

Výzkum použití polymerního recyklátu

Bc. Michal Zubík

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Zubík**
Osobní číslo: **T13517**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Výzkum použití polymerního recyklátu**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Příprava zkušebních vzorků pro experiment
3. Provedení experimentu
4. Vyhodnocení naměřených výsledků

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. David Mañas, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

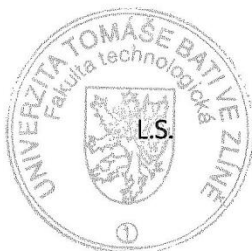
Datum zadání diplomové práce: **30. ledna 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2015**

Ve Zlíně dne 30. ledna 2015



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Zubík Michal

Obor: Konstrukce technologických zařízení

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: 11.5.2015

Michal Zubík

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

Cílem této diplomové práce je zjistit, jak se mění mechanické vlastnosti LDPE (nízkohustotní polyethylen) v závislosti na množství přidaného recyklátu (beta zářením modifikovaný LDPE). Změny mechanických vlastností testovaných zkušebních těles, vyrobených technologií vstřikování, byly měřeny Instrumentovanou zkouškou mikrotvrdosti. Z výsledků měření vyplynulo, že u testovaných zkušebních těles nedošlo ke zhoršení mechanických vlastností.

Klíčová slova: recyklace, tvrdost, mikrotvrdost, indentor, Instrumentovaná zkouška tvrdosti (DSI), LDPE, polyethylen

ABSTRACT

The aim of this thesis is to find out how it changes mechanical properties of LDPE (low density polyethylene) which depend on the amount of added recycled materials (beta radiation modified LDPE). Changes in the mechanical properties of test specimens produced by injection molding were measured by Depth Sensing Indentation. The results of measurement that tested test pieces showed no change of mechanical properties.

Keywords: recycling, hardness, microhardness, Depth Sensing Indentation (DSI), LDPE, polyethylene

Rád bych na tomto místě poděkoval panu doc. Ing. Davidovi Maňasovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a obětavý přístup při řešení diplomové práce.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ÚVOD DO POLYMERŮ	12
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	12
1.2 STRUKTURA POLYMERŮ	14
1.3 HOMOPOLYMERY A KOPOLYMERY	15
1.4 VYUŽITÍ PLASTŮ DLE JEJICH UŽITNÝCH VLASTNOSTÍ	16
2 POLYETHYLEN	17
2.1 FYZIKÁLNĚ MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYETHYLENU	18
3 MODIFIKACE POLYMERŮ	19
3.1 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ	19
3.2 POUŽÍVANÉ DRUHY ZÁŘENÍ	20
4 ZKOUŠKY TVRDOSTI	22
4.1 BRINELLOVA ZKOUŠKA TVRDOSTI.....	22
4.2 ROCKWELLOVA ZKOUŠKA TVRDOSTI	23
4.3 VICKERSOVA ZKOUŠKA TVRDOSTI.....	25
4.4 BERKOVICHOVA ZKOUŠKA	26
4.5 KNOOPOVA ZKOUŠKA TVRDOSTI	27
4.6 SHOREHO ZKOUŠKA TVRDOSTI	28
4.6.1 Měření metodou Shore A, C, D	28
4.7 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI – DSI, IIT.....	30
4.7.1 Faktory ovlivňující výsledek zkoušky.....	32
4.7.2 Základní veličiny určené metodou IIT (DSI).....	33
5 RECYKLACE	35
5.1 TŘÍDĚNÍ PLASTOVÝCH ODPADŮ	36
5.2 MECHANICKÁ RECYKLACE	37
5.3 CHEMICKÁ DEPOLYMERACE	38
5.4 SUROVINOVÁ RECYKLACE	39
5.5 ENERGETICKÉ ZPRACOVÁNÍ	39
II PRAKTICKÁ ČÁST	40
6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	41
7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	42
7.1 ZÁKLADNÍ MATERIÁL	43
7.2 RECYKLÁT.....	43
7.2.1 Síťová analýza recyklátu	44

8	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ	46
8.1	PRINCIP MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI	46
8.2	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	48
8.3	MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI PŘI ZATÍŽENÍ 0,5N	49
8.4	MĚŘENÍ PŘI ZATÍŽENÍ 1N.....	51
8.5	INDENTAČNÍ KŘIVKY	53
9	DISKUSE VÝSLEDKU	55
10	ZÁVĚR	58
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	59
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ	64
	SEZNAM TABULEK	66

ÚVOD

Současná doba neustále požaduje nové technologické a konstrukční materiály. S příchodem 19. století, po druhé světové válce, došlo k obrovskému rozmachu plastů a dnes již v mnoha odvětvích nahradily tradiční materiály, jako je dřevo, kov, sklo, keramika apod. Jejich užité vlastnosti, mezi něž patří tvrdost, pevnost, houževnatost, odolnost vůči vnějším vlivům, životnost a nízká hmotnost, je tak dosadily do čela moderních materiálů. Setkáváme se s nimi denně a takřka na každém kroku.

Ekonomická výhodnost výrobků z plastů a současný trend velkosériové výroby vede k závažné myšlence, jak nakládat s odpadem při výrobě či jak naložit s výrobky, které se stanou neužitnými. Většina velkých firem zpracovávajících plast se problematikou recyklace plastů zabývá jak z hlediska ekonomické, tak z hlediska ekologické. Ekologická stránka problematiky obvykle zahrnuje „zelené myšlení“ a snahu o zmírnění ekologické zátěže na Zemi, která vzniká řešením současných potřeb každodenního života. Ekonomická stránka problematiky je výrazně jednodušší. Ve všech úrovních výrobního procesu je snaha moderními postupy docílit využití co největšího množství vstupní suroviny. Jakýkoliv odpad ve formě přetoků, vtokových soustav a dalších představuje pro firmu finanční ztrátu. Proto se laboratorním měřením zjišťuje, jak dalece příměs recyklátu snižuje užité vlastnosti daného polymeru.

Tato diplomová práce v praktické části popisuje jednu z možných cest jak za pomoci laboratorního měření mikrotvrdosti experimentálně nalézt množství recyklátu, které je možné do základního materiálu přidat, aniž by byly významně změněny požadované vlastnosti. Výsledky výzkumu tak potenciálně mohou zvýšit zisk firmy či snížit negativní dopad na životní prostředí.

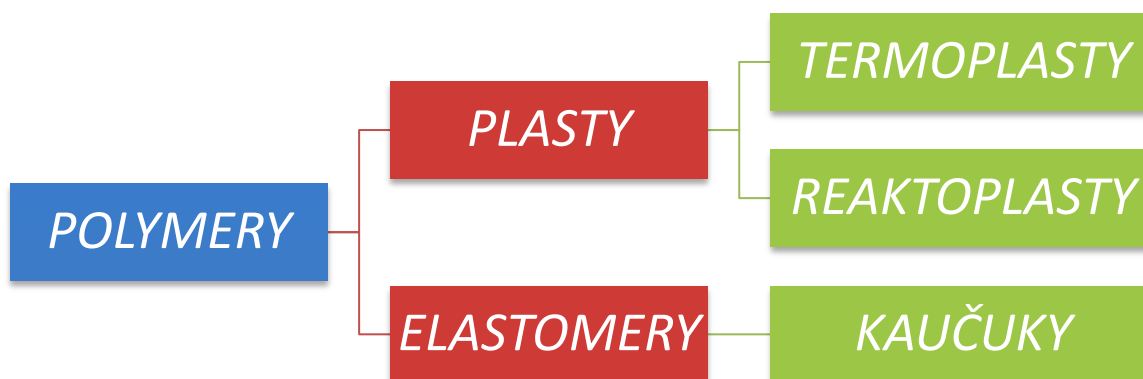
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ÚVOD DO POLYMERŮ

Slovo polymer pochází z řeckého „πολύς μέρος“ [*polýs méros*], což znamená mnoho částí. V moderní době se jím popisují chemické látky, obsahující velmi dlouhé řetězce vytvořené opakováním určitých strukturních jednotek (merů). Tyto řetězce dosahují takové délky, že odebrání jedné nebo i několika částí těchto jednotek příliš nezmění fyzikální či chemické vlastnosti polymeru. Obecně lze polymery rozdělit na přírodní (přírodní kaučuk, celulóza) a syntetické, tedy vyrobené chemickou syntézou (polyethylen, polypropylen, polyvinylchlorid). [1]

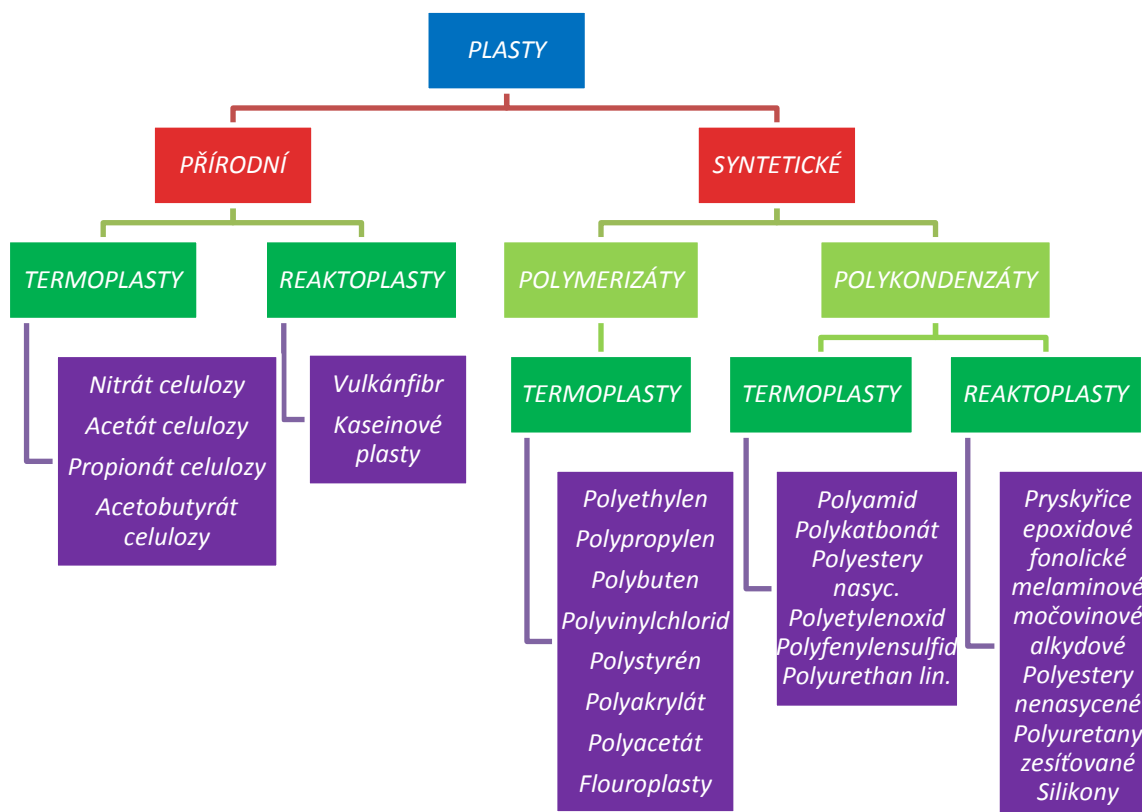
1.1 Základní rozdělení polymerů

Polymer lze rozdělit na plastomery (plasty) a elastomery. Jako plasty se označují polymery, které jsou za běžných podmínek tvrdé, často i křehké a při zvýšené teplotě se stávají plastickými a tvárnými. Pokud je tahle změna opakovatelná a vyvolává fyzikální reakci, mluvíme o termoplastech. Pokud jde o změnu trvalou, protože je výsledkem chemické reakce, bavíme se o reaktoplastech (dříve označovaných jako termosety). [1] [3]



Obr. 1 – Rozdělení polymerů [1]

Elastomery jsou polymery, které lze za běžných podmínek působením malé síly značně deformovat, přičemž po odlehčení je tato deformace vratná. Nejpočetnější podmnožinou elastomerů jsou kaučuky. Elastomery při zahřívání měknou a lze je tvářet, ale po omezenou dobu. Při dalším ohřevu již dojde k prostorovému zesíťování – vulkanizaci. [1] [3]



Obr. 2 – Rozdělení plastomerů [33]

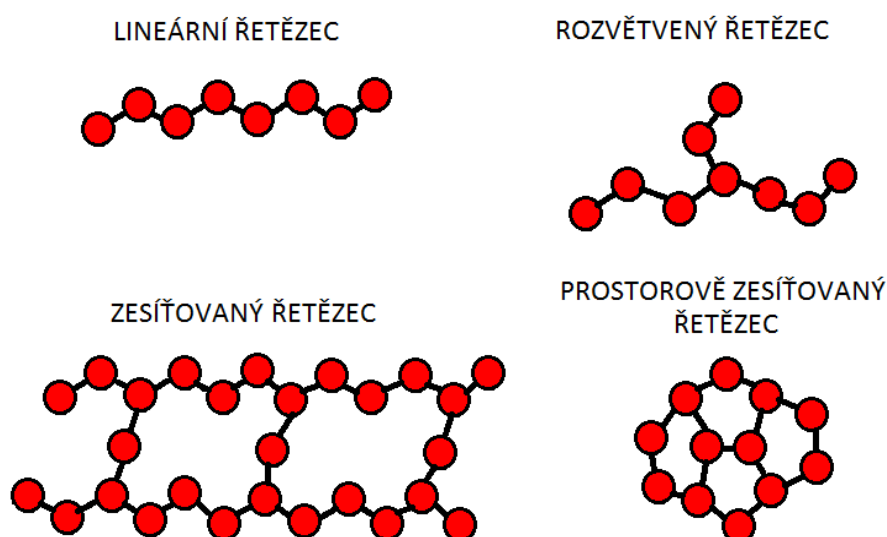
Makromolekuly polymerů lze připravovat pomocí speciálních reakcí, jako jsou polymerace, polykondenzace a polyadice. Jedná se v podstatě o jednoduché chemické reakce, které se několikrát opakují, takže původní nízkomolekulární sloučenina přechází ve vysokomolekulární látku zvanou polymer.

Plastem se polymer stává poté, co jej smísíme s nezbytnými přísadami a převedeme do formy vhodné k dalšímu technologickému zpracování. Například do formy granulí, prášků, tablet, apod. Obecný termín polymer tedy představuje chemickou látku, zatímco plast je technický materiál, který má vhodné užitné vlastnosti. [3]

1.2 Struktura polymerů

Polymerní materiály jsou složeny z makromolekul, které obsahují opakující se jednodušší díly - monomery. Podle jejich vzájemného vnitřního uspořádání lze rozlišit tyto typy:

- *Lineární polymer*. Tento polymer má jednotlivé monomery uspořádány v jedné linii za sebou. V tomto případě mezi pružnými částmi vznikají také vazebné Van der Waalsovy síly. Do této skupiny polymerů se řadí PP, PS, PMMA atd.
- *Rozvětvené polymer*. Makromolekula disponuje hlavním řetězcem, od kterého se oddělují vedlejší řetězce. Polymer s rozvětveným řetězcem disponuje menší hustotou než polymer s čistě lineární strukturou.
- *Polymer se zesíťovaným řetězcem* (se zkříženými články). Sousední větve tohoto polymeru jsou vázány silnou kovalentní vazbou. Typickým zástupcem takového polymeru jsou elastické materiály, jako je třeba kaučuk.
- *Síťované polymer*. Jsou to trojrozměrné monomery s třemi aktivními kovalentními vazbami, které vzájemně vytvářejí zesíťovanou trojrozměrnou strukturu. Tato vazba jim zajišťuje zajímavé mechanické vlastnosti. Patří sem epoxidové a fenolformaldehydové pryskyřice. [2] [27]

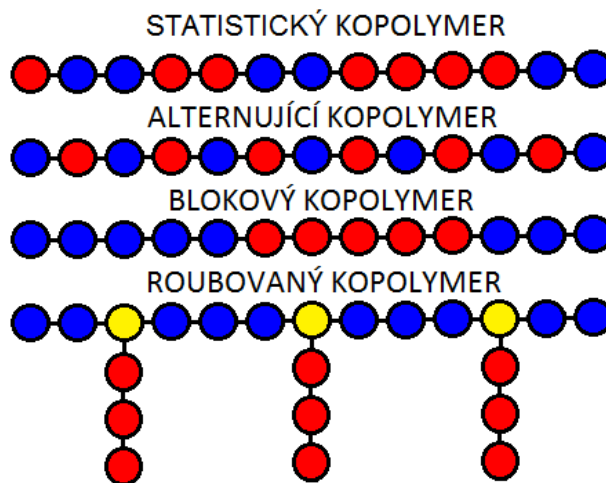


Obr. 3 – Druhy makromolekulárních řetězců

1.3 Homopolymery a kopolymery

Polymerní materiály mohou být z hlediska vnitřního makromolekulárního uspořádání tvořeny buď měry jednoho, či několika druhů. Materiály se strukturou AAAAAA (A označuje jeden typ meru), jako třeba PE, PS, BR, PVC, se řadí do podskupiny homopolymerů. Polymery s makromolekulární strukturou tvořenou měry různých typů (např. AAAAABBBBB) se označují jako kopolymery, jako např. ABS, SAN, SBR, EVA. Ty lze podle typu uspořádání struktury merů rozlišit na:

- *statistické* – měry různého typu jsou v řetězci vyskytovány nahodile, nemají pevný řád.
- *alternující* – měry různého typu se v řetězci pravidelně opakují.
- *blokové* – řetězec blokového polymeru je tvořen dvěma či více souvislými bloky merů shodného druhu.
- *roubované* – na řetězci tvořeného základním typem merů jsou „naroubovány“ příčné řetězce merů jiného typu. [2] [26]



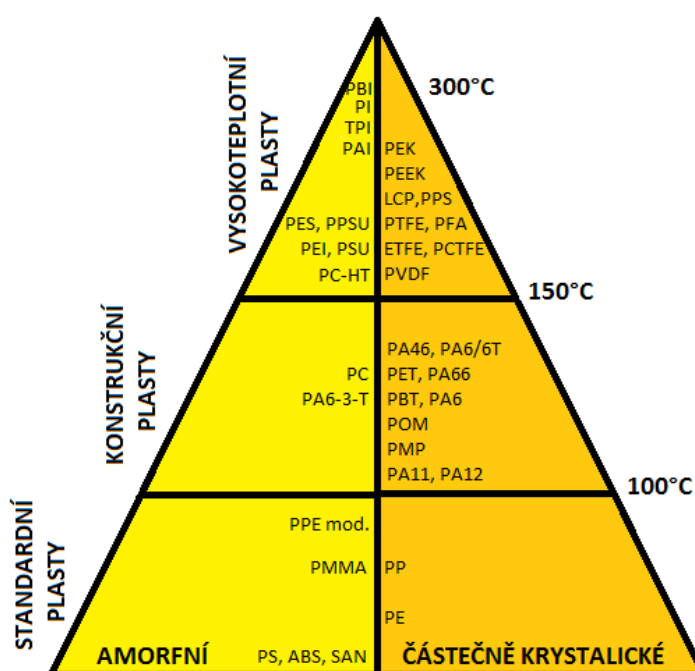
Obr. 4 – Druhy kopolymerů

1.4 Využití plastů dle jejich užitných vlastností

Plasty neboli plastomery zastupují celou škálu různorodých mechanických vlastností. Z hlediska běžného využití se v největším množství objevují plasty z kategorie standardní. Jsou to plasty pro široké použití a patří mezi plasty spotřebního charakteru. Používají se především jako obalový materiál, fólie apod. Mezi zastupce standardních plastů patří PP, PE, PS, PMMA. Tato kategorie patří k cenově nejlevnějším.

Další skupinou jsou plasty konstrukční. Ty jsou oproti plastům standardním dražší, ale vykazují výrazně lepší mechanicko-fyzikální vlastnosti jako například pevnost, odolnost vůči teplotě, odolnost proti chemickým sloučeninám a další. Konstrukční plasty se používají pro namáhané součásti a inženýrské aplikace. Patří sem PC, PET, POM, PA6.

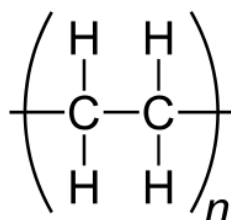
Poslední kategorií jsou plastomery hi-tech charakteru. Patří sem především vysokoteplotní plasty a plasty pro speciální použití (letecký průmysl, NASA). Jejich enormní vlastnosti a použití v extrémních podmínkách se ovšem odráží na jejich ceně a malému objemu zpracování. Řadíme sem PSU, PI, PTFE. [3]



Obr. 5 – Rozdělení a objem plastů [3]

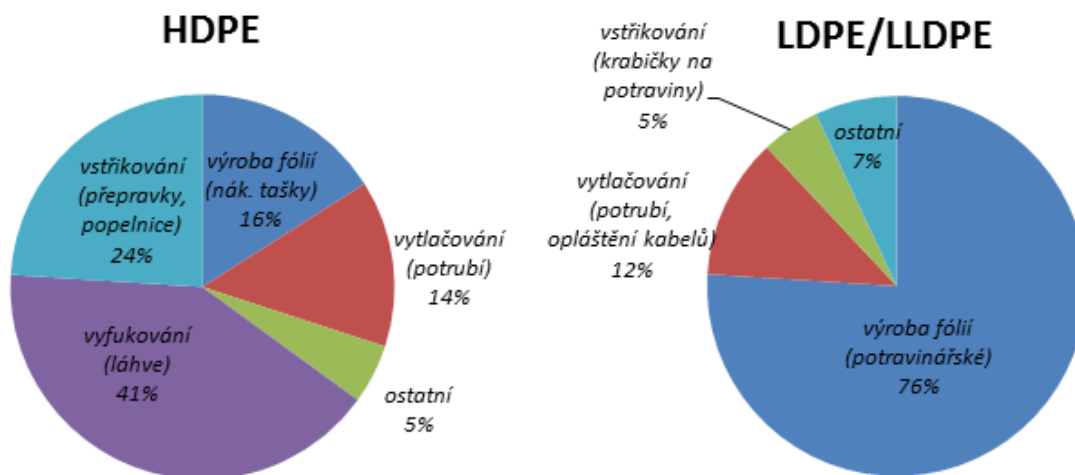
2 POLYETHYLEN

Polyethylen (PE) je homopolymer ethylenu. V technické praxi se setkáváme se dvěma základními typy tohoto polymeru, jejichž vlastnosti se diametrálně liší. Dříve se tyto druhy rozlišovaly podle postupu výroby. Jednu kategorii představoval nízkotlaký PE a druhou vysokotlaký PE. Časem se rozdíl mechanických vlastností vzniklý postupem výroby zcela smazal. Povedlo se vysokotlakým způsobem připravit polyethylen s vlastnostmi nízkotlakého polyethylenu a naopak. Proto se začal polyethylen posuzovat podle jeho hustoty, která určuje míru linearitu řetězců makromolekul. Dle hustoty se také odvíjí další mechanicko-zpracovatelské vlastnosti. Základní dělení je tedy na lineární a rozvětvený druh polyethylenu. [1]



Obr. 6 – Strukturální vzorec polyethylenu

Lineární druh se označuje zkratkou HDPE, tedy polymer s vysokou hustotou (z anglického high-density). Nízkohustotní, tedy rozvětvený polyethylen, má zkratku LDPE. Protože se však mechanické vlastnosti a hustota různých druhů polyethylenu nemění skokově, časem přibyly i další kategorie. Za zmínku jistě stojí MDPE, označující polymer o střední hustotě, či LLDPE, což je lineární nízkohustotní polyethylen. [1] [26]



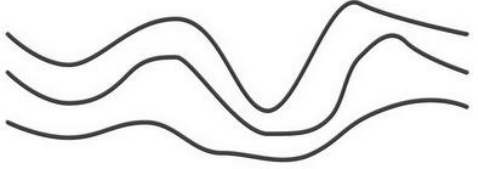
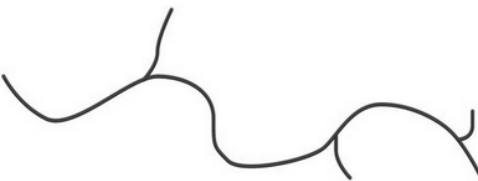
Obr. 7 – Podíl technologického zpracování HDPE a LDPE/LLDPE [6]

2.1 Fyzikálně mechanické vlastnosti polyethylenu

Obecně lze říci, že polyethylen patří mezi nejrozšířenější plasty na světě. Vyniká velmi dobrou odolností proti agresivním chemikáliím, je zdravotně nezávadný, dobře odolává stárnutí a nízké teplotě. Z mechanických vlastností disponuje nízkou hustotou (ve srovnání s ostatními plasty), vysokou houževnatostí, tažností a odolností proti rázům. To vše při zachování nízké výrobní ceny. Používá se na nádrže, jímky, rozvody pitné vody. Dále našel tento materiál široké uplatnění i v obalovém či kabelářském průmyslu a dalších technických odvětvích. Oblast použití je omezena především na nenáročné technické aplikace.

Jeho užité vlastnosti jsou silně spjaty s jeho hustotou a tím pádem i linearitou polymerních řetězců. Vzrůstající hustota vede k vyššímu obsahu krystalického podílu, čímž dojde k zhoršení zpracovatelnosti. Naopak se výrazně zlepšují mechanické vlastnosti, zejména pak pevnost, tuhost a tvrdost. Současně se zvýší odolnost proti chemikáliím a sníží se transparentnost. Nízká hustota polyethylenu obvykle značí rozvětvenost makromolekuly, naopak vysoká hustota ukazuje na vysokou linearitu výsledné struktury. [1] [4] [5]

Tab. 1 – Srovnání vlastností HDPE a LDPE [4]

HDPE - lineární, vysokohustotní polyethylén	
je tvrdší, tužší, nepatrně křehčí hustota $\rho = 940-972 \text{ kg/m}^3$ má vyšší teplotu tání $T_m = 130-135^\circ\text{C}$ má vyšší pevnost $\sigma_M = 20 - 30\text{MPa}$ má vyšší modul pružnosti $E_t = 700-1000\text{MPa}$	
LDPE - rozvětvený, nízkohustotní polyethylén	
je měkčí, ohebnější má lepší rázovou i vrubovou houževnatost při nízkých teplotách hustota $\rho = 915-930 \text{ kg/m}^3$ má nižší teplotu tání $T_m = 105-110^\circ\text{C}$ má nižší pevnost $\sigma_M = 8 - 10\text{MPa}$ má nižší modul pružnosti $E_t = 100-200\text{MPa}$	

3 MODIFIKACE POLYMERŮ

Stále náročnější požadavky průmyslu na vlastnosti konstrukčních plastů vedou k aplikaci drahých a vysoce odolných plastů. Proto je snaha hledat řešení, která by zlepšovala užité vlastnosti běžných polymerů. Jednou z možností je aplikace plniv, která výrazně ovlivňují mechanické vlastnosti, zejména pak tahové vlastnosti, rázovou houževnatost a tvrdost.

Další možností je ozařování. Působením záření dojde k vzájemnému propojení makromolekul polymerů a k jejich vzájemnému zesíťování. To významně ovlivní celou škálu jejich vlastností. Kromě mechanických vlastností, dojde k změně odolnosti vůči tepelnému či chemickému působení apod. [19][20]

3.1 Radiační síťování

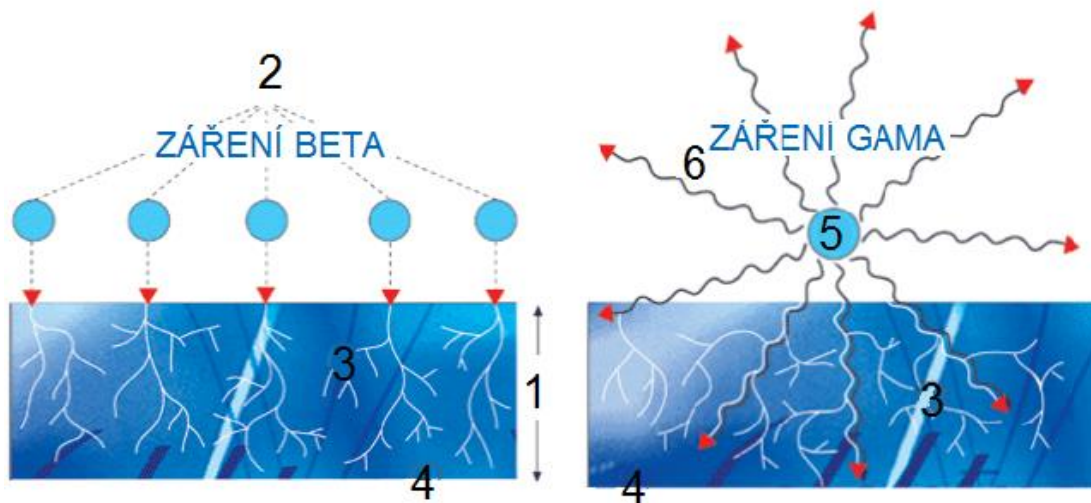
Radiační síťování je technologie, která zlepšuje mechanické, chemické a tepelné vlastnosti plastů za použití záření beta nebo gama. U plastů je síťování chemický proces, díky němuž dochází ke spojování molekul. Tím lze získat materiál, který může dosahovat fyzikálních (mechanických) vlastností drahých a speciálních plastů. Pro ozařování nejsou zapotřebí žádné další přísady. Radiační síťování se provádí až po technologických operacích, jako je vytlačování, vstřikování či vyfukování.

Radiační síťování probíhá za pokojové teploty bez dalšího namáhání ozařovaného materiálu. Další výhodou je možnost nastavení velké škály ozařovacích parametrů, kterými lze měnit stupeň síťování, a ovlivňovat tak fyzikální (mechanické) vlastnosti materiálu přesně podle toho, jak je požadováno. V používaných průmyslových zařízeních ani v ozářených produktech nevzniká žádná radioaktivita. Pro radiační síťování je základní předpoklad, že materiál při působení ionizačního záření převážně síťuje a nedegraduje. [18] [19]

3.2 Používané druhy záření

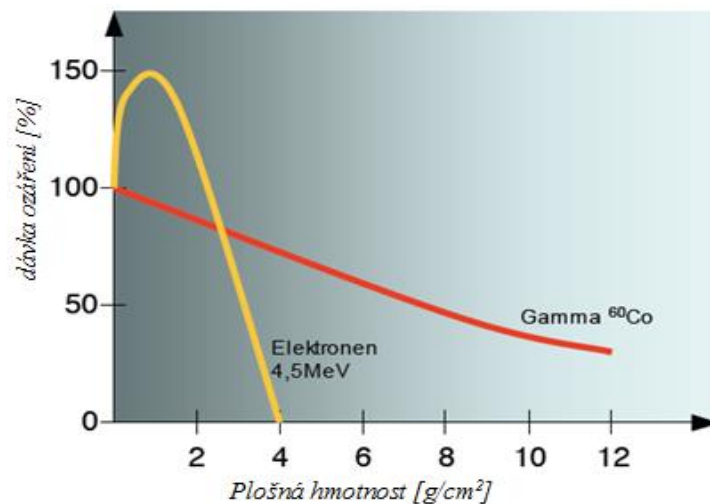
Nejčastěji používané záření je beta a gama. Hlavní rozdíl spočívá v intenzitě záření a ve schopnosti pronikat materiálem. Záření gama má vysokou schopnost penetrace materiálem, ale dávka ozáření má malou intenzitu. Hodí se tedy na ozařování většího množství výrobků nebo tvarově složitých dílů. Hlavní použití tohoto typu záření je radiační sterilizace zdravotnických produktů a potravin.

Protože pro sítování plastů jsou potřebné vysoké dávky záření, používá se především záření typu beta. To má velkou intenzitu dávky ozáření, ale nízkou schopnost penetrovat materiálem. V urychlovači elektronů je v průběhu několika sekund dodána taková dávka, pro kterou by zařízením se zářením gama potřebovalo několik hodin. U kompozitních materiálů plněných částicovými plnivými lze zářením ovlivnit soudržnost matrice a vláken, a tedy změnit výsledné fyzikální vlastnosti. [19]



1 – hloubka vniknutí elektronů; 2 – primární elektrony; 3 – sekundární elektrony;
4 – ozářený materiál; 5 – zapouzdřený zdroj záření; 6 – γ kvanta

Obr. 8 – Schéma pronikání záření [18]



Obr. 9 – Schopnosti pronikání β záření a γ záření [18]

Radiačním sítováním lze ovlivnit následující vlastnosti:

- nárůst modulu;
- zvýšení pevnosti - zejména z dlouhodobého hlediska;
- pokles poměrného prodloužení při přetržení (tažnost);
- redukce studeného tečení (creep);
- nárůst tvrdosti;
- zlepšení meze únavy - při střídavém ohybu;
- zlepšení povrchové pevnosti vůči otiskům a nespojitosti vstříkovaných dílů;
- zlepšení odolnosti proti vnitřnímu pnutí;
- zlepšení zotavení materiálu „memory effect“;
- zlepšení otěruvzdornosti;
- zlepšení chování při dlouhodobém zatížení vnitřním tlakem;
- snížení rozpustnosti;
- zlepšení odolnosti proti botnání;
- zlepšení odolnosti vůči hydrolýze a zvýšení olejovzdornosti;
- zlepšení tvarové stálosti za tepla;
- zlepšení trvalé deformace při zatížení tlakem (tahem);
- zvýšení tepelné odolnosti;
- vyšší odolnost vůči stárnutí. [18] [19]

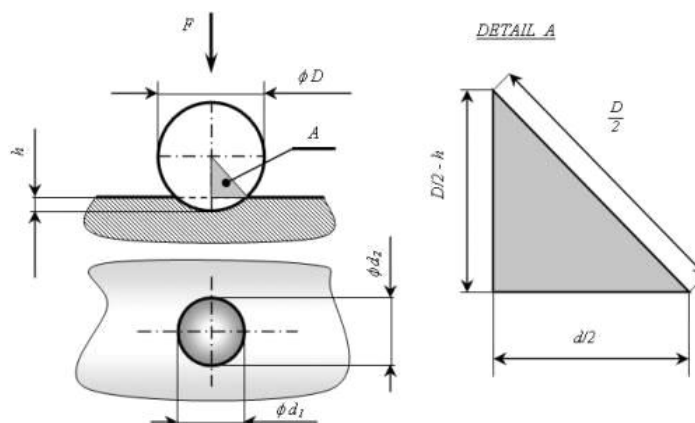
4 ZKOUŠKY TVRDOSTI

Tvrdot se nejčastěji měří metodou vlačování cizího tělesa (indentoru) do zkoušeného vzorku. Výsledek se pak hodnotí podle rozměru vtisku a podmínek zatížení. Samotná zkouška nepatří mezi destruktivní, a proto lze tvrdost měřit přímo na výrobku. V případě, že nechceme měření provádět přímo na výrobku, je nutné zvolit dostatečně reprezentativní vzorek a při jeho odebrání se vyvarovat jeho tepelnému ovlivnění. Hodnoty tvrdosti závisí na době působení tělesa, na jeho vlastnostech a rozměrech, na velikosti zatížení a na elastických vlastnostech zkoušeného materiálu.

4.1 Brinellova zkouška tvrdosti

Tato zkouška je upravována normou ČSN EN ISO 6506:2006 a spočívá v pozvolném zatlačování leštěné kuličky do zkoumaného materiálu a následného zjištění průměru vtisku. Tvrdot podle Brinella se označuje písmeny HB (Hardness Brinell). Je-li tělísko vyrobené z oceli, mluvíme také o zkoušce HBS. Je-li vyrobené ze slinutých karbidů, označuje se HBW (pro materiály o větší tvrdosti). Kuličky se vyrábí v typových řadách ($\phi D [mm] = 10; 5; 2,5; 2; 1$). Zatížení se volí jako násobek průměru kuličky ($F [kp] = 30D^2; 10D^2; 5D^2; 2,5D^2; 1D^2$). Zatížení a průměry kuliček je třeba volit tak, aby průměr vtisku byl v rozmezí od $d=0,2D$ až $0,7D$. Nevýhodou Brinellovy zkoušky je omezené použití pro materiály nízkých a středních tvrdostí. Také nelze měřit kalené povrchy, jelikož by mohlo dojít k deformaci kuličky. [10]

$$HBW = 0,102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$



Obr. 10 – Zkouška tvrdosti podle Brinella [28]

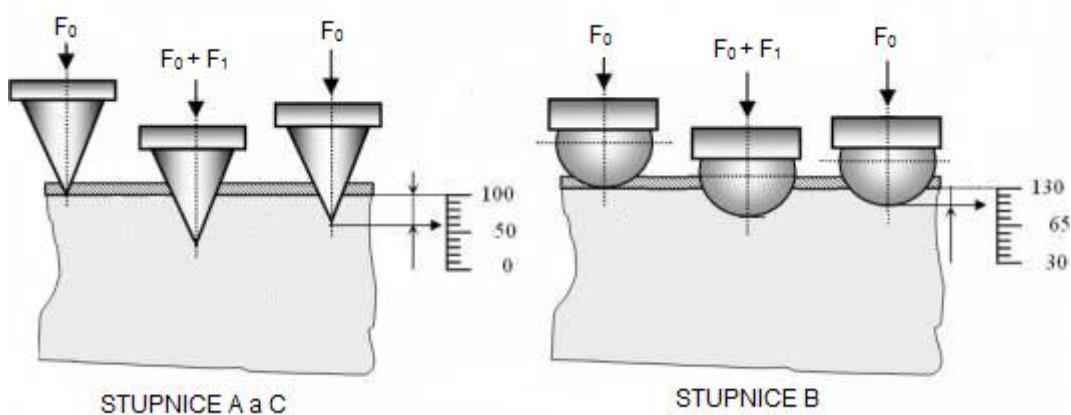
4.2 Rockwellova zkouška tvrdosti

Rockwellova zkouška tvrdosti spočívá v zatláčení indentoru do materiálu při striktně definovaných podmínkách a následném zhodnocení podle hloubky vtisku (oproti metodám Brinella a Vickerse). Tvrdost vzorku je odečítána přímo z tvrdoměru, a proto není třeba přeměřovat geometrii vtisku ani vyhledávat srovnávací hodnoty tvrdosti v tabulkách. Tím se tato metoda staví mezi zkoušky velmi rychlé a tudíž i velmi často rozšířené v provozních podmínkách.

Podle příslušné normy a zvoleného testovaného materiálu se používá indentor tvaru tvrzené leštěné ocelové kuličky nebo diamantového kuželu. Pro měření plastů se zásadně používá ocelová kulička. Ta je pozvolna zatížena předzatižením F_0 po dobu deseti sekund a poté je navíc zatížena hlavní silou F_1 na dalších patnáct sekund. Po odlehčení hlavní síly je odečtena hodnota trvalé hloubky vtisku podle stupnice na měřidle. Každý dílek představuje posun o $0,002mm$, přičemž maximální přípustná penetrace indentoru je $0,2mm$. Hodnota výsledné tvrdosti je dána vztahem¹:

$$HR = 130 - e \quad (2)$$

kde e představuje hloubku vtisku, přesněji jeden dílek na stupnici. [7] [8]



Obr. 11 – Zkouška tvrdosti podle Rockwella [28]

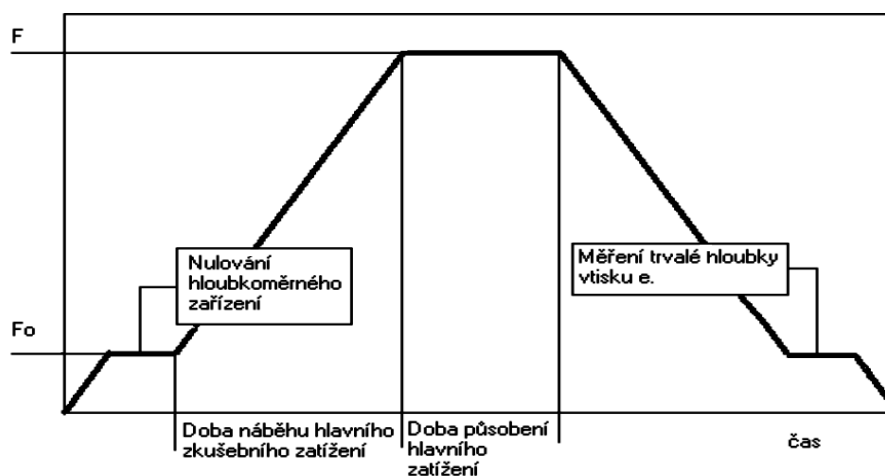
¹ Platí jen pro Rockwellovy stupnice tvrdosti typu E, L, M a R

Jak již bylo uvedeno, zkoušený materiál a jeho očekávané vlastnosti ovlivňují parametry samotného měření a tvar indentoru. Kvůli odlišnému průběhu zkoušky a mírným diferencím, které mohou vzniknout při měření jiným druhem indentoru či zátěže, byly tyto zkoušky rozřazeny a označeny velkým písmenem. To udává, o jakou stupnici jde a za jakých podmínek probíhalo měření. V praxi je nejznámější stupnice A, B a C, která se běžně používá pro měření tvrdosti kovů. Ta se podle Rockwella označuje příslušnou naměřenou hodnotou tvrdosti a písmeny HR (Rockwell hardness) rozšířené o písmeno použité stupnice např. 58 HRC.

Pro měření tvrdosti plastů pomocí Rockwellova tvrdoměru jsou podle normy ČSN EN ISO 2039-2 přípustné Rockwellovy stupnice tvrdosti M, L a R. [7] [8] [9]

Tab. 2 – Vybrané stupnice tvrdosti podle Rockwella [7] [8]

Stupnice	Druh indentoru	Předzátěž	Hlavní zatížení	Použití
A	120° diam. kužel	10kg	60 kg	slinuté karbidy, tenké povrchové vrstvy
B	1/16" ocel. kulička	10kg	100 kg	měkčí kovy, hliníkové slitiny, slitiny mědi
C	120° diam. kužel	10kg	150 kg	titan, ocel, tvrdé litiny
...
E	1/8" ocel. kulička	10kg	100 kg	slitiny hliníku a hořčíku
L	1/4" ocel. kulička	10kg	60 kg	velmi měkké a tenké materiály (doporučuje se použití co nejmenší kuličky a největšího zatížení)
M	1/4" ocel. kulička	10kg	100 kg	
R	1/2" ocel. kulička	10kg	60 kg	



Obr. 12 – Průběh zkušebního zatížení - metoda Rockwell [10]

4.3 Vickersova zkouška tvrdosti

Měření tvrdosti podle Vickerse upravuje norma ČSN EN ISO 6507-1 a popisuje její použití ve třech oblastech podle zatížení.

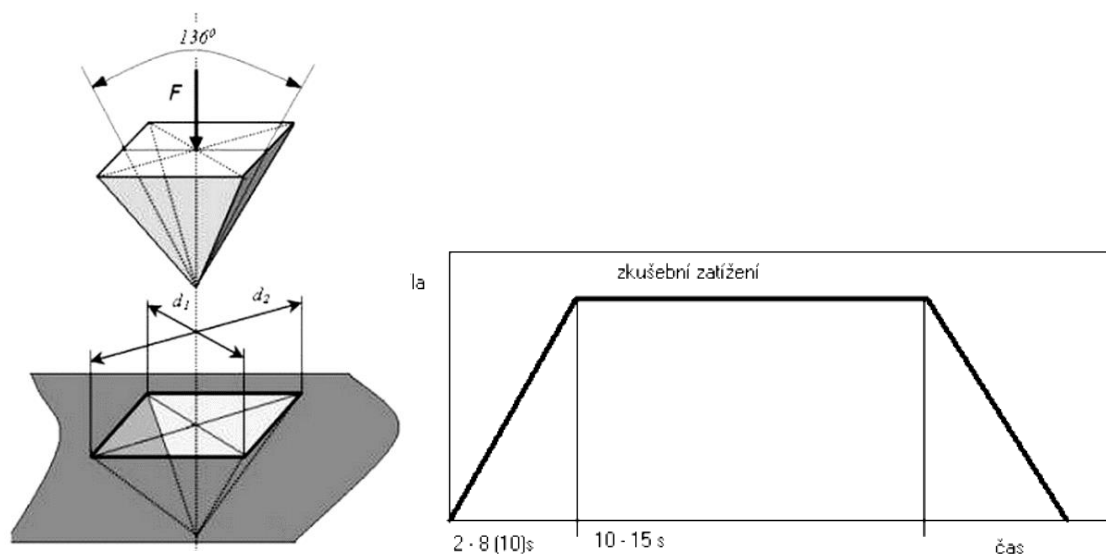
Tab. 3 – Oblast měření podle Vickerse [17]

Rozsah zkušebního zatížení F [N]	Označení tvrdosti	Rozdělení zkoušek
$F \geq 49,03$	HV 5	Zkouška tvrdosti podle Vickerse
$1,961 \leq F \leq 49,03$	HV 0,2 až HV 5	Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení
$1,09807 \leq F \leq 1,961$	HV 0,01 až HV 0,2	Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse

Při měření touto metodou je do měřeného materiálu vlačován diamantový indenter ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° . Velikost výsledné tvrdosti je pak dána jako podíl zatěžující síly F a velikosti průměrný vtisku A_s . Pro vyhodnocení zkoušky je nutno přeměřit velikost úhlopříčky vtisku d . Výsledná tvrdost se vypočítá ze vztahu:

$$HV = \frac{1}{g} \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \frac{136}{2}}{d^2} \quad (3)$$

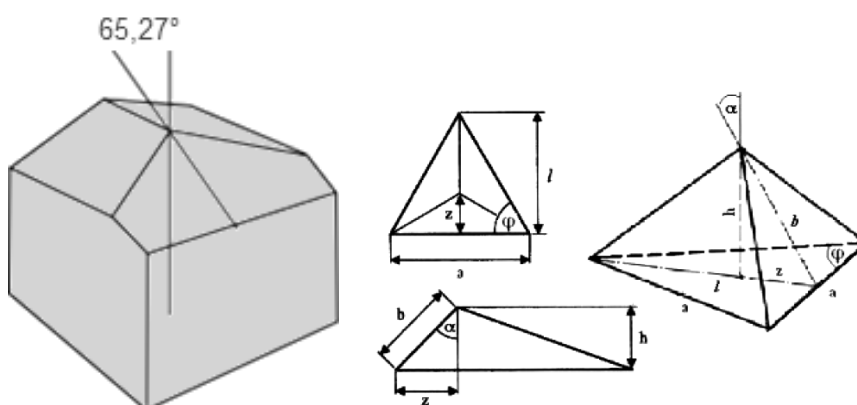
kde F je velikost zatěžující síly a d je aritmetický průměr délek úhlopříček. [17]



Obr. 13 – Vickersův indentor [10] [28]

4.4 Berkovichova zkouška

Princip měření tvrdosti podle Berkoviche je totožný se zkouškou tvrdosti podle Vickerse. Rozdíl je pouze v geometrii vnikacího tělíska. U Vickersova indentoru bývá problém s výrobou diamantového jehlanu a sbíhavostí jeho jednotlivých hran. U Berkovichovy zkoušky tento problém zcela odpadá. K měření Berkovichovy tvrdosti se používá třístěnný jehlan s vrcholovým úhlem $65,27^\circ$. Ten je méně náchylný na otřesy a neopatrnou manipulaci. V současné době slouží k měření nanoindentačních zkoušek. [17]



Obr. 14 – Berkovichův indentor [17]

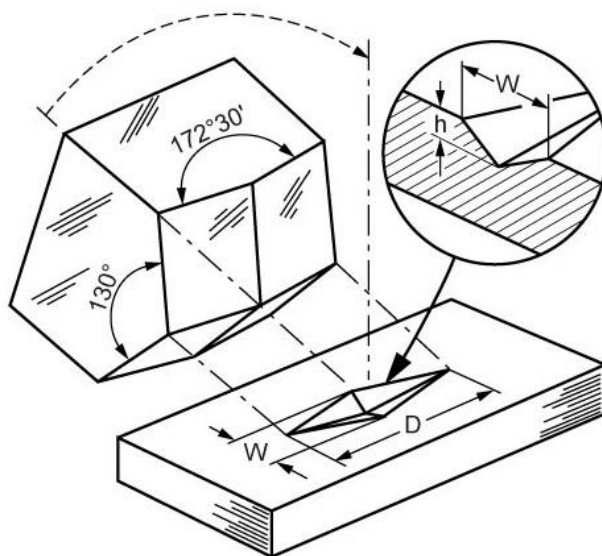
Tvrdot dle Berkoviche lze vypočítat dle vztahu:

$$HCH = 1570 \cdot \frac{F}{l^2} \quad (4)$$

Kde l je výška trojúhelníku měřená na vtisku a F je velikost maximální zatěžující síly.

4.5 Knoopova zkouška tvrdosti

Knoopova zkouška se velmi podobá metodě měření tvrdosti podle Vickerse. Spočívá v pozvolném zatlačování zkušebního tělíska zatížením směřujícím kolmo do povrchu materiálu. Doba, po kterou působí zatížení, se pohybuje v rozmezí 2 - 8s a rychlost zatěžování by neměla být větší než 0,2 mm/s. Vnikající tělísko je diamantový jehlan, jehož základnu tvoří velice protáhlý kosočtverec. Poměr úhlopříček následného vtisku je přibližně 1:7,11. [11] [13]



Obr. 15 – Vnikací tělísko pro zkoušku HKN [17]

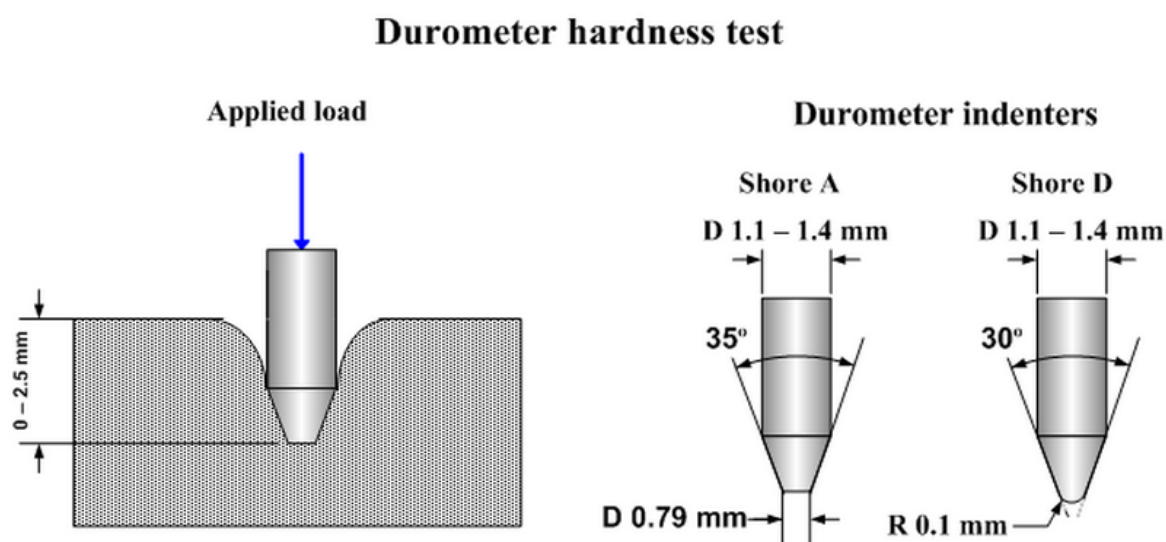
K vyhodnocení zkoušky se přeměřuje pouze rozměr delší z úhlopříček. Deformace jsou relativně největší ve směru kratší úhlopříčky a tady také dochází při odlehčení k největšímu odpružení. Ve směru dlouhé úhlopříčky je odpružení zanedbatelné. Hlavní diagonála vtisku je třikrát delší než u metody měření tvrdosti podle Vickerse, čímž je minimalizována chyba při měření její délky. Zároveň je hloubka vtisku poloviční, což tuto metodu řadí mezi vhodnou k měření keramických a křehkých materiálů. Díky protáhlé geometrii vtisku lze měřit tvrdost i u materiálů s úzkým profilem, např. drátů. [12] [13] [14]

$$KHN = 1,4513 \cdot \frac{F}{D^2} \quad (5)$$

4.6 Shoreho zkouška tvrdosti

Zkoušky podle Shore se používají zejména pro elastomerní materiály. Tato metoda úzce souvisí s hloubkou penetrace vnikajícího tělíska a je tedy měřítkem tvrdosti materiálu. Dle parametrů měření a především podle tvaru cizorodého tělíska lze rozlišit zkoušky Shore A, C a D.

Jako tělísko slouží odpružený kolík vyrobený z tvrzené oceli. Ten je tlačěn silou pružiny do materiálu. Hloubka průniku pak reprezentuje hodnotu tvrdosti Shore. Měření tvrdosti podle Shore upravuje norma ČSN EN ISO 868. [10] [15]



Obr. 16 – Měření podle Shore A a Shore D [15]

4.6.1 Měření metodou Shore A, C, D

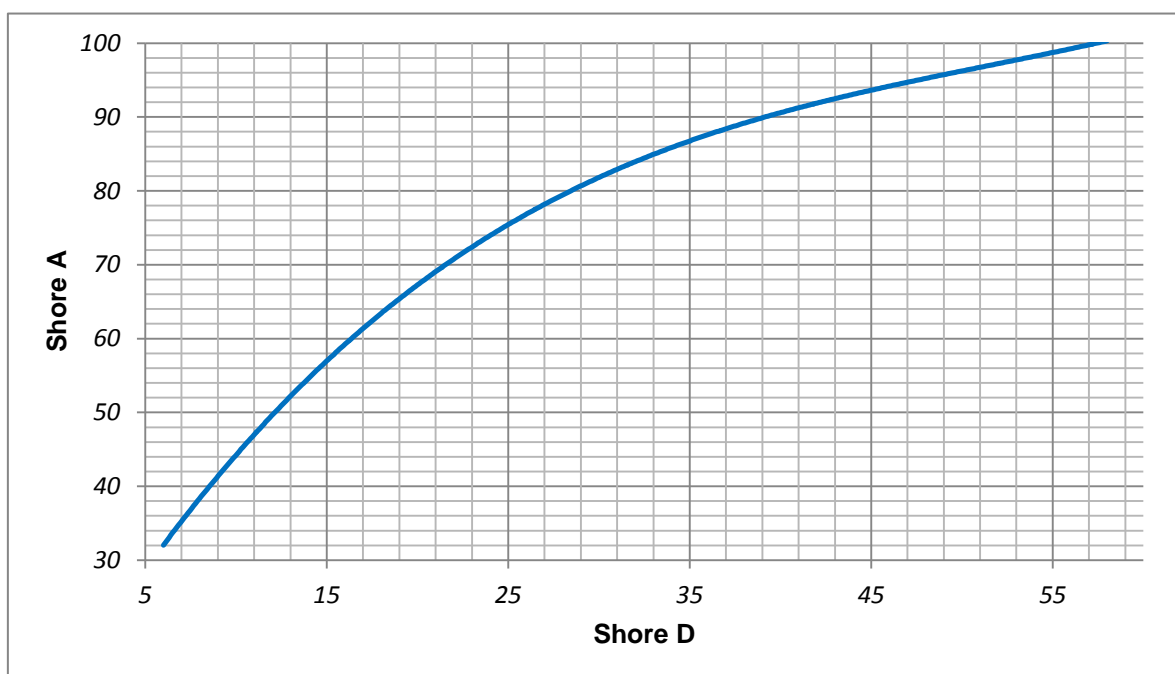
Tvrдость je podle Shore vyjádřena v rozmezí od 0 Shore (což odpovídá 2,5mm penetraci) po tvrdost 100 Shore (což odpovídá nulové penetraci). Tělísko určené pro zkoušku typu A se používá pro měkké gumy, gumové výrobky, polyester, měkké PVC, kůže, nitrilovou gumu apod. Tělísko s ostrým hrotem určené pro zkoušku typu D se využije při měření tvrdých materiálů, jako je tvrdá guma, tvrdé syntetické materiály, termoplasty, vinylové povlaky apod.

Samotné měření velmi ovlivňuje teplota, ta musí být v souladu s normou v rozmezí $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Zkoušku je nutno provést na čistém hladkém povrchu minimálně 9mm od okraje a 6mm od předchozího vpichu, přičemž musí probíhat staticky a bez

nárazu. Tloušťka vzorku nesmí být menší než 4mm (v opačném případě se projevuje i tvrdost podložky). Přípustné je maximálně trojnásobné navrstvení vzorku za účelem získání alespoň minimální požadované tloušťky. Samotnou hodnotu tvrdosti odečítáme po uplynutí doby tří sekund. [10][15]

Tab. 4 – Tabulka pro rychlý přepočít Shore A a Shore D [15]

Shore A	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Shore D	6	7	8	10	12	14	16	19	22	25	29	33	39	46	58

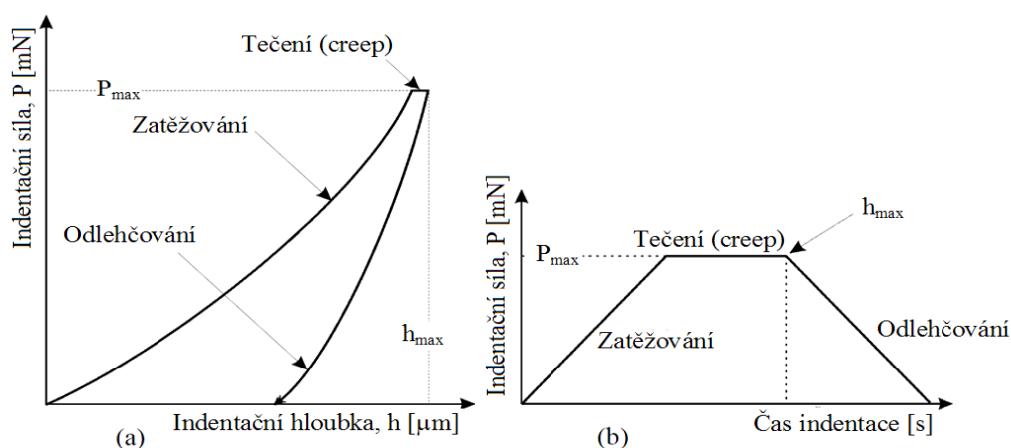


Obr. 17 – Přepočít mezi Shore A a Shore D

4.7 Instrumentovaná zkouška tvrdosti – DSI, IIT

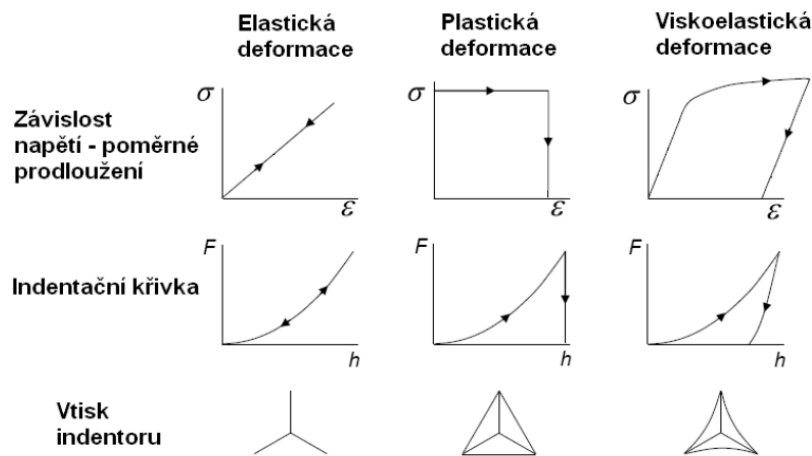
Metoda Instrumentované zkoušky tvrdosti (IIT – Instrumented Indentation Testing), nebo také DSI (Depth Sensing Indentation), vznikla za účelem měření mechanických vlastností tenkých vrstev. Princip zkoušky spočívá v okamžitém sledování hloubky průniku indentoru do materiálu v závislosti na velikosti zatížení a jeho nárůstu či poklesu. Díky propojení s PC tak v reálném čase vzniká indentační křivka. Na jejím průběhu můžeme pozorovat i místa, kde se projevují fázové změny, trhliny, delaminace a jiné. Tyto úseky by pak měly oproti ideálnímu průběhu nespojitý charakter.

Celé měření lze rozdělit do několika kroků. V první fázi dochází k řízenému zatěžování, kdy je na indentor aplikováno zatížení. Poté dochází k časové prodlevě, kdy zůstává indentační síla neměnná, a v poslední kroku dojde k pozvolnému odlehčování vzorku až na nulovou hodnotu zatěžující síly. [16] [17]



Obr. 18 – Indentační křivka a časový průběh zatížení [17]

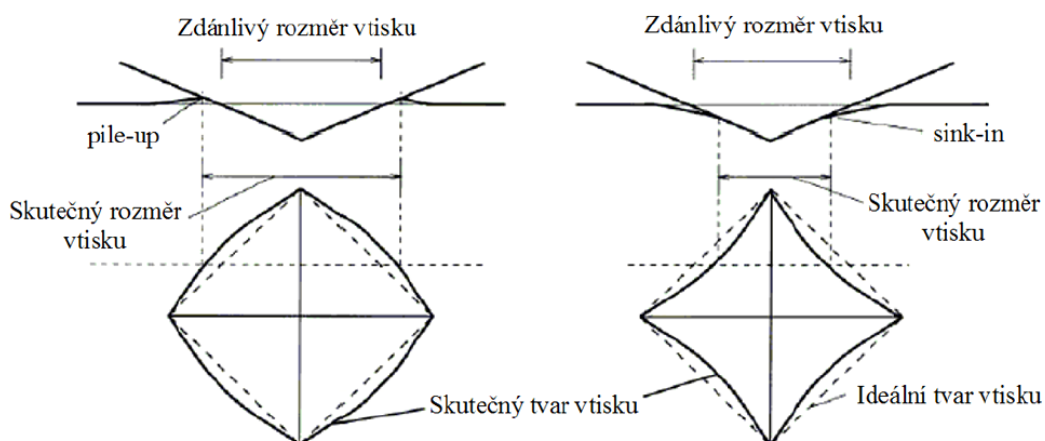
V průběhu Instrumentované zkoušky tvrdosti dochází k deformacím elastickým i plastickým. Během zatížení indentoru odpovídá vtisk negativu geometrie vnikajícího tělíška, při odlehčování dochází k zotavování elastické deformace a tvar vtisku je ovlivněn pouze deformací plastickou. V modelovém příkladu, ve kterém by materiál na zatížení reagoval pouze elastickou deformací, by na výsledném vrypu nebyl znát otisk indentoru. Naopak u materiálu reagujícím pouze plastickou deformací, by vryp odpovídal maximální hloubce vtisku s geometrií striktně reverzní oproti indentačnímu tělísku. Je zřejmé, že elasticko-plastické chování zkoumaného materiálu zásadně ovlivňuje tvar indentační křivky. [16][17]



Obr. 19 – Tvar indentačních křivek pro dané materiály [17]

Samotný tvar vtisku je ovlivněn elastickým chováním materiálu. Pokud v průběhu indentace dochází převážně k elastickým deformacím, materiál má tendenci se „vtáhnout“ okolo vtisku. Pak mluvíme o efektu sink-in. Naopak u kovových materiálů dochází často k efektu pile-up, což je nakupení materiálu v okolí vtisku.

Podle tvaru vtisku je nutno zvolit správnou analytickou metodu. Například u metody Olivera a Pharra se počítá pouze s elastickým kontaktem a nežádoucí pile-up efekt by tak negativně ovlivnil naměřené hodnoty, zejména hodnotu tvrdosti a modulu. [16][17]



Obr. 20 – Pile-up a sink-in efekt [17]

4.7.1 Faktory ovlivňující výsledek zkoušky

Hodnoty naměřené Instrumentovanou zkouškou tvrdosti jsou nepřímo určené z přesně změřené hloubky indentačního vtisku. Přesné měření geometrie vtisku v závislosti na relativně malé zatěžující síle je v praxi obtížné a výsledky mohou být ovlivněny chybami měření.

Mezi rizikové faktory negativně ovlivňující výsledek měření patří:

- kolísání teploty - může nastat buď kolísáním teploty prostředí, čímž dojde k rozměrové změně celého vzorku i měřicího zařízení, nebo změnou teploty způsobenou creepovým chováním.
- určení dotyku prvního bodu indentoru – první bod dotyku indentoru by v ideálním případě měl být takový, aby se tělísko indentoru dotýkalo hrotem povrchu materiálu, ale zároveň ho nijak neovlivnilo. V praxi však měřící zařízení při hledání dotyku již povrchovou vrstvou pronikne a veškerá další měření jsou touto odchylkou ovlivněna.
- tuhost měřící soustavy – přesnost měření je silně ovlivněna konstrukcí samotného měřicího přístroje. U vyšších hodnot zatížení mohou nastat chyby vlivem poddajnosti měřící soustavy.
- geometrie indentačního tělíska – průběh IIT zkoušky je silně závislý na tvaru projekční plochy odvozené od geometrie břitu a hloubky vtisku. Všechny výpočetní metody počítají s ideálním tvarem tělesa indentoru, což je při reálném měření nedosažitelné, zejména s ohledem na opotřebení a anizotropní vlastnosti materiálu tělíska. [17]

Další odchylky mohou být způsobeny:

- tvarem vtisku indentoru (sink-in/pile-up efekt),
- jakostí povrchu vzorku,
- zbytkovým napětím,
- vlivem substrátu.

4.7.2 Základní veličiny určené metodou IIT (DSI)

Vtisková tvrdost H_{IT}

Obecně je tvrdost definována jako míra rezistence proti vytvoření vtisku. Vtisková tvrdost je pak charakterizována zatěžující silou podělenou průmětem kontaktní plochy mezi tělískem indentoru a zkušebním vzorkem:

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p} \quad (6)$$

kde plocha A_p je dána tvarem vnikacího tělesa.

Pro Vickersův indentor platí vztah:

$$A_p = 24,50 \cdot h_c^2 \quad (7)$$

U vnikacího tělesa podle Berkoviche pak:

$$A_p = 23,96 \cdot h_c^2 \quad (8)$$

kde h_c představuje hloubku kontaktu indentoru se zkušebním tělesem při působení maximální zatěžující síly. [16] [17]

Vtiskový modul pružnosti E_{IT}

Další veličinou, kterou lze získat ze zkoušky IIT je vtiskový modul. Obecně ho lze určit ze sklonu křivky odlehčení, přičemž platí:

$$E_{IT} = E^* \cdot (1 - \nu_s^2) \quad (9)$$

kde ν_s je hodnota Poissonova poměru měřeného materiálu a E^* je komplexní modul. Ten lze získat jako:

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \quad (10)$$

kde E_i představuje modul vnikacího tělesa, ν_i Poissonův poměr pro indentor a E_r pak redukovaný modul.

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot C \sqrt{A_p}} \quad (11)$$

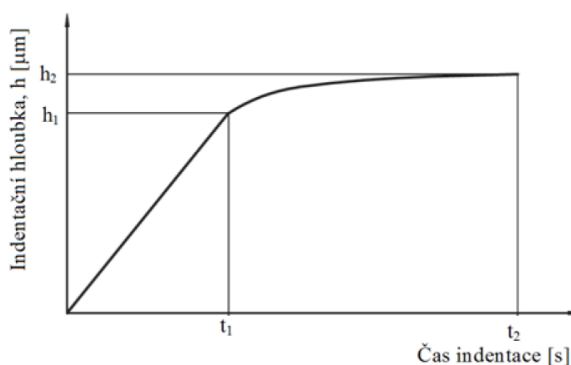
kde A_p je průmět kontaktní plochy a C je kontaktní poddajnost. [16] [17]

Vtiskové tečení C_{IT}

Při IIT je zachycován průběh změny hloubky vtisku v závislosti na čase. Z naměřené křivky lze pak odečíst hodnotu poměrného vtiskového tečení – creep. Vtiskové tečení C_{IT} je určeno ze vztahu:

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \quad (12)$$

přičemž h_1 a h_2 jsou naměřené hloubky vtisku před začátkem a na konci prodlevy, při které je materiál vystaven maximálnímu zatížení. [16] [17]

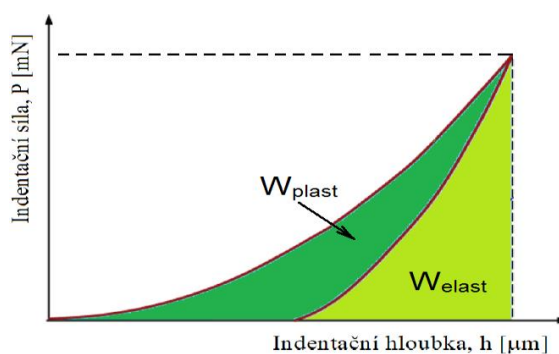


Obr. 21 – Vyjádření vtiskového tečení [17]

Deformační práce W_{elast} , W_{plast}

Z tvaru indentační křivky jde zjistit množství celkové práce spotřebované při vnikacím cyklu. Dále lze odečíst množství práce vynaložené na vratné elastické deformace W_{elast} a na deformace trvalé W_{plast} . Jejich podíl vyjádřený v procentech se pak nazývá koeficient zpětné relaxace η_{IT} . [16] [17]

$$W_{celk} = W_{elast} + W_{plast} \quad (13)$$



Obr. 22 – Vyjádření deformační práce z průběhu indentační křivky [17]

5 RECYKLACE

Slovo recyklace vzniklo z anglického recycling a volně přeloženo znamená koloběh. Jedná se tedy o opětovné (cyklické) použití dané suroviny jako druhotné složky ve výrobním procesu.

Podle § 4 předpisu č. 185/2001 Sb. Zákona o odpadech a o změně některých dalších zákonů, je recyklace definována jako:

„Jakýkoliv způsob využití odpadů, kterým je odpad znovu zpracován na výrobky, materiály nebo látky pro původní nebo jiné účely jejich použití, včetně přepracování organických materiálů; recyklací odpadů není energetické využití a zpracování na výrobky, materiály nebo látky, které mají být použity jako palivo nebo zásypový materiál.“ [30]



Obr. 23 – Jeden ze zažitých symbolů pro recyklaci

U materiálů získaných z použitých výrobků existují čtyři kategorie recyklace:

- Mechanická recyklace
- Chemická recyklace
- Surovinová recyklace
- Energetická recyklace (dle legislativy ČR se nejedná o recyklaci) [25]

5.1 Třídění plastových odpadů

Důležitou součástí recyklace plastového odpadu je samotná úprava odpadu před zpracováním. Způsob, jakým se bude s plastomerním odpadem nakládat, je závislý na stupni jeho znečištění. Podle tohoto kritéria rozlišujeme čtyři kategorie:

- *Čistý tříděný odpad* – Jde o nejkvalitnější vstupní surovinu, jakou lze získat. Jedná se o odpad shodného složení, který není znehodnocen příměsí nečistot a jeho recyklace není příliš náročná. Pověštinou jde o vtokové zbytky, vadné kusy atd. získané z výrobních podniků. Mnoho firem tuto recyklaci zahrnuje přímo do svých provozoven. Ta spočívá v rozemletí odpadu na drť, či plastikaci polymeru s jeho následnou regranulací. Drť či regranulát se poté přidávají v určitém množství do základního materiálu.
- *Znečištěný tříděný odpad* – Tento druh odpadu je získán ze sběru a bohužel je znehodnocen příměsí nečistot. Proto je jeho zpracování složitější. Hlavní odlišností je zařazení výrobního procesu praní a sušení plastové drti. Při zpracování metodou regranulace je to obzvláště nutné, protože výstupní kvalita recyklovaného polymeru silně závisí na množství příměsi. I z tohoto odpadu lze získat velmi kvalitní surovinu.
- *Čistý netříděný odpad* – Odpadní suroviny tohoto typu obsahují různé druhy polymerů, které mají neshodné vlastnosti a složení. To se velmi projevuje při plastikaci a homogenizaci. Tento odpad se zpracovává nejčastěji na diskontinuálním hnětiči. Materiál již není tolik hodnotný, jeho regranulace se neprovádí. Vyrábí se z něj lisované podlahové krytiny či protihlukové stěny.
- *Znečištěný netříděný odpad* – Recyklace této skupiny odpadů je ekonomicky nevýhodná a příliš složitá. Přičemž výsledný produkt převyšuje často cenu čistého materiálu, nehledě na to, že nedosahuje jeho vlastností. Právě zpracování takového odpadu představuje obrovský problém a často tento odpad končí na skládkách, kde zatěžuje životní prostředí. [23] [24]

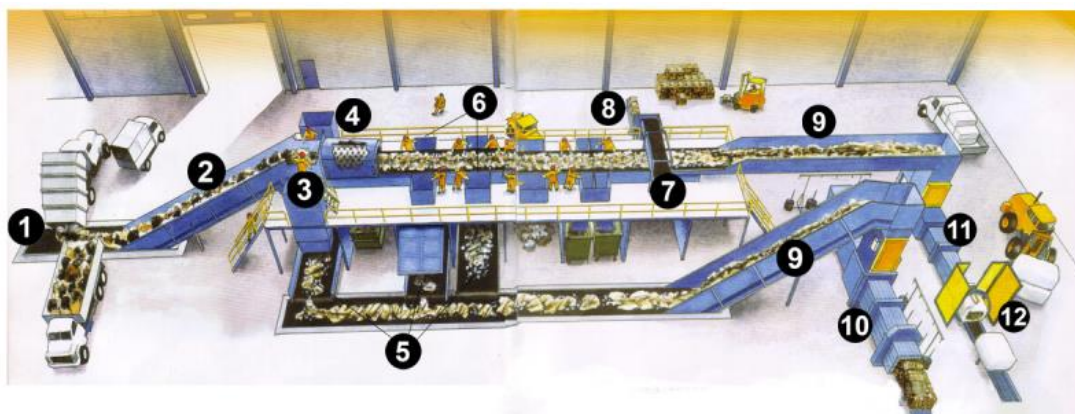
5.2 Mechanická recyklace

Mechanická recyklace zahrnuje technologický postup mletí zmetkových výrobků či odpadu, jejich následné mytí či plavení (vyplavení nečistot), sušení a případnou regranulaci. Podle stupně kontaminace recyklované drti vzniká recyklát různé kvality. V ideálním případě je pak tento recyklát fyzikálně a mechanicky podobný vlastnostem základního plastu a následně může být v příměsi použit na kvalitní výrobek. Tento způsob recyklace je zejména vhodný pro termoplasty. Ekonomická bilance je příznivá, jedná-li se o recyklaci čistého typově tříděného odpadu, protože odpadá nutnost čištění od zdrojů kontaminace.

Pravděpodobnost získání kvalitního recyklátu klesá v řadě:

- typově tříděná vstupní surovina, např. MOSTEN 52 412,
- druhově tříděná vstupní surovina, např. LDPE,
- částečně tříděná vstupní surovina,
- netříděná surovina.

Zatímco typově tříděnou surovinu si firmy povětšinou recyklují samy, u plastového odpadu získaného sběrem (sběrné dvory) je nutné k získání kvalitního produktu určeného k recyklaci tříditi vstupní surovinu podle druhu použitého polymeru a často i podle jeho barvy. Za tímto účelem jsou zřízeny třídící linky, které fungují poloautomaticky. [25]



- | | | | |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 1) přijímací dopravník | 4) bubnové sito | 7) magnetický separátor | 10) balička netříděného odpadu |
| 2) plnicí dopravník | 5) zásobníkový dopravník | 8) kovový lis | 11) balička tříděného odpadu |
| 3) předtříd'ovací stanoviště | 6) třídící stanoviště | 9) plnicí dopravník | 12) balička fólie |

Obr. 24 – Schéma třídící linky [32]

5.3 Chemická depolymerace

Chemická recyklace je vhodná pro polymery, které nelze efektivně zpracovávat mechanickou recyklací, např. kvůli jejich náchylnosti k degradaci při opětovném zpracování. Tato degradace by měla neblahý vliv na kvalitu recyklátu. Další faktor, který může znemožňovat efektivní využití mechanické recyklace, je požadavek na čistotu vstupní suroviny. V takových případech lze využít chemickou recyklaci. Ta je založena na chemickém rozkladu polymeru na produkty o podstatně nižší molární hmotnosti (oligomery) nebo až na monomerní jednotky a jejich následném chemickém zpracování. Nevýhodou tohoto zpracování jsou počáteční náklady na technologická zařízení.

Mezi základní způsoby chemické recyklace patří:

- *Tepeľná depolymerace* – funguje na principu vystavování polymerní směsi vysokým teplotám, při kterých dochází u některých polymerů k degradaci tzv. zivovým mechanismem. Z konců polymerních řetězců se pozvolna odštěpují jednotlivé monomery. Takto získané monomery lze po vyčištění opět polymerizovat na polymer původní kvality. Tímto způsobem lze recyklovat PMMA či PS.
- *Solvolyza* – principem tohoto typu recyklace je obrácení vratné polykondenzační reakce účinkem nízkomolekulárních látek směrem k odbourávání monomerních jednotek z polymerního řetězce. Takto lze recyklovat různé typy polyamidů, polyuretanů a lineárních polyesterů (zejména PET).
- *Reestřifikace* – používá se k rozkladu lineárních polyesterů přebytkem příslušného diolu. Tím vzniká směs oligomeru, jejíž vlastnosti lze řídit dávkováním diolu do reakční směsi. Ekonomická bilance je opět negativně ovlivněna počátečními náklady na specializovanou recyklační jednotku.

Z praktického hlediska lze říci, že k rentabilitě chemické recyklace dochází při zpracování přibližně pěti tisíc tun odpadu. Pokud je vstupní surovina získána zdarma, například na náklady producentů odpadu, bývá chemická recyklace rentabilně podobná jako jeho výroba z původních petrochemických surovin. [25]

5.4 Surovinová recyklace

Ze znečištěných směsí polymerního odpadu, např. frakce komunálního odpadu o hustotě vyšší než 1 g/cm^3 , již není možné získat hodnotný materiál. Jediným východiskem je využití jeho surovinového potenciálu. Princip surovinové recyklace je termicky destrukční proces, který rozkládá polymerní složky na vstupní suroviny a na směs plyných a kapalných uhlovodíků. Ty se prakticky zpracovávají na topné oleje, topný plyn, petrochemické suroviny apod. Surovinovou recyklaci lze podle principu rozdělit na hlavní metody:

- *Hydrogenace* – jedná se o vysokotlaký katalytický proces, díky kterému vznikají převážně kapalně uhlovodíky. Principiálně jde o chemickou reakci spočívající ve štěpení velkých molekul vodíkem pomocí katalyzátoru.
- *Zplyňování* – jedná se o nízkotlaký proces se zvýšenou teplotou, výsledkem jsou plyné produkty a hořlavé plyny. Děj probíhá v přítomnosti malých molekul (voda, složky vzduchu apod.). [25] [31]

5.5 Energetické zpracování

Z pohledu legislativy ČR a EU se nejedná o recyklaci v pravém slova smyslu. Energetické zpracování je využití tepelné energie, která vzniká při spalování nevyužitého polymerního odpadu. Zatímco běžné paliva hoří poměrně snadno a ve velké míře je spalování dokonalé (bez vzniku škodlivin), u polymerů vznikají zdraví škodlivé sloučeniny (HCl, karcinogenní dioxiny, toxické plyny, apod.). Proto se spalují pouze ve speciálních fluidních topeništích či pecích, kde je dostatek spalovacího vzduchu, vysoká teplota hoření a dostatečné zdržení spalin v pásmu vysokých teplot. [30] [31]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cíle diplomové práce vycházely ze zadaných požadavků, vytvořit materiál se základem LDPE, do něhož se bude přidávat recyklát ozářeného (165 kGy) LDPE. Cílem bylo vypracovat literární studii na dané téma, připravit vzorky na experiment, provést experiment a vyhodnotit naměřené výsledky. Praktická část diplomové práce popisuje měření fyzikálních (mechanických) vlastností povrchové vrstvy LDPE prostřednictvím Instrumentované zkoušky mikrotvrdomosti. Je zde uveden postup při měření osmi různých vzorků z LDPE. Pro experimentální část byly připraveny testovací zkušební tělesa technologií vstřikování. Základní materiál LDPE byl plněn recyklátem 5%, 10%, 20%, 30%, 50%, 75% a 100%. Fyzikální (mechanické vlastnosti) byly testovány Instrumentovanou zkouškou tvrdosti při aplikovaném zatížení 0,5 a 1 N. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Cíle diplomové práce byly následující:

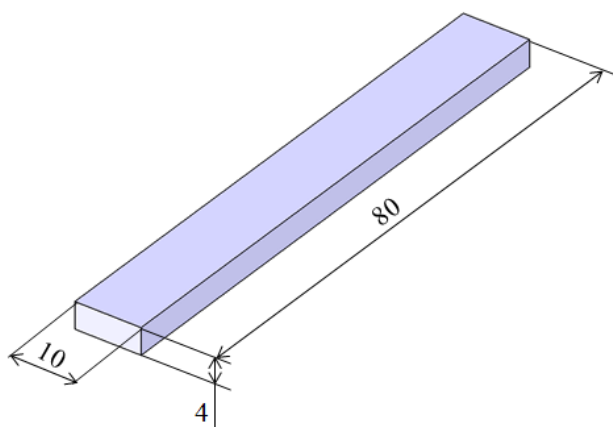
- Vypracování literární studie na dané téma.
- Příprava zkušebních vzorků na experimentální část.
- Provedení experimentu.
- Vyhodnocení naměřených hodnot.

7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Zkušební vzorky určené na Instrumentovanou zkoušku tvrdosti byly vyrobeny metodou vstřikování na vstřikovacím stroji ARBURG ALLROUNDER 470C a lišily se množstvím přidaného recyklátu. Ten byl do směsi přidán v poměru: 0%, 5%, 10%, 20%, 30%, 50%, 75% a 100%. Rozměr výsledného zkušební vzorku byl dán normou ČSN EN ISO 527-1 a je uveden na *Obr. 26*.



Obr. 25 – ARBURG ALLROUNDER 470 C [21]



Obr. 26 – Rozměry zkušební vzorku

7.1 Základní materiál

Základní „čistý“ materiál byl zvolen BRALEN VA 20 – 60 od fy Slovnaft Petrochemicals, s.r.o., což je nízkohustotní polyetylen disponující dobrými tokovými vlastnostmi. Tento materiál je vhodný pro vstřikování a neobsahuje žádná přidaná aditiva. Je vhodný jak pro výrobu produktů určených pro domácnost (splňuje směrnici o kontaktu s potravinami), tak i pro technické dílce složitých tvarů. Není vhodný na výrobky, které jsou vystaveny velkému mechanickému namáhání či agresivním chemikáliím. Používá se na výrobu hraček a uplatnění nachází i ve farmaceutickém průmyslu. [22]

Tab. 5 – Vlastnosti materiálu Bralen VA 20 – 60 [22]

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Index toku taveniny	20	<i>g/10 min</i>
Měrná hmotnost	0,914	<i>g/cm³</i>
Teplota tání	102 - 115	°C
Mrazuvzdornost	-65	°C
Modul pružnosti v tahu	8,9	<i>MPa</i>
Tvrdost Shore D	41	-

7.2 Recyklát

Jako recyklát byl použit materiál LDPE získaný mletím radiačně síťovaných trubek (beta záření o dávce 165 kGy) na potrubí. Radiačním síťováním se rozšiřují možnosti využití těchto plastů a zlepšují se jejich užité vlastnosti. Mezi výhody patří použitelnost při vyšších teplotách, delší životnost, odolnost vůči tvoření trhlin a zlepšená ohnivzdornost.



Obr. 27 – Radičně síťované potrubí z LDPE [19]

7.2.1 Sítová analýza recyklátu

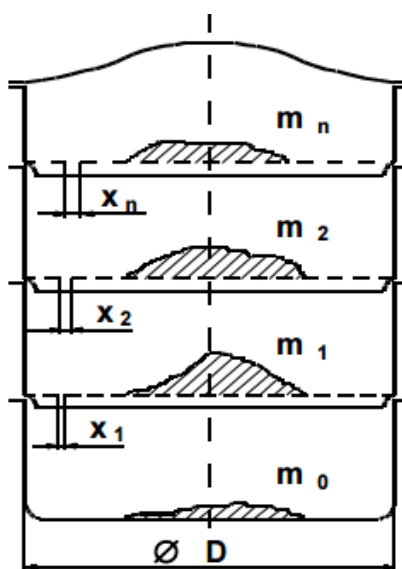
Sítová analýza se provádí k určení velikosti částic pojících práškových materiálů. Jednotlivé částice se pohybují od molekulárních rozměrů až po částice velikosti centimetrů. Pro měření takového rozsahu velikostí částic je zapotřebí více metod. Přehled některých používaných analýz uvádí *Tab. 6*. [19]

Tab. 6 – Metody měření velikostí částic [19]

Druh metody	Princip	Rozměr částic
Mechanická metoda	Sítová analýza	mm – 40 μ m
Mikroskopické metody	Světelná mikroskopie	250 – 0,5 μ m
	Elektronová mikroskopie	0,001 -0,1 μ m
Sedimentační metody	Sedimentace v kapalině	1 – 300 μ m
	Sedimentace v plynu	1 – 100 μ m
	Sedimentace v odstřed. poli	0,05 – 5 μ m
	Rozplavování	1 – 200 μ m
Metody založené na principu ohybu a rozptylu světla		nm – 1000 μ m
Metody založené na principu elektrické vodivosti		nm

Při sítové analýze se postupuje tak, že je sestavena řada sít o různém rozměru ok nad sebe. Síto obsahující nejmenší oka je umístěno nejnižše a směrem vzhůru se rozměry ok na sítích zvětšují. Pod síty bývá umístěna nádoba na zachycení propadu.

Navážka analyzovaného materiálu se nasype na horní síto a uzavře se. Díky tomu nedojde k rozprášení vzorku při setřásání. To se provádí strojně nebo ručně na střešacích strojích. Celý experiment trvá, v závislosti na počtu použitých sít, v rozmezí od 0,5 až 3 hod. Konec nastává teprve tehdy, když je propad sítím o průměru 0,2 mm za jednu minutu menší než 0,1 % hmotnosti navážky vzorku. Poté se zváží propad m_0 a vzorky na sítích m_1 , m_2 až m_n . Zrna zachycená na sítích se opatrně setřou štětečkem. Důležité je zrna ze spodní strany síta zahrnout do propadu a ostatní zrna připočíst k příslušnému zbytku na sítu. [19]



Obr. 28 – Síťová analýza [19]

Materiál byl za pomoci mletí zpracován na pojícího prášek firmou MEL-BAX Roman Odstrčilík, která se zabývá zpracováním práškových polymerů (fluidní a ruční nanášení, pojiva). Následně byla provedena síťová analýza vzniklého prášku.

Tab. 7 – Výsledek síťové analýzy

Specifikace	Požadavek	Výsledek
<400 μm	Min. 60%	65%
400-500 μm	Min. 40%	35%

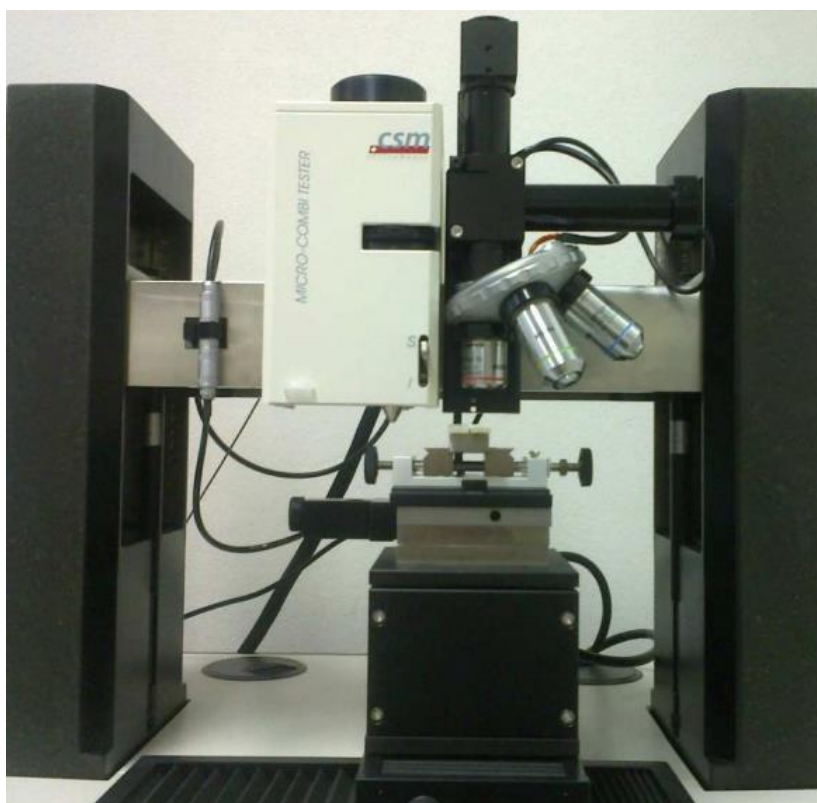
8 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ

Zkouška mikrotvrdosti byla provedena na měřícím zařízení typu Micro Combi Tester od fy CSM Instruments. Jde o stolní kompaktní multiplatformní zařízení určené pro vnikací zkoušky nanotvrdosti a mikrotvrdosti. Toto zařízení je vhodné pro nízká zatížení s hloubkou měření v řádu nanometrů. Používá se k měření měkkých i tvrdých povlaků, keramických povrchových vrstev apod. Zařízení disponuje také fotoaparátem s vysokým rozlišením pro pořízení fotografie či videozáznamu. Micro Combi Tester umožňuje i měření „Scratch Tests“.

8.1 Princip měření mikrotvrdosti

Měření spočívá ve vlačování indentoru do materiálu. Sleduje se velikost zatěžující síly a hloubka, do které je indentační tělísko vtačeno. Také se vyhodnocuje míra deformace materiálu.

Při vlastním měření je nutné upnout zkušební vzorek a nastavit vstupní parametry, poté již měření probíhá zcela automaticky. V průběhu experimentu měřicí přístroj odesílá naměřené hodnoty do počítače, kde mohou být dále vyhodnocovány.



Obr. 29 – Micro Combi Tester

Zvolené parametry zkoušky:

- maximální zatížení – 0,5N a 1N;
- výdrž na maximálním zatížení – 90s;
- rychlost zatěžování/odtěžování – 2N/min;
- Poissonovo číslo – 0,3.

Jako indentační tělísko byl použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° - Vickersův indentor. Měření bylo provedeno pomocí metody DSI (Depth Sensing Indentation) a vyhodnocení mikromechanických vlastností proběhlo metodou Oliver & Pharr.

8.2 Statistické vyhodnocení výsledků

K vyhodnocení výsledků zkoušek bylo použito následujících vztahů a statistických postupů.

Aritmetický průměr \bar{x} – je ukazatel polohy odhadující střední hodnotu všech naměřených n . Je velmi citlivý na odlehlé hodnoty, u asymetrických rozložených dat nemá jeho použití smysl.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (14)$$

Rozptyl s^2 – vyjadřuje, jak jsou naměřené hodnoty rozptýleny. Hodnota rozptylu (míry variability) neukazuje absolutní hodnotu chyby. Vyjadřuje mez, kterou náhodná chyba s určitou pravděpodobností překročí či nepřekročí.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (15)$$

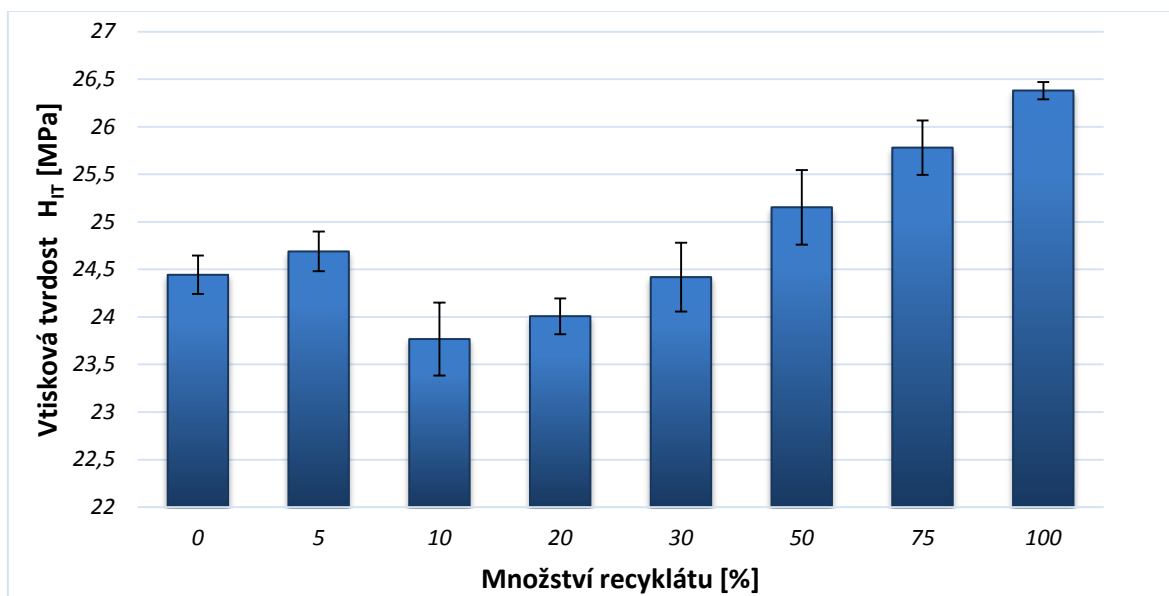
Směrodatná odchylka s – je ukazatelem variability souboru. Je definována jako odmocnina z výběrového rozptylu.

$$s = \sqrt{s^2} \quad (16)$$

Střední kvadratická chyba aritmetického průměru σ – charakterizuje nejistotu, s jakou přesností byla aritmetickým průměrem určena měřená veličina.

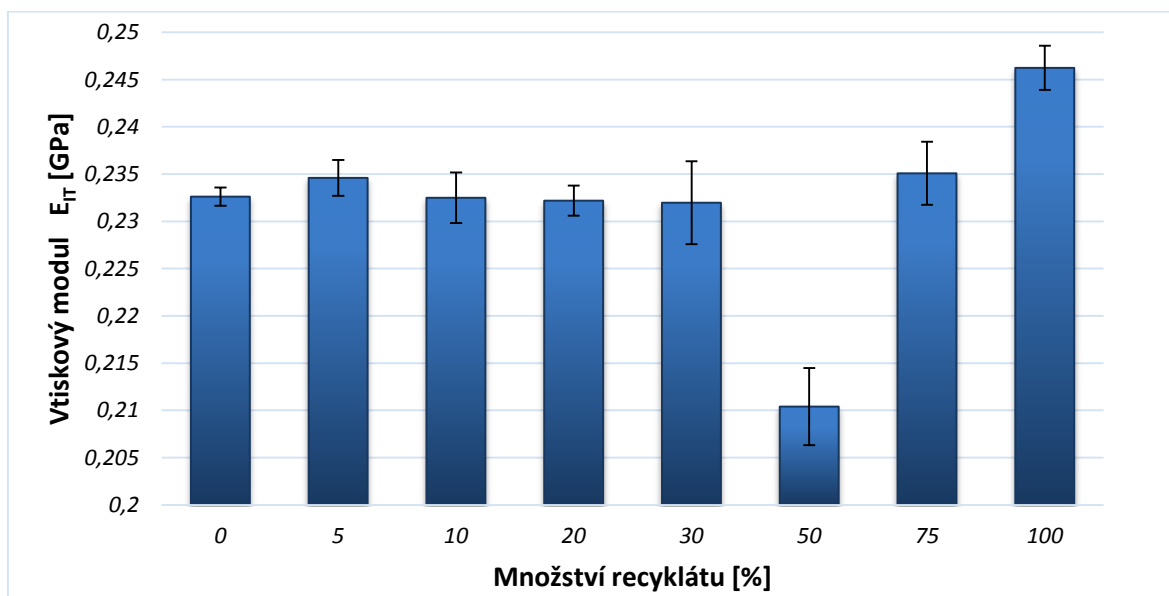
$$\sigma = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (17)$$

8.3 Měření mikrotvrdosti při zatížení 0,5N



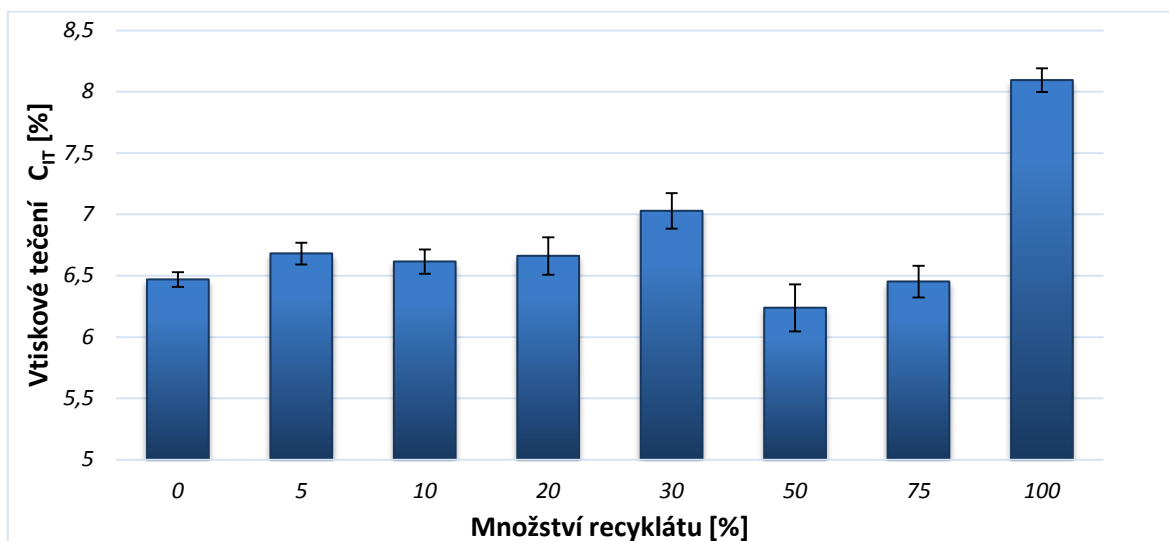
Obr. 30 – Vtisková tvrdost, zatížení 0,5N

Obr. 30 ukazuje závislost vtiskové tvrdosti na množství přidaného recyklátu. Tato hodnota představuje míru odporu materiálu vůči deformaci způsobené vnikajícím tělískem. Největší hodnota tvrdosti byla naměřena u LDPE₁₀₀ ($H_{IT}=26,38$ MPa). Nejnižší hodnota byla u vzorku LDPE₁₀ ($H_{IT}=23,77$ MPa).



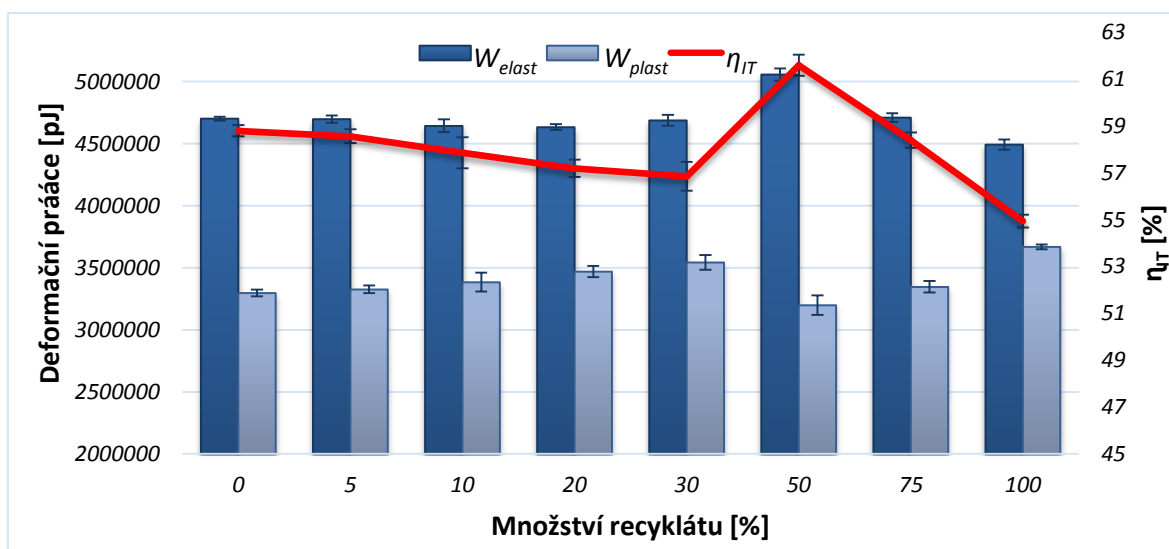
Obr. 31 – Vtiskový modul pružnosti, zatížení 0,5N

Další sledovanou veličinou byl vtiskový modul pružnosti E_{IT} , který reprezentuje tuhost povrchové vrstvy zkušebního tělesa. Dle Obr. 31 byla nejvyšší hodnota naměřena u LDPE₁₀₀ ($E_{IT}=0,246$ GPa), nejnižší hodnota pak u LDPE₅₀. ($E_{IT}=0,21$ GPa).



Obr. 32 – Vtiskové tečení, zatížení 0,5N

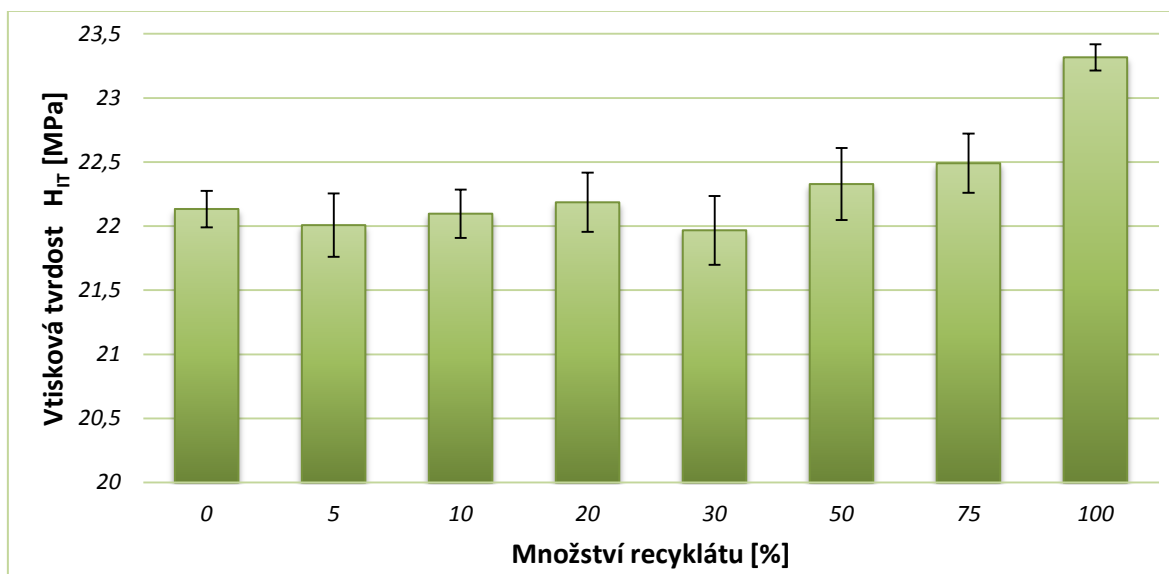
Na Obr. 32 je vidět změna vtiskového tečení C_{IT} . U materiálu LDPE byla největší hodnota naměřena u vzorku vyrobeného pouze z recyklátu ($C_{IT}=8,09\%$). Nejmenší hodnota byla zaznamenána u vzorku LDPE₅₀ ($C_{IT}=6,23\%$).



Obr. 33 – Deformační práce, zatížení 0,5N

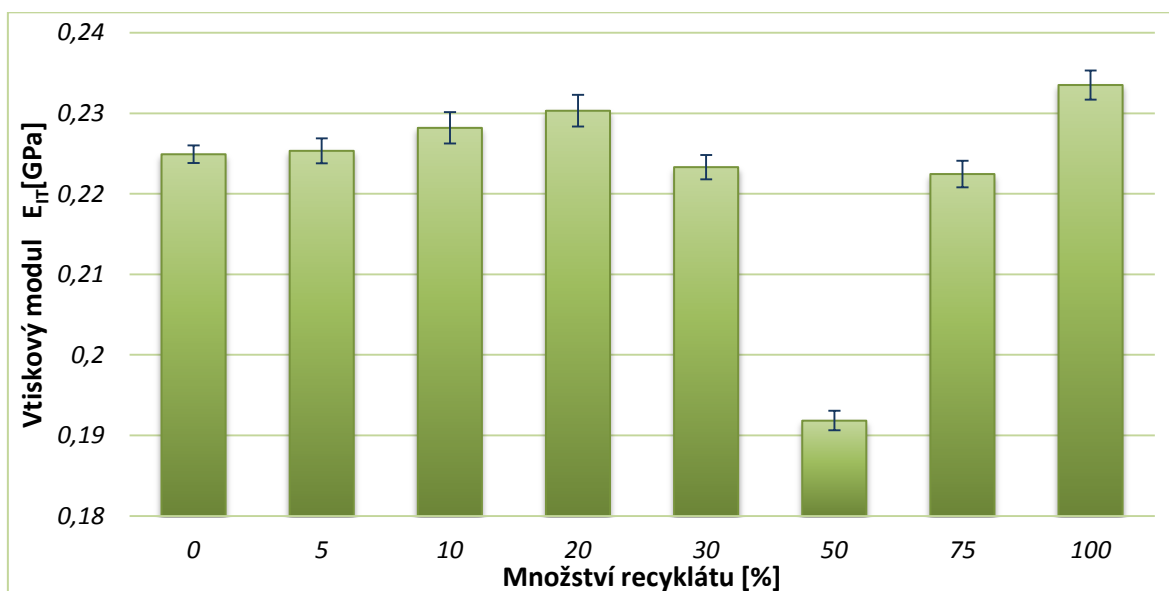
Elastická část deformační práce W_{elast} prokazuje schopnost materiálu reagovat na zatížení vratnou deformací. Plastická část deformační práce W_{plast} vyjadřuje množství práce spotřebované na trvalou plastickou deformaci. Koefficient vratné deformace η_{IT} klesá s množstvím přidaného recyklátu. Podle Obr. 33 byla největší elastická deformační práce naměřena u LDPE₅₀, u stejného materiálu byla zároveň zjištěna nejmenší plastická práce. U vzorku LDPE₁₀₀ tomu bylo právě naopak, materiál vykazoval nejnižší podíl elastické práce, zatímco plastická část práce byla největší.

8.4 Měření při zatížení 1N



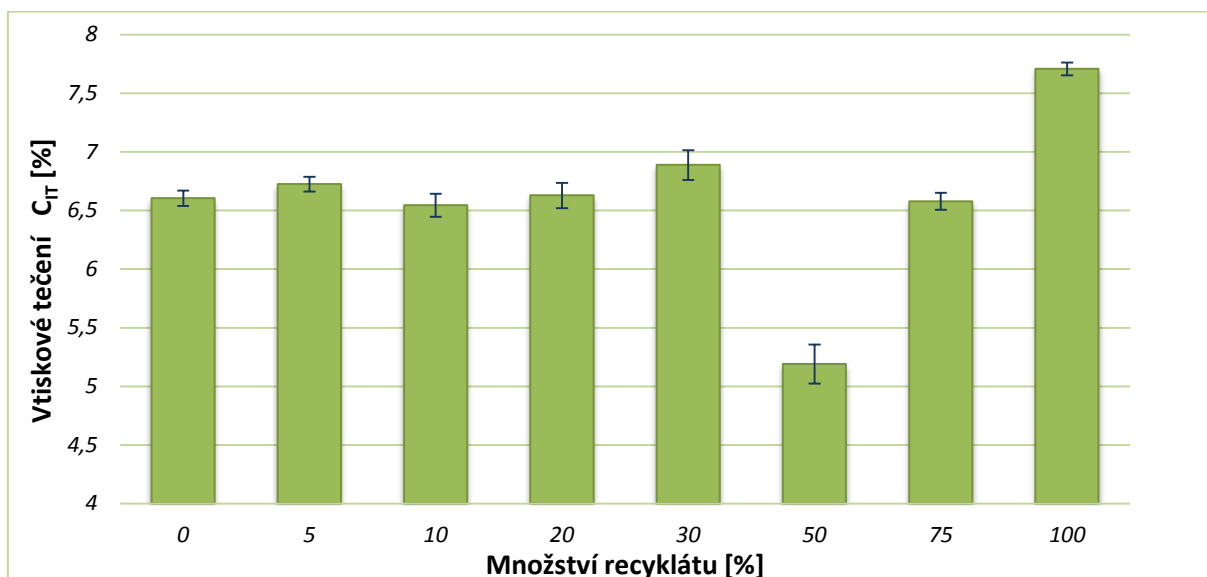
Obr. 34 – Vtisková tvrdost, zatížení 1N

Dle Obr. 34 největší hodnotu vtiskové tvrdosti vykazoval vzorek z materiálu LDPE₁₀₀, tudíž materiál obsahující pouze recyklát ($H_{IT}=23,32$ MPa). Nejmenší hodnota tvrdosti byla změřena u vzorku LDPE₃₀ ($H_{IT}=21,97$ MPa).



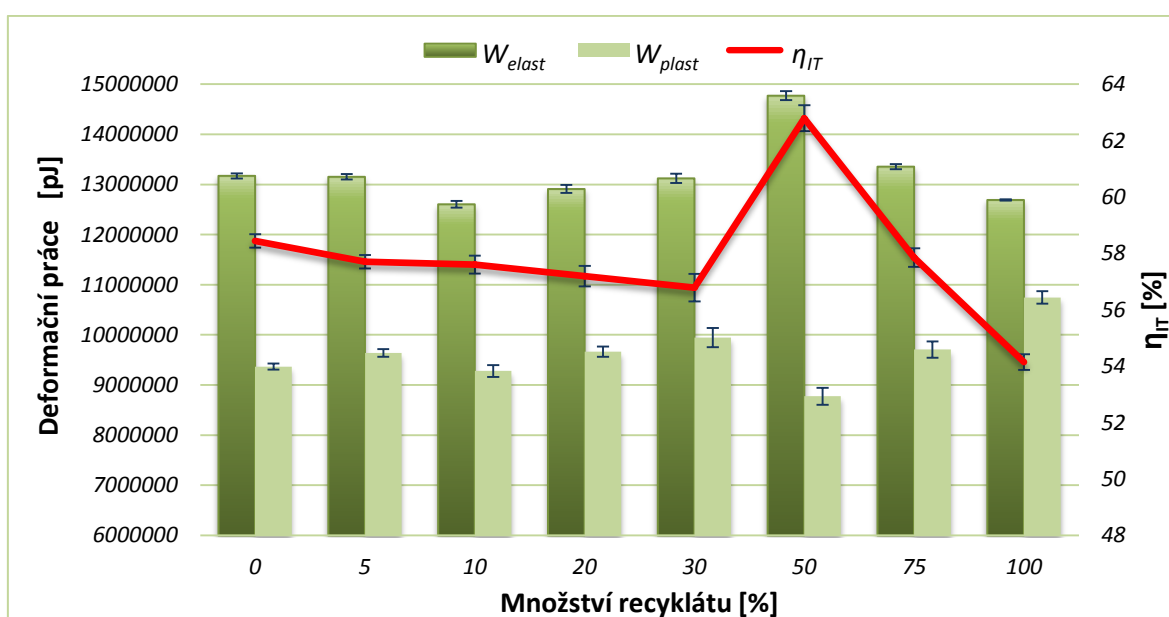
Obr. 35 – Vtiskový modul pružnosti, zatížení 1N

Další veličinou určenou z Instrumentované zkoušky byl vtiskový modul pružnosti, viz Obr. 35. Nejnižší hodnota vtiskového modulu pružnosti byla naměřena u materiálu LDPE₅₀ ($E_{IT}=0,192$ GPa). Nejvyšší hodnota byla u LDPE₁₀₀ ($E_{IT}=0,234$ GPa).



Obr. 36 – Vtiskové tečení, zatížení 1N

Obr. 36 zobrazuje průběh vtiskového tečení v závislosti na množství přidaného recyklátu. Hodnota vtiskového tečení byla nejvyšší u materiálu LDPE₁₀₀ ($C_{IT}=7,71\%$). Nejnižší hodnota vtiskového tečení byla u LDPE₅₀ ($C_{IT}=5,19\%$).

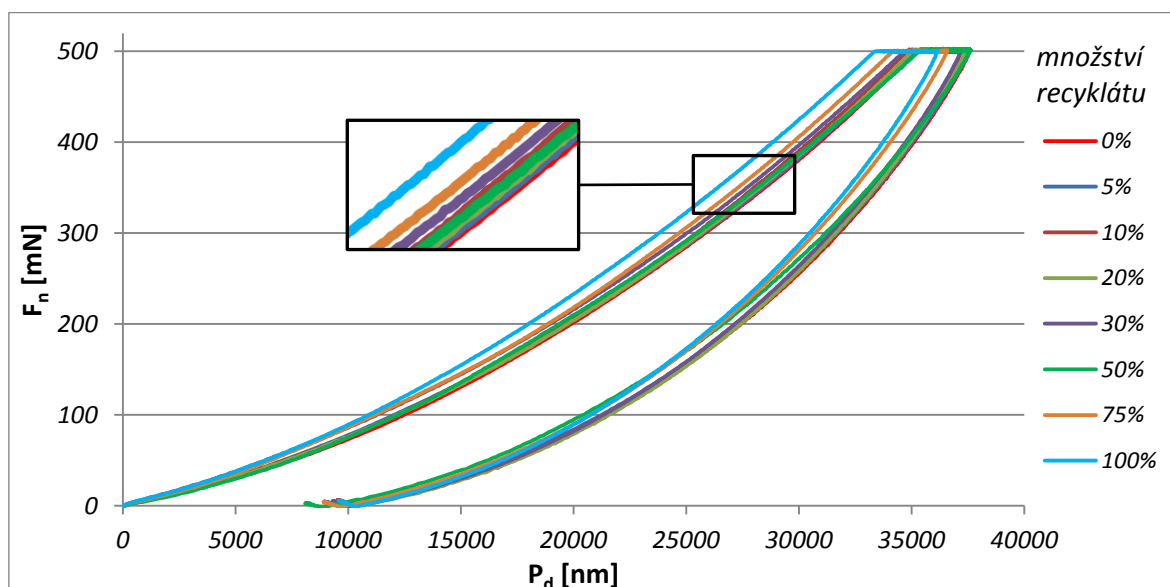


Obr. 37 – Deformační práce, zatížení 1N

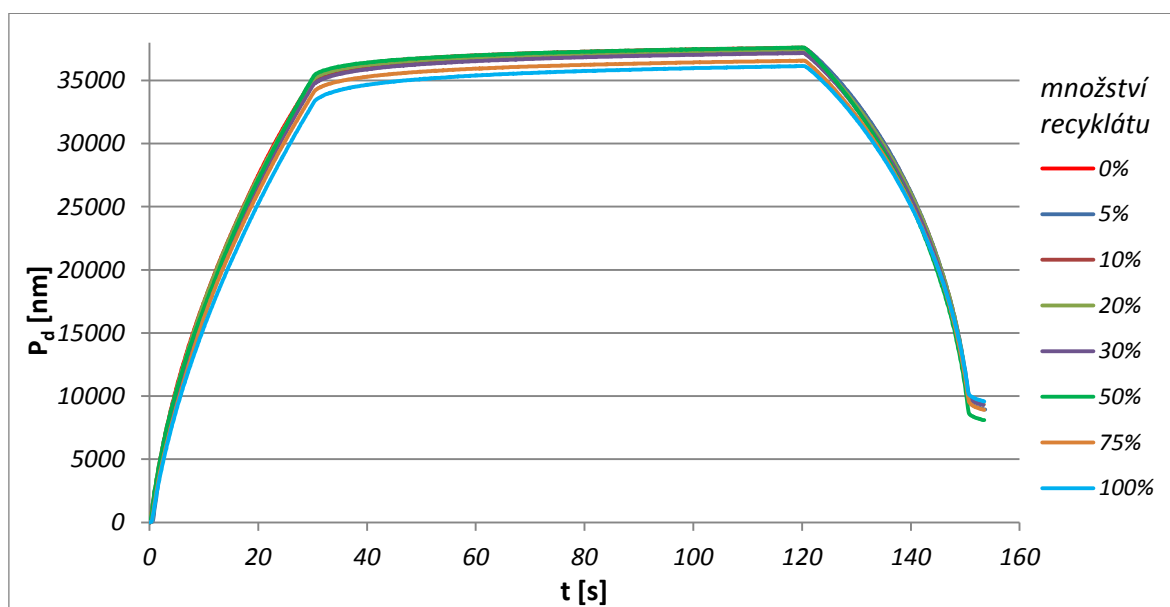
Dle Obr. 37 koeficient zpětné deformace η_{IT} , vyjadřující podíl elastické práce vůči práci celkové, klesá s množstvím přidaného recyklátu. Plastický podíl deformační práce naopak vykazuje mírně stoupající charakter. Nejvyšší podíl elastické deformační práce byl u LDPE₅₀. Nejnižší u LDPE₁₀. Největší plastická práce byla naměřena u LDPE₁₀₀ a nejmenší u LDPE₅₀.

8.5 Indentační křivky

Z naměřených hodnot byl sestaven spojnicový graf Obr. 38, zachycující průběh indentační hloubky vtisku P_d v závislosti na indentační síle $F_n=0,5N$. Na Obr. 39 je zobrazen přírůstek indentační hloubky vtisku za jednotku času.



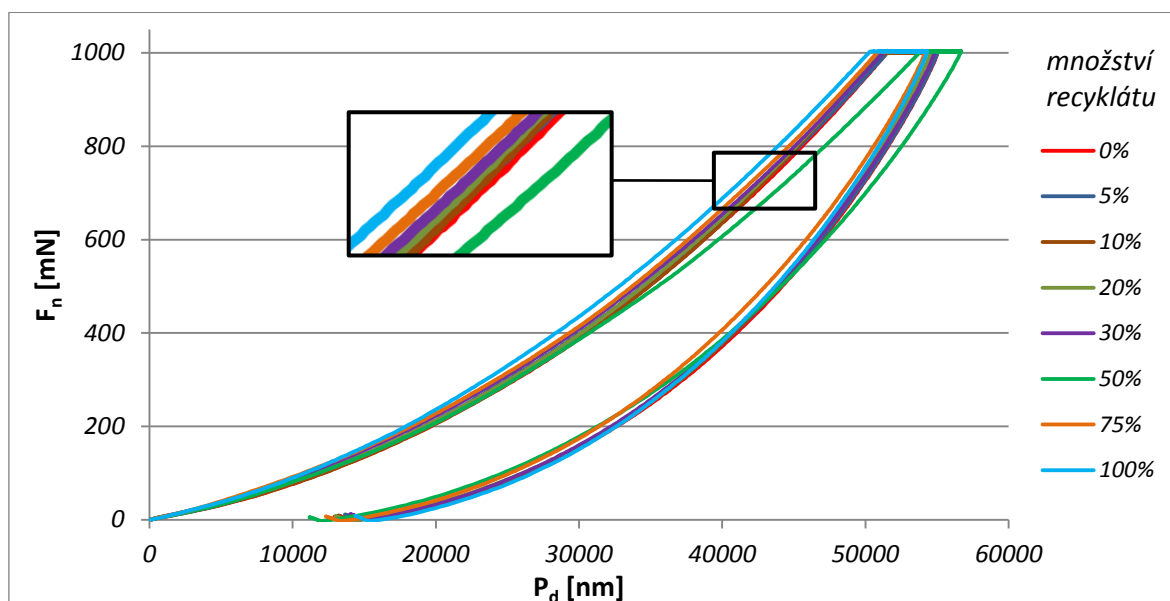
Obr. 38 – Naměřené hodnoty pro LDPE + recyklát při zatížení 0,5N



Obr. 39 – Graf hloubky vtisku v závislosti na čase (LDPE + recyklát; 0,5N)

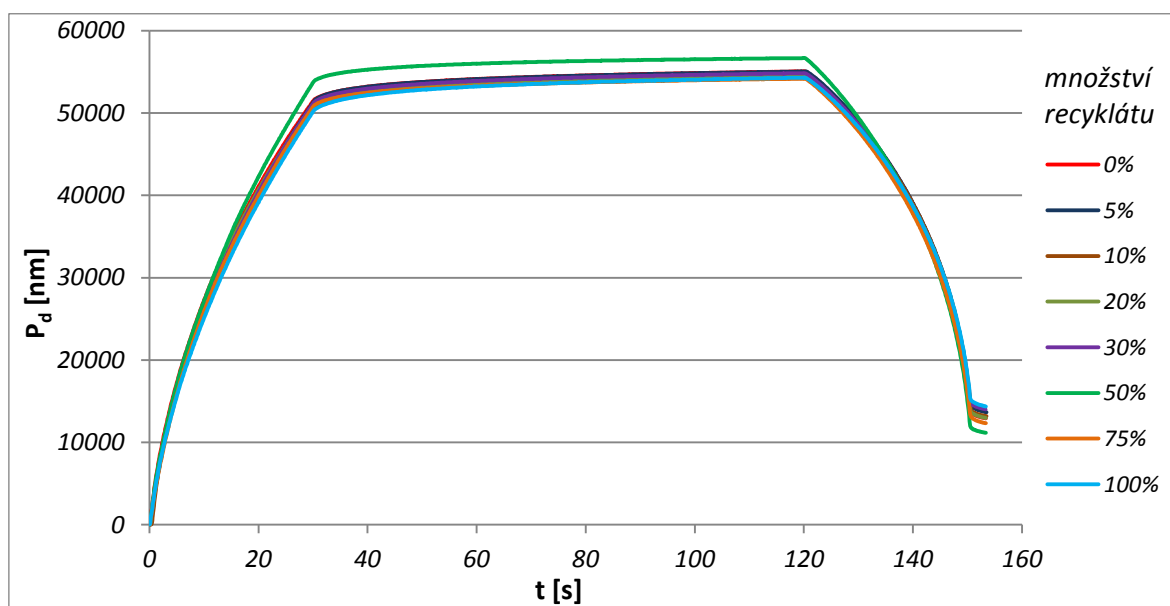
Z obou obrázků je patrné, že indentační křivka je ovlivněna složením vzorku. U materiálu s větším podílem recyklátu dochází k menšímu vtisku indentoru.

U vzorků měřených pod vyšší indentační zátěží tj. $F_n=1N$ jsou rozdíly způsobené množstvím recyklátu ještě více patrné. Na Obr. 40 jde vidět značná odlišnost materiálu LDPE₅₀, která mohla být způsobena například nedokonalou distribucí částic recyklátu při vstřikování.



Obr. 40 – Naměřené hodnoty pro LDPE + recyklát při zatížení 1N

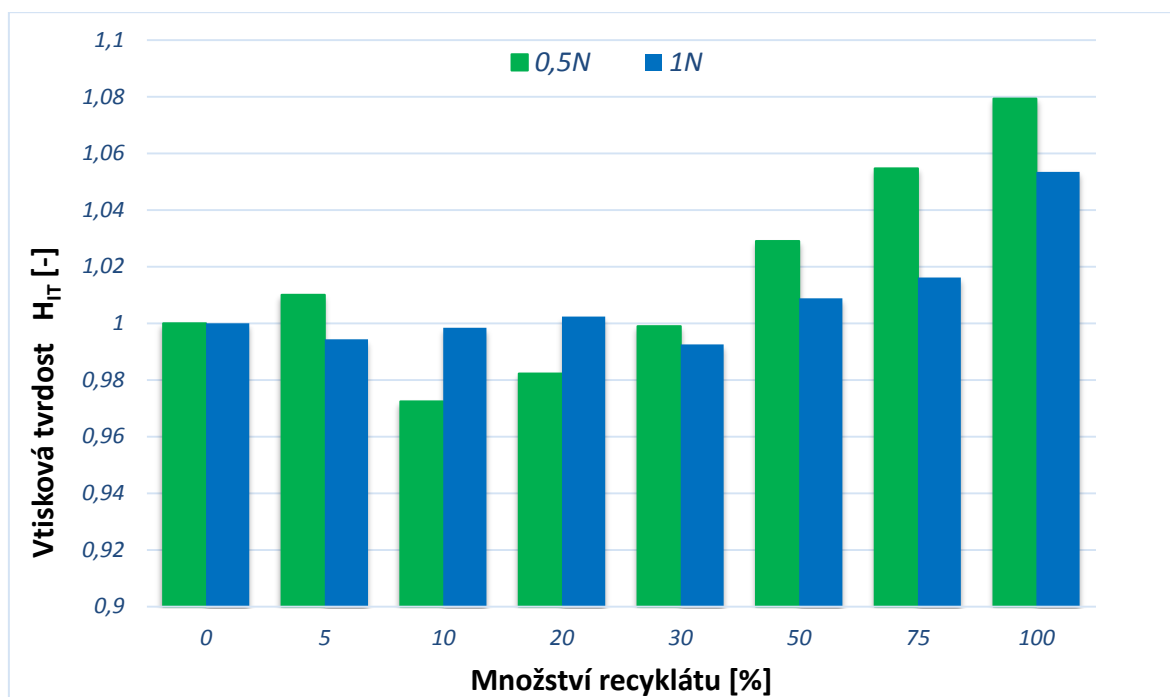
Na Obr. 41 lze vidět, že při dosažení maximálního zatížení se indenter dále posouvá do větší hloubky, tento jev je popisován jako vtiskové tečení (creep).



Obr. 41 – Graf hloubky vtisku v závislosti na čase (LDPE + recyklát; 1N)

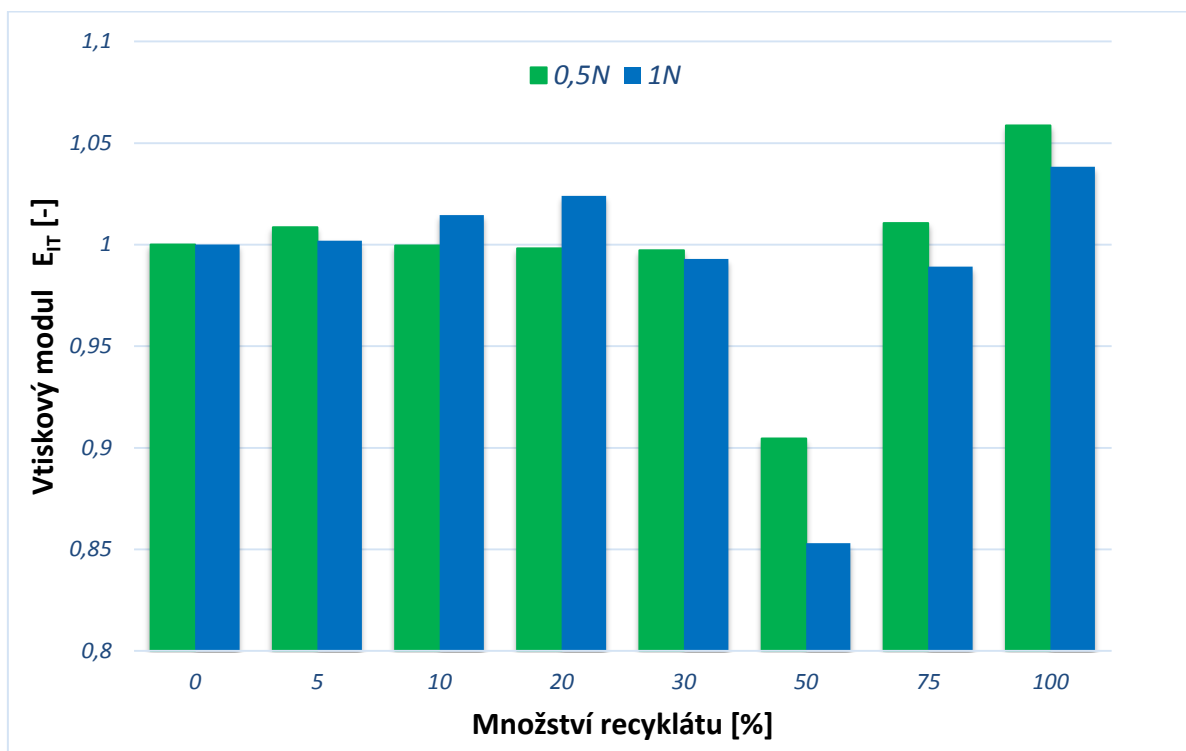
9 DISKUSE VÝSLEDKU

Diplomová práce řeší problém měření fyzikálních vlastností (mechanických) povrchové vrstvy LDPE plněného recyklátem LDPE, který byl ozářen dávkou záření 165kGy. Zkušební tělesa byla vyrobena technologií vstřikování. Základní materiál LDPE byl plněn recyklátem 5%, 10%, 20%, 30%, 50% 75% a 100%. Fyzikální (mechanické vlastnosti) byly testovány instrumentovanou zkouškou tvrdosti při aplikovaném zatížení 0.5 a 1 N. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.



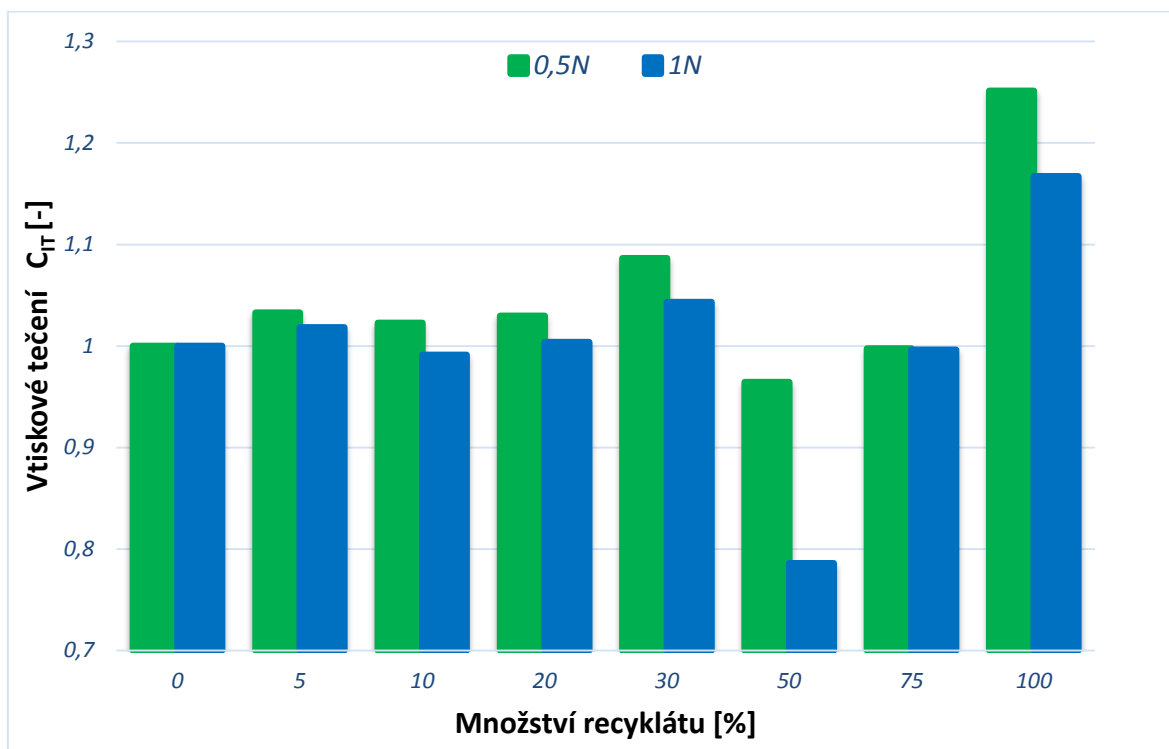
Obr. 42 – Vtisková tvrdost

Obr. 42 ukazuje závislost vtiskové tvrdosti na množství přidaného recyklátu. S nižším zatížením byla naměřená vtisková tvrdost vyšší a docházelo tak k menšímu průniku tělíska indentoru do materiálu. Nejnižší tvrdost byla zaznamenána u LDPE₁₀ při nižším zatížení, kde měl materiál o tři procenta horší vlastnosti. Nejvyšší tvrdost shodně vykazovaly vzorky z LDPE₁₀₀. Oproti základnímu materiálu vykazoval materiál až o osm procent vyšší tvrdost.



Obr. 43 – Vtiskový modul

Dle Obr. 43 byl průběh vtiskového modulu v obou případech zatížení shodný, s přidavkem recyklátu docházelo k jeho mírnému zvýšení. U LDPE₅₀ byl v obou případech zjištěn extrémní propad hodnot. Tato odlišnost mohla být způsobena například špatnou distribucí částic recyklátu při vstřikování. Vtiskový modul u tohoto materiálu je až o patnáct procent nižší než vykazoval původní materiál. Nejvyšší hodnotu modulu vykazoval materiál LDPE₁₀₀ při zatížení 0,5N, u kterého došlo ke zlepšení až o šest procent.



Obr. 44 – Vtiskové tečení

Vtiskové tečení (creep) nám popisuje chování testovaného zkušebního tělesa při působení konstantního zatížení v průběhu času (Obr. 44). Z výsledku měření je patrné, že se zvyšujícím se množstvím recyklátu přidávaného do čistého LDPE dochází k nárůstu hodnot krípu. Tento nárůst dosahuje u nízkého (0,5N) zatížení až 25%. Při aplikaci vyššího zatížení se dostáváme k hodnotě 18%. Tento nárůst je možné si vysvětlit drobnými prasklinami v povrchové vrstvě, kdy nejsou ovlivněny hodnoty vtiskové tvrdosti nebo vtiskového modulu pružnosti.

Zajímavé jsou výsledky vtiskového tečení u plnění 50% recyklátu. Zde došlo k poklesu krípu u zatížení 1N o téměř 20%, v porovnání s ostatním procentuálním plněním čistého LDPE.

10 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá výzkumem využití polymerního recyklátu (ozářeného LDPE). Recyklát modifikovaný beta zářením (dávka 165 kGy) byl přidáván do čistého LDPE v množství 5%, 10%, 20%, 30%, 50%, 75% a 100%. Fyzikální (mechanické) vlastnosti byly měřeny Instrumentovanou zkouškou mikrotvrlosti při aplikovaném zatížení 0,5N a 1N.

Ze zpracovaného experimentu vyplývá, že materiál LDPE s rostoucím přídatkem recyklátu vykazoval v povrchové vrstvě (při zatížení 1N) větší hodnoty vtiskové tvrdosti (5%) a zvyšovala se jeho hodnota vtiskového modulu (4%). S větším množstvím přidaného recyklátu docházelo k zvýšení hodnot vtiskového tečení (creep) a poklesu výsledných hodnot koeficientu zpětné deformace.

Z výsledků měření bylo patrné, že při nižších koncentracích recyklátu se mechanické vlastnosti LDPE neměnily, respektive změny byly pozvolné a sledované hodnoty se měnily jen v řádu několika málo procent. Rozdíl vtiskové tvrdosti mezi čistým materiálem a materiálem obsahujícím sto procent recyklátu činil při nízkém zatížení (0,5N) osm procent a zároveň hodnota vtiskového tečení o celých dvacet pět procent vzrostla.

Z výsledků měření vyplynulo, že přidáním recyklátu ozářeného LDPE do čistého LDPE, nedochází ke zhoršení mechanických vlastností testovaných zkušebních těles. Změny se projevují např. zvýšenou odolností proti opotřebení nebo zlepšenými třecími vlastnostmi. Modifikované LDPE přidáním recyklátu může nalézt uplatnění při náročnějších aplikacích, tam, kde dochází ke kontaktu mezi polymerem a zeminou apod.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [2] Fyzika na KF PdF MU. *Fyzikální základy vědy o materiálu*. [online]. 2013 [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/fmkomplet3.htm>
- [3] Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti. LENFELD, Petr. *Katedra tváření kovů a plastů* [online]. 2008 [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [4] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.
- [5] Tribon. *Polyethylen - zpracování a prodej* [online]. 2011 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.technicke-plasty-tribon.cz/nabidka/materialy-polotovaru/bezne-plasty/polyethylen>
- [6] Essential chemical industry. *Polyethylen* [online]. 2014 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polyethene.html>
- [7] Zkoušení materiálů a výrobků. *Zkouška tvrdosti podle Rockwella* [online]. 2005. vyd. 2005 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.kluvi.com/index.php?menu=2&page=download&kategorie=12>
- [8] ASTM Standard Tests. *Test Method to measure Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials Using the CETR-UMT 3* [online]. 2006 - 2015 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.cetr.com/eng/services/astm-tests.html>
- [9] ČSN EN ISO 2039-2. *Plasty - Stanovení tvrdosti - Část 2: Tvrdost dle Rockwella*. 2000.
- [10] LUDVÍK, BÍLEK. *Zkoušky tvrdosti: Přehled základních zkušebních metod pro uživatele tvrdoměrů Qness*. Kladno, 2010. Dostupné z: http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrdosti.pdf

- [11] Struers. *Knoop Test Methods* [online]. 2015 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://www.struers.com/default.asp?doc_id=946
- [12] Hardness Testing. *Knoop Hardness Testing* [online]. 2010 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.hardnesstesters.com/Applications/Knoop-Testing.aspx>
- [13] Oddělení povrchového inženýrství. *Zkoušky tvrdosti* [online]. 2006 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [14] Zkoušky tvrdosti: komplexní didaktické zpracování problému. In: PODRÁBSKÝ, Tomáš. *Prezentace zkoušky tvrdosti* [online]. 2003 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3082060/>
- [15] SubsTech. *Shore hardness test* [online]. 2013 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=shore_durometer_hardness_test
- [16] DUŠEK, Jiří. *Tvrlost, mikrotvrlost, nanotvrlost - čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008. 171 s. Dizertační práce. Masarykova univerzita v Brně.
- [17] OVSÍK, Martin. *Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů*. Zlín, 2013. 178 s. Dizertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [18] BGS: *Ideen Plus Energie* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.bgs.eu/>
- [19] LAMBOROVÁ, Romana. *Recyklace ozářených polymerů*. Zlín, 2009 Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [20] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů*. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné také z: <https://publi.cz/books/183/>
- [21] Lumiplast. *Arburg* [online]. 2013 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.lumiplast.cz/?site=Equipment>
- [22] SLOVNAFT PETROCHEMICALS, S.R.O. 2008. *Technical Data Sheet: BRALEN VA 20-60*. Dostupné také z: <http://daco-trade.ru/media/2011/01/VA20-60a.pdf>
- [23] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracovávání kaučuků a plastů*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 1999, 203 s. ISBN 80-7080-367-3.

- [24] STRADĚJ, Jiří. *Vliv typu a množství recyklátu na vlastnosti plastového výrobku*. Zlín, 2013. 107 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [25] KOHOUT a BOSÁK. *Recyklace autoplastů a možnosti jejich využití* [online]. Pardubice, 2001 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://envi.upce.cz/pisprace/prezencni/28-3-3.doc>
- [26] RYBNÍKÁŘ, František a kolektiv. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 420 s.
- [27] ELIAS, Hans-Georg. *An introduction to plastics*. 2nd completely rev. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, 387 s. ISBN 3-527-29602-6.
- [28] Skúšky tvrdosti. *Matnet* [online]. 2006 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=531>
- [29] SHAH, Vishu. *Handbook of plastics testing technology*. 2nd ed. New York: Wiley, 1998, 527 s. ISBN 0-471-18202-8.
- [30] Povinnosti při nakládání s vybranými výrobky, vybranými odpady a vybranými zařízeními. In: *Zákon o odpadech a o změně dalších zákonů*. § 4 předpis č. 185/2001. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>
- [31] Recyklace plastů. *Katedra chemie UJEP* [online]. 2014 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/14_%20RECYKLACE%20PLASTU.pdf
- [32] Třídící linka. *Enviregion* [online]. 2 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://ucebnice3.enviregion.cz/userFiles/odpady/linka.jpg>
- [33] SC - News. Brno: © SERVIS CENTRUM s.r.o., 2002. MK ČR E 12474.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

η_{IT}	Koeficient vratné deformace
ν	Poissonova konstanta
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
A_p	Průmět kontaktní plochy mezi tělískem indentoru a zkušebním vzorkem
BR	Polybutadiene rubber
C_{IT}	Vtiskové tečení (creep)
DSI	Depth Sensing Indentation Instrumentovaná zkouška tvrdosti
E	Modul pružnosti
E_{IT}	Vtiskový modul pružnosti
EVA	Ethylenvinylacetát
F_n	Indentační síla
HB	Tvrdomost podle Brinella
h_c	Hloubka kontaktu indentoru se zkušebním tělesem při působení maximální zatěžující síly
HCl	Kyselina chlorovodíková
HDPE (PE-HD)	Vysokohustotní polyethylen
HCH	Tvrdomost podle Barcolovic
H_{IT}	Vtisková tvrdomost
HKN	Tvrdomost podle Knoop
HR	Tvrdomost podle Rockwella
HV	Tvrdomost podle Vickerse
IIT	Instrumented Indentation Testing Instrumentovaná zkouška tvrdosti
LDPE (PE-LD)	Nízkohustotní polyethylen
LDPE ₁₀₀	Nízkohustotní polyethylen pouze z recyklátu
LDPE ₅₀	Nízkohustotní polyethylen z 50% recyklátu

LLDPE (PE-LLD)	Lineární nízkohustotní polyethylen
MDPE (PE-MD)	Polyethylen o střední hustotě
PA6	Polyamid-6
PC	Polykarbonát
P_d	Indentační hloubka vtisku
PE	Polyethylen
PET (PETP)	Polyethylentereftalát
PI	Polyimide
PMMA	Polymethylmethakrylát
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PSU	Polysulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
SAN	Styrenakrylnitril
SBR	Styrene butadiene rubber
W_{elast}	Elastická část deformační práce vnikacího procesu
W_{plast}	Plastická část deformační práce vnikacího procesu
W_{total}	Celková deformační práce vnikacího procesu

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 – Rozdělení polymerů [1]</i>	12
<i>Obr. 2 – Rozdělení plastomerů [33]</i>	13
<i>Obr. 3 – Druhy makromolekulárních řetězců</i>	14
<i>Obr. 4 – Druhy kopolymerů</i>	15
<i>Obr. 5 – Rozdělení a objem plastů [3]</i>	16
<i>Obr. 6 – Strukturní vzorec polyethylenu</i>	17
<i>Obr. 7 – Podíl technologického zpracování HDPE a LDPE/LLDPE [6]</i>	17
<i>Obr. 8 – Schéma pronikání záření [18]</i>	20
<i>Obr. 9 – Schopnosti pronikání β záření a γ záření [18]</i>	21
<i>Obr. 10 – Zkouška tvrdosti podle Brinella [28]</i>	22
<i>Obr. 11 – Zkouška tvrdosti podle Rockwella [28]</i>	23
<i>Obr. 12 – Průběh zkušebního zatížení - metoda Rockwell [10]</i>	24
<i>Obr. 13 – Vickersův indentor [10] [28]</i>	25
<i>Obr. 14 – Berkovichův indentor [17]</i>	26
<i>Obr. 15 – Vnikací tělísko pro zkoušku HKN [17]</i>	27
<i>Obr. 16 – Měření podle Shore A a Shore D [15]</i>	28
<i>Obr. 17 – Přepočítání mezi Shore A a Shore D</i>	29
<i>Obr. 18 – Indentační křivka a časový průběh zatížení [17]</i>	30
<i>Obr. 19 – Tvar indentačních křivek pro dané materiály [17]</i>	31
<i>Obr. 20 – Pile-up a sink-in efekt [17]</i>	31
<i>Obr. 21 – Vyjádření vtiskového tečení [17]</i>	34
<i>Obr. 22 – Vyjádření deformační práce z průběhu indentační křivky [17]</i>	34
<i>Obr. 23 – Jeden ze zažitých symbolů pro recyklaci</i>	35
<i>Obr. 24 – Schéma třídící linky [32]</i>	37
<i>Obr. 25 – ARBURG ALLROUNDER 470 C [21]</i>	42
<i>Obr. 26 – Rozměry zkušebního vzorku</i>	42
<i>Obr. 27 – Radiačně síťované potrubí z LDPE [19]</i>	44
<i>Obr. 28 – Síťová analýza [19]</i>	45
<i>Obr. 29 – Micro Combi Tester</i>	46
<i>Obr. 30 – Vtisková tvrdost, zatížení 0,5N</i>	49
<i>Obr. 31 – Vtiskový modul pružnosti, zatížení 0,5N</i>	49
<i>Obr. 32 – Vtiskové tečení, zatížení 0,5N</i>	50

<i>Obr. 33 – Deformační práce, zatížení 0,5N</i>	50
<i>Obr. 34 – Vtisková tvrdost, zatížení 1N</i>	51
<i>Obr. 35 – Vtiskový modul pružnosti, zatížení 1N</i>	51
<i>Obr. 36 – Vtiskové tečení, zatížení 1N</i>	52
<i>Obr. 37 – Deformační práce, zatížení 1N</i>	52
<i>Obr. 38 – Naměřené hodnoty pro LDPE + recyklát při zatížení 0,5N</i>	53
<i>Obr. 39 – Graf hloubky vtisku v závislosti na čase (LDPE + recyklát; 0,5N)</i>	53
<i>Obr. 40 – Naměřené hodnoty pro LDPE + recyklát při zatížení 1N</i>	54
<i>Obr. 41 – Graf hloubky vtisku v závislosti na čase (LDPE + recyklát; 1N)</i>	54
<i>Obr. 42 – Vtisková tvrdost</i>	55
<i>Obr. 43 – Vtiskový modul</i>	56
<i>Obr. 44 – Vtiskové tečení</i>	57

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 – Srovnání vlastností HDPE a LDPE [4].....</i>	18
<i>Tab. 2 – Vybrané stupnice tvrdosti podle Rockwella [7] [8].....</i>	24
<i>Tab. 3 – Oblast měření podle Vickerse [17].....</i>	25
<i>Tab. 4 – Tabulka pro rychlý přepočít Shore A a Shore D [15].....</i>	29
<i>Tab. 5 – Vlastnosti materiálu Bralen VA 20 – 60 [22].....</i>	43
<i>Tab. 6 – Metody měření velikostí částic [19].....</i>	44
<i>Tab. 7 – Výsledek síťové analýzy.....</i>	45