

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Vysokopevné polymerní materiály

bakalářská práce

Vedoucí práce: **doc. Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D.**

Autor práce: **Tomáš Fuksa**

Praha 2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Tomáš Fuksa

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Vysokopevné polymerní materiály

Název anglicky

High strength polymers

Cíle práce

Cílem práce je provést literární rešerši v oblasti vysoce pevných polymerních materiálů používaných v konstrukcích.

Metodika

- 1) Úvod
- 2) Stavba polymerních materiálů
- 3) Polymerní materiály s vysokou pevností
- 4) Vliv plniv na polymerní materiály s vysokou pevností
- 5) Lomová houževnatost polymerních materiálů s vysokou pevností
- 6) Závěr

Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

Polymer; Plnivo; Pevnost; Lomová houževnatost

Doporučené zdroje informací

- DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vysoká škola chemicko-technologická, 1995.
- EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. Scientia, 2009.
- FERRY, John D. Viscoelastic properties of polymers. John Wiley & Sons, 1980.
- LANDEL, Robert F.; NIELSEN, Lawrence E. Mechanical properties of polymers and composites. CRC Press, 1993.
- MLEZIVA, Jaroslav. Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití. Sobotáles, 2000.
- RYU, Seongwoo, et al. High-Strength Carbon Nanotube Fibers Fabricated by Infiltration and Curing of Mussel-Inspired Catecholamine Polymer. *Advanced Materials*, 2011, 23.17: 1971-1975.
- VAN KREVELEN, Dirk Willem; TE NIJENHUIS, Klaas. Properties of polymers: their correlation with chemical structure; their numerical estimation and prediction from additive group contributions. Elsevier, 2009.
- VESELÝ, Karel. Polymery: struktura, syntézy, vlastnosti, zpracování. Brno: Česká společnost průmyslové chemie, 1992, 178: 80-02.
- WARD, Ian M.; HADLEY, Dennis W. An introduction to the mechanical properties of solid polymers. John Wiley & Sons Ltd.; John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- WARD, Ian M.; SWEENEY, John. Mechanical properties of solid polymers. John Wiley & Sons, 2012.
-

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 4. 6. 2015

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 24. 6. 2015

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 18. 02. 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Vysokopevnostní polymerní materiály vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne: 29.3.2017

Podpis: _____ (T. Fuksa)

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Rostislavovi Chotěborskému, Ph.D. za odborné rady a celkovou pomoc poskytnutou během zpracování zvoleného tématu.

Abstrakt:

Cílem této bakalářské práce byla literární rešerše tématu Vysokopevnostní polymerní materiály. V úvodu práce byla nastíněna problematika řešeného tématu. V kapitole Stavba polymerních materiálů jsou popsány obecné strukturní charakteristiky polymerních materiálů. Následující kapitola Polymerní materiály s vysokou pevností charakterizuje kompozity a zároveň představuje nejběžnější vysokopevnostní polymerní plasty. V kapitole Vliv plniv na polymerní materiály s vysokou pevností jsou představeny vyztužující plniva a jejich účinek. Poté následuje kapitola Lomová houževnatost polymerních materiálů s vysokou pevností, která se zabývá houževnatostí a vlivem plniv. Problematika řešeného tématu je shrnuta v závěru této práce.

Klíčová slova: Polymer, Plnivo, Pevnost, Lomová houževnatost

High strength polymers

Summary:

The aim of this bachelor thesis was literature review of the topic High strength polymers. Problems of the theme were outlined in the introduction to this work. General structural characteristics are described in the chapter Construction of polymeric materials. The following chapter Polymeric materials with high strength characterizes the composites and also represents the most common high polymer plastics. In chapter Effect of fillers on polymer materials with high strength are introduced reinforcing fillers and their effect. Then follow chapter Fracture toughness of polymer materials with high strength, which deals with the toughness and influence of fillers. Issues of the theme is summarized at the conclusion of this work.

Key words: Polymer, Filler, Strength, Fracture toughness

Obsah

1	Úvod	1
2	Stavba polymerních materiálů	2
2.1	Vazby v polymerech	4
2.2	Makromolekulární řetězce	5
2.2.1	Tvar makromolekul	6
2.2.2	Stereoizomerie	7
2.3	Struktura.....	7
2.4	Fázový stav	8
2.4.2	Stupeň krystalinity	10
3	Polymerní materiály s vysokou pevností.....	11
3.1	Plniva	11
3.2	Kompozity	11
3.3	Polyamidy (PA)	13
3.3.1	Alifatické polyamidy	13
3.3.2	Aromatické polyamidy	14
3.4	Polyamidimid (PAI).....	14
3.5	Polyimidy (PI).....	15
3.6	Polyfenylsulfid (PPS).....	15
3.7	Polyethereterketon (PEEK).....	15
3.8	Ultravysokomolekulární polyethylen (UHMW PE).....	16
3.9	Polybenzimidazol (PBI).....	17
3.10	Polybutyltereftalát (PBT)	17
3.11	Polethyltereftalát (PET).....	18

4	Vliv plniv na polymerní materiály s vysokou pevností.....	19
4.1	Polymerní kompozity s krátkými vlákny.....	20
4.1.1	Podmínky vyztužujícího efektu.....	20
4.1.2	Druhy vyztužujících vláken.....	21
4.2	Polymerní kompozity s částicemi.....	23
4.2.1	Účinek velikosti částic na mechanické vlastnosti.....	24
4.2.2	Druhy vyztužujících částic.....	24
4.3	Nanokompozity.....	26
4.4	Hybridní kompozity.....	26
5	Lomová houževnatost polymerních materiálů s vysokou pevností.....	27
5.1	Mechanické vlastnosti polymerních materiálů.....	27
5.1.1	Hypotéza nejslabšího článku.....	27
5.1.2	Tahová zkouška.....	28
5.1.3	Rázová zkouška.....	29
5.2	Lomová mechanika.....	29
5.2.1	Kritický rozměr trhliny.....	30
5.2.2	Lomová houževnatost.....	30
5.2.3	Lomová plocha vyztužených polymerních materiálů.....	31
5.2.4	Rozptýlení výztuže.....	31
5.2.5	Vliv mezifáze.....	31
5.2.6	Vliv velikosti výztuže.....	32
5.2.7	Mechanismy zvýšení lomové houževnatosti.....	32
6	Závěr.....	33
7	Seznam použité literatury.....	34

1 Úvod

Pokud určité období lidské historie definuje pro ni charakteristický materiál, pak bezpochyby žijeme v době polymerní. I když je lidská rasa od počátku své existence obklopena přírodními polymery (dřevo, vlna atd.), teprve syntetické polymery dokázaly poskytnout řešení stále náročnějších materiálových požadavků napříč spektrem prakticky všech průmyslových oblastí. Explozivní rozvoj syntetizovaných polymerů nastal na počátku 20. století a stále pokračuje, aktuálně především ve formě kompozitů, které představují další vývojový stupeň polymerních materiálů.

Kapitola Stavba polymerních materiálů se zabývá především uspořádáním makromolekul syntetických polymerů, vazbami v nich působících, strukturou a fázovými stavy polymerů.

V kapitole Polymerní materiály s vysokou pevností je popsána funkce vyztužujících plniv, a zároveň jsou uvedeny nejběžnější polymerní materiály vyznačující se vysokou pevností. Většinu z nich je možné označit za polymerní kompozity, jelikož se skládají z minimálně dvou chemicky odlišných fází (matrice a výztuže) o různých vlastnostech. Následkem tzv. synergického účinku pak kompozity vykazují výrazně lepší mechanické vlastnosti než jejich jednotlivé složky.

Poté navazuje kapitola Vliv plniv na polymerní materiály s vysokou pevností, v níž jsou představeny nejpoužívanější krátkovláknitá a částicová plnidla, tedy tzv. výztuže, a jejich účinek na mechanické vlastnosti polymerních kompozitů.

Následující kapitola Lomová houževnatost polymerních materiálů s vysokou pevností se zabývá mechanickými vlastnostmi vysokopevných polymerů a zkouškami sloužícími k jejich zjištění. Důraz je kladen zejména na houževnatost, metody sloužící k její charakteristice a faktory ji ovlivňující.

V závěru je shrnuto řešení vybraného tématu a nastíněn další možný vývoj.

Očekávaným výsledkem této práce je srozumitelné seznámení s problematikou vysokopevných polymerních materiálů na základě vypracované rešerše.

2 Stavba polymerních materiálů

Polymerní materiály jsou veškeré přírodní nebo syntetické makromolekulární sloučeniny, označované jako polymery. Podle Ducháčka (Ducháček, V., 1995) se jedná o chemické látky velkého množství vlastností, jejichž ohromné molekuly obsahují převážně atomy uhlíku, kyslíku a vodíku, mnohdy i chloru, dusíku nebo jiných i anorganických prvků, případně seskupení atomů. Vznikají při jedné z polyreakcí, z nichž nejvýznamnější jsou polymerace, polykondenzace a polyadice.

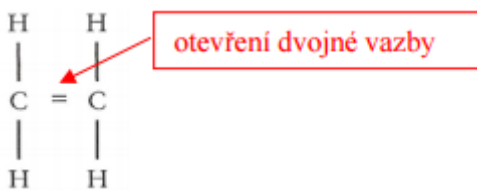
Jako zástupce přírodních polymerů, tzv. biopolymerů, Husárek (Husárek, J., 2013) uvádí mimo jiné dřevo, kůži nebo rohovinu.

V případě syntetických polymerů vznikají základní součásti polymerů, tedy makromolekulární řetězce, při polymeraci. Jedná se o polymeraci kondenzační nebo adiční. Jako výchozí surovina se pro tyto chemické reakce podle Ducháčka (Ducháček, V., 1995) zpravidla používají nízkomolekulární sloučeniny organického původu, tzv. monomery, které spolu s přísadami (aditivy) upravujícími určité vlastnosti tvoří plasty.

Jelikož se v dnešní době při syntéze běžně používají stovky různých monomerů, je počet druhů polymerů s rozmanitými vlastnostmi prakticky neomezený. Stejně tak se liší množství monomerů, které vytvářejí jednotlivé makromolekuly polymeru. Následkem toho je proměnlivá i jejich relativní molekulová hmotnost, daná poměrem hmotnosti molekuly a atomové hmotnosti konstanty, přičemž se dle Sodomky (Sodomka, J. et al., 2008) pohybuje většinou v rozmezí 10^4 až 10^7 . Z ní zjištěná průměrná relativní molekulová hmotnost pak v podstatě kvantitativně popisuje stupeň polymerace.

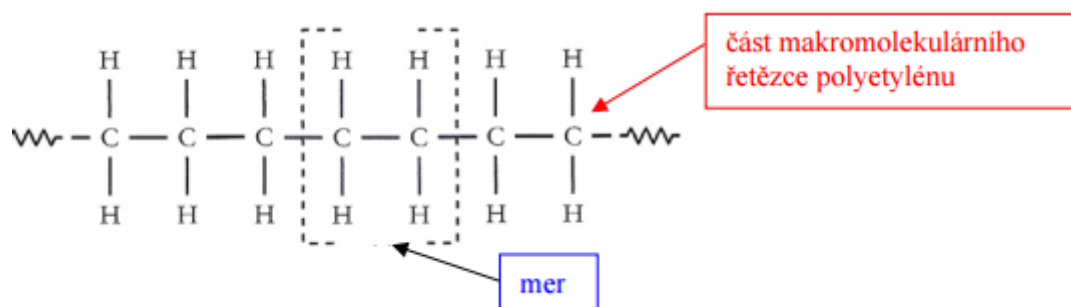
Jako příklad vzniku jednoduchého polymeru uvádí Sojka (Sojka, J. et al., 2012) polyetylén, který se syntetizuje prostřednictvím polymerace. Vzniká z etylénu s molekulovým vzorcem C_2H_4 , jenž je monomerem s dvojnou vazbou mezi atomy uhlíku.

Pokud jsou navozeny vhodné podmínky, zpravidla zvýšený tlak a teplota za použití látek chemického původu, tzv. iniciátorů, dochází u atomů uhlíku v etylénu k otevření dvojně vazby, viz Obr. 1.



Obr. 1 Otevření dvojně vazby etylénu [6]

Díky tomu se ve všech molekulách etylénu objeví nové vazebné místo, dovolující vzájemné spojování a následné vytvoření makromolekulárního řetězce, jehož část je zobrazena na Obr. 2.



Obr. 2 Část makromolekulárního řetězce polyetylénu [6]

Zde je modře označena základní stavební (monomerní) jednotka, tzv. mer. Je to článek makromolekulárního řetězce, tedy pravidelně se opakující molekula monomeru o neměnném chemickém složení, která je zabudována do makromolekuly polymeru. V našem případě je to mer $-C_2H_4-$, nyní již bez dvojné vazby mezi atomy uhlíku.

Strukturní jednotkou se podle Husárka (Husárek, J., 2013) rozumí nejjednodušší uspořádání merů ve struktuře makromolekuly. Polymery, které mají stavební a strukturní jednotku identickou, se nazývají homopolymery. U jiných polymerů, které označujeme jako kopolymery, může strukturní jednotku tvořit i více různých stavebních jednotek.

Množství stavebních jednotek dle Husárka (Husárek, J., 2013) vyjadřuje polymerační stupeň n , jenž nabývá hodnoty 10 až 10^6 . Podle něj rozlišujeme makromolekulární látky na oligomery, což jsou sloučeniny s nízkým polymeračním stupněm ($n < 10$) a na polymery, jež mají vyšší polymerační stupeň ($n > 10$).

Veselého (Veselý, K., 1992) popisuje syntetické polymery jako směsí makromolekul o různém polymeračním stupni, tedy o různé velikosti makromolekulárního řetězce. Následkem toho je hodnota polymeračního stupně n pouze průměrná, nikoli konstantní. Tato skutečnost se nazývá polydisperzita a je základní charakteristikou většiny polymerů.

2.1 Vazby v polymerech

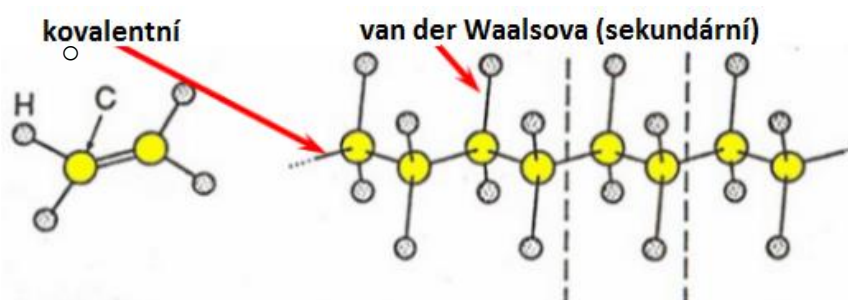
Druh vazeb atomů či molekul markantně ovlivňuje strukturu polymeru, a tím i veškeré jeho vlastnosti. V případě polymerů se podle Sodomky (Sodomka, J. et al., 2008) jedná o vazbu kovalentní, van der Waalsovou a vodíkovou.

vazba kovalentní

- je hlavním typem vazby v polymerech, viz Obr. 3,
- jedná se o vysoce silnou vazbu molekul s pevností cca. 1 000 GPa, kterou, jak zmínil Sojka (Sojka, J. et al., 2012), neovlivní ani případné rozpouštění nebo tání materiálu,
- představují ji společné dvojice valenčních elektronů dvou atomů, přičemž zmíněné atomy jsou elektricky neutrální,
- valenční elektrony jsou půlku času pod vlivem jednoho atomového jádra a půlku času pod vlivem jádra druhého.

vazba van der Waalsova

- je to slabá molekulární vazba, snadno narušitelná tepelným pohybem,
- pevnost této vazby je asi 2 GPa,
- působí u molekul složených z kovalentně vázaných atomů, viz Obr. 3,
- Sojka (Sojka, J. et al., 2012) uvádí, že molekulární síly této vazby mají malý dosah, tudíž je pro její vznik potřeba velkého přiblížení částic,
- je typickou vazbou pro prvky nebo sloučeniny se silně stabilní valenční skupinou,
- vyskytuje se například u termoplastu polyetylénu.



Obr. 3 Kovalentní a van der Waalsova vazba [6]

vazba vodíková

- Sodomky (Sodomka, J. et al., 2008) uvádí, že se tato vazba vyskytuje v důsledku navázání atomu vodíku na silně elektronegativní prvek (fluor, dusík nebo kyslík), díky čemuž dojde k přenosu kladného elektrického náboje protonu na atom vodíku,
- vodíková vazba má pevnost přibližně 8 GPa,
- energie této vazby je o řád nižší než energie vazby kovalentní a pohybuje se ve velmi širokých mezích, díky čemuž se mění i meziatomové vzdálenosti tvořené vodíkovou vazbou.

Zmíněné druhy vazeb odrážejí pouze ideální okrajové situace. Reálně, v případě pevných látek, dochází k překrývání rozličných jevů, což má za následek kooperaci několika druhů vazeb zároveň. Rozpoznání veškerých vazeb s jejich podílovým zastoupením v konkrétních případech je proto vysoce problematické.

2.2 Makromolekulární řetězce

Jak již bylo uvedeno, při syntéze polymerů prostřednictvím polymerace dochází k vytváření makromolekul, které je možné přirovnat k řetězu s jednotlivými články - mery.

Tyto makromolekulární řetězce vznikají podle Veselého (Veselý, K., 1992) z cyklických molekul monomeru anebo z molekul, které obsahují minimálně jednu dvojnou vazbu, přičemž vzniklé chemické vazby mezi molekulami musí mít dostatečnou pevnost.

Většina důkladně prostudovaných polymerů je dle Veselého (Veselý, K., 1992) tvořena látkami s řetězcí $-C-C-$, eventuálně s řetězcí $-C-O-$ nebo $-C-N-$. Existuje také mnoho anorganických polymerů, jež mají vazby $-Si-O-$, $-Al-O-$, $-P-O-$, $-B-O-$, $-Ge-O-$, $-Sn-O-$, popřípadě vazby těchto prvků s dusíkem.

Negativní vlastností těchto vazeb je jejich polarita, která způsobuje snadné štěpení vazeb během působení kyselin nebo bází. Vazba $-C-C-$ naopak vlivu kyselin a bází dobře odolává. Na druhou stranu je pevnost některých zmíněných vazeb větší než pevnost vazby $-C-C-$.

2.2.1 Tvar makromolekul

Husárek (Husárek, 2013) uvádí, že přítomnost přinejmenším dvou reaktivních skupin uvnitř molekuly monomeru je podmínka pro vznik makromolekulárního řetězce. Při tvarování řetězců má největší vliv počet vazebných míst, na kterých může vzniknout kovalentní vazba spolu s tlakovými a teplotními podmínkami. Husárek (Husárek, 2013) uvádí, že polymery dělíme dle tvaru molekul na lineární (jednoduché), rozvětvené, plošně zesítené a prostorově zesítené řetězce.

Lineární řetězec

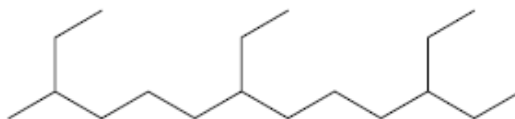
- tento řetězec se skládá pouze z jedné osy, podobné páteři, viz Obr. 4,
- pojem lineární není úplně přesný, řetězec je nejrůzněji zohýbaný a pokroucený.



Obr. 4 Schematicky zobrazený lineární řetězec polymeru [8]

Rozvětvený řetězec

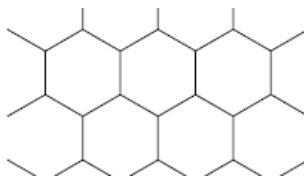
- rozvětvené řetězce vznikají spojením úseků lineárních řetězců skrze příčné chemické vazby, díky čemuž připomínají větvení se kmen, viz Obr. 5,
- toto uspořádání merů je charakteristickým znakem termoplastů.



Obr. 5 Schematicky zobrazený rozvětvený řetězec polymeru [8]

Plošně zesíťovaný řetězec

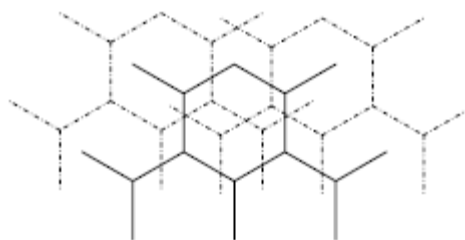
- takový řetězec vzniká příčným spojením všech lineárních řetězců v jeden celek,
- příčná spojení zabírají dle Husárka (Husárek, 2013) pouze 0,5 – 2 % povrchu řetězce,
- takto uspořádané molekuly monomeru, zobrazené na Obr. 6, jsou charakteristickým znakem elastomerů.



Obr. 6 Schematicky zobrazený plošně rozvětvený řetězec polymeru [8]

Prostorově zesíťovaný řetězec

- prostorově zesíťované řetězce vznikají v případě, že se mery chemicky navážou do trojrozměrné sítě, viz Obr. 7



Obr. 7 Schematicky zobrazený prostorově zesíťovaný řetězec polymeru [8]

2.2.2 Stereoizomerie

Stereoizomerie neboli takticita podle Ducháčka (Ducháček, V., 1995) nastává u makromolekulárních sloučenin pocházejících z monomerů s dvojnou vazbou, jež obsahují takzvaný asymetrický uhlíkový atom. Tento atomu uhlíku nemá žádnou rovinu ani střed symetrie neboli souměrnost.

Ducháček (Ducháček, V., 1995) také popsal, že pokud se při syntéze polymeru jednotlivé molekuly monomeru pospojují náhodně, dojde ke vzniku nesymetrické struktury a tzv. ataktického polymeru. V případě, že se molekuly monomeru spojí s jistou pravidelností, označují se vzniklé polymery jako taktické. Dále pak se dělí na izotaktické a syndiotaktické.

2.3 Struktura

Sodomka (Sodomka, J. et al., 2008) uvádí, že struktura polymeru je nositelka jeho vlastností. K určení struktury je nutné vědět, z jakých atomů nebo molekul se polymer skládá, jakým způsobem jsou tyto nejzákladnější částice rozloženy a uspořádány, i jakými silami jsou vzájemně vázány. Strukturu polymerů pak určují především:

- chemické složení základních částic,
- prostorové uspořádání atomů v základní částici,
- molární hmotnost a její distribuce,
- tvar makromolekul,
- velikost makromolekul.

V důsledku stále se vyvíjejících a navzájem kritizovaných poznatků v oblasti struktury polymerů, které jsou uvedeny na předchozí straně, vznikla dle Ducháčka (Ducháček, V., 1995) tzv. Moderní makromolekulární teorie, vycházející z těchto domněnek:

- makromolekulární řetězce jsou lineární, rozvětvené, plošně zesíťované nebo prostorově zesíťované,
- veškeré vlastnosti polymerů jsou závislé na jejich fázovém stavu, chemickém složení a molekulové hmotnosti,
- makromolekulární řetězce nejsou tuhé útvary, v důsledku nepřetržitého pohybu vlastních jednotlivých segmentů (úseků), které se projevují individuálně, získávají různé geometrické konformace (uspořádání).

Ducháčka (Ducháček, V., 1995) uvádí, že přes značnou propracovanost této teorie nedokážeme na jejím základě odhadovat přesné makroskopické vlastnosti polymerů závislé na jejich molekulární struktuře. Může za to ohromné množství různých vlastností makromolekulárních látek, které znemožňuje jejich jednoznačné schématické rozdělení. Jedná se například o existenci různých fyzikálních stavů, způsobených kromě chemického složení i molekulovou hmotností polymerů.

2.4 Fázový stav

Obrovská molekulová hmotnost polymerů má podle Ducháčka (Ducháček, V., 1995) za následek velmi vysoký bod varu, který se nachází bez výjimky vždy nad teplotou rozkladu těchto materiálů. Pro představu, Sodomka (Sodomka, J. et al., 2008) uvádí, že polymery jakožto makromolekulární látky mají relativní molekulovou hmotnost tisíc až milion, zatímco nízkomolekulární látky jsou sloučeninami o relativní molekulové hmotnosti v řádu desítek až stovek.

V důsledku této skutečnosti se polymery vyskytují pouze v tuhém nebo kapalném stavu, plynný stav je u nich podle Ducháčka (Ducháček, V., 1995) neuskutečnitelný. Na základě pravidelnosti geometrického uspořádání makromolekul v tuhém stádiu hovoříme o značně uspořádaném stavu krystalickém a téměř neuspořádaném stavu sklovitém.

Krystalický stav představuje podle Sojky (Sojka, J. et al., 2012) existenci pravidelného, periodického uspořádání atomů, při němž má jednoduchý makromolekulární řetězec, vzniklý polymerací, tvar meandru.

Naproti tomu sklovitý stav se minimálním uspořádáním polymerních řetězců podobá stavu kapalnému, schopnost pohybu polymerních řetězců v tomto stavu (téct) je však znemožněna.

U polymerních materiálů se dle Ducháčka (Ducháček, V., 1995) na rozdíl od nízkomolekulárních látek navíc vyskytuje kaučukovitý stav, jenž je přechodovým stavem mezi sklovitým a kapalným. V něm je možné polymerní materiál za použití relativně mále síly silně deformovat, tudíž nemůže být označen za tuhou látku, zároveň však nemůže být kapalinou, protože při deformaci nevzniká nevratný tok charakterizující kapalným stavem.

Je tedy zřejmé, že veškeré polymerní materiály mohou mít čtyři odlišné fázové stavy:

- **krystalický**
- **amorfní**
 - **sklovitý**
 - **kaučukovitý**
 - **plastický**

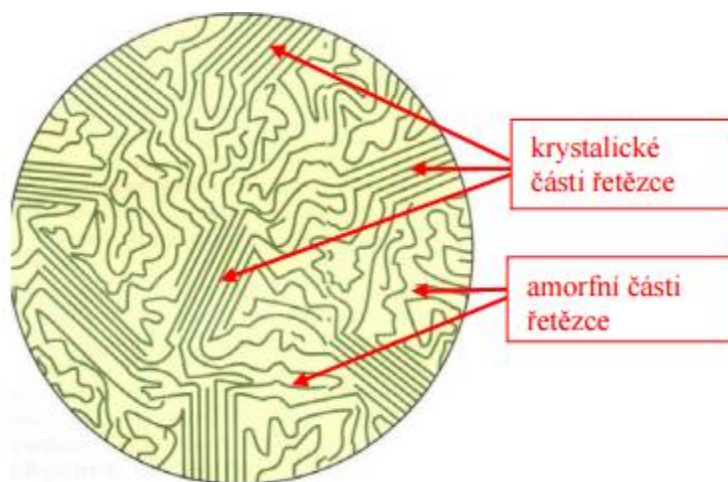
Fázový stav makromolekulárních látek při běžných podmínkách a šíři teplotního rozmezí existence zmíněných stavů způsobuje v největší míře molekulová hmotnost těchto látek a jejich chemické složení. Ducháček (Ducháček, 1995) uvádí, že je velmi obtížné určit jednotlivé fázové stavy polymerů. Pokud bychom je definovali na základě chování při odlišných teplotách, je možné krystalické polymery charakterizovat teplotou tání T_m a amorfní teplotou zesklenní T_g . Definujeme-li je měřením velikosti deformace, která vznikla účinkem síly při daném čase a teplotě, dostáváme termomechanickou křivku, která je odlišná pro každý polymerní materiál.

Ducháček (Ducháček, 1995) zmiňuje, že většina polymerních materiálů nemůže mít podobu všech tří amorfních fázových stavů, jelikož jejich teplota zesklenní a teplota toku T_f může být větší než teplota jejich rozkladu. Takové materiály mohou mít například pouze sklovitý stav, jako je tomu u celulózy.

2.4.2 Stupeň krystalinity

Sojka (Sojka, J. et al., 2012) uvádí, že za specifických podmínek je možné, aby určité druhy polymerů byly tzv. částečně krystalické, viz Obr. 8. Týká se to zejména některých termoplastů a v menší míře i elastomerů, reaktoplasty jsou zpravidla zcela amorfní.

Vznik tohoto částečně krystalického stavu je podmíněn lineárním makromolekulárním řetězcem bez zesílení nebo přílišného větvení stejně jako nízkou rychlostí tuhnutí polymeru.



Obr. 8 Zobrazení amorfních a krystalických částí makromolekulárních řetězců polymeru [6]

Procentuální množství krystalického stavu v hmotě polymeru se označuje jako stupeň krystalinity. Je logické, že stupeň krystalinity musí zákonitě ovlivnit vlastnosti polymerního materiálu, především jeho pevnost a tuhost, které se zvyšujícím se podílem krystalického stavu stoupají. Jako příklad takového materiálu je možné uvést polyetylén s krystalickým stavem představujícím až 90 % celkového objemu. Sodomka (Sodomka, J. et al., 2008) uvádí, že kvůli omezené pohyblivosti makromolekul v polymerech není možné vyrobit makromolekulární materiál s čistě krystalickou strukturou, tudíž krystalinita nikdy nedosáhne 100 %.

3 Polymerní materiály s vysokou pevností

Stále náročnější požadavky v oblastech jako je strojírenství, elektrotechnika nebo medicína iniciují modifikaci mechanických, fyzikálních a chemických vlastností polymerních materiálů při zachování přijatelných cen. Sodomka (Sodomka, J. et al., 2008) se zmiňuje, že většina kapacity výzkumu v oblasti makromolekulární chemie se zabývá rozvojem konstrukční, případně speciálních hi-tech polymerů s výjimečnými vlastnostmi, kterými jsou převážně semikrystalické termoplasty.

Ve srovnání s masově používanými polymery se jedná o drahé materiály, mají však výrazně lepší užité vlastnosti, které je možné ještě vylepšit například tvorbou polymerních směsí nebo přidáním vyztužujících plniv.

3.1 Plniva

Sodomka (Sodomka, J. et al., 2008) uvádí, že v technické praxi hrají přísady přidávané do polymerních materiálů podobnou roli jako přísadové prvky u ocelí. Jednou z přísad jsou plniva, která dle Lednického (Lednický, F., 2009) umožňují kromě snižování nákladů pozitivně ovlivňovat mechanické vlastnosti materiálu, především jeho pevnost a tuhost.

Proces přidávání těchto zpevňujících plniv je tzv. vyztužování polymerů za pomoci vláken nebo částic, což Ehrenstein (Ehrenstein, W. G., 2009) obecně popsal jako využívání synergických účinků různorodých materiálů pro dosažení lepších vlastností. Tento tzv. synergický efekt umožňuje dle Janovce (Janovec, J., 2014) získat lepší vlastnosti, než jaké odpovídají průměru odvozenému z vlastností složek. Vyztužené polymery je možné označit za kompozity.

3.2 Kompozity

Kompozitní materiály se podle Janovce (Janovec, J., 2014) skládají z minimálně dvou chemicky odlišných fází. Pevná a tuhá nespojitá fáze (může být i více) je nazývána výztuží, zatímco poddajnější spojitá fáze fungující jako pojivo a ochrana výztuže je matrice. Dohromady tvoří kompozit, který je charakteristický vlastnostmi, jakých nemůže samostatně dosáhnout ani jedna z jeho fází. Obsah každé fáze by měl být minimálně 5 %.

Veselý (Veselý, K., 1992) přirovnává pokrok v oblasti materiálu od homogenních ke kompozitním k vývoji měkkýšů do vyšší formy života - obratlovců.

Výztuže mají různé rozměry, podle kterých kompozity rozlišujeme na makrokompozity (rozměry v mm – cm), mikrokompozity (rozměry 1 – 10² μm) a nejvíce aktuální nanokompozity (rozměry 1 – 1 000 nm). Vysokopevnostní polymery spadají do oblasti mikrokompozitů a nanokompozitů, přičemž jsou dle Ehrensteina (Ehrenstein, W. G., 2009) většinou vyztuženy ve směru namáhání, což z nich dělá, na rozdíl od kovů a nevyztužených plastů, anizotropní materiál.

Matrice se podle Sodomky (Sodomka, J. et al., 2008) dělí na reaktoplastové a termoplastové. Reaktoplastové matrice ve srovnání s termoplastovými mnohem houževnatější, a navíc jsou především kvůli snadné výrobě (není nutné vytvrzování) o 25 až 80 % levnější. Vynikají dobrou tvarovou stabilitou při působení vnitřního pnutí, odolnosti proti opotřebení (především za použití uhlíkových vláken, kdy se součinitel tření snižuje na 1/3), dále vyšší pevností, houževnatostí a modulem pružnosti, jenž se pohybuje v rozmezí 2 až 4 GPa. Sodomka (Sodomka, J. et al., 2008) dále uvádí, že se nejčastěji vyrábí z polyamidů, polyfenylensulfidu, polyethylenu nebo polypropylenu. Reaktoplastové matrice představuje celá řada pryskyřic, např. polyesterová, epoxidová nebo melaminová.

Janovec (Janovec, J., 2014) dělí polymerní kompozitní materiály na základě tvaru vyztužujících prvků následovně:

- **vláknové kompozity**
 - s krátkými vlákny
 - s kontinuálními (dlouhými) vlákny
- **částicové kompozity**
 - sférické (izomerické) částice
 - nesférické (anizomerické) částice
- **nanostrukturní kompozity**
 - částice nebo destičky mají rozměry v nanometrech
- **hybridní kompozity**
 - mohou obsahovat různé druhy vláken o různých rozměrech, popřípadě vlákna a částicemi zpevněnou matici

3.3 Polyamidy (PA)

Mleziva (Mleziva, J., 2000) definoval polyamidy jako lineární polymery, které obsahují amidové skupiny –CONH–. Běžné polyamidy mají za tuhého stavu 30 – 50 % podíl krystalické fáze, která značně pozitivně ovlivňuje jejich mechanické vlastnosti, zatímco amorfní fáze zapříčiňuje elasticitu s tažností.

Přednostmi PA jsou podle Lederera (Lederer, J.) vysoká houževnatost, tvrdost, odolnost vůči oděru, výborné elektroizolační vlastnosti a biologická odolnost. To z nich činí oblíbený materiál pro konstrukci namáhaných součástí, jako jsou pneumatikové kordy, ložiska, ozubená kola nebo vlákna. Kupříkladu skupina SKF, přední světový výrobce ložisek, používá PA zesílené skelnými vlákny pro výrobu ložiskových klecí. Polyamidy se obecně dělí na alifatické a aromatické.

3.3.1 Alifatické polyamidy

Polyamid 6 (silon)

- vyrábí se hydrolytickou nebo aniontovou polymerací monomeru kyseliny 6-aminokapronové,
- zajímavostí je, že postup k výrobě základní sloučeniny silonu (kaprolaktamu) vynalezl český vědec Otto Wichterle,
- tento materiál se dle Lederera (Lederer, J.) vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, např. nízkým koeficientem tření a ořezuvzdorností, které je možné ještě navýšit přidáním plniv, jeho nevýhodou je však velká nasákavost.

Polyamid 66 (nylon)

- vyrábí se dvoustupňovou polykondenzací monomerů kyseliny adipové a hexametylendiaminu,
- oproti silonu má nylon větší pevnost i teplotu tání (o cca. 200°C) a menší nasákavost,
- jak uvádí Lednický (Lednický, F., 2009), často se vyztužuje krátkými skleněnými vlákny (např. 30 %), čímž se stává kompozitem.

3.3.2 Aromatické polyamidy

Lineární aromatické polyamidy, tzv. aramidy, se podle Ducháčka (Ducháček, V., 1995) projevují neobvyklou tepelnou i chemickou odolností a extrémní pevností. Syntetizují se pomocí polykondenzace, při níž je navíjeno pevné vlákno z kapalného roztoku. Rozeznáváme dva druhy těchto vláken – para-aramidy (PPTA) a meta-aramidy (MPIA).

Para-aramidy (PPTA)

- obchodní označení firmy DuPont pro tyto vlákna je Kevlar®,
- Trunda (Trunda, L., 2016) Kevlar popisuje jako materiál s vlastnostmi tekutého krystalu, jenž má polymerové řetězce orientované ve směru vlákna,
- díky značné symetrii makromolekul mají tato vlákna dle Lederera (Lederer, J.) pevnost v tahu cca. 3 000 MPa, vysoký Youngův modul pružnosti a tepelnou odolnost, jejich nevýhodou je však rozpadavost vlivem UV záření nebo působením zásad,
- využívají se při výrobě letadel, neprůstřelných vest, jako náhražka azbestu atd. .

3.4 Polyamidimid (PAI)

Tento amorfní termoplast se syntetizuje polykondenzací za přítomnosti aromatických diaminů a anhydridů kyseliny trimellitové, jak uvádí Mleziva (Mleziva, J., 2000). Vytváří pomyslné propojení aromatických polyamidů a polyimidů.

Vyznačuje se výbornými mechanickými vlastnostmi, jako je tvrdost, pevnost a modul pružnosti v tahu dosahující téměř 5 000 MPa, jenž se dá srovnat s parametry kovů. Mleziva (Mleziva, J., 2000) dále uvádí, že je nehořlavý, přičemž dlouhodobě odolává teplotě 260°C a krátkodobě teplotě 300°C. Přidáním plniv jako jsou skelná nebo uhlíková vlákna (obvykle do 30 %) se dosáhne vyšší pevnosti a tuhosti při současném snížení ceny materiálu.

Na trhu ho mimo jiné distribuuje firma Solvay pod obchodním názvem Torlon®. Využívá se v oblasti letectví či automobilového průmyslu pro výrobu nemazaných ložisek využívaných za extrémních podmínek, součástí čerpadel, těsnění a podobně.

3.5 Polyimidy (PI)

Jak uvádí Prokopová (Prokopová, I., 2008), tyto polymery vznikají během polykondenzace dianhydridů kyseliny pyromellitové s aromatickými diaminy. Podle Veselého (Veselý, K., 1992) mají mimořádnou škálu užitečných vlastností. Jedná se především o vysokou pevnost, vynikající dielektrické vlastnosti a výjimečnou tepelnou odolnost, dlouhodobou do teploty 260°C. Uplatnění nacházejí především v oblasti mikroelektroniky a letectví. Dále se používají v textilním průmyslu ve formě vláken nebo jako folie pod obchodním označením Kapton® od firmy DuPont.

3.6 Polyfenylsulfid (PPS)

Jedná se o semikrystalický chemicky odolný termoplast s výjimečně velkou mechanickou odolností za zvýšených teplot (do 240°C), související především s tuhostí, pevností a creepem. Běhálek (Běhálek, L., 2016) navíc upozorňuje na výbornou tekutost taveniny zlepšující jeho zpracovatelnost, což usnadňuje přidávání minerálního plniva (až 65 %) a vyztužujících plniv (uhlíková nebo skleněná vlákna, 30 – 40 %).

Veselý (Veselý, K., 1992) uvádí, že při obsahu 60 % skleněných vláken získá tento polymer vlastnosti kovu. Navíc se jedná o samozhášivý materiál. Používá se mimo jiné na výrobu komponentů palivového systému, zásuvek, ventilů nebo náběhové hrany křídel letadel.

3.7 Polyethereterketon (PEEK)

Stejně jako PPS je to semikrystalický chemicky odolný samozhášivý plast s výbornými mechanickými vlastnostmi. Kromě značné otěruvzdornosti a zpracovatelnosti má dle Běhála (Běhálek, L., 2016) výbornou tvarovou stálost za vysokých teplot (do 310°C).

Ještě lepších mechanických vlastností tohoto materiálu je dosaženo přidáváním plniv, např. uhlíkových, karbonových nebo skelných vláken. Skupina SKF využívá PEEK zesílený vlákny mimo jiné k výrobě ložisek pro větrnou energetiku. Dále je využíván například v oblasti letectví, jaderného a automobilového průmyslu nebo v lékařství, protože je biologicky inertní.

3.8 Ultravysokomolekulární polyethylen (UHMW PE)

Lapčík (Lapčík, L. et al., 2001) uvádí, že ovlivňování vlastností polymerů, především anizotropní zvyšování pevnosti a tuhosti, prostřednictvím jednosměrného dloužení polymerů je nám známo již od počátku syntézy polymerních vláken. Strukturální podstatou tohoto dloužení je orientace a protahování (napřimování) molekul polymeru.

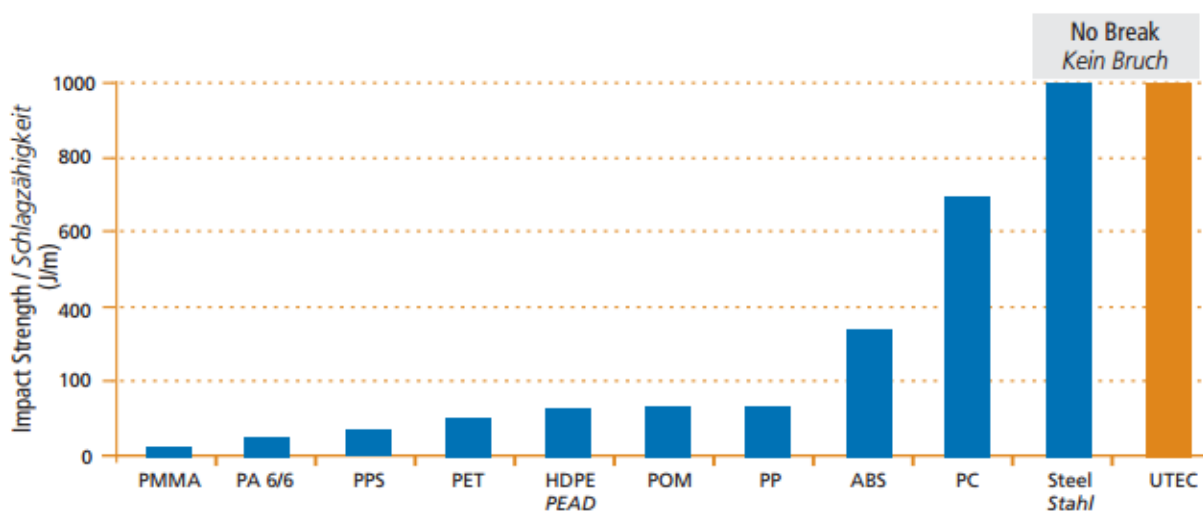
Nejúspěšněji se tyto úpravy projeví u lineárního vysokohustotního polyethylenu, jehož kovalentní vazby mezi atomy uhlíku polyethylenové makromolekuly dosahují tuhosti a pevnosti srovnatelné s tou u diamantu. Teoretické výpočty dosažitelného modulu pružnosti mezi hodnotami 180 až 340 GPa jsou dle Lapčíka (Lapčík, L. et al., 2001) zatím velice rozdílné od experimentálně zjištěných maximálních hodnot (16 až 36 GPa), avšak díky nově vyvíjeným metodám efektivní orientace se stále přibližují.

Kurtz (Kurtz, S., 2009) uvádí, že polyethylen lze rozlišovat na polyethylen s nízkou hustotou (LDPE) a polyethylen s vysokou hustotou (HDPE), přičemž relativní molekulová hmotnost těchto materiálů nepřesahuje hodnotu $200\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. V případě ultravysokomolekulárního polyethylenu (UHMW PE) dosahuje relativní molekulová hmotnost hodnot v rozsahu $2\,000\,000 - 9\,000\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. Je to zapříčiněno velmi dlouhými makromolekulárními řetězci tohoto termoplastu o polymerním stupni n až 200 000.

Lapčík (Lapčík, L. et al., 2001) zmiňuje, že extrémně pevná polyethylenová vlákna mají údajně lepší odolnost proti dynamické únavě než aramidy. Nejvýznamnější vlastností tohoto materiálu je podle Lapčíka (Lapčík, L. et al., 2001) výrazně nižší hustota, než jakou mají jiné pevné materiály ($2/3$ oproti aramidům a $1/2$ vůči uhlíkovým vláknům), což se pozitivně projevuje na jejich měrné pevnosti – je ze všech materiálů používaných k vyztužování kompozitů nejvyšší. Zhao (Zhao, Y. et al., 2017) například uvedl, že přidáním malého množství UHMW PE (až do hmotnostních 2,5 %) do olefinových blokových kopolymerů (OBC) se zvýšil Youngův modul z 12 MPa na 22 MPa při zachování dobré elasticity.

Tento materiál charakterizuje také vysoký měrný modul a houževnatost, nízká navlhavost, otěruvzdorné i dielektrické vlastnosti a chemická stálost. Z něj vyrobená vlákna mají širokosáhlé využití, např. vyztužují kompozity, ze kterých se vyrábějí ochranné přilby apod., nebo slouží k výrobě lodních lan a rybářských sítí.

Firma Braskem tento materiál prodává pod názvem UTEC, přičemž deklaruje výrazně lepší rázovou houževnatost než jiné materiály, viz Obr. 9.



Obr. 9 Srovnání rázové houževnatosti UTEC a ostatních materiálů [15]

3.9 Polybenzimidazol (PBI)

O tomto vysoce stabilním heterocyklickém polymeru Běhálek (Běhálek, L., 2016) uvedl, že má nejvyšší teplotní odolnost (T_g okolo 430°C , do které je dlouhodobě využitelný) ze všech komerčních polymerních materiálů. Krátkodobě odolá teplotě až 760°C .

Vyznačuje se také vysokou tvrdostí, rozměrovou a chemickou stálostí, odolností proti opotřebení a slabým koeficientem tření, což z něj činí oblíbený materiál pro hi-tech oblasti jako je kosmický průmysl. Kromě součástek jako jsou ložiska se zpracovává na vlákna, z kterých se vyrábějí ochranné oděvy.

3.10 Polybutylentereftalát (PBT)

Tento semikrystalický polyesterový termoplast syntetizovaný pomocí polykondenzace je podle Moravce (Moravec, J., 2008) kvůli svému vyváženému komplexu tepelně/mechanických vlastností vhodný pro mechanicky a elektricky namáhané součástky. Moravec (Moravec, J., 2008) dále uvádí, že PBT má vysokou pevnost (Youngův modul: $2\,000 - 2\,700\text{ MPa}$, pevnost v tahu: $50 - 58\text{ MPa}$) a rozměrovou stálost. Zároveň dobře odolává creepu, chemikáliím a korozi pod napětím.

Pro zlepšení mechanických vlastností se vyztužuje skelnými vlákny nebo minerálními plnivými. Využívá se mimo jiné pro výrobu konektorů, čidel nebo spalovacích a elektrických komponentů systémů automobilů.

3.11 Polethylentereftalát (PET)

Běhálek (Běhálek, L., 2016) uvádí, že se jedná o amorfní, případně semikrystalický, lineární polyester. Jeho vynikající mechanické vlastnosti (Youngův modul: okolo 2 200 MPa, pevnost v tahu: 70 – 80 MPa) se odvíjejí především od hodnoty polymeračního stupně n a obsahu krystalické struktury.

Obecně se vyznačuje výbornými kluznými vlastnostmi, dobrou odolností proti creepu, zpracovatelností a v amorfní podobě vysokou světelnou propustností. Zároveň je však při obvyklých podmínkách křehký a navlhá.

Moravec (Moravec, J., 2008) zmiňuje, že původně byl syntetizován kvůli výrobě velmi kvalitních vláken, které je možné použít i při vyztužování kompozitů (např. pro kluzná ložiska a ozubená kola). V menší míře se z PET vyrábějí fólie. Dříve byl v modifikované formě využíván k výrobě nápojových lahví, které jsou dnes většinou vyráběny z kopolyesterů.

4 Vliv plniv na polymerní materiály s vysokou pevností

Lednický (Lednický, F., 2009) uvádí, že druh plniva prakticky není omezen, zásadní je pouze jeho funkce v materiálu, dostupnost a cena. Například polymery plněné anorganickými příměsemi mají mnohem lepší objemovou stálost, která se projevuje nižším smrštěním ve formě. Plniva mohou zajistit i snížení hořlavosti materiálu nebo jeho vyztužení.

Na složku s vyztužujícím efektem je dle Lednického (Lednický, F., 2009) skrze polymerní matici přenášena vnější mechanická síla. Aby byl kompozit jako celek schopný vydržet zatížení, které řádově převyšuje pevnost využití matrice, musí mít vyztužující složka větší mechanickou pevnost a menší poddajnost.

Základní charakteristika výztuže je podle Lednického (Lednický, F., 2009) tzv. štíhlost (aspektní poměr), jež je poměrem mezi jejím největším a nejmenším rozměrem (např. délka vlákna a jeho průměr). Pokud je hodnota štíhlosti 10 a více, dojde k požadovanému efektu vyztužení, který se zvyšující se hodnotou narůstá.

Jak již bylo uvedeno, jako výztuž mohou být použita vlákna nebo částice, jež jsou v polymerní matici dispergovány nebo agregovány. V případě vyztužení krátkými vlákny nebo částice je dle Lednického (Lednický, F., 2009) nutné počítat s částečnou orientací výztuže ve směru toku, a z toho plynoucí mírou anizotropie.

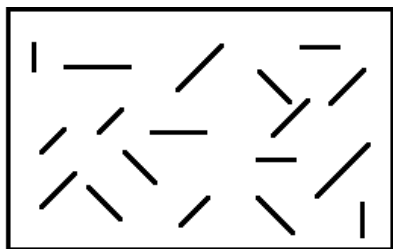
Obecně je možné říci, že výztuže o velkém tvarovém faktoru zpravidla významně zlepšují vlastnosti kompozitu v určitém směru (tuhost, pevnost v tahu), zatímco částice s malým tvarovým faktorem generují v souvislosti s materiálem spíše globální efekt (lepší houževnatost a modul pružnosti v tahu).

Podle Ehrensteina (Ehrenstein, W. G., 2009) 90 % všech plastů vyztužených vlákny, tzv. FRP, představují polyesterové nebo vinylesterové pryskyřice smíšené s dlouhými skleněnými vlákny. Tyto vyztužené plasty jsou z aplikačního hlediska vrstevnatě uspořádané a označují se jako lamináty. Zpevňující účinek dlouhovláknité výztuže je podstatně vyšší než účinek výztuže s krátkými vlákny, avšak vzhledem k zaměření a omezenému rozsahu této práce jim nebude věnována pozornost.

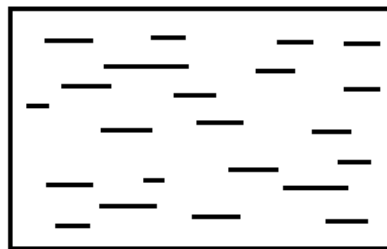
4.1 Polymerní kompozity s krátkými vlákny

Lednický (Lednický, F., 2009) uvádí, že krátká vlákna, na rozdíl od dlouhých vláken, umožňují obvyklé výrobní postupy jako je vstřikování nebo lisování, přičemž dolní hranice obsahu těchto vláken je podle Ehrensteina (Ehrenstein, W. G., 2009) 15 %. Při nižším obsahu je efekt výztuže zanedbatelný. Horní hranicí je pak 50 % obsahu vláken. Při větším obsahu je velmi složité dosáhnout rovnoměrného smáčení, což může vést k tvorbě vzduchových bublin, jež dle Rýglové (Rýglová, Š., 2006) následně iniciují lom. Navíc, v případě nejčastěji používaných abrazivně působících skelných vláken, dochází k opotřebení výrobku.

Krátká vlákna jsou v matrici většinou nahodile orientována, viz Obr. 10, aby byla zajištěna izotropie kompozitu. Janovec (Janovec, J., 2014) uvádí, že při použití zvláštních výrobních postupů je možné krátká vlákna orientovat jednosměrně, viz Obr.11.



Obr. 10 Krátká vlákna orientována nahodile [18]



Obr. 11 Krátká vlákna orientována jednosměrně [18]

4.1.1 Podmínky vyztužujícího efektu

Vyztužení představuje dle Ehrensteina (Ehrenstein, W. G., 2009) navýšení tuhosti a pevnosti polymeru, které způsobí uložení výztuže do matrice, přičemž musí být splněno toto:

- vyztužující vlákna musí být pevnější (σ = pevnost) než matrice

$$\sigma_{fP} > \sigma_{mP}$$

- matrice se nesmí porušit (ε = mezní prodloužení) dřív než vlákno

$$\varepsilon_{mP} > \varepsilon_{fP}$$

- vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost (E = modul pružnosti v tahu) než matrice

$$E_f > E_m$$

Pro získání optimálního vyztužovacího efektu je také velmi důležité přenesení všech působících sil na vlákna, čehož se dle Ehrensteina (Ehrenstein, W. G., 2009) dosáhne pouze dobrým spojením vlákna a matrice. To je možné získat předúpravou výztuže, tzv. apreturou, která jakožto mezifáze spojuje povrch vlákna a matici dvojitou chemickou vazbou.

Kromě zpevňujícího efektu výztuže je velmi důležitý její ekonomický. Ehrenstein (Ehrenstein, W. G., 2009) uvádí, že nevyztužené plasty jsou z hlediska srovnání modulu pružnosti dražší jak plasty vyztužené. Pokud bychom srovnávali pevnost, vyplatí se pouze dražší konstrukční plasty s krátkovláknitou výztuží.

4.1.2 Druhy vyztužujících vláken

Skleněná vlákna

- Ehrenstein (Ehrenstein, W. G., 2009) uvádí, že jsou jako jediná z vláken izotropní,
- 90 % použitých skleněných vláken jsou tzv. E-vlákna vyrobená z bezalkalické skloviny, jež jsou výborným elektrickým izolantem,
- z hlediska pevnosti jsou zajímavé S-vlákna s pevností o 40 – 70 % větší než E-vlákna,
- tato vlákna mají dle Sodomky (Sodomka, J. et al., 2008) vyšší pevnost v tahu než většina organických a anorganických vláken,
- skleněná vlákna nevykazují viskoelastické chování jako syntetizovaná vlákna,
- dále se vyznačují lepšími tepelnými vlastnostmi než ostatní materiály (mechanické vlastnosti se nezhoršují ani v případě dlouhodobého tepelného namáhání při 250°C).

Aramidová vlákna

- aramidová vlákna jsou dle Ehrensteina (Ehrenstein, W. G., 2009) nejlehčí vyztužující vlákna, díky čemuž mají vysokou měrnou pevnost v tahu,
- jsou silně anizotropní,
- co se týče špatných vlastností, jsou tato vlákna hydrofilní (do 7 %) a obtížně obrobitelná, Sodomka (Sodomka, J. et al., 2008) uvádí, že se vyznačují nižší adhezí k matici než ostatní vlákna a při působení UV záření výrazně ztrácejí pevnost,
- ve směru vláken mají mnohem vyšší mez pevnosti v tahu oproti mezi pevnosti v tlaku, kvůli čemuž se nehodí pro součástky namáhané ohybem nebo tlakem.

Dalším oblíbeným polymerním materiálem pro zpracování do vláken je např. silon, nylon, Kevlar nebo UHMW PE.

Uhlíková vlákna

- tato vlákna skládající se z více než 90 % uhlíku jsou extrémně tuhá a pevná, dle Ehrensteina (Ehrenstein, W. G., 2009) však mají nízkou tažnost a vysokou cenu,
- jsou silně anizotropní, dále se vyznačují nízkou hustotou a vysokou odolností při dlouhodobém dynamickém namáhání,
- oproti syntetickým vláknům se u nich při rostoucím zatížení zvyšuje modul pružnosti,
- jejich pevnost a modul pružnosti v tahu se odvíjejí od stupně orientace uhlíkových vrstev a četnosti vad vzniklých při výrobě, přičemž hodnoty trvají až do 500°C,
- Sodomka (Sodomka, J. et al., 2008) uvádí, že mimořádně dobře odolávají korozi a vedou teplo.

Přírodní vlákna

- jako výztuž se podle Ehrensteina (Ehrenstein, W. G., 2009) používají výhradně rostlinná vlákna s celulózovým základem,
- vyznačují se výbornou pevností v tahu, nízkou hustotou, snadným opracováním a odolností proti stárnutí,
- nevýhodou těchto vláken je chování za přítomnosti vody, špatná odolnost vůči vysokým teplotám (nad 200°C) a omezená délka,
- velmi zajímavé jsou snahy o syntetickou výrobu pavoučích vláken, viz. BioSteel.

Moderní alternativou k uvedeným druhům vláken použití materiálu PBO, prodávaného firmou Toyobo CO., Ltd. ve formě vláken pod obchodní názvem ZYLON®. Toto vlákno se dle Toyobo (Toyobo CO., Ltd., 2005) vyznačuje téměř dvojnásobnou pevností a modulem pružnosti v tahu než Kevlar®, zároveň odolá o 100°C vyšší teplotě než tento para-aramid.

Další zajímavý materiál jsou vlákna PIPD. Northolt (Northolt, M. et al., 2002) uvedl, že se tato vysokopevnostní organická polymerní vlákna vyrábějí z poly{2,6-diimidazo[4,5-b:4',5'-e]-pyridinylene-1,4 (2,5-dihydroxy)phenylenu}. Vyznačují se výjimečně vysokým modulem pevnosti v tahu (2,5 GPa) a modulem pružnosti v tahu (150 GPa). Zároveň mají oproti PBO nebo PA výrazně lepší protipožární vlastnosti.

Humár (Humár, A. et al., 2000) porovnal fyzikální vlastnosti konkrétních výrobků z uvedených materiálů, viz Tab. 1.

Druh vlákna	Skelné, E-sklo	Uhlíkové, Magmanite AS-4D	Aramidové, Kevlar 49	UHMWPE, Spectra 1000
Měrná hmotnost ρ [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	2,6	1,8	1,4	0,97
Pevnost v tahu R_m [MPa]	3 447	4 137	3 964	2 910
Modul pružnosti v tahu E [GPa]	83	241	131	110
Tažnost [%]	4,9	1,6	2,8	2,9
Kilogramová cena C_{kg} [USD.kg ⁻¹]	2,2	26,46	41,89	44,09
Cenová pevnost (R_m/C_{kg})	1 567	156	95	66
Cenová tuhost (E/C_{kg})	38	9	3	2,5
Měrná pevnost (R_m/ρ)	1 326	2 298	2 831	3 000
Měrná tuhost (E/ρ)	32	134	94	113

Tab. 1 Porovnání fyzikálních vlastností vyztužujících vláken [26]

4.2 Polymerní kompozity s částicemi

Rýglová (Rýglová, Š., 2006) zmiňuje, že oproti kompozitům vyztuženým vlákny mají tyto materiály vlivem nespojitosti výztuže horší mechanické vlastnosti. Hlavním důvodem jejich aplikace do polymerů je dle Janovce (Janovec, J., 2014) zvětšení tuhosti, dále zlepšení rozměrové stability při tepelném působení spolu se zvýšením rázové houževnatosti a modulu pružnosti materiálu, velmi důležité je také snížení ceny. V případě PA navíc dle Ptáčka (Ptáček, L., 2002) potlačují změnu tvaru vlivem absorpce vody.

Většina částicových plniv se vyrábí semletím anorganického materiálu (vápence, mastku, kaolinu, slídy apod.) na mikroskopické rozměry, díky čemuž jsou ve svém okolí schopny vlivem disipace deformační energie potlačovat rozvíjení plastických deformací v matici.

Kvůli relativně nízkému objemovému podílu výztuže (obvykle 5 – 30 %) má obvykle rozhodující vliv na vlastnosti kompozitu matrice. Velmi důležitá je také kompatibilita matrice s výztuží, která dle Lednického (Lednický, F., 2009) závisí na mezifázové adhezi, tedy na vzájemné adhezi matrice a výztuže.

4.2.1 Účinek velikosti částic na mechanické vlastnosti

Veselý (Veselý, K., 1992) uvádí, že tvrdé cizí částice obsažené v polymerní matici fungují jako tzv. koncentrátoři napětí. Materiál se chová, jako kdyby v blízkosti částic (do vzdálenosti přibližně jednoho průměru od povrchu částice) účinkovalo cca. dvojnásobné napětí. Z tohoto důvodu se větší částice stávají iniciátory lomového procesu, tedy generátory trhlin, které potom nadále rostou.

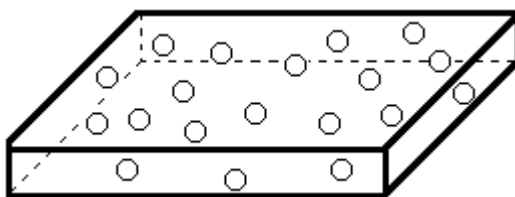
Podle Rýglové (Rýglová, Š., 2006) je kritická velikost takto působících částic pro každý polymer jiná, přičemž se odvíjí na základě jeho morfologie. Jako koncentrátoři napětí se mohou chovat také agregáty plniva, které v materiálu zůstanou po neúplné dispergaci jemných částic. Množství agregátů přirozeně roste s koncentrací plniva, což je důvodem velmi složité přípravy kompozitů obsahujících vysoké koncentrace plniv.

4.2.2 Druhy vyztužujících částic

Vyztužující částice je možné dle Rýglové (Rýglová, Š., 2006) rozdělit na sférické a nesférické.

Sférické částice

Sférický tvar, viz Obr.12, oslabuje koncentrování napětí, díky čemuž je oproti nesférickým tvarům sníženo riziko vzniku lomu v matici.

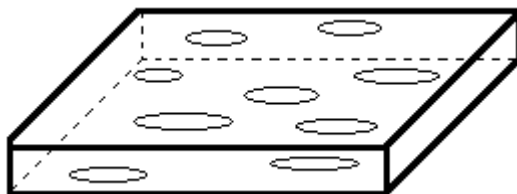


Obr. 12 Částicový kompozit - izometrický [20]

Tyto částice se vyrábějí plné (použitelné pod větším tlakem) nebo duté (snižují hustotu), většinou s průměrem 1 – 150 μm . Větší rozměry by snížily pevnost materiálu. Rýglová (Rýglová, Š., 2006) uvádí, že nejběžnější materiál těchto částic je sklo, dále uhlík a organické sloučeniny jako epoxidy a fenoly.

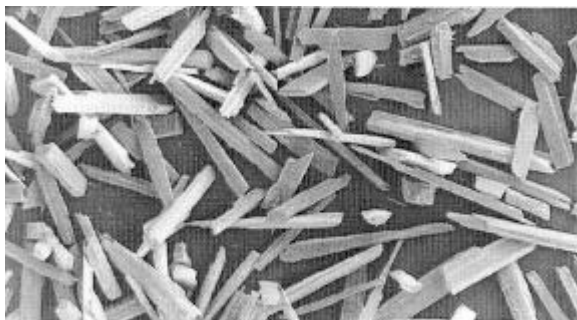
Nesférické částice

Rýglová (Rýglová, Š., 2006) uvádí, že tyto částice polymery vyztužují, a navíc zpevňují, což z nich činí tzv. aktivní částice. Většinou mají destičkový a jehlicový tvar, viz Obr. 13.



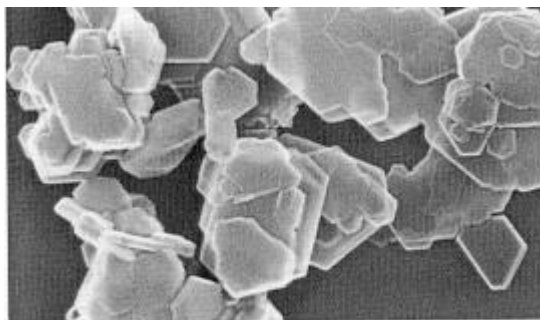
Obr. 13 Částicový kompozit - izometrický [20]

Částice mohou mít náhodnou nebo preferovanou orientaci. Obvykle to jsou přírodní nebo syntetizované minerály, kupříkladu vločky slídy (kvůli vhodnému tvaru dobře zpevní matici do všech směrů své roviny), mastek, karbonáty, wollastonit (Obr. 14) nebo kaolin (Obr. 15.)



Obr. 14 Typické částice wollastonitu [23]

100 μm



Obr. 15 Typické kaolinové destičky [23]

1 μm

Za lehké nesférické částice je možné označit také tzv. whiskery. Weeton (Weeton, J., 2010) uvádí, že se jedná o podlouhlé monokrystaly (často ve tvaru tenkých vláken) se štíhlostí podobnou nesférickým částicím. Kaniok (Kaniok, J., 2012) uvedl, že základním materiálem pro jejich výrobu je karbid křemíku a grafit.

Velmi dobře vyztužují a zlepšují houževnatost. Jejich velkou nevýhodou je, stejně jako u azbestu, neodbouratelnost v případě usazení na plicích, díky čemuž se označují jako rakovinotvorné. Často se používají v kombinaci s vlákny v hybridních kompozitech.

4.3 Nanokompozity

Jemnější fázová struktura podle Lednického (Lednický, F., 2009) zlepšuje pevnostní charakteristiky polymerního kompozitu o daném složení. To je důvodem pokusů o výrobu vláken a částic s rozměry v řádu nanometrů, u kterých se vzhledem k jejich velikosti mohou dle Lapčíka (Lapčík, L. et al., 2001) projevat i kvantové efekty, např. tunelování elektronů. Pro představu, nanometr a metr se velikostně liší zhruba stejně jako fotbalový míč a zeměkoule. Kompozity obsahující nanovýztuž se obecně nazývají nanokompozity. Příkladem této výztuže mohou být uhlíkové nanotrubičky (CNT), které dle Zhanga (Zhang, L., 2010) vynikají vysokou pevností a vynikající tepelnou i elektrickou vodivostí.

Použití nanoprvků vede k vyšší homogenizaci materiálu, což se pozitivně projevuje na fyzických vlastnostech materiálu, zároveň je množství potřebné výztuže dle Lednického (Lednický, F., 2009) pouze v řádu jednotek procent.

Složitá výroba (např. rovnoměrná dispergace výztuže) vede k velmi vysoké ceně těchto kompozitů, což brání jejich komerčnímu využití, jedná se však o atraktivní a velice aktuální oblast vědy.

4.4 Hybridní kompozity

Kratochvíl (Kratochvíl et al., 2005) zmiňuje použití hybridních kompozitů u výrobků s vysokými nároky zejména na tuhost, pevnost a houževnatost. Jak napovídá slovo hybridní, jedná se o smíšené kompozity, většinou:

- s vláknovou výztuží tvořenou více druhy vláken,
- s vláknovou i částicovou (případně nanočásticovou) výztuží,
- se směsí matric.

Použitím plniv s různými vlastnostmi se dle Janovce (Janovec, Jiří et al., 2008) rozšiřuje už tak velká škála možností využití kompozitní materiálů. Zvláště aktuální jsou hybridní nanokompozity, které jsou úzce spjaty s pokroky v oblasti nanokompozitů.

5 Lomová houževnatost polymerních materiálů s vysokou pevností

Houževnatost polymerních materiálů je vlastnost mnohem komplexnější a složitější než jejich pevnost. Existuje více definic, Vlach (Vlach, B., 2002) definuje houževnatost jako odolnost souboru mechanických vlastností vůči porušení materiálu a následnému šíření trhliny. Porušení materiálu, tedy lom, je pak singularitou vnějších deformačních procesů a vnitřních změn struktury, což značně znesnadňuje popis podmínek, za kterých vznikne.

Další faktory, které komplikují analýzu pevnostního chování polymerních materiálů, představuje přítomnost strukturních vad, závislost na vnější geometrii předmětu a výrazný vliv času s teplotou, což znemožňuje chápat pevnost pouze jako určité mezní napětí, při jehož překročení dojde k porušení materiálu. Lom je nutné brát jako proces rozvíjející se s časem za určité teploty.

5.1 Mechanické vlastnosti polymerních materiálů

Driml (Driml, B., 2012) zmiňuje, že se mechanické vlastnosti hodnotí pomocí experimentálních metod rozlišitelných například dle časového průběhu (statické, dynamické) nebo napěťové geometrie (tahové, tlakové atd.), přičemž nejčastěji je využíváno namáhání jednoosým tahem.

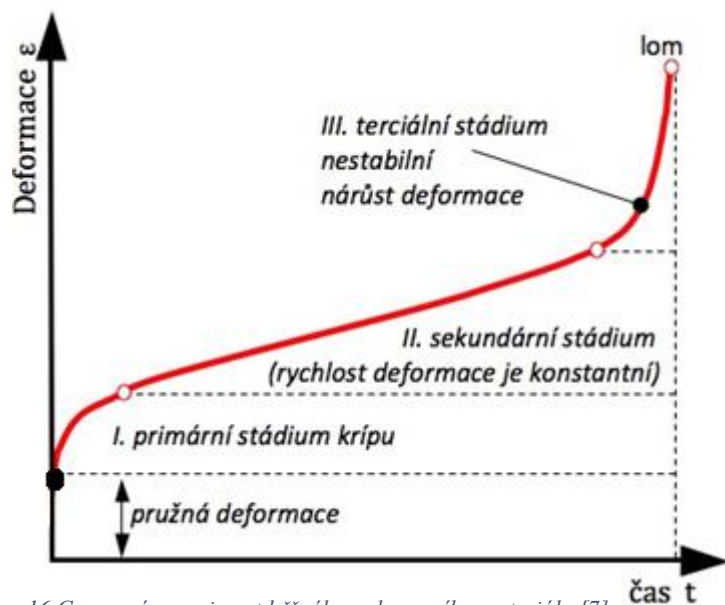
5.1.1 Hypotéza nejslabšího článku

Teorie týkající se pevnosti polymerů se podle Lapčíka (Lapčík, L. et al., 2001) nejčastěji zakládají na tzv. hypotéze nejslabšího článku. Ta říká, že o pevnosti tělesa rozhoduje selhání kritického elementu, který způsobí řetězovou reakci vedoucí k lomu tělesa.

U některých vyztužených polymerů však není tento přístup použitelný, jelikož při případném porušení prvku vyztuže (např. přetržení paralelního vlákna) dojde pouze k rozložení jím přenášeného napětí na ostatní vyztužující prvky.

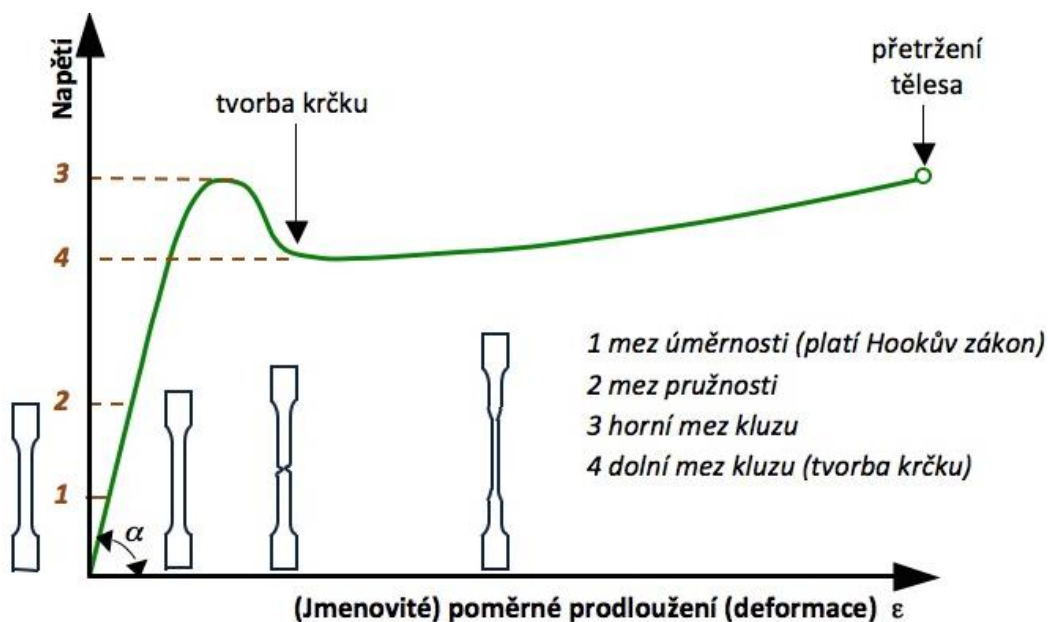
5.1.2 Tahová zkouška

Driml (Driml, B., 2012) označuje již zmíněnou tahovou zkouška jako nejrozšířenější experimentální statickou metodu pro zjišťování pevnostních vlastností materiálu. Lapčík (Lapčík, L. et al., 2001) uvádí, že má šest základních režimů – jedná se například o creepový experiment (viz Obr.16) nebo tahovou zkoušku napětí-deformace.



Obr. 16 Creepový experiment běžného polymerního materiálu [7]

Záznamem tahové zkoušky napětí-deformace je dle Laska (Lasek, S., 2013) tzv. pracovní diagram (viz Obr.17), z něhož je snadné vyjádřit houževnatost pomocí plochy pod křivkou napětí – deformace, která představuje deformační práci spotřebovanou do vzniku lomu.



Obr. 17 Smluvní pracovní diagram typický pro semikrystalické termoplasty [7]

Další využití pracovního diagramu podle Běháka (Běhálek, L., 2016) spočívá v odečtu významných pevnostních charakteristik, jako je např. Youngův modul pružnosti E , pevnost v tahu nebo tažnost.

K matematickému popisu časově závislého deformačního chování polymerů byly dle Lapčíka (Lapčík, L. et al., 2001) sestaveny tři reologické modely, na jejichž základě popisujeme viskoelasticitu, v případě velkým deformací plasticitu začínající vznikem krčku, viz. Obr. 17. Plasticita je časově a teplotně závislá změna, přičemž rozsáhlé plastické deformacemi vzniknou překročením horní meze kluzu materiálu. Podstatou viskoelasticity jsou konformační změny makromolekul, eventuálně posouvání těžišť makromolekul během viskózního toku.

5.1.3 Rázová zkouška

Houževnatost je podle Lapčíka (Lapčík, L. et al., 2001) mnohdy chápána jako protiklad k odolnosti materiálu proti křehkému lomu (křehkosti), z čehož plyne souvislost mezi houževnatostí a energií absorbovanou do doby, než dojde k porušení materiálu.

Množství absorbované energie, kterou polymer vydrží díky své pevnosti anebo naopak poddajnosti, se podle UFMI (UFMI – Fakulta technologická, 2011) obvykle stanovuje rázovou zkouškou dle Charpyho, případně zkouškou Izod. Pokud je zkušební vzorek opatřen vrubem, určí se vrubová houževnatost, pokud je povrch hladký, jedná se o rázovou houževnatost, přičemž tyto hodnoty představují energii vztaženou na průřez zkušebního vzorku. U vyztužených kompozitů je dle Ehrensteina (Ehrenstein, W. G., 2009) nutné počítat s jejich citlivostí na vruby, protože dochází vlivem zatížení ke kvaziplastickému otupení. To je způsobeno tvorbou mikrotrhlin.

5.2 Lomová mechanika

Lapčík (Lapčík, L. et al., 2001) uvádí, že nejvíce objektivní způsob hodnocení houževnatosti polymerů představují metody lomové mechaniky, které ji definují jako odpor materiálu vůči rozšiřování trhliny.

Meissner (Meissner, B. et al., 1987) zmiňuje, že rozlišujeme její dvě základní kategorie – v případě polymerních materiálů nejvíce využívanou lineární elastickou lomovou mechaniku LLM a elasto-plastickou lomovou mechaniku EPLM.

5.2.1 Kritický rozměr trhliny

Zjišťování houževnatosti se provádí na zkušebních vzorcích opatřených trhlinou o určitých rozměrech. Pokud je rozměr trhliny menší než tzv. C_{crit} , pevnost materiálu není trhlinou téměř ovlivněna (do doby, než vlivem případného napětí za určitý čas dosáhne C_{crit}). Pokud je trhlina větší než C_{crit} , dojde podle Lapčíka (Lapčík, L. et al., 2001) v místě jejího výskytu k lomu. Lasek (Lasek, S., 2013) uvádí, že rozměr skutečné trhliny se určuje defektoskopickou metodou, nejčastěji ultrazvukem.

5.2.2. Lomová houževnatost

Na otázku ještě přípustného rozměru trhliny v materiálu (při určitém napětí) se dle Lapčíka (Lapčík, L. et al., 2001) snažil odpovědět A.W. Griffith. Vyslovil domněnku, podle které se trhlina začne šířit, pokud je úbytek plastické energie v tělese, vzniklý šířením trhliny, stejný nebo větší v porovnání s nárůstem celkové energie nově vzniklé plochy. Podle této úvahy byl odvozen vztah mezi velikostí trhliny a pevností v tahu, na jehož základě určujeme tzv. lomovou energii. Ta je spolu s faktory intenzity napětí (K_I , K_{II} , K_{III}), které představují tři odlišné způsoby působení vnějšího napětí na trhlinu, hlavním parametrem lineární lomové mechaniky.

Nejdůležitější ze zmíněných faktorů je K_I , který definuje tahovou napjatost před špicí trhliny u excentricky namáhaného tělesa opatřeného jedním bočním vrubem. Kritická hodnota K_I , při níž trhlina ztratí stabilitu, je tzv. lomová houževnatost K_{Ic} . Lasek (Lasek, S., 2013) uvádí, že pokud platí $K_I < K_{Ic}$, materiál s trhlinou se neporuší, v opačném případě nastane lom.

Hodnotu lomové houževnatosti, v případě vyztužených polymerů, ovlivňuje velké množství navzájem kombinovatelných faktorů znesnadňujících její popis. Janovec (Janovec, J. et al., 2008) uvádí, kromě času a teploty, především objemový podíl výztuže, houževnatost matrice, rozměry a vzájemnou vzdálenost vyztužujících prvků, soudržnost všech fází a přítomnost dutin, které vznikají na fázovém rozhraní.

Pokud bychom uvažovaly nelineárně pružný systém, což je vhodné u polymerů s větší tažností, je dle Lapčíka (Lapčík, L. et al., 2001) namísto použití pro popis uvolňování energie během růstu trhliny tzv. *J-integrál* (EPLM). Pokud však potlačíme plasticitu zkušebního vzorku vhodně zvoleným tvarem a vnějšími podmínkami, není to nutné.

5.2.3 Lomová plocha vyztužených polymerních materiálů

Lomová plocha dává dle Lednického (Lednický, F., 2009) odpověď na otázku, zda je výztuž uložena optimálně vzhledem k namáhání materiálu. Kritickým parametrem lomové plochy je mezifázová adheze. Pokud je menší než pevnost matrice, dojde k porušení mezifáze a vzniklý lom kopíruje hranici mezi výztuží a matricí. Častým příkladem materiálu s nízkou mezifázovou adhezí jsou polymery vyztužené částicemi.

V případě, že má mezifáze větší pevnost než matrice, rozšiřuje se vznikající lom nezávisle na výztuži. Hodnotu mezifázové adheze je dle Lednického (Lednický, F., 2009) možné odhadnout z míry obalení výztuže, která se v lomu vždy objeví.

5.2.4 Rozptýlení výztuže

Rýglová (Rýglová, Š., 2006) zmiňuje, že při výrobě polymerů vyztužených částicemi je klíčové zajistit co nejvíce rovnoměrné rozptýlení výztuže, díky čemuž se sníží množství koncentrátorů napětí. Napětí vznikající v okolí určité částice je ovlivněno především částicí, která s ní sousedí. V případě jisté kritické vzdálenosti, která je pro každou matrici jiná, dochází k překrývání napěťových polí částic, což může mít za následek zvýšení napětí nad kritickou mez. V takovém případě dochází ke vzniku vad, které snižují lomovou houževnatost kompozitu.

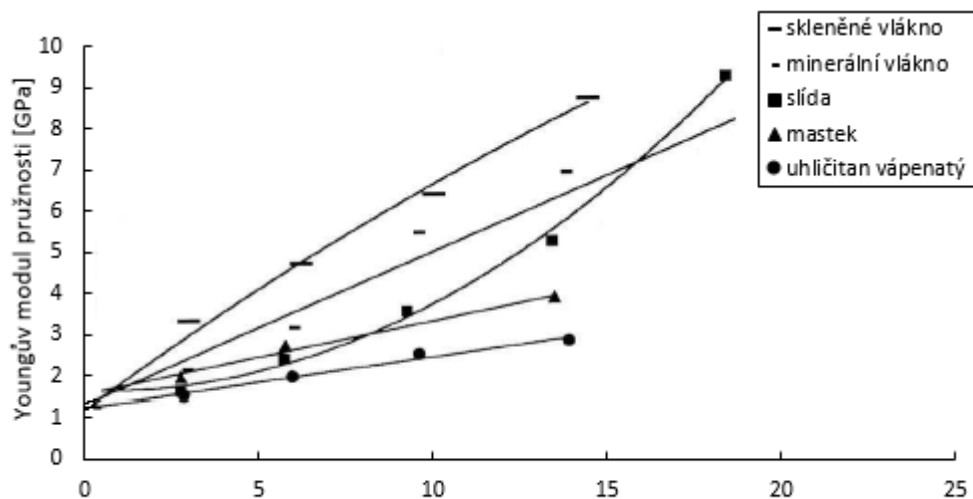
5.2.5 Vliv mezifáze

Ehrenstein (Ehrenstein, W. G., 2009) definuje mezivrstvu (mezifázi) jako proměnlivou oblast materiálu oddělující výztuž a matrici, mnohdy s odlišnými vlastnosti vzhledem k oběma fázím. Její základní funkce spočívá v přenosu napětí z matrice na vlákna, v menší míře se podílí na ochraně výztuže.

Rozlišujeme tzv. mezifázi neřízenou a řízenou. Řízená mezifáze vzniká nanesením funkční vrstvy na výztuž, díky čemuž dojde k dokonalejší smáčivosti, a tím i pevnějšímu spojení matrice s výztuží. Následkem toho se zlepší mechanické vlastnosti, včetně lomové houževnatosti.

5.2.6 Vliv velikosti výztuže

Nezbedová (Nezbedová, E., 2011) uvádí, že velikost vyztužujících prvků významně ovlivňuje základní mechanické vlastnosti polymerních kompozitů, například jejich Youngův modul pružnosti (viz Obr.18), a tím i výslednou lomovou houževnatost kompozitu. S rostoucí velikostí prvků výztuže zároveň klesá vliv velikosti mezivrstvy na modul pružnosti kompozitu.



Obr. 18 Efekt velikosti výztuže na Youngův modul pružnosti kompozitu PP-H [23]

5.2.7 Mechanismy zvýšení lomové houževnatosti

Isotropní polymerní materiály

Výztuž v těchto materiálech dle Lapčíka (Lapčík, L. et al., 2001) nutí matici k rozvoji lokálním plastickým deformací, které pohlcují a rozptylují vnější mechanickou energii vzniklou nárazem do velkého objemu, čímž se zabraňuje rozvoji jediné kritické křehké trhliny. Je však nutná dobrá mezifázová adheze a zajištění kritické vzdálenosti mezi prvky výztuže. Při použití vláken s vysokou tažností je popsán efekt výrazně navýšen.

Anizotropní polymerní materiály

V případě anizotropních materiálů dochází podle Lapčíka (Lapčík, L. et al., 2001) vlivem výztuže k strukturním mechanismům, které zastavují rozvoj trhliny a tím přímo zvyšují hodnotu kritické lomové houževnatosti K_{Ic} . V těchto materiálech se zpravidla nejsilněji projevuje tzv. Cook-Gordonův mechanismu, který spočívá v otupování a odchýlení hlavní trhliny vlivem příčné trhliny. Velkou výhodou CG mechanismu je jeho minimální ovlivnitelnost nízkými teplotami.

6 Závěr

Vysokopevné polymerní materiály jsou vzhledem k obrovské variabilitě vlastností při výhodných cenách stále více využívány jako náhrada za obvyklé dražší materiály, a to prakticky ve všech průmyslových odvětvích.

Požadovaným výsledkem zpracování tématu Vysokopevné polymerní materiály bylo sepsání srozumitelné literární rešerše na základě pravdivých informací. Měla obsahovat základní poznatky k pochopení dané problematiky, od stavby polymerních materiálů po jejich pevnostní charakteristiky, čehož bylo dle mého mínění v rámci možností dosaženo. Její další vývoj je možný v souvislosti s využitím v navazující diplomové práci, která by teoreticky mohla přinést nová fakta do oblasti polymerních materiálů s vysokou pevností.

Při psaní této práce jsem vycházel z informací obsažených v uvedené literatuře. I přes velké množství zdrojů jsem nenarazil na žádný, který by souvisle a aktuálně shrnoval vědomosti týkající se problematiky polymerních materiálů zpevněných krátkovláknitou a částicovou výztuží, spolu s jejich mechanickými charakteristikami.

Na základě této rešerše jsem posléze došel jsem k názoru, že polymerní kompozity, zejména hybridní nanokompozity, jsou materiálem budoucnosti, kromě jiného kvůli kvantu svých výjimečných vlastností. V cestě jejich masové produkci stojí především technologická a finanční náročnost výroby, vyřešení těchto problémů je však nejspíš pouze otázkou času.

S rostoucí produkcí polymerních materiálů roste i množství z nich vznikajícího odpadu. S ohledem na tuto skutečnost si myslím, že by v budoucnu mělo být věnováno více pozornosti otázkám jejich recyklace a biologické odbouratelnosti.

7 Seznam použité literatury

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1995. ISBN 80-7080-241-3
- [2] MLEZIVA, Jaroslav. Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7
- [3] SODOMKA, Jaromír; MACHEK, Václav. Polymery a kompozity s polymerní matricí. Nauka o materiálu. 4. část. Praha: ČVUT, 2008. ISBN 9788001039274
- [4] VESELÝ, Karel. Polymery: struktura, syntézy, vlastnosti, zpracování. 1. vyd. Brno: Česká společnost průmyslové chemie, 1992, 178:80-02
- [5] MEISSNER, Bohumil; ZILVAR, Václav, Fyzika polymerů: struktura a vlastnosti polymerních materiálů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987
- [6] SOJKA, Jaroslav; VÁŇOVÁ, Petra, Základy progresivních konstrukčních materiálů [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012 [cit.2017-03-05]. Dostupné z: http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ZPKM/OPORA_PROGRESIVNI_MATERIALY.pdf
- [7] BĚHÁLEK, Luboš. Polymery [online]. Střední odborné učiliště Svitavy, 2016 [cit.2017-03-08]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [8] HUSÁREK, Josef, Makromolekulární látky, syntetické polymery [online]. Investice do rozvoje vzdělávání, 2013 [cit.2017-03-09]. Dostupné z: ucitelchemie.upol.cz/materialy/studijni_texty/vyukova_temata/plasty_text.pdf
- [9] LEDERER, Jaromír. Polyvinylchlorid [online]. Ústí nad Labem: UJEP [cit.2017-03-04]. Dostupné z <http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/PVC07022013.pdf>
- [10] TRUNDA, Lukáš, Specifikace materiálu: Kevlar [online]. odetka.cz, 2016 [cit.2017-03-04]. Dostupné z: http://www.odetka.cz/net20/cz/hitech_snury_specmat_kevlar.aspx
- [11] LEDNICKÝ, František. Mikroskopie a morfologie polymerů díl 2.. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN: 978-80-7372-487-0
- [12] PROKOPOVÁ, Irena. Makromolekulární chemie. 2. vyd. Praha: VŠCHT Praha, 2008, ISBN: 978-80-7080-662-3

- [13] LAPČÍK, Lubmír; RAAB Miroslav. Nauka o materiálech II. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2001. ISBN: 8023865277
- [14] KURTZ, M. Steven. UHMWPE Biomaterials Handbook. 2. vyd. London: Elsevier, 2009. ISBN: 978-0-12-374721-1
- [15] Braskem.com [online]. Frankfurt am Main [cit.2017-03-05]. Dostupné z: http://www.braskem.com/Portal/Principal/Arquivos/Download/Upload/AF_UTEC_2013_145.pdf
- [16] MORAVEC, Jaromír, Studijní materiály – polyestery[online]. Technická univerzita v Liberci, 2008 [cit.2017-03-05]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/p14/polyestery.pdf
- [17] EHRENSTEIN, W. Gotfried, Polymerní kompozitní materiály. 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN: 97880886960296
- [18] JANOVEC, Jiří, Nauka o materiálu I. [online]. Praha: Ústav materiálového inženýrství – Fakulta strojní, 2014 [cit.2017-03-06]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
- [19] ZHAO, Yongsheng et al., Tailoring the crystalline morphology and mechanical property of olefin block copolymer via blending with a small amount of UHMWPE. Polymer (United Kingdom), London: Elsevier, 2017. ISSN: 0032-3861
- [20] LAŠ, Vladislav, Mechanika kompozitních materiálů – 1 [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009 [cit.2017-03-08]. Dostupné z: <http://www.kme.zcu.cz/download/predmety/229-umm-6.pdf>
- [21] RÝGLOVÁ, Šárka, Částicové kompozitní materiály a některé jejich bioaplikace [online]. Praha: Ústav struktury a mechaniky hornin AV, 2006, [cit.2017-03-09]. Dostupné z: https://www.irsm.cas.cz/materialy/oddeleni/5/bulletin/2006_bulletin.pdf
- [22] PTÁČEK, Luděk et. al., Nauka o materiálu II. 1. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [23] NEZBEDOVÁ, Eva, Vývoj v oblasti kompozitu s částicovým plnivem [online]. Brno: Polymer Institute Brno, 2011, [cit.2017-03-10]. Dostupné z: http://www.csm-kompozity.wz.cz/Vyvoj_kompozitu.pdf

- [24] Vláknové kompozitní materiály, jejich vlastnosti a výroba [online]. Praha: ČVUT – Fakulta strojní, 2007 [cit.2017-03-10]. Dostupné z: http://www.kompozity.info/seminar/2_seminar/1_materialy_technologie.pdf
- [25] WEETON, John. W. et al., Engineer's Guide to Composite Materials, American Society for Metals, 2001, ISBN: 0871702266, 9780871702265
- [26] HUMÁR, Anton et al., Technologie zpracování nových kompozitních materiálů tuzemské výroby. Brno: Ústav strojírenské technologie FSI-VUT, 2000. 154. s.
- [27] PBO fiber ZYLON [online]. Toyobo CO., Ltd., 2005, [cit.2017-03-011]. Dostupné z: <http://www.toyobo-global.com/seihin/kc/pbo/zylon-p/bussei-p/technical.pdf>
- [28] NORTHOLT, Maurits G. et al., PIPD, a new high-modulus and high-strength polymer fibre with exceptional fire protection properties. Fire and Materials, červen 2002, vol. 26, s. 169-172
- [29] KANIOK, Jozef, Kompozity ve strojírenství [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci – Fakulta strojní, 2012 [cit.2017-03-11]. Dostupné z: http://www.kts.tul.cz/content/files/podklady/INKompozity_ve_strojirenstvi.pdf
- [30] KRATOCHVÍL, Bohumil et al., Úvod do studia materiálů. Praha: VŠCHT v Praze, 2005, ISBN 80-7080-568-4
- [31] JANOVEC, Jiří et al., Perspektivní materiály. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2008. ISBN: 978-80-01-04167-3
- [32] ZHANG, Liangchi, Advanced Materials Research. Trans Tech Publications. 9. prosince 2010, vol. 139, s. 1-8
- [33] VLACH, Bohumil, Houževnatost materiálu a Charpyho zkouška [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2002 [cit.2017-03-12]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-2044-8.pdf>
- [34] LASEK, Stanislav, Základy degračních procesů [online]. Ostrava: VŠB – TUO, 2013 [cit.2017-03-15]. Dostupné z: http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/03_Materialov%C3%A9_inzenyrstvi/01_Zaklady_degradacnich_procesu/Lasek_Zaklady_degradacnich_procesu.pdf

- [35] DRIML, Bohuslav, Metody zkoušení mechanických vlastností materiálů [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012 [cit.2017-03-15]. Dostupné z: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf
- [36] Kontrola a zkušební metody [online]. Praha: Ústav fyziky a materiálového inženýrství – Fakulta technologická, 2011 [cit.2017-03-16]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_11.pdf