

MECHANICKÉ VLASTNOSTI KONSTRUKČNÍCH POLYMERŮ

Patrik Slovák

Bakalářská práce
2015

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Patrik Slovák**
Osobní číslo: **T14685**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Mechanické vlastnosti konstrukčních polymerů**

Zásady pro vypracování:

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

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího BP.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. David Maňas, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

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

Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2015**

Ve Zlíně dne 9. února 2015


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: SLOVÁK PATRIK

Obor: TZ

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 užit 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 19.5.2015



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 nevdělečně 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 vzdělávacímu 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 bakalářské práce je měření a vyhodnocení mechanických vlastností konstrukčních polymerů. Teoretická část pojednává o obecném rozdělení, vlastnostech a zkoušení vybraných čtyř druhů polymerů. Praktická část pojednává o zpracování a následném porovnání naměřených vlastností a celkové vyhodnocení mechanických zkoušek.

Klíčová slova: konstrukční polymery, mechanické vlastnosti, zkouška vrubové houževnatosti, zkouška tvrdosti Shore D

ABSTRACT

The scope of this work is to measure and evaluate mechanical properties of structural polymers. The theoretical part describes general classification, properties and testing of selected four types of polymers. The practical part deals with processing and subsequent comparison of the measured properties and the overall evaluation of mechanical tests.

Keywords: structural polymers, mechanical properties, test notch toughness, hardness test Shore D

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat vedoucímu této bakalářské práce doc. Ing. Davidu Maňasovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a ochotu, které mi umožnil při psaní této práce.

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

Ve Zlíně.....

.....

Patrik Slovák

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY	12
1.1 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	12
1.1.1 Termoplasty.....	13
1.1.2 Reaktoplasty.....	13
1.1.3 Elastomery.....	13
1.2 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ PODLE VÝCHOZÍCH SUROVIN	14
1.2.1 Přírodní.....	14
1.2.2 Syntetické.....	14
1.3 ROZDĚLENÍ PODLE TVARU POLYMERNÍHO ŘETĚZCE	14
1.3.1 Lineární polymer	14
1.3.2 Rozvětvený polymer	14
1.3.3 Zesíťovaný polymer	14
1.3.4 Prostorově zesíťovaný polymer	14
1.4 ROZDĚLENÍ PODLE TECHNOLOGIE A PODMÍNEK ZPRACOVÁNÍ.....	15
1.4.1 Tvářecí technologie	15
1.4.2 Tvarovací technologie	15
1.4.3 Doplnkové technologie	15
2 VYBRANÉ DRUHY POLYMERŮ	16
2.1 MAKROLON 2207	16
2.2 SLOVAMID 6 15% GF.....	16
2.3 SAN TYRIL 905 UV	16
2.4 CALIBRE.....	16
3 ZKOUŠKY TVRDOSTI	17
3.1 ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE BRINELLA	17
3.1.1 Podstata metody	17
3.1.2 Zkušební tělesa a zařízení.....	18
3.1.3 Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Brinella	18
3.2 ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE ROCKWELLA.....	20
3.2.1 Podstata metody	20
3.3 ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE VICKERSE	22
3.3.1 Podstata metody	22
3.3.2 Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Vickerse.....	23
3.4 ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE SHOREHO.....	24
3.4.1 Podstata metody	24
3.4.2 Tvrdoměry Shore.....	25
3.4.3 Provedení zkoušky tvrdosti metodou Shore A	26
3.4.4 Provedení zkoušky tvrdosti metodou Shore D	26
3.5 ZKOUŠKA TVRDOSTI IRHD	27
3.5.1 Podstata metody	27
3.5.2 Standartní metody provedení zkoušky	27

3.5.3	Metody měření zdánlivé tvrdosti.....	27
3.5.4	Zápis hodnoty tvrdosti.....	28
4	ZKOUŠKA TAHEM.....	29
4.1	PODSTATA METODY.....	29
4.2	ZKUŠEBNÍ TĚLESA	30
4.1	TAHOVÁ KŘIVKA	31
5	RÁZOVÁ ZKOUŠKA V OHYBU	34
5.1	METODA CHARPY	34
5.2	METODA IZOD	35
5.3	METODA DYNSTAT	35
II	PRAKTICKÁ ČÁST	36
6	CÍLE BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	37
6.1	CÍL PRÁCE	37
7	EXPERIMENT	38
7.1	VSTŘIKOVACÍ STROJ ARBURG ALLROUNDER 420 C	38
7.2	SUŠIČKA ARBURG THERMOLIFT 100 – 2	38
7.3	VRUBOVAČKA CEAST S MIKROMETREM.....	39
7.4	STROJ PRO TAHOVOU ZKOUŠKU ZWICK ROELL 1456.....	40
7.5	CHARPYHO KLADIVO ZWICK ROELL HT50J.....	41
7.6	TVRDOMĚR OMAG AFFRI ART 13	42
7.7	HODNOTY VSTŘIKOVÁNÍ	43
7.7.1	Polykarbonát Makrolon 2207.....	43
7.7.2	Polyamid Slovamid 6 15%GF	44
7.7.3	San Tyril 905 UV	44
7.7.4	Calibre	45
8	ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	46
8.1	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	46
8.1.1	Odhad aritmetického průměru.....	46
8.1.2	Odhad směrodatné odchylky.....	46
8.1.3	Střední kvadratická chyba aritmetického průměru	47
8.2	RÁZOVÁ ZKOUŠKA V OHYBU	47
8.3	ZKOUŠKA TAHEM	49
8.4	ZKOUŠKA TVRDOSTI SHORE D	51
9	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	52
	ZÁVĚR	53
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	54
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	54
	SEZNAM OBRÁZKŮ	58
	SEZNAM TABULEK.....	60

ÚVOD

Polymery jsou v dnešní době velmi oblíbené, protože umožňují jednoduché zpracování. Nahrazují mnoho klasických materiálů, jako jsou především kovy, dřevo, sklo, kůže aj. Uplatňují se v nejrůznějších oborech lidské činnosti. Lidstvo už odnedávna zkouší různé materiály. Zkušební metody a přístroje se postupně vyvíjí a nemohou být stejné pro všechny polymery.

Měřením mechanických vlastností se musí provádět při vývoji a výrobě materiálů. Vhodný výběr materiálu je klíčový pro konstrukci výrobku a jeho následném používání. Způsob jak zjistit u materiálu jeho požadované vlastnosti je jeho zkoušení. Zkoušku lze přímo provést na výrobku, nebo na zkušebním tělese. Následně se provede srovnání s materiálovým listem a vyhodnotí.

Cílem této bakalářské práce je vyhodnocení naměřených hodnot čtyř vybraných druhů konstrukčních polymerů.

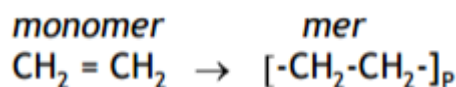
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymery jsou chemické látky neobvyklých vlastností, obsahující v molekulách zpravidla atomy uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku, chloru, ale i jiných prvků. Polymery ve formě výrobku jsou prakticky v tuhém stavu, ale mohou být ve stavu zpracování také v kapalném stavu. Většinou se to děje za zvýšeného tlaku a teploty, což umožňuje výrobku dát různý tvar, podle budoucího použití.

Makromolekulární látky nazýváme často polymery. Májí mnohokrát se opakující jednotku mer. Název je určen od slova meros-část a poly-mnoho, proto polymer. Výchozí látka pro výrobu polymerů je monomer.[1]

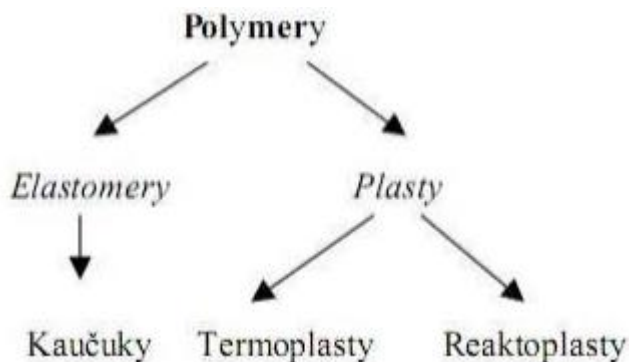
Označení polymer je neurčitý, není přesně definovaná délka, nebo velikost molekuly, kterou můžeme označit jako polymer. Termín polymer označujeme makromolekuly, které mají své vyznačující se vlastnosti pro molekuly a dlouhou řetězcovou strukturu.[2]



Obr. 1 Stavební jednotka

1.1 Rozdělení polymerů

Polymery dělíme do dvou základních skupin a to jsou elastomery a plasty. Plasty dále rozdělujeme na termoplasty a reaktoplasty.



Obr. 2 Rozdělení polymerů

1.1.1 Termoplasty

Tyto polymerní materiály mají fyzikálně vázané lineární a rozvětvené makromolekuly. Jsou tuhé za běžných teplot, ale při vyšších teplotách jsou tvárné a to i opakovatelně. Při zahřívání nedochází ke změnám chemické struktury, ale jedná se pouze o fyzikální proces.

Termoplasty tvoří většinu zpracovaných materiálů jako polyethylen (PE), polypropylen (PP), polybuten (PB), polystyren (PS) a mnoho dalších.

1.1.2 Reaktoplasty

Tyto polymerní materiály se dříve nazývali termosety. Reaktoplasty stejně jako termoplasty při první fázi zahřívání měknou a můžeme je tvarovat, ale pouze na omezenou dobu. Při dalším ohřevu dochází k vytvrzování, pomocí chemické reakce, při které dojde k prostorovému zesíťování struktury.

Ochlazování se děje již mimo formu, protože rychlé ochlazení formy a následný další ohřev je obtížný. Děj je už konečný, vyrobené plasty nelze již znovu použít pro další výrobu.

Mezi reaktoplasty se řadí epoxidy a nasycené polyestery, dále formaldehydové pryskyřice a mnoho dalších.

1.1.3 Elastomery

Tyto polymerní materiály jsou vysoce elastické. Elastomery jsou za běžných podmínek malou silou deformovatelné, přičemž je tato deformace většinou vratná. Nejběžnějším zastoupením elastomerů jsou kaučuky, ze kterých se převážně vyrábí guma (pryž).

V První fázi zahřívání tyto materiály rovněž měknou a proto je na omezenou dobu lze tvářet. Při dalším zahřívání dojde k prostorovému zesíťování struktury, k tzv. vulkanizaci.[2]

1.2 Rozdělení polymerů podle výchozích surovin

1.2.1 Přírodní

Vznikají v rostlinách, či v živočišných organismech složitými biochemickými procesy (bílkoviny, celulóza, škrob, kaučuk)

1.2.2 Syntetické

V přírodě se nevyskytují, vyrábějí se z jednoduchých organických sloučenin reakcemi, přičemž se velký počet molekul výchozích látek spojuje v makromolekulu (polystyren, polyethylen, bakelit apod.)

1.3 Rozdělení podle tvaru polymerního řetězce

1.3.1 Lineární polymer

Monomery jsou jednotlivě seřazeny za sebou. Z prostorových důvodů se mohou lineární makromolekuly více přiblížit jedna ke druhé a vyplnit tak více prostoru.

1.3.2 Rozvětvený polymer

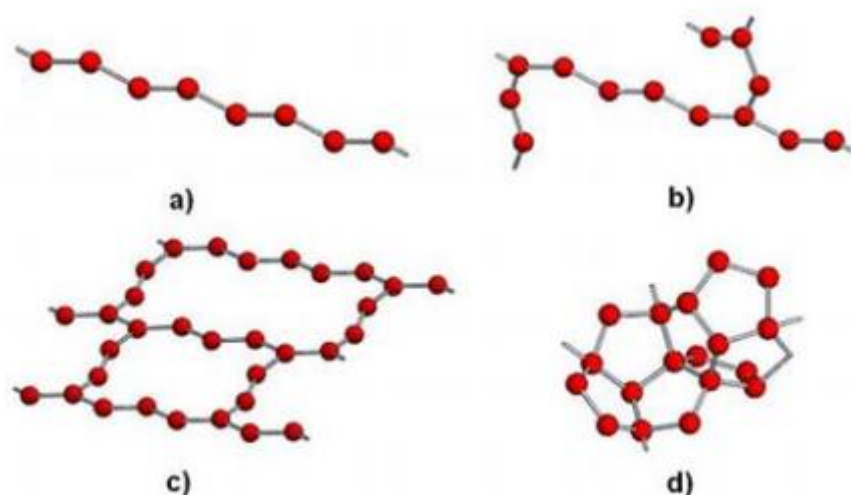
Vyznačuje se hlavním řetězcem, z něhož vystupují vedlejší větve. Makromolekuly se nemohou důsledkem vedlejších větví k sobě moc přiblížit. Za zhoršení mechanických vlastností mají za následek boční řetězce, které oddalují sousední makromolekuly a tím poklesnou mezimolekulární síly.

1.3.3 Zesíťovaný polymer

Vyznačuje se několika zesíťovanými, nebo rozvětvenými makromolekulárními řetězci, mezi sebou propojenými vazbami. Vytváří skoro nekonečnou makromolekulu. Tyto polymery mají nízkou odolnost proti rázu, ale naopak mají vysokou tvrdost, tuhost a odolávají při zvýšené teplotě. [1]

1.3.4 Prostorově zesíťovaný polymer

Trojrozměrné monomery, mají tři kovalentní vazby, které vytváří trojrozměrnou síť. Tyto polymery vynikají svými mechanickými vlastnostmi.



Obr. 3 Tvary polymerních řetězců: a) lineární polymer, b) rozvětvený polymer, c) zesíťovaný polymer, d) prostorově zesíťovaný polymer

1.4 Rozdělení podle technologie a podmínek zpracování

Pro zpracování polymerů se používá mnoho technologických postupů. Rozdělení těchto postupů je velmi složité vzhledem k jejich rozmanitosti a vzájemnému prolínání.

1.4.1 Tvářecí technologie

Ovlivňuje zásadním způsobem požadovaný tvar výchozího materiálu, částice se značně přemísťují. Mezi operace patří (vytlačování, válcování, vstřikování, lisování, laminování, odlévání atd.). Tváření probíhá nejčastěji při dvou vlivech a to jsou určitá teplota a tlak. Výsledkem může být polotovár (deska, trubka, vlákno), nebo výrobek (výstřížek, výlisek, odlitek).[3]

1.4.2 Tvarovací technologie

Výchozí je polotovár, hmota mění svůj tvar jen s malým přemísťováním částic. Můžeme použít zvýšenou teplotu, nebo tlak. Mezi operace patří (obrábění, tvarování desek, ohýbání trubek, vyfukování, lepení atd.)[3]

1.4.3 Doplnkové technologie

Úprava vlastní hmoty před zpracováním (tabletování, příprava granulátu, sušení hmoty, předehřev, příprava směsí polymerů s barvivy atd.)[3]

2 VYBRANÉ DRUHY POLYMERŮ

2.1 Makrolon 2207

Makrolon je obchodní značka pro strukturované polykarbonátové tabule. K výrobě je použit polykarbonátový granulát. Je to výrobek z polykarbonátu, který je známý svou odolností proti úderu, optickou průsvitností a značně sníženou hořlavostí. Díky těmto vlastnostem vyplývající z mnohostěnné struktury je tento polykarbonát ideálním materiálem pro prosklení bytových objektů a různých staveb. [4]

2.2 Slovamid 6 15%GF

Slovamid je obchodní značka pro polyamid 6 vyztužený 10%, nebo 15% skelných vláken. Používá se pro houževnaté a vysokopevnostní výrobky používané v automobilovém, elektrotechnickém a strojírenském průmyslu. Výrobky jsou držáky, těla a části elektrického nářadí, hobby nářadí, součástky převodovek, části ventilátorů a nosné části pro automobilový průmysl. Dodává se ve všech odstínech RAL, nebo čirý. [5]

2.3 San Tyril 905 UV

San Tyril je styren-akrylonitrilový kopolymer složený ze styrenu a akrylonitrilu. Je to plast o vynikající chemické odolnosti, pevnosti, tvrdosti a rozměrové stálosti, navíc dokonale čirý, vhodný pro nejrůznější oblasti použití, jako jsou předměty do domácnosti, spotřebiče, automobilové součásti, pouzdra akumulátorů a osvětlení. [6]

2.4 Calibre

Polykarbonát Calibre je amorfni konstrukční termoplastický materiál vyznačující se výbornými mechanickými, optickými, elektrickými a tepelnými vlastnostmi. Calibre se vyznačuje vynikající kombinací čirosti, tepelné odolnosti a rázové houževnatosti. Dodávají se i speciální typy, kde se klade důraz vždy na určité parametry, jako je barva, odolnost vůči vznícení, stabilita vůči UV záření nebo snadnější uvolňování z formy. Výrobky jsou optické a sluneční brýle, optická média (CD, DVD), láhve na vodu, součásti zdravotního vybavení, mobilní telefony, kryty elektronických zařízení, elektrické spotřebiče a osvětlení. [7]

3 ZKOUŠKY TVRDOSTI

Materiály jsou při používání, ale i při zpracování vystaveny mnoha namáhání jako tlak, tah, střih, krut a ohyb. Tato namáhání většinou nepůsobí samostatně, ale kombinovaně, takže materiál je vystaven různému namáhání. Materiál musí mít vlastnosti jako pevnost, pružnost, tvárnost, tvrdost aj.)

Zkoušky se většinou neprovádí na součástech samostatně, ale na jejich zkušebních tělesech. Mohou být zhotoveny buď přímo ze součástí, nebo z materiálů součástí. Zkoušky tvrdosti polymerů

Tvrdost je mechanická vlastnost, která má mimořádnou důležitost. Tato vlastnost vyniká tím, že se dá zjistit nejrychleji, nejlevněji a to i na předmětech malých rozměrů, či přímo na výrobku. Tvrdost se dá definovat jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa.

3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Pro měření tvrdosti tuhých polymerů, byla upravena zkouška tvrdosti podle Brinella, používaná u kovů. Byly zvětšeny průměry měřících kuliček a snížena síla při jejich vtláčování. Povrch musí být hladký, rovný a zbaven nečistot. Metoda není vhodná pro měkké materiály, ale pro měření tuhých polymerních materiálů.[8]

3.1.1 Podstata metody

Provádí se vtláčováním vnikacího tělesa do povrchu zkušebního tělesa. Následně se provede změření vtisku po odlehčení zkušebního zařízení. Zatížení je při zkoušce konstantní, mění se jen hloubka vtisku, která se odečte pomocí výškového indikátoru.[9]

Vztah pro výpočet tvrdosti HB při odečítání průměru vtisku d :

$$H_{B=} = \frac{2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

HB je hodnota tvrdosti podle Brinella

F je zatěžující síla, kterou je kulička vtláčována do zkušebního tělesa [N]

D je průměr zkušební kuličky [mm]

d je kulová výseč kuličky vniklá do zkušebního tělesa (materiálu) [mm]

π je Ludolfovo číslo

Vztah pro výpočet tvrdosti HB podle hloubky důlku:

$$H_B = \frac{F}{A_s} = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot h} \quad (2)$$

F je zatěžující síla, kterou je kulička vtlačována do zkušební tělesa [N]

D je průměr zkušební kuličky [mm]

A_s je plocha vytlačeného důlku [mm²]

h je hloubka vtisku [mm]

3.1.2 Zkušební tělesa a zařízení

Minimální tloušťka zkušební tělesa je 4 mm a šířka je 15 mm. Měření probíhá vždy minimálně na 5 zkušebních tělesech a hodnoty se odečítají po 10, 30, nebo 60 sekundách. Obecně platí, že zkušební tělesa by neměli svými rozměry a okrajovými defekty jako je tvrdost podložky, nebo výška vzorku záporně ovlivnit výsledek. Kuličky jsou vyrobené z leštěné nerezové oceli. Pro lamináty a bakelity je průměr kuličky 3 mm. Pro většinu plastomerů je průměr kuličky 5 mm a pro měkké PVC je průměr kuličky 10 mm. Zkušební zatížení se používá 132, 358, nebo 961 N v závislosti na tvrdosti zkoušeného lu.[8,10]

3.1.3 Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Brinella

Hodnota tvrdosti	Symbol zkoušky	Rozměr vnikacího tělesa	Velikost zkušebního zatížení	Doba působení zkušebního zatížení
$\frac{\perp}{XXX}$	$\frac{\perp}{HB}$	$\frac{\perp}{XX}$	$\frac{\perp}{XXX}$	$\frac{\perp}{XX}$

Obr. 4 Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Brinella[9]

Příklad: 350 HB 5/358/30 – tvrdost podle Brinella 350, stanovenou kuličkou o průměru 5mm, při zkušebním zatížení 358 N působícím po dobu 30 s.[9]



Obr. 5 Tvrdoměr Brinell typu NEXUS 3001 XLM - IMP[11]

3.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Metoda měření tvrdosti pochází z USA a tam je taky nejvíce rozšířena. Zkouška se provádí postupným (dva stupně zatížení), vtlačováním vnikacího tělesa do povrchu zkušebního tělesa a změření hloubky vtisku h . Vnikacím tělesem je diamantový kužel, nebo kulička definovaného průměru. Tato zkouška je rychlá, snadná a vtisky jsou malé.

3.2.1 Podstata metody

Kulička, nebo diamantový kužel, který se dotýká povrchu zkoušeného tělesa zatížíme předběžnou silou F_0 , poté pomalu zvyšujeme sílu o přídatné zatížení F_1 , až dojde k celkovému zatížení F předepsané normou. Poté přídatné zatížení F_1 opět odlehčujeme na předběžnou sílu F_0 a zjistíme hloubku vtisku h . Základní stupnice tvrdosti jsou A, B, C, D, E, F, G, H, K. [12]

Tvrdot podle Rockwella pro stupnici A a C se vypočítá:

$$HR = 100 - \frac{h}{S} \quad (3)$$

HR je hodnota tvrdosti podle Rockwella

H je hloubka vtisku [mm]

S je jednotková stupnice, jeden dílek na stupnici [mm]

Tvrdot podle Rockwella pro stupnici B se vypočítá:

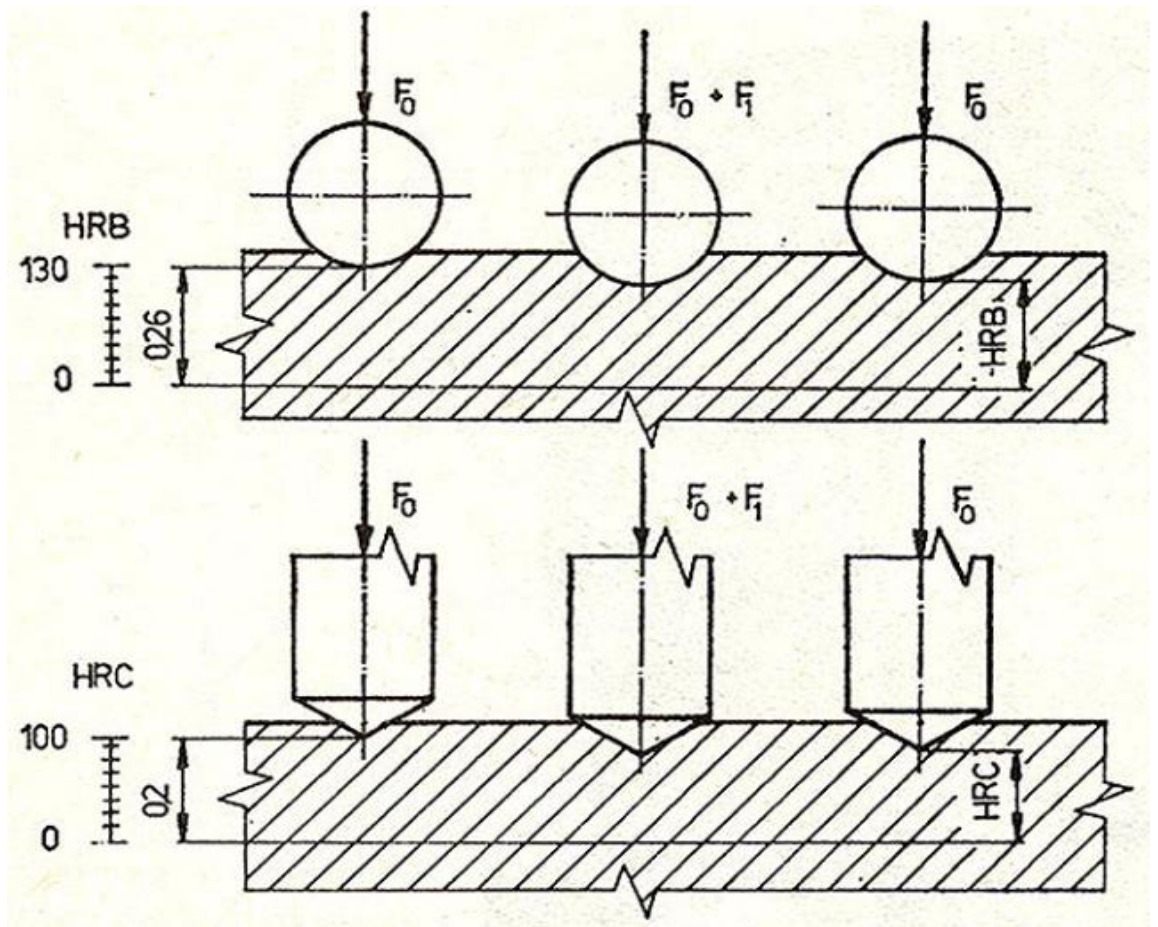
$$HR = 130 - \frac{h}{S} \quad (4)$$

HR je hodnota tvrdosti podle Rockwella

H je hloubka vtisku [mm]

S je jednotková stupnice, jeden dílek na stupnici [mm]

Příklad: 60 HRB - tvrdosti podle Rockwella 60 na stupnici B.



Obr. 6 Průběh Rockwellovy zkoušky tvrdosti [13]



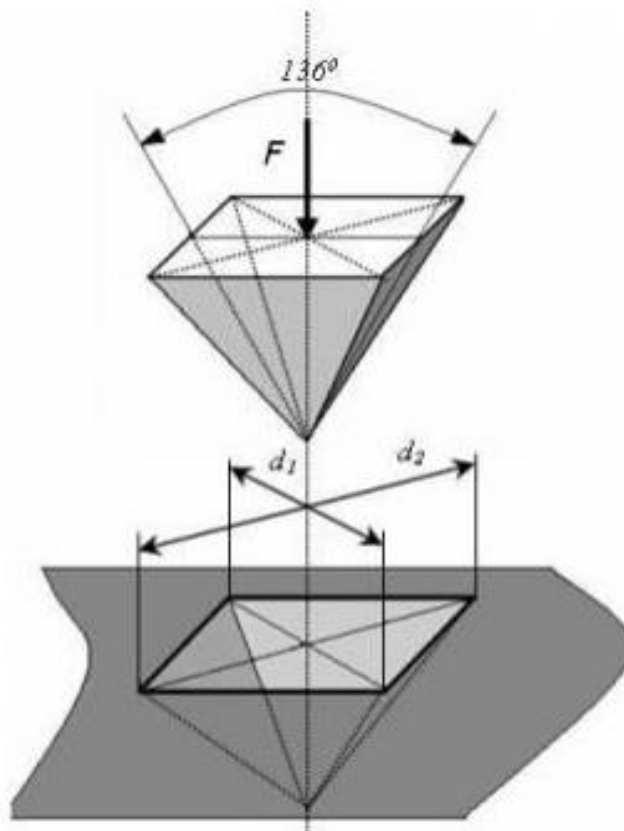
Obr. 7 Tvrdoměr Rockwell typu VERZUS 700 RS/RSB[14]

3.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Metoda měření tvrdosti je velmi přesná a minimálně závislá na zatížení. Tato zkouška měření tvrdosti je nejvíce rozšířená v Evropě. Hodnoty tvrdosti podle HV nelze převést na pevnost v tahu, nebo na jiné tvrdosti. Přepočty lze použít, jen v případě, že máme spolehlivé podklady.

3.3.1 Podstata metody

Diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° vtlačujeme se zkušebním zatížením F do zkušebního tělesa po dobu 10 až 15 s. Pro některé materiály se používá i delší doby, ale musí být vyznačena v označení tvrdosti. Po provedení vtisku určitou konstantní silou se měří úhlopříčka stopy. Výhodou metody je, že při použití různých zatížení se nemění hodnoty tvrdosti. Úhlopříčka se proměří pomocí mikroskopu. Velikost zkušebního zatížení je od 10 N až do 1000 N. Teplota při zkoušce by měla být v rozmezí 10 až 35 $^\circ\text{C}$. [8]



Obr. 8 Podstata metody měření tvrdosti metodou Vickers 15

Vztah pro výpočet tvrdosti:

$$HV = \frac{1}{g} \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \frac{\sin \alpha}{2}}{d^2} \quad (5)$$

HV je hodnota tvrdosti dle Vickerse

F je zatěžující síla [N]

d je aritmetický průměr délek obou změřených úhlopříček [mm]

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (6)$$

d_1 je délka jedné úhlopříčky [mm]

d_2 je délka jedné úhlopříčky [mm]

g je tíhové zrychlení $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

α je vrcholový úhel jehlanu 136°

3.3.2 Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Vickerse

Hodnota tvrdosti	Symbol zkoušky	Velikost zkušebního zatížení	Doba působení zkušebního zatížení
$\frac{\perp}{XXX}$	$\frac{\perp}{HV}$	$\frac{\perp}{XXX}$	$\frac{\perp}{XX}$

Obr. 9 Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Vickerse 9

Příklad: 640 HV – tvrdost podle Vickerse 640 určena při zkušebním zatížením 294,2 N, působícím po dobu od 10 do 15 s.



Obr. 10 Tvrdoměr pro zkoušku tvrdosti dle VICKERS 16

3.4 Zkouška tvrdosti podle Shoreho

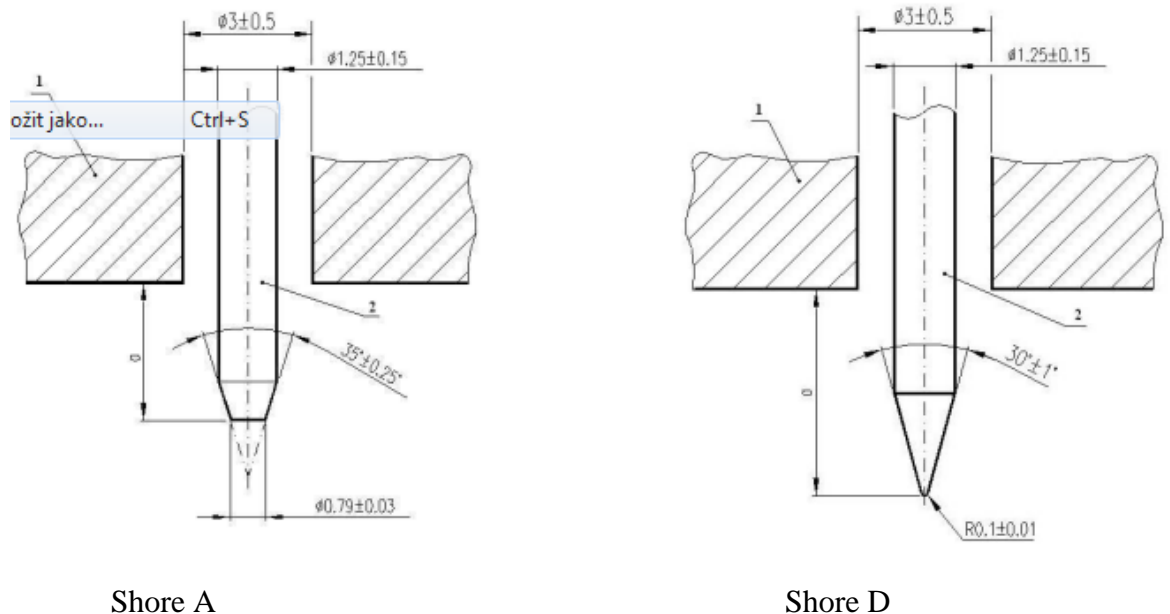
Tato metoda měření tvrdosti plastů se používá pro měkčí plasty a pryže. Patří do skupiny odrazových metod. Používá se dvou druhů tvrdoměrů. Tvrdoměr typu A, který se používá pro měkčí materiály a pryže a tvrdoměr typu D, který se používá pro tvrdší materiály.

3.4.1 Podstata metody

Zkouška spočívá ve vtlačování hrotů různých tvarů do zkušebního tělesa za přesně stanovených podmínek. Hloubka vtisku hrotu je nepřímo úměrná hodnotě tvrdosti. Typické pro tyto tvrdoměry je zatěžování pomocí pružin.[9]

3.4.2 Tvrdoměry Shore

Pro měření tvrdosti se používá tvrdoměr typu A a D. Pro vyvození vnikací síly se používá u obou druhů zkušebních zařízení pružiny. Tyto pružiny musí být pravidelně kalibrovány.[17]



Shore A

Shore D

Obr. 11 Tvrdoměr Shore typu A a D 17

1 je opěrná patka

2 je ukazatel délky pružiny

Zkušební hrot je vyroben z kalené oceli. Pro odečet vysunutí délky zkušebního hrotu slouží ukazatel, který je opatřen stupnicí ze kterého se odčítá délka v jednotkách 0 až 100. Vyvozená síla hrotu tvrdoměru A se vypočte:

$$F_A = 550 + 750H_A \quad (7)$$

H_A je hodnota tvrdosti pro Shore A

F_A je vlačovací síla pro Shore A[N]

Vyvozená síla hrotu tvrdoměru D se vypočte:

$$F_D = 455H_D \quad (8)$$

H_D je hodnota tvrdosti pro Shore D

F_D je vlačovací síla pro Shore D[N]

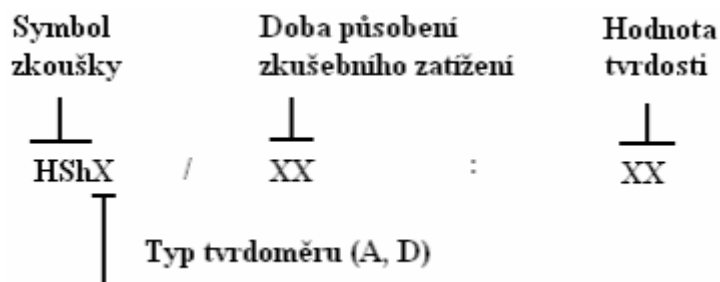
3.4.3 Provedení zkoušky tvrdosti metodou Shore A

Tvrdoměr se přiloží na zkušební těleso minimálně 12 mm od okraje, tak aby patka pevně přisedla po celé ploše. Minimální tloušťka zkušebního tělesa je minimálně 6 mm. Tvrdost se odečítá za 3 sekundy od okamžiku dotyku. Pokud se mění hodnota na stupnici, tak se odečte tvrdost až za 15 sekund. Výsledná hodnota tvrdosti je aritmetický průměr nejméně tří měření. [8]

3.4.4 Provedení zkoušky tvrdosti metodou Shore D

Postupuje se obdobně jako u Shore A. Zkušební tělesa mají mít minimální tloušťku 6 mm. Měření se opět provádí minimálně 12 mm od okraje. Hodnota tvrdosti se odečítá za 15 sekund po přiložení tvrdoměru. Výsledkem zkoušky je průměr z minimálně pěti měření. [8]

Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Shoreho:



Obr. 12 Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Shoreho 9

Příklad: HShD/1560 - tvrdost podle Shoreho 60, měřená tvrdoměrem typu D, po dobu 15 s.



Obr. 13 Digitální tvrdoměr Shore typu HPE [18]

3.5 Zkouška tvrdosti IRHD

Tato metoda měření se používá pro rychlé měření tvrdosti pryže. Zkouška je oproti metodě Shore jednoduchá. Opět se používá kuličky, která vniká do povrchu. IRHD vychází z anglického názvu International Rubber Hardness Degree, což v překladu znamená Mezinárodní stupeň tvrdosti pryže.[8]

3.5.1 Podstata metody

Zkouška se provádí měřením vtlačení kuličky měřicího zařízení určitou silou na pryžovém vzorku. Hloubka vtlačení závisí na zatížení, které je způsobeno závažím. Provedení tvrdoměru je takové, aby výsledky měření, byli co nejvíce shodné s tvrdostním rozsahem Shore A. Měřicí rozsah je 28,5 – 100 IRHD. Při stanovení tvrdosti se zkušební těleso na 5 s zatíží tyčinkou s měřicí kuličkou, která váží 30 g a potom se nechá 30 s působit celkové zatížení.[17]

3.5.2 Standartní metody provedení zkoušky

Metoda N: Normální zkouška, metoda se používá pro měření tvrdosti v rozsahu 35 IRHD až 85 IRHD.

Metoda H: Zkouška pro vysoké tvrdosti, metoda se používá měření tvrdosti v rozsahu 85 IRHD až 100 IRHD.

Metoda L: Zkouška pro nízké tvrdosti, metoda se používá pro měření tvrdosti v rozsahu 10 IRHD až 35 IRHD.

Metoda M: Mikrozkouška, metoda je zmenšenou zkouškou metody N, umožňuje zkoušet tenké a malé zkušební tělesa. Měřená tvrdost je rozsahu 35 IRHD až 85 IRHD. Při různých povrchových nerovnostech např. vzniklé broušením zkouška neposkytuje vždy přesné výsledky jako výsledky získané ostatními metodami.[17]

3.5.3 Metody měření zdánlivé tvrdosti

Tyto metody jsou vhodné pro zakřivené povrchy a všechny různé tvary zakřiveného tělesa, velmi často to jsou „O“ kroužky. Dělíme je na CN, CH, CL, CM a jsou obdobou metod N, H, L a M.[17]

3.5.4 Zápis hodnoty tvrdosti

Po měření se hodnota zaokrouhlí na nejbližší celé číslo v mezinárodní stupnici tvrdosti pryže a označí se symbolem °. [17]

Příklad: 90°, H – střední hodnota 90, měření proběhlo na tělese standartních rozměrů metodou H pro vysoké tvrdosti

4 ZKOUŠKA TAHEM

Materiály jsou při používání, ale i při zpracování vystaveny mnoha namáhání jako tlak, tah, stříh, krut a ohyb. Tato namáhání většinou nepůsobí samostatně, ale kombinovaně, takže materiál je vystaven různému namáhání. Materiál musí mít vlastnosti jako pevnost, pružnost, tvárnost, tvrdost aj.)

Nejrozšířenější statická zkouška. Je potřebná téměř u všech konstrukčních materiálů. Zkouška se neprovádí přímo na součásti, ale na zkušební tyči, jejíž rozměr a tvar je normalizovaný dle ČSN EN ISO 527. Důležitá je volba rychlosti deformace. Musí se zvolit tak, aby k přetržení došlo řádově v sekundách až desítkách sekund.



Obr. 14 Okamžik před přetržením a po přetržení zkušební vzorku

4.1 Podstata metody

Zjišťuje se pevnost v tahu, poměrné prodloužení, tažnost a kontrakce. Zkušební vzorky jsou upnuty v čelistech a síla pomalu roste. Zatěžuje se ve zkušebním stroji, který může být opatřen teplotní komorou. Cílem zkoušky je stanovit závislost mezi zatěžující silou F_m a deformací, tedy prodloužení zkušební vzorku. Pevnost v tahu R_m je smluvní hodnota napětí daného podílem největší zatěžující síly F_m , kterou vydrží zkušební tyč a počáteční průřez zkušební tyče S_0 . [8]



Obr. 15 Zařízení pro tahovou zkoušku s teplotní komorou

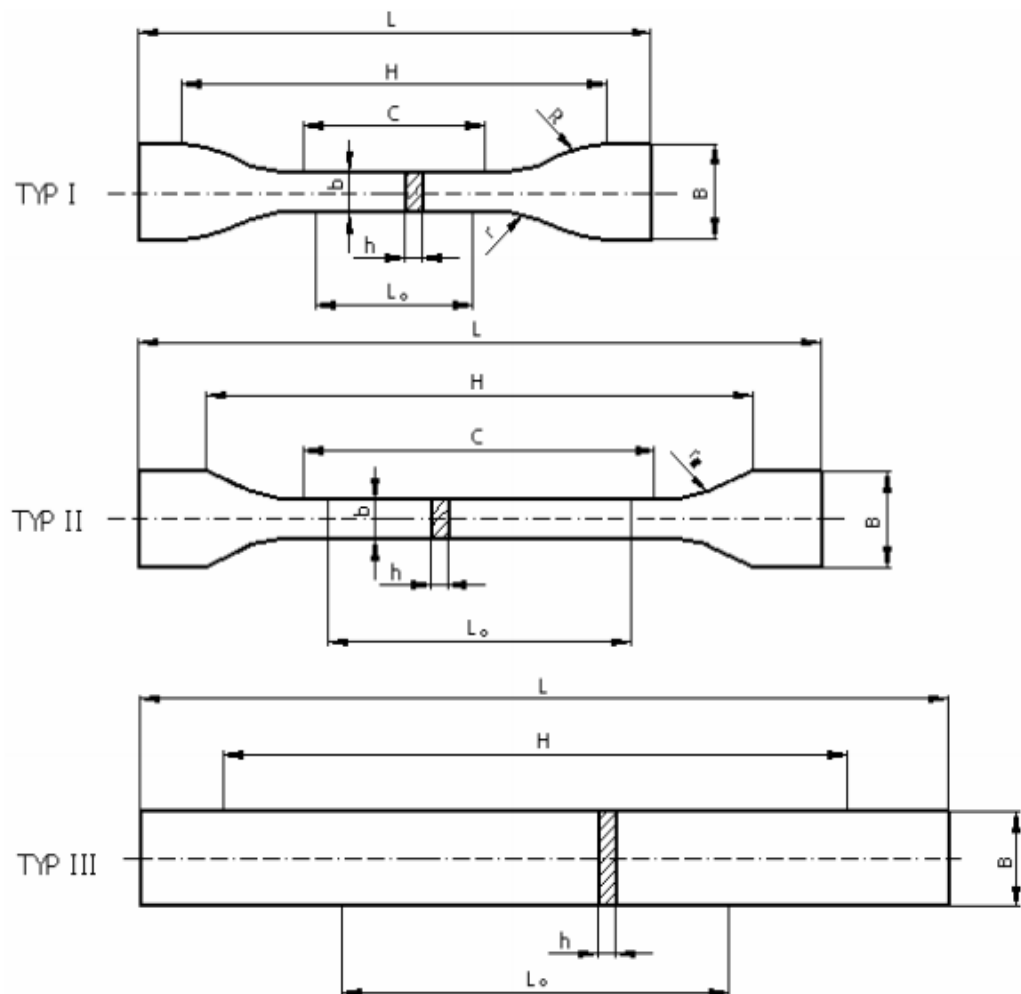
4.2 Zkušební tělesa

Zkušební vzorky jsou buď připraveny přímo ze zkoušené suroviny, nebo mohou být vyříznutá přímo z materiálu. Jsou ve tvaru tyčinek, destiček, kroužků, válečků apod.

U tahové zkoušky se používá dvou typů zkušebních vzorků ve tvaru kroužků, nebo oboustranné lopatky.

Tab. 1 Rozměry vzorků u tahové zkoušky polymerů

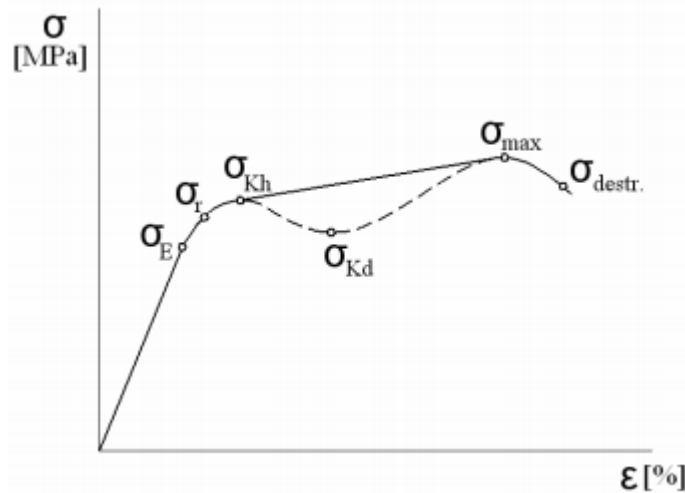
Rozměry [mm]	Typ zkušebního tělesa		
	typ I	typ II	typ III
celková délka L	75	150	250
šířka upínací hlavy B	12,5±1,0	20,0±0,5	25,0±0,5
délka pracovní části C	25±1	80,0±0,5	/
šířka pracovní části b	4±1	10,0±0,5	/
malý poloměr zakřivení r	8,0±0,5	/	/
velký poloměr zakřivení R	12,5±1,0	/	/
počáteční měřená délka L₀	20,0±0,5	50,0±0,5	50±1
vzdálenost mezi značkami H	50±2	110±5	170±5
poloměr zakřivení r₁	/	20-25	/
tloušťka h	4,0±0,2	4,0±0,2	4,0±0,2



Obr. 16 Tvary zkušebních vzorků pro zkoušku tahem[19]

4.1 Tahová křivka

Tuhé polymery většinou vykazují již od začátku nelineární průběh deformace. Pokud je zakřivení malé, tak se počítá se zdánlivě lineárním průběhem a graficky se vyhodnotí zdánlivý modul pružnosti. Obecná tahová křivka polymeru, která je vyobrazena na obr.17 se vyznačují všechny napěťové a deformační meze.



Obr. 17 Tahová křivka polymerů[8]

Mez úměrnosti σ_E vyjadřuje konec hookovského chování a vyznačuje se smluvním napětím:

$$\sigma_E = \frac{F_E}{A_0} [MPa] \quad (9)$$

V dalším průběhu křivky vzniká zakřivení, jenž zahrnuje časově závislou elastickou a plastickou deformaci. Bod na křivce do kterého je ještě tato deformace vratná se nazývá mez pružnosti σ_R :

$$\sigma_R = \frac{F_R}{A_0} [MPa] \quad (10)$$

Při zvětšení napětí nad mez úměrnosti hodnota modulu pružnosti klesá. Napětí se zvětšuje pomalu a rychlost deformace pomalu stoupá. V tomto úseku vzniká nevratná plastická deformace. Modul pružnosti je již nulový. Tento stav se nazývá mez kluzu σ_K . Ukáže-li se na křivce snížené napětí, tak se jedná o horní mez kluzu σ_{Kh} , kdežto na pokračující křivce za minimálním napětí je dolní mez kluzu σ_{Kd} . Meze kluzu se vyjadřují smluvním napětím:

$$\sigma_K = \frac{F_K}{A_0} [MPa] \quad (11)$$

$$\sigma_{Kh} = \frac{F_{Kh}}{A_0} [MPa] \quad (12)$$

$$\sigma_R = \frac{F_{Kd}}{A_0} [MPa] \quad (13)$$

Mez pevnosti v tahu, je napětí potřebné k přetržení, vztažené na původní průřez. Při výpočtu se dosazuje maximální hodnota F_{MAX} , ale k destrukci dojde až při nižším napětím.

$$\sigma = \frac{F_{MAX}}{A_0} [MPa] \quad (14)$$

Deformační veličiny získané z tahové zkoušky jsou tažnost A, což je trvalé poměrné prodloužení po přetržení.

$$A = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (15)$$

Další získanou veličinou je kontrakce Z, což je trvalé poměrné zúžení zkušebního vzorku po přetržení v místě lomu.

$$Z = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100 [\%] \quad (16)$$

5 RÁZOVÁ ZKOUŠKA V OHYBU

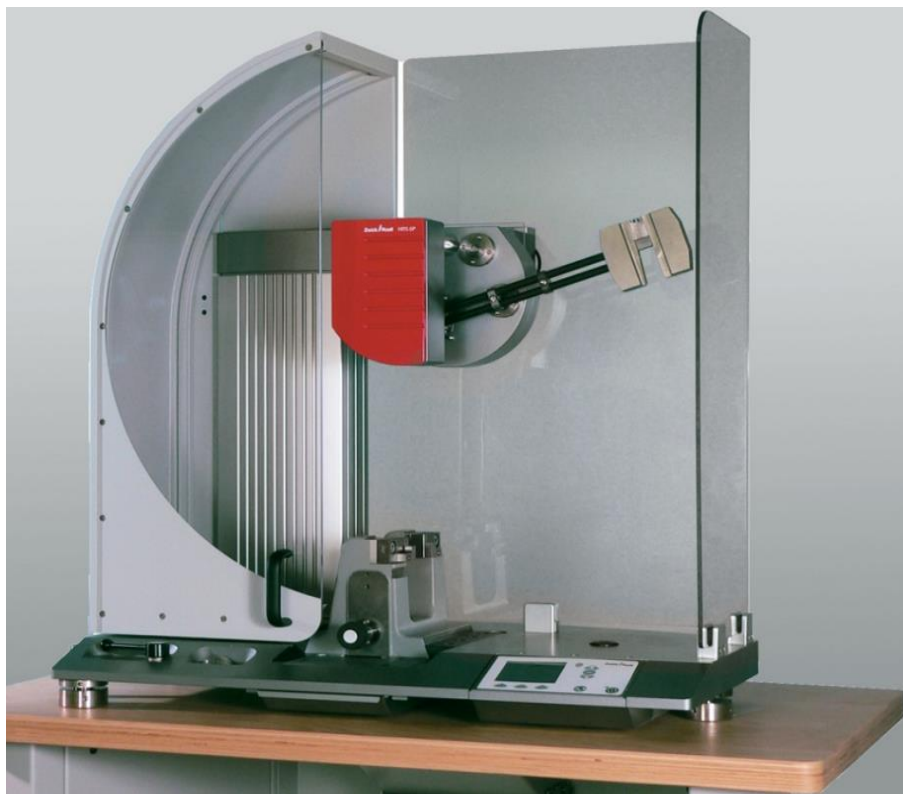
Vrubová houževnatost je definovaná, jako poměr spotřebované práce k přeražení zkušebního tělesa zeslabené vrubem k ploše zeslabeného průřezu. Materiál se opatří jedním, nebo více vruby. Touto úpravou zkušebního tělesa dochází ke zvýšení koncentrace napětí okolo vrubu. Nejvíce citlivé na vrub jsou plasty ve sklovitém tvaru. Zkoušky se provádí dle normy ČSN EN ISO 179.[19]

5.1 Metoda Charpy

Zkušební těleso se umístí tak, aby byl na dvou podpěrách a vrub byl v tahové oblasti (na opačné straně tělesa), kde je provedena rázová deformace. Poté se uprostřed přerazí otáčivým kladivem. Na vrubovou deformaci má podstatný vliv tvar a hloubka vrubu. [8]

Vrubovou houževnatost metodou Charpy vypočteme:

$$A_K = \frac{W}{b \cdot h_K} [kJ \cdot m^{-2}] \quad (17)$$



Obr. 18 Charpyho kladivo [22]

5.2 Metoda Izod

Zkouška se liší od metody Charpy způsobem přeražení zkušebního tělesa, které se na jedné straně upne a na druhé přerazí. Tělesa opatřená vrubem se uchycují pevně a přerazí se ze stejné strany jako mají vrub. Nevýhoda spočívá vtom, že po přeražení kladivem brání uražená polovina zkušebního vzorku v další cestě a část energie se spotřebuje na jeho odmrštění.[8]

5.3 Metoda Dynstat

Při této zkoušce se dají měnit kladiva s energií 0,49; 0.98; 1.96; a 3.92 Nm. Metoda je produktivní, protože zkušební vzorky spotřebují málo hmoty a lze je vyrobit z destiček, nebo přímo z výrobků vyříznutím předepsaného tvaru. [8]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

6.1 Cíl práce

Cílem bakalářské práce bylo porovnání fyzikálních vlastností u vybraných typů polymerních materiálů PC (Makrolon 2207), PA (Slovamid 6 15% GF), SAN (San Tyril 905 UV) a PC (Calibre). Materiály byly testovány tahovou zkouškou, rázovou zkouškou v ohybu a zkouškou tvrdosti. Každý soubor měření obsahoval vždy 15 měření. Výsledky měření byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Cílem bakalářské práce bylo:

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

7 EXPERIMENT

7.1 Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420 C

Tento německý vstřikovací stroj slouží pro běžně vstřikování plastů, ale i pro více komponentní vstřikování. K řízení slouží moderní 32 bitový multiprocesorový řídicí systém SELOGICA. Toto ovládání umožňuje použití stejného ovládacího rozhraní pro různé konstrukční řady. Jednoduché programování procesů pracovního cyklu stroje prostřednictvím symbolů na výklopné obrazovce umožňuje dosažení krátkých časů při seřizování. Přímá kontrola správnosti všech zvolených dat zajišťuje vysoký komfort. Vstřikovací výkon, jde podle potřeby navýšit hydraulickým akumulátorem. Celý stroj má dobrou přístupnost, což zvyšuje efektivitu práce.[20]



Obr. 19 Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420 C[20]

7.2 Sušička ARBURG THERMOLIFT 100 – 2

Před samotným vstřikováním se musí granulát sušit v sušičce THERMOLIFT z důvodů odstranění vlhkosti polymerního granulátu. Toto zařízení je kompaktní spojovací sušení i dopravu plastového granulátu. Suší se proudícím vzduchem a optimálně se reguluje sušení materiálu pomocí čerstvého i cirkulujícího vzduch. Zařízení je vybaveno řídicím

systemem SELOGICA. Ovládání je jednoduché pomocí panelu se symboly. Sušička je mobilní na kolečkách, a proto lze libovolně přesouvat ke strojům.[21]



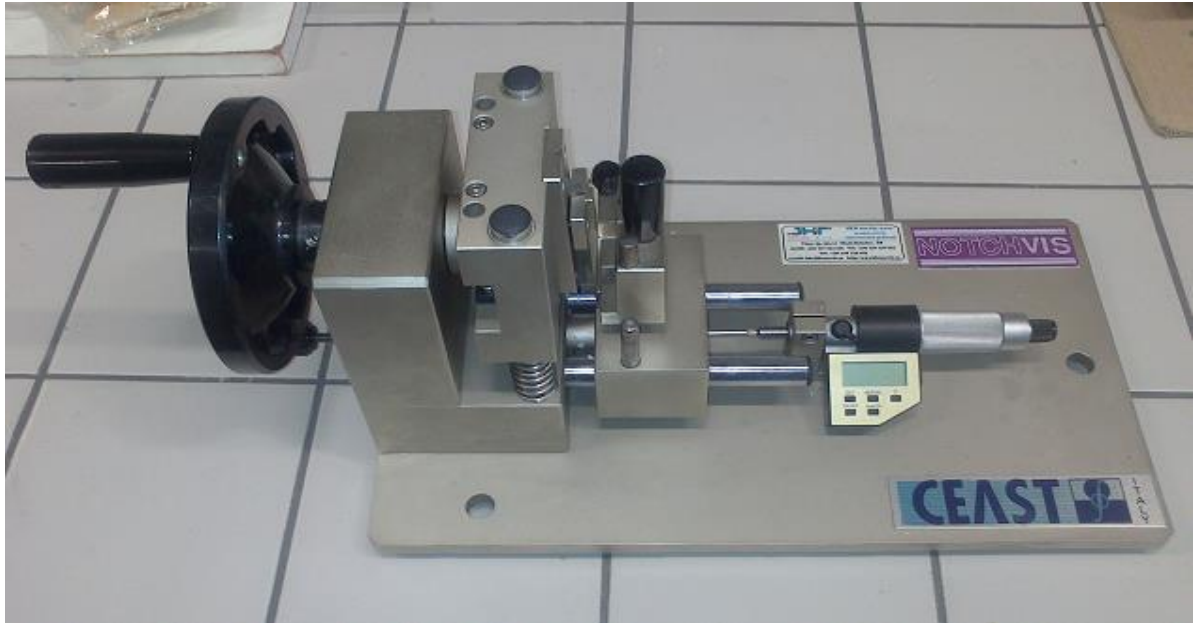
Obr. 20 Ovládací pane sušičky [21]



Obr. 21 Sušička ARBURG THERMOLIFT 100 - 2 [21]

7.3 Vrubovačka CEAST s mikrometrem

Toto zařízení slouží pro přípravu zkušebních vzorků normalizovaných tvarů vrubů – V dle ISO 179 a ISO 180 – typ A, B, C a U. Obsluha vrubovačky je manuální. Zkušební vzorek se položí a dorazí do pracovního prostoru. Poté se začne jednou rukou otáčet ruční pohon a druhou rukou se pomalu otáčí mikrometr, až se zlehka nůž dotkne vzorku. Mikrometr se vynuluje a může se začít tvořit vrub o určitém tvaru a hloubce. Hloubku vrubu jsem volil 2 mm.



Obr. 22 Vrubovačka CEAST s mikrometrem

7.4 Stroj pro tahovou zkoušku ZWICK Roell 1456

Tento německý stroj je vhodný pro zkoušení ve více oblastech a to především pro tlakové, tahové, ale i ohybové zkoušky. Je vybaven softwarem od společnosti Zwick, který představuje novou generaci softwaru pro zkoušení materiálu. Zařízení lze obsluhovat pomocí běžného počítače, či notebooku. Standartní programové vybavení obsahuje již přes 600 norem. Zkoušet se může za zvýšené i normální teploty. Flexibilní montážní systém dovoluje snadnou výměnu upínacích čelistí a zkušebních vzorků. Maximální zkušební síla je 20 kN a maximální rychlost posuvu příčnicku je $750 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Celková šířka pracovního prostoru činí 420 mm.



Obr. 23 Stroj pro tahovou zkoušku ZWICK Roell 1456

7.5 Charpyho kladivo ZWICK Roell HT50J

Slouží k provádění jednorázových dynamických zkoušek. Rázové kladivo o energii 50 J již automaticky rozpozná používané kyvadlo. Kyvadlo je vyrobeno z dvojité karbonové tyče, čímž je dosaženo vysoké pevnosti ve směru rázu a velké koncentrace hmoty v místě úderu. Vzorek se umístí do pracovní části, přesně ve středu vrubu. Poté se zavře bezpečnostní kryt a v programu se nastaví příslušné parametry. Digitální snímač s velkým rozlišením přesně změří úhel kyvu. Pro zvýšení bezpečnosti se zařízení spouští oběma rukama, aby nedošlo ke zranění. K zastavení kyvadla se použije volitelná kotoučová brzda, která pracuje téměř bez opotřebení. [22]



Obr. 24 Charpyho kladivo ZWICK HT50J [22]

7.6 Tvrdoměr OMAG Affri ART 13

Univerzální tvrdoměr, na kterém byla provedena zkouška tvrdosti ShoreD.



Obr. 25 Tvrdoměr OMAG Affri ART 13

7.7 Hodnoty vstřikování

Tabulky ukazují konečné nastavení vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420 C pro různé konstrukční polymery.

7.7.1 Polykarbonát Makrolon 2207

Tab. 2 Hodnoty vstřikování pro Makrolon 2207

Parametr	Hodnota	Jednotky
teplota formy	90	°C
dávka	25	cm ³
vstřikovací tlak	600	bar
dotlak	400	bar
celkový čas dotlaku	10	s
rychlost vstřikování	50	mm/s
dráha přepnutí	15	mm
čas chlazení	30	s
Teplotní rozhraní pásem plastikační jednotky		Jednotky
teplota pod násypkou	40	°C
2. teplotní pásmo	260	°C
3. teplotní pásmo	270	°C
4. teplotní pásmo	275	°C
5. teplotní pásmo	280	°C
teplota trysky	280	°C

7.7.2 Polyamid Slovamid 6 15%GF

Tab. 3 Hodnoty vstřikování pro Slovamid 6 15% GF

Parametr	Hodnota	Jednotky
teplota formy	60	°C
dávka	25	cm ³
vstřikovací tlak	600	bar
dotlak	400	bar
celkový čas dotlaku	10	s
rychlost vstřikování	50	mm/s
dráha přeprnutí	15	mm
čas chlazení	30	s
Teplotní rozhraní pásem plastikační jednotky		Jednotky
teplota pod násypkou	40	°C
2. teplotní pásmo	225	°C
3. teplotní pásmo	230	°C
4. teplotní pásmo	240	°C
5. teplotní pásmo	240	°C
teplota trysky	245	°C

7.7.3 San Tyril 905 UV

Tab. 4 Hodnoty vstřikování pro San Tyril 905 UV

Parametr	Hodnota	Jednotky
teplota formy	50	°C
dávka	25	cm ³
vstřikovací tlak	600	bar
dotlak	400	bar
celkový čas dotlaku	10	s
rychlost vstřikování	50	mm/s
dráha přeprnutí	15	mm
čas chlazení	30	s
Teplotní rozhraní pásem plastikační jednotky		Jednotky
teplota pod násypkou	40	°C
2. teplotní pásmo	260	°C
3. teplotní pásmo	270	°C
4. teplotní pásmo	275	°C
5. teplotní pásmo	280	°C
teplota trysky	280	°C

7.7.4 Calibre

Tab. 5 Hodnoty vstřikování pro Calibre

Parametr	Hodnota	Jednotky
teplota formy	90	°C
dávka	25	cm ³
vstřikovací tlak	600	bar
dotlak	400	bar
celkový čas dotlaku	10	s
rychlost vstřikování	50	mm/s
dráha přeprnutí	15	mm
čas chlazení	30	s
Teplotní rozhraní pásem plastikační jednotky		Jednotky
teplota pod násypkou	40	°C
2. teplotní pásmo	260	°C
3. teplotní pásmo	270	°C
4. teplotní pásmo	275	°C
5. teplotní pásmo	280	°C
teplota trysky	280	°C



Obr. 26 Plastový granulát připravený ke zpracování [23]

8 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

8.1 Vyhodnocení výsledků

Naměřené hodnoty byly statisticky vyhodnoceny a graficky zpracovány. Byly použity statické vztahy vyhodnocování.

8.1.1 Odhad aritmetického průměru

Pro odhad teoretické skutečné střední hodnoty základního souboru používáme aritmetický průměr \bar{x} , který lze empiricky vypočítat pro výběrový soubor, s použitím konečného počtu n jedinců náhodně vybraných ze základního souboru. Aritmetický průměr nemusí být skutečně se vyskytující obměnou dané proměnné. [24]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (19)$$

\bar{x} je odhad aritmetického průměru

n je počet měření

x_i je hodnota měřené veličiny

8.1.2 Odhad směrodatné odchylky

Směrodatná odchylka, podobně jako rozptyl, určuje jako moc jsou hodnoty rozptýleny či odchýleny od průměru hodnot.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (20)$$

s je odhad směrodatné odchylky

\bar{x} je odhad aritmetického průměru

n je počet měření

x_i je hodnota měřené veličiny

8.1.3 Střední kvadratická chyba aritmetického průměru

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (21)$$

u_a je střední kvadratická chyba aritmetického průměru

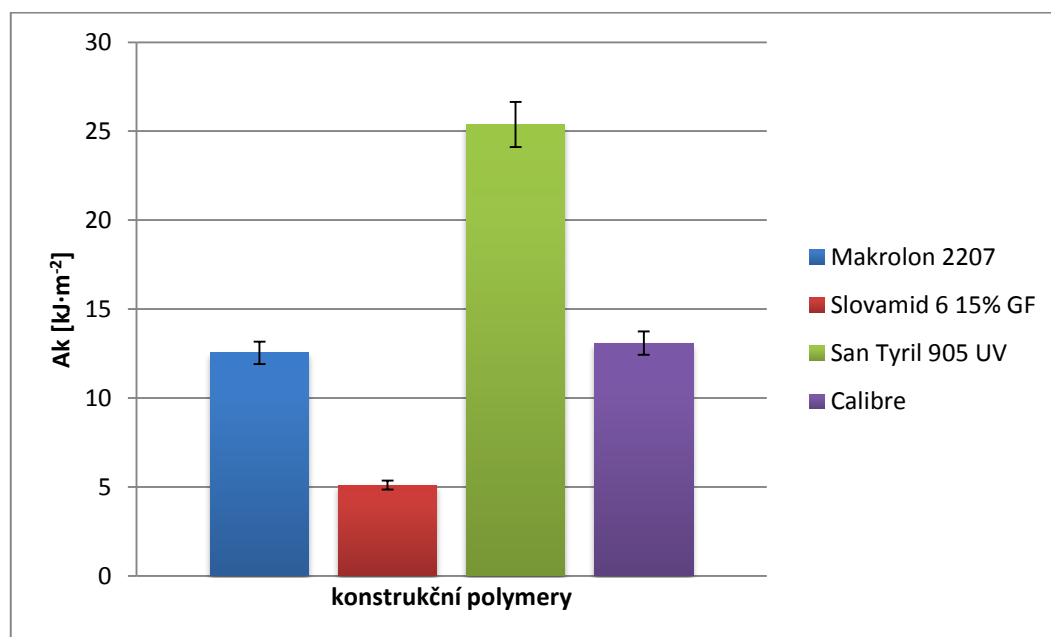
\bar{x} je odhad aritmetického průměru

n je počet měření

x_i je hodnota měřené veličiny

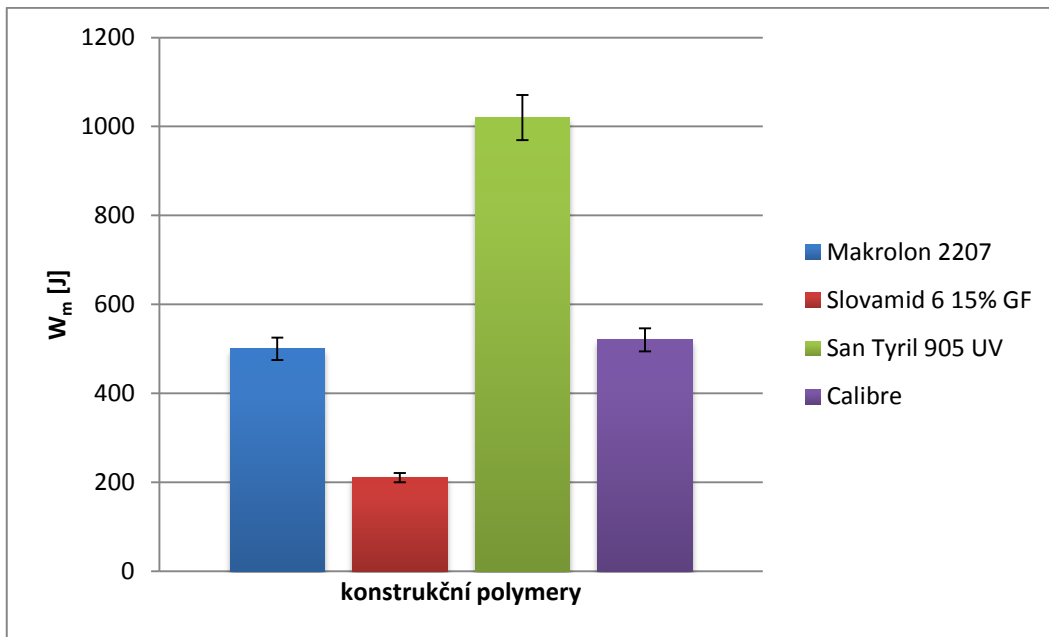
8.2 Rázová zkouška v ohybu

Zkušební tělesa v podobě tyčinek se opatřily vrubem ve tvaru V. Tloušťka zkušebních těles v místě vrubu byla 4 mm a šířka 10 mm. Zkouška se provedla na zkušebním stroji ZWICK Roell HT50J. Rázové kladivo mělo energii 50 J. Každý soubor měření obsahoval vždy 15 měření. Teplota v místě zkoušení byla 23 °C.



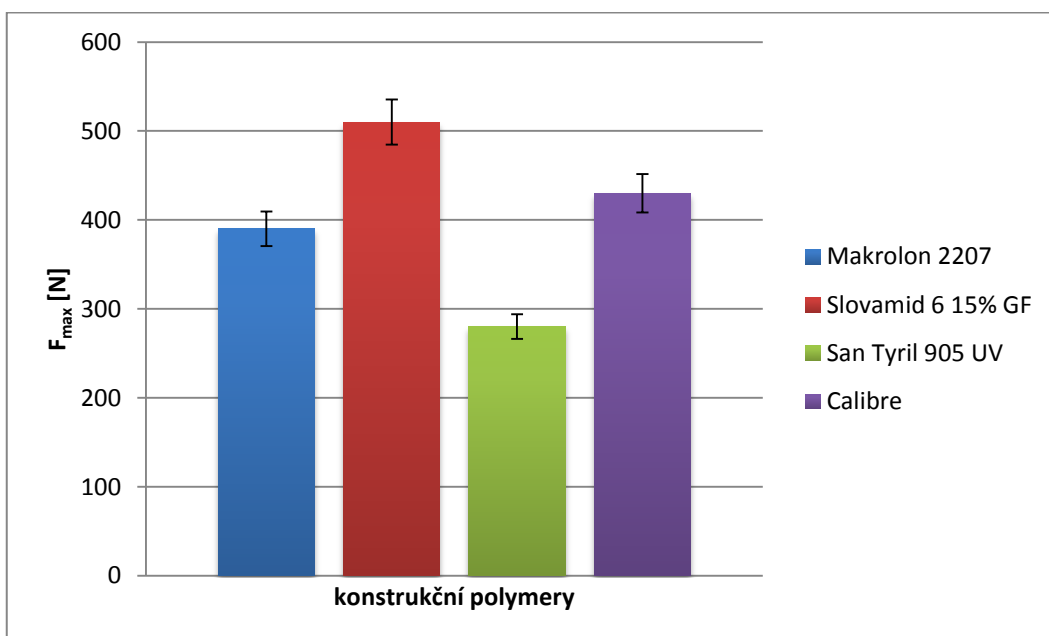
Obr. 27 Porovnání vrubové houževnatosti

Při porovnání výsledů měření (obr. 27) bylo zjištěno, že největší vrubovou houževnatost měl San Tyril 905 UV ($A_k=25 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$), což je styren – akrylonitrilový kopolymer složený ze styrenu a akrylonitrilu. Nejmenší vrubovou houževnatost měl Slovamid 6 s 15% skelných vláken ($A_k=5 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$).



Obr. 28 Porovnání deformační energie

Při porovnání výsledů měření (obr. 28) bylo zjištěno, že největší deformační energii měl San Tyril 905 UV ($W_m=1020$ J). Naopak nejmenší deformační energii měl Slovamid 6 15 % GF ($W_m=210$ J).

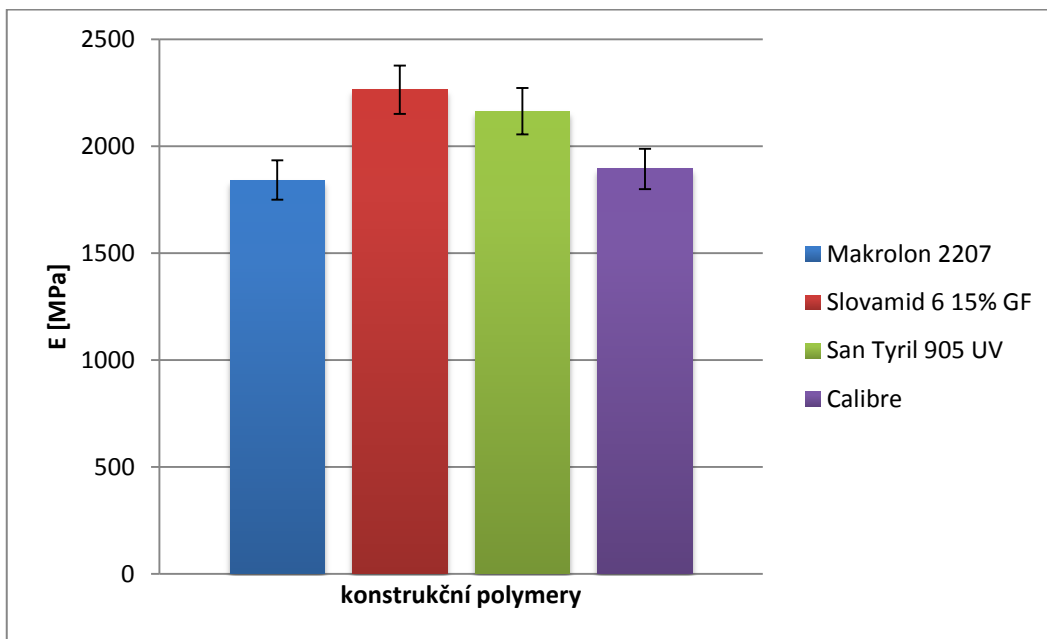


Obr. 29 Porovnání maximální síly

Při porovnání výsledů měření (obr. 29) bylo zjištěno, že největší spotřebovanou sílu měl Slovamid 6 15% GF ($F_{MAX}=510$ N). Naopak nejmenší spotřebovanou sílu měl San Tyril 905 UV ($F_{MAX}=280$ N).

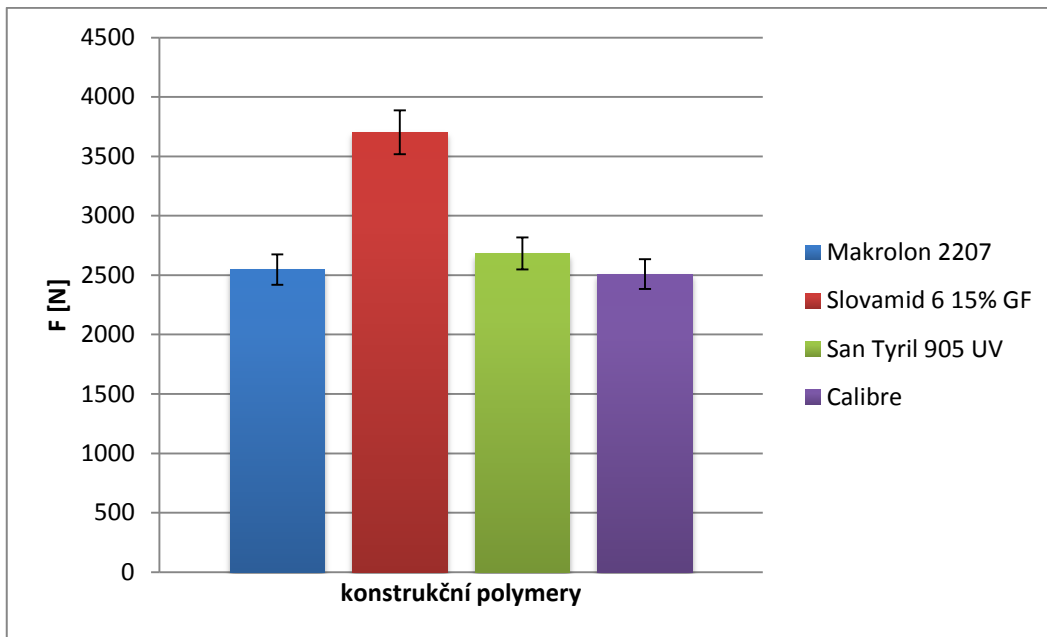
8.3 Zkouška tahem

Zkušební tělesa byly v podobě lopatek, dle normy ČSN ISO 527 – 1, tvar zkušebního tělesa – typ II. Zkouška se provedla na zkušebním stroji ZWICK Roell 1456. Každý soubor měření obsahoval vždy 15 měření. Teplota v místě zkoušení byla 23 °C.



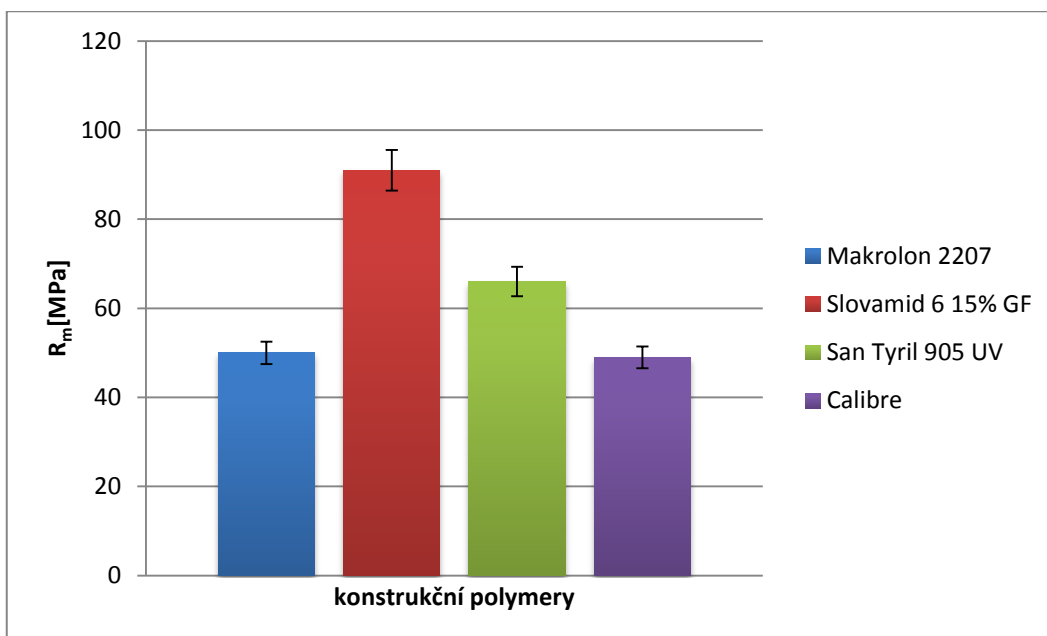
Obr. 30 Porovnání modulu pružnosti

Při porovnání výsledů měření (obr. 30) bylo zjištěno, že největší modul pružnosti měl Slovamid 6 15% GF ($E=2263$ MPa) a nejmenší modul pružnosti v tahu má Makrolon 2203 ($E=1841$ MPa).



Obr. 31 Porovnání síly potřebné k přetržení

Při porovnání výsledů měření (obr. 31) bylo zjištěno, že největší sílu k přetržení potřeboval Slovamid 6 15% GF ($F=3703$ N) a nejmenší sílu k přetržení potřebovalo Calibre ($F=2509$ N).

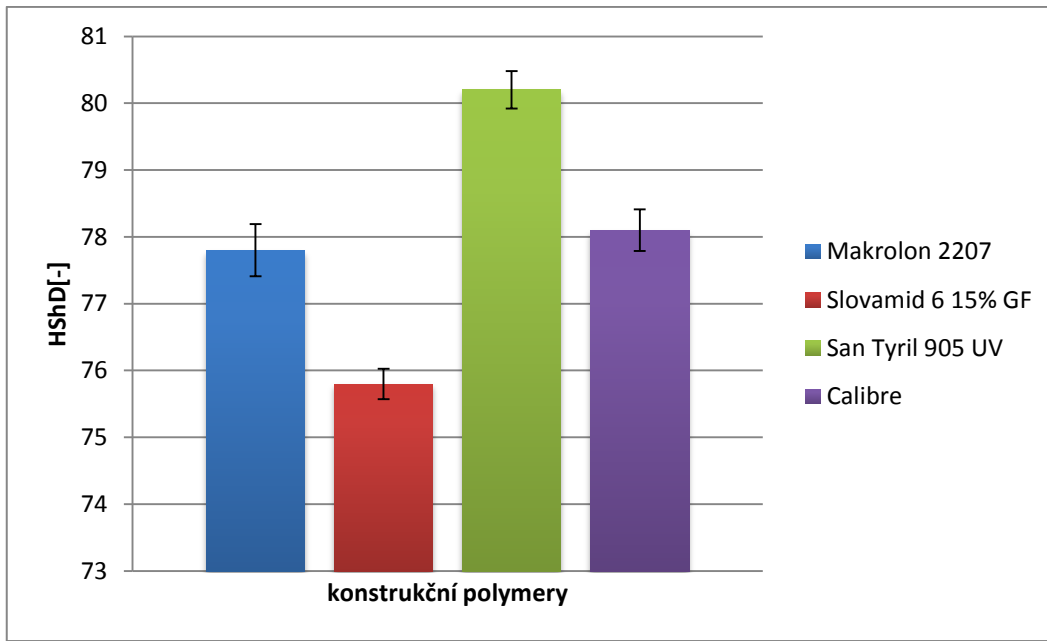


Obr. 32 Porovnání meze pevnosti v tahu

Při porovnání výsledů měření (obr. 32) bylo zjištěno, že největší mez pevnosti v tahu měl Slovamid 6 15% GF ($R_m=91$ MPa) a nejmenší mez pevnosti v tahu mělo Calibre ($R_m=49$ MPa).

8.4 Zkouška tvrdosti Shore D

Zkušební tělesa měly tloušťku 6 mm. Tvrdost se odečetla na stupnici tvrdoměru za 15 sekund. Výsledná hodnota byla aritmetický průměr z 15 měření. Teplota v místě zkoušení byla 21 °C.



Obr. 33 Porovnání zkoušky tvrdosti Shore D

Při porovnání výsledů měření (obr. 33) bylo zjištěno, že největší tvrdost měl San Tyril 905 UV (HShD=80) a nejmenší tvrdost měl Slovamid 6 plněný 15% skelných vláken (HShD=76).

9 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Cílem bakalářské práce bylo porovnání fyzikálních vlastností u vybraných typů polymerních materiálů PC (Makrolon 2207), PA (Slovamid 6 15% GF), SAN (San Tyril 905 UV) a PC (Calibre). U vybraných typů materiálů byla provedena rázová zkouška v ohybu (A_k , W_m , F_{max}), zkouška tahem (F_m , E , R_m) a zkouška tvrdosti Shore D (HShD). Každý soubor měření obsahoval vždy 15 měření. Výsledky měření byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z rázové zkoušky v ohybu vyplynulo, že nejvyšší hodnoty vrubové houževnatosti, která reprezentuje tuhost testovaného zkušebního tělesa, byla zjištěna u testovaného materiálu SAN. Nejmenší hodnota vrubové houževnatosti byla zjištěna u materiálu PA. Velmi podobné hodnoty dosáhli PC (Calibre a Makrolon).

Z tahové zkoušky vyplynulo, že nejvyšší hodnoty modulu pružnosti v tahu, který reprezentuje tuhost testovaného zkušebního tělesa, byla zjištěna u testovaného materiálu PA. Nejmenší hodnota tuhosti byla zjištěna u materiálu PC (Calibre). Velmi vysoké hodnoty tuhosti byly rovněž naměřeny u materiálu PA. Materiál SAN dosáhl podobných hodnot, jako tomu bylo u materiálu PC (Calibre).

Ze zkoušky tvrdosti (Shore D), která je jednou z významných vlastností mechanických zkoušek vyplynulo, že nejvyšší hodnoty tvrdosti dosáhl SAN. O něco menší hodnoty dosáhli podobně PC (Calibre a Makrolon). Nejmenší tvrdost byla naměřena u PA.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo porovnání fyzikálních (mechanických) vlastností u vybraných typů polymerních materiálů PC (Makrolon 2207), PA (Slovamid 6 15% GF), SAN (San Tyril 905 UV) a PC (Calibre). U vybraných typů materiálů byla provedena zkouška tahem (F_m , E , R_m), rázová zkouška v ohybu - zkouška vrubové houževnatosti (A_k , W_m , F_{max}) a zkouška tvrdosti Shore D (HShD). Každý soubor měření obsahoval vždy 15 měření. Zkušební tělesa se zpracovaly vstřikováním do tvaru lopatek a tyčinek. Výsledky měření byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z výsledků měření fyzikálních (mechanických) vlastností vyplynulo, že při rázové zkoušce v ohybu (vrubové houževnatosti) dosáhl nejvyšších hodnot vrubové houževnatosti materiál SAN Tyril 905 UV. Nejnižší hodnoty naopak vykazoval materiál PA6 Slovamid 15% GF, který vykázal při tahové zkoušce naopak nejvyšší hodnoty meze pevnosti v tahu a modulu pružnosti. U materiálu SAN bylo při tahové zkoušce zjištěno, že dosáhl nejmenší hodnoty maximální síly a maximálního napětí. Při zkoušce tahem dosáhl nejvyšších hodnot PA6 Slovamid plněný 15 % skelných vláken. Naopak při rázové zkoušce v ohybu dosáhl nejmenších hodnot při porovnání vrubové houževnatosti i deformační energie. Při zkoušce tvrdosti (Shore D) dosáhl PA6 taktéž nejmenší tvrdosti. Nejvyšší tvrdost byla naměřena u SAN Tyrilu 905 UV. Polykarbonáty (Makrolon 2207 a Calibre) vykazovali téměř shodné hodnoty ve všech měřeních.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] RYBNÍKÁŘ, F. Makromolekulární chemie I, Brno VUT. 1987
- [2] Jurčová, M., Testování mechanických vlastností modifikovaných polymerů, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013, vedoucí bakalářské práce doc. Ing. David Mañas, Ph.D.
- [3] Rozdělení technologií na zpracování plastů [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp>
- [4] Základní vlastnosti Makrolonu [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.eloraplasty.cz/makrola.htm>>
- [5] Základní vlastnosti Slovamidu 6 [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupný z WWW:<<http://www.plastcom.sk/wp-content/uploads/2014/02/Materialovy-list-102000-SLOVAMID-6-GF-15.pdf>>
- [6] Základní vlastnosti San Tyrilu [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupný z WWW: < <http://www.resinex.cz/produkty/tyril.html>>
- [7] Základní vlastnosti Calibre [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupný z WWW: < <http://www.resinex.cz/produkty/calibre.html>>
- [8] SCHATZ, Miroslav, VONDRÁČEK, Petr. *Zkoušení polymeru*. 1. vyd. Praha: SNTL -nakladatelství technické literatury, 1979. 264s.
- [9] HLUCHÝ, Miroslav, KOLOUCH, Jan. *Strojírenská technologie 1 – 1.díl: Nauka o materiálu*. 3. vyd. Praha: Scienta, 2002. 266 s.
- [10] ČSN EN ISO 2039-1. *Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 1: Metoda vtláčením kuličky*. Praha: Český normalizační institut, 2000. 12s.
- [11] Tvrdoměr Brinell [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.testsysteme.cz/cz/produkty/tvrdomery-kovu/tvrdomery-brinell/tvrdomer-brinell-typu-nexus-3001xlm-imp.html>>
- [12] ČSN EN ISO 2039-1. *Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 2: Tvrdost dle Rockwella*. Praha: Český normalizační institut, 2000. 12s.
- [13] Průběh Rockwellovy zkoušky [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupný z WWW:

- <http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/kom/tvrdomer/rock1.jpg>
- [14] Tvrdoměr Rockwell [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.testsysteme.cz/cz/produkty/tvrdomery-kovu/tvrdomery-rockwell/tvrdomer-rockwell-typu-verzus-700-rs-rsb.html>>
- [15] Podstata metody měření tvrdosti metodou Vickers [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=531>>
- [16] Tvrdoměr Vickers [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupný z WWW: <http://www.testsysteme.cz/cz/aktuality/novy-micro-vickers-a-vickers-tvrdomer-firmy-innovatest-europe-bv/>>
- [17] Martinek, M., Měření tvrdosti polymerů polymerů, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, vedoucí bakalářské práce doc. Ing. David Maňas, Ph.D.
- [18] Digitální tvrdoměr Shore [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.testsysteme.cz/cz/produkty/tvrdomery-shore-a-irhd/rucni-tvrdomery-shore/digitalni-tvrdomer-hpe-ii.html>>
- [19] Bc. Adámek, R., Vliv záření na vlastnosti vybraných plastů, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008, vedoucí diplomové práce doc. Ing. David Maňas, Ph.D.
- [20] Vstřikovací stroj ARBURG [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupný z WWW: <https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/mediathek/prospekte/arburg_hydraulic_allrounders_680480_cz/#>
- [21] Sušička ARBURG THERMOLIFT 100 – 2 [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupný z WWW: <<https://www.arburg.com/cs/cz/spektrum-sluzeb/vstrikovani/vstrikovaci-stroje/prislusenstvi>>
- [22] Zkušební stroje ZWICK [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupný z WWW: <<https://www.zwick.cz>>
- [23] Plastový granulát [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/03-pripravne%20zpracovani%20plastu/01-granulat.jpg>
- [24] Odhad aritmetického průměru [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupný z WWW: <<http://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn1/strednih.htm>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	Tažnost
A_K	Vrubová houževnatost
A_n	Rázová houževnatost
A_s	Plocha vytlačeného důlku
b	Šířka zkušební tělesa
d	Aritmetický průměr délek obou změřených úhlopříček
D	Kulová výseč kuličky
D	Průměr zkušební kuličky
d_1	Délka jedné úhlopříčky
d_2	Délka jedné úhlopříčky
F	Zatěžující síla
F_A	Vtlačovací síla pro Shore A
F_D	Vtlačovací síla pro ShoreD
g	Tíhové zrychlení
H	Hloubka vtisku
H_A	Hodnota tvrdosti pro Shore A
HB	Hodnota tvrdosti podle Brinella
h_k	Tloušťka zkušební tělesa
HR	Tvrdomost podle Rockwella
HR	Tvrdomost podle Rockwella
HV	Tvrdomosti podle Vickerse
k_v	Vrubový koeficient
L	Celková délka zkušební tělesa
L_0	Počáteční délka zkušební tělesa

n	Počet měření
S	Odhad směrodatné odchylky
S	Průřez zkušebního tělesa
S_0	Počáteční průřez zkušebního tělesa
u_a	Střední kvadratická chyba aritmetického průměru
W	Deformační energie spotřebovaná k přeražení tělesa
\bar{x}	Odhad aritmetického průměru
x_i	Hodnota měřené veličiny
Z	Kontrakce
S_J	Jednotková stupnice
α	Úhel
π	Ludolfovo číslo
σ_E	Smluvní napět
σ_R	Mez pružnosti
σ_K	Mez kluzu
σ_{Kh}	Horní mez kluzu
σ_{Kd}	Dolní mez kluzu

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Stavební jednotka	12
<i>Obr. 2</i> Rozdělení polymerů	12
<i>Obr. 3</i> Tvary polymerních řetězců: a) lineární polymer, b) rozvětvený polymer, c) zesíťovaný polymer, d) prostorově zasíťovaný polymer	15
<i>Obr. 4</i> Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Brinella ⁹	18
<i>Obr. 5</i> Tvrdoměr Brinell typu NEXUS 3001 XLM - IMP11	19
<i>Obr. 6</i> Průběh Rockwellovy zkoušky tvrdosti 13	21
<i>Obr. 7</i> Tvrdoměr Rockwell typu VERZUS 700 RS/RSB14	21
<i>Obr. 8</i> Podstata metody měření tvrdosti metodou Vickers 15	22
<i>Obr. 9</i> Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Vickerse 9	23
<i>Obr. 10</i> Tvrdoměr pro zkoušku tvrdosti dle VICKERS 16	24
<i>Obr. 11</i> Tvrdoměr Shore typu A a D 17	25
<i>Obr. 12</i> Obecné schéma pro označení zkoušky tvrdosti podle Shoreho 9	26
<i>Obr. 13</i> Digitální tvrdoměr Shore typu HPE 18	26
<i>Obr. 14</i> Okamžik před přetržením a po přetržení zkušebního vzorku	29
<i>Obr. 15</i> Zařízení pro tahovou zkoušku s teplotní komorou	30
<i>Obr. 16</i> Tvary zkušebních vzorků pro zkoušku tahem ¹⁹	31
<i>Obr. 17</i> Tahová křivka polymerů ⁸	32
<i>Obr. 18</i> Charpyho kladivo 22	34
<i>Obr. 19</i> Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420 C20	38
<i>Obr. 20</i> Ovládací pane sušičky 21	39
<i>Obr. 21</i> Sušička ARBURG THERMOLIFT 100 - 2 21	39
<i>Obr. 22</i> Vrubovačka CEAST s mikrometrem	40
<i>Obr. 23</i> Stroj pro tahovou zkoušku ZWICK Roell 1456	41
<i>Obr. 24</i> Charpyho kladivo ZWICK HT50J 22	42
<i>Obr. 25</i> Tvrdoměr OMAG Affri ART 13	42
<i>Obr. 26</i> Plastový granulát připravený ke zpracování 23	45
<i>Obr. 27</i> Porovnání vrubové houževnatosti	47
<i>Obr. 28</i> Porovnání deformační energie	48
<i>Obr. 29</i> Porovnání maximální síly	48
<i>Obr. 30</i> Porovnání modulu pružnosti	49
<i>Obr. 31</i> Porovnání síly potřebné k přetržení	50

<i>Obr. 32 Porovnání meze pevnosti v tahu</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 33 Porovnání zkoušky tvrdosti ShoreD</i>	<i>51</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1</i> Rozměry vzorků u tahové zkoušky polymerů	30
<i>Tab. 2</i> Hodnoty vstřikování pro Makrolon 2207	43
<i>Tab. 3</i> Hodnoty vstřikování pro Slovamid 6 15% GF.....	44
<i>Tab. 4</i> Hodnoty vstřikování pro San Tyril 905 UV.....	44
<i>Tab. 5</i> Hodnoty vstřikování pro Calibre.....	45