

Polymery vyztužené modifikovanými vláknovými plnivými

Bc. Rudolf Čechal

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Rudolf ČECHAL**
Osobní číslo: **T09829**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Polymery vyztužené modifikovanými vláknovými plnivými.**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerži na dané téma
2. Přípravte a modifikujte zkušební tělesa
3. Provedte mechanické zkoušky
4. Vyhodnoďte naměřené výsledky zkoušek

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Fyzika polymerů – Meissner B.

Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů – Jančář J.

Applied Radiation Chemistry: Radiation Processing – Woods R., Pikaev A.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michal Daněk
BGS

Datum zadání diplomové práce:

14. února 2011

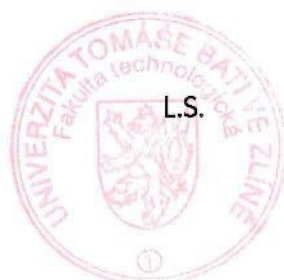
Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2011

Ve Zlíně dne 11. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: ČECHAL RUDOLF

Obor: KTZ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;

- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 11.5.2011

Čech

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Náplní této diplomové práce je využití radiačně sesíťovaných LLDPE vláken jako kompozitních plniv. Teoretická část se zabývá danou problematikou. Praktická část popisuje zkoušení vláken, míchání směsí, přípravu zkušebních vzorků a jejich mechanické zkoušky. Vláknina byla smíchána s LDPE práškem v daných poměrech.

Klíčová slova: vlákna, radiační síťování, tahová zkouška, rázová zkouška, kompozit

ABSTRACT

The master of this thesis is the use of radiation cross-linked LLDPE fibres as composite fillers. The theoretical part deals with the issue. The practical part describes the testing of fibres, mixing, preparation of specimens and mechanical testing. The fibres were blended with LDPE powder in the given proportion.

Keywords: fibres, radiation cross-linking, tensile test, impact test, composite

Rád bych touto cestou poděkoval firmě *Baumhüter extrusion GmbH* za poskytnutí vláknové stříže, firmě *BGS - Beta Gamma Service* za radiační sesíťování těchto vláken a především Ing. Daňkovi a Ing. Holíkovi za poskytnutou pomoc a cenné rady týkající se této práce. Dále bych rád poděkoval doc. Stoklasovi, doc. Pavlínkovi, Ing. Žalůdkovi Ph.D., Ing. Šumberovi, Dr. Knackovi a ostatním, kteří mi vyšli vstříc při realizaci této práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské/diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....

Podpis studenta

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 PLASTY A KOMPOZITY	13
1.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA PLASTŮ	13
1.2 DĚLENÍ POLYMERŮ	13
1.3 KOMPOZITY	15
1.3.1 Matrice	15
1.3.2 Plniva	15
1.4 VÝROBA VLÁKEN	17
1.4.1 Zvlákňování z roztoku	17
1.4.2 Zvlákňování z taveniny	18
1.4.3 Zvlákňování v plastickém stavu	18
1.4.4 Úprava vláken	19
1.5 PE VLÁKNA A MATRICE, JEJICH IMPREGNACE	19
1.5.1 Impregnace PE vláken	19
2 SÍŤOVÁNÍ	22
2.1 RADIKÁLOVÁ POLYMERACE	23
2.2 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ	24
2.2.1 Radiační síťování vlivem beta záření	25
2.2.2 Radiační síťování vlivem gama záření	26
2.2.3 Srovnání metod radiačního síťování	26
2.2.4 Důvody a oblast použití radiačního síťování	27
2.2.5 Oboustranné radiační ozařování	27
3 IONIZAČNÍ ZÁŘENÍ	29
3.1 DRUHY IONIZAČNÍHO ZÁŘENÍ	29
3.1.1 Záření alfa	29
3.1.2 Beta záření	30
3.1.3 Záření gama	31
3.2 JEDNOTKY VELIČIN IONIZAČNÍHO ZÁŘENÍ	32
3.3 ZDROJE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ	32
3.3.1 Urychlovače elektronů	32
3.3.2 Gama záření	33
3.4 MĚŘENÍ IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ	34
3.4.1 Dozimetrické přístroje	34
3.4.2 Radiometrické přístroje	35
3.4.3 Spektroskopické přístroje	35
3.4.4 Přístroje pro stanovení interakcí mezi zářením a hmotou	35
4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLU	36

4.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	36
4.2	TAHOVÁ ZKOUŠKA	37
4.3	RÁZOVÁ ZKOUŠKA	40
II	PRAKTICKÁ ČÁST	41
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	42
6	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	43
7	VÝROBA A ÚPRAVA <i>LLDPE</i> VLÁKEN A <i>LDPE</i> PRÁŠKU	44
8	ZKOUŠENÍ VLÁKEN	45
8.1	ZKOUŠKA TEPELNÉHO A TEPELNĚ MECHANICKÉHO ZATĚŽOVÁNÍ VLÁKEN	45
8.1.1	Princip zkoušky	45
8.1.2	Postup	45
8.1.3	Dosažené výsledky	46
8.2	DSC - DIFERENČNÍ SKENOVACÍ KALORIMETR	48
8.2.1	Princip zkoušky	48
8.2.2	Postup	48
8.2.3	Dosažené výsledky	49
9	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	51
9.1	MÍCHÁNÍ SMĚSI VLÁKEN A <i>LDPE</i> PRÁŠKU	51
9.2	GRANULACE	52
9.3	VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	53
9.4	KONTROLA DISTRIBUCE VLÁKEN VE ZKUŠEBNÍCH VZORCÍCH	55
9.4.1	Princip zkoušky	55
9.4.2	Postup	55
9.4.3	Dosažené výsledky	56
10	MECHANICKÉ ZKOUŠKY	57
10.1	ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI	57
10.1.1	Princip zkoušky	57
10.1.2	Postup	57
10.1.3	Dosažené výsledky	58
10.2	TAHOVÁ ZKOUŠKA	59
10.2.1	Princip zkoušky	59
10.2.2	Postup	59
10.2.3	Dosažené výsledky	59
11	STANOVENÍ MOŽNOSTÍ BUDOUCÍHO VYUŽITÍ TOHOTO MATERIÁLU	63
12	ZÁVĚR	64
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	66
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	70
	SEZNAM OBRÁZKŮ	71

SEZNAM TABULEK	73
SEZNAM GRAFŮ.....	74
SEZNAM PŘÍLOH	75

ÚVOD

Při výběru diplomové práce mě zaujalo téma Polymery vyztužené modifikovanými vláknovými plnivými. Využití polymerních vláken jako kompozitní výztuže polymerní matrice, jakým způsobem a do jaké míry může toto spojení ovlivnit mechanické vlastnosti výsledného materiálu, toto upoutalo mou pozornost. Z toho důvodu jsem přivítal možnost prostudovat chování ozářené vláknové stříže z LLDPE a možnosti jejího využití jako plniva nízkohustotního polyetyleny. V dnešní době stále hojnějšího rozšiřování škály využití polymerních materiálů a jejich pronikání do nejrůznějších odvětví lidské činnosti je možnost podílet se na výzkumu nového typu kompozitního materiálu vítanou výzvou a příležitostí.

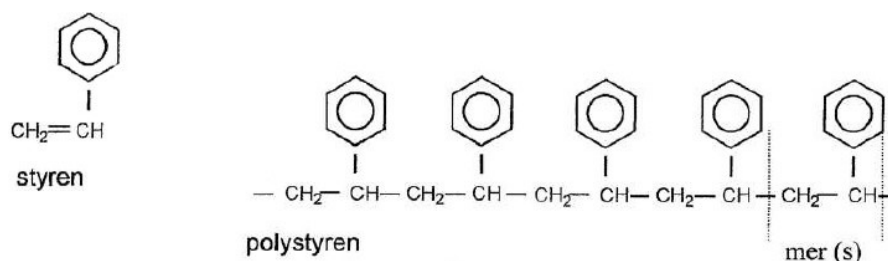
Při přípravě tohoto kompozitu bylo hlavním předmětem zájmu zjištění, do jaké míry se podepíše vliv radiačního síťování vláknové stříže na výsledné vlastnosti materiálu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PLASTY A KOMPOZITY

1.1 Základní charakteristika plastů

Plasty jsou tvořeny makromolekulárními organickými látkami (polymery) a různými příměsemi. Polymery se skládají z velkého počtu opakujících se stavebních jednotek – merů (Obr. 1). Mohou být jak syntetického, tak i přírodního původu. Jejich řetězce tvoří atomy uhlíku a vodíku, na které se váží další prvky, jako například kyslík, dusík nebo fluór. Příměši přidávané do plastů ovlivňují zpracovatelské a užitné vlastnosti, popřípadě snižují cenu výrobku. Jsou to například změkčovadla, barviva, plniva, antidegradanty, antioxidanty a mnoho dalších.



Obr. 1 Příklad polymeru (meru) [1]

1.2 Dělení polymerů

Základní rozdělení polymerních materiálů je z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty. Dělíme je tedy do dvou základních skupin na plasty (termoplasty a reaktoplasty) a elastomery (kaučuky). Plasty jsou za běžných podmínek tvrdé, často i křehké a za zvýšené teploty se stávají plastickými. [1]

Termoplasty – jsou na rozdíl od reaktoplastů opakovaně tavitelné. Zpracovávají se nejčastěji ve formě taveniny použitím rozličných technologií. Do této skupiny plastů se řadí například polyolefiny, polyestery nebo polyamidy.

Reaktoplasty – Nejsou opakovaně tavitelné. Po jejich zahřátí dojde k chemické reakci a sesíťování. Tyto polymery mají lepší mechanické vlastnosti než termoplasty, jsou tužší, tvrdší, odolnější proti korozi a zvýšeným teplotám. Naopak se zhoršuje jejich tažnost. Patří sem například fenoplasty, aminoplasty nebo epoxidové pryskyřice.

Dále se dělí polymerní látky podle jejich původu na:

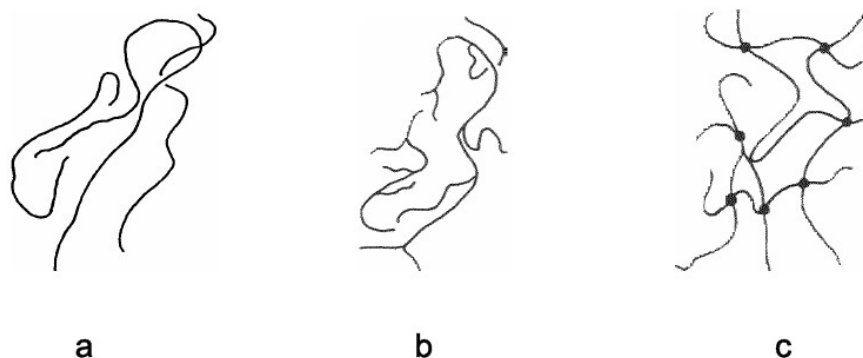
- Přírodní (biopolymery), mezi ty patří například celulóza, přírodní kaučuk atd.
- Syntetické, vyráběné uměle například z ropných produktů

Syntetické polymery se dělí podle druhu reakce, kterou vznikají:

- Polymerace
- Polykondenzace
- Polyadice

Podle tvaru molekul (Obr. 2) na

- Lineární (Obr. 2 a)
- Rozvětvené (Obr. 2 b)
- Sesíťované (Obr. 2 c)



Obr. 2 Rozdělení polymerů podle tvaru molekul [1]

Polymerní látky se dělí také podle stupně krystalinity – stupně uspořádanosti na nadmolekulární úrovni na:

- Amorfní, makromolekuly jsou uspořádány nahodile. Jsou tvrdé, křehké, průhledné a dobře rozpustné v organických rozpouštědlech. Patří sem například PS, PC nebo PMMA.
- Krystalické (semikrystalické), pravidelně uspořádané makromolekulární řetězce. Jsou houževnaté, mléčně zakalené a s rostoucím stupněm krystalinity se zvyšuje jejich pevnost. V organických rozpouštědlech se rozpouští špatně, popřípadě vůbec. Do této skupiny patří například PE nebo PP.

1.3 Kompozity

Jako kompozity označujeme složené heterogenní systémy, tvořené minimálně dvěma složkami nebo fázemi, které mají rozdílné fyzikální vlastnosti. Jejich výsledné vlastnosti jsou lepší, než pouhý součet vlastností jednotlivých složek. Například železobeton, sklolaminát nebo pneumatiky. [15,17]

1.3.1 Matrice

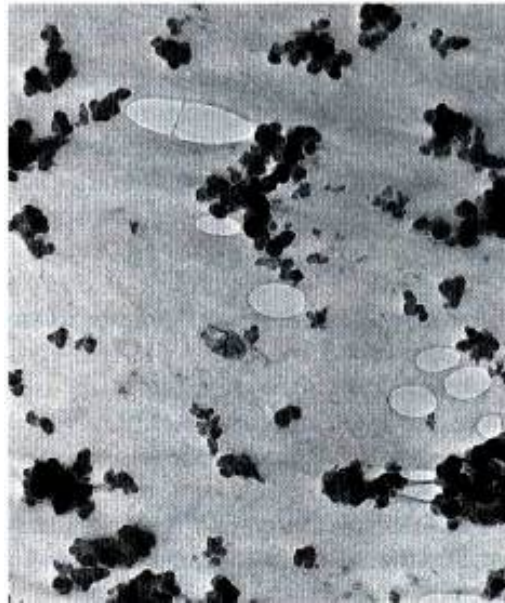
Polymerní matrice má za úkol zafixovat vláknovou výztuž do požadovaného geometrického uspořádání, přenášet zatížení do výztuže, zabránit destruktivním deformacím výztuže v místech tlakového zatížení a ochránit výztuž před působením škodlivých vlivů. Matrice se podle použitého materiálu dělí na termoplastické a matrice z reaktoplastů. Toto rozdělení dále určuje schopnost jejich opětovného tavení a použití. Nejčastěji používanými maticemi jsou matrice z reaktoplastů. Důležitá je dobrá adheze mezi maticí a plnivem, jakož i dostatečná tažnost matrice. [16,18]

1.3.2 Plniva

Plniva jsou příměsi přidávané do polymerní matrice ke zlepšení jejich užitných vlastností, popřípadě ke snížení ceny výsledného výrobku.

Kompozity s částicovými plnivy

Částice jsou obvykle anorganického původu a mohou mít kulovitý, destičkovitý, jehlicovitý nebo nepravidelný tvar. Nejčastěji používanými plnivy jsou vápenec, oxidy křemíku, hořčíku a hliníku, skleněné mikrokuličky, slída nebo mikročástice kovů. Tyto plniva značně mění mechanické vlastnosti jako je modul pružnosti, houževnatost, tvrdost atd. Příklad polymerního materiálu plněného částicovými plnivy je na Obr. 3, kde je pryž plněna kulovými částicemi uhlíku. Oválné útvary připomínající vodní kapičky jsou malé vzduchové bubliny v pryži a tmavé objekty pak uhlíkové částice. [1,15]



Obr. 3 Pneumatika – zvětšení 80 000x [15]

Kompozity s vláknovou výztuhou

Vláknové výztuže jsou k dispozici v lineární, plošné nebo prostorové formě. Vlákna mají výrazně vyšší pevnost v tahu než příslušný kompaktní materiál. Nejčastěji používanými vlákny jsou vlákna skleněná, uhlíková a aramidová (např. kevlarová). Vlákna se na povrchu chemicky upravují tak, aby se na rozhraní matrice a vlákna vytvořily pevné chemické vazby. Významnou kvantitativní charakteristikou kompozitních vláknových plniv je poměr modulu pružnosti vlákna a hustoty vlákna a poměr pevnosti v tahu vlákna a hustoty vlákna. Tyto poměry rozhodují o výsledné hmotnosti konstrukce. Obecně platí, že se zvyšujícím se obsahem výztužných vláken až do podílu 80% se zlepšují mechanické vlastnosti kompozitu. Všechna vlákna musí být dokonale smočena pojivem (matricí). Nejčastěji používanými polymerními matricemi pro polymery plněné vlákny jsou matrice z reaktoplastů, např. polyesterové pryskyřice. Jejich viskozitu lze snadno ovlivňovat podílem reaktivního rozpouštědla (styrenu), ztužujícími přísadami a plnivy. Krátké doby vytvrzování se s výhodou využívá při hromadné výrobě. Obvyklý poměr objemového podílu vláken a matrice je 0.65/0.35. Nejlepší mechanické vlastnosti a dostatečnou tepelnou i chemickou odolnost mají matrice z epoxidových pryskyřic. [1,15,16,17]



Obr. 4 Fázové rozhraní vlákno – matrice [17]

1.4 Výroba vláken

Technologie výroby polymerních vláken se nazývá zvlákňování. Jedná se o postup, při kterém se z roztoku, taveniny, nebo zplastikovaného vláknotvorného polymeru protlačováním přes otvory trysek mění vytvořený kapalný proud na tuhé vlákno. [1,3]

Požadavky na materiály zpracovávané zvlákňováním:

- Dostatečně velký a rovnoměrný polymerační stupeň
- Lineární makromolekuly bez objemných bočních skupin
- Pravidelně se opakující polární skupiny, které umožní uplatnění silných mezimolekulárních vazeb
- Prostorově pravidelná struktura, a tím alespoň částečná krystalinita
- Určitý stupeň tuhosti řetězce
- Schopnost rozpouštět se na dostatečně koncentrované roztoky nebo se tavit při teplotě podstatně nižší, než je teplota rozkladu [3]

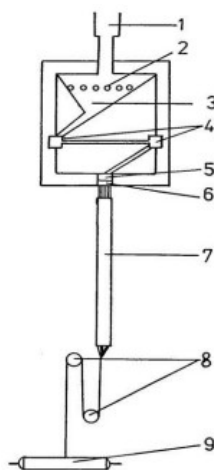
1.4.1 Zvlákňování z roztoku

Používá se buď pro polymery, které mají příliš velký interval mezi teplotou měknutí a teplotou tání a naopak malý rozdíl mezi teplotou tání a teplotou rozkladu, nebo pro materiály snadno podléhající tepelné degradaci. Při tomto procesu je důležitá volba rozpouštědla. Po rozpuštění polymeru se jednotlivé šarže roztoku homogenizují, filtrují a

odvzdušňují. Při zvlákňování dochází ke zpětnému získávání tuhého polymeru ve formě vlákna buď vysrážením (mokrý způsob), nebo vysušením (suchý způsob). [1,3]

1.4.2 Zvlákňování z taveniny

Oprati zvlákňování z roztoku má několik výhod. Nepracuje se s rozpouštědly, odpadá tedy rozpouštění polymerů, filtrace roztoků, jejich odvzdušňování, regenerace rozpouštědel atd. V porovnání se zvlákňováním z roztoku jsou také 3 až 5 krát vyšší odtahové rychlosti. Nevýhodou je složitější a materiálově náročnější zpracovatelské zařízení, z důvodu zvlákňování polymerů za vysokých teplot (většinou nad 220°C) a v neoxidující atmosféře. Schéma zařízení pro zvlákňování z taveniny je uvedeno na Obr. 5. [1,3]



Obr. 5 Zvlákňovací
zařízení [1]

- 1 – násypka, 2 – tavící rošt, 3 – jímka taveniny, 4 – čerpadla, 5 – filtr, 6 – zvlákňovací trysky, 7 – zvlákňovací šachta, 8 – odtahové zařízení, 9 – navíjecí cívka

1.4.3 Zvlákňování v plastickém stavu

Tento postup je obdobou zvlákňování z taveniny. Zplastikovaný materiál se vytlačuje vysokým tlakem otvory trysky podobně jako při vytlačování nebo vstřikovávání. Používá se jej hlavně pro polymery, které snadno degradují a jsou špatně rozpustné v běžných rozpouštědlech (např. polyolefiny). [1,3]

1.4.4 Úprava vláken

Maximální pevnosti vláken se dosáhne až po jejich *dloužení* (orientaci - mechanickém protažení až na několikanásobek původní délky). Vlákná se dluží většinou mezi dvěma válečky odvalujícími se různou obvodovou rychlostí. Stupeň prodloužení je tedy řízen různou rychlostí otáčení válečků při stejném průměru. Vlákná se mohou dlužit buď bezprostředně po zvláknění polymeru, nebo častěji odděleně. [1,3]

1.5 PE vlákna a matrice, jejich impregnace

Tuhost a pevnost polymerních vláken je různá v závislosti na jejich morfologii a použitém pojivu (matrici). V posledních několika desetiletích bylo vyvinuto mnoho vysokopevnostních polymerních vláken, při jejichž použití získává materiál pevnost a tuhost srovnatelnou s hliníkem nebo dokonce ocelí. Nejběžněji používané jsou aramidové a polyetylenové vlákna. Polyetylenové vlákna jsou chemicky odolné proti většině rozpouštědel, mají nízký součinitel tření, jsou biologicky nezávadné a hydrofobní. [26,27]

Výsledné mechanické vlastnosti se výrazně liší v závislosti na použité polymerní matrici. Při použití polyetylenových vláken a epoxidových nebo polyesterových matric dochází k potížím při jejich vzájemném propojování z důvodu chemické netečnosti polyetylenu. Z důvodu vysoké adheze a chemické kompatibility vláken a matrice vznikl koncept jednosložkových kompozitů. PE matrice má však vyšší viskozitu než např. nevytvrzená epoxidová pryskyřice a dojde tedy ke zhoršení tokových vlastností taveniny. [26,27]

1.5.1 Impregnace PE vláken

Nejdůležitějším krokem při výrobě kompozitu s PE vlákny a PE matricí je impregnace vláken. Tento proces zajišťuje dobré pronikání matrice mezi svazky vláken, smočení všech vláken a rovnoměrné rozložení vláken v matrici. Při výrobě jednosložkových PE kompozitů se využívá několika postupů. Nejpoužívanějšími metodami jsou filmová stohovací technika a prášková impregnace s následným zalisováním za zvýšené teploty. Při výrobě kompozitu filmovou stohovací metodou se střídavě nanáší velmi tenké vrstvy vláken a matrice, které se následně za působení tepla slisují. Alternativní metoda výroby je založena na zhutňování vláken za zvýšené teploty bez použití jakékoliv matrice. Nevýhodou této metody je velmi

úzký rozsah zpracovatelských teplot, při kterých nedochází k poškození vláken. Také impregnace PE vláken pomocí taveninové metody je tedy relativně složitá. [26,27]

Způsoby impregnace PE vláken:

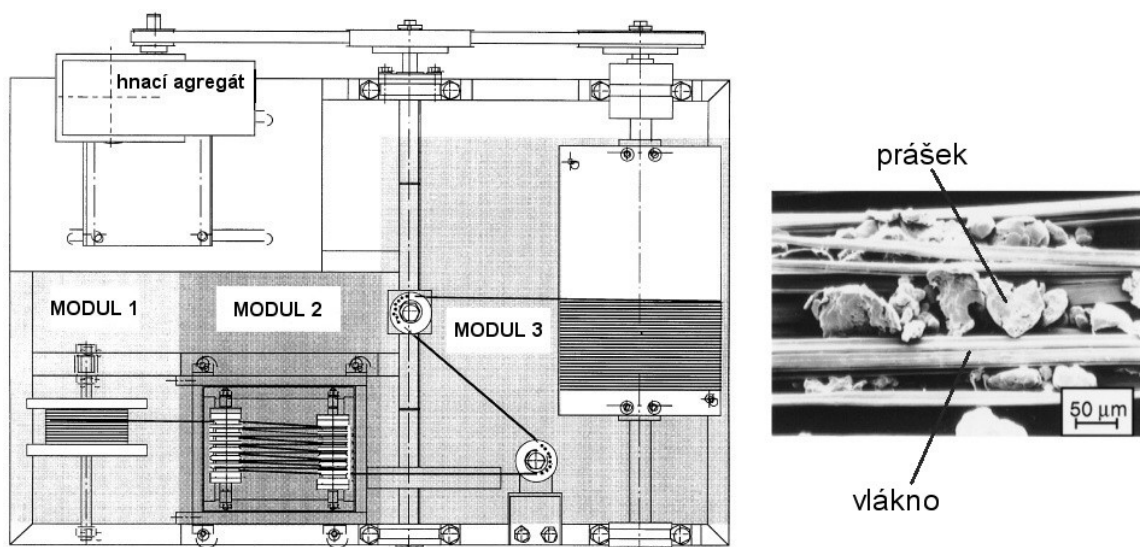
- Impregnace taveninou
- Impregnace práškem
- Impregnace roztokem

Impregnace taveninou

Při impregnaci taveninou se svazky vláken zafixují ve formě, aby se předešlo jejich smrštění, a naskládají mezi filmy PE matrice. Matrice neproniká do vnitřní části vlákenných svazků z důvodu její vysoké hustoty po roztavení. Zvýšením zpracovatelské teploty dojde jen k nepatrnému snížení viskozity matrice. Avšak dojde i k přiblížení se k bodu tání vláken, natavení jejich ploch, jejich vzájemnému propojení a vytvoření koherentních svazků.

Impregnace práškem

Při práškové impregnaci se na vlákna suspenzně nanáší mokvý prášek. Stroj na práškovou impregnaci se skládá z hnacího agregátu a tří modulů. V prvním modulu dochází k odvíjení vláken z cívky. Ve druhém modulu se v suspenzním prostředí svazky vláken impregnují. V posledním třetím modulu se pak svazky vláken navíjejí. Při práškové impregnaci dochází k nehomogenní distribuci práškových částic. [27]

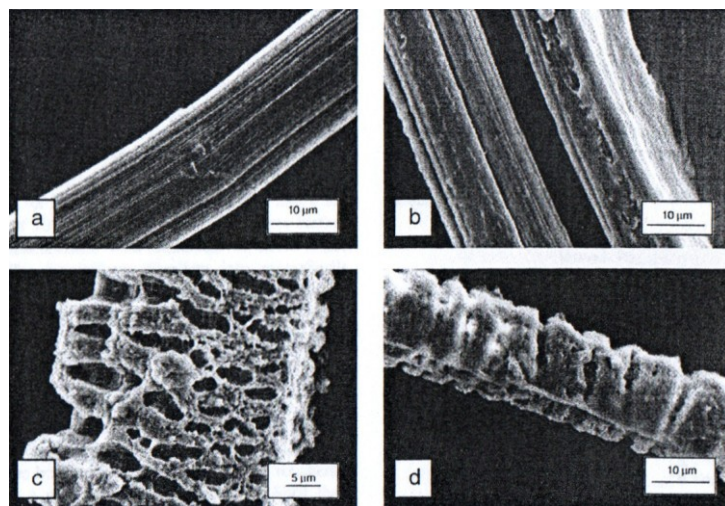


Obr. 6 Stroj na práškovou impregnaci (vlevo) a příklad takto naimpregnovaného vlákna (vpravo) [26,27]

Impregnace roztokem

Při výrobě kompozitních výrobků touto technikou se nejdříve PE vlákno naimpregnuje směsí LDPE a xylenu a poté ohřeje na konsolidační teplotu. Tím vznikne jednosměrný prepreg, jež se navrství do formy a zvýšením teploty a tlaku zalaminuje.

Příklad impregnace roztokem je znázorněn na Obr. 7. Na Obr. 7 (a) je neimpregnované PE vlákno. Na Obr. 7 (b) je vidno PE vlákno impregnované směsí 5 hmotnostních % LDPE a xylenu, kde se vlákno obalí vrstvou LDPE po 8 minutách působení. S rostoucí dobou působení roztoku na vlákno roste tloušťka obalové vrstvy - 3,25 hod. (Obr. 7 (c)), 19,5 hod. (Obr. 7 (d)). [28]



Obr. 7 Impregnace PE vláken směsí LDPE a xylenu [28]

2 SÍŤOVÁNÍ

Pod pojmem síťování rozumíme vzájemné spojování polymerních řetězců za vzniku prostorové sítě. Vzhledem k velkým délkám polymerních řetězců je třeba jen malého přídatku síťovacího činidla, aby molekulová hmotnost polymeru vzrostla nekonečně – makromolekula má pak rozměry příslušného výrobku. Síťování probíhá pomocí radikálové polymerace. U velkého počtu plastů lze provádět síťování pomocí ozařování. Výhodou této metody je, že síťování provádíme na hotovém výrobku po dokončení zpracovatelského procesu. Tímto způsobem lze přetvořit např. termoplastické materiály na materiály vykazující za určitých teplotních podmínek vlastnosti elastomerů. [1,4]

V poslední době se síťování průmyslově uplatňuje jak u kaučuků (zde hovoříme o vulkanizaci), tak i u jiných lineárních polymerů, např. polyethylenu, polypropylenu a polyvinylchloridu. Těm tento proces propůjčuje některé výhodné vlastnosti, zejména tvarovou stálost za zvýšené teploty a zvýšení fyzikálně-mechanických vlastností. Tyto materiály pak ztrácejí rozpustnost v organických rozpouštědlech (pouze bobtnají a mění svůj tvar). S rostoucím stupněm zesíťování klesá bobtnavost a navlhavost polymeru. [1]

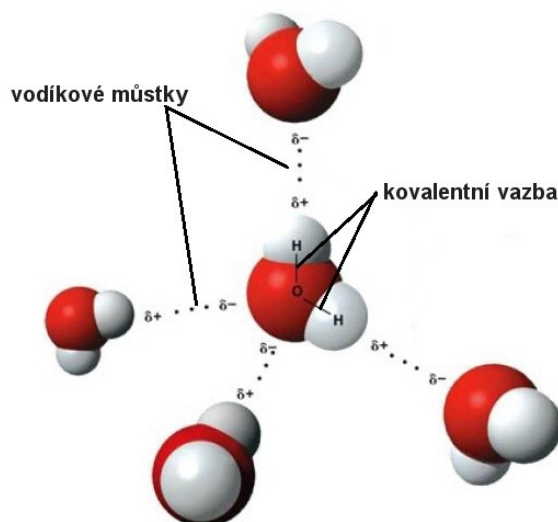
Možnosti vzniku prostorové sítě polymeru jsou následující:

- Polykondenzací nebo polyadící tří a vícefunkčních monomerů
- Polymerací monomerů, z nichž alespoň jeden má vyšší funkčnost než 2
- Zabudováním příčných vazeb mezi lineární nebo rozvětvené makromolekulární řetězce
- Vzájemnou reakcí makromolekulárních řetězců s vhodnými reaktivními skupinami. [1]

U semikrystalických polymerů probíhá síťování v jejich amorfní oblasti. V prvním stádiu síťovacího procesu, tj. při vzniku prvních příčných vazeb mezi lineárními řetězci polymeru vzroste molekulová hmotnost polymeru bez vzniku trojrozměrné sítě. Po dosažení určité koncentrace příčných vazeb začne docházet ke vzniku trojrozměrné struktury, *gelu* - systém se nachází v bodě gelovatění. V bodě gelovatění se výrazně mění vlastnosti polymeru. S rostoucí koncentrací příčných vazeb se pak polymer skládá ze dvou složek, a to z *gelu*, který je nerozpustný ve všech rozpouštědlech (nepočítáme-li rozpouštědla napadající chemické příčné vazby) a *solu*, který je rozpustný a dá se vyextrahovat.

2.1 Radikálová polymerace

Lineární polymerní řetězce jsou mezi sebou vzájemně svázány pomocí sekundárních vazeb, tzv. *vodíkových můstků* (Obr. 8). Vodíkový můstek je vazba mezi dvěma atomy vodíku, která se řadí mezi Van der Waalsovy vazby, které vznikají na základě elektrostatických přitažlivých sil mezi částicemi s určitým elektrickým nábojem. Tyto vazby jsou však velmi slabé a mají malou vazebnou energii (8 až 40 kJ). Proto je naší snahou tyto vazby nahradit silnějšími primárními vazbami kovalentními, které mají vazebnou energii řádově několikanásobně vyšší. Při radikálové polymeraci dochází vlivem záření o určité energii nebo vlivem síťovacího činidla k odtržení atomu vodíku a vzniku volného radikálu. Dva radikály pak mezi sebou vzájemně interagují za vzniku kovalentní vazby (Obr. 8).



Obr. 8 Kovalentní vazba a vodíkové můstky [18]

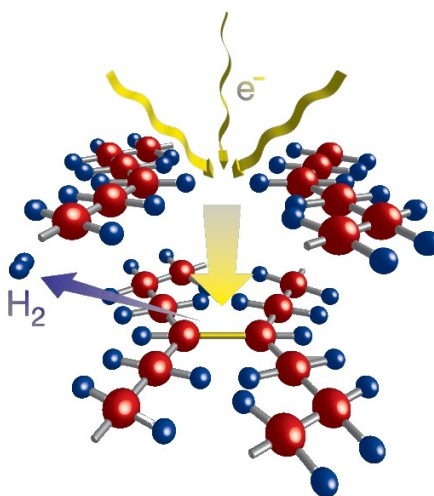
Průběh radikálové polymerace se dělí na tři části:

1. Iniclace – vytvoření volných radikálů odštěpením atomu vodíku
2. Propagace – vznik kovalentních vazeb mezi radikály
3. Terminace – ukončení vazebné reakce

Polymerní síť vzniká v materiálu na základě radikálové polymerace a to pomocí síťovacího činidla (peroxidů), nebo působením radiačního záření. Tato síť vzniká také vlivem silanů, zde ale nejde o síťování silany ale o jejich roubování.

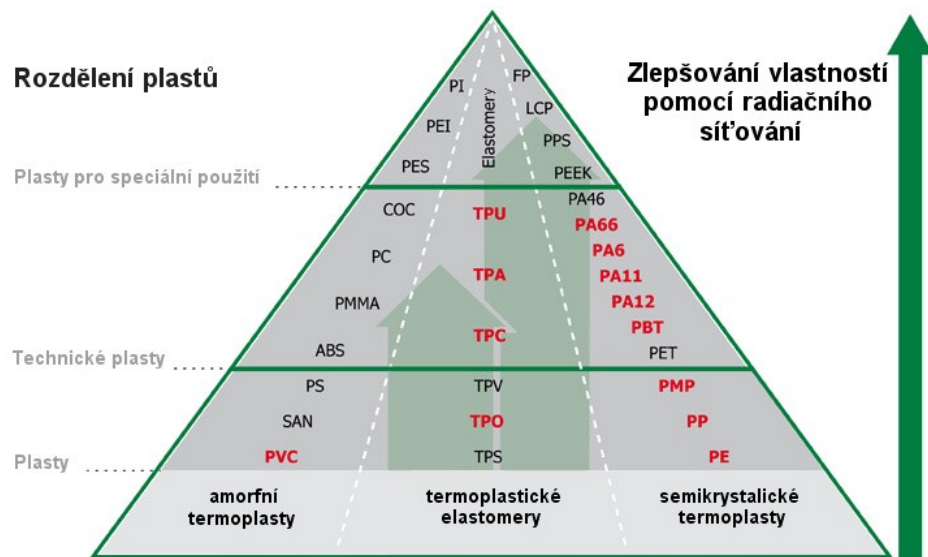
2.2 Radiační síťování

Radiační síťování je metoda, při které dochází ke vzniku sítě v materiálu v důsledku jeho ozařování ionizačním zářením. Po dopadu emitovaných částic na makromolekulární řetězec dojde odštěpení vodíkových atomů navázaných na polymerní řetězce a vytvoření volných radikálů. Ty vlivem rekombinace v řetězci vytvoří spojením dvou volných radikálů sousedících řetězců síť (Obr. 9). Oproti ostatním způsobům síťování probíhá tento proces za běžné (pokojové) teploty, výrobky tedy nejsou dodatečně namáhány.



Obr. 9 Radiační síťování [6]

Při radiačním síťování dochází ke dvěma dějům, a to k síťování a degradaci. V závislosti na tom, který děj převažuje, pak rozdělujeme materiály na radiačně síťovatelné a nesíťovatelné. Radiačně síťovatelné materiály jsou vyznačeny na Obr. 8 červenou barvou. Některé směsi pro radiační síťování nevyžadují k sesíťování žádné síťovací činidlo (např. polyolefiny mimo PP). Tyto směsi pak nazýváme samosíťovatelné. Pro komerční směsi se však využívá síťovacích činidel (např. TAIC $C_{12}H_{15}N_3O_3$) pro další zlepšení materiálových vlastností, snížení dávky záření, nebo ke zvýšení odolnosti proti hoření. Kupříkladu PA 6 je samosíťovatelný, ale až při dávkách záření přibližně 600 kGy. Což je z ekonomického hlediska nepřijatelné a navíc se zvyšující se dávkou záření dochází i k vyššímu stupni degradace.

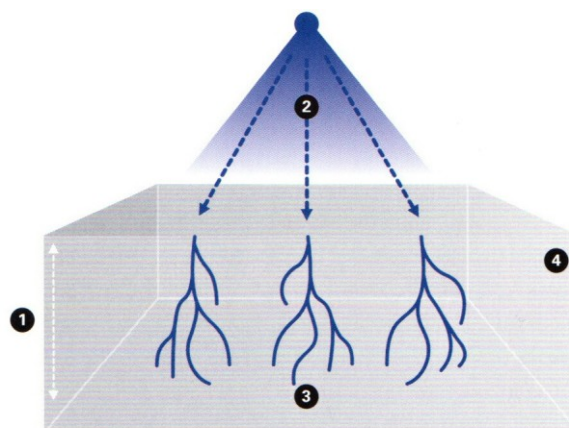


Obr. 10 Polymery komerčně vhodné k radičnímu síťování [19]

Existují dvě metody radičního síťování, a to buď ozařováním výrobku pomocí beta záření, anebo gama záření. Nezávisle na použité metodě nezůstává v takto ozářených výrobcích žádná radioaktivita.

2.2.1 Radiční síťování vlivem beta záření

Jedná o částicový druh záření. K síťování beta zářením se používá generátor elektronů, kterým je následně dodáno velké množství kinetické energie. Tyto urychlené elektrony dopadají na ozařovaný předmět a prochází jím. Při průchodu elektronu materiálem dojde k aktivaci a ionizaci molekul a jejich následnému zesíťování. Průběh síťování pomocí beta záření je znázorněn na Obr. 11.

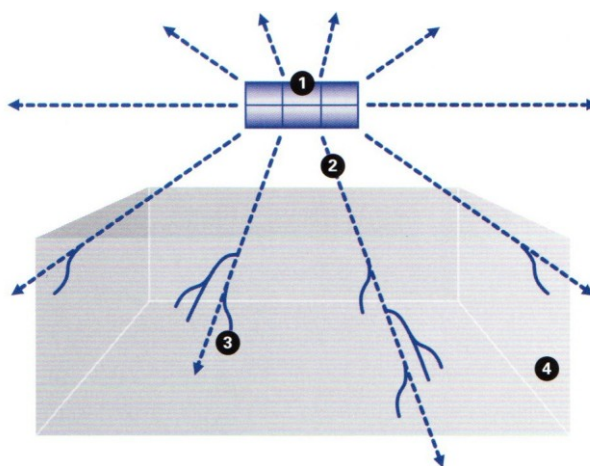


Obr. 11 Princip síťování vlivem beta záření [19]

1 – penetrační hloubka elektronů, 2 – primární elektrony, 3 – sekundární elektrony, 4 - ozařovaný materiál

2.2.2 Radiační síťování vlivem gama záření

Zde se jedná o vlnový charakter záření. Jako zdroj záření se používají atomy radioaktivních prvků, nejčastěji je to kobalt (^{60}Co s poločasem rozpadu přibližně pět let). Při průniku energetických kvant materiálem dochází k různým vzájemně působícím procesům a vzniku sekundárních elektronů. Tyto elektrony dále aktivují a ionizují makromolekulární řetězce v materiálu a tvoří volné radikály, které spolu interagují za vzniku polymerní sítě. Průběh této metody je znázorněn na Obr. 12.

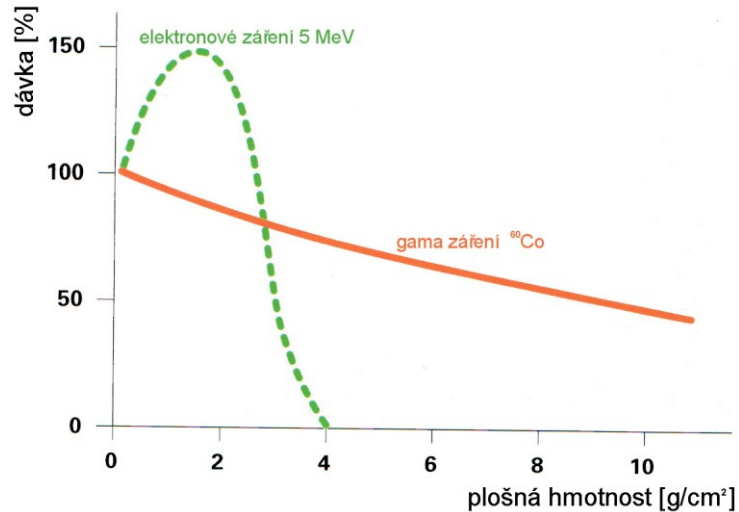


Obr. 12 Princip síťování vlivem gama záření [19]

1 – ^{60}Co - zdroj γ záření, 2 – gama kvanta, 3 – sekundární elektrony, 4 - ozařovaný materiál

2.2.3 Srovnání metod radiačního síťování

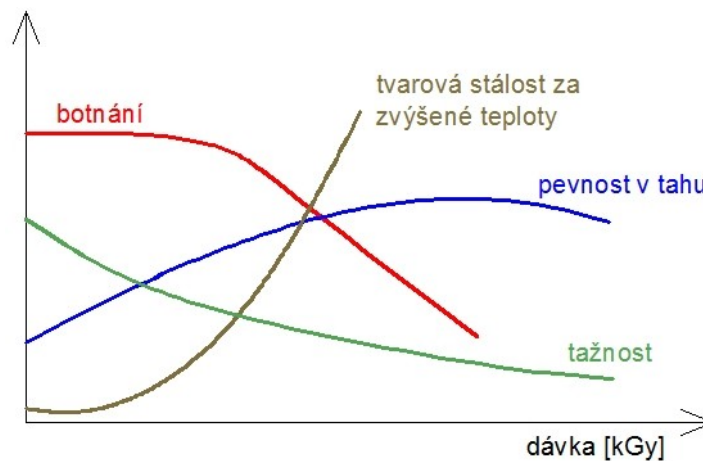
Nejčastěji používanou metodou radiačního síťování je vlivem beta záření. Tato metoda se vyznačuje vysokou dávkou záření v relativně krátkém čase. Omezení beta záření je v jeho penetrační hloubce. Proto se pro objemnější díly používá gama záření, které sice materiálu dodá menší množství energie, ale jeho penetrační hloubka je výrazně vyšší (Obr. 13). V praxi to znamená, že velikost dávky záření, k jejímuž dodání potřebuje urychlovač elektronů několik vteřin, potřebuje zdroj gama záření několik hodin.



Obr. 13 Srovnání pronikání elektronů a gama kvant záření [19]

2.2.4 Důvody a oblast použití radiačního síťování

Radiační síťování se uplatňuje při výrobě široké škály výrobků. U takto upraveného materiálu nebo výrobku dochází k výraznému zlepšení jeho mechanických vlastností, zvýšení tuhosti a pevnosti. Je stálý za zvýšených teplot, při kterých neozářený materiál taje a chemicky odolnější.

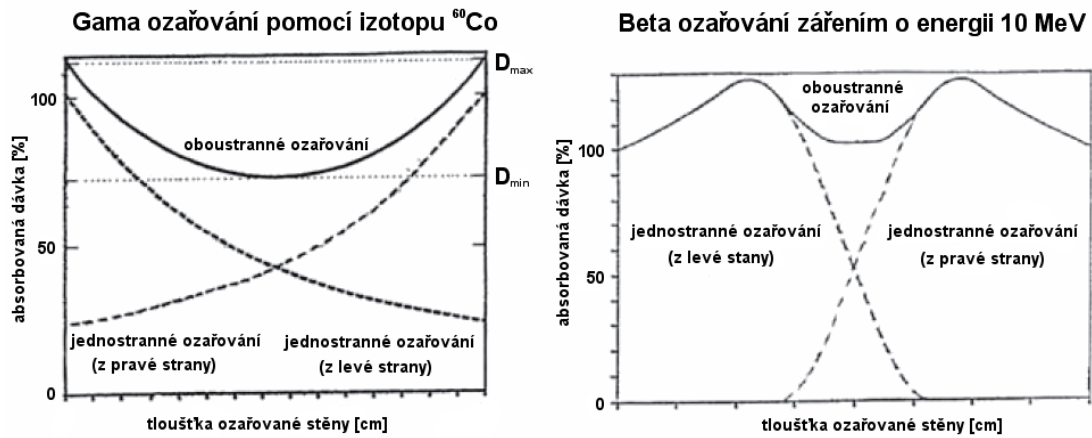


Obr. 14 Změna mech. vlastností po ozáření

2.2.5 Oboustranné radiační ozařování

Při radiačním síťování se s výhodou využívá oboustranného ozařování. Tento postup zvyšuje hospodárnost procesu. S rostoucím výkonem použitých elektronových urychlovačů

roste také výrobní rychlost produkce ozařování. Na Obr. 15 je znázorněno srovnání jednostranného, oboustranného postupného a oboustranného souběžného ozařování.



Obr. 15 Srovnání jednostranného a oboustranného ozařování [25]

3 IONIZAČNÍ ZÁŘENÍ

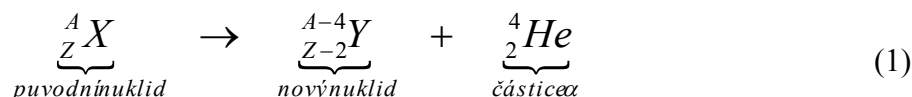
3.1 Druhy ionizačního záření

Ionizující záření je záření způsobující přímo nebo nepřímo ionizaci látky, kterou prochází. Přímou ionizující záření je tvořeno nabitými částicemi (elektrony, pozitrony, protony, alfa částicemi apod.), jejichž kinetická energie je dostatečná k tomu aby došlo k ionizaci. Nepřímou ionizující záření tvoří částice bez náboje (fotony, neutrony), které díky absenci náboje nemohou ionizovat. Při průchodu těchto částic látkou dojde k jejich interakci s touto látkou a uvolnění nabitých částic, nebo k jaderné přeměně, kterou provází emise ionizujícího záření. [8]

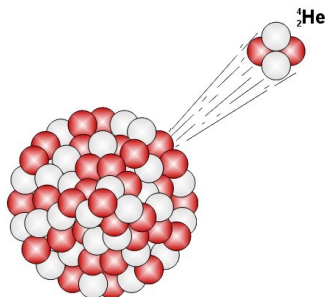
Dále lze ionizující záření dělit na korpuskulární záření (záření alfa, beta, neutronové záření apod.) a elektromagnetické záření (gama záření, rentgenovo záření X). Radioaktivní záření se uvolňuje při rozpadu atomových jader. Dle charakteristických vlastností se dělí na α , β , γ a některé další. Jednotlivé radioaktivní přeměny se navzájem liší mechanismem přeměny, jemuž odpovídá druh emitovaných částic. Vždy se jedná o proces, při němž je energie uvolňována, neboť k radioaktivní přeměně dochází spontánně. [7,8]

3.1.1 Záření alfa

Radioaktivita α je charakteristická pro těžké nuklidy s protonovým číslem $Z > 82$ (těžší než olovo). Je to přímo ionizující záření tvořené alfa částicemi (Obr. 16) – jádru hélia (nuklid hélia, skládající se ze dvou protonů a dvou neutronů, nesoucí elektrický náboj $+2e$). Při průchodu prostředím nuklidy silně ionizují, a proto toto záření velmi rychle ztrácí svou energii. Dosah tohoto záření je tedy velmi omezený – ve vzduchu do vzdálenosti několika milimetrů, ve vodě nebo tkáni pouze zlomky milimetrů. Přeměnu nuklidu znázorňuje rovnice

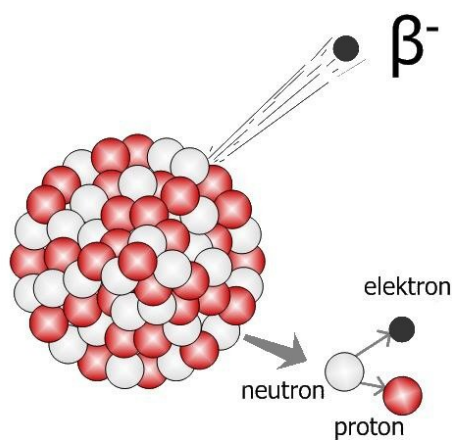


kde A značí nukleonové a Z protonové číslo atomu. [7,8]

Obr. 16 Záření α [20]

3.1.2 Beta záření

Toto záření je tvořeno urychlenými elektrony a vzniká při přeměně mnoha přírodních i umělých radionuklidů. V porovnání s alfa zářením mají beta částice výrazně menší hmotnost. To znamená, že se při stejné energii pohybují podstatně rychleji a při průchodu prostředím mnohem méně ionizují. Tím je dán i výrazně vyšší dosah beta záření – ve vzduchu až několik metrů, ve vodě nebo tkáni až desítky milimetrů a u těžších materiálů desetiny až jednotky milimetrů. [8]

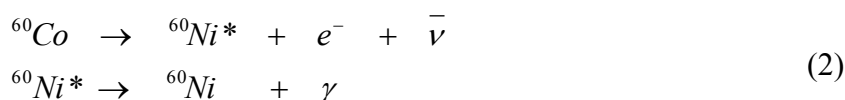
Obr. 17 Záření β^- [20]

Přeměna beta je tříčásticový proces. Neutrino a antineutrino odnáší část energie uvolněné jádrem, z toho důvodu je energetické spektrum beta záření spojitě se střední energií rovnou přibližně 1/2 až 1/3 maximální energie. Při přeměně β^+ dochází ke zpomalení emitovaného pozitronu ionizačními a excitačními ztrátami energie v prostředí a v konečné fázi, když se setkají pozitron a elektron, obě částice zaniknou (anihilují) za současného uvolnění dvou fotonů s energiemi 0,511 MeV, které se z místa anihilace rozlétnou opačnými směry. [7]

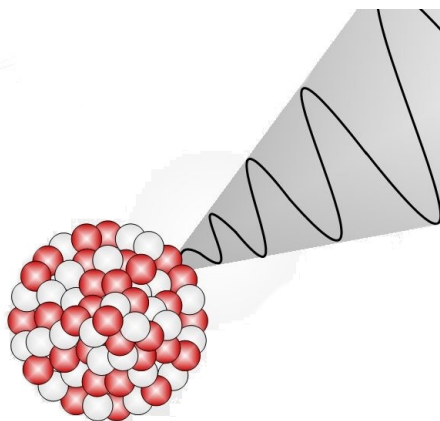
3.1.3 Záření gama

Gama záření je elektromagnetické záření obvykle jaderného původu. Vzniká při radioaktivním rozpadu řady nuklidů, často souběžně s alfa nebo beta zářením. Toto záření je složeno z emitovaných fotonů. Fotony mají nulovou klidovou hmotnost, jsou to kvanta elektromagnetického záření a s ostatními částicemi mohou interagovat prostřednictvím svých elektromagnetických vlastností. V elektrickém a magnetickém poli se neodchylují, pohybují se rychlostí světla, přičemž jejich energie je dána součinem Planckovy konstanty ($h = 4,135 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$) a frekvence vlnění. Při průchodu prostředím uvolňují fotony elektricky nabitě částice a předává jim energii dostatečnou k jejich ionizaci. Jedná se tedy o nepřímo ionizující záření, jehož dosah ve vzduchu je řádově několik set metrů a v kompaktních materiálech jako je například zemina, hornina, beton pak řádově několik centimetrů až desítek centimetrů. [7,8]

Příkladem gama záření může být rozpad kobaltu-60 na nikol-60, při kterém v prvním stupni nejprve jádro kobaltu vyše částici β (tedy elektron e^-) a elektronové antineutrino $\bar{\nu}$ a přemění se na jádro niklu v excitovaném stavu. Poté se nově vzniklé excitované jádro zbaví přebytečné energie vyzářením kvanta záření gama:



Vyzářená kvanta gama záření mají v tomto případě energii buď 1,17 MeV nebo 1,33 MeV. [18]



Obr. 18 Gama záření [20]

3.2 Jednotky veličin ionizačního záření

Energie – kinetická energie, kterou získá elektron průchodem potenciálním rozdílem 1 V, ve vakuu. [*eV* elektronvolt]

$$1 \text{ eV} = 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Dávka – absorbovaná energie záření (hmoty) [*Gy* Gray]

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule} \cdot \text{Kg}^{-1} = 100 \text{ rad}$$

Dávková intenzita – množství absorbované energie za jednotku času [*Gy·s⁻¹* Gray za sekundu]

$$1 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ Watt} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Penetrace – hloubka průniku záření

Velikost penetrace je silně závislá na energii. [*MeV* mega elektronvolt]

Aktivita – výkon zdroje radiačního záření je charakterizován jeho aktivitou [*Bq* Becquerel]

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ rozpad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$1 \text{ Ci (Curie)} = 307 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

3.3 Zdroje ionizujícího záření

Zdrojem ionizujícího záření mohou být přirozeně radioaktivní látky, uměle vyrobené radionuklidy, speciální zařízení jako rentgenky, urychlovače nabitých částic, jaderné reaktory apod. [8]

3.3.1 Urychlovače elektronů

Průmyslovým zdrojem beta záření pro radiační sítování je *urychlovač elektronů*. Žhavicí katoda emituje elektrony, které jsou za pomoci elektromagnetů urychlovány a naváděny do svislé (rentgenovy) trubice. Uvnitř trubice se nachází vysoké vakuum, které zabraňuje energetickým ztrátám při pohybu elektronu trubicí. Energie elektronů je dána velikostí střídavého napětí mezi anodou a katodou a délkou trubice. [19]

Elektronové urychlovače se dělí do tří skupin v závislosti množství dodávané energie. Jsou to:

- Nízkoenergetické urychlovače (0 – 1,5 MeV)
- Středně-energetické urychlovače (1,5 – 5 MeV)
- Vysokoenergetické urychlovače (5 – 10 MeV)

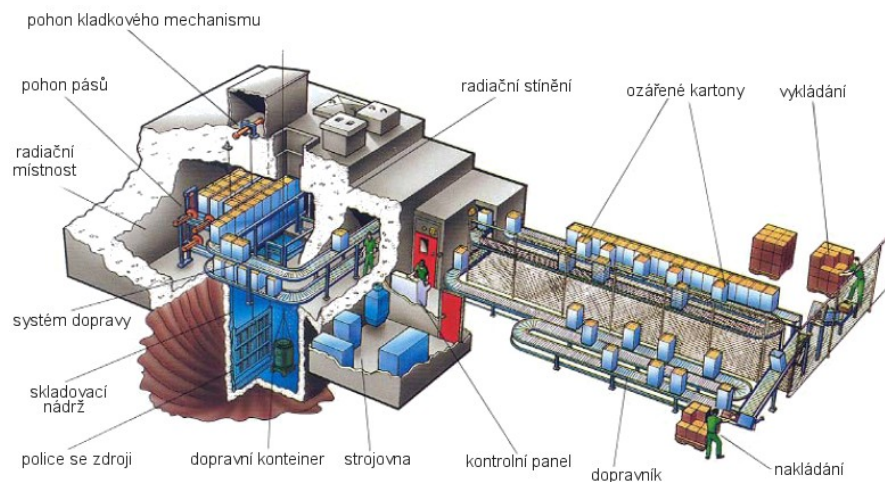
Nízko a středně-energetické urychlovače mají lineární tvar a dodávaná energie roste s délkou trubice. Paprsek elektronů v trubici je usměřován pomocí elektromagnetů po jejím obvodu. Na výstupu z trubice je pak paprsek elektronů pomocí střídavého magnetického pole vychylován a vystupuje jako vějířovitý proud elektronů, který ozařuje výrobek. Vysokoenergetické urychlovače jsou kruhového tvaru. U lineárního urychlovače (Obr. 19) jsou jeho části uzavřeny v tlakové nádobě naplněné izolujícím plynem, za účelem zabránění elektrickému výboji. [19]



Obr. 19 Lineární urychlovač elektronů [19]

3.3.2 Gama záření

Nejpoužívanějším průmyslovým zdrojem gamazáření je zapouzdřený izotop kobaltu ^{60}Co emitující gama záření se střední energií cca 1,3 MeV a vysokou penetrací. Doba ozařování činí v závislosti na požadované dávce až několik hodin. Celkové dávky ozáření se v průmyslové výrobě dosahuje opakovaným objížděním europalet s výrobky kolem zdroje. Na rozdíl od urychlovačů elektronů není možné zdroj tohoto záření vypnout. Z toho důvodu se využívá ponoření zdroje záření do vodní nádrže k odstínění radiace (Obr. 20). [19]



Obr. 20 Linka s využitím gama záření [25]

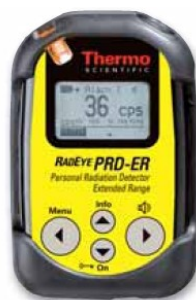
3.4 Měření ionizujícího záření

Princip měření ionizujícího záření je založen na jeho reakci s látkou tvořící identifikační prostředí detektoru. U ionizujícího záření lze měřit

- počet dopadnuvších částic za časový úsek
- velikost středního proudu částic
- energii dopadajících částic
- dávku ionizačního záření [8]

3.4.1 Dozimetrické přístroje

Měří veličiny charakterizující přenos energie a její předávání předmětům umístěným v radiačním poli. Jedná se o přístroje k měření dávek, dávkové rychlosti, fluence (hustoty prošlých částic nebo hustoty prošlé energie), expoziční rychlosti (míra ozáření daného objektu) apod. Příklad dozimetru od firmy *HUKOS s.r.o.* je uveden na Obr. 21. [8]



Obr. 21 Dozimetr

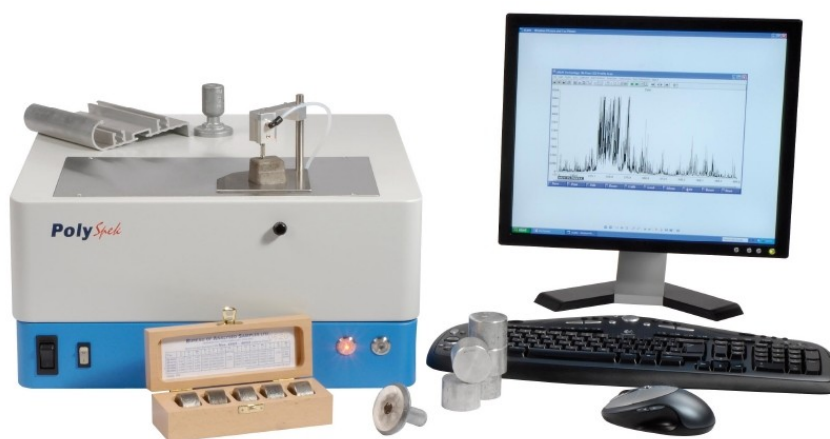
RadEye PRD-ER [21]

3.4.2 Radiometrické přístroje

Měří parametry pole záření, nebo charakteristiky zdroje záření. Buď se tedy měří radiometrické charakteristické veličiny radiačního pole v místě detektoru - určuje se fluence, nebo se získávají údaje o aktivitě zdroje záření. [8]

3.4.3 Spektroskopické přístroje

Pomocí těchto přístrojů se stanovuje rozložení částic nebo kvant záření podle jednoho nebo více parametrů. Například pomocí energie, hmoty, náboje, atd. Výsledkem měření spektroskopických přístrojů (Obr. 22) je spektrum, tedy množina hodnot, kterých může nabývat měřená fyzikální veličina v závislosti na vybraném parametru (např. četnosti částic v určitém energetickém rozmezí - kanálu). [8]



Obr. 22 Jiskrový optický emisní spektrometr ARUN Polyspek [21]

3.4.4 Přístroje pro stanovení interakcí mezi zářením a hmotou

Tyto přístroje se dělí do dvou skupin, přístroje k měření mechanických, fyzikálních, chemických a jiných veličin, a na přístroje pro analýzu složení látek (aktivační analýza, rentgeno-fluorescenční analýza, atd.). [8]

4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLU

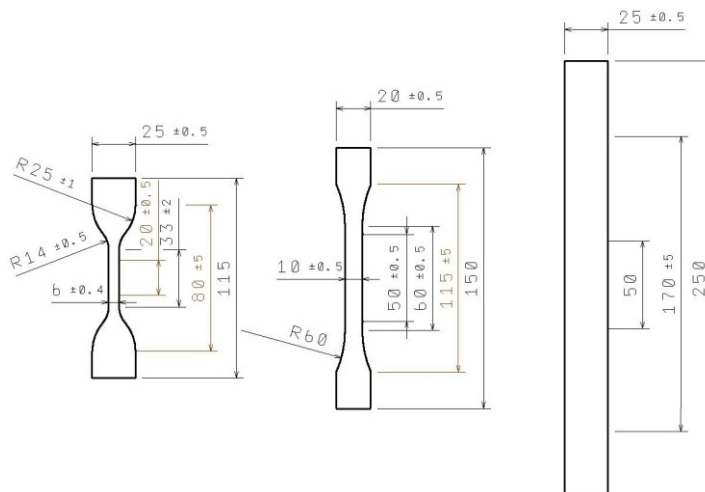
U plastů se provádí různé druhy mechanických zkoušek za účelem zjištění jeho odolnosti vůči působení různých druhů zatížení. Používané metody se dělí do tří základních skupin:

- statické zkoušky (Materiál je namáhán pozvolně měnícími se silami, které působí obvykle až do okamžiku destrukce zkušebního tělíska.) Provádí se například zkoušky tahové, tlakové, ohybové, tvrdosti, zkoušky pevnosti lepených spojů, zkoušky pevnosti v odlupování (namáhání lepených spojů ve směru kolmém na lepenou plochu), zkoušky pevnosti ve smyku mezi vrstvami vyztužených plastů, kríповé zkoušky a další.
- dynamické zkoušky (Síla působí buď rázově, nebo jen v krátkém čase. Další možností je dlouhodobé působení síly, jejíž velikost se ve velmi krátkém čase periodicky mění.)
- únavové zkoušky (Dlouhodobé zkoumání mechanických vlastností za předepsaných podmínek, obvykle až do okamžiku poškození materiálu. Používají se různé druhy zkoušek v závislosti na materiálu.)

4.1 Příprava zkušebních těles

Výsledky mechanických zkoušek ovlivňují jak vlastnosti polymeru - chemické složení, molekulová hmotnost a její distribuce, krystalinita, obsah nečistot apod., tak i režim zpracování a způsob přípravy zkušebních tělísek. Příprava zkušebních tělísek se liší dle druhu prováděné zkoušky nebo podle polymerního materiálu. Vzorky se připravují dle materiálových nebo zkušebních norem buď přímo ze zkoušené suroviny (vstřikováním, lisováním nebo vytvrzováním v příslušné formě), nebo vyříznutím a strojním opracováním. Při přípravě vzorků jsou tělíska obvykle vystavena podmínkám, které neodpovídají jejich ustálenému stavu (např. krystalinita při vstřikování, vznik mechanického napětí při opracování, vysušení apod.). Tyto tělíska je tedy třeba kondicionovat. Při vlastní zkoušce je také třeba dodržovat pevně stanovené klimatické podmínky, při kterých má zkouška probíhat. Tyto podmínky stanovuje norma ISO 291. [9,11,13]

Vzorky pro tahové zkoušky se připravují dle normy ISO 527-1. Tyto zkušební tělíska jsou znázorněny na Obr. 23. Jejich tloušťka se volí dle použitého materiálu v rozmezí 1 až 6 mm. [9,14]



Obr. 23 Zkušební tělíska pro tahovou zkoušku

4.2 Tahová zkouška

Tato zkouška hodnotí pevnost materiálu při jeho tahovém namáhání. Zkušební tělísko se upne do trhacího stroje a je namáháno silou až do okamžiku jeho přetržení. Vlastnosti plastů se v různých místech liší a tahové napětí je rozloženo rovnoměrně, tím vznikají smyková napětí. Průřez tělíska se v průběhu zkoušky mění až do okamžiku dosažení rovnováhy mezi deformací a napětím. Při následném dalším zatěžování dojde k přetržení zkušebního tělíska. Z důvodu průběžné změny průřezu tělíska je obtížné stanovit skutečné napětí. V praxi se využívá tzv. *smluvní napětí*, což je velikost působící síly vztažená na počáteční průřez zkušebního tělíska. [9,11,14]

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

Tento způsob výpočtu je vyhovující u materiálů, u nichž dochází k malým deformacím (např. reaktoplasty). U elastomerních materiálů, u kterých dochází k prodloužení v řádu desítek procent, dojde k podstatnému zmenšení průřezu zkoušeného tělíska a tím i k velkému rozdílu počátečního a koncového napětí při zkoušce. Při trhání tělíska roste jeho původní délka z počáteční hodnoty l_0 na hodnotu l - *poměrné prodloužení* (ϵ_l)

$$\varepsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} [-] \quad (4)$$

a zmenšuje se jeho průřez z hodnoty S_0 na hodnotu S - *poměrné zúžení* (ε_s).

$$\varepsilon_s = \frac{S_0 - S}{S_0} = \frac{\Delta S}{S_0} [-] \quad (5)$$

Poměr relativního zúžení a relativního prodloužení charakterizuje *Poissonovo číslo*

$$\mu = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_l} [-], \quad (6)$$

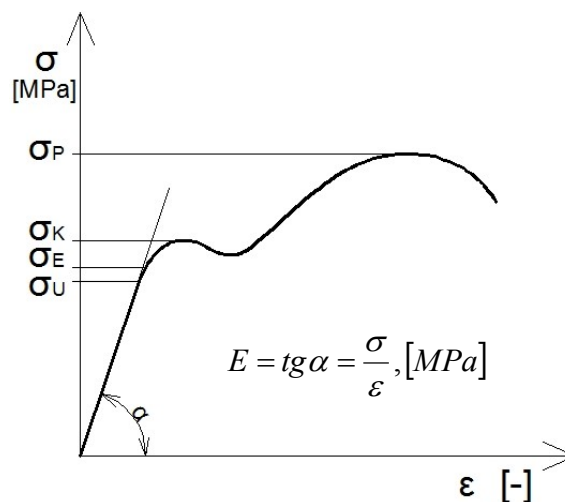
jehož teoretická maximální hodnota může dosáhnout až 0,5. Pro tahové zkoušky v počáteční části křivky do meze úměrnosti platí **Hookův zákon** (deformace je úměrná použité síle)

$$\varepsilon_l = K \cdot \sigma [-]. \quad (7)$$

součinitel K udává poměrnou změnu délky při jednotkovém napětí. Je to \cotg úhlu, který svírá tečna křivky napětíového diagramu a osa popisující prodloužení zkušební tělíska. Jeho převrácenou hodnotou dostaneme *modul pružnosti* E daného materiálu (Youngův modul)

$$\frac{1}{K} = E \Rightarrow \varepsilon_l = \frac{\sigma}{E} [-]. \quad (8)$$

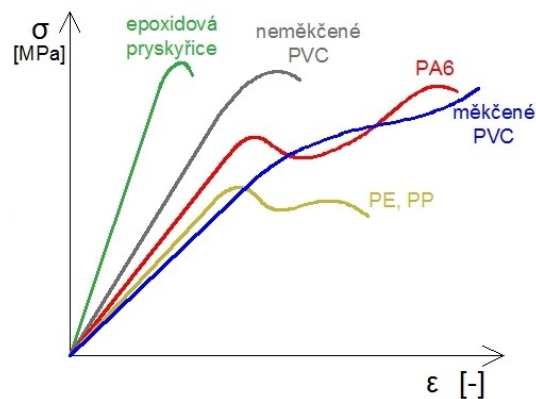
Na Obr. 24 je na napětíovém diagramu znázorněn průběh tahové zkoušky pro ocelové zkušební tělísko. V tomto diagramu jsou také vyznačeny důležité body na tahové křivce. Počáteční část křivky má přímkový průběh. Tangenta úhlu, pod kterým se směrnice tohoto úseku odklání od osy vyznačující poměrné prodloužení tělíska, odpovídá modulu pružnosti v tahu daného materiálu.



Obr. 24 Tahová zkouška oceli

Do *meze úměrnosti* σ_U je deformace přímo úměrná napětí (oblast platnosti Hookeova zákona). *Mez pružnosti* σ_E je smluvně určována jako napětí, které vyvolá trvalou deformaci $\epsilon=0,005\%$ původní délky l_0 . *Mez kluzu* σ_K udává počátek trvalé deformace zkoušeného tělíska. Tato deformace je viditelná na tahové křivce pouze některých tvárných materiálů a je také smluvně určena pro trvalou deformaci $\epsilon = \text{Bod}$, ve kterém dosáhne zatěžující síla svého maxima, se nazývá *mez pevnosti v tahu* σ_P . Po překročení tohoto bodu dojde k poklesu zatěžující síly, tvorbě krčku a přetržení zkušebního tělíska - *mez přetržení* σ_S .

Na Obr. 25 jsou srovnány průběhy tahových křivek různých druhů polymerních materiálů.



Obr. 25 Tahové křivky pro různé materiály

Způsob provedení a podmínky zkoušky pro vstříkované plastové tělíska jsou uvedeny v normě ISO 527-2. Pro pryžové materiály pak dle normy ISO 37/1.



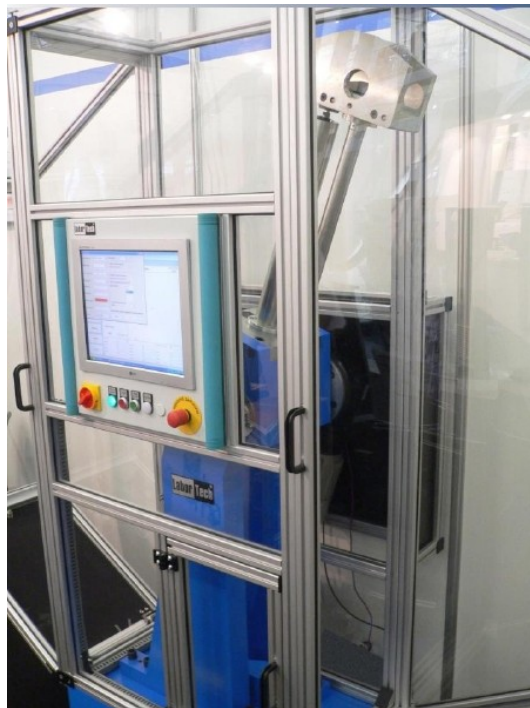
Obr. 26 Trhací stroj

Zwick 1456

4.3 Rázová zkouška

Rázové zkoušky udávají množství práce nebo energie potřebné k porušení zkušebního tělíska. Nejčastěji prováděnou dynamickou zkouškou je zkouška rázem v ohybu - *Charpyho kladivo*. Zkouška se provádí ve většině případů jedním rázem, přičemž je použito většího množství energie, než je třeba k porušení zkušební vzorku. Rázová zkouška v ohybu je velmi dobrým ukazatelem křehkosti nebo houževnatosti testovaného materiálu. Tato zkouška se provádí dle normy ISO 179-2. Těžké kladivo (Obr. 19) otočné kolem své osy se zvedne a zajistí v předepsané výšce a následně nechá dopadnout na zkušební tělíska s vrubem uprostřed. Měří se rozdíl výšek kladiva v počáteční a koncové poloze, z něhož se vypočte nárazová práce $K(U, V)$ a vrubová houževnatost $KC(U, V)$. Písmena U, V udávají tvar vrubu na zkušebním tělísku.

$$K(U, V) = E_1 - E_2 = G \cdot (h_1 - h_2) [J]$$
$$KC(U, V) = \frac{K(U, V)}{S_0} [J \cdot m^{-2}] \quad (9)$$



Obr. 27 Sharpyho kladivo [29]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Byly stanoveny následující cíle diplomové práce:

- Zjištění vlastností ozářených LLDPE vláken
- Příprava zkušebních tělísek
- Provedení mechanických zkoušek
- Zhodnocení výsledků těchto zkoušek
- Stanovení možností budoucího využití tohoto materiálu

6 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Za účelem statistického vyhodnocení naměřených výsledků bylo použito následujících vztahů:

Aritmetický průměr (Φ)

Udává průměrnou hodnotu polohy těžišť měřené hodnoty n .

$$\Phi = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (10)$$

Směrodatná odchylka (s)

Tato hodnota vyjadřuje kvadratický průměr odchylek od jejich aritmetického průměru.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \Phi)^2} \quad (11)$$

Střední kvadratická chyba aritmetického průměru (σ)

Vyjadřuje, s jakou přesností jsme pomocí aritmetického průměru stanovili měřenou veličinu.

$$\sigma = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

7 VÝROBA A ÚPRAVA LLDPE VLÁKEN A LDPE PRÁŠKU

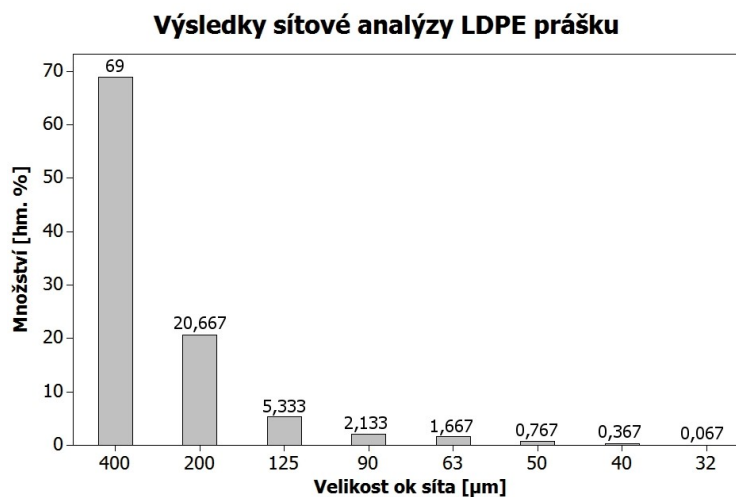
Vlákna z LLDPE byla poskytnuta firmou *Baumhüter extrusion GmbH* v množství 10kg. Tato vlákna byla vyrobena metodou zvlákňování z taveniny a dloužena přibližně v poměru 1:3. Dále tato vlákna obsahují přibližně 0,5% maziv, což je směs esterů kyseliny polyglykolové a přibližně 6% vlhkosti. Teplota tání vláken je asi 122°C a vlákna byla nastříhána na délku přibližně 2,2 mm. Jejich střední průměr činil dle naměřených hodnot $7,56 \pm 0,16 \mu\text{m}$ při teplotě 23°C.

Tato vlákna byla následně radiačně ozářena a zesít'ována firmou *BGS - Beta Gamma Service*, a to pomocí elektronového urychlovače dne 13.1.2011. Velikost energie urychlovače byla 10 MeV a vlákna byla ozářena dávkou minimálně 200 kGy. Stupeň zesíťení vláken nebylo možné pro jejich malý rozměr stanovit. Další informace jsou uvedeny v certifikátu viz. Příloha PI: BGS Protokol o ozáření.

Polymerní prášek byl vyroben rozemletím LDPE granulátu *BRALEN VA 20-60* firmy *Slovnaft Petrochemicals* s následujícími vlastnostmi udávanými materiální databází *IDES Prospector*:

ITT (190°C/2,16kg)	20 g/10 min
Hustota (23°C)	914 kg/m ³
Mez pevnosti v tahu	8 MPa
Teplota měknutí	84 °C
Teplota tání	130 - 150°C

Velikost částic namletého prášku byla zjištěna pomocí síťové analýzy - Graf. 1.



Graf. 1 Síťová analýza LDPE prášku

8 ZKOUŠENÍ VLÁKEN

8.1 Zkouška tepelného a tepelně mechanického zatěžování vláken

8.1.1 Princip zkoušky

Při zkoušce byla testována ozářená i neozářená vlákna při teplotách 23°C, 122°C, 145°C, 160°C a 180°C. Ozářená vlákna jsou pak za zvýšené teploty ještě dodatečně mechanicky zatěžována. Zjišťuje se vliv teploty na strukturu a soudržnost vláken. Při teplotách 23°C a 122°C u neozářených a 23°C, 122°C a 145°C u ozářených se měří také velikost smrštění (změna průřezu) vláken.

8.1.2 Postup

Nejdříve byly připraveny zkušební vzorky ozářených a neozářených vláken (Obr. 28). Tyto vzorky pak byly umístěny do vytemperované teplotní komory Zwick/Roell, typ W91255 a zatíženy zvolenou teplotou po dobu 20 minut.



Obr. 28 Zkušební vzorek vláken

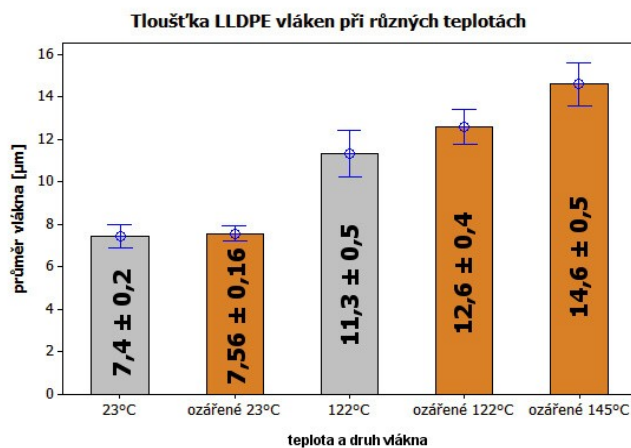
Po vyjmutí z komory bylo na mikrotvrdoměru AFFRI DM2A provedeno měření vlivu teplotního zatížení na strukturu a smrštění vláken při stonásobném zvětšení. U ozářených vzorků při teplotách 122°C a 145°C byl také zkoumán vliv mechanického namáhání (vzájemného smykového posunutí laboratorních sklíček vůči sobě o vzdálenost přibližně 2 mm) na strukturu a soudržnost vláken.



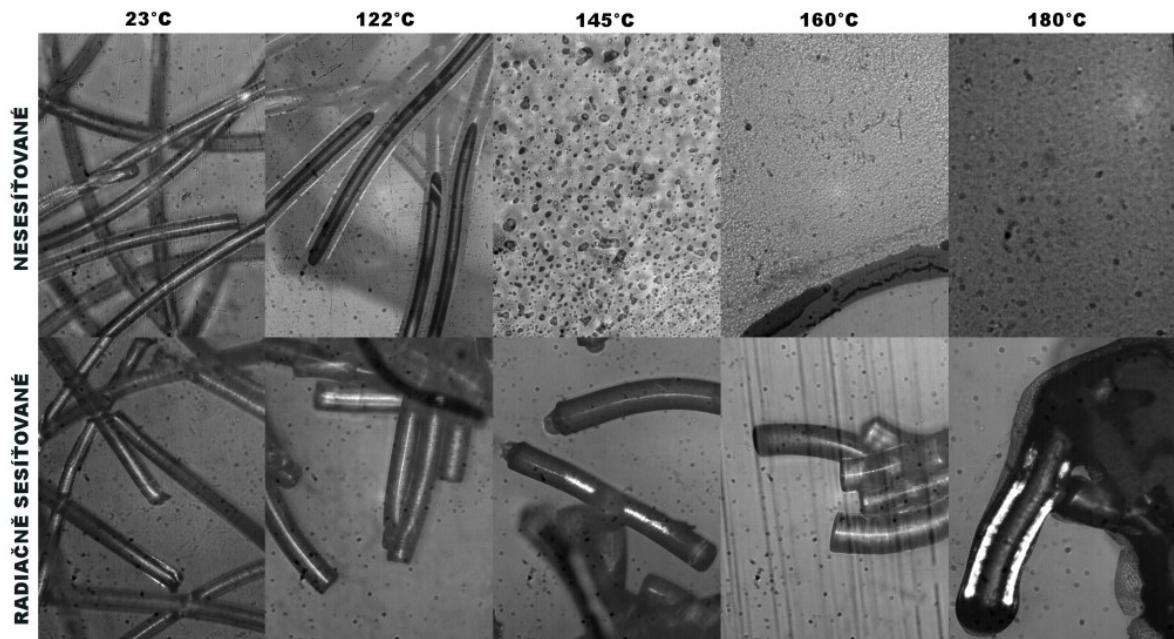
Obr. 29 Teplotní Komora Zwick/Roell W91255 vlevo,
mikrotvrdoměr AFFRI DM2A vpravo.

8.1.3 Dosažené výsledky

Bylo provedeno 10 měření průměru ozářených a neozářených vláken při třech kontrolních teplotách. Naměřený střední průměr ozářených vláken při teplotě 23°C činil $7,56 \pm 0,16 \mu\text{m}$, u neozářených pak $7,4 \pm 0,2 \mu\text{m}$ (Graf. 2). Při zvýšení teploty na 122°C vzrostl vlivem zrelaxování vnitřních napětí, které vzniká ve vláknech při jejich zpracování prodloužením, průměr neozářených vláken o 52,66 % na hodnotu $11,3 \pm 0,5 \mu\text{m}$ a průměr ozářených vláken o 66,41 % na hodnotu $12,6 \pm 0,4 \mu\text{m}$. Při zatížení ozářených vláken teplotou 145°C došlo pak ke zvětšení jejich průměru o 92,89 % na hodnotu $14,6 \pm 0,4 \mu\text{m}$. U neozářených vláken vzhledem k jejich teplotě tání 122°C došlo při teplotě 145°C k jejich úplnému roztavení (Obr. 30).

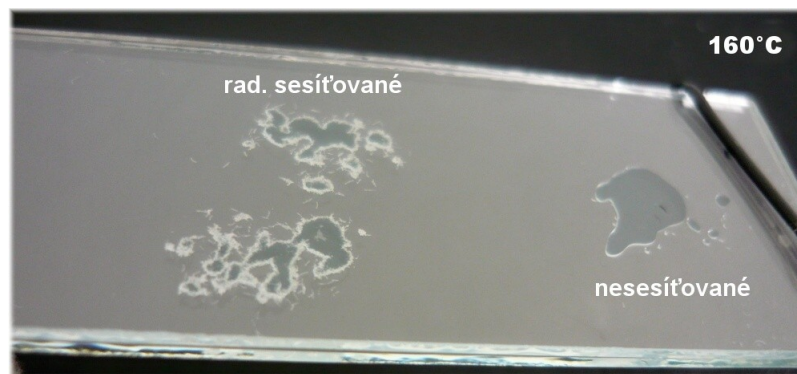


Graf. 2 Srovnání průměru ozářených a neozářených vláken při různých teplotách



Obr. 30 Srovnání ozářených a neozářených vláken při různých teplotách na mikrotvrdoměru AFFRI DM2A při 100x zvětšení.

Na Obr. 31 je patrný vizuální rozdíl vzorku ozářených a vzorku neozářených vláken při teplotě 160°C po vyjmutí z teplotní komory.

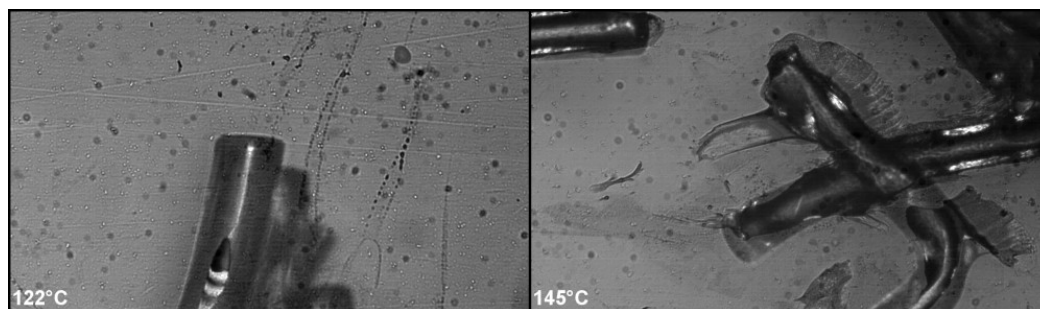


Obr. 31 Makroskopické srovnání ozářených a neozářených vláken při teplotě 160°C.

Datum poslední kalibrace teplotní komory Zwick/Roell W91255 je 7.1.2008.

Vliv tepelně mechanického zatěžování je patrný na Obr. 32. Při teplotě 122°C dochází k mírnému natavení vláken. To je patné na Obr. 32 vlevo. Při vzájemném posuvu laboratorních sklíček zanechá na skle vlákno jasně patrnou taveninovou stopu. Při teplotě

145°C již dochází k většímu stupni natavení vlákna (Obr. 32 vpravo), což dokazují výraznější taveninové stopy na skle.



Obr. 32 Vliv teplotněmechanického zatěžování na ozářená vlákna

8.2 DSC - Diferenční skenovací kalorimetr

8.2.1 Princip zkoušky

Differential Scanning Calorimetry je metoda zkoumání změny tepelné kapacity testovaného materiálu s měnící se teplotou. Vzorek o známé hmotnosti je zahříván nebo chlazen a změny jeho tepelné kapacity se sledují jako změny tepelného toku. To umožňuje detekci přechodů, jakými jsou například tání, skelný přechod, fázové změny nebo vytvrzování. Těto metody se tedy využívá u materiálů, u kterých dochází k nějakým přechodům (např. polymery, potraviny, farmaceutické přípravky, polovodiče a mnoho dalších). Při práci s polymerními materiály různých typů je teplota skelného přechodu důležitá k pochopení vlastností těchto materiálů. Největší výhodou DSC je jeho jednoduchost a rychlost s jakou dokáže zobrazit přechody v materiálech.

8.2.2 Postup

Byly připraveny zkušební vzorky z LLDPE vláken o hmotnostech 6,9 mg neozářeného a 6 mg ozářeného. Tyto vzorky byly následně v DSC přístroji firmy *Perkin Elmer*, konkrétně typ *Pyris 1 DSC* (Obr. 33) temperovány ze 70°C na 150°C rychlostí 10°C·min⁻¹ - první ohřev. Po jejím dosažení se vytrvalo na této teplotě po dobu jedné minuty a následovalo chlazení zpět na 70°C opět rychlost 10°C·min⁻¹ a minutové setrvání na této teplotě. Poté následoval druhý ohřev, jehož teplotní podmínky odpovídají prvnímu

ohřevu. První ohřev se provádí za účelem odstranění vnitřních pnutí v materiálu a jeho zrelaxování. Směrodatný je tedy až druhý ohřev.



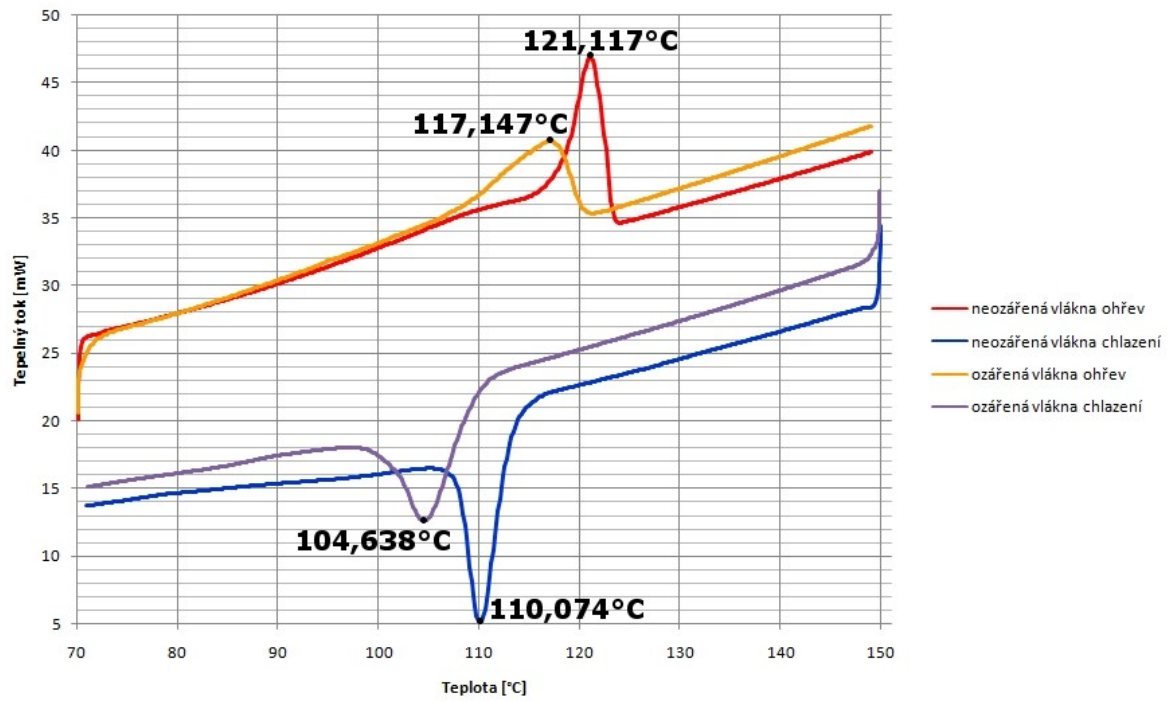
Obr. 33 Perkin Elmer - Pyris 1
DSC [30]

8.2.3 Dosažené výsledky

Z výsledků měření (Graf. 3) vyplývá teplota tání při ohřevu neozářených vláken $121,117^{\circ}\text{C}$ a entalpie $36,174 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$. Teplota krystalizace při ochlazování neozářeného vzorku je $110,074^{\circ}\text{C}$ s entalpií $-40,706 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$.

U ozářených vláken pak dochází k tání jejich nezesíťované složky při teplotě $117,147^{\circ}\text{C}$ s entalpií $35,609 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$. Teplota krystalizace je $104,638^{\circ}\text{C}$ a entalpie při této teplotě $-49,909 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$.

Vlivem dloužení a tepelné stabilizace dochází k destrukci lamelární struktury materiálu, vytahování řetězců z lamel a transformaci na fibrilární strukturu. K rozdílu teploty tání a krystalizace mezi neozářenými vlákny a nezesíťovanou složkou ozářených vláken dochází z důvodu zmenšení tloušťky lamely vlivem ozařování. Toto má za následek snížení krystalizační teploty v důsledku zhoršení podmínek krystalizace při nižších tloušťkách lamel. Ze stejného důvodu dochází také ke snížení teploty tání, tenké lamely jsou díky svému velkému povrchu nestabilní, dochází k tání materiálu za nižších teplot.



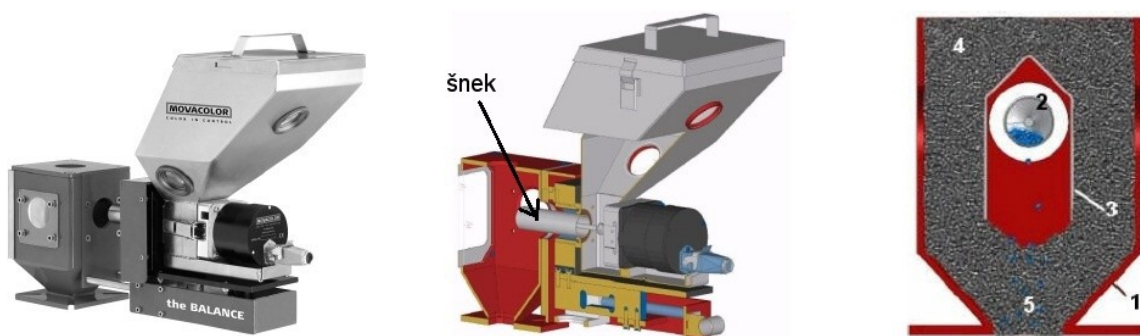
Graf. 3 Měření LLDPE vláken pomocí diferenčního skenovacího kalorimetru

9 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK

9.1 Míchání směsi vláken a LDPE prášku

Z ozářených vláken a práškového LDPE byly pomocí fluidní míchačky namíchány dvě směsi pro následné vstřikování v poměrech 25 % vláken, 75 % práškového LDPE a 50 % vláken, 50 % práškového LDPE.

Původním záměrem bylo namíchat tyto směsi pomocí gravitačního dávkovače od firmy *Movacolor B.V.* typ *MC-Balance* (Obr. 34 vlevo), který je primárně určen k přesnému dávkování granulovaných barevných příměsí a plastikační jednotky. Použití tohoto dávkovacího zařízení však nebylo možné, docházelo k problémům s distribucí vláken z násypky dávkovacího zařízení do hrdla násypky s LDPE práškem. Už samotná vlákna měla velmi špatnou sypkost a před vstupem do šneku dávkovače (Obr. 34 uprostřed) došlo semknutí svazků vláken elektrostatickými silami a vytvoření klenby, která zabraňovala dalšímu přísunu vláken do šneku dávkovače.



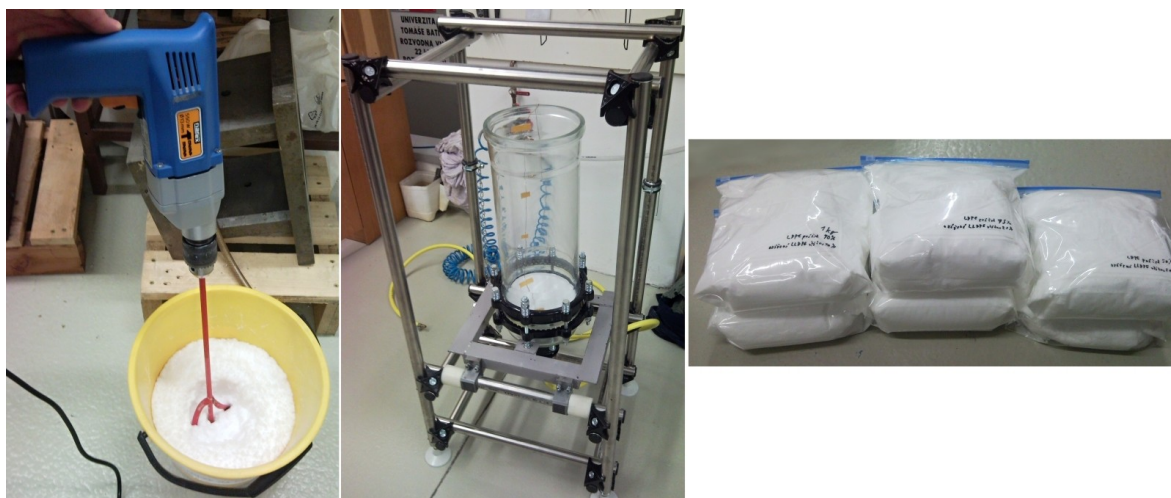
Obr. 34 Movacolor MC-Balance vlevo a uprostřed, vpravo pohled na výstup dávkovače [31]

1 – násypka, 2 – válec se šnekem dávkovače, 3 – krycí desky, 4 – granulát, 5 – směs obou materiálů

Pro míchání této směsi LDPE prášku a krátkých vláken se tedy jevil nevhodnější způsob míchání na fluidní míchačce. Nejdříve bylo naváženo množství prášku a vláken o hmotnosti 1 kg. Tyto složky byly nejdříve promísены pomocí elektrické vrtačky *Narex EVP 13* a obloukové míchací metly s kruhem v plastové nádobě (Obr. 35 vlevo). Takto vytvořená směs byla následně umístěna do skleněného válce fluidní míchačky (Obr. 35 uprostřed), která byla poté uzavřena látkovým filtrem a pryžovou obroučicí. Při míchání

docházelo k separaci jednotlivých vláken z vlákenných svazků a rovnoměrnému rozptýlení práškových částic mezi tato vlákna. Výsledné směsi vykazovaly vysoký stupeň homogenity a byly uloženy do plastových sáčků (Obr. 35 vpravo).

Při míchání PE vláken a prášku docházelo ke generování pozitivního elektrického náboje triboelektrifikací a elektrostatické síly zajišťovali soudržnosti těchto dvou složek. To vedlo k dobrému rozptýlení práškových částic a vláken, což je nezbytné pro dosažení optimálních vlastností kompozitu. [32]



Obr. 35 Postup míchání směsi práškového LDPE a vláken

9.2 Granulace

Do násypky dvoušnekového vytlačovacího stroje *Brabender DSK 42/6* (Obr. 36 vlevo) byla nasypána připravená směs LDPE prášku a ozářených LLDPE vláken. Při granulaci podobně jako při pokusu přímého vstřikování této směsi docházelo k tvorbě klenby a horší distribuci materiálu do dvoušneku, ne však v takové míře jako u jednošnekové plastikační jednotky. Tento problém byl vyřešen za pomoci mírného působení síly na materiál v násypce. Po plastikaci na dvoušneku byly přes dvojici trysek vytlačovány dvě struny na odtahový pás, kde docházelo k jejich chladnutí. Procesní podmínky tohoto procesu jsou uvedeny v Tab. 1.

Po zchlazení strun byly jejich konce zavedeny do granulátoru *Brabender* (Obr. 36 vpravo) a směsi nagraulovány na částice o délce cca. 3 mm.



Obr. 36 Granulace směsi prášku a vláken

Procesní podmínky Brabender DSK 42/6		
Otáčky dvoušneku	30	min ⁻¹
Teplota vstupního pásma	135	°C
Teplota přechodového pásma	160	°C
Teplota výstupního pásma	180	°C
Chlazení pod násypkou	tlakovým vzduchem	

Tab. 1 Procesní podmínky vytlačovacího stroje Brabender

9.3 Vstřikování zkušebních tělísek

Z nagraulovaných směsí byly na vstřikovacím stroji *Arburg Allrounder 420 C* (Obr. 37) vstříknuty zkušební tělíska na trhačku a zkoušku vrubové houževnatosti v množství - 100 ks tělísek z čistého LDPE prášku, 79 ks s 10 % vláken, 97 ks s 25 % vláken a 99 ks s 50 % vláken. Procesní podmínky vstřikovacího procesu jsou uvedeny v Tab. 2. S rostoucím množstvím přidaných vláken za shodných procesních podmínek docházelo ke snižování hmotnosti výstřiků, což lze vysvětlit jako zvýšení viskozity taveniny v důsledku většího množství příměsí (10 %

vláken $18,196 \pm 0,003$ g, 25 % vláken $18,151 \pm 0,002$ g, 50 % vláken $18,142 \pm 0,002$ g). Hmotnosti se však liší pouze v řádu několika setin gramu, nemělo by tedy dojít k výraznějšímu ovlivnění mechanických zkoušek v důsledku různé hustoty materiálu.



Obr. 37 Arburg Allrounder 420 C 1000-350 [33]

Procesní podmínky vstřikovacího stroje		
Uzavírací síla	950	kN
Vstřikovací rychlost	60	mm·s ⁻¹
Vstřikovací tlak	800	bar
Dotlak	720	bar
Dráha dávkování	25	mm
Bod přepnutí	18	mm
Doba vstřikování	0,4	s
Doba plnění	2,46	s
Doba působení dotlaku	15	s
Doba chlazení	35	s
Celková doba cyklu	61,1	s
Temperace vstřikovacího stroje		
Teplota formy	40	°C
Teplota pod násypkou	40	°C
Teplotní pásmo 2	140	°C
Teplotní pásmo 3	150	°C
Teplotní pásmo 4	160	°C
Teplotní pásmo 5	180	°C

Tab. 2 Procesní podmínky vstřikování směsi LDPE prášku a vláken

9.4 Kontrola distribuce vláken ve zkušebních vzorcích

9.4.1 Princip zkoušky

Z vlákný vyztuženého materiálu se vytvoří mikrotomové řezy. Tyto řezy se umístí na laboratorní sklíčko a na mikroskopu se pořídí jejich snímek. Na pořízených fotografiích se hodnotí distribuce vláken, orientace vláken, poměrné množství vláken, popř. další požadované vlastnosti.

9.4.2 Postup

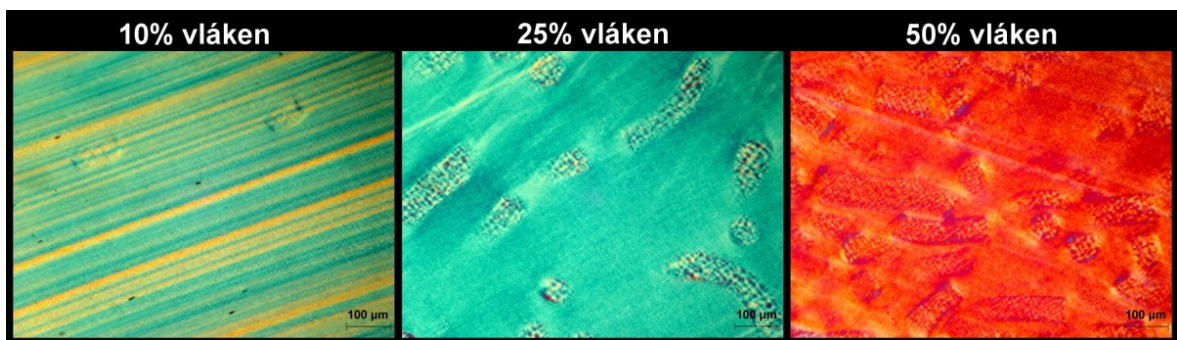
Zkušební tyčinka pro rázovou zkoušku byla nejdříve plátkovou pilkou zakrácena a umístěna do mikrotomu *Leica RM2255* (Obr. 38 vlevo). Řezy byly vedeny v podélně ve směru toku taveniny. Nejdříve byla plocha začištěna několika řezy do hloubky 1mm, poté byl pořízen řez o tloušťce 30 μm a tento umístěn na laboratorní sklíčko, zakápnut kapalinou a překryt krycím sklíčkem. Tento zkušební vzorek byl následně umístěn do optického mikroskopu se 160x zvětšením a polarizačním filtrem, opatřeným fotoaparátém *Sony DSC-F717* (Obr. 38 vpravo) za účelem pořizování snímků. Po pořízení snímků vláken s matricí byl pořízen snímek měřky pro určení měřítka.



Obr. 38 Mikrotom Leica RM2255 vlevo, mikroskop vpravo

9.4.3 Dosažené výsledky

Na pořízených snímcích jednotlivých směsí (Obr. 39) je jasně patrný rozdíl v množství vyztužujících plniv. Při 10% plnění nejsou plniva v matrici téměř rozeznatelná. U 25% směsi jsou již vlákna jasně patrná a dochází k ovlivnění světelného spektra a azurovému zbarvení materiálu. Část těchto vláken je jednosměrně orientovaná. U 50% směsi dochází k ovlivnění světelného spektra a k červenooranžovému barevnému nádechu materiálu. Množství plniv je zde na první pohled větší. Větší podíl vláken než u předchozích dvou je také jednosměrně orientován.



Obr. 39 Mikrotomové řezy

10 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

U vstříkovaných zkušebních tělísek byla provedena zkouška vrubové houževnatosti a tahová zkouška za různých teplot.

10.1 Zkouška vrubové houževnatosti

10.1.1 Princip zkoušky

Cílem této zkoušky je zjistit odolnost materiálu proti rázovému namáhání. Zkušební tělísko o rozměrech dle normy ISO 179-1 opatřené vrubem se vloží do měřicího přístroje a rázově zatíží. Měří se velikost síly potřebné k jeho porušení.

10.1.2 Postup

Zkouška vrubové houževnatosti byla provedena na měřicím přístroji *CEAST® Resil Impactor* (Obr. 40). Několik tělísek pro zkoušku vrubové houževnatosti o rozměrech 100 x 10 x 4 mm bylo nejprve na ručním vrubovači *Ceast 6955.000* opatřeno vrubem o hloubce 2 mm a následně otestováno dle normy ISO 179-1/ 1 p A. Materiál zkušebních tělísek byl však natolik houževnatý, že nedošlo k jeho porušení a výsledek zkoušky byl tedy neprůkazný. Z toho důvodu byly zkušební vzorky opatřeny vrubem o hloubce 3 mm a závaží (kladivo) spouštěno pod úhlem 140°.

Podmínky zkoušky:

Podmínky zkoušky		
Počáteční úhel kladiva	140	°
Délka závěsu	0,5	m
Hmotnost kladiva	2,192	kg
Teplota	23	°C
Výška tělíska	4	mm
Šířka tělíska v místě vrubu	7	mm

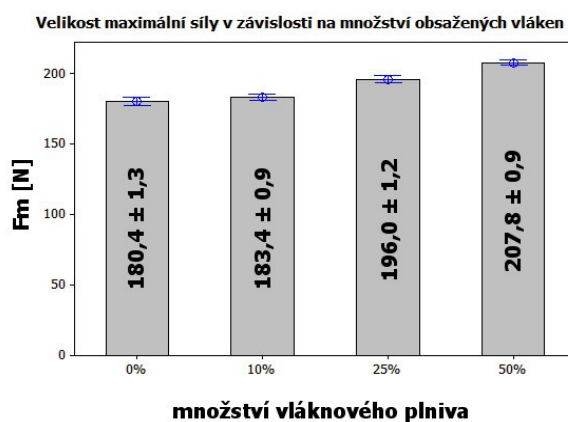
Tab. 3 Podmínky rázové zkoušky



Obr. 40 CEAST® Resil Impactor

10.1.3 Dosažené výsledky

Maximální síla, které dokáže zkušební tělísko opatřené vrubem odolávat se zvyšuje s rostoucím množstvím ozářeného LLDPE vláknového plniva - viz. Graf. 4. Při 50 % koncentraci vláknového plniva dojde k nárustu maximální síly o 15 %. To je způsobeno zvýšením tuhosti a pevnosti vlivem vyztužení orientovanými vlákny. Časový průběh napětí viz. Příloha P II: Vrubová houževnatost - časový průběh zatížení.



Graf. 4 Velikost maximální síly v závislosti na množství obsažených vláken

Množství vláken	F _m [N]	FL [N]	s _m [mm]	s _L [mm]	A _m [KJ·m ⁻²]	A _b [KJ·m ⁻²]
0%	180,4 ± 1,3	103 ± 4	0,351 ± 0,001	1,013 ± 0,008	0,381 ± 0,007	2,010 ± 0,014
10%	183,4 ± 0,9	121 ± 4	0,351 ± 0,001	0,933 ± 0,002	0,384 ± 0,008	1,990 ± 0,013
25%	196,0 ± 1,2	132 ± 3	0,35	0,914 ± 0,002	0,398 ± 0,004	2,055 ± 0,006
50%	207,8 ± 0,9	150,1 ± 1,5	0,35	0,9	0,416 ± 0,004	2,063 ± 0,009

Tab. 4 Srovnání naměřených hodnot rázové zkoušky pro různé množství obsažených vláken

10.2 Tahová zkouška

10.2.1 Princip zkoušky

Při zkoušce materiálu tahem se zjišťuje odolnost materiálu proti tahovému namáhání. Tato zkouška se provádí na trhacím stroji. Zkušební tělísko o rozměrech dle normy ISO 527-1 se upne do čelistí trhacího stroje, zatíží předzatížením, popřípadě vytemperuje na požadovanou teplotu a poté se provede zkouška. Z výsledků zkoušky lze určit mimo jiné pevnost, tažnost nebo modul pružnosti.

10.2.2 Postup

Tahová zkouška byla provedena na zkušebním stroji *Zwick 1456* (Obr. 41) za teplot 23 a 80°C. Ke zkoušce za zvýšené teploty bylo použito teplotní komory *Zwick/Roell W91255*. Poslední datum kalibrace trhacího stroje bylo 14.12.2010, teplotní komory pak 7.1.2008. Do čelistí trhacího stroje bylo upnuto zkušební tělísko o rozměrech dle normy ISO 527-1, to bylo zatíženo předzatížením o velikosti 3N. Extenzometry byly umístěny ve vzdálenosti 20 mm. Minimální zkoušené množství plněných zkušebních vzorků bylo 25 ks.

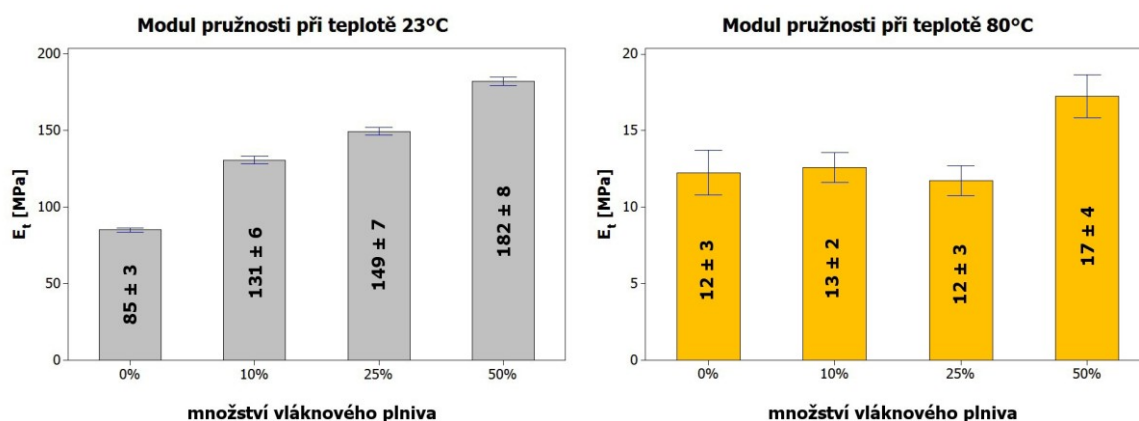


Obr. 41 *Zwick 1456* s teplotní komorou *Zwick/Roell W91255*

10.2.3 Dosažené výsledky

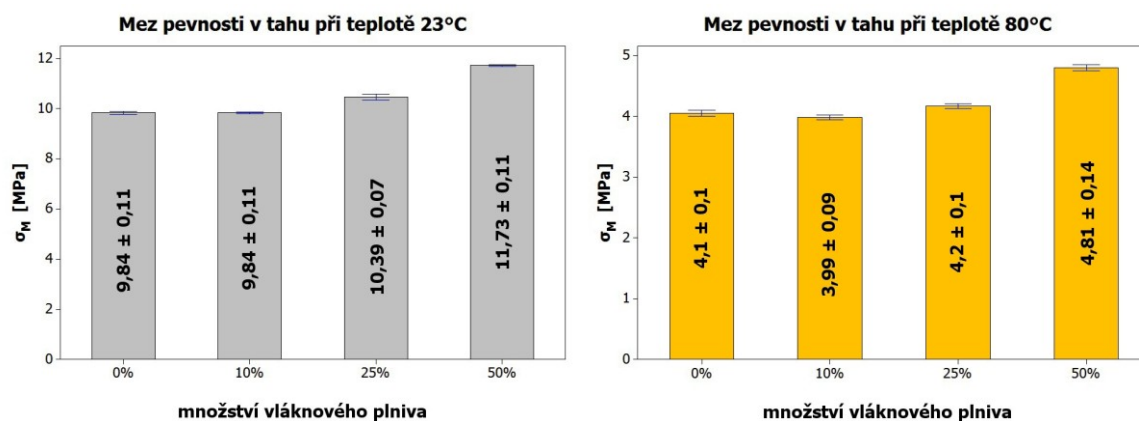
Z naměřených hodnot plyne, že při teplotě 23°C dojde ke zvýšení modulu pružnosti E_t již přidáním 10 % ozářených vláken, a to o 54 % (Graf. 5). Při 25 % vláken vzroste tento

modul o 75 % a při 50 % vláken pak o 114%. Ovšem při teplotě 80°C jsou rozdíly ve velikosti modulu pružnosti mezi čistým LDPE a plněným 10 a 25 % minimální. Tato vlákna tedy nejsou v menším množství vhodná ke zvyšování modulu pružnosti. Až při 50 % koncentraci vláken dojde ke zvýšení modulu pružnosti teplotně zatíženého materiálu o 42 %.



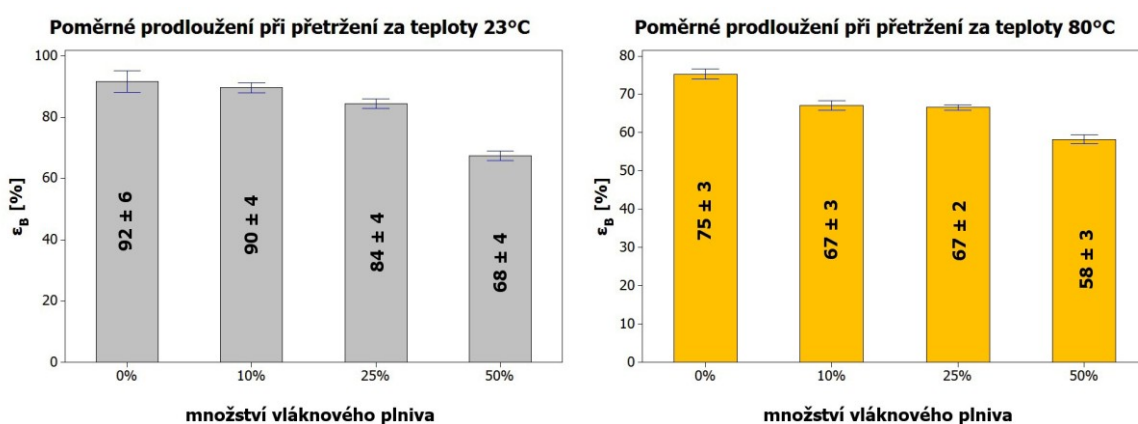
Graf. 5 Srovnání modulu pružnosti vzorků s rozdílným množstvím výplně za různých teplot

Co se týká pevnosti v tahu zde se vliv plniv při teplotě 23°C projeví až při koncentraci vláknového plniva 25 % (Graf 6.), kdy dojde ke zvýšení meze pevnosti v tahu o 6 %. Při 50% koncentraci za stejné teploty vzroste pevnost v tahu o 19 %. Za teploty 80°C dojde k poklesu meze pevnosti v tahu u 10 % množství plniv o 2,7 %. Za toto zhoršení vlastností pravděpodobně mohou samotná vlákna, která v malé koncentraci plní ve změkklém materiálu spíše funkci nečistot, na nichž dochází ke vzniku mikrotrhlin. S rostoucím množstvím vláknového plniva již vlákna plní vyztužující funkci a při jejich 25 % koncentraci dojde ke zvýšení meze pevnosti o 2,4 %, při 50 % koncentraci pak o 17 %.



Graf. 6 Srovnání pevnosti v tahu u vzorků s rozdílným množstvím výplně za různých teplot

Dalším zkoumaným aspektem byl vliv ozářeného vláknového plniva na tažnost materiálu. Jak je patrné Graf. 7 za teploty 23°C docházelo s množstvím přidaného vláknového plniva k postupnému poklesu tažnosti materiálu až o 26 % při 50 % množství plniv. Také při teplotě 80°C se do tažnosti promítla přítomnost vláken v matrici. Příměsí 10 a 25 % vláken došlo k takřka totožnému poklesu tažnosti materiálu o 11 %. Při 50 % koncentraci vláken v LDPE matrici došlo již k výraznějšímu poklesu tažnosti a to o 23 %.



Graf. 7 Srovnání tažnosti vzorků s rozdílným množstvím výplně za různých teplot

Průměrné získané hodnoty pevnosti, tažnosti, modulu pružnosti a velikosti maximální síly při teplotách 23 a 80°C jsou uvedeny v Tab. 5 a Tab. 6.

vláken	a_0 [mm]	b_0 [mm]	σ_M [MPa]	σ_B [MPa]	E_t [MPa]	ϵ_M [%]	ϵ_B [%]	Δl_B [mm]	F_M [N]
0%	3,981±0,005	9,876±0,005	9,84±0,11	9,15±0,19	85±3	79±3	92±6	18,4±1,3	387±4
10%	3,99	9,882±0,005	9,84±0,11	9±0,2	131±6	77±3	90±4	18±0,8	388±4
25%	3,99	9,884±0,006	10,39±0,07	9,4±0,2	149±7	68±2	84±4	17±0,8	410±3
50%	3,989±0,003	9,881±0,005	11,73±0,11	10,5±0,3	182±8	57±3	68±4	13,51±0,9	462±4

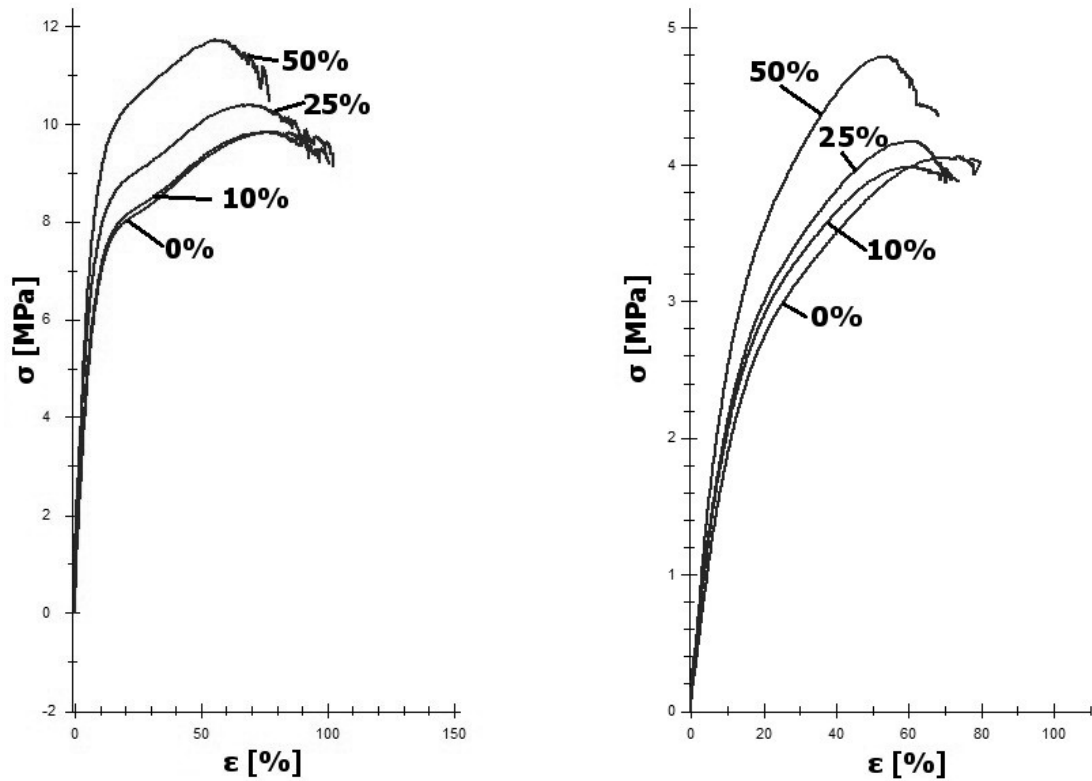
Tab. 5 Průměrné výsledky tahové zkoušky při teplotě 23°C

vláken	a_0 [mm]	b_0 [mm]	σ_M [MPa]	σ_B [MPa]	E_t [MPa]	ϵ_M [%]	ϵ_B [%]	Δl_B [mm]	F_M [N]
0%	3,99	9,884±0,005	4,1±0,1	3,96±0,11	12±3	69,1±1,9	75±3	15,2±0,5	160±4
10%	3,997±0,005	9,9	3,99±0,09	3,86±0,11	13±2	60,2±1,6	67±3	13,6±0,6	158±4

25%	3,99	9,896±0,005	4,2±0,1	4,03±0,12	12±3	60,8±1,6	67±2	13,5±0,4	165±4
50%	3,99	9,88±0,006	4,81±0,14	4,64±0,16	17±4	54±2	58±3	11,8±0,6	190±6

Tab. 6 Průměrné výsledky tahové zkoušky při teplotě 80°C

Průběhy průměrných hodnot tahových křivek jsou vyobrazeny v Graf. 8. Z těchto grafů je patrný výrazný pokles jak pevnosti, tak i tažnosti materiálu s rostoucí teplotou.



Graf. 8 Tahové křivky různě plněných materiálů při teplotách 23 vlevo a 80°C
vpravo

11 STANOVENÍ MOŽNOSTÍ BUDOUCÍHO VYUŽITÍ TOHOTO MATERIÁLU

Orientační náklady na výrobu kompozitu

Cena LLDPE vláken nebyla bohužel firmou *Baumhüter extrusion GmbH* poskytnuta, pravděpodobně je variabilní v závislosti na odebíraném množství.

Průměrná cena za ozařování je definována plošnou hmotností a pohybuje se mezi 1,- až 3,- € za kg, přičemž minimální cena za zakázku činí 250 €.

Cena LDPE granulátu závisí na výrobci a dodavateli. Konečnou cenu ovlivňuje také velikost odebíraného množství. Přibližná cena za jeden kilogram LDPE granulátu činí 3 €.

K těmto materiálovým nákladům je třeba přičíst také náklady na míchání směsí, jejich granulaci, skladování a přepravu.

Oblasti možného použití kompozitu

Tento materiál má vyšší pevnost a modul pružnosti než čisté LDPE. I když u něj došlo k poklesu tažnosti, nadále zůstává dostatečně měkký a poddajný. Vzhledem k vysoké chemické odolnosti a zdravotní nezávadnosti by jej bylo možné využít v potravinářském, farmaceutickém, nebo automobilovém průmyslu jako obalového materiálu, hadiček apod.

12 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zjištění vlivu radiačně zesíťovaných krátkých LLDPE vláken na mechanické vlastnosti materiálu, při jejich použití jako vyztužujícího plniva s matricí z LDPE.

Zkoušení vláken

Při tepelném zatížení ozářených i neozářených vláken docházelo k jejich smrštění přibližně na třetinu jejich původní délky. Toto je způsobeno výrobním procesem vláken, která jsou při zvlákňování dlužena.

Otestováním vláken na diferenčním skenovacím kalorimetru došlo k zjištění, že vlivem ozáření klesla jak teplota tání, tak i teplota krystalizace těchto vláken. Tento jev je zdůvodněn v kapitole 8.2.3.

Příprava materiálu

Při pokusu o míchání těchto LLDPE vláken s práškovým LDPE za pomoci gravitačního dávkovače *Movacolor MC-Balance* přímo na vstřikovacím stroji docházelo u vláken jejich vzájemným propletením a působením elektrostatických sil k tvorbě klenby nad šroubem dávkovače a přerušení distribuce vláken do plastikační jednotky vstřikovacího stroje. Z toho důvodu byla směs prášku a vláken nejdříve promíchána v plastové nádobě a poté domíchána na fluidní míchačce k dosažení maximální homogenity směsi. Poté proběhl pokus o vstřikování této směsi. Směs však tvořila chuchvalce podobné plodům bavlníku, které opět utvořily klenbu v násypce. Konečným řešením byla tedy granulace připravené směsi na dvoušneku, kde při mírném působení síly na směs v násypce docházelo k dobré distribuci směsi do vstupního pásma dvoušneku. Vytlačená struna byla poté nagraulována a poté již bez problémů použita na vstřikovacím stroji.

Mechanické vlastnosti

Se zvyšujícím se množstvím vláknového plniva docházelo při teplotě 23°C s jeho rostoucí koncentrací při tahové zkoušce k zvýšení pevnosti v tahu a modulu pružnosti (kapitola 10.2.3). Naopak s rostoucí koncentrací vláken docházelo ke snižování tažnosti materiálu. Při rázové zkoušce se zvyšujícím se množstvím plniva docházelo k nárstu maximální síly, a tedy ke zvyšování tuhosti a pevnosti. Materiál je však natolik houževnatý,

že při rázové zkoušce sice docházelo k jeho narušení částečným lomem, ale ani při 50% plnění nedošlo k jeho úplnému přelomení.

Při tahové zkoušce za teploty 80°C byly však rozdíly u čistého materiálu a plněného vlákny s koncentrací 10 a 25% v modulu pružnosti a mezí pevnosti v tahu minimální. Na změně mechanických vlastností se podepsala až 50% koncentrace vláken, díky které došlo ke zlepšení těchto vlastností. Tažnost materiálu klesala s množstvím přidaného plniva.

Možnosti aplikací

Vzhledem k výsledným mechanickým vlastnostem by tento kompozit mohl najít uplatnění v nejrůznějších průmyslových odvětvích, například k výrobě hadiček, obalových materiálů apod. Ovšem vezmeme-li v úvahu komplikovanější způsob výroby tohoto kompozitu a z toho plynoucí zvýšené výrobní náklady, lze jej doporučit spíše pro aplikace v hromadné a velkosériové výrobě z důvodu minimalizace těchto přídatných nákladů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURYMONOGRAFIE:

- [1] Ducháček V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [2] VESELÝ, K. *Polymery : struktura, syntézy, vlastnosti, zpracování*. Brno : Česká společnost průmyslové chemie, 1992. 177 s. ISBN 8002009517.
- [3] KUTA, A. *Technologie a zařízení pro zpracovávání kaučuků a plastů*. Vyd. 1. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. 203 s. ISBN 80-7080-367-3.
- [4] VACULÍK, J. Diplomová práce – Vlastnosti radiačně síťovaných polymerů. Zlín: UTB, 2010. 126 s.
- [5] LAMBOROVÁ, R. Diplomová práce – Recyklace ozářených polymerů. Zlín: UTB, 2009. 95 s.
- [6] ITC 2006 (Zlín, Česko). Vliv ozařování na vlastnosti plastů. In MAŇAS, Miroslav; STANĚK, Michal; DRGA, Tomáš. *ITC 2006 - V. mezinárodní nástrojářská konference sborník přednášek : Nástroje 2006 = Tools 2006 : Zlín*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2006. s. 37. ISBN 80-7318-448-6.
- [7] JANDL, J.; PETR, I. *Ionizující záření v životním prostředí*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1988. 200 s.
- [8] FUKÁTKO, T. *Detekce a měření různých druhů záření*. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2007. 189 s. ISBN 978-80-7300-193-3.
- [9] JARUŠEK, J. *Metody zkoumání polymerů*. 2. vyd. Pardubice : VŠCHT, 1984. 105 s.
- [10] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. 193 s. ISBN 8021424435.
- [11] IVES, G; MEAD, J; RILEY, M. *Handbook of plastics test methods*. London : Iliffe books, 1971. 476 s. ISBN 0-592-05449-7.

- [12] MEISSNER, B; ZILVAR, V. *Fyzika polymerů. Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987. 308 s.
- [13] ISO 291. *Standard atmospheres for conditioning and testing*. Brussels : European Committee for Standardization, 1997. 9 s.
- [14] ISO 527-4. *Determination of tensile properties Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites*. Brussels : European Committee for Standardization, 1997. 12 s.

ELEKTRONICKÉ ZDROJE:

- [15] *Úvod do fyziky pevných látek: Pedagogická fakulta Masarykovy Univerzity - Katedra fyziky* [online]. [cit. 2010-10-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/FMkomplet3.htm>>
- [16] Minster, J. *Odborná skupina Mechanika kompozitních materiálů a konstrukcí - Aplikace vláknových polymerních kompozitů ve stavebnictví* [online]. [cit. 2010-11-01]. Dostupné z WWW: <<http://www.csm-kompozity.wz.cz/stav.pdf>>
- [17] *Všeobecný popis materiálů používaných při výrobě kompozitů - Svět casemoddingu* [online]. [cit. 2010-11-01]. Dostupné z WWW: <<http://www.modding.cz/?p=73>>
- [18] *DEPARTMENT OF BIOCHEMISTRY AND MOLECULAR BIOPHYSICS, THE UNIVERSITY OF ARIZONA: The Chemistry of water* [online]. [cit. 2010-11-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.biology.arizona.edu/biochemistry/tutorials/chemistry/page3.html>>
- [19] *BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG* [online]. [cit. 2010-11-07]. Dostupné z WWW: <<http://bsg.eu>>
- [20] *Wikipedie Otevřená encyklopedie* [online]. [cit. 2010-11-18]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org>>
- [21] *HUKOS s.r.o.* [online]. [cit. 2010-11-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.hukos.cz/>>

- [22] WOODS, R. J. ; PIKAEV, A. K. *Applied radiation chemistry: radiation processing* [online]. [s.l.] : [s.n.], 1993 [cit. 2010-11-28]. Dostupné z WWW: <http://books.google.cz/books?id=H8IXSP55D58C&printsec=frontcover&dq=Applied+Radiation+Chemistry:+Radiation+Processing&hl=cs&ei=e4zyTLjKCNKBswa1maT9Cg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CCoQ6AEwAA>. ISBN 0-471-54452-3.
- [23] DRIML, B. *Nebezpečné chemické látky a přípravky* [online]. 2010 [cit. 2010-12-09]. 4. Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení. Dostupné z WWW: <http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf>.
- [24] TEMPOS: *Technická měřidla a počítačové systémy* [online]. 2009 [cit. 2010-12-12]. Zkušební lisy. Dostupné z WWW: <<http://www.tempos.cz/zkusebni-stroje/zkusebnilisy>>.
- [25] International Atomic Energy Agency. *TRENDS IN RADIATION STERILIZATION OF HEALTH CARE PRODUCTS* [online]. Austria : [s.n.], červenec 2008 [cit. 2011-01-22]. Dostupné z WWW: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1313_web.pdf>. ISBN 978-92-0-111007-7.
- [26] SCHULTE, K., FRANK, L. *High-density Polyethylene Fiber/Polyethylene Matrix Composites* [online], Pergamon, Oxford, 2000, Pages 231-248, , 10.1016/B0-08-042993-9/00065-6.
Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B7589-49H1FC0-16/2/388f7a6f7917fa1a597cdfb6702b6ec1>>. ISBN 978-0-08-042993-9.
- [27] LACROIX, F., LU, H. -Q., SCHULTE, K. *Wet powder impregnation for polyethylene composites: preparation and mechanical properties* [online], Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 30, Issue 3, March 1999, Pages 369-373, DOI: 10.1016/S1359-835X(98)00085-2.
Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TWN-3VTRK5H-P/2/45435492420ae2654122963e488d7069>>. ISSN 1359-835X.
- [28] LACROIX, F., WERWER, M., SCHULTE, K. *Solution impregnation of polyethylene fibre/polyethylene matrix composites*, Composites Part A: Applied Science and

Manufacturing, Volume 29, Issue 4, 1998, Pages 371-376, DOI: 10.1016/S1359-835X(97)00101-2.

Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TWN-3T5GMJM-12/2/9130dd8f40ace45047a0698883d1b41e>>. ISSN 1359-835X.

[29] *LaborTech*® [online]. 2009 [cit. 2011-03-11]. LabTest® - Model CHK Charpyho kladivo 300J. Dostupné z WWW: <www.labortech.cz>.

[30] *DfR Solutions* [online]. 2011 [cit. 2011-03-23]. Differential Scanning Calorimetry. Dostupné z WWW: <<http://www.dfrsolutions.com/differential-scanning-calorimetry/>>.

[31] *Movacolor B.V. - Color in Control* [online]. 2010 [cit. 2011-03-31]. MC-Balance product information. Dostupné z WWW: <http://www.movacolor.com/downloads/mc_balance_product_information.pdf>.

[32] HOFSTE, J. M., KERSTEN, J. M. E., PENNING, A. J. *Surface charges in blending short fibres with polyethylene powder* [online], Journal of Electrostatics, Volume 45, Issue 1, 1 November 1998, Pages 69-78, DOI: 10.1016/S0304-3886(98)00037-0.

Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V02-3V8D5VR-5/2/fd37de27044459ea93ace2ab41520558>>. ISSN 0304-3886.

[33] *Arburg* [online]. 2011 [cit. 2011-04-05]. ALLROUNDER 420 C 1000-350 advance. Dostupné z WWW: <<http://www.arburg.com>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Název
LDPE		Nízkohustotní polyetylen
LLDPE		Lineární nízkohustotní polyetylen
s		Směrodatná odchylka
Ø		Průměrná hodnota
σ		Střední kvadratická chyba aritmetického průměru
	Bq	Becquerel
E _t	MPa	Modul pružnosti
	eV	Elektron volt
ε _B	%	Poměrné prodloužení při přetržení
ε _M	%	Poměrné prodloužení
	Gy	Dávka záření
Δl _B	mm	Prodloužení při přetržení
Δl _M	mm	Prodloužení při max. zatížení
F _M	N	Maximální síla
ITT	g/10min	Index toku taveniny
l	mm	délka
l ₀	mm	Původní délka
σ _B	MPa	Napětí při přetržení
σ _M	MPa	Maximální napětí

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklad polymeru (meru) [1].....	13
Obr. 2 Rozdělení polymerů podle tvaru molekul [1].....	14
Obr. 3 Pneumatika – zvětšení 80 000x [15]	16
Obr. 4 Fázové rozhraní vlákno – matrice [17]	17
Obr. 5 Zvlákňovací	18
Obr. 6 Stroj na práškovou impregnaci (vlevo) a příklad takto naimpregnovaného vlákna (vpravo) [26,27]	21
Obr. 7 Impregnace PE vláken směsí LDPE a xylenu [28]	21
Obr. 8 Kovalentní vazba a vodíkové můstky [18]	23
Obr. 9 Radiační síťování [6].....	24
Obr. 10 Polymery komerčně vhodné k radiačnímu síťování [19].....	25
Obr. 11 Princip síťování vlivem beta záření [19].....	25
Obr. 12 Princip síťování vlivem gama záření [19]	26
Obr. 13 Srovnání pronikání elektronů a gama kvant záření [19].....	27
Obr. 14 Změna mech. vlastností po ozáření.....	27
Obr. 15 Srovnání jednostranného a oboustranného ozařování [25]	28
Obr. 16 Záření α [20].....	30
Obr. 17 Záření β^- [20]	30
Obr. 18 Gama záření [20]	31
Obr. 19 Lineární urychlovač elektronů [19].....	33
Obr. 20 Linka s využitím gama záření [25]	34
Obr. 21 Dozimetr RadEye PRD-ER [21].....	34
Obr. 22 Jiskrový optický emisní spektrometr ARUN Polyspek [21].....	35
Obr. 23 Zkušební tělíska pro tahovou zkoušku.....	37
Obr. 24 Tahová zkouška oceli.....	38
Obr. 25 Tahové křivky pro různé materiály	39
Obr. 26 Trhací stroj Zwick 1456	39
Obr. 27 Sharpyho kladivo [29].....	40
Obr. 28 Zkušební vzorek vláken.....	45
Obr. 29 Teplotní Komora Zwick/Roell W91255 vlevo, mikrotvrdoměr AFFRI DM2A vpravo.	46

Obr. 30 Srovnání ozářených a neozářených vláken při různých teplotách na mikrotvrdoměru AFFRI DM2A při 100x zvětšení.....	47
Obr. 31 Makroskopické srovnání ozářených a neozářených vláken při teplotě 160°C.	47
Obr. 32 Vliv teplotněmechanického zatěžování na ozářená vlákna.....	48
Obr. 33 Perkin Elmer - Pyris 1 DSC [30]	49
Obr. 34 Movacolor MC-Balance vlevo a uprostřed, vpravo pohled na výstup dávkovače [31].....	51
Obr. 35 Postup míchání směsi práškového LDPE a vláken	52
Obr. 36 Granulace směsi prášku a vláken	53
Obr. 37 Arburg Allrounder 420 C 1000-350 [33].....	54
Obr. 38 Mikrotom Leica RM2255 vlevo, mikroskop vpravo	55
Obr. 39 Mikrotomové řezy	56
Obr. 40 CEAST® Resil Impactor	58
Obr. 41 Zwick 1456 s teplotní komorou Zwick/Roell W91255	59

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Procesní podmínky vytlačovacího stroje Brabender	53
Tab. 2	Procesní podmínky vstřikování směsi LDPE prášku a vláken	54
Tab. 3	Podmínky rázové zkoušky.....	57
Tab. 4	Srovnání naměřených hodnot rázové zkoušky pro různé množství obsažených vláken.....	58
Tab. 5	Průměrné výsledky tahové zkoušky při teplotě 23°C	61
Tab. 6	Průměrné výsledky tahové zkoušky při teplotě 80°C	62

SEZNAM GRAFŮ

Graf. 1 Sítová analýza LDPE prášku	44
Graf. 2 Srovnání průměru ozářených a neozářených vláken při různých teplotách.....	47
Graf. 3 Měření LLDPE vláken pomocí diferenčního skenovacího kalorimetru	50
Graf. 4 Velikost maximální síly v závislosti na množství obsažených vláken.....	58
Graf. 5 Srovnání modulu pružnosti vzorků s rozdílným množstvím výplně za různých teplot.....	60
Graf. 6 Srovnání pevnosti v tahu u vzorků s rozdílným množstvím výplně za různých teplot.....	61
Graf. 7 Srovnání tažnosti vzorků s rozdílným množstvím výplně za různých teplot	61
Graf. 8 Tahové křivky různě plněných materiálů při teplotách 23 vlevo a 80°C vpravo	62

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: BGS Protokol o ozáření

Příloha P II: Vrubová houževnatost - časový průběh zatížení

Příloha P III: Vrubová houževnatost - získané hodnoty

Příloha P IV: Tahová zkouška - tahové křivky při různém plnění a teplotě

Příloha P V: Tahová zkouška - získané hodnoty

PŘÍLOHA P I: BGS PROTOKOL O OZÁŘENÍ

Zertifikat

BGS

IDEEN PLUS ENERGIE

BGS John-Deere-Str. 3 76646 Bruchsal
Uni Zlin
Tschechische Republik

Zertifikats-Nr.: 31200116

BGS-Auftrags-Nr.: 312.00079.01
Ihr Lieferschein: für Uni Zlin

Artikel: Muster

Charge: 3 Sack PE-Fasern

Kunden-Nr. : 200409
Datum : 13.01.2011
Seite : 1 von 1

1 x

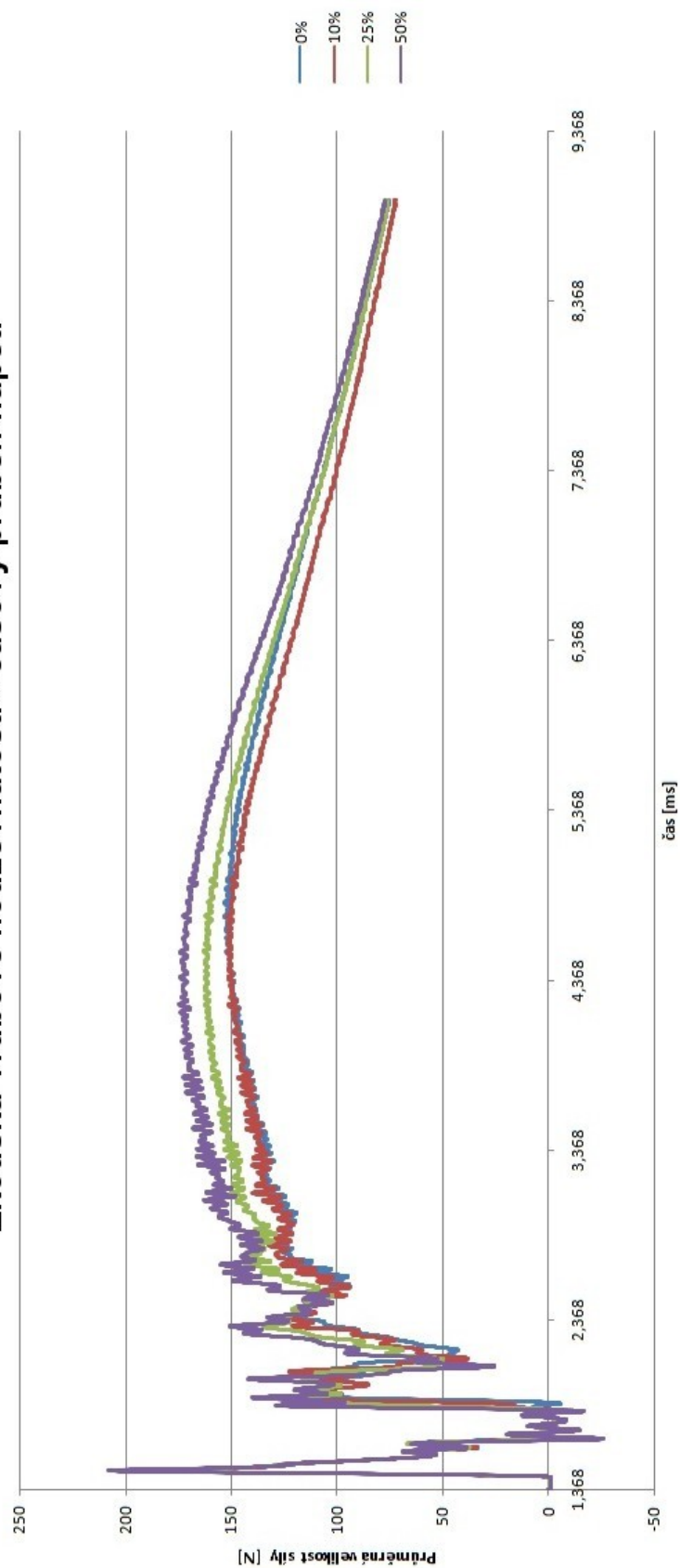
Strahlenart:	ELEKTRONEN
Energie [MeV]:	10,00
Min. Dosis [kGy]:	200,00
Bestrahlt am:	13.01.2011

Bestrahlungszertifikat - Certificate of irradiation - Certificat d'irradiation
BGS IDEEN PLUS ENERGIE BGS IDEEN PLUS ENERGIE BGS IDEEN PLUS ENERGIE



PŘÍLOHA P II: VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST - ČASOVÝ PRŮBĚH ZATÍŽENÍ

Zkouška vrubové houževnatosti - časový průběh napětí



PŘÍLOHA P III: VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST - ZÍSKANÉ HODNOTY

Bez vláknové výplně

vzorek	Fm [N]	FL [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [kJ·m ⁻²]	Ab [kJ·m ⁻²]
1	173,3	78,77	0,35	1,01	0,35	1,93
2	177,71	103,35	0,35	1,01	0,37	1,95
3	182,76	118,48	0,35	1,03	0,37	2,02
4	184,02	106,5	0,35	1,02	0,36	2,03
5	185,91	112,17	0,35	0,94	0,38	1,99
6	180,23	115,96	0,35	1,02	0,39	2,01
7	179,6	104,61	0,35	1,02	0,39	2,05
8	179,6	86,34	0,36	1,03	0,43	2,07
9	185,28	113,43	0,35	1,03	0,39	2,02
10	175,82	92,01	0,35	1,02	0,38	2,03
∅	180,4	103	0,351	1,013	0,381	2,01
s	1,3	4	0,001	0,008	0,007	0,014

10% vláken

vzorek	Fm [N]	FL [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [kJ·m ⁻²]	Ab [kJ·m ⁻²]
1	183,39	109,65	0,35	0,93	0,34	1,93
2	185,91	134,86	0,35	0,93	0,37	2,04
3	182,13	122,26	0,35	0,94	0,38	2
4	185,26	127,93	0,35	0,93	0,37	1,99
5	180,23	110,28	0,36	0,92	0,43	1,97
6	178,97	105,24	0,35	0,94	0,39	1,95
7	185,91	124,78	0,35	0,93	0,4	1,98
8	179,6	108,39	0,35	0,94	0,39	1,97
9	185,28	136,75	0,35	0,93	0,37	2
10	187,17	131,71	0,35	0,94	0,4	2,07
∅	183,4	121	0,351	0,933	0,384	1,99
s	0,9	4	0,001	0,002	0,008	0,013

25% vláken

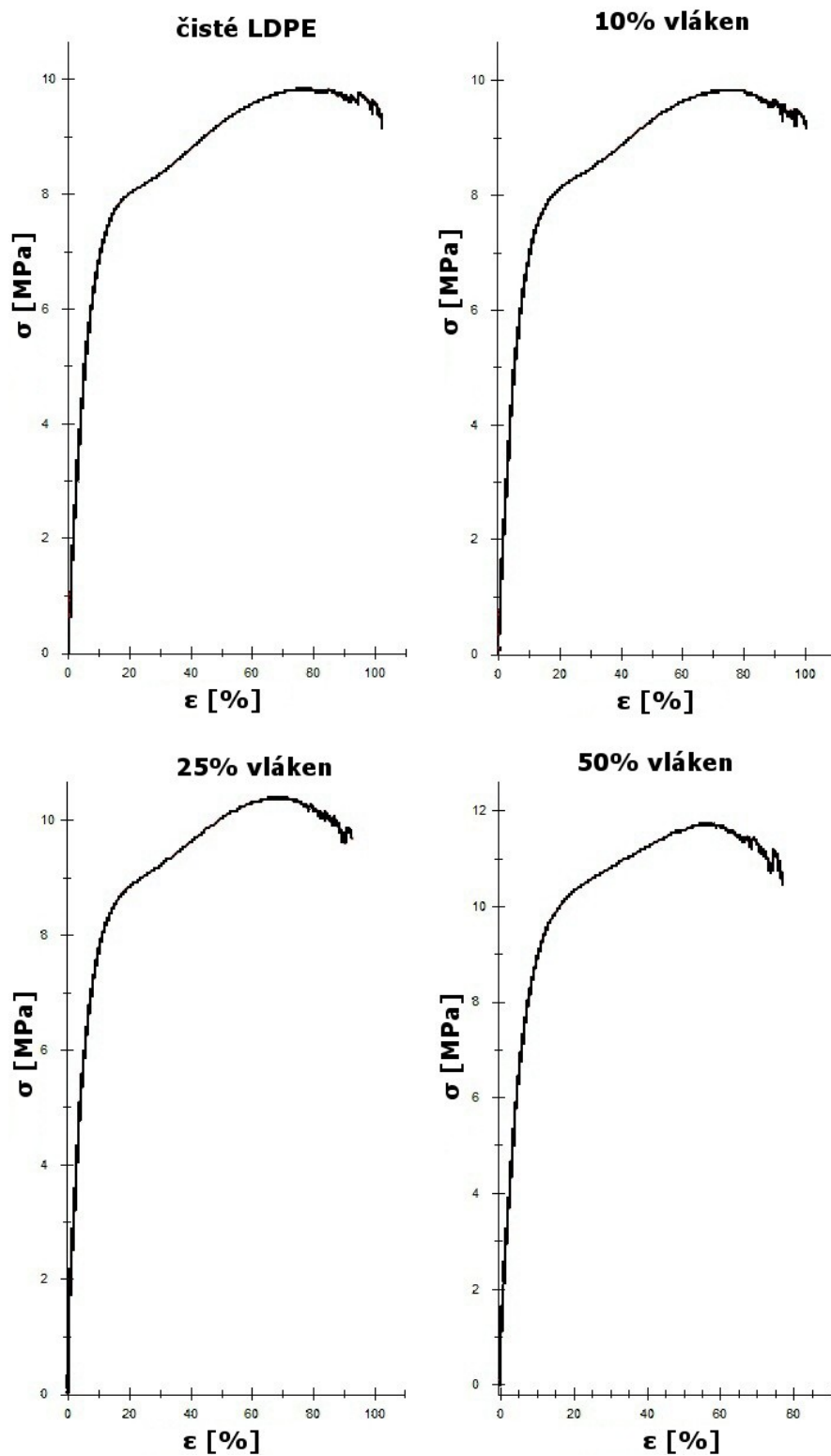
vzorek	Fm [N]	FL [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [kJ·m ⁻²]	Ab [kJ·m ⁻²]
1	192,84	141,79	0,35	0,92	0,38	2,04
2	200,4	129,82	0,35	0,91	0,42	2,07
3	199,14	119,74	0,35	0,91	0,4	2,08
4	193,47	139,27	0,35	0,91	0,4	2,07
5	197,88	138,01	0,35	0,91	0,39	2,04
6	199,77	134,86	0,35	0,91	0,39	2,04
7	194,1	126,04	0,35	0,92	0,41	2,06
8	189,06	139,27	0,35	0,93	0,4	2,08
9	195,36	119,11	0,35	0,91	0,4	2,03
10	197,88	136,12	0,35	0,91	0,39	2,04
∅	196	132	0,35	0,914	0,398	2,055
s	1,2	3	0	0,002	0,004	0,006

50% vláken

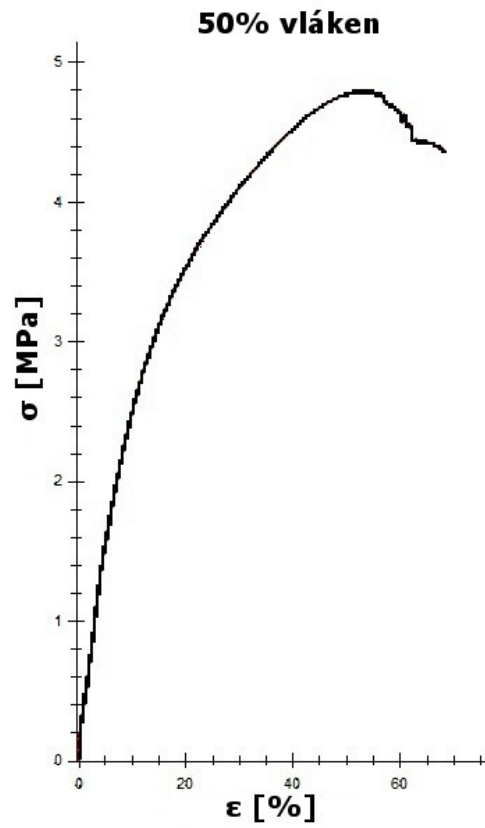
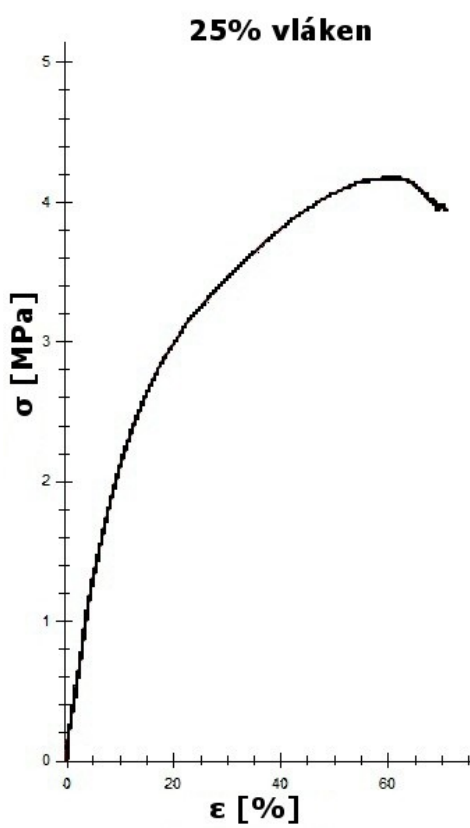
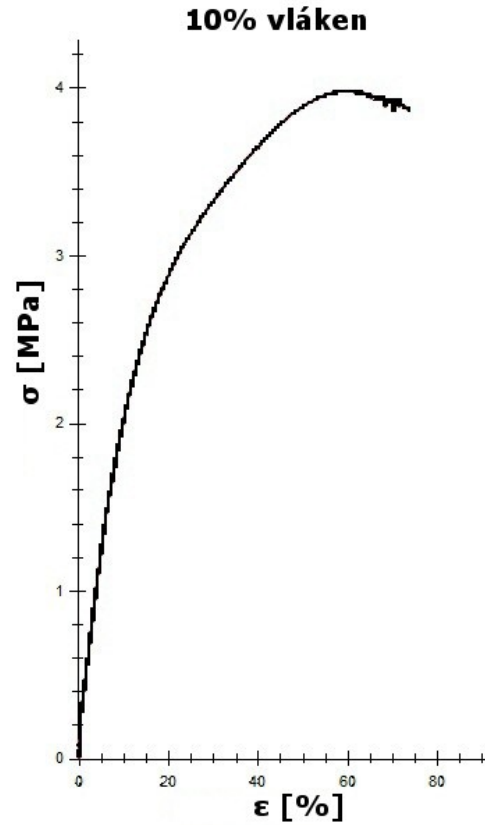
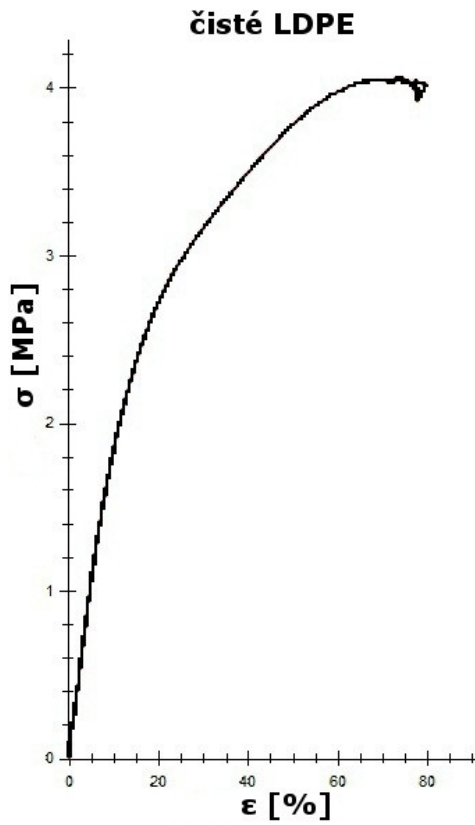
vzorek	Fm [N]	FL [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [kJ·m ⁻²]	Ab [kJ·m ⁻²]
1	204,81	144,31	0,35	0,9	0,41	2,05
2	207,96	148,72	0,35	0,9	0,4	2,06
3	211,74	147,46	0,35	0,9	0,42	2,05
4	206,07	149,99	0,35	0,9	0,43	2,09
5	210,48	156,92	0,35	0,9	0,42	2,02
6	208,59	146,83	0,35	0,9	0,41	2,08
7	203,55	146,83	0,35	0,9	0,4	2,06
8	209,85	155,03	0,35	0,9	0,41	2,06
9	209,22	157,55	0,35	0,9	0,44	2,12
10	205,44	147,46	0,35	0,9	0,42	2,04
∅	207,8	150,1	0,35	0,9	0,416	2,063
s	0,9	1,5	0	0	0,004	0,009

PŘÍLOHA P IV: TAHOVÁ ZKOUŠKA - TAHOVÉ KŘIVKY PŘI RŮZNÉM PLNĚNÍ A TEPLITĚ

Průběh napětí a poměrného prodloužení při teplotě 23°C



Průběh napětí a poměrného prodloužení při teplotě 80°C



PŘÍLOHA P V: TAHOVÁ ZKOUŠKA - ZÍSKANÉ HODNOTY

Čistý LDPE - 23°C											
č.	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]	σ _M [MPa]	σ _B [MPa]	E _t [MPa]	Nom. Str. R _m [mm]	ε _M [%]	ε _B [%]	Δl _M [mm]	Δl _B [mm]	F _M [N]
1	3,97	9,87	10,06	9,4	81,72	80,12	80,18	94,18	16,04	18,84	394,17
2	3,99	9,88	9,97	9,29	85,77	77,89	77,95	91,42	15,6	18,29	390,87
3	3,98	9,88	9,87	9,39	85,73	78,11	78,16	88,63	15,64	17,74	388,95
4	3,98	9,87	9,86	9,14	81,53	82,91	82,97	102,5	16,6	20,51	387,61
5	3,98	9,88	9,78	9,15	86,13	73,54	73,58	81,78	14,73	16,37	384,18
6	3,98	9,88	9,85	9,19	90,36	73,12	73,17	82,77	14,64	16,56	387,16
7	3,98	9,88	9,84	9,32	85,31	77,9	77,95	91,08	15,6	18,23	387,09
8	3,99	9,88	9,75	8,89	84,25	81,42	81,46	92,06	16,31	18,43	383,56
9	3,98	9,88	9,67	8,94	86,55	73,79	73,85	84,32	14,78	16,87	381,36
10	3,98	9,87	9,65	9,07	83,71	79,12	79,17	94,91	15,85	18,99	379,51
11	3,98	9,88	9,81	8,83	83,21	78,99	79,04	90,31	15,82	18,07	385,24
12	3,99	9,88	9,81	9,34	87,2	81,25	81,3	93,3	16,27	18,67	385,72
13	3,98	9,87	9,83	9,04	84,17	77,48	77,54	88,34	15,52	17,68	387,16
14	3,98	9,87	9,88	9,33	81,95	83,79	83,85	101,45	16,78	20,3	388,16
15	3,98	9,87	9,99	8,91	88,31	80,65	80,7	99,23	16,15	19,86	392,28
Ø	3,981	9,876	9,84	9,15	85,06	78,67	78,72	91,75	15,75	18,36	386,87
s	0,005164	0,005071	0,11	0,19	2,5	3,26	3,26	6,23	0,65	1,25	3,89
σ	0,13	0,05	1,1	2,12	2,94	4,14	4,14	6,79	4,14	6,79	1,01

10 % LLDPE vláken - 23°C											
č.	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]	σ _M [MPa]	σ _B [MPa]	E _t [MPa]	Nom. Str. R _m [mm]	ε _M [%]	ε _B [%]	Δl _M [mm]	Δl _B [mm]	F _M [N]
1	3,99	9,88	10,01	9,18	131,21	70,28	73,89	84,83	14,79	16,97	394,66
2	3,99	9,88	10,01	9,07	124,05	71,68	75,37	87,72	15,08	17,55	394,66
3	3,99	9,87	9,95	8,94	142	70,44	74,04	87,09	14,81	17,42	392,43
4	3,99	9,88	9,88	9,21	134,1	70,37	73,97	86,53	14,8	17,31	389,03
5	3,99	9,89	9,94	8,62	135,42	75,24	79,11	88,94	15,83	17,79	391,71
6	3,99	9,88	9,91	9,33	130,11	75,29	79,17	87,87	15,84	17,58	391,16
7	3,99	9,88	9,88	9,29	139,67	75,23	79,1	88,99	15,82	17,8	389,31
8	3,99	9,88	9,88	9,1	126,9	68,02	71,51	81,68	14,31	16,34	389,58
9	3,99	9,88	9,89	8,79	136,43	75,7	79,58	92,77	15,92	18,56	389,75
10	3,99	9,88	9,84	9,21	128,69	75,45	79,32	90,2	15,87	18,05	388,04
11	3,99	9,88	9,79	8,98	139,77	71,56	75,23	86,17	15,05	17,24	385,94
12	3,99	9,88	9,91	9,39	140,11	75,76	79,65	89,76	15,94	17,96	390,82
13	3,99	9,89	9,81	9,18	130,24	71,69	75,38	89,76	15,08	17,96	386,8
14	3,99	9,88	9,88	9,05	128,46	75,94	79,86	94,46	15,98	18,9	390,06
15	3,99	9,88	9,66	9,13	129,85	75,03	78,89	88,44	15,79	17,69	381
16	3,99	9,89	9,92	8,9	122,6	75,7	79,6	96,86	15,93	19,38	391,06
17	3,99	9,89	9,9	8,75	131,61	75,97	79,88	93,35	15,98	18,68	390,51
18	3,99	9,88	9,78	9,08	128,79	75,19	79,06	89,94	15,82	17,99	385,43
19	3,99	9,88	9,74	8,9	122,31	75,88	79,8	92,22	15,97	18,45	383,99
20	3,99	9,89	9,67	8,77	118,19	75,69	79,6	90,55	15,93	18,12	381,17
21	3,99	9,88	9,82	9,07	131,46	69,99	73,59	85,66	14,72	17,14	387,38
22	3,99	9,88	9,81	8,88	134,01	75,69	79,58	100,7	15,92	20,15	386,8
23	3,99	9,88	9,54	8,58	120,16	70,83	74,46	85,55	14,9	17,12	376,09
24	3,99	9,89	9,87	9,08	128,39	75,82	79,71	94,17	15,95	18,84	389,2
25	3,99	9,89	9,74	9,08	134,46	70,02	73,62	89,06	14,73	17,82	384,16
∅	3,99	9,882	9,84	9,02	130,76	73,54	77,32	89,73	15,47	17,95	388,03
s	0	0,005228	0,11	0,21	6,3	2,64	2,78	4,11	0,56	0,82	4,34
σ	0	0,05	1,12	2,33	4,82	3,59	3,6	4,58	3,59	4,58	1,12

25 % LLDPE vláken - 23°C											
č.	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]	σ _M [MPa]	σ _B [MPa]	E _t [MPa]	Nom. Str. R _m [mm]	ε _M [%]	ε _B [%]	Δl _M [mm]	Δl _B [mm]	F _M [N]
1	3,99	9,88	10,32	9,19	147,12	66,1	69,48	85,83	13,9	17,17	406,88
2	3,99	9,88	10,54	9,25	146,06	63,49	66,73	86,52	13,35	17,31	415,47
3	3,99	9,88	10,4	9,52	160,96	63,25	66,47	82,4	13,3	16,48	410,04
4	3,99	9,88	10,34	8,89	154,65	66,1	69,48	84,36	13,9	16,88	408,5
5	3,99	9,88	10,44	9,74	153,27	65,23	68,55	81,39	13,72	16,29	411,62
6	3,99	9,89	10,46	9,54	157,57	63,29	66,52	82,8	13,31	16,56	412,41
7	3,99	9,88	10,4	9,59	145,09	63,49	66,73	80,98	13,35	16,2	410,38
8	3,99	9,88	10,54	9,72	153,12	63,57	66,81	83,87	13,37	16,78	415,36
9	3,99	9,9	10,26	9,03	137,51	63,48	66,73	79,01	13,35	15,81	405,3
10	3,99	9,89	10,26	9,43	144,61	63,25	66,47	78,82	13,3	15,77	404,31
11	3,99	9,88	10,41	9,1	143,54	63,04	66,26	79,1	13,26	15,83	410,87
12	3,99	9,88	10,33	9,33	138,32	65,92	69,3	91,05	13,87	18,22	407,23
13	3,99	9,89	10,49	9,62	154,38	68,31	71,8	80,92	14,36	16,19	413,44
14	3,99	9,89	10,45	9,05	145,14	65,59	68,95	90,35	13,79	18,08	412,48
15	3,99	9,9	10,39	9,45	153,45	69,03	72,56	92,98	14,52	18,6	410,11
16	3,99	9,89	10,41	9,6	157,11	68,08	71,56	86,86	14,32	17,38	411,38
17	3,99	9,89	10,42	9,46	156,09	67,37	70,82	84,64	14,17	16,93	411,11
18	3,99	9,89	10,41	9,65	148,52	63,95	67,23	82,31	13,45	16,47	410,9
19	3,99	9,88	10,49	9,54	160,27	67,5	70,95	86,95	14,19	17,39	413,99
20	3,99	9,89	10,36	9,45	157,57	63,7	66,94	81,12	13,39	16,23	408,22
21	3,99	9,89	10,39	8,96	154,71	63,29	66,53	83,16	13,31	16,64	409,87
22	3,99	9,88	10,33	9,36	145,09	63,5	66,75	90,26	13,36	18,06	407,54
23	3,99	9,88	10,41	9,47	143,93	63,29	66,51	82,36	13,31	16,48	410,35
24	3,99	9,88	10,32	9,54	148,77	65,9	69,27	84,99	13,86	17	407,02
25	3,99	9,88	10,35	9,49	139	65,7	69,06	87,24	13,82	17,45	407,84
26	3,99	9,88	10,34	9,42	142,43	66,14	69,53	84,12	13,91	16,83	407,74
27	3,99	9,88	10,36	9,42	151,29	69,71	73,28	90,19	14,66	18,04	408,43
28	3,99	9,88	10,32	9,45	140,25	63,45	66,68	79,81	13,35	15,97	406,81
29	3,99	9,88	10,33	9,28	151,48	63,43	66,67	77,9	13,34	15,59	407,26
30	3,99	9,88	10,4	9,43	151,82	63,7	66,95	90,39	13,4	18,08	409,94
∅	3,99	9,884	10,39	9,4	149,44	65,06	68,39	84,42	13,68	16,89	409,76
s	0	0,006261	0,07	0,22	6,68	2	2,11	4,14	0,42	0,83	2,79
σ	0	0,06	0,68	2,34	4,47	3,08	3,08	4,9	3,08	4,9	0,68

50 % LLDPE vláken - 23°C											
č.	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]	σ _M [MPa]	σ _B [MPa]	E _t [MPa]	Nom. Str. R _m [mm]	ε _M [%]	ε _B [%]	Δl _M [mm]	Δl _B [mm]	F _M [N]
1	3,99	9,89	11,96	10,02	167,22	54,7	57,51	68,88	11,5	13,78	471,43
2	3,98	9,88	11,59	10,49	170,35	51,83	54,46	62,11	10,9	12,43	455,89
3	3,98	9,88	11,72	10,84	177,96	55,35	58,15	65,17	11,64	13,04	460,87
4	3,99	9,87	11,73	10,01	180,79	52,32	54,96	63,38	11	12,68	461,96
5	3,99	9,88	11,68	10,72	172,39	52,43	55,1	68,15	11,02	13,63	460,63
6	3,99	9,89	11,76	10,55	170	52,18	54,83	64,8	10,97	12,97	464,13
7	3,99	9,88	11,56	10,68	173,2	58,28	61,25	76,27	12,25	15,26	455,34
8	3,99	9,88	11,71	10,7	176,36	51,94	54,58	63,7	10,92	12,74	461,79
9	3,99	9,88	11,4	10,31	176,74	51,98	54,6	63,09	10,93	12,62	449,55
10	3,99	9,88	11,68	9,92	190,96	52,32	54,94	67,22	10,99	13,45	460,59
11	3,99	9,88	11,82	10,66	183,66	54,82	57,59	68,75	11,52	13,75	465,98
12	3,99	9,88	11,8	10,31	181,96	52,1	54,73	66,24	10,95	13,25	465,19
13	3,99	9,88	11,75	10,37	191,08	52,9	55,57	66,73	11,12	13,35	463,2
14	3,99	9,88	11,91	10,57	181,14	54,91	57,67	67	11,54	13,41	469,44
15	3,99	9,88	11,87	10,89	182,25	52,66	55,3	65,48	11,07	13,1	467,83
16	3,99	9,88	11,74	10,47	182,69	54,98	57,75	68,14	11,56	13,63	462,75
17	3,99	9,88	11,79	10,51	172,65	52,43	55,09	65,33	11,02	13,07	465,22
18	3,99	9,88	11,71	10,57	190,04	52,78	55,44	64,49	11,09	12,9	461,69
19	3,99	9,88	11,61	9,93	187,81	56,92	59,79	73,83	11,96	14,77	457,85
20	3,99	9,88	11,76	10,87	189,94	52,64	55,29	64,27	11,06	12,86	463,47
21	3,99	9,88	11,65	10,16	181,82	58,12	61,06	77,06	12,22	15,42	459,36
22	3,99	9,87	11,73	10,76	184,62	51,91	54,52	59,15	10,91	11,84	462,1
23	3,99	9,88	11,81	10,97	186,9	54,92	57,69	65,2	11,54	13,04	465,98
24	3,99	9,88	11,75	10,77	183,37	57,19	60,07	68,56	12,02	13,72	463,23
25	3,99	9,88	11,81	10,59	195,84	52,87	55,52	65,98	11,11	13,2	465,57
26	3,99	9,88	11,8	10,35	192,6	57,88	60,79	71,32	12,16	14,27	465,09
27	3,99	9,88	11,67	9,99	176,94	58,38	61,33	73,89	12,27	14,78	459,94
28	3,99	9,89	11,74	10,31	192,31	56,93	59,78	73,75	11,96	14,75	462,75
29	3,99	9,89	11,71	10,43	188,06	57,7	60,63	71,72	12,13	14,35	462,03
30	3,99	9,88	11,72	10,54	182,5	52,9	55,57	65,6	11,12	13,13	461,83
Ø	3,989	9,881	11,73	10,48	182,14	54,31	57,05	67,51	11,41	13,51	462,42
s	0,002537	0,004498	0,11	0,3	7,58	2,33	2,45	4,28	0,49	0,86	4,27
σ	0,06	0,05	0,9	2,84	4,16	4,28	4,29	6,33	4,29	6,33	0,92

Čistý LDPE - 80°C

č.	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]	σ _M [MPa]	σ _B [MPa]	E _t [MPa]	Nom. Str. R _m [mm]	ε _M [%]	ε _B [%]	Δl _M [mm]	Δl _B [mm]	F _M [N]
1	3,99	9,89	3,98	3,9	11,54	73,34	73,38	77,24	14,81	15,59	157,04
2	3,99	9,89	3,8	3,76	6,38	68,65	68,69	72,63	13,96	14,75	149,93
3	3,99	9,89	4,05	4	7,23	69,02	69,11	73,65	14,01	14,92	159,64
4	3,99	9,89	4,03	3,96	14,55	69,01	69,05	73,85	13,93	14,89	158,99
5	3,99	9,89	4,03	3,99	10,97	67,3	67,37	72,3	13,61	14,6	158,96
6	3,99	9,89	4,02	3,97	16,97	69,38	69,42	74,69	13,97	15,02	158,44
7	3,99	9,88	3,99	3,94	13,25	67,22	67,28	71,81	13,57	14,48	157,52
8	3,99	9,88	3,97	3,87	13,02	67,49	67,51	74,71	13,63	15,07	156,59
9	3,99	9,88	4,17	4,12	13,21	72,26	72,31	76,58	14,57	15,42	164,52
10	3,99	9,88	4,12	4,06	14,89	68,34	68,39	74,25	13,78	14,95	162,43
11	3,99	9,88	4,18	4,12	12,8	67,65	67,7	73,7	13,66	14,86	164,76
12	3,99	9,88	4,08	3,98	9,79	72,18	72,24	80,04	14,61	16,17	160,95
13	3,99	9,88	4,08	3,99	13,59	67,73	67,78	76,71	13,67	15,46	160,95
14	3,99	9,88	4,1	4	14,66	69,33	69,37	79,83	13,97	16,07	161,64
15	3,99	9,88	4,13	3,73	10,99	68,5	68,56	77,82	13,85	15,7	162,87
16	3,99	9,88	4,15	4,06	12,1	67,49	67,55	74,69	13,67	15,1	163,7
Ø	3,99	9,884	4,05	3,96	12,24	69,06	69,11	75,28	13,95	15,19	159,93
s	0	0,005	0,1	0,11	2,76	1,91	1,91	2,51	0,38	0,5	3,72
σ	0	0,05	2,36	2,76	22,56	2,76	2,76	3,34	2,75	3,28	2,33

10 % LLDPE vláken - 80°C											
č.	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]	σ _M [MPa]	σ _B [MPa]	E _t [MPa]	Nom. Str. R _m [mm]	ε _M [%]	ε _B [%]	Δl _M [mm]	Δl _B [mm]	F _M [N]
1	4	9,9	3,72	3,57	11,89	62,24	62,31	70,11	12,62	14,18	146,94
2	3,99	9,9	4,03	3,99	11,62	61,77	61,85	65,72	12,51	13,28	159,03
3	4	9,9	3,91	3,85	8,41	62,19	62,22	68,35	12,64	13,86	155,01
4	4	9,9	3,84	3,66	8,91	60,38	60,45	70,05	12,27	14,19	152,09
5	4	9,9	4,02	3,89	14,74	62,4	62,42	68,76	12,59	13,85	159,3
6	4	9,9	3,96	3,92	13,73	58,73	58,77	62,83	11,86	12,67	156,62
7	4	9,9	3,86	3,79	14,29	59,05	59,08	65,01	11,93	13,11	152,88
8	4	9,9	3,97	3,87	12,52	59,62	59,68	66,61	12,06	13,45	157,34
9	4	9,9	4,08	3,81	12,09	62,44	62,5	74,63	12,62	15,05	161,74
10	3,99	9,9	4,08	4,01	9,46	58,9	58,98	63,51	11,95	12,86	161,26
11	3,99	9,9	4,05	3,86	8,49	59,38	59,43	69,97	12,08	14,19	159,99
12	3,99	9,9	4,1	4,03	10,69	59,03	59,11	64,57	11,96	13,05	162,08
13	3,99	9,9	4,01	3,78	10,24	59,58	59,64	62,91	12,08	12,73	158,27
14	3,99	9,9	4,12	3,98	16,83	59,6	59,65	67,92	12,01	13,67	162,8
15	4	9,9	4,05	3,96	13,1	58,3	58,38	64,78	11,79	13,07	160,43
16	4	9,9	4,01	3,68	16,65	59,41	59,43	65,97	11,98	13,28	158,72
17	4	9,9	3,97	3,85	13,98	59,4	59,42	64,08	11,99	12,93	157,14
18	4	9,9	4,03	3,93	16,4	58,01	58,04	62,64	11,69	12,61	159,47
19	3,99	9,9	4,09	3,99	11,17	61,85	61,87	68,94	12,52	13,93	162,15
20	3,99	9,9	3,96	3,85	12,27	58,53	58,62	66,55	11,84	13,42	156,31
21	4	9,9	3,92	3,8	13,12	58,9	58,93	67,73	11,91	13,67	154,94
22	4	9,9	4,01	3,91	15,03	59,12	59,15	65,95	11,93	13,29	158,68
23	4	9,9	3,93	3,83	14,71	58,55	58,57	64,9	11,82	13,08	155,46
24	4	9,9	4,11	3,93	13,56	62,79	62,83	72,03	12,68	14,52	162,94
25	4	9,9	3,92	3,78	12,81	62,58	62,66	71,72	12,64	14,45	155,18
26	4	9,9	4	3,88	10,4	62,29	62,33	68,67	12,62	13,88	158,44
Ø	3,997	9,9	3,99	3,86	12,58	60,19	60,24	67,11	12,18	13,55	157,89
s	0,004707	0	0,09	0,11	2,42	1,63	1,63	3,12	0,34	0,63	3,71
σ	0,12	0	2,36	2,88	19,27	2,7	2,7	4,65	2,75	4,66	2,35

25 % LLDPE vláken - 80°C											
č.	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]	σ _M [MPa]	σ _B [MPa]	E _t [MPa]	Nom. Str. R _m [mm]	ε _M [%]	ε _B [%]	Δl _M [mm]	Δl _B [mm]	F _M [N]
1	3,99	9,89	4,06	3,96	13,05	62,3	62,37	67,17	12,59	13,55	160,15
2	3,99	9,89	4,12	3,85	13,1	59,5	59,57	64,03	12,04	12,93	162,55
3	3,99	9,89	4,07	3,9	12,71	61,37	61,44	67,5	12,4	13,61	160,49
4	3,99	9,89	4,15	4,07	16,13	62,77	62,84	66,31	12,66	13,35	163,96
5	3,99	9,9	4,28	4,06	7,68	62,57	62,63	67,77	12,73	13,76	169,01
6	3,99	9,9	4,15	4,02	11,72	62,68	62,75	69,15	12,69	13,97	163,86
7	3,99	9,9	4,25	4,05	9,39	62,09	62,16	65,96	12,6	13,36	167,84
8	3,99	9,9	4,05	3,96	10,75	62,56	62,63	67,76	12,68	13,71	160,05
9	3,99	9,9	4,3	4,22	12,55	62,4	62,46	64,66	12,62	13,06	170
10	3,99	9,9	4,14	3,9	10,01	62,5	62,57	71,44	12,7	14,47	163,34
11	3,99	9,89	4,25	4,13	9,64	59,17	59,24	64,5	12	13,05	167,53
12	3,99	9,89	4,11	3,9	8,51	59,2	59,27	68,4	12,03	13,85	162,1
13	3,99	9,89	4,07	3,94	12,34	59,38	59,43	66,77	12,02	13,49	160,53
14	3,99	9,9	4,19	4,03	12,45	59,3	59,38	66,64	12	13,45	165,47
15	3,99	9,9	4,18	4,14	9,67	60,92	60,97	64,03	12,36	12,97	165,06
16	3,99	9,9	4,14	4,06	8,27	62,43	62,5	66,96	12,7	13,59	163,72
17	3,99	9,89	4,26	4,14	9,05	59,5	59,56	65,56	12,09	13,29	168,18
18	3,99	9,9	4,32	4,06	7,39	62,32	62,38	67,58	12,7	13,74	170,45
19	3,99	9,9	4,07	3,82	15,35	62,32	62,38	68,92	12,58	13,89	160,66
20	3,99	9,89	4,31	4,18	14,45	59,43	59,5	66,23	12	13,35	170,17
21	3,99	9,89	4,39	4,3	8,89	59,04	59,11	64,25	12	13,02	173,26
22	3,99	9,89	4,27	4,17	15,22	59,2	59,26	61,59	11,95	12,41	168,35
23	3,99	9,89	4,25	4,14	13,57	58,9	58,97	64,43	11,9	13	167,53
24	3,99	9,89	4,27	4,08	16,99	59,14	59,17	66,1	11,92	13,31	168,67
25	3,99	9,9	4,28	4,16	13,37	59,15	59,25	66,31	11,95	13,36	168,91
26	3,99	9,9	4,16	4,05	13,93	62,35	62,42	67,02	12,59	13,51	164,41
27	3,99	9,9	4,11	4	13,57	58,84	58,9	64,77	11,89	13,06	162,46
28	3,99	9,9	4,14	3,96	12,63	59,26	59,34	69,14	12	13,96	163,62
29	3,99	9,9	4,01	3,89	8,64	59,23	59,32	67,05	12,05	13,59	158,41
30	3,99	9,9	4,01	3,87	11,06	61,71	61,8	69,87	12,49	14,11	158,54
∅	3,99	9,896	4,18	4,03	11,74	60,72	60,79	66,6	12,3	13,46	164,98
s	0	0,00504	0,1	0,12	2,64	1,57	1,57	2,06	0,33	0,42	3,98
σ	0	0,05	2,42	2,98	22,48	2,59	2,59	3,09	2,65	3,13	2,41

50 % LLDPE vláken - 80°C											
č.	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]	σ _M [MPa]	σ _B [MPa]	E _t [MPa]	Nom. Str. R _m [mm]	ε _M [%]	ε _B [%]	Δl _M [mm]	Δl _B [mm]	F _M [N]
1	3,99	9,88	4,98	4,88	18,24	54,35	54,44	57,17	11	11,55	196,37
2	3,99	9,89	4,82	4,55	17,61	51,1	51,18	54,51	10,35	11,02	190,39
3	3,99	9,87	4,69	4,57	11,8	54,4	54,46	58,59	11,06	11,89	184,52
4	3,99	9,87	4,88	4,67	17,07	51,69	51,77	57,97	10,46	11,7	192,25
5	3,99	9,87	4,85	4,53	18,96	52,3	52,38	59,31	10,57	11,96	191,11
6	3,99	9,88	4,86	4,72	14,09	52,72	52,78	55,85	10,7	11,31	191,22
7	3,99	9,88	4,87	4,56	16,58	50,67	50,75	53,41	10,26	10,79	191,97
8	3,99	9,88	4,98	4,87	18,32	51,09	51,17	54,31	10,33	10,96	196,71
9	3,99	9,88	4,84	4,71	19,53	54,5	54,58	56,98	11	11,48	190,84
10	3,99	9,88	5,01	4,87	25,3	53,31	53,37	56,3	10,73	11,32	197,4
11	3,99	9,88	4,99	4,82	24,54	51,87	51,95	55,95	10,45	11,25	196,64
12	3,99	9,88	4,9	4,74	23,88	51,26	51,34	54,54	10,33	10,97	193,28
13	3,99	9,88	5,01	4,9	19,59	52,95	53,04	55,44	10,7	11,18	197,53
14	3,99	9,88	4,85	4,68	16,43	54,76	54,83	58,03	11,05	11,69	191,11
15	3,99	9,88	4,77	4,46	20,34	54,96	55,03	61,56	11,08	12,39	188,02
16	3,99	9,88	4,81	4,66	18,26	54,25	54,32	59,05	10,96	11,91	189,6
17	3,99	9,88	4,8	4,61	11,8	55,29	55,37	61,37	11,22	12,42	189,16
18	3,99	9,89	4,75	4,61	11,99	54,79	54,87	60,34	11,12	12,21	187,44
19	3,99	9,89	4,86	4,57	16,82	54,52	54,59	60,85	11,02	12,27	191,59
20	3,99	9,89	4,72	4,55	17,3	54,43	54,5	61,7	10,99	12,43	186,34
21	3,99	9,89	4,93	4,86	15,32	54,84	54,92	59,19	11,08	11,93	194,65
22	3,99	9,89	4,97	4,79	16,34	54,63	54,7	60,1	11,02	12,1	196,26
23	3,99	9,87	4,62	4,5	11,43	54,75	54,83	59,97	11,1	12,12	182,05
24	3,99	9,87	4,65	4,5	11,62	54,45	54,52	56,05	11,04	11,35	183,15
25	3,99	9,88	4,66	4,47	17,3	54,23	54,3	58,1	10,94	11,7	183,87
26	3,99	9,88	4,69	4,55	17,95	52,37	52,43	58,03	10,56	11,68	185,07
27	3,99	9,88	4,51	4,32	13,99	54,88	54,97	60,17	11,1	12,14	177,69
28	3,99	9,88	4,79	4,65	18	53,63	53,7	57,63	10,82	11,61	188,92
29	3,99	9,88	4,74	4,63	14,13	54,77	54,84	56,58	11,07	11,42	186,86
30	3,99	9,88	4,46	4,3	23,13	61,77	61,84	68,77	12,45	13,83	175,77
∅	3,99	9,88	4,81	4,64	17,26	53,85	53,93	58,26	10,89	11,75	189,59
s	0	0,006149	0,14	0,16	3,77	2,05	2,05	3,04	0,41	0,61	5,62
σ	0	0,06	2,95	3,42	21,87	3,81	3,8	5,21	3,79	5,18	2,96