou odolnost materiálů je nutné tehdy zjišťovat, aby se zjistila míra délky přípustného tepelného namáhání z hlediska změn chemického složení materiálu během

zpracování při zvýšené teplotě. Pro PVC a jeho kopolymery je normalizována konduktometrická metoda. Při této zkoušce se stanovuje doba, kdy začíná rychlý pokles elektrického odporu měřeného zkušební vzorku při stálé teplotě. Zkušební vzorek se vloží mezi 2 elektrody vyhřáté obvykle na 180°C. Probíhající změna elektrického odporu se měří buď ohmetrem v časových intervalech nebo se zapisuje zapisovačem. Tepelná stabilita se stanoví tak, že úsekem křivky největšího poklesu elektrického odporu se vede směřnice, jejíž průsečík se směrnicí předchozího průběhu elektrického odporu udává časovou souřadnicí tepelnou stabilitu.

Pro hrubou orientaci lze schematicky znázornit změnu mechanických vlastností v závislosti na teplotě u jednotlivých druhů polymerů oproti anorganickým materiálům asi takto:

Termoplasty

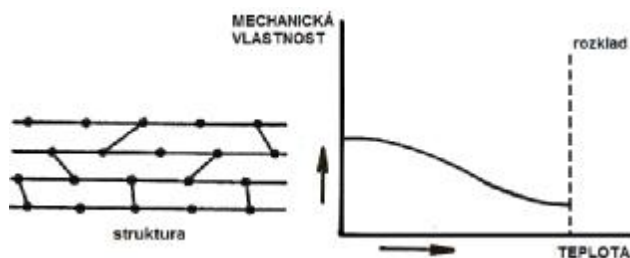
Lineární molekuly nezesíťované. Při zahřívání měknou, jsou vratně deformovatelné. Existuje výrazná závislost mechanických vlastností na teplotě.



Obr. 29. Závislost mechanických vlastností termoplastů na teplotě

Elastomery

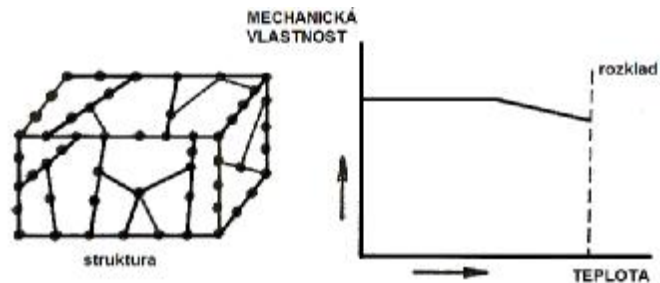
Lineární makromolekuly řídkce zesíťované. Snadno se deformují a po uvolnění deformujícího napětí se opět vracejí do původního tvaru a rozměrů. Jsou to obvykle kaučuky, kaučukovité látky a pryže.



Obr. 30. Závislost mechanických vlastností elastomerů na teplotě

Reaktoplasty

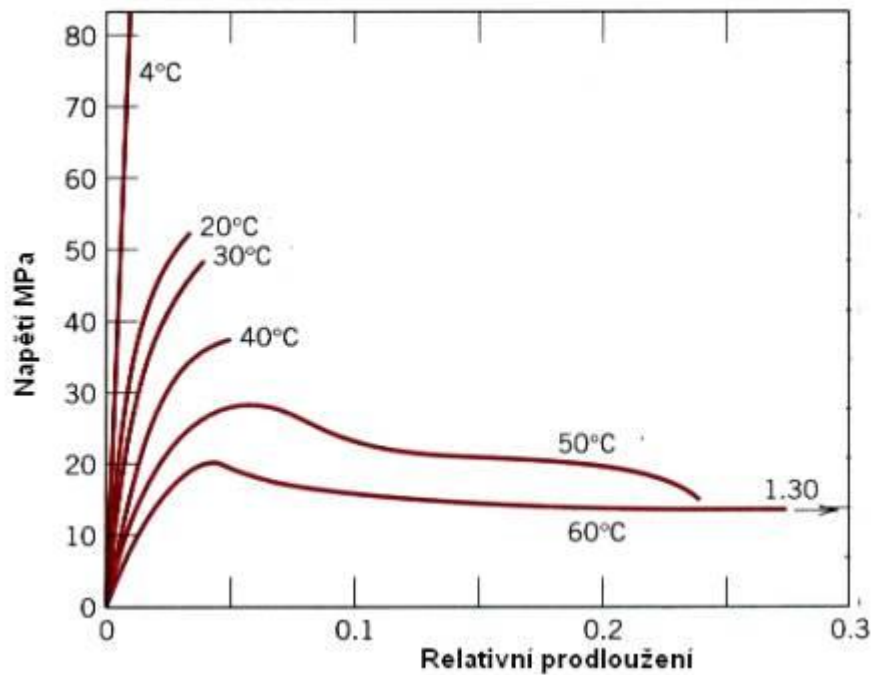
Prostorově zesíťované makromolekuly. Jsou nerozpustné a netavitelné. Nepatrná závislost mechanických vlastností na teplotě. [6]



Obr. 31. Závislost mechanických vlastností reaktoplastů na teplotě

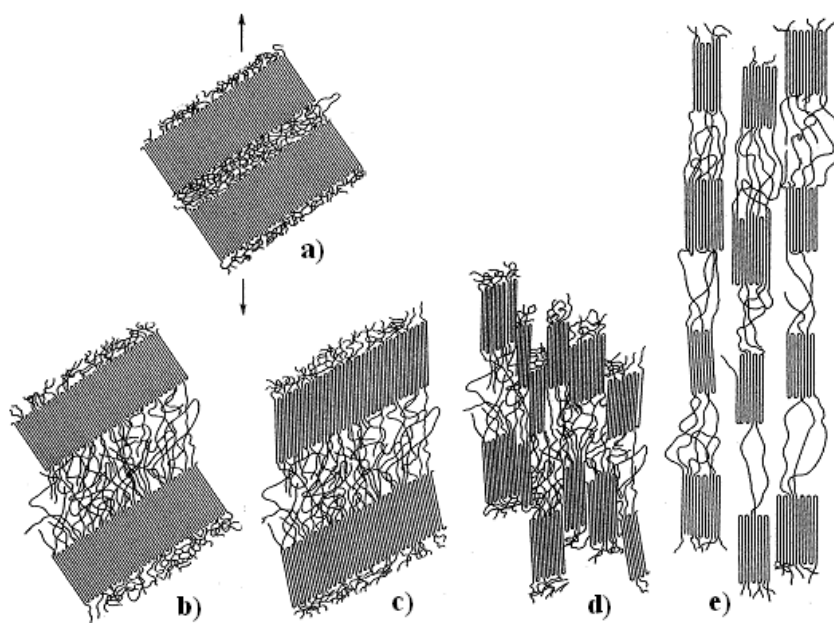
4.2 Mechanické vlastnosti polymerů závislé na teplotě

Mechanické vlastnosti polymerů jsou velmi rozdílné a silně závislé na teplotě (obr. č.32).



Obr. 32. Teplotní závislost mechanických vlastností polymerů

Mechanismus elastické a plastické deformace polymerů je názorně ukázán na *obr. č.33.*

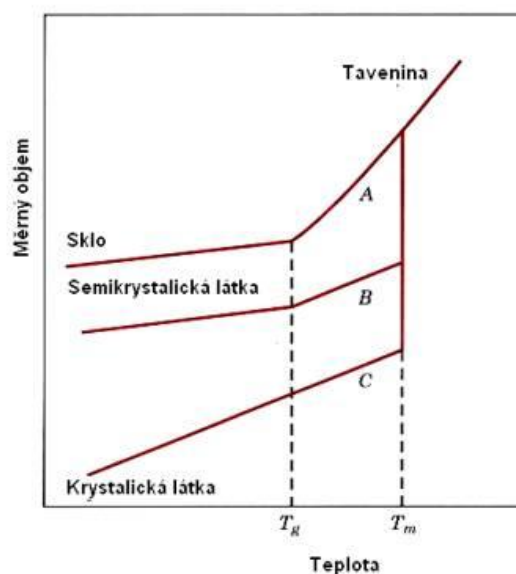


Obr. 33. Schematické znázornění změn účinkem tahového zatížení

Na počátku deformace odpovídá struktura polymeru případu (a) na *obr. č.33.*, tj. v oblasti mezi krystalickými oblastmi se nachází amorfni oblasti. V prvním stádiu deformace (elastická oblast (b)) dochází k malému prodloužení řetězců, které mezi sebou vážou krystalické oblasti. Během třetího stádia ((c) počátek plastické oblasti) dochází k naklánění lamelárních krystalických vrstev. Ve třetím stádiu (d) dochází již k separaci jednotlivých krystalických bloků. Na závěr deformace (e) pak dochází k orientaci krystalických segmentů a řetězců makromolekul v amorfni oblasti do směru působícího napětí.

Sledujeme-li závislost měrného objemu (převrácená hodnota hustoty) na teplotě, dostaneme pro polymer graf, znázorněný na *obr. č.34.* Podle druhu polymeru dostáváme tři typické křivky: křivku A pro zcela amorfni polymer, křivku B pro polymer semikrystalický a křivku C pro krystalický polymer. Kromě teploty tání v grafu vystupuje i teplota T_g , tzv. teplota skelného přechodu, při níž dochází k výrazným strukturním změnám – k přechodu od pevného k pružnému (kaučkovitému) stavu a tyto změny jsou doprovázeny i změnou makroskopických parametrů (tuhost, měrné teplo, koeficient tepelné roztažnosti).

Po fyzikální stránce si lze tuto změnu vysvětlit tak, že při nižších teplotách „zamrzlé“ makromolekuly začnou nad teplotou T_g konat rotační a translační pohyb. [2]

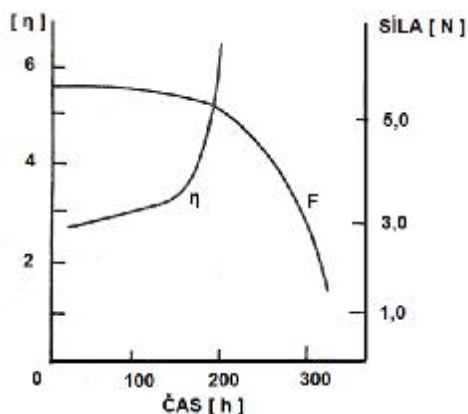


Obr. 34. Teplotní závislost měrného objemu polymerů a teplota skelného přechodu

4.3 Tepelné stárnutí

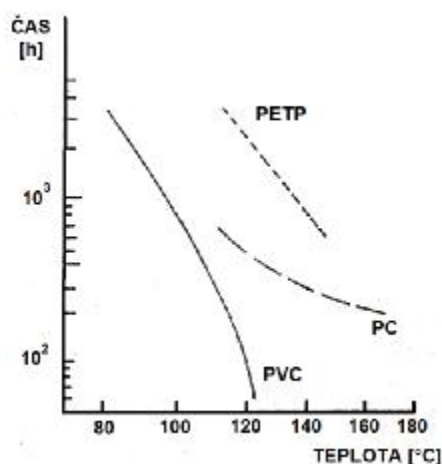
Při dlouhodobém vystavení polymerních materiálů účinkům teploty nad 60 – 70°C, obvykle ve vzdušném prostředí, dochází k tepelnému stárnutí. Při něm probíhají vedle chemických reakcí také fyzikální pochody. Z chemických pochodů může probíhat síťování, dochází k oxidaci, k odbourávání polymeru, u některých polymerů dochází k odštěpování substituentů. K fyzikálním pochodům patří změny nadmolekulární struktury, mění se počet i velikost krystalů. Dochází ke smršťování a vznikají hmotové ztráty.

Krátkodobý ohřev nevyvolává zpravidla hlubší změny ve vlastnostech polymeru, naproti tomu dlouhodobé tepelné namáhání může polymer ovlivnit do té míry, že dochází k trvalé změně vlastností. Krátkodobé zkoušky mají zpravidla pouze orientační charakter. Je známa řada polymerů, u nichž nedochází při krátkodobém ohřevu k patrným změnám jejich mechanických vlastností, avšak při pokračujícím ohřevu při téže teplotě dochází náhle k jejich značným změnám. Na obr. č.35 jsou znázorněny změny limitního viskozitního čísla a síla potřebná na přetržení zkušebního tělíska v závislosti na čase. Po dobu asi 150 h se limitní viskozitní číslo ani síla podstatně nemění. Po této době však dochází v důsledku oxidačních změn a síťování ke zvýšení limitního viskozitního čísla, ale také k poklesu síly, potřebné k přetržení tělíska.



Obr. 35. Změna limitního viskozitního čísla a síly potřebné k přetržení vzorku v závislosti na době stárnutí

Při sledování změn v průběhu tepelného stárnutí se tyto změny posuzují ve dvou teplotních rozmezích, a to při 20 až 100°C a při 100 až 200°C. Na obr. č.36 je znázorněna závislost mezi teplotou a dobou ohřevu, vztažená na pokles tažnosti o 35%.



Obr. 36. Pokles tažnosti o 35% v závislosti na čase a teplotě

Při tepelném stárnutí do 100°C může u některých polymerů dojít i ke zlepšení některých mechanických vlastností, jak k tomu např. u polyetyleny v důsledku vzestupu krystalinity dochází. Přetavením se však získá materiál s původními vlastnostmi, což svědčí o tom, že změna nastala působením zvýšené teploty.

U polystyrénu asi po 300 hodinovém tepelném stárnutí při 60°C nedochází k výrazným změnám viskozity ani mechanických vlastností. Tepelné namáhání při 100°C na vzduchu vyvolává žloutnutí polymeru. Tepelné stárnutí neměkčeného PVC při 100°C vede k poklesu mechanických vlastností.

Při tepelném stárnutí měkčeného PVC je nutno uvažovat také ztráty změkčovadel, jejichž těkavost se při 100°C již dosti projevuje. Také další změny změkčovadel mohou ovlivnit mechanické vlastnosti výrobku.

U polyamidů při 70°C nebyl po 180 dnech zjištěn podstatný pokles tažnosti, v důsledku změn nadmolekulární struktury může naopak dojít ke zlepšení mechanických vlastností.

Fenoplasty a aminoplasty jsou do 100°C stálé, nemění se u nich ani pevnost v ohybu, ani rázová houževnatost, průběh stárnutí je značně ovlivněn použitými plnivými.

Účinek teplot v rozmezí 100 až 200°C způsobuje u většiny polymerů již výrazné změny v důsledku termooxidačního odbourávání. Pro polyetylén, polypropylén, polyamidy, polyuretany, nasycené i nenasycené polyestery, fenoplasty s organickými plnivými a také pro epoxidy leží hraniční teplota dlouhodobé použitelnosti pod 100°C. U polymetylmakrylátu se optické ani mechanické vlastnosti při 130°C prakticky nemění. Polyamidy při 150°C po 100 h stárnutí ztrácejí pevnost v tahu až o 46% a rázová houževnatost klesá až o 70%.

Vlivem kyslíku výrobky hnědnou. U fenoplastů se hodnoty mechanických vlastností při 150°C po 25 až 50 hodinách ustalují na nižší hladině a tyto hodnoty se dlouhodobě nemění.
[9]

4.4 Teplotní závislost modulu pružnosti

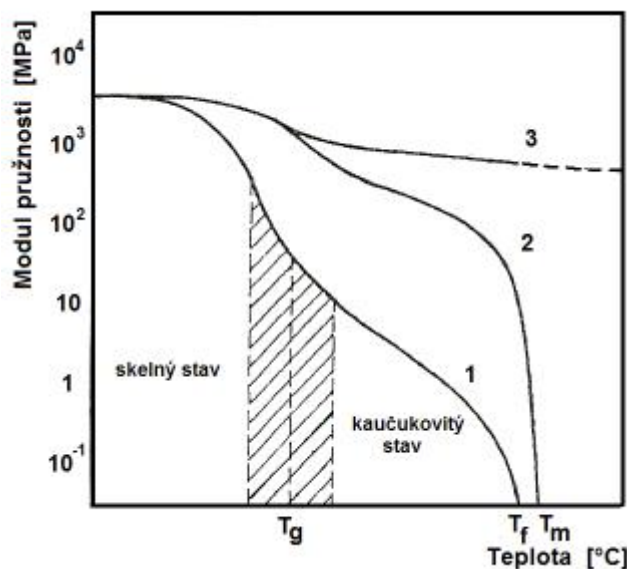
4.4.1 Amorfni termoplastické polymery

S rostoucí teplotou se oslabují molekulární soudržné síly (van der Waalsovy) a modul pružnosti zpočátku mírně klesá. Pohyblivost řetězců v této teplotní oblasti je značně omezena, řetězce jsou v „zamrzlém“ stavu. Tato oblast se označuje jako sklovitý stav. Deformační a lomové chování polymerů se podobá chování anorganických skel. Při dalším zvyšování teploty prochází polymer přechodovým stavem, kdy modul pružnosti klesá asi o 4 řády a přechází ze sklovitého do kaučukovitého stavu (*obr. č.37*). Teploty omezující praktické použití amorfni termoplastů leží při teplotách pod T_g , kdy se modul pružnosti začíná výrazněji zmenšovat. Pro kaučukovitý stav je charakteristické, že u polymeru je možno vyvodit působením malých sil velké deformace, přičemž podstatnou část celkových deformací tvoří deformace vratné. Při dalším zvyšování teploty polymer přechází

z kaučukovitého stavu do stavu viskózního toku. Teplota tohoto přechodu se obvykle označuje jako teplota toku T_f , nad touto teplotou se polymery zpracovávají např. vstřikováním, vytlačováním, vyfukováním apod.

4.4.2 Semikrystalické polymery

Jak bylo již uvedeno, semikrystalické polymery obsahují jednak krystalickou fázi, jednak amorfní fázi. Z tohoto důvodu se na křivce teplotní závislosti modulu pružnosti projevuje jak teplota skelného přechodu, tak teplota tání T_m krystalické fáze. Nad T_g jsou amorfní oblasti v kaučukovitém stavu, podobně jako u amorfních polymerů. Přetrvávající krystalové útvary však vyztužují kaučukovité amorfní oblasti a pokles modulu pružnosti v oblasti T_g je podstatně menší než u amorfních polymerů (pokles asi o 1 řád). Z toho důvodu se semikrystalické polymery mohou používat jako konstrukční materiály i nad teplotou skelného přechodu. Teplotou omezující jejich použití není teplota tání krystalické fáze, ale mezní teploty, ležící pod teplotou tání. Použití semikrystalických polymerů při vyšších teplotách je limitováno někdy příliš nízkým modulem pružnosti, a to zejména u polymerů s nízkou krystalinitou, jindy termooxidačními procesy, vedoucími ke zhoršení mechanických a fyzikálních vlastností.



Obr. 37. Schématické průběhy závislosti modulu pružnosti polymerů na teplotě

(1 – amorfní, 2 – semikrystalické, 3 – sítované)

V praxi se tepelná odolnost plastů posuzuje např. zkouškou podle Vicata. Teplota měknutí podle Vicata je teplota, při níž hrot o standardním průřezu (1mm^2) pronikne za rovnoměrného růstu teploty do předepsané hloubky (1mm). Jinou, z praktického hlediska důležitou zkouškou, je měření teploty průhybu. Je to teplota, při které se dosáhne předepsané velikosti průhybu zkušební tělesa za standardních podmínek zkoušky, tj. rozměrů tělesa, způsobu zatěžování a ohřevu. Tento údaj má význam zejména pro plastové výrobky v provozu stabilně mechanicky zatěžované za vyšších teplot.

4.4.3 Sesítěné polymery

Sesítěné polymery (reaktoplasty), u nichž jsou uzlová místa prostorové sítě tvořena kovalentními vazbami, mají po dosažení teploty skelného přechodu modul pružnosti nižší oproti skelnému stavu o jeden, maximálně o dva řády. To závisí na stupni sesítení a chemické struktuře síťujícího činidla. V kaučukovité oblasti není možno sesítěné polymery tvarovat podobným způsobem jako lineární amorfnní polymery. Pro konstrukční účely se reaktoplasty používají ve skelném stavu. Vytvrzený reaktoplast nelze zvyšováním teploty nad T_g převést do stavu viskózního toku. Modul pružnosti je téměř konstantní až do teplot, kdy dochází k degračním procesům mechanismem porušování kovalentních vazeb.

4.4.4 Teplota skelného přechodu

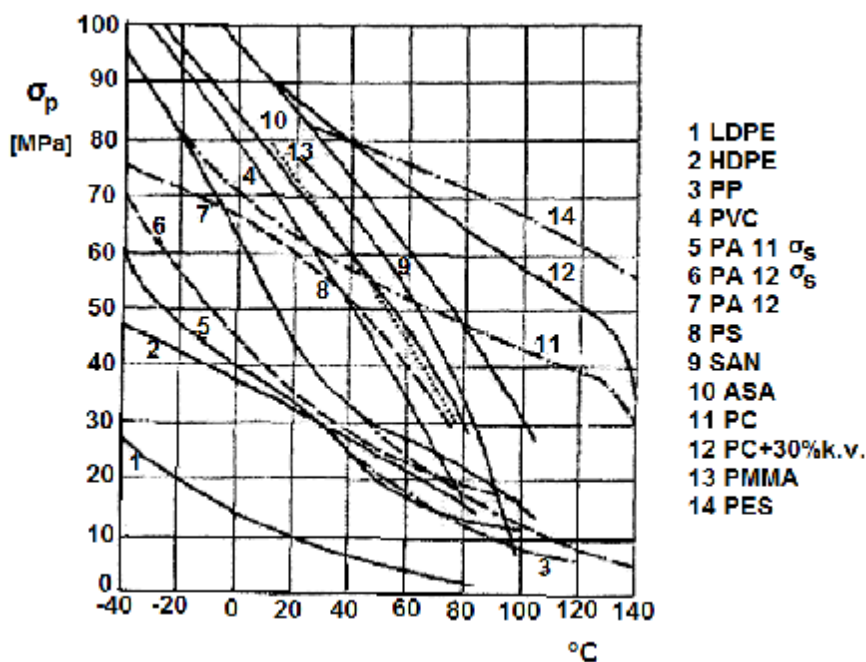
Z průběhu závislosti modulu pružnosti na teplotě vyplývá, že nejdůležitější fyzikální charakteristikou, rozhodující o teplotním rozsahu konstrukčního použití plastů, je teplota skelného přechodu T_g . Hodnota T_g bezprostředně souvisí se strukturou konstituční jednotky polymeru. Čím je tato struktura komplikovanější a tuhost makromolekul větší, tím je nesnadnější pohyblivost molekulárních segmentů a T_g se zvyšuje. Protože je T_g z fyzikálního hlediska mezní hranicí pro konstrukční použití amorfnních polymerů, je snaha syntetizovat polymery s co nejvyšší T_g . Se vzrůstající T_g a tuhostí makromolekul se ovšem zhoršuje zpracovatelnost lineárních amorfnních polymerů kvůli značně vysoké viskozitě taveniny. Z tohoto důvodu se některé polymery s vysokou T_g mísí s vhodným polymerem o nižší T_g , aby se zlepšila jeho zpracovatelnost.

Typickým příkladem takového komerčně vyráběného plastu je polymerní slitina PPO a PS. Fyzikální výklad teploty skelného přechodu, která není jednoznačně definovaným fázovým přechodem, jako např. teplota tání krystalů, je zatím nejednotný a různé teorie

tohoto přechodu se v literatuře stále vyvíjejí a upřesňují. Teplota T_g je při ohřevu ze skelného stavu spojena s uvolněním tzv. Brownova mikropohybu. Dodáním tepelné energie se usnadňují přeskoky pohyblivých segmentů do nových poloh. To je umožněno přítomností děr o submolekulární velikosti (vakantních míst) v amorfní fázi. Při T_g , která je charakteristická pro danou strukturu konstituční jednotky, se zvyšuje frekvence přeskoků exponenciálně. Navenek se to projevuje výraznými změnami mechanických a fyzikálních vlastností. Praktické důsledky to má zejména pro již popsanou závislost modulu pružnosti na teplotě, jejíž znalost je nezbytná pro konstrukční navrhování plastových výrobků. [10]

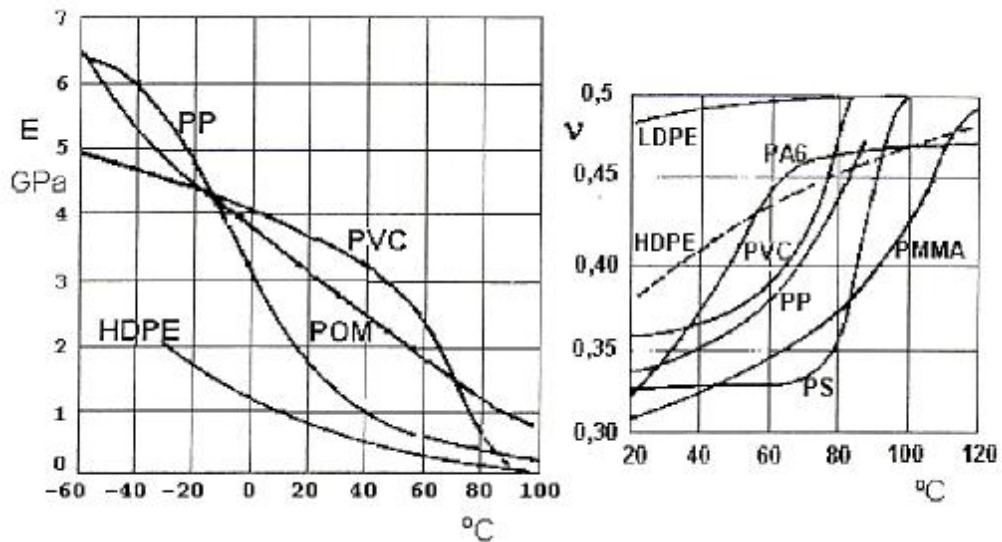
4.5 Příklady mechanického chování polymerů za zvýšených teplot

Základním materiálovým parametrem vstupujícím do úvah o spolehlivosti plastového výrobku či konstrukce je časová mez pevnosti při daných vnějších podmínkách. Směrem k nižším teplotám u plastů obecně vzrůstá pevnost a klesá tažnost. Závislosti krátkodobé meze pevnosti resp. kluzu na teplotě jsou pro některé typy plastů vyneseny na *obr. č.38*.



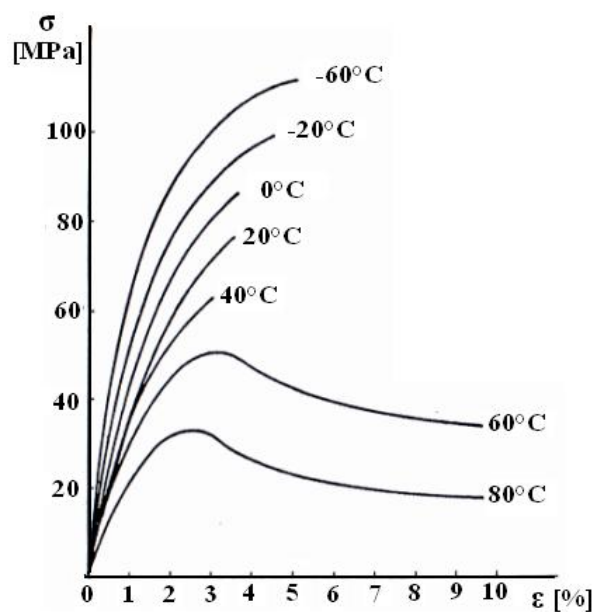
Obr. 38. Závislosti krátkodobé meze pevnosti na teplotě

Specifičností v chování plastů jsou výrazné závislosti elastických konstant na teplotě. S rostoucí teplotou se obecně modul pružnosti plastu snižuje, Poissonovo číslo naopak vzrůstá. Příklady těchto závislostí jsou uvedeny na obr. č.39 [13]



Obr. 39. Závislost modulu pružnosti a Poissonova čísla na teplotě

Průběh tahových křivek houževnatého polystyrenu je uveden na obr. č.40. S rostoucí teplotou přechází polymer postupně z tuhého, tvrdého stavu do kaučukovitěho s menším modulem a vysokou tažností. Vidíme, že v oblasti -40°C až $+40^{\circ}\text{C}$ mají křivky podobný průběh jako měla změna v rychlosti deformace. [14]



Obr. 40. Průběh tahových křivek houževnatého polystyrenu při různých teplotách

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je zjištění vlivu teploty na mechanické chování polymerních a kompozitních materiálů.

V první fázi praktické části bude provedeno vstřikování zkušebních tělísek z následujících materiálů: polypropylén (PP, PP+30% GF), polyamid (PA6, PA6 + 30% GF, PA66 + 30% GF), polystyrén (PS), polykarbonát (PC). Po vystříknutí zkušebních tělísek bude následovat provedení mechanických zkoušek. Tahové zkoušky za teploty okolí a zkoušky za zvýšených teplotách v teplotní komoře.

V závěru budou vyhodnoceny naměřené výsledky a porovnány s výsledky v použitých teoretických zdrojích a s FEM modelem pro krátkovláknový kompozitní materiál.

6 POPIS A TECHNICKÉ PARAMETRY POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ

6.1 Zkušební stroj Zwick

Zkušební stroj Zwick 145 665 (*obr. č.41*) slouží k měření mechanických vlastností materiálů. Umožňuje provádět statické zkoušky tahem, tlakem, ohybem i cyklické zkoušky míjivým zatížením. Oblast použití je omezena velikostí maximální snímané síly siloměrnou hlavou na materiály polymerní (plasty, kompozity, lamináty, textilie, pěnové materiály, lepenky, papíry aj.) S použitím teplotní komory je možno provádět i mechanické zkoušky při teplotách $-80 - +250^{\circ}\text{C}$.

Univerzální testovací programy pro zmíněné mechanické zkoušky (testXpert v. 7.0) jsou dodány spolu se zkušebním strojem a nainstalovány na osobním počítači, který vyhodnocuje průběh zkoušky a měřené veličiny.



Obr. 41. Zkušební stroj Zwick 145 665

Technická data

Snímač síly : 20 kN a 2,5 kN

Pracovní výška : 1160 mm

Celková výška : 2012 mm

Pracovní šířka : 420 mm

Celková šířka : 630 mm

Strojová výška : 1284 mm

Maximální zkušební rychlost : 750 mm/min

Hmotnost : 150 kg

6.2 Teplotní komora Zwick

Standardní teplotní komory, osvědčeny a testovány ve Zwick Roell kvalitě, byly zkonstruovány pro největší užívané rozmezí teplot. Mohou být ovládány chladicími prostředky CO₂ nebo LN₂. Jsou úsporné a jsou vybaveny vnitřním osvětlením, průmyslovým osvědčením Eurotherm kontroly, plus sériovým rozhraním pro komunikaci s testovacím PC.

Optimální přizpůsobení lokálním ověřovacím požadavkům může být dosaženo skrz stacionární umístění zařízení do testovacího stroje nebo připevněním na kolejnice. Připevnění na kolejnice umožňuje přisunutí a odsunutí teplotní komory do zkušební oblasti stroje Zwick.

Při použití optického extenzometru spolu s teplotní komorou je teplotní gradient velmi nízký díky plně zahřátému, průhlednému oknu.



Obr. 42. Teplotní komora Zwick W91255

Technická data

Teplotní rozmezí : -80 °C _ +250°C

Čas ohřevu na +250°C : < 30 min

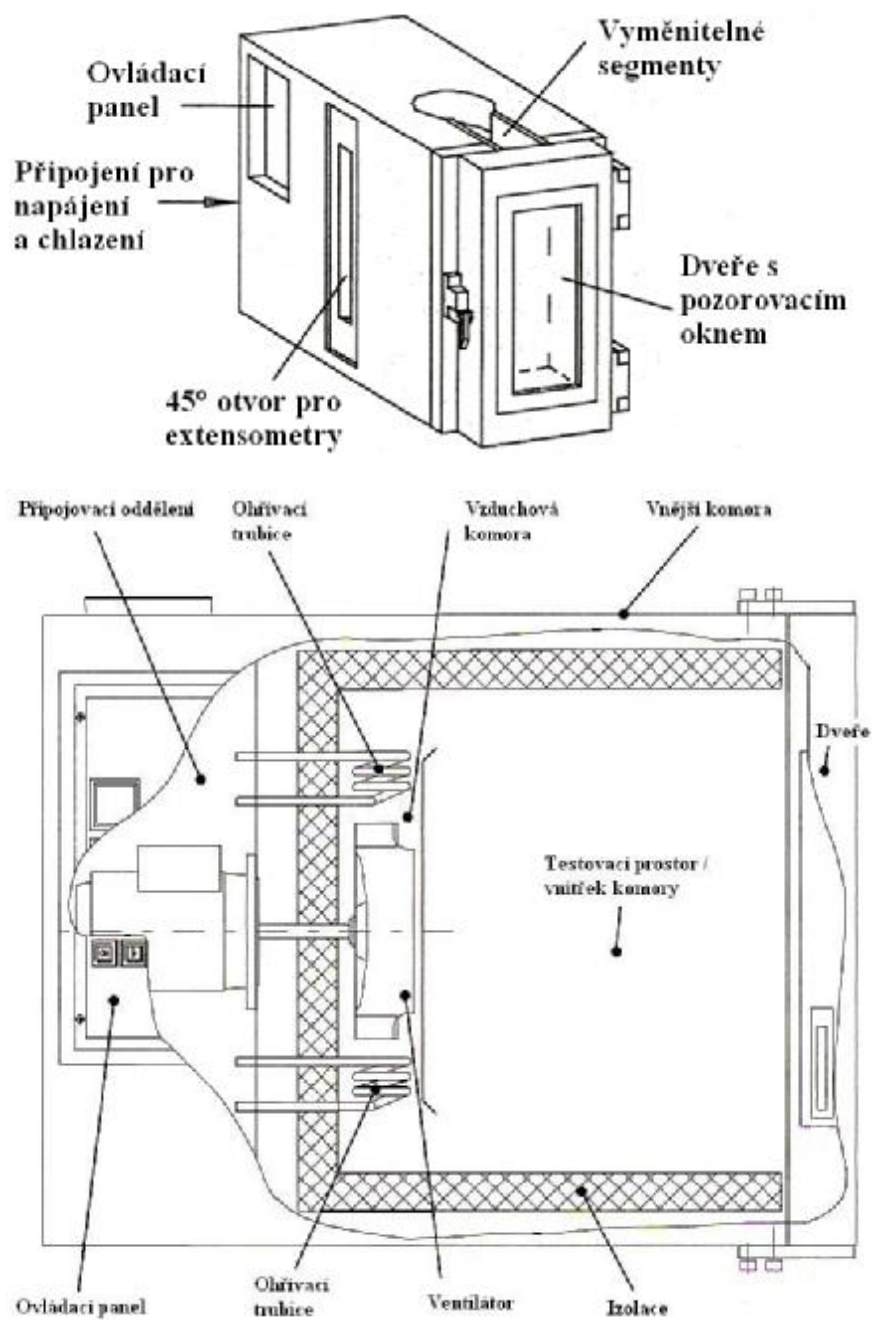
Maximální teplotní odchylka : ± 3,5 °C

Čas ochlazení na -60°C : < 20 min

Vnější rozměry (VxŠxT) : 850 x 400 x 840 mm

Rozměry testovacího prostoru (VxŠxT) : 700 x 255 x 360 mm

Hmotnost : 90 Kg

Popis teplotní komory

6.3 Vstříkovací stroj Arburg

Vstříkovací stroj ARBURG 420 C Allrounder Advanced (obr. č.43) je vybaven 32 bitovým multiprocesorovým řídicím systémem *SELOGICA*, který umožňuje strojům *Allrounder C* jednoduše a bezpečně ovládat komplexní technologii vstříkování. Tento vstříkovací stroj je předurčen pro univerzální řešení všech úkolů v oblasti vstříkování, ale lze ho použít také pro všechny speciální oblasti zpracování plastů, jako např. v oblasti vícekomponentního vstříkování nebo v oblasti zpracování LSR či PET-materiálů. Díky širokému spektru použití ho lze přizpůsobit dle požadavků zákazníka pro všechny provozní aplikace.



Obr. 43. Vstříkovací stroj ARBURG 420 C Allrounder Advanced

Technická data

Uzavírací síla : 1000 kN	Otevírací síla : max. 35/350 kN
Výška formy : min. 250 mm	Vzdálenost mezi sloupky : 420 x 420 mm
Upínací deska : 605 x 605 mm	Síla vyhazovacích kolíků : max. 40 kN
Objem dávky : 182 cm ³	Průměr šneku : 40 mm
Účinná délka šneku : 20 L/D	Tah šneku : max. 145 mm
Čas otvácího cyklu : 2,0 – 329 s - mm	
Rychlost toku taveniny : max. 128/168/212 cm ³ /s	
Řízení energie vstříkovacího čerpadla : 22 kW	

7 POPIS POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

Polypropylén (PP TATREN TI 924; PP SLOVALEN PH 61 GF 30)

Polypropylen je druhým nejvýznamnějším vyráběným polyolefinem. Molekulová hmotnost obchodních typů bývá v rozmezí 100 000 až 600 000 g/mol. Bod tání leží v intervalu 160 až 170 °C.

Polymerací samotného propylénu získáme homopolymer, označovaný PP-H. Pro praktické použití je nejčastější homopolymer s molární hmotností mezi 2.105 až 6.105 a poměrně úzkou distribucí. Jsou to vysoce krystalické a dobře tekuté typy. Zvyšuje-li se molární hmotnost a rozšiřuje distribuce, získáme méně tekuté typy se sníženou krystalinitou a dobrou houževnatostí použitelné pro vstřikování, vyfukování dutých nádob a vytlačování fólií.

Použití: trubky, folie, desky, předměty domácí spotřeby s vyšší tuhostí a tepelnou odolností, orientované pásy, obaly; v automobilovém průmyslu – výplně dveří, palubní desky, ventilátory, nárazníky; vlákna, kompozity.

Zpracování: vstřikováním, vytlačováním a lisováním při teplotách do 280°C.

Výhody: krátkodobě odolává teplotám až 140 °C, výborné elektroizolační vlastnosti, dobrá chemická odolnost, dobře odolává vroucí vodě a sterilizaci.

Nevýhody: nižší rázová houževnatost, křehkost pod 0 °C, větší citlivost na termooxidaci, menší propustnost pro plyny a páry.

Tab. 2. Vlastnosti PP

Vlastnosti	Hodnoty	Jednotky
Hustota	0,900	g/cm ³
Index toku taveniny (230 °C/21,6 N)	30	g/10 min
Mez kluzu	28	MPa
Prodloužení na mezi kluzu	11	%
Mez pevnosti v tahu	34-38	MPa
Modul pružnosti v tahu	1200	MPa
Vrubová houževnatost Charpy	2	kJ/m ²
Teplota měknutí podle Vicata	149	°C
Tvrдость Shore D	65	-

Tab. 3. Vlastnosti PP + 30 % GF

Vlastnosti	Hodnoty	Jednotky
Hustota	1,100	g/cm ³
Hustota skleněných vláken	2,5	g/cm ³
Index toku taveniny (230 °C/21,12 N)	9±3	g/10 min
Obsah plniva	30±2	%
Štíhlostní poměr	346	-
Modul pružnosti v tahu	4900	MPa
Modul pružnosti skleněných vláken	75000	MPa
Tažnost	4	%
Mez pevnosti v tahu	80	MPa
Vrubová houževnatost Charpy	4	kJ/m ²

Polyamid (PA 6 Ravamid B-NC; PA 6 Ravamid B GF30 NC)

Polyamidy jsou lineární polymery. Nejvýznamnější a nejrozšířenější jsou PA s alifatickými řetězci. V anglosaské literatuře se pro alifatické PA používá synonymum „nylon“, vzniklé z obchodního označení PA.

K jednoduchému označení alifatických PA byl zaveden systém, který udává počet uhlíkových atomů ve stavebních jednotkách řetězců: PA6, PA66, PA610.

Typické PA jsou v tuhém stavu 30 až 50 % krystalické a neprůhledné, řetězce jsou provázány vodíkovými můstky mezi amidovými skupinami, jejichž množství ovlivňuje krystalickou strukturu, bod tání a teplotu skelného přechodu aj.

Použití: folie, textilní a technická vlákna, konstrukční materiál na ložiska, ozubená kola s 30% skl. vlákna, kluzná pouzdra.

Zpracování: 74 % vstřikováním, 22% vytlačováním, zbytek litím a ostatními postupy.

Výhody: vysoká houževnatost, tvrdost, odolnost proti oděru, všechny PA odolávají účinku pohonných látek, olejů a velké řady technických rozpouštědel, nasákavost způsobuje dobré elektroizolační charakteristiky, na nichž spočívá použití PA jako polymerních materiálů.

Nevýhody: mají úzký rozsah teplot tání a tuhnutí.

Tab. 4. Vlastnosti PA 6

Vlastnosti	Hodnoty	Jednotky
Hustota	1,140	g/cm ³
Nasákavost (24hod,23°C)	1,5-2,0	%
Mez pevnosti v tahu	80	MPa
Prodloužení při přetržení	>80	%
Mez pevnosti v ohybu	>100	MPa
Modul pružnosti v ohybu	2600	MPa
Vrubová houževnatost IZOD	80	J/m
Teplota měknutí podle Vicata	190	°C
Teplota průhybu při zatížení (metoda A)	70	°C

Tab. 5. Vlastnosti PA 6 + 30% GF

Vlastnosti	Hodnoty	Jednotky
Hustota	1,360	g/cm ³
Nasákavost (24hod,23°C)	1	%
Mez pevnosti v tahu	170	MPa
Prodloužení při přetržení	3	%
Mez pevnosti v ohybu	230	MPa
Modul pružnosti v ohybu	8200	MPa
Vrubová houževnatost IZOD	150	J/m
Teplota měknutí podle Vicata	220	°C
Teplota průhybu při zatížení (metoda A)	210	°C

Polystyrén (KRASTEN)

Polystyrén tvoří lineární nerozvětvené řetězce. Rentgenograficky bylo dokázáno, že polystyrén je amorfní polymer. Řetězec má poměrně tuhý, neohebný, z čehož vyplývá řada jeho mechanických a fyzikálních vlastností. Morfologicky není zajímavý, protože řetězce nemají žádné pravidelné uspořádání.

Použití: spotřební předměty, obaly, hračky, potravinové misky, kelímky, součásti osvětlovacích těles, elektrotechnické součástky.

Zpracování: velmi snadné pro jeho tokové vlastnosti, zvláště při nižší molekulové hmotnosti (oblast elastické deformace prakticky nemá). Zpracovává se všemi známými technologiemi. Vstřikování, vyfukování, obrábění, lepení. Na povrchu jej lze lakovat, pokovovat.

Výhody: výborné tokové vlastnosti a velmi dobrou rozměrovou stálost, modifikací na lehčený (pěnový) polystyrén dobré tepelné vlastnosti, vysoký index lomu světla (široké možnosti při konstrukci osvětlovacích těles).

Nevýhody: nízká rázová a vrubová houževnatost, výrobky jsou náchylné k elektrostatickému náboji.

Tab. 6. Vlastnosti PS

Vlastnosti	Hodnoty	Jednotky
Hustota	1,040	g/cm ³
Index toku taveniny (200 °C/50 N)	6-7	g/10 min
Mez kluzu	30	MPa
Napětí v tahu při přetržení	22	MPa
Prodloužení při přetržení	40	%
Modul pružnosti v tahu	2100	MPa
Mez pevnosti v ohybu	40	MPa
Rázová houževnatost Charpy	100	kJ/m ²
Teplota měknutí podle Vicata	94	°C

Polykarbonát (Calibre 303 EP 22)

Polykarbonáty jsou polyestery kyseliny uhličitě a dvojsytných alkoholů. Jsou transparentní (propustnost světla 85%). PC se dá zpracovávat všemi známými zpracovatelskými technologiemi. Jeho granulát je však třeba před zpracováním dobře vysušit, nejlépe za vakua. Nejdůležitějšími způsoby jeho zpracování jsou vstřikování, vytlačování a vakuové tvarování. Fólie lze vyrábět vyfukováním nebo vytlačováním štěrbinovou tryskou. Průmyslově vyráběné fólie se však připravují z roztoku. Tento způsob má tu výhodu, že se dá použít také u výšemolekulárních typů, které poskytují fólie vyšší kvality.

Použití: konstrukční díly, folie, trubky, tyče a desky, směsi s ABS – součásti automobilů, CD nosiče, elektrotechnika a elektronika.

Zpracování: vstřikování při 280-310°C, vytlačování při 220-320°C, lití do roztoku, třískové opracování, svařování horkým vzduchem, výroba slitin (blends) s termoplasty.

Výhody: vysoká rázová houževnatost i za velmi nízkých teplot, dobrá rozměrová stálost, dobré elektroizolační vlastnosti, odolnost vůči UV, vysoká mechanická pevnost (zvláště v tahu), nízká absorpce vody,

Nevýhody: nedostatečná odolnost vůči dlouhodobému působení vroucí vody a páry, amoniaku a aminům. Také dlouhodobé působení methanolu způsobuje jejich degradaci.

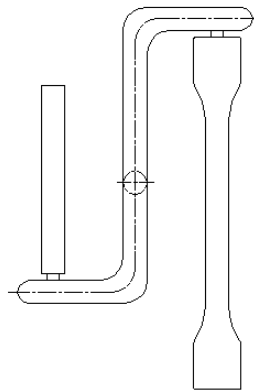
Tab. 7. Vlastnosti PC

Vlastnosti	Hodnoty	Jednotky
Hustota	1,200	g/cm ³
Index toku taveniny (300 °C/12,0 N)	22	g/10 min
Mez kluzu	60	MPa
Mez pevnosti v tahu	65-70	MPa
Modul pružnosti v tahu	2340	MPa
Modul pružnosti v ohybu	2410	MPa
Tažnost	120	%
Vrubová houževnatost Charpy	20	kJ/m ²
Teplota měknutí podle Vicata	147	°C

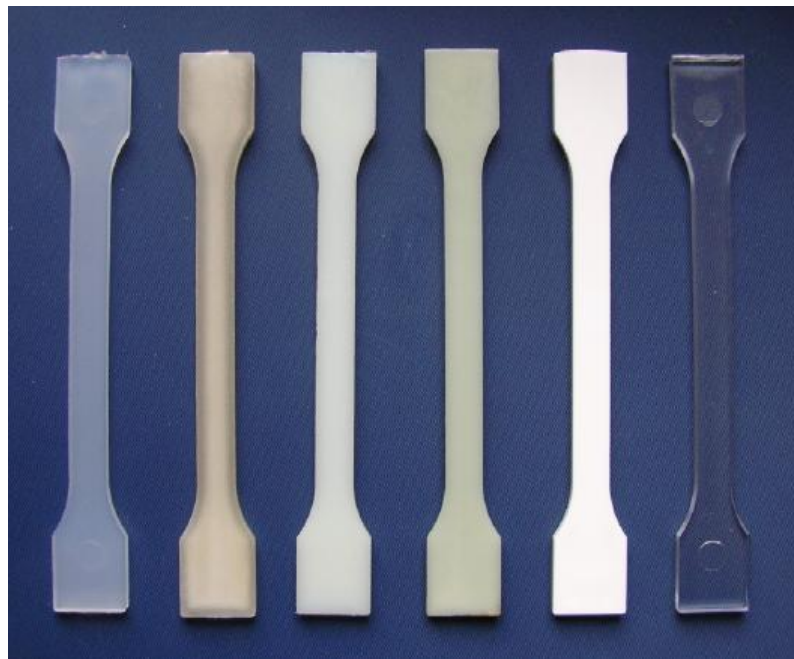
8 EXPERIMENT A VÝSLEDKY MĚŘENÍ

8.1 Příprava zkušebních vzorků

Všechny zkušební vzorky byly zhotoveny vstřikováním na vstřikovacím stroji Arburg 420C. Byla použita jednonásobná forma. Dutina měla tvar lopatky a obdélníkové tyčinky viz obr. č.44. Rozměry zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku viz kapitola 3.3 obr. č. 20.



Obr. 44. Uspořádání dutiny formy: lopatka + obdélníková tyčinka



Obr. 45. Zkušební vzorky (zleva: PP, PP+30%GF, PA6, PA6+30%GF, PS, PC)

8.1.1 Vstřikovací podmínky

Podmínky vstřikování a vstřikovací parametry viz příloha P I.

8.2 Tahová zkouška

Zkušební vzorky byly zatěžovány jednoosým tahem na zkušebním stroji Zwick 145 665 při teplotě okolí 23°C. Při vyšších teplotách byly vzorky zkoušeny na trhacím stroji Instron 1122 vybaveným teplotní komorou (*obr. č.46*). Provedení zkoušky za vyšších teplot poskytl Institut pro testování a certifikaci, ITC a.s. Zlín.

Zkouška probíhala ve dvou fázích. Nejprve se za rychlosti posuvu čelistí 1 mm/min provedlo měření modulu pružnosti materiálu, a pak probíhala samotná zkouška za rychlosti posuvu čelistí 50 mm/min. Pro vyšší teploty se teplotní komora vyhřála na požadovanou teplotu (40°C, 60°C a 80°C). Poté následovala výdrž na dané teplotě 15 minut pro dokonalé prohřátí zkušebního vzorku. Naměřené hodnoty byly sestaveny do tabulek a grafických závislostí dle teploty a druhu materiálu zkušebního vzorku. Pro každý materiál bylo provedeno měření pěti vzorků a z nich stanovena průměrná hodnota a směrodatná odchylka.



Obr. 46. Univerzální trhací stroj Instron 1122 s teplotní komorou

Naměřené hodnoty v následujících tabulkách (*tab. č.8 – tab. č.31*):

a [mm] - tloušťka vzorku

b [mm] - šířka vzorku

E [MPa] - modul pružnosti v tahu

σ_P [MPa] - mez pevnosti materiálu

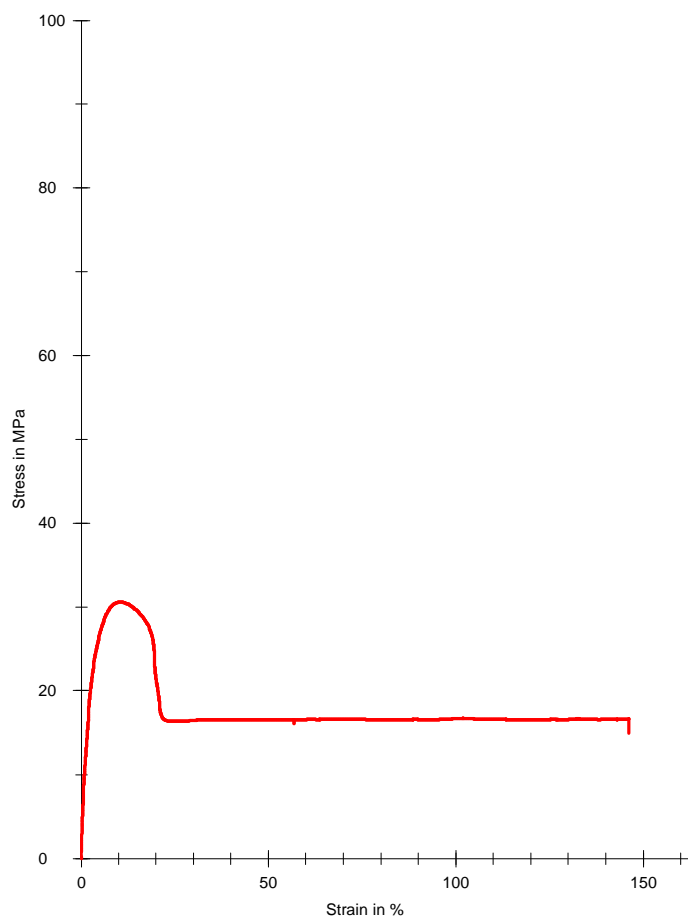
$\Delta l \sigma_P$ [mm] - protažení při maximálním napětí

ε_Z [%] - poměrná deformace při maximálním napětí

PP (teplota okolí 23°C):

Tab. 8. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PP (23°C)

PP	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,86	10,07	1407,14	30,46	6,03	10,04
s	0,01	0,01	20,03	1,29	0,07	0,11

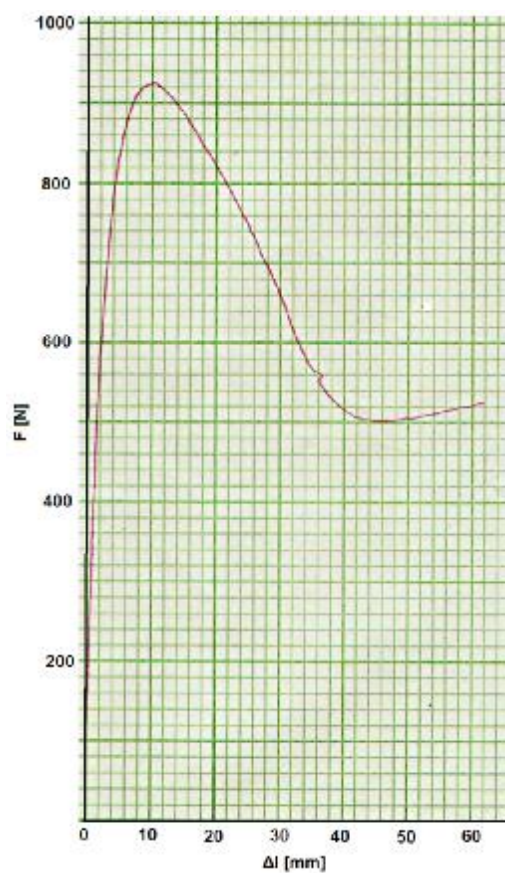


Obr. 47. Grafické zobrazení průměrných hodnot tahové zkoušky pro PP (23°C)

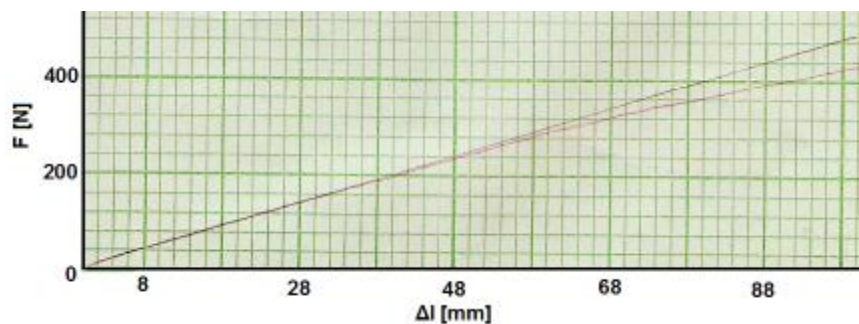
PP (40°C):

Tab. 9. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PP (40°C)

PP	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,88	10,06	1130,00	22,96	10,25	10,25
s	0,01	0,01	169,71	0,90	0,35	0,35



Obr. 48. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP (40°C)

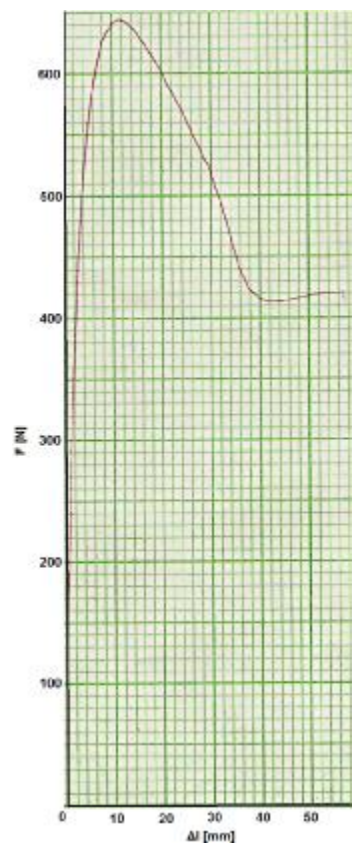


Obr. 49. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP (40°C) – modul

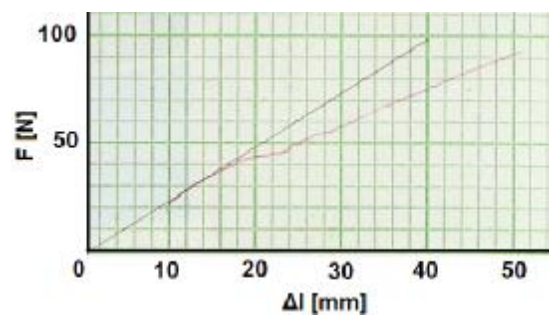
PP (60°C):

Tab. 10. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PP (60°C)

PP	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,86	10,07	934,50	17,01	11,50	11,50
s	0,01	0,01	60,10	0,51	0,71	0,71



Obr. 50. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP (60°C)

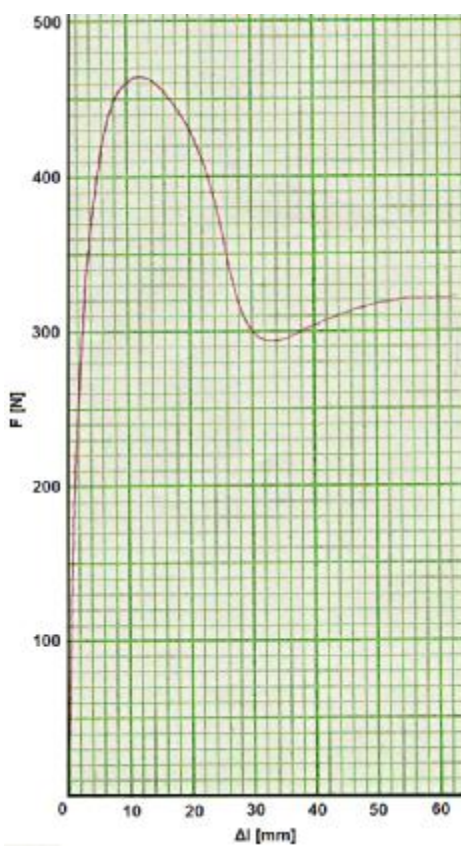


Obr. 51. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP (60°C) – modul

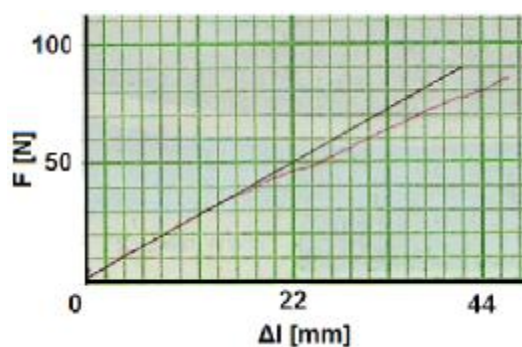
PP (80°C):

Tab. 11. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PP (80°C)

PP	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,88	10,06	546,50	12,07	12,25	11,75
s	0,01	0,02	30,41	0,18	0,35	0,35



Obr. 52. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP (80°C)

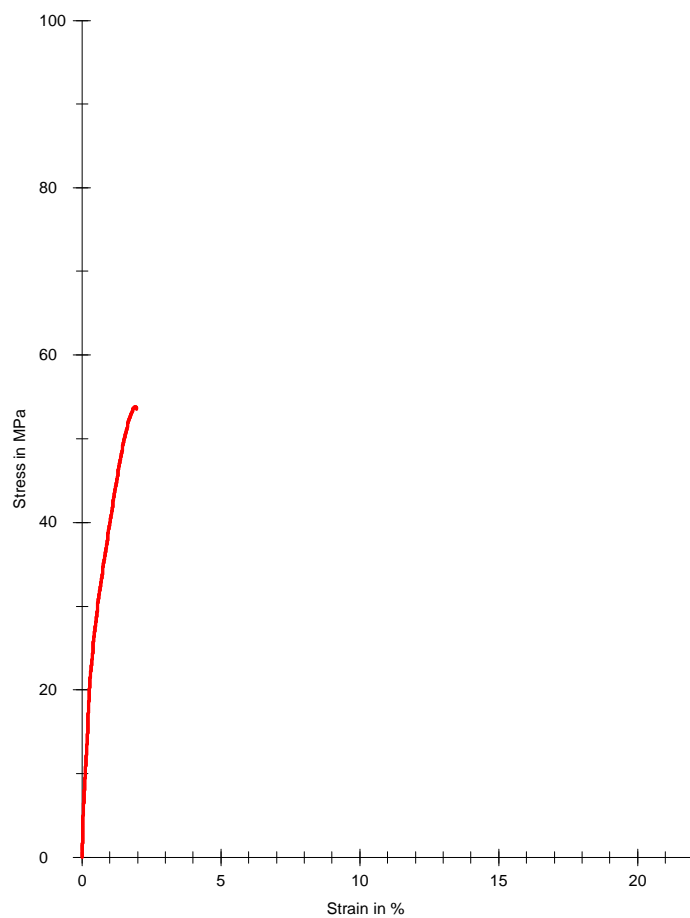


Obr. 53. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP (80°C) – modul

PP + 30 % GF (teplota okolí 23°C):

Tab. 12. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (23°C)

PP + 30 %	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,85	10,05	6439,50	53,83	0,39	1,93
s	0,01	0,01	9,19	0,21	0,01	0,04



Obr. 54. Grafické zobrazení průměrných hodnot tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (23°C)

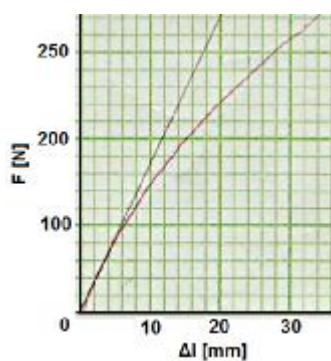
PP + 30 % GF (40°C):

Tab. 13. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (40°C)

PP + 30 %	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,86	10,06	4356,00	51,57	1,25	1,25
s	0,01	0,02	267,29	2,21	0,35	0,35



Obr. 55. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (40°C)



Obr. 56. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (40°C) – modul

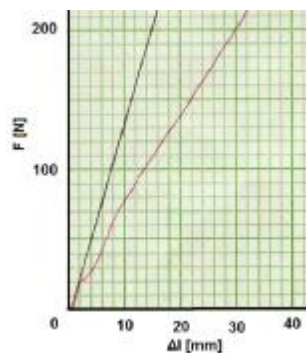
PP + 30 % GF (60°C):

Tab. 14. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (60°C)

PP + 30 %	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,86	10,06	3112,50	39,21	2,25	2,25
s	0,01	0,01	17,68	0,19	0,35	0,35



Obr. 57. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (60°C)

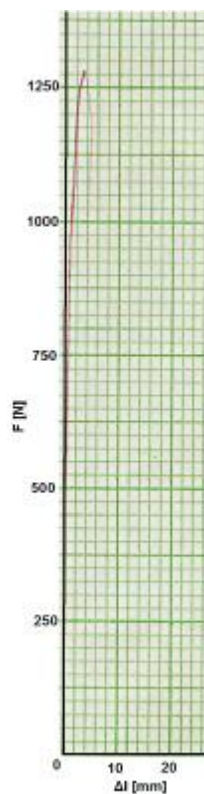


Obr. 58. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (60°C) – modul

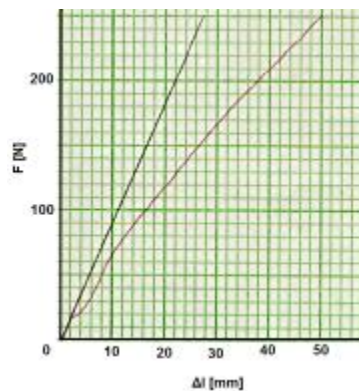
PP + 30 % GF (80°C):

Tab. 15. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (80°C)

PP + 30 %	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,85	10,05	2386,00	32,04	3,25	3,25
s	0,01	0,01	161,22	0,22	0,35	0,35



Obr. 59. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (80°C)

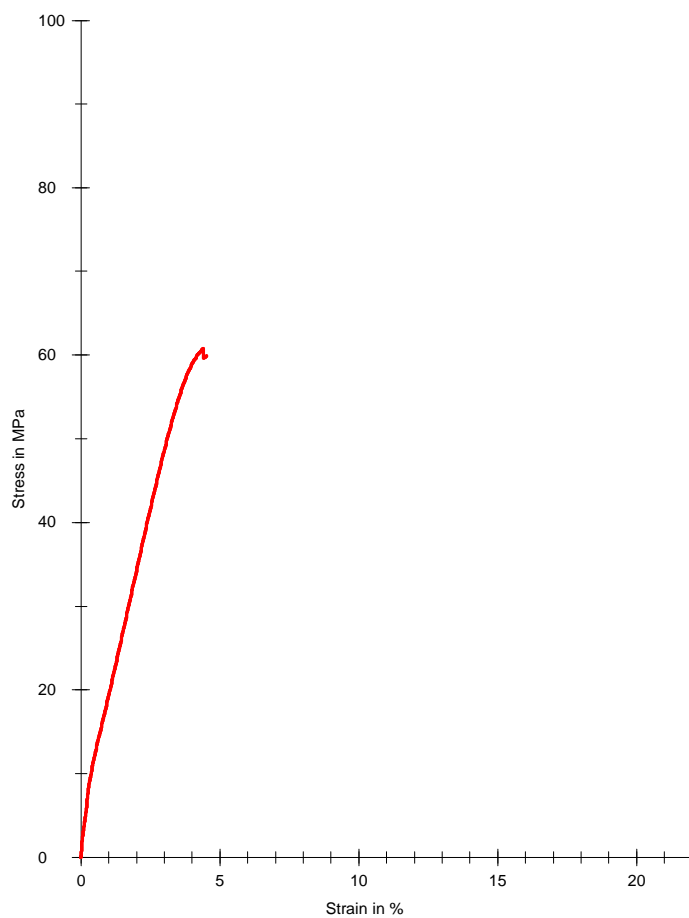


Obr. 60. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (80°C) – modul

PA6 (teplota okolí 23°C):

Tab. 16. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6 (23°C)

PA6	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,99	9,88	2783,42	60,93	0,90	4,49
s	0,01	0,01	32,66	1,41	0,01	0,10

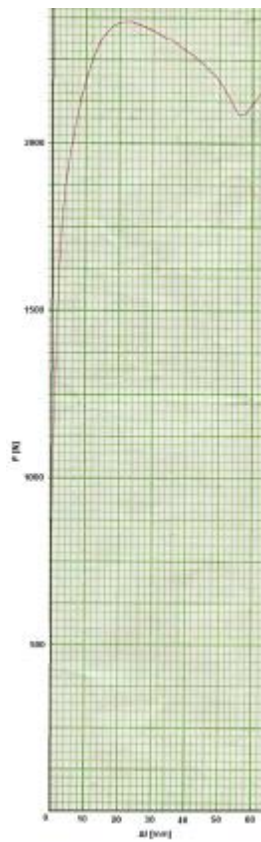


Obr. 61. Grafické zobrazení průměrných hodnot tahové zkoušky pro PA6 (23°C)

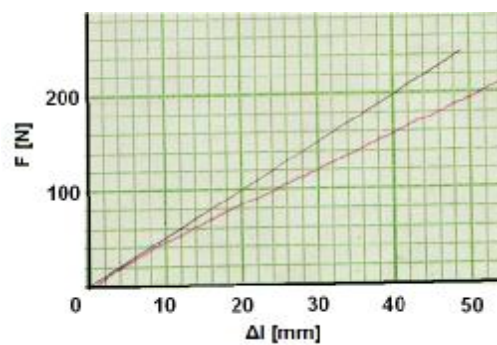
PA6 (40°C):

Tab. 17. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6 (40°C)

PA6	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	4,00	9,88	1270,00	58,75	21,50	21,50
s	0,02	0,01	28,28	0,42	0,71	0,71



Obr. 62. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 (40°C)

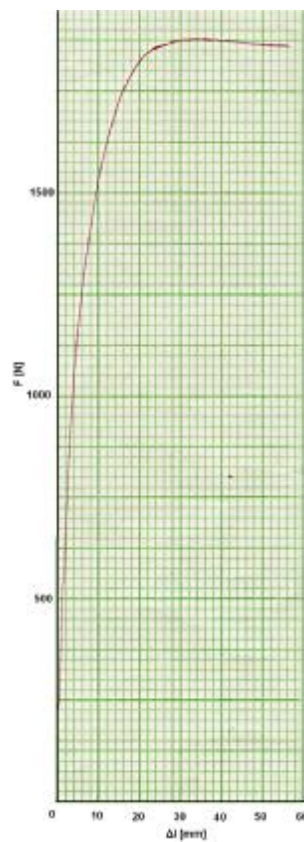


Obr. 63. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 (40°C) – modul

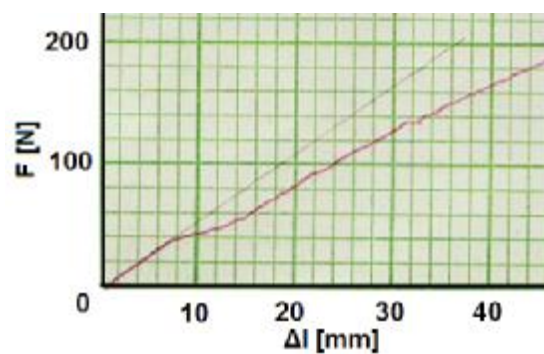
PA6 (60°C):

Tab. 18. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6 (60°C)

PA6	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,99	9,87	1109,00	45,32	32,00	32,00
s	0,03	0,01	94,75	2,21	2,83	2,83



Obr. 64. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 (60°C)

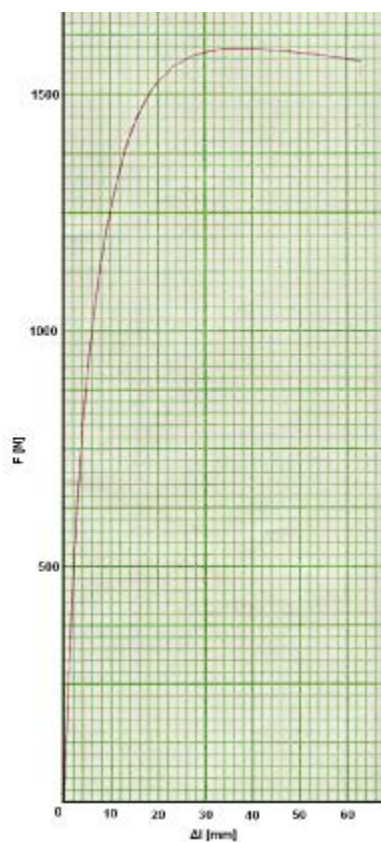


Obr. 65. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 (60°C) – modul

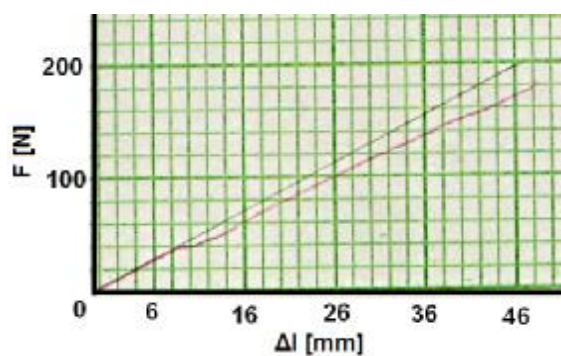
PA6 (80°C):

Tab. 19. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6 (80°C)

PA6	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	4,00	9,88	997,00	39,54	33,00	33,00
s	0,02	0,01	63,64	0,66	4,24	4,24



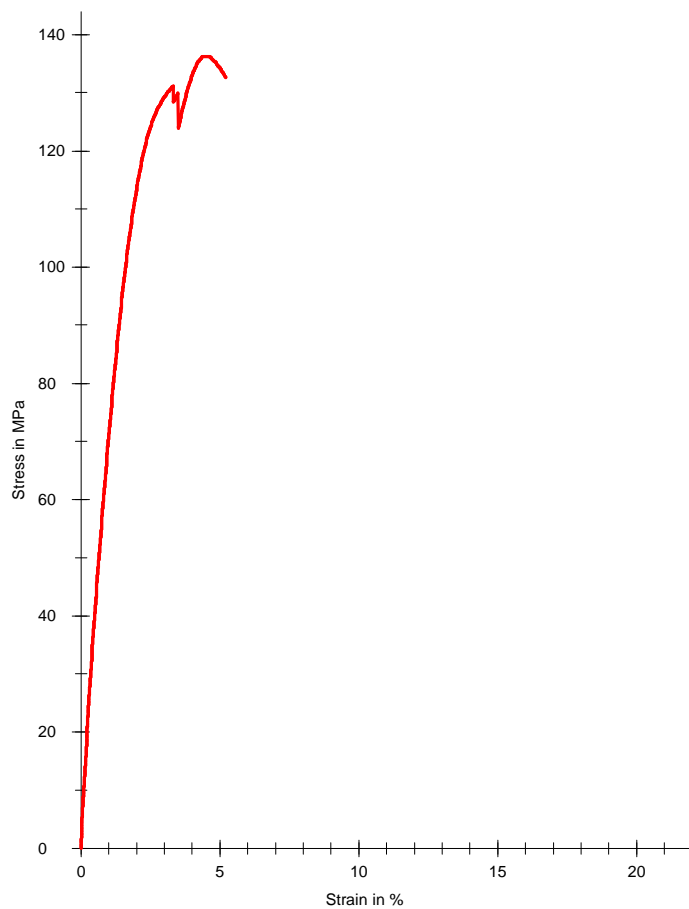
Obr. 66. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 (80°C)



Obr. 67. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 (80°C) – modul

PA6 + 30% GF (teplota okolí 23°C):*Tab. 20. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6 + 30% GF (23°C)*

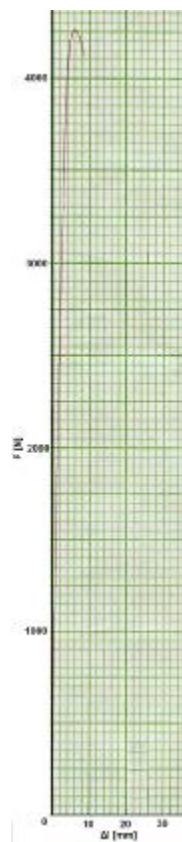
PA6+ 30 %	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,97	9,88	8434,37	137,40	0,73	3,64
s	0,01	0,01	88,81	1,58	0,25	1,24

*Obr. 68. Grafické zobrazení průměrných hodnot tahové zkoušky pro PA6 + 30%GF (23°C)*

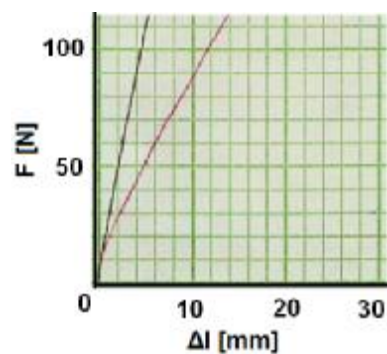
PA6 + 30% GF (40°C):

Tab. 21. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6 + 30% GF (40°C)

PA6+ 30 %	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,96	9,88	6031,50	106,44	5,50	5,50
s	0,01	0,01	309,01	0,27	0,71	0,71



Obr. 69. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 + 30 % GF (40°C)

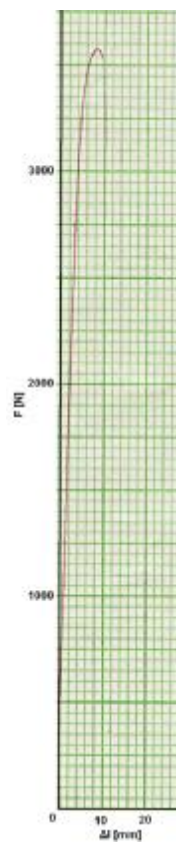


Obr. 70. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 + 30 % GF (40°C) – modul

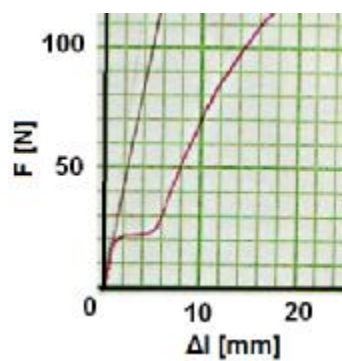
PA6 + 30% GF (60°C):

Tab. 22. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6 + 30 % GF (60°C)

PA6+ 30 %	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,97	9,87	5625,00	89,69	7,00	7,00
s	0,01	0,03	883,88	0,44	1,41	1,41



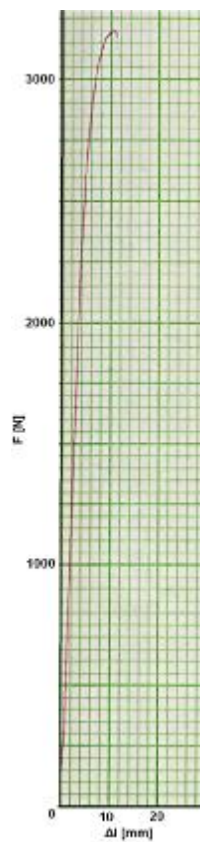
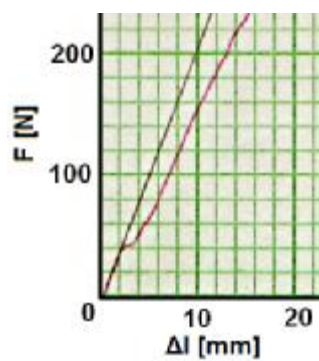
Obr. 71. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 + 30 % GF (60°C)



Obr. 72. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 + 30 % GF (60°C) – modul

PA6 + 30% GF (80°C):*Tab. 23. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6 + 30 % GF (80°C)*

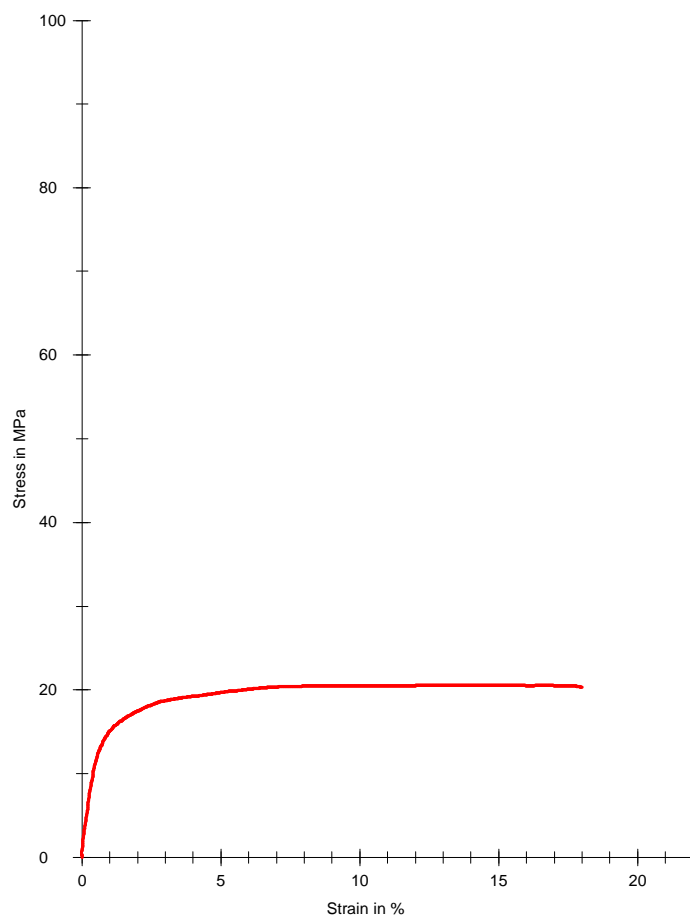
PA6+ 30 %	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,96	9,88	5277,50	81,00	10,50	10,50
s	0,02	0,01	392,44	1,41	0,71	0,71

*Obr. 73. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 + 30 % GF (80°C)**Obr. 74. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 + 30 % GF (80°C) – modul*

PS (teplota okolí 23°C):

Tab. 24. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PS (23°C)

PS	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,98	9,99	2375,39	20,61	3,11	15,52
s	0,01	0,01	91,99	0,09	0,32	1,63

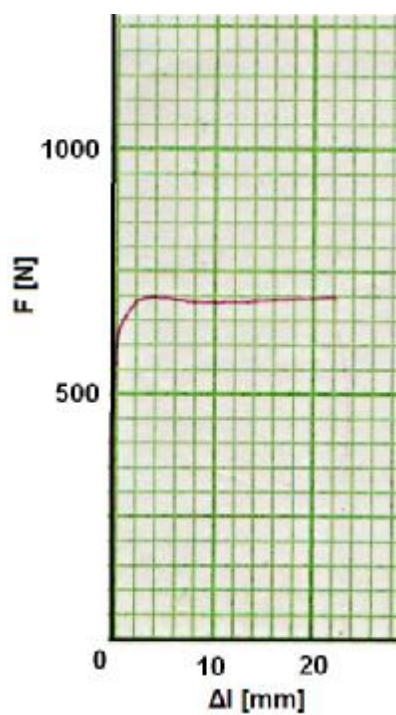


Obr. 75. Grafické zobrazení průměrných hodnot tahové zkoušky pro PS (23°C)

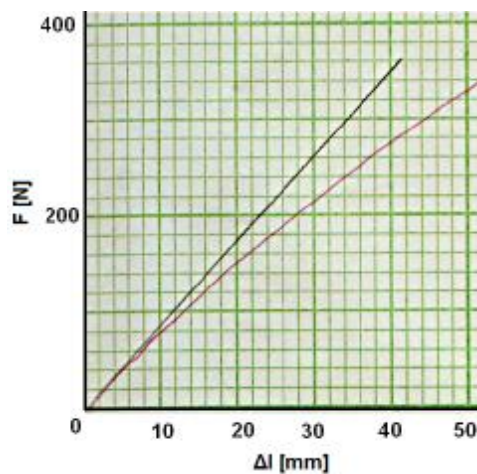
PS (40°C):

Tab. 25. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PS (40°C)

PS	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,97	9,97	2098,00	17,25	4,50	4,50
s	0,01	0,01	247,49	0,35	0,71	0,71



Obr. 76. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PS (40°C)

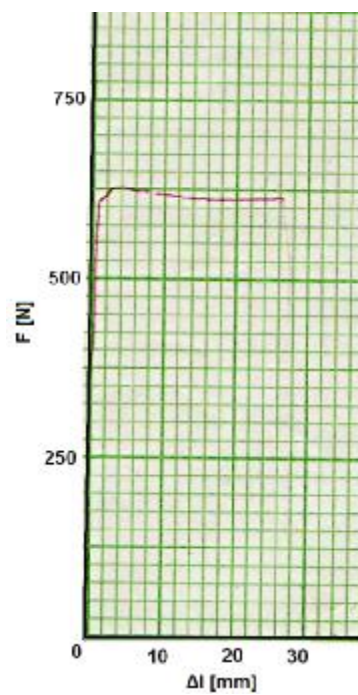


Obr. 77. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PS (40°C) – modul

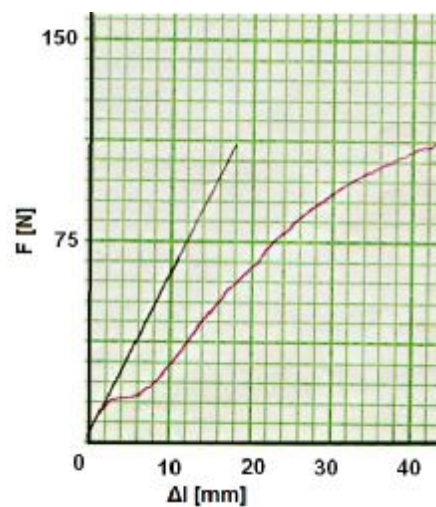
PS (60°C):

Tab. 26. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PS (60°C)

PS	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,99	9,98	1635,00	15,94	3,50	3,50
s	0,01	0,01	207,89	0,44	0,71	0,71



Obr. 78. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PS (60°C)

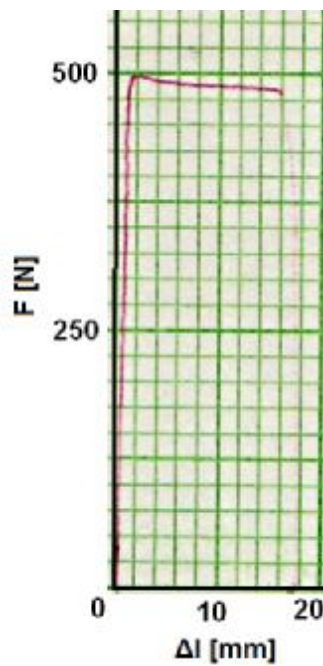


Obr. 79. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PS (60°C) – modul

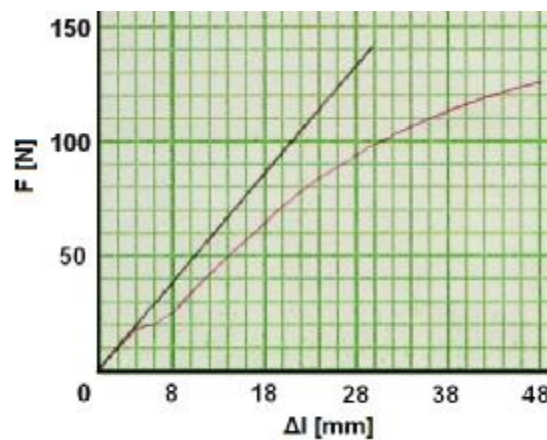
PS (80°C):

Tab. 27. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PS (80°C)

PS	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,97	9,97	1319,50	12,25	2,25	2,25
s	0,01	0,01	98,29	0,35	0,35	0,35



Obr. 80. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PS (80°C)

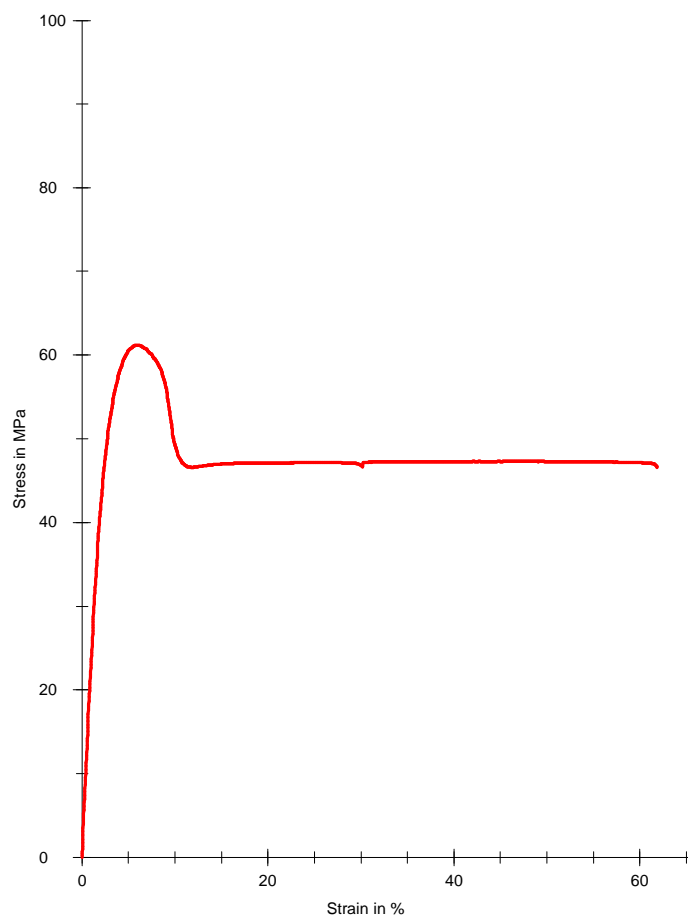


Obr. 81. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PS (80°C) – modul

PC (teplota okolí 23°C):

Tab. 28. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PC (23°C)

PC	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,98	9,96	2491,45	61,16	1,19	5,94
s	0,01	0,01	59,71	0,00	0,01	0,05

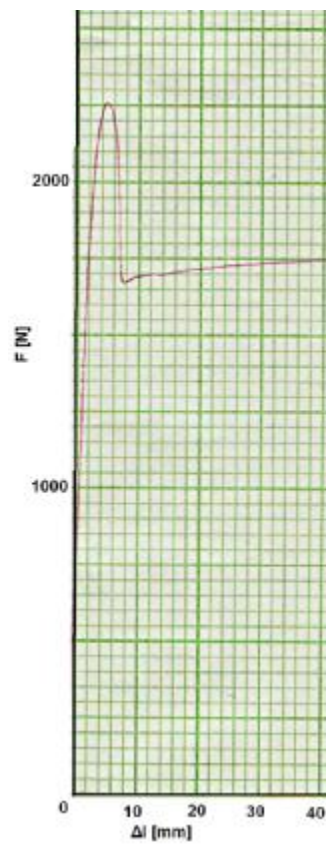


Obr. 82. Grafické zobrazení průměrných hodnot tahové zkoušky pro PC (23°C)

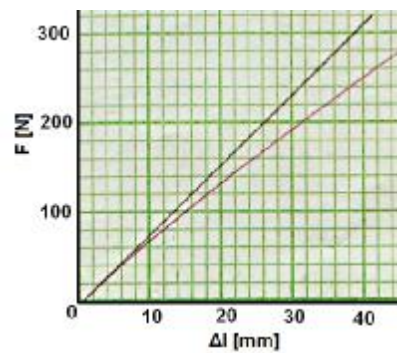
PC (40°C):

Tab. 29. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PC (40°C)

PC	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,98	9,95	1952,50	55,25	4,25	4,25
s	0,01	0,01	67,18	1,41	0,35	0,35



Obr. 83. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PC (40°C)

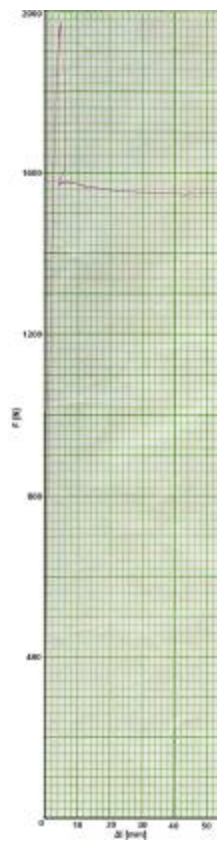


Obr. 84. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PC (40°C) – modul

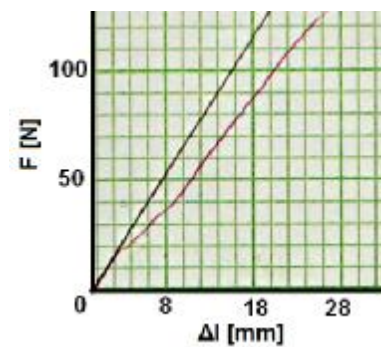
PC (60°C):

Tab. 30. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PC (60°C)

PC	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	Δl σ_P [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,96	9,94	1615,00	50,00	4,50	4,50
s	0,04	0,03	73,54	1,41	0,71	0,71



Obr. 85. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PC (60°C)

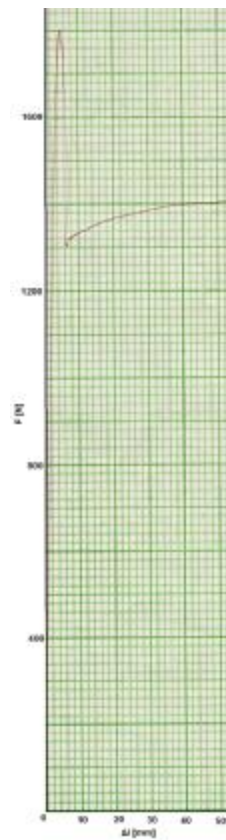


Obr. 86. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PC (60°C) – modul

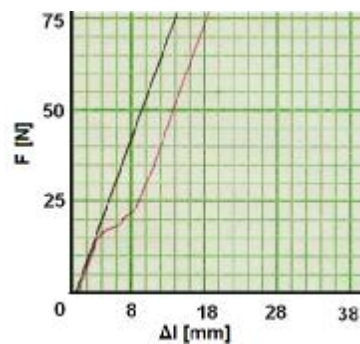
PC (80°C):

Tab. 31. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PC (80°C)

PC	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	σ_P [MPa]	$\Delta l \sigma_P$ [mm]	ε_Z [%]
\bar{x}	3,97	9,96	1319,50	43,50	4,50	4,50
s	0,01	0,01	98,29	2,12	0,71	0,71



Obr. 87. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PC (80°C)



Obr. 88. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PC (80°C) – modul

8.3 Výpočet efektivního modulu pružnosti vrstevnaté struktury pro PP+30% GF

Zkušební tělísko nelze vyrobit tak, aby vněm byly vlákna uspořádána jenom v podélném či příčném směru, proto také nelze z tahové zkoušky přímo naměřit modul pružnosti ve směru vláken E_L nebo napříč E_T . Proto bude použito zjednodušeného lineárně elastického modelu (s různou orientací vláken na povrchu a ve středu viz *obr. č.89*) pro výpočet efektivního modulu pružnosti zkušebního tělíska. Výsledné hodnoty modulu vypočítané z modelovaných výsledků pro E_L a E_T se pak srovnají s moduly naměřenými experimentálně na zkušebních tělískách. Zároveň budou tyto hodnoty porovnány s moduly vypočítanými pro hodnoty E_L a E_T určených z Halpin-Tsaiova vztahu (16):

$$\frac{N_c}{N_m} = \frac{1 + A \cdot B \cdot V_f}{1 - B \cdot V_f},$$

$$\text{kde: } B = \frac{\frac{N_f}{N_m} - 1}{\frac{N_f}{N_m} + A}$$

proměnná A nabývá hodnot v závislosti na tom, pro kterou konstantu je rovnice použita.

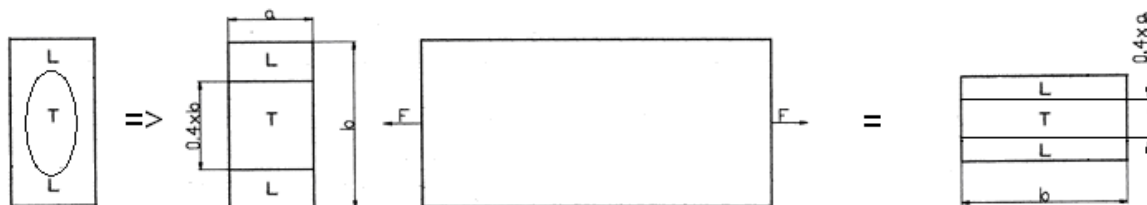
$$\begin{aligned} \text{Pro potřebu: } \quad E_L \quad A &= \frac{2 \cdot l}{d} \\ E_T \quad A &= 2 \\ G_{LT} \quad A &= 1 \\ \nu_{LT} \quad A &= \infty \end{aligned}$$

Protože při vstřikování dochází ke zkracování délky vláken, byla použita hodnota štíhlostního poměru $l/d = 100$. Pro výpočet objemové koncentrace vláken z hmotnostní koncentrace vláken jsme použili vztah:

$$V_f = \frac{M_f}{\frac{r_f}{r_m} - M_f \cdot \left(\frac{r_f}{r_m} - 1 \right)} \quad (37)$$

$$V_f = \frac{M_f}{\frac{r_f}{r_m} - M_f \cdot \left(\frac{r_f}{r_m} - 1 \right)} = \frac{0,3}{\frac{2,5}{0,9} - 0,3 \cdot \left(\frac{2,5}{0,9} - 1 \right)} = 0,134$$

Pro zjištění efektivního modulu pro tahovou zkoušku byl použit zjednodušený lineárně elastický model uvedený na obr. č.89. Tloušťka jednotlivých vrstev byla přibližně určena z reálného tělíska.



Obr. 89. Namodelovaná struktura pro výpočet tuhosti pro tah, kde L je podélný směr vláken a T příčný směr vláken

U takto sestaveného modelu je potřeba provést redukci šířek na nejvyšší modul a spočítat redukovanou plochu S_r . V tomto případě jde o redukci na modul E_L .

$$S_R = 0,6 \cdot b \cdot a + 0,4 \cdot b \cdot \frac{E_T}{E_L} \cdot a \quad (38)$$

Pak efektivní modul takovéto struktury je:

$$E_{2/1} = \frac{E_L \cdot S_r}{S} \quad (39)$$

Příklad výpočtu pro teplotu okolí 23°C:

$$\frac{E_L}{E_m} = \frac{1 + A \cdot B \cdot V_f}{1 - B \cdot V_f} \Rightarrow E_L = \frac{1 + A \cdot B \cdot V_f}{1 - B \cdot V_f} \cdot E_m = \frac{1 + 200 \cdot 0,206473 \cdot 0,134}{1 - 0,206473 \cdot 0,134} \cdot 1407,14 = 9455,13 \text{ MPa}$$

$$B = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + A} = \frac{\frac{75000}{1407,14} - 1}{\frac{75000}{1407,14} + 200} = 0,206473 \quad A = \frac{2 \cdot l}{d} = 2 \cdot 100 = 200$$

$$\frac{E_T}{E_m} = \frac{1 + A \cdot B \cdot V_f}{1 - B \cdot V_f} \Rightarrow E_T = \frac{1 + A \cdot B \cdot V_f}{1 - B \cdot V_f} \cdot E_m = \frac{1 + 2 \cdot 0,945750 \cdot 0,134}{1 - 0,945750 \cdot 0,134} \cdot 1407,14 = 2019,76 \text{ MPa}$$

$$B = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + A} = \frac{\frac{75000}{1407,14} - 1}{\frac{75000}{1407,14} + 2} = 0,945750 \quad A = 2$$

$$S_R = 0,6 \cdot b \cdot a + 0,4 \cdot b \cdot \frac{E_T}{E_L} \cdot a = 0,6 \cdot 10 \cdot 4 + 0,4 \cdot 10 \cdot \frac{2019,76}{9455,13} \cdot 4 = 27,42 \text{ mm}^2$$

$$\underline{E_{2/1}} = \frac{E_L \cdot S_R}{S} = \frac{E_L \cdot S_R}{a \cdot b} = \frac{9455,13 \cdot 27,42}{4 \cdot 10} = \underline{6480,98 \text{ MPa}}$$

Tab. 32. Vypočítané a experimentálně naměřené charakteristiky krátkovláknových struktur pro PP+ 30% skleněných vláken

Teplota	Experiment	Model Halpin - Tsai			Strukturní model*			
		E _L	E _T	E _{2/1}	E _L	E _T	E _{2/1}	E _N
[°C]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
23	6439,50	9455,13	2019,76	6480,98	9287,12	2181,07	6444,70	4080,71
40	4356,00	8853,3	1628,15	5963,24	7458,00	1751,50	5175,4	3277
60	3112,50	8332,91	1350,13	5539,80	6167,70	1448,48	4280,01	2710,05
80	2386,00	6833,17	793,9	4417,46	3606,90	847,08	2502,97	1584,85

*) hodnoty určené z modelů pro krátkovláknovou usměrněnou a neusměrněnou strukturu [25] byly přepočítány pro modul pružnosti použité matrice.

Grafické srovnání vypočtených a experimentálně zjištěných hodnot modulů pro dané teploty viz diskuse výsledků (kapitola 8.7).

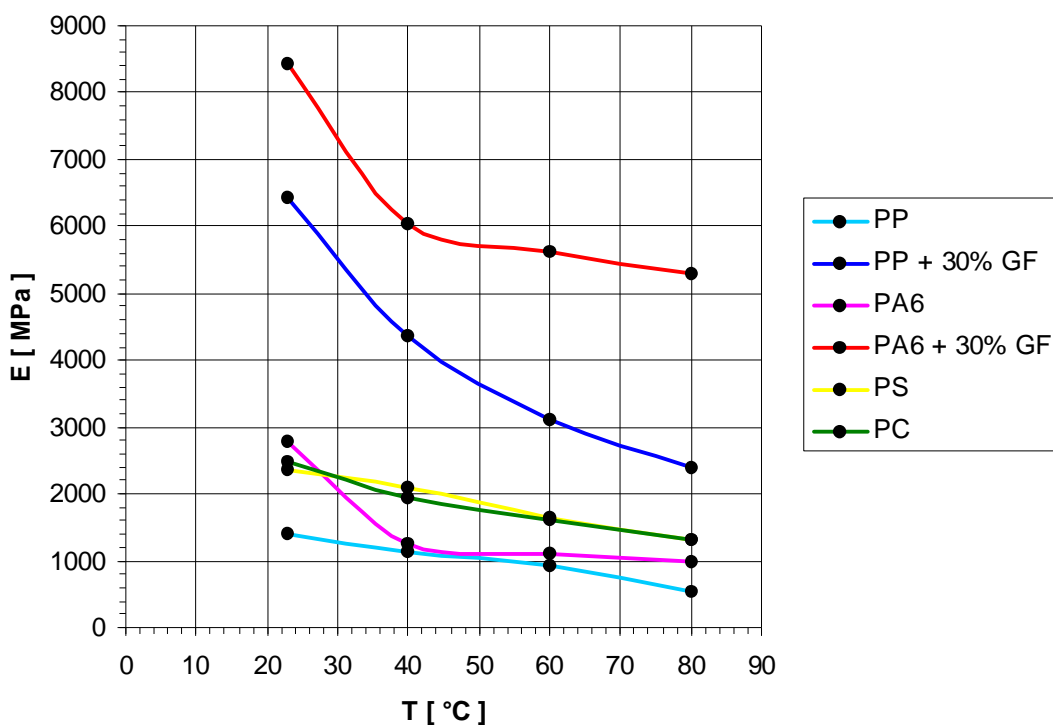
DISKUSE VÝSLEDKŮ

8.4 Přehled výsledků modulu pružnosti v tahu v závislosti na teplotě

Tab. 33. Hodnoty modulu pružnosti v tahu materiálů pro dané teploty

T [°C]	PP (E [MPa])	PP+30% GF (E [MPa])	PA6 (E [MPa])	PA6+30% GF (E [MPa])	PS (E [MPa])	PC (E [MPa])
23	1407,14	6439,50	2783,42	8434,37	2375,39	2491,45
40	1130,00	4356,00	1270,00	6031,50	2098,00	1952,50
60	934,50	3112,50	1109,00	5625,00	1635,00	1615,00
80	546,50	2386,00	997,00	5277,50	1319,50	1319,50

Závislost modulu pružnosti na teplotě zkoušených materiálů



Obr. 90. Graf závislosti modulu pružnosti na teplotě

Z naměřených hodnot (tab. č.33) a grafu (obr. č.90) vyplývá, že za zvýšených teplot dochází ke snižování modulu pružnosti v tahu. U PP, PP+30%GF a PA6 se jedná přibližně o 60% pokles z teploty okolí na teplotu 80°C, u PA6+30%, PS a PC pak přibližně 40%

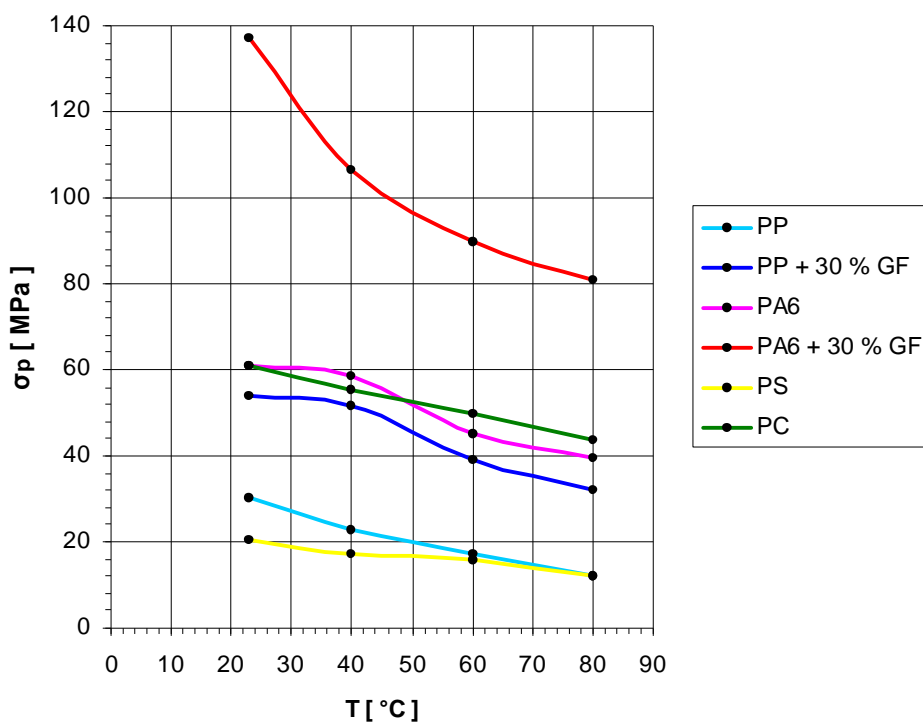
pokles. V rozmezí teplot 23°C až 40°C nám nejvýrazněji klesá modul pružnosti v tahu u materiálů PA6, PA6+30%GF a PP+30%GF. U plněného materiálu by to mohlo být způsobeno výchylkou soudržnosti vláken s matricí při přechodu na vyšší teplotu než je teplota okolí. Naopak plněný a neplněný PA6 nám od teploty 40°C do teploty 80°C vykazuje nejmenší pokles hodnot modulu pružnosti.

8.5 Přehled výsledků meze pevnosti v tahu v závislosti na teplotě

Tab. 34. Hodnoty meze pevnosti v tahu materiálů pro dané teploty

T [°C]	PP (σ [MPa])	PP+30% GF (σ [MPa])	PA6 (σ [MPa])	PA6+30% GF (σ [MPa])	PS (σ [MPa])	PC (σ [MPa])
23	30,46	53,83	60,93	137,40	20,61	61,16
40	22,96	51,57	58,75	106,44	17,25	55,25
60	17,01	39,21	45,32	89,69	15,94	50,00
80	12,07	32,04	39,54	81,00	12,25	43,50

Závislost meze pevnosti na teplotě



Obr. 91. Graf závislosti meze pevnosti na teplotě

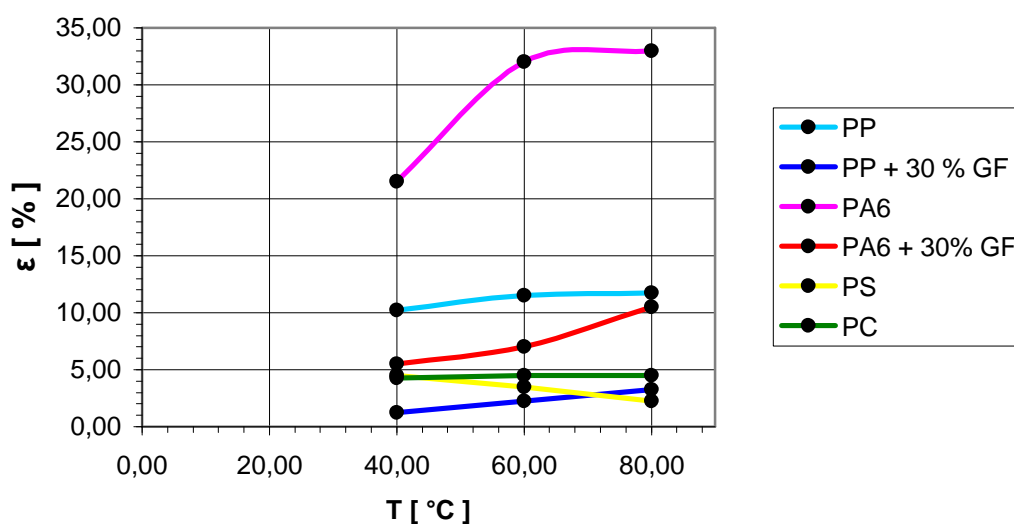
Z naměřených hodnot (tab. č.34) a grafu (obr. č.91) vyplývá, že za zvýšených teplot dochází ke snižování meze pevnosti v tahu. U PP+30% GF, PA6, PA6+30% GF a PS se jedná přibližně o 40% pokles z teploty okolí na teplotu 80°C, PC zaznamenal 30% pokles a u PP se jedná až o 60% na ztrátě pevnosti.

8.6 Přehled výsledků poměrného prodloužení v závislosti na teplotě

Tab. 35. Hodnoty poměrného prodloužení materiálů pro dané teploty

T [°C]	PP (ε [%])	PP+30% GF (ε [%])	PA6 (ε [%])	PA6+30% GF (ε [%])	PS (ε [%])	PC (ε [%])
40	10,25	1,25	21,50	5,50	4,50	4,25
60	11,50	2,25	32,00	7,00	3,50	4,50
80	11,75	3,25	33,00	10,50	2,25	4,50

Závislost poměrného prodloužení na teplotě

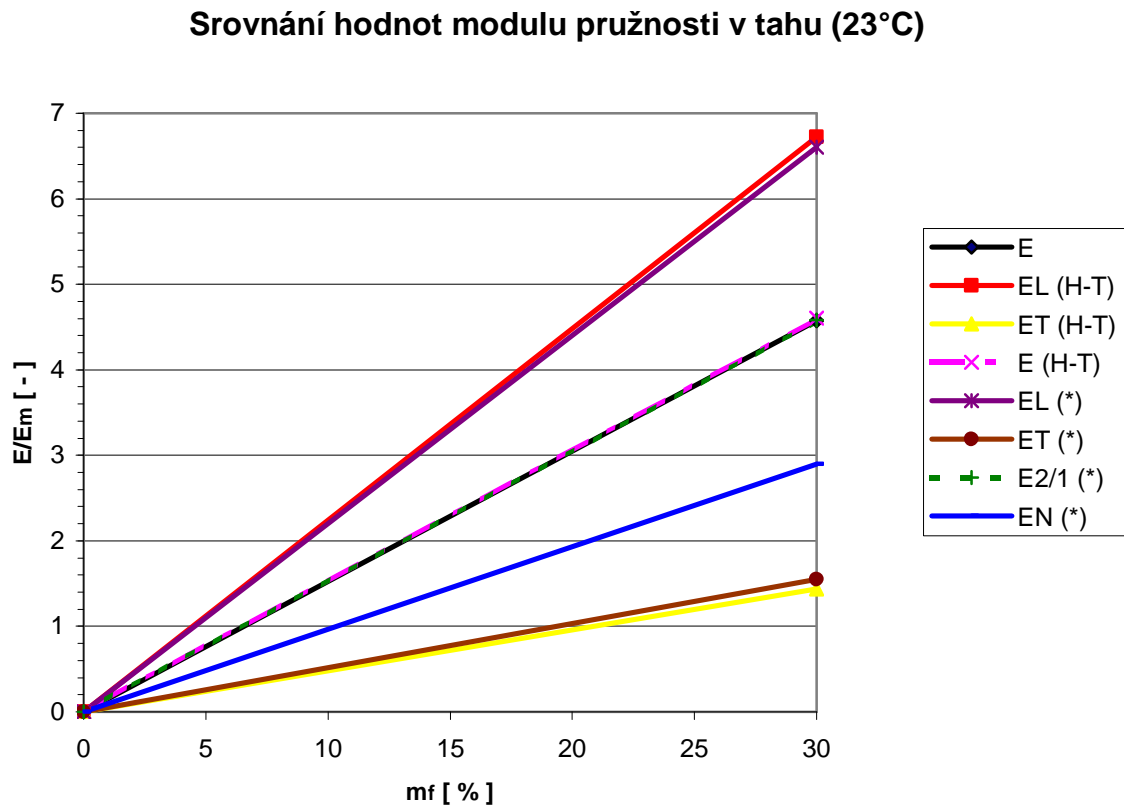


Obr. 92. Graf závislosti poměrného prodloužení na teplotě

Z naměřených hodnot (tab. č.34) a grafu (obr. č.92) vyplývá, že za zvýšených teplot dochází ke zvyšování poměrného prodloužení. Pouze u PS hodnoty poměrného prodloužení klesají. Pro dostatečné posouzení, zdali se nejedná pouze o výchylku, by bylo třeba znát hodnoty poměrného prodloužení ve větším rozsahu teplot.

8.7 Grafické porovnání s modelem pro krátkovláknový kompozitní materiál PP+30% GF

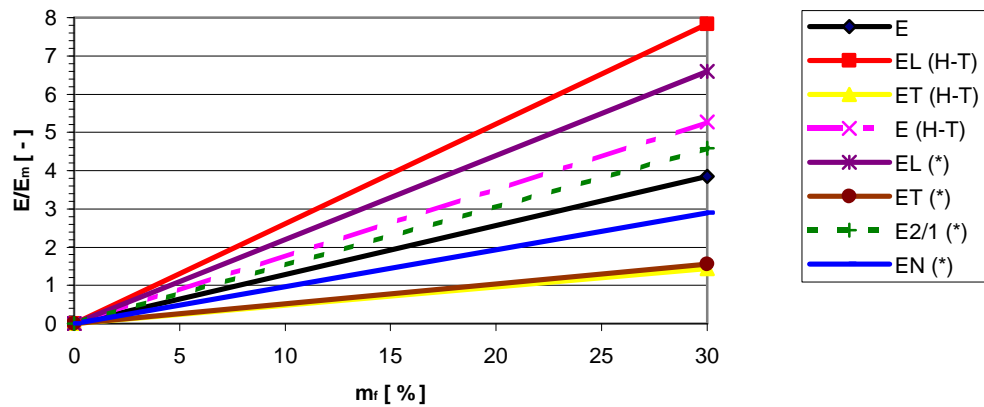
Pro přehlednost výsledků byly vypočtené hodnoty modulů vrstevnaté struktury srovnány s experimentálně získanými daty.



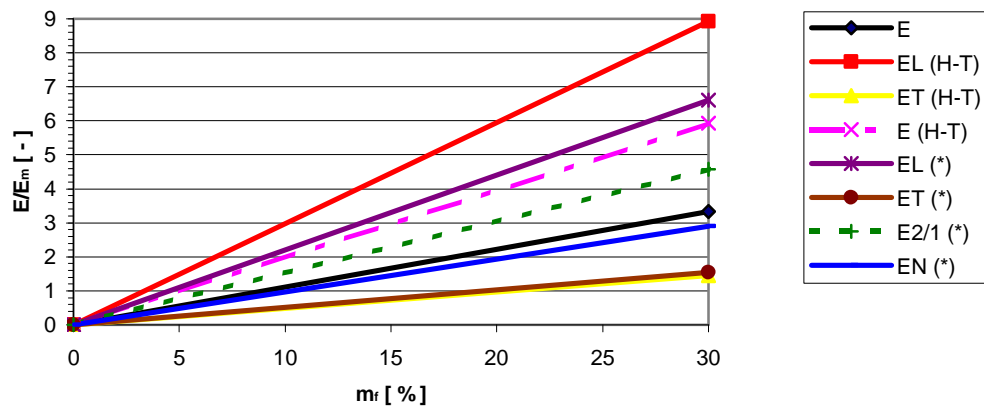
Obr. 93. Srovnávací graf modulů pružnosti pro teplotu 23°C

E	experimentálně naměřený modul
E_L (H-T)	modul v longitudinálním směru vypočtený z modelu Halpin - Tsai
E_T (H-T)	modul v transversálním směru vypočtený z modelu Halpin - Tsai
E (H-T)	modul vypočtený z modelu Halpin - Tsai
E_L (*)	modul v longitudinálním směru přepočtený ze strukturního modelu
E_T (*)	modul v transversálním směru přepočtený ze strukturního modelu
$E_{2/1}$ (*)	modul přepočtený ze strukturního modelu
E_N (*)	modul neusměrněné struktury

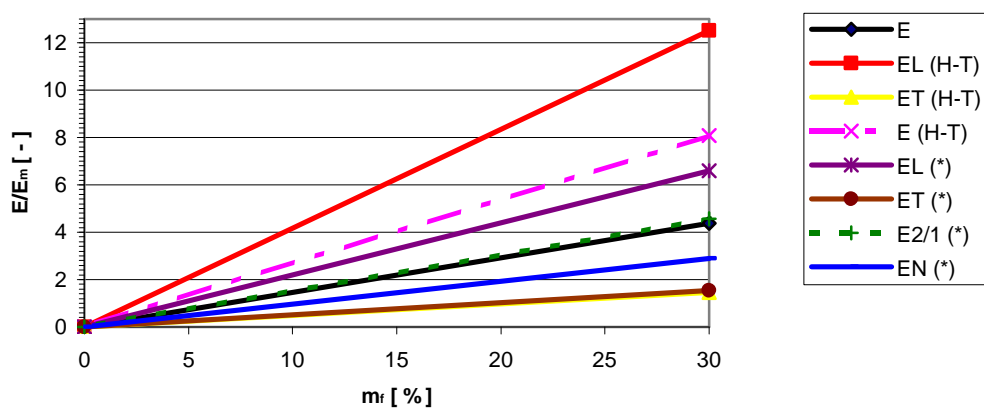
Srovnání hodnot modulu pružnosti v tahu (40°C)



Srovnání hodnot modulu pružnosti v tahu (60°C)



Srovnání hodnot modulu pružnosti v tahu (80°C)



Obr. 94. Srovnávací grafy modulů pružnosti pro teploty 40°C, 60°C, 80 °C

Jak je z výsledků (*tab. č.32*) a grafických srovnání (*obr. č.94*) patrné, pro teplotu okolí (23°C), modul pružnosti v tahu namodelované struktury se téměř shoduje s modulem zjištěným z experimentálního měření. Odpovídá také výsledkům E_L a E_T pro Halpin-Tsaiův vztah. To potvrzuje jednak správnost použitých mikromechanických strukturních modelů pro výpočet elastických a termoelastických konstant, tak i orientaci vláken do podélného a příčného směru při vstřikování tenkostěnného produktu, tak jak bylo navrženo na *obr. č.89*.

Při zvyšujících se teplotách zaznamenáváme též určitou shodu při porovnání experimentálně naměřených hodnot se strukturním modelem, ovšem Halpin - Tsaiův model se zvyšující se teplotou zaznamenává větší odchylku, zejména při modulu v longitudinálním směru E_L .

Je zřejmé, že sestavený strukturní model a vypočtené hodnoty efektivních modulů je třeba brát jako určité hranice, ve kterých se budou pohybovat hodnoty skutečných struktur.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá studiem vlivu teploty na mechanické chování polymerních a kompozitních materiálů.

V teoretické části jsme se nejprve zabývali popisem, charakterizací a rozdělením polymerních a kompozitních materiálů. V návaznosti na kompozity bylo provedeno studium problematiky modelování elastických a termomechanických konstant krátkovláknových kompozitních materiálů v rovině mikromechanické a také na to navazující makromechanické. V souladu s tím se studium také zabývá mikro a makrostrukturou kompozitních struktur, která je ovlivněna především typem technologického zpracování, a to vstřikováním. Dále jsme se v teoretické části zabývali popisem mechanických vlastností polymerních materiálů, jejich zkoušení a tepelnými vlastnostmi.

V praktické části diplomové práce byly uvedeny popisy a technické parametry použitých materiálů a zařízení. Technologií vstřikování jsme zhotovili zkušební tělíska ze čtyř materiálů polymerních a dvou materiálů kompozitních s krátkovláknovou strukturou. Dále byla provedena tahová zkouška pro čtyři stoupající hodnoty teplot a jejich vyhodnocení v závislosti na teplotě. Pro krátkovláknový materiál jsme vypočetli efektivní moduly pružnosti v tahu pomocí zjednodušených modelů vrstevnatých struktur a výsledky porovnali s hodnotami zjištěnými experimentálně.

Byla dokázána oprávněnost strukturálních modelů pro modelování elastických konstant krátkovláknových kompozitních materiálů v případě modulu pružnosti v tahu ve směru vláken a napříč u reálně vyrobeného tělíska pomocí technologie vstřikování. Byla také ověřena tvorba třívrstvé struktury po tloušťce stěny vstřikovaných výrobků a potvrzeno, že anizotropie mechanických vlastností vznikající orientací krátkých vláken v proudu taveniny vstřikovaných výrobků může mít značný vliv na výsledné - makroskopické mechanické chování.

Dále bylo ukázáno jak značný vliv má teplota na mechanické vlastnosti polymerních a kompozitních materiálů z hlediska tuhosti a pevnosti. Proto je třeba dbát na výběr a použitelnost, zejména jako konstrukčních materiálů, při provozech za zvýšených teplot.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LUKOVICS, Imrich. *Konstrukční materiály a technologie*. VUT Brno, 1992.
- [2] *Fyzikální základy vědy o materiálu* [online]. [cit. 2006-01-10]. Dostupný z WWW: [<http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/FMkomplet3.htm/>](http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/FMkomplet3.htm/).
- [3] RAAB, Miroslav. *Materiály a člověk*. Encyklopedický dům Praha, 1999.
- [4] BAREŠ, A. Richard. *Kompozitní materiály*. SNTL Praha, 1988.
- [5] *Mechanické vlastnosti polymerů* [online]. [cit. 2006-01-10]. Dostupný z WWW: [<http://www.beltplast.cz/>](http://www.beltplast.cz/).
- [6] JARUŠEK, Jaroslav. *Metody zkoumání polymerů*. VŠCHT Pardubice, 1984.
- [7] Technická norma: ČSN EN ISO 527-1 (64 0604)
- [8] Technická norma: ČSN EN ISO 178 (64 0607)
- [9] HAGEN, Vladisav. *Únava a stárnutí materiálu*. VUT Brno, 1977.
- [10] ZÁMORSKÝ, Zdeněk. *Nauka o polymerech II*. VUT Brno, 1980.
- [11] AGARWAL, Bhagwan. *Vláknové kompozity*. SNTL Praha, 1987.
- [12] ŠUBA, Oldřich. *Mechanické chování těles*. UTB Zlín, 2002. ISBN 80-7318-101-0
- [13] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z plastů*. UTB Zlín, 2005. ISBN 80-7318-287-4
- [14] ŠUBA, Oldřich. – ŽALUDEK, Milan. *Modelování elastického chování polymerů vyztužených krátkými vlákny*.
- [15] ŽALUDEK, Milan. – ŠUBA, Oldřich. *Modelování termomechanických vlastností polymerů vyztužených krátkými vlákny*.
- [16] SOVA, Miloš. – KREBS, Josef. a kolektiv. *Termoplasty v praxi. Svazek 2*, Praha 2001.
- [17] ŠUBA, Oldřich. - ŽALUDEK, Milan. - KOUDELKOVÁ, Zuzana. *Modelling of effective Young's modulus of short-fibre reinforced injection moulded polymers parts*. In: Proc. of Reinforced plastics 2004, Balatonvilágos, May 25-27, 2004.

- [18] RYBNIKÁŘ, František. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. SNTL Praha, 1965.
- [19] MEISSNER, Bohumil. *Fyzika polymerů : struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. SNTL Praha, 1987.
- [20] SCHÄTZ, Miroslav. *Zkoušení polymerů*. VŠCHT Praha, 1988.
- [21] HUGO, Jiří. *Konstrukční plastické hmoty, jejich vlastnosti a využití ve strojírenství*. SNTL Praha, 1965.
- [22] ŠVEC, Petr. *Polystyren a jeho modifikace* SNTL Praha, 1985.
- [23] *Zwick Information* [online]. [cit. 2005-01-15]. Dostupný z WWW:
<<http://www.zwick.com/>>.
- [24] MLÁDEK, Milan. *Nauka o materiálech*. UTB Zlín, 2001.
- [25] KOVÁŘOVÁ, Miroslava. *Modelování elastických vlastností polymerů vyztužených krátkými vlákny* [disertační práce], VUT Brno, FT Zlín, 1998.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

f	index vlákna	
m	index matrice	
L	index podélný směr	
T	index příčný směr	
x, y, z	index globální lokální systém	
π	Ludolfovo číslo	[-]
r	poloměr vlákna	[mm]
σ_f	napětí vlákna v osovém směru	[N/mm ²]
τ	smykové napětí na rozhraní válcové vlákno – matrice	[N/mm ²]
σ_{f0}	napětí na konci vlákna	[N/mm ²]
τ_y	napětí na mezi kluzu ve smyku	[N/mm ²]
σ_{fmax}	maximální hodnota efektivního napětí	[N/mm ²]
l	délka vlákna	[mm]
ε_c	efektivní deformace	[%]
ε_f	deformace vláken	[%]
ε_m	deformace matrice	[%]
l_t	přenosová délka vlákna	[mm]
E_c	efektivní modul pružnosti	[N/mm ²]
E_f	modul pružnosti vláken	[N/mm ²]
E_m	modul pružnosti matrice	[N/mm ²]
E_N	modul neusměrněné struktury	[N/mm ²]
$E_{2/1}$	modul vypočtený ze strukturního modelu	[N/mm ²]
d	průměr vlákna	[mm]
σ_c	zatěžovací napětí kompozitu	[N/mm ²]

l_c	kritická délka vlákna	[mm]
σ_m	napětí v matrici	[N/mm ²]
σ_{pc}	pevnost kompozitu	[N/mm ²]
σ_{pf}	pevnost vláken	[N/mm ²]
σ_{pm}	pevnost matrice	[N/mm ²]
σ_{stf}	střední osově napětí krátkého vlákna	[N/mm ²]
l_c/d	kritická štíhlost vlákna	[-]
V_f	objemový podíl vláken	[%]
V_m	objemový podíl matrice	[%]
N_C	elastická konstanta kompozitu	[-]
N_f	elastická konstanta vláken	[-]
N_m	elastická konstanta matrice	[-]
α	efektivní koeficient teplotní roztažnosti	[K ⁻¹]
$[\alpha]$	matice koeficientů teplotní roztažnosti	[-]
$[C]$	matice poddajnosti	[-]
σ	napětí	[N/mm ²]
σ_p	mez pevnosti materiálu	[N/mm ²]
F	zatěžující síla	[N]
S	průřez zkušebního vzorku	[mm ²]
a	tloušťka vzorku	[mm]
b	šířka vzorku	[mm]
S_0	původní průřez zkušebního vzorku	[mm ²]
ΔS	skutečné zvětšení průřezu	[mm ²]
S_R	redukovaná plocha	[mm ²]
ε	poměrné prodloužení	[-]

ε_z	poměrná deformace při maximálním napětí	[%]
Δl	skutečné prodloužení	[mm]
Δl_{σ_p}	protažení při maximálním napětí	[mm]
l_0	původní délka vzorku	[mm]
l	délka vzorku	[mm]
ν	Poissonovo číslo	[-]
K	součinitel úměrnosti	[1/N/mm ²]
E	modul pružnosti v tahu	[N/mm ²]
S_x	smluvní mez kluzu	[N/mm ²]
S	mez kluzu	[N/mm ²]
F_s	síla odpovídající mezi kluzu	[N]
F_{sx}	síla odpovídající smluvní mezi kluzu	[N]
F_{max}	maximální zatěžující síla	[N]
F_r	síla kdy dojde k přetržení vzorku	[N]
ε_r	poměrné prodloužení při přetržení	[%]
R_1	poloměr trnu	[mm]
R_2	poloměr podpěr	[mm]
l	délka zkušebního tělesa	[mm]
b	šířka zkušebního tělesa	[mm]
h	tloušťka zkušebního tělesa	[mm]
L	rozpětí podpěr	[mm]
s_i	jednotlivá hodnota průhybu	[mm]
ε_{fi}	odpovídající deformace ohybem	[-]
σ_{f1}	napětí v ohybu, stanovené pro průhyb s_1	[N/mm ²]
σ_{f2}	napětí v ohybu, stanovené pro průhyb s_2	[N/mm ²]

T	teplota	[°C]
T _g	teplota skelného přechodu polymerního materiálu	[°C]
T _m	teplota tání polymerního materiálu	[°C]
T _f	teplota toku	[°C]
ČSN	česká technická norma	
PVC	polyvinylchlorid	
PP	polypropylen	
PE	polyetylen	
PA	polyamid	
PS	polystyren	
PC	polykarbonát	

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Rozdělení polymerů</i>	10
<i>Obr. 2. Struktura polymerů</i>	12
<i>Obr. 3. Struktura kopolymerů</i>	13
<i>Obr. 4. Semikrystalický polymer</i>	13
<i>Obr. 5. Sfěrolit</i>	14
<i>Obr. 6. Různé koncentrační distribuce</i>	17
<i>Obr. 7. Některá možná uspořádání částic</i>	18
<i>Obr. 8. Rovnováha na elementu diskontinuálního vlákna uloženého</i>	19
<i>Obr. 9. Typický průběh normálového napětí S_f a smykového napětí t po délce vlákna</i>	20
<i>Obr. 10. Idealizovaná křivka smykového napětí – smyková deformace pro matrici</i>	20
<i>Obr. 11. Průběhy napětí vlákna a smykového napětí na rozhraní pro různé délky vlákna</i>	21
<i>Obr. 12. Průběhy napětí vlákna a smykového napětí na rozhraní podél vlákna (pružně plastické chování)</i>	23
<i>Obr. 13. Laminátový model krátkovláknové plošné struktury</i>	24
<i>Obr. 14. Fontánový tok při plnění dutiny formy</i>	26
<i>Obr. 15. Orientace vláken ve stěně</i>	27
<i>Obr. 16. Polyamid 66 vyztužený krátkými skleněnými vlákny</i>	27
<i>Obr. 17. Závislosti efektivních elastických konstant na objemové koncentraci a štíhlostním poměru vláken</i>	29
<i>Obr. 18. Závislost modulu pružnosti a Poissonova čísla plošné struktury s neusměrněnými krátkými vlákny na obj. koncentraci a štíhlostním poměru vláken</i>	30
<i>Obr. 19. Srovnání závislosti modelovaných výsledků pro modul pružnosti v tahu</i>	31
<i>Obr. 20. Tvary zkušebních tělísek pro zkoušky tahem</i>	34
<i>Obr. 21. Obecná křivka „síla – prodloužení“</i>	38
<i>Obr. 22. Charakteristické křivky různých materiálů</i>	40
<i>Obr. 23. Závislost síly na rychlosti deformace u polypropylenu</i>	41
<i>Obr. 24. Tahové křivky polyamidu s různou vlhkostí</i>	42
<i>Obr. 25. Závislost „napětí – poměrné prodloužení“ ,počáteční oblast</i>	43

<i>Obr. 26. Schéma tříbodového zatěžování se znázorněním rozložení ohybového momentu.</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 27. Schéma čtyřbodového zatěžování se znázorněním rozložení ohybového momentu.</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 28. Efekt koncentrace napětí u vzorků rozlišné tloušťky (a: tenký vzorek, b: tlustý vzorek).....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 29. Závislost mechanických vlastností termoplastů na teplotě.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 30. Závislost mechanických vlastností elastomerů na teplotě.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 31. Závislost mechanických vlastností reaktoplastů na teplotě.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 32. Teplotní závislost mechanických vlastností polymerů.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 33. Schematické znázornění změn účinkem tahového zatížení.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 34. Teplotní závislost měrného objemu polymerů a teplota skelného přechodu.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 35. Změna limitního viskozitního čísla a síly potřebné k přetržení vzorku v závislosti na době stárnutí.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 36. Pokles tažnosti o 35% v závislosti na čase a teplotě.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 37. Schématické průběhy závislosti modulu pružnosti polymerů na teplotě.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 38. Závislosti krátkodobé meze pevnosti na teplotě.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 39. Závislost modulu pružnosti a Poissonova čísla na teplotě.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 40. Průběh tahových křivek houževnatého polystyrenu při různých teplotách.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 41. Zkušební stroj Zwick 145 665.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 42. Teplotní komora Zwick W91255.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 43. Vstřikovací stroj ARBURG 420 C Allrounder Advanced.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 44. Uspořádání dutiny formy: lopatka + obdélníková tyčinka.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 45. Zkušební vzorky (zleva: PP, PP+30%GF, PA6, PA6+30%GF, PS, PC).....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 46. Univerzální trhací stroj Instron 1122 s teplotní komorou.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 47. Grafické zobrazení průměrných hodnot tahové zkoušky pro PP (23°C).....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 48. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP (40°C).....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 49. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP (40°C) – modul.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 50. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP (60°C).....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 51. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP (60°C) – modul.....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 52. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP (80°C).....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 53. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP (80°C) – modul.....</i>	<i>75</i>

<i>Obr. 54. Grafické zobrazení průměrných hodnot tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (23°C).....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 55. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (40°C).....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 56. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (40°C) – modul</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 57. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (60°C).....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 58. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (60°C) – modul</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 59. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (80°C).....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 60. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (80°C) – modul</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 61. Grafické zobrazení průměrných hodnot tahové zkoušky pro PA6 (23°C).....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 62. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 (40°C).....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 63. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 (40°C) – modul</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 64. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 (60°C).....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 65. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 (60°C) – modul</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 66. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 (80°C).....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 67. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 (80°C) – modul</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 68. Grafické zobrazení průměrných hodnot tahové zkoušky pro PA6 + 30%GF (23°C).....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 69. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 + 30 % GF (40°C).....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 70. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 + 30 % GF (40°C) – modul</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 71. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 + 30 % GF (60°C).....</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 72. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 + 30 % GF (60°C) – modul</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 73. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 + 30 % GF (80°C).....</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 74. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PA6 + 30 % GF (80°C) – modul</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 75. Grafické zobrazení průměrných hodnot tahové zkoušky pro PS (23°C).....</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 76. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PS (40°C).....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 77. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PS (40°C) – modul.....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 78. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PS (60°C).....</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 79. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PS (60°C) – modul.....</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 80. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PS (80°C).....</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 81. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PS (80°C) – modul.....</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 82. Grafické zobrazení průměrných hodnot tahové zkoušky pro PC (23°C).....</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 83. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PC (40°C).....</i>	<i>93</i>

<i>Obr. 84. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PC (40°C) – modul</i>	93
<i>Obr. 85. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PC (60°C)</i>	94
<i>Obr. 86. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PC (60°C) – modul</i>	94
<i>Obr. 87. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PC (80°C)</i>	95
<i>Obr. 88. Grafické zobrazení tahové zkoušky pro PC (80°C) – modul</i>	95
<i>Obr. 89. Namodelovaná struktura pro výpočet tuhosti pro tah, kde L je podélný směr vláken a T příčný směr vláken</i>	97
<i>Obr. 90. Graf závislosti modulu pružnosti na teplotě</i>	99
<i>Obr. 91. Graf závislosti meze pevnosti na teplotě</i>	100
<i>Obr. 92. Graf závislosti poměrného prodloužení na teplotě</i>	101
<i>Obr. 93. Srovnávací graf modulů pružnosti pro teplotu 23°C</i>	102
<i>Obr. 94. Srovnávací grafy modulů pružnosti pro teploty 40°C, 60°C, 80 °C</i>	103

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Rozměry zkušebních tělísek</i>	35
<i>Tab. 2. Vlastnosti PP</i>	65
<i>Tab. 3. Vlastnosti PP + 30 % GF</i>	66
<i>Tab. 4. Vlastnosti PA 6</i>	66
<i>Tab. 5. Vlastnosti PA 6 + 30% GF</i>	67
<i>Tab. 6. Vlastnosti PS</i>	68
<i>Tab. 7. Vlastnosti PC</i>	69
<i>Tab. 8. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PP (23°C)</i>	72
<i>Tab. 9. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PP (40°C)</i>	73
<i>Tab. 10. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PP (60°C)</i>	74
<i>Tab. 11. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PP (80°C)</i>	75
<i>Tab. 12. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (23°C)</i>	76
<i>Tab. 13. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (40°C)</i>	77
<i>Tab. 14. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (60°C)</i>	78
<i>Tab. 15. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PP + 30 % GF (80°C)</i>	79
<i>Tab. 16. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6 (23°C)</i>	80
<i>Tab. 17. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6 (40°C)</i>	81
<i>Tab. 18. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6 (60°C)</i>	82
<i>Tab. 19. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6 (80°C)</i>	83
<i>Tab. 20. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6 + 30% GF (23°C)</i>	84
<i>Tab. 21. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6 + 30% GF (40°C)</i>	85
<i>Tab. 22. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6 + 30 % GF (60°C)</i>	86
<i>Tab. 23. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PA6 + 30 % GF (80°C)</i>	87
<i>Tab. 24. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PS (23°C)</i>	88
<i>Tab. 25. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PS (40°C)</i>	89
<i>Tab. 26. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PS (60°C)</i>	90
<i>Tab. 27. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PS (80°C)</i>	91
<i>Tab. 28. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PC (23°C)</i>	92
<i>Tab. 29. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PC (40°C)</i>	93
<i>Tab. 30. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PC (60°C)</i>	94
<i>Tab. 31. Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro PC (80°C)</i>	95

<i>Tab. 32. Vypočítané a experimentálně naměřené charakteristiky krátkovláknových struktur pro PP+ 30% skleněných vláken</i>	<i>98</i>
<i>Tab. 33. Hodnoty modulu pružnosti v tahu materiálů pro dané teploty</i>	<i>99</i>
<i>Tab. 34. Hodnoty meze pevnosti v tahu materiálů pro dané teploty</i>	<i>100</i>
<i>Tab. 35. Hodnoty poměrného prodloužení materiálů pro dané teploty</i>	<i>101</i>

SEZNAM PŘÍLOH

P I Vstřikovací podmínky

PŘÍLOHA P I: VSTŘIKOVACÍ PODMÍNKY

PP TATREN TI 924

Vstřikovací rychlost: 30 mm/s

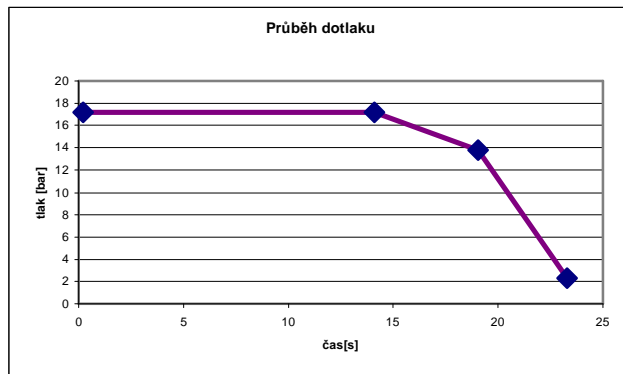
Dráha dávkování: 57,2 mm

Bod přepnutí: 24,3 mm

Tlak hydrauliky: 90,5 bar

Celkový čas dotlaku: 23,3 s

Průběh dotlaku:



Nastavení teplot plastikační jednotky:

Teplota pod násypkou: $T_1 = 50^{\circ}\text{C}$

Teplotní pásmo 2: $T_2 = 185^{\circ}\text{C}$

Teplotní pásmo 3: $T_3 = 210^{\circ}\text{C}$

Teplotní pásmo 4: $T_4 = 215^{\circ}\text{C}$

Teplotní pásmo 5: $T_5 = 220^{\circ}\text{C}$

Teplota na trysce: $T_6 = 225^{\circ}\text{C}$

Doba chlazení: 50 s

Analýza profilu:

	Počáteční profil	Finální profil
doba plnění [s]	0,75	0,35
doba dotlaku [s]	7,50	23,18
doba chlazení [s]	17,50	2,43
celkový čas [s]	25,75	25,97

PP SLOVALEN PH 61 GF 30

Vstřikovací rychlost: 46,1 mm/s

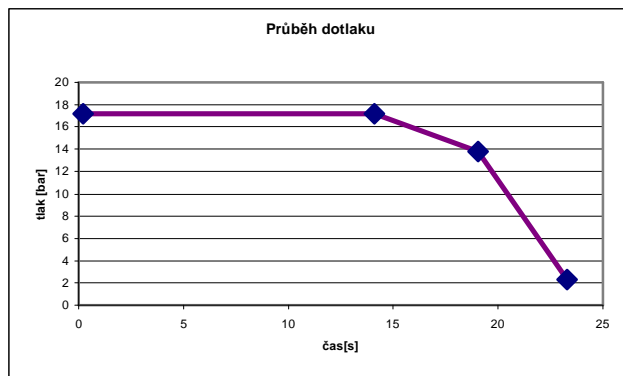
Dráha dávkování: 41,2 mm

Bod přepnutí: 24,3 mm

Tlak hydrauliky: 90,5 bar

Celkový čas dotlaku: 23,3 s

Průběh dotlaku:



Nastavení teplot plastikační jednotky:

Teplota pod násypkou: $T_1 = 50^\circ\text{C}$

Teplotní pásmo 2: $T_2 = 200^\circ\text{C}$

Teplotní pásmo 3: $T_3 = 205^\circ\text{C}$

Teplotní pásmo 4: $T_4 = 210^\circ\text{C}$

Teplotní pásmo 5: $T_5 = 220^\circ\text{C}$

Teplota na trysce: $T_6 = 230^\circ\text{C}$

Doba chlazení: 2,43 s

Analýza profilu:

	Počáteční profil	Finální profil
doba plnění [s]	0,75	0,35
doba dotlaku [s]	7,50	23,18
doba chlazení [s]	17,50	2,43
celkový čas [s]	25,75	25,97

PA 6 Ravamid B-NC

Vstřikovací rychlost: 90, mm/s

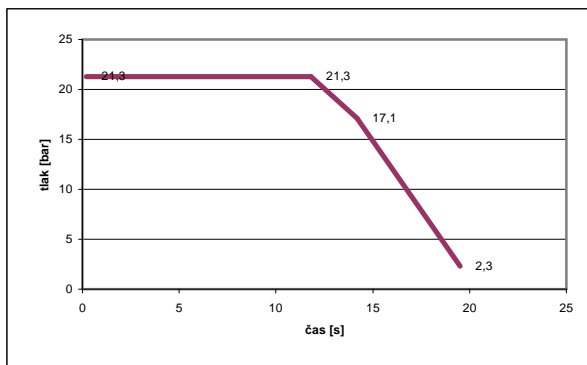
Dráha dávkování: 48,1 mm

Bod přepnutí: 27,8 mm

Tlak hydrauliky: 90,5 bar

Celkový čas dotlaku: 19,52 s

Průběh dotlaku:



Nastavení teplot plastikační jednotky:

Teplota pod násypkou: $T_1 = 50^\circ\text{C}$

Teplotní pásmo 2: $T_2 = 220^\circ\text{C}$

Teplotní pásmo 3: $T_3 = 225^\circ\text{C}$

Teplotní pásmo 4: $T_4 = 230^\circ\text{C}$

Teplotní pásmo 5: $T_5 = 240^\circ\text{C}$

Teplota na trysce: $T_6 = 280^\circ\text{C}$

Doba chlazení: 22,01 s

Analýza profilu:

	Počáteční profil	Finální profil
doba plnění [s]	0,70	0,22
doba dotlaku [s]	12,86	19,33
doba chlazení [s]	30,00	22,01
celkový čas [s]	43,56	41,56

PA 6 Ravamid B GF30 NC

Vstřikovací rychlost: 45, mm/s

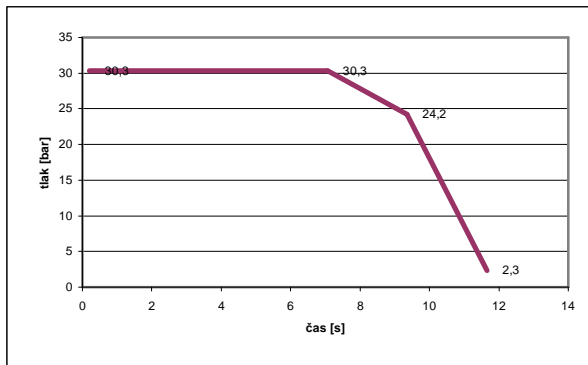
Dráha dávkování: 38,5 mm

Bod přepnutí: 25,1 mm

Tlak hydrauliky: 90,5 bar

Celkový čas dotlaku: 11,66 s

Průběh dotlaku:



Nastavení teplot plastikační jednotky:

Teplota pod násypkou: $T_1 = 50^\circ\text{C}$

Teplotní pásmo 2: $T_2 = 210^\circ\text{C}$

Teplotní pásmo 3: $T_3 = 240^\circ\text{C}$

Teplotní pásmo 4: $T_4 = 255^\circ\text{C}$

Teplotní pásmo 5: $T_5 = 270^\circ\text{C}$

Teplota na trysce: $T_6 = 280^\circ\text{C}$

Doba chlazení: 17,23 s

Analýza profilu:

	Počáteční profil	Finální profil
doba plnění [s]	0,47	0,19
doba dotlaku [s]	10,71	11,46
doba chlazení [s]	25,00	17,24
celkový čas [s]	36,18	28,89

PS KRASTEN

Vstřikovací rychlost: 112,2 mm/s

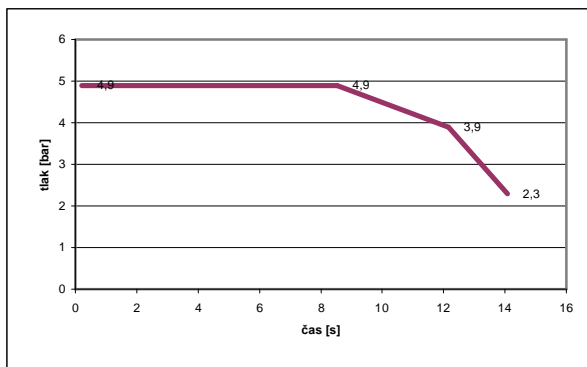
Dráha dávkování: 41,2 mm

Bod přepnutí: 25,8 mm

Tlak hydrauliky: 90,5 bar

Celkový čas dotlaku: 14,08 s

Průběh dotlaku:



Nastavení teplot plastikační jednotky:

Teplota pod násypkou: $T_1 = 50^\circ\text{C}$

Teplotní pásmo 2: $T_2 = 180^\circ\text{C}$

Teplotní pásmo 3: $T_3 = 210^\circ\text{C}$

Teplotní pásmo 4: $T_4 = 230^\circ\text{C}$

Teplotní pásmo 5: $T_5 = 245^\circ\text{C}$

Teplota na trysce: $T_6 = 255^\circ\text{C}$

Doba chlazení: 28,411 s

Analýza profilu:

	Počáteční profil	Finální profil
doba plnění [s]	0,30	0,13
doba dotlaku [s]	6,43	13,89
doba chlazení [s]	15,00	28,42
celkový čas [s]	21,73	42,43

PC Calibre 303 EP 22

Vstřikovací rychlost: 47,6 mm/s
Dráha dávkování: 41,2 mm
Bod přepnutí: 12,8 mm
Tlak hydrauliky: 90 bar
Celkový čas dotlaku: 9,2 s

Nastavení teplot plastikační jednotky:

Teplota pod násypkou: $T_1 = 40\text{ °C}$
Teplotní pásmo 2: $T_2 = 220\text{ °C}$
Teplotní pásmo 3: $T_3 = 240\text{ °C}$
Teplotní pásmo 4: $T_4 = 250\text{ °C}$
Teplotní pásmo 5: $T_5 = 260\text{ °C}$
Teplota na trysce: $T_6 = 270\text{ °C}$
Doba chlazení: 19,2 s

Analýza profilu:

	Počáteční profil	Finální profil
doba plnění [s]	1,20	0,54
doba dotlaku [s]	10,71	9,00
doba chlazení [s]	25,00	19,03
celkový čas [s]	36,91	28,57