

Návrh funkčního řešení zpětného zrcátka automobilu pro sportovní účely

Michal Valenta

Bakalářská práce
2016

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal Valenta**
Osobní číslo: **T13126**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Návrh funkčního řešení zpětného zrcátka automobilu pro sportovní účely**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma.
2. Příprava zkušebních těles pro experimentální část.
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: **8. ledna 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2016**

Ve Zlíně dne 3. února 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



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

Příjmení a jméno: VALENTA MICHAL

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 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, považuji 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 18.5.2016


.....

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 neviditelně 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). Odjírá-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 přihlídí k vyšší výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá optimálním řešením materiálu zpětného zrcátka pro závodní automobil Citroen DS3 R3T. Měla by poskytnout obecný přehled o použití polymerních materiálů v moderních automobilech. V teoretické části jsou popsány jednotlivé druhy termoplastických polymerů. Na základě mechanických zkoušek polymerů byl vybrán vhodný alternativní materiál pro použití v aplikaci zpětného zrcátka. Základní materiál vychází ze stávajícího sportovního zrcátka.

Klíčová slova: polymerní materiály, automobil, zpětné zrcátko, mechanické zkoušky, zkoušky tvrdosti

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the optimal design of material for rearview mirror use on Citroen DS3 R3T. The thesis should provide a general overview of the use of polymeric in modern vehicles. Different types of thermoplastic polymers are described in teoretical part. Based on the mechanical testing of polymers, a suitable alternative materiál for use in the rearview mirror was chosen. The basic material is based on current sport mirror.

Keywords: polymeric materials, automobile, rearview mirror, mechanical tests, hardness tests

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

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

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| ÚVOD | 11 |
| 1 TEORETICKÁ ČÁST | 12 |
| 1 VYUŽITÍ PLASTŮ V AUTOMOBILNÍM PRŮMYSLU | 13 |
| 1.1 HISTORIE | 13 |
| 1.2 SOUČASNOST..... | 14 |
| 1.3 ZPĚTNÁ ZRCÁTKA..... | 16 |
| 1.3.1 Zrcátka na DS3 R3T..... | 17 |
| 1.3.2 Norma zrcátek pro soutěžní vozy..... | 18 |
| 2 POLYMERY | 19 |
| 2.1 SYNTÉZA POLYMERŮ | 20 |
| 2.1.1 Polymerace | 20 |
| 2.1.2 Polykondenzace..... | 21 |
| 2.1.3 Polyadice | 21 |
| 2.2 DRUHY TERMOPLASTICKÝCH POLYMERŮ..... | 22 |
| 2.2.1 Polyetylén – PE | 22 |
| 2.2.2 Polypropylen – PP | 22 |
| 2.2.3 Styrenové polymery – PS, SB, ABS, SAN, ASA..... | 23 |
| 2.2.4 Polyvinylchlorid – PVC | 23 |
| 2.2.5 Fluoroplasty – PTFE (polytetrafluoretylén) | 24 |
| 2.2.6 Polymethylmetakrylát – PMMA | 24 |
| 2.2.7 Polyamidy - PA | 24 |
| 2.2.8 Polyformaldehyd – polyoxymethylen – POM..... | 25 |
| 2.2.9 Polykarbonát – PC..... | 25 |
| 2.2.10 Lineární polyuretan – PUR..... | 25 |
| 3 ZPRACOVÁNÍ A ZKOUŠKY | 26 |
| 3.1 TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ..... | 26 |
| 3.1.1 Vstřikování | 26 |
| 3.1.2 Vytlačování | 26 |
| 3.1.3 Válcování | 26 |
| 3.1.4 Lisování..... | 26 |
| 3.1.5 Odlévání | 27 |
| 3.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ..... | 27 |
| 3.2.1 Tahové vlastnosti polymerů | 28 |
| 3.2.2 Tlakové vlastnosti polymerů | 30 |
| 3.2.3 Ohybové vlastnosti polymerů..... | 31 |
| 3.2.4 Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy..... | 33 |
| 3.3 ZKOUŠKY TVRDOSTI | 34 |
| 3.3.1 Zkouška tvrdosti dle Brinella | 35 |
| 3.3.2 Zkouška tvrdosti dle Rockwella..... | 35 |
| 3.3.3 Vickersova zkouška..... | 35 |
| 3.3.4 Tvrdost SHORE | 36 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.4 | ZKOUŠKY MIKROTVRDOSTI..... | 37 |
| 3.4.1 | Přehled základních parametrů | 37 |
| II | PRAKTICKÁ ČÁST | 38 |
| 4 | CÍL PRÁCE | 39 |
| 5 | EXPERIMENT | 40 |
| 5.1 | PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES | 40 |
| 5.2 | SUŠENÍ - ARBURG THERMOLIFT 100-2 | 40 |
| 5.3 | VSTŘIKOVÁNÍ – VSTŘIKOVACÍ STROJ ARBURG ALLROUNDER 470 H..... | 41 |
| 5.4 | VRUBOVÁNÍ – VYŘEZÁVAČKA VRUBŮ CEAST S MIKROMETREM..... | 42 |
| 5.4.1 | Postup práce | 42 |
| 6 | MĚŘENÍ A VÝSLEDKY | 43 |
| 6.1 | STATISTICKÉ PROSTŘEDKY | 43 |
| 6.2 | RÁZOVÁ ZKOUŠKA V OHYBU – CHARPYHO KLADIVO ZWICK ROELL HIT50J | 44 |
| 6.2.1 | Popis zkoušky..... | 44 |
| 6.2.2 | Vrubová houževnatost A_k | 45 |
| 6.2.3 | Deformační energie W_m | 45 |
| 6.2.4 | Maximální síla F_m | 46 |
| 6.3 | TAHOVÁ ZKOUŠKA – ZWICK ROELL 1456 | 47 |
| 6.3.1 | Popis zkoušky..... | 47 |
| 6.3.2 | Modul pružnosti v tahu E | 48 |
| 6.3.3 | Maximální síla F_{max} | 49 |
| 6.3.4 | Maximální napětí R_m | 50 |
| 6.3.5 | Tažnost materiálů A | 50 |
| 6.4 | MĚŘENÍ TVRDOSTI SHORE D - TVRDOMĚREM OMAG ART 13..... | 51 |
| 6.4.1 | Popis zkoušky..... | 51 |
| 6.4.2 | Tvrdomost Shore D | 52 |
| 6.5 | MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI – MICRO COMBI TESTER | 53 |
| 6.5.1 | Popis zkoušky..... | 53 |
| 6.5.2 | Vtisková tvrdost H_{IT} | 54 |
| 6.5.3 | Vtiskový modul E_{IT} | 54 |
| 6.5.4 | Vtiskové tečení C_{IT} | 55 |
| 6.5.5 | Koeficient zpětné relaxace η | 56 |
| 7 | DISKUZE VÝSLEDKŮ | 57 |
| 7.1 | VYHODNOCENÍ RÁZOVÉ ZKOUŠKY V OHYBU | 57 |
| 7.2 | VYHODNOCENÍ TAHOVÉ ZKOUŠKY | 59 |
| 7.3 | VYHODNOCENÍ TVRDOSTI SHORE D | 60 |
| 7.4 | VYHODNOCENÍ MIKROTVRDOSTI | 61 |
| | ZÁVĚR | 63 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 64 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 66 |

| | |
|-----------------------------|-----------|
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 68 |
| SEZNAM TABULEK..... | 70 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | 71 |

ÚVOD

Rozmach polymerů je v dnešní době tak velký, že je lze nalézt v každém odvětví. Ukázkou toho je automobilní průmysl, zejména pak sportovní automobily, kde je snahou použití materiálů s co nejnižší hmotností při zachování požadovaných mechanických vlastností.

Polymery se od sebe odlišují jak složením, tak i chemickou reakcí, kterou byly připraveny. Základní rozdělení polymerů je na plasty a elastomery. Plasty se dále dělí na termoplasty a reaktoplasty. Nejrozšířenější skupinou jsou termoplasty, které zahrnují velký počet druhů polymerů. Každý polymer je charakteristický svými vlastnostmi a při výběru takového polymeru je nutné znát jeho parametry.

K získání vlastností určitého polymeru slouží nejrůznější zkoušky. Testování mechanických vlastností materiálů hraje nezastupitelnou roli při kontrole technologie výroby, kontrole jakosti, při přejímkách polotovarů či výrobků, a také při vývoji nových materiálů. Mechanické zkoušky lze rozdělit do dvou základních skupin. První skupinu tvoří zkoušky statické, které vyjadřují chování materiálu za působení klidových spojitých sil. Druhou skupinou jsou dynamické zkoušky. Zde je těleso namáháno rázem, tedy silou koncentrovanou do velmi krátké doby.

V praktické části bakalářské práce jsou zkoumány fyzikálně mechanické vlastnosti vybraných druhů polymerů. Tyto vlastnosti jsou srovnávány s vlastnostmi základního materiálu, který představuje polymer ABS. Výsledky jsou graficky znázorněny a vyhodnoceny.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VYUŽITÍ PLASTŮ V AUTOMOBILNÍM PRŮMYSLU

1.1 Historie

Umělé plastické hmoty se v automobilním průmyslu začaly uplatňovat záhy po svém objevení. Vlastnosti prvních plastů nebyly nijak světoborné, na slunci rychle tály, snadno vzplanuly a byly drahé. Proto první pokusy o výrobu plastových dílů byly z odpadů, jako je hnědouhelný dehet, sója nebo také konopné vlákna.

V první polovině 19. století Angličan Alexander Parkes modifikoval celulózu do tvárné hmoty, výsledkem byl parkesit a průsvitný celuloid. Využitelnost v automobilu, kde spalovací motor vykazuje vysoké teploty, byla velmi malá. Až bakelit (podle Lea Baekelanda) vzniklý z fenolu a formaldehydu, se prosadil jako dobrý izolátor na elektroinstalace. Využíval se převážně na rozdělovače, pojistkové skříně později dokonce i celé karoserie. Ty levnější karoserie se ve 20. letech minulého století vyráběly z fabrikoidu, neboli umělé kůže vyrobené z částí přírodního materiálu s pojivem. Přelom nastal ve 30. letech, kdy byl objeven polyethylen a vinyl (PVC). Polyethylen našel uplatnění v izolaci elektroinstalace, kdežto vinyl jako těsnění nebo čalounění.

V druhé polovině 20. století, ve snaze vyrobit automobil cenově dostupný i pro běžné obyvatele, němečtí vědci vyvinuli termoset nazývaný „duroplast“ (odolný plast), a vznikl dnes již legendární Trabant. Použila se sovětská bavlna, která se prolila fenolovou pryskyřicí a po zapečení při 170°C vznikl finální výrobek. Plastové karoserie se však díky zvýšeným nárokům na bezpečnost (deformační zóny) využití nedočkaly.

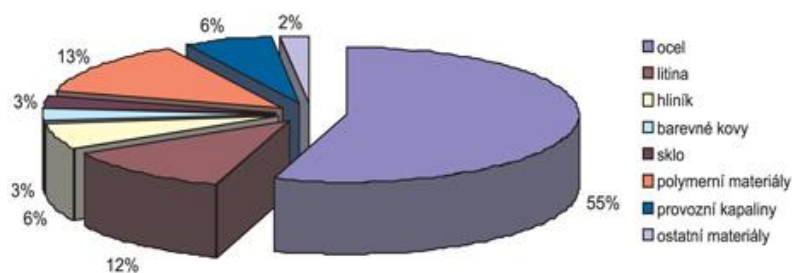
Počátkem 70. let obsahoval běžný západoevropský automobil zhruba 6 % plastů, tedy 66 kg. V dnešní době je zastoupení plastů v automobilu kolem jedné pětiny, což představuje váhu asi 200 kilogramů. [3]



Obr. 1 Bakelitové součástky automobilu.

1.2 Současnost

Dnes již v automobilu nalezneme celou škálu polymerních materiálů, které zahrnují termoplasty, reaktoplasty a gumu. Mezi reaktoplasty (dříve termosety, duromery, duroplasty) můžeme zařadit i pěnový polyuretan využívaný na odhlučnění automobilu a čalounění sedadel. Největší podíl plastových dílů najdeme na karoserii a v interiéru. [2]



Obr. 2 Podíl použitých materiálů v automobilu. [2]

Nejvíce zastoupenými polymerními materiály v automobilu jsou materiály na bázi polypropylenu (35 %), následují polyamidy (14 %), polyetylén (10 %) a polymery ABS (7 %).

Vývojový trend se ubírá směrem k materiálům na bázi polypropylénu (PP), zvláště pak směsi polypropylénu s elastomery a vyztužujícími plnivými. Tyto materiály jsou výhodné jak z konstrukčního hlediska (mechanické vlastnosti), tak i ekonomického.

Houževnatost PP, který je křehký zvláště za nízkých teplot, je modifikovné mícháním s etylén-propylénovými statickými nebo blokovými kopolymery (EPM), anebo blokovými styren-butadiénovými kopolymery (SBS kaučuky). Kromě vysoké houževnatosti je potřeba klást důraz na povětrnostní podmínky. Materiál musí obsahovat kromě tepelných stabilizátorů také stabilizátory proti účinkům UV záření. Výhodný způsob UV stabilizace je pigmentace materiálů sazemi.

Polyamidy jsou další oblíbenou skupinou materiálů používaných v konstrukci automobilů. Jejich pozitivní vlastností je odolnost vůči mazivům a palivům. Nejčastěji požadované modifikované polyamidy jsou se zvýšenou tuhostí a houževnatostí. Tuhost polyamidů se nejčastěji zvyšuje mícháním s vláknitým nebo destičkovým minerálním plnivem. Při výrobě některých komponentů se často používá polyamid vyztužený sklenými vlákny. Pro vysoce namáhané díly se často kombinuje modifikační účinek částicového a vláknitého plniva anebo vláknitého plniva a elastomerového modifikátoru houževnatosti. [2]



Obr. 3 Plastové dílce automobilu.[2]

Všechny typy polyamidů vyztužené skelnými vlákny obsahují obvykle 15 % až 50 % vláken, často v kombinaci s modifikátorem houževnatosti. Skelné mikrokuličky zajišťují menší smrštění výrobku při vstřikování. To je výhodné pro výrobky s velkou přesností. Z plněného polyamidu se následně vyrábí díly, jako jsou ovládací prvky osvětlení, topení, větrání, kliky dveří, součásti napínacího mechanismu bezpečnostních pásů a také **pláště zpětných zrcadel**. [2]



Obr. 4 Zpětní zrcátko používané na závodních vozech Citroen DS3.

1.3 Zpětná zrcátka

Jedná se o jednu z hlavních součástí aktivní bezpečnosti dopravních prostředků, zejména automobilů. Slouží k přehledu situace za vozidlem, či v místech kam řidič z pozice sedadla nedohlédne. Například u nákladních vozidel zpětná zrcátka ukazují nejen situaci za vozidlem ale i těsně před ním.

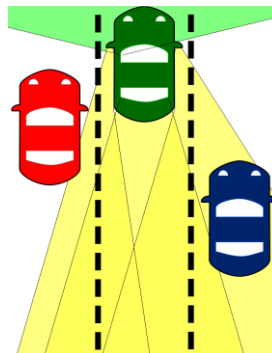
U osobních vozidel se umisťují do rohů bočních předních oken a doprostřed čelního skla. Dříve byla boční zrcátka umisťována na kapotu.

Problém klasických zrcátek je takzvaný mrtvý úhel. V něm se může vyskytovat jiné vozidlo a může tak v případě změny pruhu dojít ke kolizi. Jedná se o místo, ve kterém cizí vozidlo zmizí ze zrcátka, ale ještě není vidět z místa řidiče. K eliminování mrtvého úhlu slouží tvarování odrazové plochy zrcátek. [8]



Obr. 5 Tvarované odrazové sklo pro lepší přehlednost za vozidlem. [8]

V moderních vozidlech jsou zrcátka nahrazována kamerami. Ty jsou menší než zrcátka a vytvářejí tak menší aerodynamický odpor vzduchu. Obraz z kamer je promítán na displeje ve vozidle. [8]



Obr. 6 Zobrazení pozorovacích úhlů ve vozidle. [8]

1.3.1 Zrcátka na DS3 R3T

I soutěžní auta na rallye závody musí být vybaveny zpětnými zrcátky. Závody se sice jezdí na uzavřených komunikacích, jenže mezi měřenými úseky se závodní speciál pohybuje v běžném provozu a platí pro něj stejné předpisy jako pro ostatní účastníky silničního provozu. Z tohoto důvodu musí být závodní automobil vybaven vnějšími zpětnými zrcátky. Ty nejsou důležité jen v provozu ale také na rychlostní zkoušce, kde je nutné kontrolovat situaci za vozidlem. U většiny automobilů se sportovní zrcátka umísťovala do předního rohu bočního okna, ale dnes, díky rozdílné konstrukci a optimálnímu umístění těžiště, kdy posádka vozu sedí více ve středu vozidla, se u některých vozidel zpětná zrcátka umísťují na horní hranu bočních dveří. Právě tak tomu je i u Citroenu DS3 R3T.

Jedná se o upravený automobil vycházející ze sériového modelu DS3 vyráběného automobilkou Citroen. Tento závodní vůz je jeden z nejlepších jak ve své třídě, tak i celkově mezi vozy poháněné jednou nápravou. Kombinace výkonu motoru, rychlého řazení a skvěle fungujícímu podvozku z něj dělá vítězný vůz. Menší konstrukční a estetickou slabinou jsou zpětná zrcátka umístěná na bočních dveřích. Ta svou velikostí dosti přesahují šířku vozidla (obr. 7) a při těsnějším kontaktu s retardérem (pevná překážka na trati sloužící k snížení rychlosti vozidla na rovných úsecích) často dochází k uražení těchto zrcátek. Citroen DS3 R3T není vybaven širokými nápravami a rozšířenou karoserií jako je tomu u Citroenu DS3 nejvyšší specifikace WRC odkud tato zrcátka pochází. [14]



Obr. 7 Zpětné zrcátko používané na závodních vozích Citroen DS3.[15]

1.3.2 Norma zrcátek pro soutěžní vozy

Výhled dozadu musí být zajištěn dvěma vnějšími zrcátky (jedno vpravo a jedno vlevo). Tato zrcátka mohou být stejná jako u sériových vozů.

Každá zrcátka musí mít odrazovou plochu minimálně 90 cm².

Vnitřní zrcátko je volitelné.

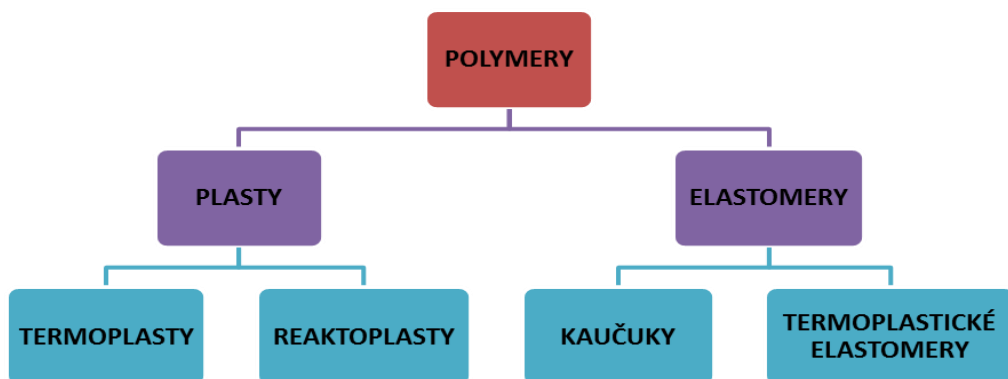
Použití: skupiny N, A, R a Super 2000 Rally.

Výřez v tělese zpětného zrcátka (maximálně plocha 25 cm² na zrcátko) je ovšem povolen pro větrání prostoru posádky.

Použití: pouze pro rally, skupiny N, A, R a Super 2000 Rally. [13]

2 POLYMERY

Polymery jsou chemické látky s velkou škálou vlastností, které obsahují ve svých makromolekulách zejména atomy uhlíku, vodíku, kyslíku a dalších prvků jako jsou dusík nebo chlór. S výrobky z polymeru se setkáváme většinou v tuhém stavu, ale při zpracování vlivem zvýšené teploty a tlaku se nacházejí ve stavu kapalném, který umožní budoucímu výrobku udělit tvar na základě jeho použití. Polymery se dělí na elastomery a plasty. [1, 4]



Obr. 8 Rozdělení polymerů.

- Elastomer

Jak již název napovídá, jedná se o vysoce elastický polymer, který je v běžných podmínkách snadno deformovatelný bez porušení, přičemž deformace je převážně vratná.

Nejčastěji zastoupenými elastomery jsou kaučuky, z nichž se vyrábí guma, ze které se stává chemickou reakcí (vulkanizací) pryž.

- Plasty

Polymery v běžných podmínkách většinou tvrdé, často i křehké. Za zvýšených teplot se stávají plastickými (odtud název plasty) a tvarovatelnými. Pokud je změna z plastického do tuhého stavu vratná (opakovatelná), nazýváme je **termoplasty**. Pokud jde o změnu nevratnou (neopakovatelnou, trvalou), protože je výsledkem chemické reakce, která často probíhá za zvýšených teplot, mluvíme o **reaktoplastech** (termosety, pryskyřice).

[1]

2.1 Syntéza polymerů

Polymerace, polykondenzace a polyadice patří mezi tři základní chemické reakce syntetických polymerů.

2.1.1 Polymerace

Polymerace je chemická řetězová reakce velkého počtu molekul monomeru, při které vznikají dlouhé makromolekuly polymeru. Chemické složení polymeru je stejné jako chemické složení monomeru. Produktem polymerace je makromolekulární řetězec, který dorůstá do své konečné délky ve velmi krátké době. Podle charakteru růstového místa lze základní polymerační reakce rozdělit do tří skupin. [4]

- Radikálová polymerace

Polymerace monomeru schopného radikálové reakce může být vyvolána účinkem iniciátoru (chemické energie), tepla (tepelné energie) nebo záření (radiace). Iniciátory, které zahajují polymerační reakci, mohou být organické a anorganické peroxidy (dibenzoylperoxid) nebo azosloučeniny, které se rozkládají při zvýšených teplotách na radikály zahajující polymeraci. [1]

- Iontová polymerace

Polymerní reakce, při které rostoucí konce nebo aktivní centra vznikající makromolekuly vytvářejí polarizovaná seskupení, mezi která je vtahována molekula monomeru. Jestliže je atom uhlíku vázaný aktivní vazbou kladně polarizován, mluvíme o **kationtové polymeraci**.

V případě záporné polarizace aktivně vázaného uhlíkového atomu se jedná o **polymeraci aniontovou**. [1]

- Koordinační polymerace

Jak radikálová, tak iontová polymerace jsou reakcemi monomeru s aktivním koncem vznikající makromolekuly, při nichž k růstu polymerního řetězce dochází prostorově neuspořádaně, statisticky náhodně. Při vzniku prostorově pravidelně uspořádaných makromolekulárních řetězců se monomer včleňuje mezi jejich rostoucí konce a katalyzátor podle přísného geometrického pořádku, koordinovaně. Takové polymeraci proto říkáme **koordinační** nebo **stereospecifická**, či jedním slovem **polyinzerce**. [1]

2.1.2 Polykondenzace

Polykondenzace je sled stejných opakujících se reakcí funkčních skupin výchozích látek, ke vzniku polymeru je třeba, aby výchozí sloučeniny měly potřebný počet funkčních skupin, a to nejméně dvě v každé molekule vzájemně reagující komponenty. V takovém případě vzniká lineární polymer. Má-li některá výchozí látka více funkčních skupin v molekule, vznikají produkty se strukturou prostorové sítě.

Polykondenzace je tedy reakce, při níž vzniká ze dvou nízkomolekulárních látek polymer a nějaké jiné nízkomolekulární látka, většinou voda. [1, 4]

2.1.3 Polyadice

Sloučeniny, jejichž molekuly obsahují násobné vazby, nebo jsou tvořeny kruhy s malým počtem členů, mohou být mimo vzájemného spojování (řetězení) schopny adičních reakcí se sloučeninami, jejichž molekuly obsahují vhodné funkční skupiny.

Polyadice na rozdíl od polymerace poskytuje odlišnou strukturu základního článku od struktury výchozích látek. [1, 4]

2.2 Druhy termoplastických polymerů

2.2.1 Polyetylén – PE

- Výroba: vysokotlakou polymerací – rozvětvený (LDPE) – měkký
nízkotlakou polymerací – lineární (HDPE) – tvrdý
- Charakteristika – semikrystalický plast s nižší pevností a tuhostí, ale s velkou houževnatostí, spotřebitelský ale i konstrukční plast, $\rho = 920 - 960 \text{ kg/m}^3$.
- Vlastnosti – je hořlavý, odkapává, značný kríp. Velmi dobré elektroizolační vlastnosti. Má nízkou odolnost vůči UV záření a povětrnostním vlivům, ale za to výbornou chemickou odolnost i odolnost vůči rozpouštědlům. Nedá se lepit. Je možný modifikovat velkou řadou přísad.
- Použití – misky, lahve, vaničky, trubky, folie, palivové nádrže (HDPE). [5]

2.2.2 Polypropylen – PP

- Charakteristika – je semikrystalický, středně pevný, tuhý a houževnatý materiál, $\rho = 904 - 910 \text{ kg/m}^3$. Často je plněn výstužnými plnivými, převážně skelnými vlákny, které zlepšují mechanické vlastnosti. Lze ho použít i na některé technické výrobky.
- Vlastnosti – středně pevný a tuhý materiál, vykazuje kríp, rázová pevnost kolem 0°C prudce klesá. Teplota použitelnosti je do 130°C . Chemicky odolný, nenavlhá, lze barvit a je cenově dostupný. Mezi jeho nevýhody patří zejména hořlavost, pod bodem mrazu křehne, podléhá oxidaci a nedá se lepit. Lze jej plnit velkou řadou plniv a kaučukem.
- Použití – lopatky ventilátoru, komponenty klimatizační jednotky, přístrojové desky, nárazníky, víka zavazadlového prostoru. [5]

2.2.3 Styrenové polymery – PS, SB, ABS, SAN, ASA

- Charakteristika – amorfní plasty, jsou tuhé, pevné, ale bez přísad křehké a čiré, $\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$.
- Vlastnosti – mechanické vlastnosti závisí na složení kopolymeru.

| | |
|-----|---|
| PS | E = 3200 MPa – nízká rázová houževnatost |
| SB | E = 2000-3000 MPa – lepší rázová houževnatost |
| ABS | E = 1800 – 2000 MPa – velmi dobrá rázová houževnatost |
| SAN | E = 3600 MPa – lepší rázová houževnatost |

- Použití

PS – spotřební výrobky, krabice na potraviny, víka přístrojů, kostky cívek, folie pro kondenzátory. Používá se ve standartní formě nebo jako pěnový.

SB – zásuvky k psacím stolům, desky pro tvarování, kelímky.

ABS – součástky automobilů – přístrojové desky, kryty a kliky dveří, mřížky chladiče, pouzdra reproduktorů.

SAN – nádoby mixérů, odrazová a koncové světla automobilů.

ASA – výrobci automobilů nyní začínají používat tento materiál pro vnější aplikace, jako jsou mřížky větracích otvorů pod předním sklem. Aplikace SAN v automobilech zahrnují měřidla na přístrojové desce a knoflíky. Verze s vyztužením pomocí skelných vláken byla použita automobilkou OPEL pro pouzdra světlometů. [5]

2.2.4 Polyvinylchlorid – PVC

- Charakteristika – je amorfní termoplast s vyšší pevností a tuhostí, s nižší rázovou a vrubovou houževnatostí, hlavně za nízkých teplot, $\rho = 1300 - 1400 \text{ kg/m}^3$.
- Vlastnosti – vyšší pevnost a tuhost. Má malý sklon ke krípu. Teplotní odolnost je nízká, 60-80°C. Velmi dobré elektroizolační vlastnosti a chemická odolnost. Lze jej lepit i barvit, ale má horší zpracovatelnost.

Použití:

neměkčený – trubky pro dopravu kapalin, kelímky, obaly na potraviny, obložení dveří a stropu automobilu, kryty přístrojů.

měkčený – hračky, folie, koženky, podlahové krytiny, dopravní pásy. [5]

2.2.5 Fluoroplasty – PTFE (polytetrafluoretylén)

- Charakteristika – semikrystalický plast podobný PE, je měkký, povrch se snadno poškrábe, nejdražší plast.
- Vlastnosti – Vykazuje kříp, dobrá rázová odolnost, výborné kluzné vlastnosti. Teplota použití je 250 – 300°C. Je zcela nehořlavý, elektrické vlastnosti a chemická odolnost výborná.
- Použití – ložiska, membrány, trubky, folie. [5]

2.2.6 Polymetylmakrylát – PMMA

- Charakteristika – je amorfní termoplast, tuhý a velmi pevný s nízkou tažností. Je to konstrukční plast s výbornými optickými vlastnostmi. Výroba je zdlouhavá a tím i nákladná.
- Vlastnosti – dobré mechanické a optické vlastnosti, malý sklon ke křípu. Teplotní odolnost 65-70°C. Vyznačuje se dobrou odolností proti UV záření a povětrnostním vlivům.
- Použití – kryty přístrojů, světlometů a ostatních světel, stropní okna aut, vstříkované technické výrobky. [5]

2.2.7 Polyamidy - PA

- Charakteristika – semikrystalický, tuhý, pevný, tažný, s výraznou mezí kluzu, dobrá rázová odolnost.
- Vlastnosti – hydrokropický plast, absorpce vody se dá snížit plnivý (skelné vlákna). Snadno se zpracovává a lze jej barvit.
- Použití – ložiska, ozubená kola, lopatky ventilátorů, vlákna, panely automobilů. [5]

2.2.8 Polyformaldehyd – polyoxymethylen – POM

- Charakteristika – semikrystalický konstrukční termoplast, vyrábí se polymerací formaldehydu.
- Vlastnosti – je tvrdý a pevný, má výrazná rázová houževnatost a velmi dobrá otěruvzdornost.
- Použití – kloubové čepy řízení, vačky, ozubená kola. [5]

2.2.9 Polykarbonát – PC

- Charakteristika – amorfni termoplast, středně tuhý s vyšší pevností, konstrukční plast.
- Vlastnosti – dobré mechanické vlastnosti, vysoká rázová a vrubová houževnatost. Nesnadno se zapálí. Odolnost proti UV záření. Chemicky méně odolný plast.
- Použití – panely karoserie, střešní lampy a dveřní osvětlení, zadní brzdová světla. Nově se aplikuje na boční okna automobilů. [5]

2.2.10 Lineární polyuretan – PUR

- Charakteristika – amorfni termoplast charakteru tuhé pryže. Dobrá ohebnosti i za mrazu.
- Vlastnosti – Tažnost a rázová houževnatost je vysoká jako u kaučuků. Velké rozpětí teploty použití, ale také velká teplotní roztažnost.
- Použití – těsnicí kroužky, manžety, membrány, kladky, ozubená kola, řemeny. [5]

3 ZPRACOVÁNÍ A ZKOUŠKY

3.1 Technologie tváření

Tváření je technologický postup, kdy se zpracovává polymer v plastickém stavu. Výchozí látka se přeměňuje na polotovar nebo finální výrobek, dochází k přemísťování částic. Do tvářecích procesů můžeme zařadit operace jako je vstřikování, vytlačování, válcování, lisování, odlévání, ale i laminování, vypěňování. [7]

3.1.1 Vstřikování

Nejpoužívanější metoda výroby plastových dílců. Je zde možnost použití široké škály materiálů. Jde o způsob tváření, kdy se roztavený polymer vstřikuje velkou rychlostí do kovové formy. Hotový výrobek se po ztuhnutí pomocí vyhazovacího systému vyhodí z dutiny formy. [7]

3.1.2 Vytlačování

Jedná se o kontinuální proces tváření, kdy polymerní tavenina je vytlačována z tlakové komory přes šablonu do volného prostoru. Pomocí této technologie se vyrábí většina polotovarů: trubky, desky, tyče, profily. [7]

3.1.3 Válcování

Je způsob tváření, během něhož se polymerní materiál dostává mezi vyhřívané válce neboli kalandry. Intenzita a účinnost válcování závisí na konstrukci válců, jejich kompenzaci a rozdílu obvodových rychlostí - skluzu. Kvalita povrchu a prohnětení materiálu se zlepšuje tím, kolikrát projde materiál mezi válci. [7]

3.1.4 Lisování

Tváření materiálu probíhá ve vyhřívané formě. Výsledného tvaru se docílí za působení tlaku. Jedná se o jednu z nejstarších technologií. Slouží ke zpracovávání reaktoplastů. [7]

3.1.5 Odlévání

Připravená forma se vyplní roztaveným materiálem. Může se jednat o termoplasty (PVC, PA), nebo reaktoplasty (formaldehydové, epoxidové pryskyřice). Výhodami odlévání jsou nízké náklady na provoz stroje a výrobu formy, konstrukční jednoduchost, minimální odpad a v neposlední řadě také výroba tvarově rozdílných dílů současně. [7]

3.2 Mechanické vlastnosti materiálů

Mezi základní zkoumané vlastnosti patří pevnost, pružnost, plasticita a houževnatost. Ale mechanických charakteristik je mnohem více a do jisté míry závisí na přípravě i tvaru zkušebních těles, podmínkách zkoušek apod. Mechanické charakteristiky uváděné v materiálových listech jsou stanoveny experimentálně na normalizovaných zkušebních tělíscích za předepsaných podmínek z práškového nebo granulovaného polymeru vstřikováním, lisováním nebo odléváním. Lze je také stanovit i na tělesech obrobených z hotových výrobků. [12]

Při namáhání zkušebních těles dochází k jejich deformaci. Těleso v důsledku působící síly mění svůj tvar. Jestliže se těleso vrátí do původního stavu, jedná se o deformaci elastickou (pružnou). V případě, kdy se tvar tělesa po odstranění působící síly nevrátí do původního stavu, jde o tzv. plastickou (trvalou) deformaci.

U polymerů je díky jejich struktuře deformační chování složitější. Jejich deformace má dvě složky pružnou i trvalou a navíc ještě deformaci zpožděně elastickou (viskoelastickou). Pokud těleso vystavíme stálému zatížení, můžeme pozorovat jeho deformaci, rychlost deformace s časem klesá. Odborně se této vlastnosti říká kríp. Z toho tvrzení můžeme usoudit, že celková deformace polymerů je časově závislá. Při krátkodobém zatížení se polymer chová jako tuhá látka, zatímco při dlouhodobém zatěžování je deformace větší a materiál je poddajný (plastický).

Další vlastností viskoelastických polymerů je elastické zotavení neboli zpětný kríp. Tento jev nastává při uvolnění napětí, kdy materiál má snahu vrátit se do původního tvaru. Z toho vyplývá, že při krátkodobém zatěžování budou hodnoty rozdílné jako v případě dlouhodobého zatěžování. Krátkodobé zkoušky mají jen informativní charakter. Slouží k porovnání materiálů mezi sebou. Pro konstrukční výpočty se používají dlouhodobé zkoušky. [12]

3.2.1 Tahové vlastnosti polymerů

Patří mezi nejzákladnější charakteristiky materiálu. Jestliže je zkušební těleso vystaveno jednoosému namáhání v tahu, je možné průběh deformace sledovat pomocí deformační křivky, což je závislost poměrného prodloužení na normálovém napětí. Jedná se o experimentální zkoušku, kdy zkušební těleso je uchyceno do čelistí zkušebního stroje a osazeno průtahoměrem. Během zkoušky se zaznamenává závislost působící síly na poměrném prodloužení. Pro výpočet smluvního napětí platí rovnice (1) a pro výpočet poměrného prodloužení rovnice (2). [12]

$$\sigma = \frac{F}{S_0} [MPa] \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

Rozměry a tvar zkušebních těles jsou pro každý materiál definovány normou. Nejčastěji se používají vzorky ve tvaru oboustranných lopatek z důvodu pohodlného upnutí do čelistí stroje. U kaučuků se může použít vzorek ve tvaru kruhu, u folií pak pásků.

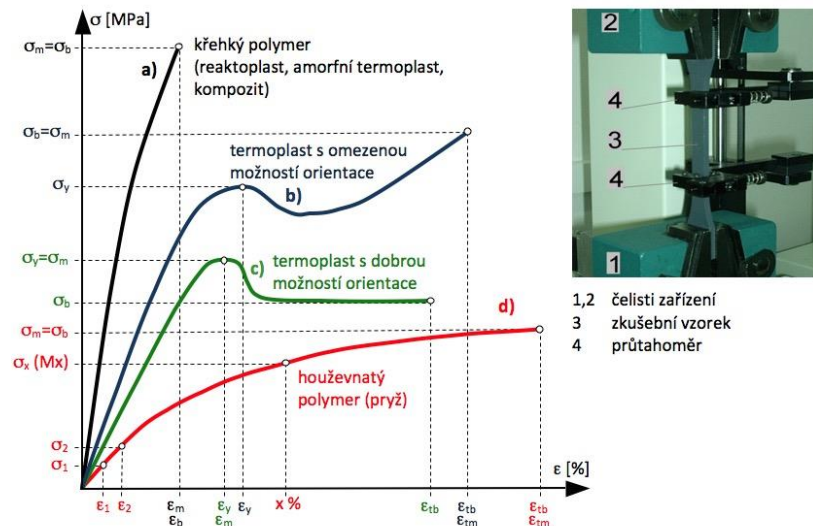
Na základě deformační křivky určujeme pevnostní charakteristiky jako je mez pevnosti, napětí na mezi kluzu a napětí při přetržení.

Mez pevnosti je maximální napětí v tahu, které odpovídá největší síle naměřené v průběhu zkoušky a jeho hodnota se určí pomocí rovnice (4). Hodnota meze pevnosti se u plastů pohybuje při pokojové teplotě v rozmezí 15 MPa do 100 MPa (u vyztužených plastů až do 170 MPa).

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{S_0} [MPa] \quad (3)$$

Napětí na mezi kluzu je napětí, při kterém začíná vznikat plastická (trvalá) deformace a začíná se tvořit tzv. krček. Napětí na mezi kluzu je maximální přípustné napětí součásti v provozu, neboť za touto hranicí vznikají trvalé deformace. U semikrystalických plastů je napětí na mezi kluzu shodné s mezí pevnosti. [12]

Napětí při přetržení je napětí, kdy dojde k porušení zkušebního tělesa. U křehkých polymerních materiálů jakou jsou amorfní termoplasty, reaktoplasty a kompozity, může být napětí při přetržení shodné s napětím mezi pevnosti. [12]



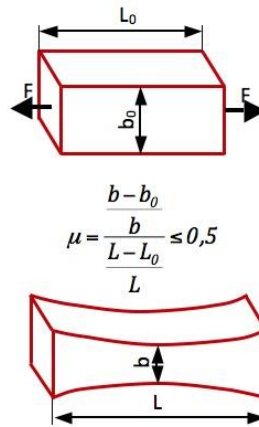
Obr. 9 Zkouška tahem. [12]

Další důležitou charakteristikou materiálů je modul pružnosti vyjadřující jeho tuhost. S rostoucí tuhostí roste i modul pružnosti. Ten se stanoví z deformační křivky, kde je patrná lineární závislost napětí na poměrném prodloužení. V této oblasti platí tzv. Hookův zákon (5), který říká, že deformace je přímo úměrná napětí materiálu. Popisuje pružnou deformaci materiálu, který se po odlehčení malých sil vrací do původního stavu. Bod na křivce, kde končí oblast hookovského chování se označuje jako mez úměrnosti. Dalším bodem deformační křivky je mez pružnosti, do tohoto bodu jsou deformace vratné. Za tímto bodem již nastává deformace plastická (trvalá). Nastává mez kluzu, u semikrystalických polymeru dojde k mírnému poklesu a obětovnému nárůstu až do určitého maxima, kdy dojde k přetržení zkušebního vzorku nebo porušení soudržnosti a poklesu napětí. Kdežto u křehkých polymerů dochází k lomu již při nízkých deformacích, a to těsně za mezí pružnosti.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\epsilon} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

Modul pružnosti lze vypočítat z Hookova zákona, nebo z grafu kdy představuje směrnici lineární části grafu, resp. tangentu úhlu alfa. U houževnatých materiálů vliv viskoelastické-

ho chování způsobuje nelinearitu počáteční oblasti. Proto při výpočtu modulu pružnosti v tahu se vychází ze dvou hodnot napětí odpovídající poměrnému prodloužení $\varepsilon_1=0,05\%$ a $\varepsilon_2=0,25\%$ a často se označuje jako sečný modul pružnosti. [12]

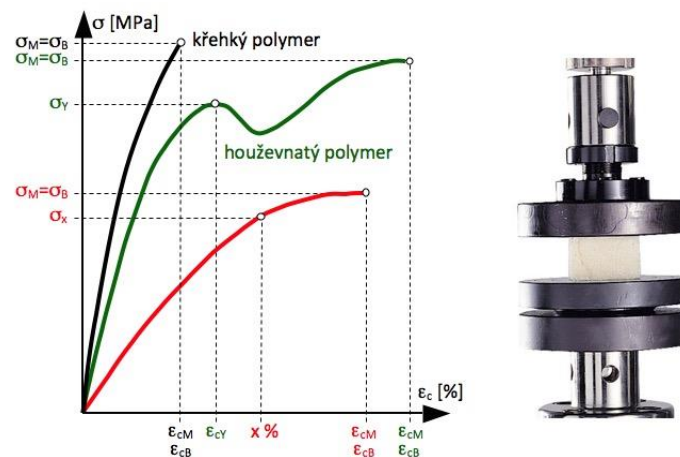


Obr. 10 Poissonův poměr. [12]

Z deformace zkušební tělesa lze určit také Poissonův poměr, který vyjadřuje poměr příčného zúžení k podélnému protažení při deformaci polymeru. Pro nestlačitelné materiály (korek) je roven 0,5. U plastů je jeho hodnota daleko menší (závisí na chemickém složení a struktuře) např. pro PE-LD $\mu=0,45$. [12]

3.2.2 Tlakové vlastnosti polymerů

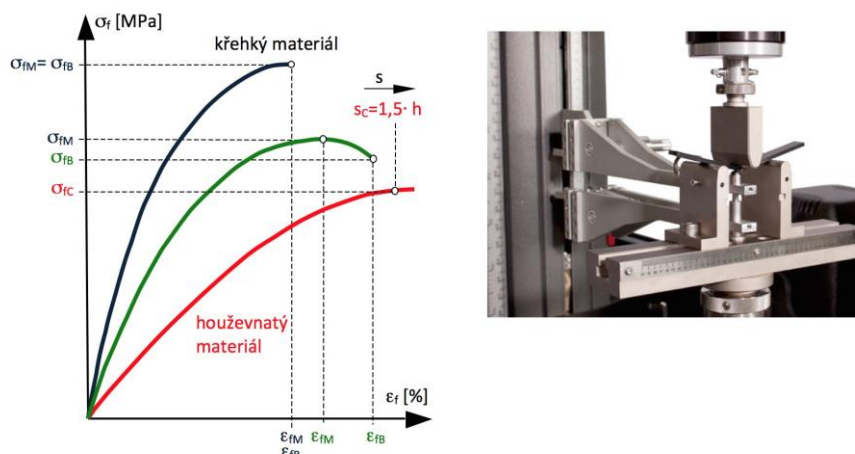
Představují odolnost polymerních materiálů vůči tlakovým zatížením. Zkušební těleso ve tvaru válce, trubky, pravouhlého hranolu nebo kolečka (v případě elastomerů) je položeno mezi dvě tlačné desky a během stlačování dochází k zaznamenávání napětí v závislosti na poměrném stlačení. U tvrdých, tuhých a křehkých polymerů roste napětí rovnoměrně až do okamžiku meze pevnosti v tlaku. Za touto mezí dochází k destrukci materiálu, většinou se objeví drobné trhlinky na povrchu, které však nemusí znamenat velkou deformaci anebo porušení soudržnosti. Mez pevnosti v tlaku může být také totožná s napětím v tlaku při porušení. U houževnatých a měkkých polymerů je nárůst napětí pozvolnější s mezí kluzu, nad kterou dojde k plastické deformaci bez viditelné destrukce. Struktura zkoušeného tělesa je narušena mikrotrhlinami, které vznikají při přemísťování materiálu. Vyhodnocené tlakové zkoušky probíhá podobným způsobem jako u tahové zkoušky pouze s výjimkou značení indexů (velké písmena) jednotlivých veličin. [12]



Obr. 11 Zkouška tlakem. [12]

3.2.3 Ohybové vlastnosti polymerů

Ohyb patří k dalšímu nejčastěji vyskytujícímu se zatížení, proto je jeho charakteristika velmi důležitá zejména u střešních konstrukcí, nosníků a obkladových materiálů. Elastomery mají dostatečnou tuhost v ohybu, tudíž se u nich ohybové zkoušky dělají jen výjimečně. Pro ohybové zkoušky se používají tělesa ve tvaru hranolu, která se umístí na dvě podpěry v předepsané vzdálenosti. V praxi se setkáváme se dvěma možnostmi měření. Tou první je tříbodový ohyb, tj. síla působí na těleso uprostřed mezi podpěrami. Další variantou je ohyb čtyřbodový, zde je síla rozdělena na dvě stejně velké síly, které působí v určité vzdálenosti od podpěr. Používá se pro velké a tlustostěnné vzorky. [12]



Obr. 12 Zkouška v ohybu. [12]

Křivky závislosti napětí na deformaci v ohybu pro plasty jsou zobrazeny na (obr. 12). Pevnost v ohybu se spočítá z maximálního ohybového momentu a modulu průřezu podle rovnice (6).

$$\sigma_{fM} = \frac{M_{o,max}}{W_o} [MPa] \quad (5)$$

Hodnota průřezového modulu se stanoví dle rovnice (7).

$$W_o = \frac{b \cdot h^2}{6} [mm^3] \quad (6)$$

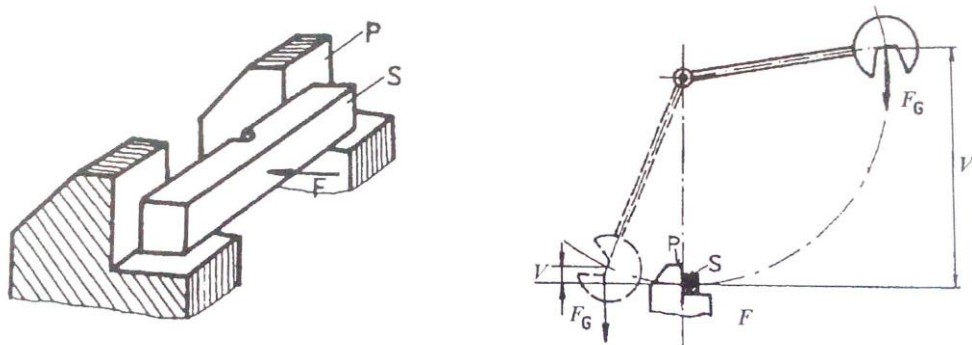
Modul pružnosti v ohybu se vypočítá podobně jako modul pružnosti v tahu, tedy ze dvou hodnot napětí odpovídající hodnotám deformace ohybem $\varepsilon_1=0,05$ % a $\varepsilon_2=0,25$ %. Vztah mezi průhybem a deformací v ohybu pro třibodový ohyb je dán rovnicí (8).

$$s = \frac{1}{6} \cdot \frac{\varepsilon_f \cdot L^2}{h} [mm] \quad (7)$$

[12]

3.2.4 Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy

Jedná se o nejstarší, nejjednodušší a v praxi nejrozšířenější zkoušku hodnocení materiálu proti křehkému lomu. Podstata této zkoušky spočívá v přeražení zkušební tělesa s vrubem jedním rázem kyvadla za předem definovaných podmínek. Uprostřed zkušební tělesa na protilehlé straně k místu úderu se nachází vrub s přesně definovanou geometrií. Vruby mohou být buď ve tvaru V, nebo U. Standardní zkušební těleso musí mít délku 55 mm a čtvercový průřez o stranách 10 mm. Při zkoušce se stanovuje spotřebovaná práce na přeražení zkušební tyče, označujeme ji jako nárazová práce K , které je dána rozdílem potenciálních energií. [11]



Obr. 13 Schéma Charpyho kladiva.[4]

Vrubová houževnatost Charpyho metodou se vypočítá pomocí vzorce:

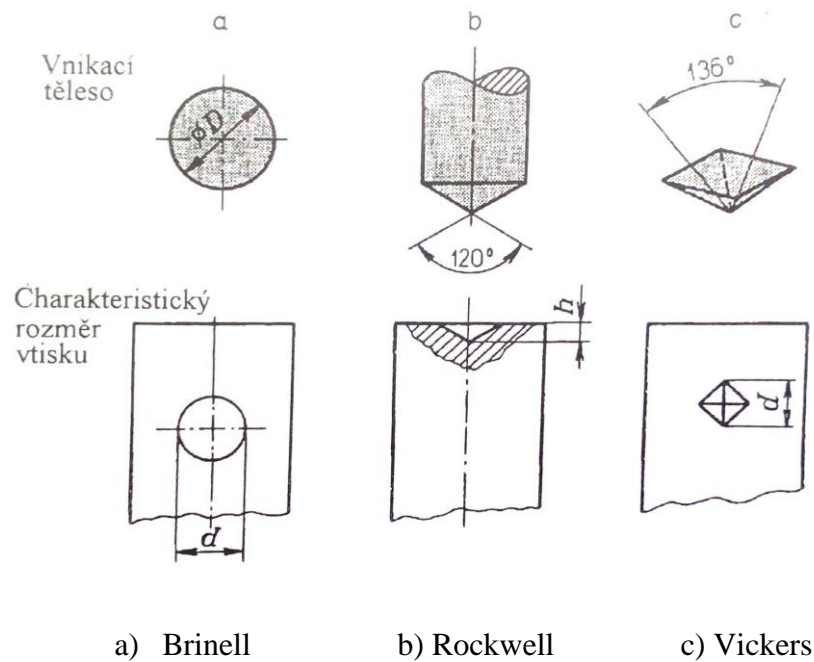
$$A_k = \frac{W}{b \cdot h_k} \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (8)$$

[4]

3.3 Zkoušky tvrdosti

Tvrdost je vlastnost povrchu materiálu bránit se proti místnímu vniknutí cizího tělesa. Určuje se vtlačováním indentoru (vnikacího tělíska) definovanou silou do povrchu zkoušeného materiálu. Jedná se o rychlou a levnou zkoušku, sloužící k odhadu mechanických vlastností daného materiálu.

Existují dva způsoby měření tvrdosti. První způsob, používaný u kovů a keramiky, kdy je indentor zamáčknut do materiálu tak, aby došlo k plastické deformaci. Tyto metody se označují jako metody vnikací. Druhý způsob měření tvrdosti je založen na odrazu zkušebního tělíska, v dnešní době se často využívá na hodnocení pryží a plastů. [4]



Obr. 14 Druhy vtisků dle metod. [4]

3.3.1 Zkouška tvrdosti dle Brinella

Podstatou Brinellovy zkoušky je vtlačování ocelové kalené kuličky průměru D do vyleštěné plochy zkušebního materiálu konstantním zatížením. Pro měření tvrdosti tuhých polymerů byly zvětšeny průměry měřících kuliček a snížena síla při jejich vtlačování. Tato metoda není vhodná pro měkké materiály.

Po provedení zkoušky se změří průměr nebo hloubka vtisku. Pomocí měřícího mikroskopu je daleko jednodušší měření průměru vtisku, kdežto přesné změření hloubky je mnohem obtížnější. Zkoumaný povrch musí být rovný, hladký, bez povrchových chyb a nečistot. Tloušťka vzorku nesmí být menší než osminásobek hloubky vtisku. [17]

3.3.2 Zkouška tvrdosti dle Rockwella

Jedná se o vnikací zkoušku, kde do povrchu zkušebního tělesa je vtlačován diamantový kužel nebo kulička definovaného průměru. Rockwell volil diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° a zaoblením vrcholu $0,2$ mm. Zkouška se uskutečňuje při dvou stupních zatížení a měří se výsledná hloubka vtisku. Metoda je vhodná pro kalené, zušlechtěné nebo jinak tepelně zpracované oceli. Nepožaduje se dokonale upravený povrch, protože zkouška se provádí tak, že při zatížení 98 N se hloubkoměr nastaví na nulu, zatíží se hlavní silou. Hodnota hloubky vtisku se odečítá po odtížení na původních 98 N. Důvodem jsou pružné deformace. [17]

3.3.3 Vickersova zkouška

Nejpoužívanější zkouška tvrdosti v Evropě. Známa podle tvrdoměru firmy Vickers. Diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° je vtlačován do zkušebního tělesa danou silou po dobu $10 - 15$ s. Úhel je volno tak, aby se eliminovalo tření v průběhu zkoušky a naměřené hodnoty příliš neodlišovaly od tvrdosti dle Brinella. Po provedení vtisku se měří délky jeho uhlopříček. [17]

3.3.4 Tvrdost SHORE

Existují různé typy měření tvrdosti Shore, které se od sebe odlišují tvarem vnikacích těles a charakteristikou použité pružiny. Jedná se o vnikací zkoušku, založenou na principu zatěžení pomocí pružiny, která musí být kontrolována a cejchována. Mezi nejznámější metody patří Shore A, D. První jmenovaná se používá pro měření tvrdosti elastomerů, druhá pak pro tvrdší polymery.

Podstatou zkoušky Shore D je měření odporu proti vlačovanému hrotu s danou geometrií. Povrch zkušebního tělesa musí být hladký, rovný a bez viditelných poruch. Velikost se volí dle počtu měření tak, aby vzdálenost mezi jednotlivými měřeními byla nejméně 12 mm a vzdálenost od okraje alespoň 5 mm. Tloušťka musí být nejméně 6 mm. Výsledné hodnoty tvrdosti se udávají v jednotkách Shore D.

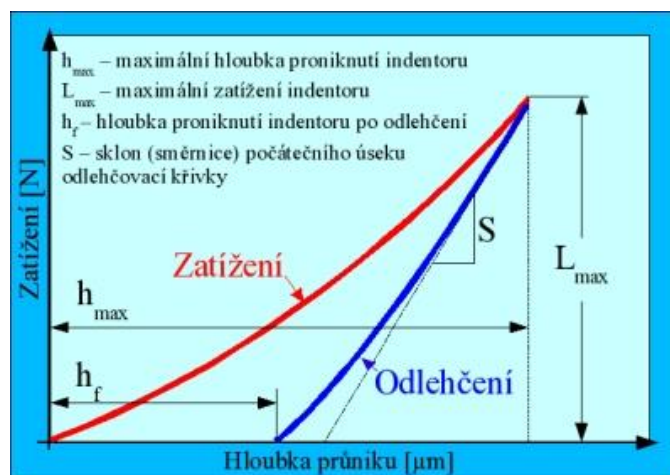
Měření probíhá na zkušebním stroji, který se skládá z vertikálně upevněné měřicí hlavy, stojanu s posuvnou opěrnou podložkou, výměnného závaží a ukazatele naměřené hodnoty. Zkušební těleso se položí na opěrnou podložku, přitlačí na měřicí hlavu a po stanovené době se odečte hodnota tvrdosti. Přítlačná síla je vyvozena pomocí závaží. Měření probíhá 10-15 s, výsledná hodnota se zjistí z aritmetického průměru pěti měření. [9]



Obr. 15 Tvrdoměr pro metodu Shore A, D. [20]

3.4 Zkoušky mikrotvrdomosti

Zkouška mikrotvrdomosti je charakteristická tím, že zatížení při měření je v řádu jednotek newtonů a stejně tak velikost vtisku je v řádech μm (10^{-6} m). Zkouška se řídí příslušnou normou ISO 14577, která slouží k vyhodnocení vtisku do materiálu s ohledem na zatížení a posun vnikacího tělesa v průběhu plastické i pružné deformace. Pro měření mikrotvrdomosti se používají metody dle Vickerse, Knoop a Berkoviče. [18]



Obr. 16 Závislost zatížení na hloubce vtisku při měření mikrotvrdomosti. [18]

3.4.1 Přehled základních parametrů

- Vtisková tvrdost H_{IT} je mírou resistance k trvalé deformaci nebo poškození.
- Vtiskový modul E_{IT} lze vypočítat ze směrnice tečny a je srovnatelný s Youngovým modulem materiálu, pokud nedochází k deformaci okolí vtisku.
- Vtiskové tečení C_{IT} je hodnotou tečení materiálu, může se vypočítat jako relativní změna hloubky vtisku.
- Koeficient zpětné relaxace η je poměr elastické práce a práce celkové. [18]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍL PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo:

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

5 EXPERIMENT

Praktická část bakalářské práce je zaměřena na zkoumání fyzikálně-mechanických vlastností vybraných druhů polymerů. Získané hodnoty jsou porovnávány s hodnotami etalonového materiálu ABS. Alternativní materiály byly vybrány s ohledem na možnost využití jejich vlastností při funkčním návrhu zrcátka. Zkoušky mechanických vlastností byly realizovány na vybraných polymerních materiálech PA6 60GF, Slovamid 15 (PA), Makrolon R30 (PC), POM, Nirion (PC), Slovamid 10 (PA). Výsledky byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

5.1 Příprava zkušebních těles

Příprava zkušebních těles probíhala dle příslušných norem ČSN EN ISO pro zkoušky vrubové houževnatosti dle Charpy, tahové zkoušky, zkoušky tvrdosti Shore D a zkoušky mikrotvrdosti. Tvar a rozměry zkušebních těles byly zhotoveny dle příslušné normy.

5.2 Sušení - Arburg Thermolift 100-2

Před zahájením vstřikování zkušebních těles bylo nutné granulát polymeru zbavit vlhkosti. Pro sušení bylo použito zařízení Arburg Thermolift 100-2, s regulací množství čerstvého a cirkulujícího vzduchu. Zařízení je vybaveno systémem SELOGICA. Výhodou je obsluha více vstřikovacích strojů a přívod materiálu přímo do plastikační jednotky.



Obr. 17 sušička Arburg Thermolift 100-2

5.3 Vstřikování – vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470 H

Výroba zkušebních těles byla provedena na vstřikovacím stroji Arburg Allrounder 470 H. Zařízení německého původu složí k vstřikování běžných polymerů, ale i pro více komponentní vstřikování. Jednoduché ovládání a programování procesů pomocí výklopné obrazovky umožňuje rychlou a kvalitní obsluhu vstřikovacího stroje. O řízení celého procesu se stará moderní systém SELOGICA. [19]



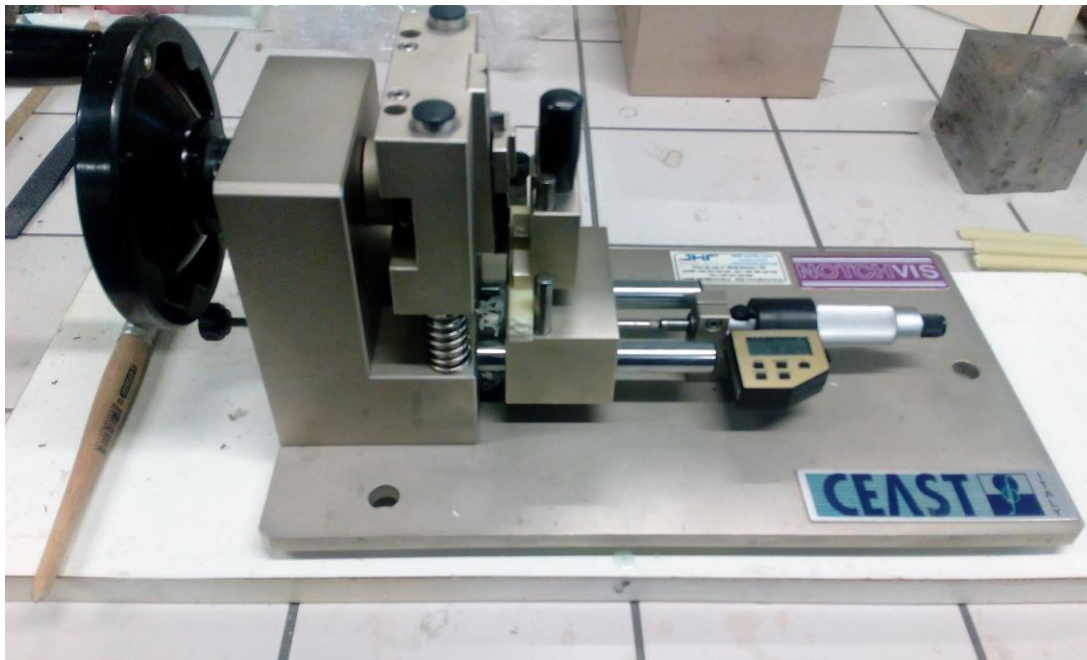
Obr. 18 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470 H.

Tab. 1 Technická data vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 470 H. [19]

| | |
|----------------------------------|------------------------|
| Uzavírací síla | max. 1000 kN |
| Zdvih otevření | max. 350 mm |
| Výška formy | min. - max. 250-500 mm |
| Světlost mezi upínacími deskami | max. 600-850 mm |
| Vzdálenost mezi vodícími sloupy | 470x470 mm |
| Velikost upínací desky (š. x v.) | 637x637 mm |
| Vyhazovací síla | max. 40 kN |
| Zdvih vyhazování | max. 175 mm |

5.4 Vrubování – vyřezávačka vrubů CEAST s mikrometrem

Zařízení slouží k vytvoření vrubů na zkušebních tělíscích pro vrubovou houževnatost. Vruby ve tvaru V se provádí dle normy ISO 179 a ISO 180. Ruční pohon přes excentr zajišťuje přímočarý vratný pohyb řezacího nože.



Obr. 19 Vrubovačka CEAST s mikrometrem.

5.4.1 Postup práce

Vzorek se upne do zařízení pomocí svěrky. Při dosažení doteku vzorku s řezacím nožem se mikrometr nastaví na nulu. Jednou rukou se rozpohybuje nůž a druhou rukou se pomocí mikrometru přisunuje vzorek až do dosažení potřebné hloubky vrubu.

6 MĚŘENÍ A VÝSLEDKY

6.1 Statistické prostředky

Zpracování naměřených hodnot bylo provedeno v programu Microsoft Excel s využitím vztahů pro statistické vyhodnocování.

- Aritmetický průměr (výběrový): je vyjádřením typické hodnoty popisující soubor mnoha hodnot. Suma výsledků dělena jejich počtem n :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

- Rozptyl s^2 : je definován jako střední hodnota čtverců odchylek jednotlivých hodnot od aritmetického průměru.

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (10)$$

- Směrodatná odchylka s : kvadratický průměr odchylek hodnot od aritmetického průměru.

$$s = \sqrt{s^2} \quad (11)$$

- Střední kvadratická chyba aritmetického průměru σ : „ Využití pro hodnocení přesnosti měření.

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

6.2 Rázová zkouška v ohybu – Charpyho kladivo ZWICK Roell HIT50J

Jedná se o moderní zařízení sloužící k měření dynamického zatížení. Hlavní charakteristikou přístroje je přesnost, spolehlivost a ergonomický design. Uložení kyvadla je provedeno pomocí dvojité uhlíkové tyče. Tato konstrukce eliminuje vibrace a poskytuje vysokou tuhost při nárazu. Výměna kyvadla je možná bez pomoci nářadí. Vysoké rozlišení digitálního snímače umožňuje přesné měření úhlu nárazu. Volitelná brzda plynule zastaví kyvadlo. [16]

6.2.1 Popis zkoušky

Zkouška byla provedena dle normy ČSN ISO 179-2. Před měřením bylo nutné kyvadlo zajistit ve výchozí poloze. Do počítače byly zadány veškeré hodnoty potřebné pro měření. Zkušební tělísko se umístilo na podpěry tak, aby byl vrub umístěn po směru pádu kyvadla. Středění vzorku bylo provedeno středící tyčinkou umístěnou na otočné hřídelce. Následovalo měření, které je nutné provádět oběma rukama z důvodu bezpečnosti. Po přeražení zkušebního vzorku je kyvadlo zastaveno kotoučovou brzdou, která nevykazuje téměř žádné opotřebení. V této zkoušce byly získány hodnoty vrubové houževnatosti A_k , deformační práce W_{max} a maximální síly nutné k přeražení zkušebního tělesa F_{max} . Zkouška probíhala při teplotě 23°C.

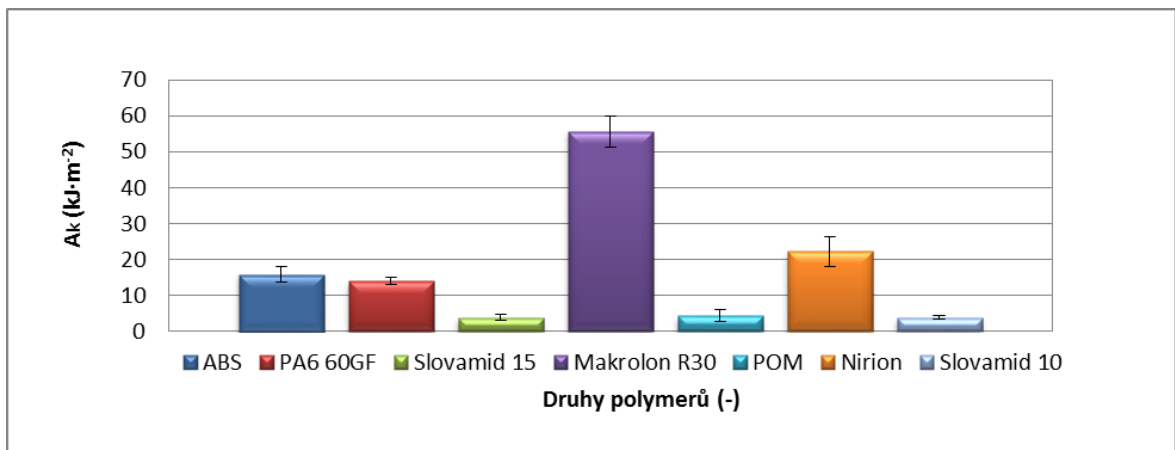


Obr. 20 Charpyho kladivo ZWICK Roell HIT50J

6.2.2 Vrubová houževnatost A_k

Tab. 2 Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti A_k .

| Vrubová houževnatost ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$) | | | | | | | |
|--|-----|----------|-------------|--------------|-----|--------|-------------|
| | ABS | PA6 60GF | Slovamid 15 | Makrolon R30 | POM | Nirion | Slovamid 10 |
| průměr | 16 | 14.0 | 3.9 | 55.6 | 4.4 | 22.3 | 3.8 |
| chyba σ | 2.1 | 1.6 | 0.9 | 4.3 | 1.7 | 4.2 | 0.5 |



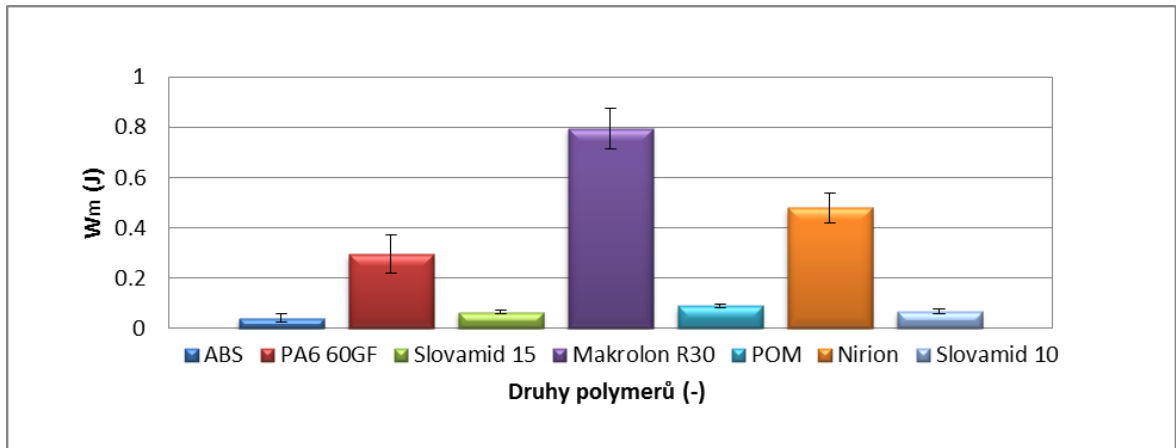
Obr. 21 Vrubová houževnatost A_k .

Z rázové zkoušky v ohybu vyplývá, že největší průměrné hodnoty dosáhl polymer Makrolon R30, $A_k = (55,6 \pm 4,3) \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Naopak polymer Slovamid 10 vykazoval nejnižší hodnotu, $A_k = (3,8 \pm 0,5) \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$, jak je patrné z obr. 21.

6.2.3 Deformační energie W_m

Tab. 3 Průměrné hodnoty deformační práce W_m .

| Deformační energie (J) | | | | | | | |
|------------------------|------|----------|-------------|--------------|------|--------|-------------|
| | ABS | PA6 60GF | Slovamid 15 | Makrolon R30 | POM | Nirion | Slovamid 10 |
| průměr | 0.04 | 0.30 | 0.07 | 0.79 | 0.09 | 0.48 | 0.07 |
| chyba σ | 0.02 | 0.08 | 0.01 | 0.08 | 0.01 | 0.06 | 0.01 |



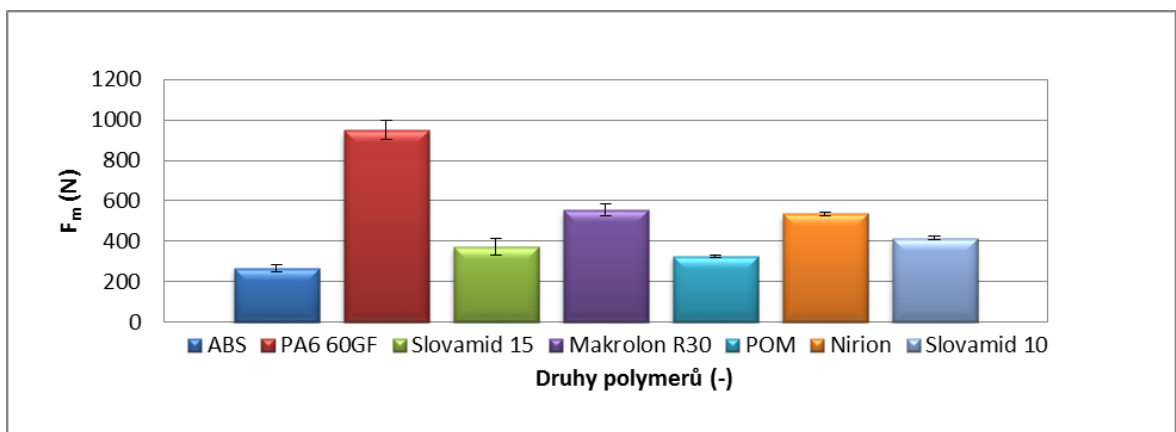
Obr. 22 Deformační energie W_m .

Při rázové zkoušce v ohybu měl největší energii potřebnou k přeražení zkušebního tělesa Makrolon R30, $W_m = (0,79 \pm 0,08)$ J. Referenční materiál ABS vykazoval nejnižší hodnotu deformační energie, $W_m = (0,04 \pm 0,02)$ J, jak je patrné z obr. 22.

6.2.4 Maximální síla F_m

Tab. 4 Průměrné hodnoty maximální síly F_m .

| Maximální síla (N) | | | | | | | |
|--------------------|-----|----------|-------------|--------------|-----|--------|-------------|
| | ABS | PA6 60GF | Slovamid 15 | Makrolon R30 | POM | Nirion | Slovamid 10 |
| průměr | 270 | 948 | 376 | 555 | 326 | 536 | 416 |
| chyba σ | 18 | 47 | 42 | 27 | 9 | 7 | 8 |



Obr. 23 Maximální síla F_m .

Při rázové zkoušce v ohybu bylo zjištěno, že nejvyšší maximální sílu spotřeboval PA6 60GF, $F_m = (948 \pm 47)$ N. U etalonového materiálu ABS byla zjištěna nejnižší síla, $F_m = (270 \pm 18)$ N, jak je patrné z obr. 23.

6.3 Tahová zkouška – ZWICK Roell 1456

Tahová zkouška probíhala na zařízení ZWICK Roell 1456. Tento stroj je určený pro mechanické zkoušky, a to zejména tahové, tlakové a ohybové zkoušky. Za pomoci nové generace software lze zařízení jednoduše programovat a obsluhovat přes běžný počítač. Měření lze provádět za normální i zvýšené teploty.

6.3.1 Popis zkoušky

Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 527-2/1B/10. Měření probíhalo za pokojové teploty 22°C. Nejprve bylo nutné nastavit parametry stroje, což jsou posuvové rychlosti a výchozí vzdálenost čelistí. Pro získání modulu pružnosti byla rychlost posuvu nastavena na hodnotu 1 mm·min⁻¹. Po získání modulu pružnosti byla rychlost zvýšena na hodnotu 10 mm·min⁻¹. Vzdálenost čelistí ve výchozí poloze byla 96 mm. Upínání zkušební vzorku probíhalo pomocí pneumaticky ovládaných čelistí. Na obrazovce počítače bylo možno pozorovat průběh zkoušky, kde byla vykreslována závislost zatěžujícího napětí na poměrném prodloužení. Výsledné hodnoty byly ukládány do tabulek.



Obr. 24 Zkušební stroj ZWICK 1456

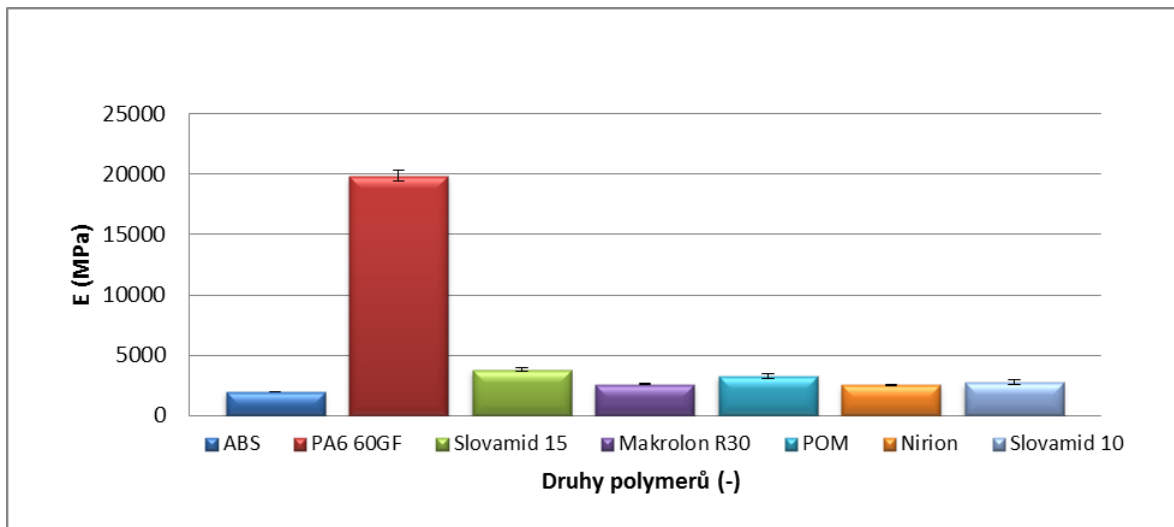
Tab. 5 Technická data stroje ZWICK 1456.

| | |
|-------------------------------|------------------|
| Maximální posuv příčniku | 800 mm/min |
| Snímače síly | 2,5 a 20 kN |
| Strojová výška | 1284 mm |
| Šířka pracovního prostoru | 420 mm |
| Extenzometry měření protažení | macro (přídavný) |
| Vyhodnocovací software | master - tah |

6.3.2 Modul pružnosti v tahu E

Tab. 6 Průměrné hodnoty modulu pružnosti E.

| Modul pružnosti (MPa) | | | | | | | |
|-----------------------|------|----------|-------------|--------------|------|--------|-------------|
| | ABS | PA6 60GF | Slovamid 15 | Makrolon R30 | POM | Nirion | Slovamid 10 |
| průměr | 1992 | 19880 | 3810 | 2586 | 3274 | 2552 | 2756 |
| chyba σ | 8 | 421 | 181 | 55 | 180 | 56 | 177 |



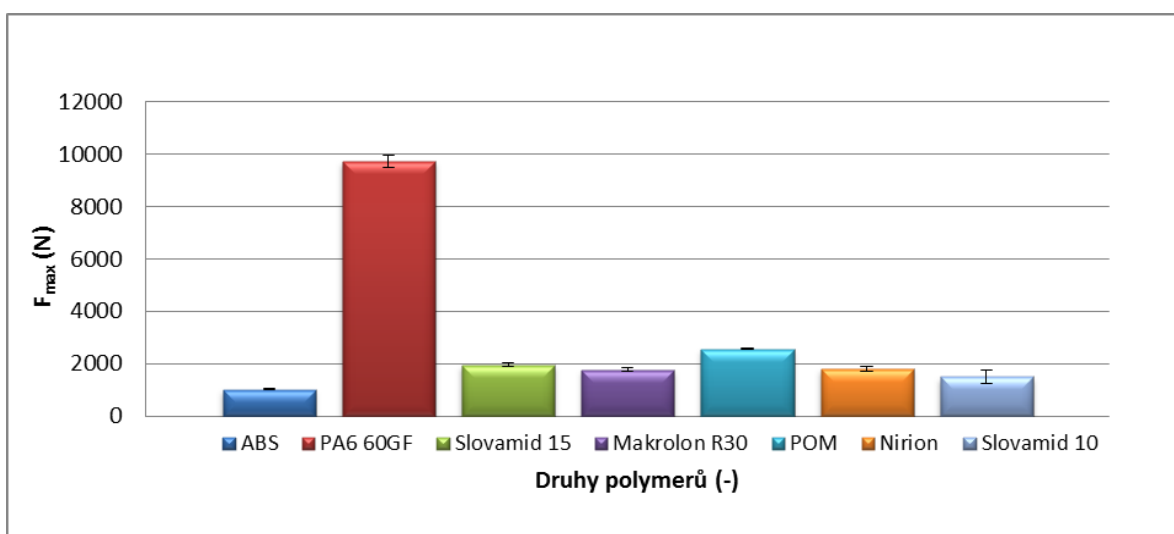
Obr. 25 Srovnání modulu pružnosti.

Z tahové zkoušky vyplývá, že nejvyšší modul pružnosti v tahu vykazoval PA6 60GF, $E = (19880 \pm 421)$ MPa. Naopak základní polymer ABS měl nejnižší modul pružnosti, $E = (1992 \pm 8)$ MPa, jak je patrné na obr. 25.

6.3.3 Maximální síla F_{max}

Tab. 7 Průměrné hodnoty maximální síly F_{max} .

| Maximální síla (N) | | | | | | | |
|--------------------|------|----------|-------------|--------------|------|--------|-------------|
| | ABS | PA6 60GF | Slovamid 15 | Makrolon R30 | POM | Nirion | Slovamid 10 |
| průměr | 1022 | 9724 | 1956 | 1770 | 2558 | 1812 | 1500 |
| chyba σ | 18 | 221 | 75 | 59 | 30 | 90 | 238 |



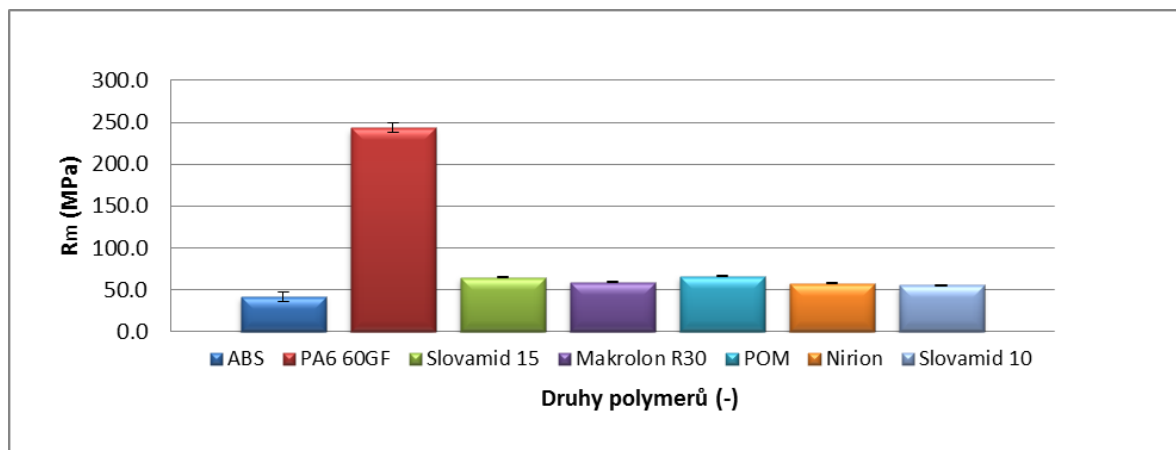
Obr. 26 Maximální síla F_{max} .

Při tahové zkoušce byla největší zatěžující síla u polymeru PA6 60GF, $F = (9724 \pm 221)$ N. Nejmenší síla byla zaznamenána u polymeru ABS, $F = (1022 \pm 18)$ N, jak je patrné z obr. 26.

6.3.4 Maximální napětí R_m

Tab. 8 Průměrné hodnoty maximálního napětí R_m .

| Maximální napětí (MPa) | | | | | | | |
|------------------------|------|----------|-------------|--------------|------|--------|-------------|
| | ABS | PA6 60GF | Slovamid 15 | Makrolon R30 | POM | Nirion | Slovamid 10 |
| průměr | 42.2 | 243.0 | 64.8 | 59.1 | 66.2 | 57.9 | 55.4 |
| chyba σ | 1.7 | 5.7 | 0.5 | 0.3 | 0.5 | 0.2 | 1.0 |



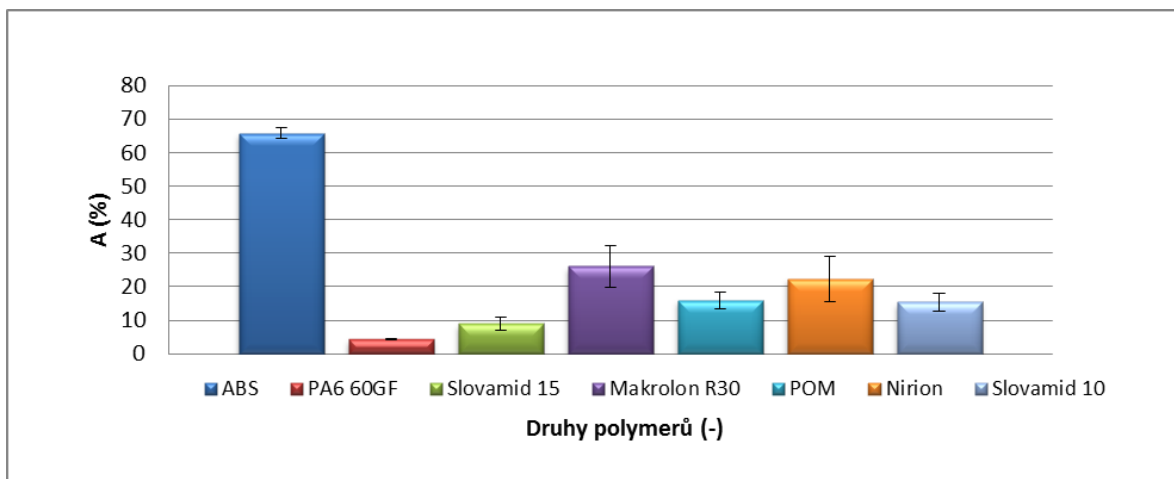
Obr. 27 Maximální napětí R_m .

Meze pevnosti při tahové zkoušce byla nejvyšší u PA6 60GF, $R_m = (243,0 \pm 5,7)$ MPa. Polymer ABS měl nejmenší mez pevnosti, $R_m = (42,2 \pm 1,7)$ MPa, jak je patrné z obr. 27.

6.3.5 Tažnost materiálů A

Tab. 9 Průměrné hodnoty tažnosti materiálů A.

| Tažnost (%) | | | | | | | |
|----------------|-----|----------|-------------|--------------|-----|--------|-------------|
| | ABS | PA6 60GF | Slovamid 15 | Makrolon R30 | POM | Nirion | Slovamid 10 |
| průměr | 66 | 4 | 9 | 26 | 16 | 22 | 15 |
| chyba σ | 2 | 1 | 2 | 6 | 2 | 7 | 3 |



Obr. 28 Tažnost materiálů.

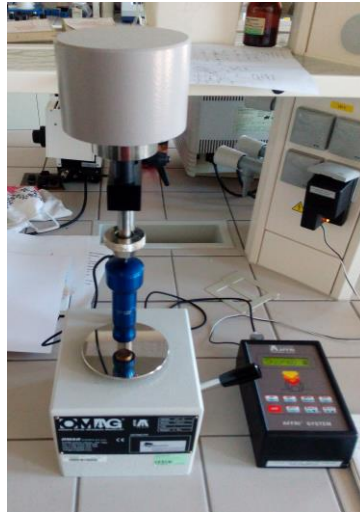
Z tahové zkoušky bylo zjištěno, že největší tažnost dosáhl materiál ABS, $A = (66 \pm 2) \%$. Nejmenší tažnost byla zjištěna u PA6 60GF, $A = (4 \pm 1) \%$, jak je patrné z obr. 28.

6.4 Měření tvrdosti Shore D - tvrdoměrem OMAG ART 13

Měření tvrdosti Shore D probíhalo na tvrdoměru OMAG ART 13. Jedná se o kompaktní tvrdoměr určený k měření tvrdosti polymerů a pryží. Skládá se z podstavce, zdvihacího zařízení, sondy s pružinou a s ocelovým indentorem pro měření plastů, závaží a zaznamenávacího zařízení. Přístroj je napájen ze sítě přes transformátor.

6.4.1 Popis zkoušky

Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 868. Měření je podstatně jednoduché a nevyžaduje velké znalosti. Zkušební vzorek se umístí na podložku, tak aby vtisk nebyl blíže než 5 mm od okraje vzorku. Zdvihacím zařízením se vzorek přitiskne na sondu vahou 4536 g, indenter vnikne do materiálu. Síla působí na vzorek po dobu 5 sekund, poté se odečte hodnota ze zaznamenávacího zařízení. Následně se podložka se vzorkem spustí do výchozí polohy a může se pokračovat v dalším měření, které by nemělo probíhat blíže jak 12 mm od předešlého měření. Výsledkem této zkoušky je aritmetický průměr pěti měření. Teplota při měření byla 22°C.

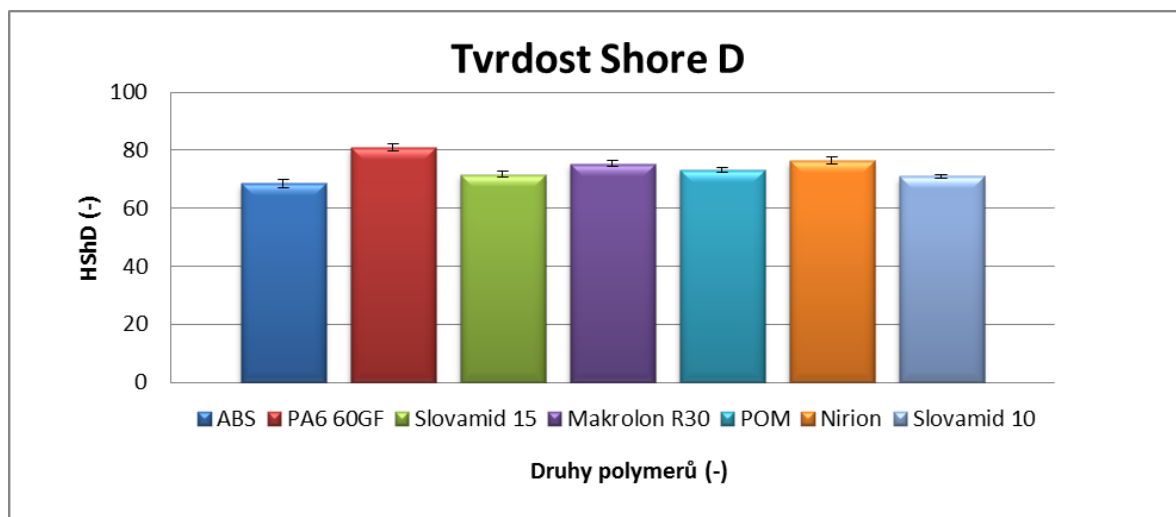


Obr. 29 Tvrdomer OMAG ART 13

6.4.2 Tvrđost Shore D

Tab. 10 Průměrné hodnoty tvrdosti Shore D.

| Tvrđost Shore D | | | | | | | |
|-----------------|------|----------|-------------|--------------|------|--------|-------------|
| | ABS | PA6 60GF | Slovamid 15 | Makrolon R30 | POM | Nirion | Slovamid 10 |
| průměr | 68.7 | 81.0 | 71.7 | 75.3 | 73.3 | 76.5 | 71.0 |
| chyba σ | 1.4 | 1.3 | 0.9 | 1.0 | 0.8 | 1.3 | 0.8 |



Obr. 30 Tvrđost Shore D.

Při zkoušce Shore D byla zjištěna nevyšší tvrdost u polymeru PA6 60GF ($81,0 \pm 1,3$) Shore D. Nejnižší tvrdost vykázal referenční polymer ABS ($68,7 \pm 1,4$) Shore D.

6.5 Měření mikrotvrdomosti – Micro Combi Tester

Měření mikrotvrdomosti bylo provedeno na zařízení Micro Combi Tester od společnosti CSM Instruments. Přístroj je schopen měřit tvrdost materiálů různými druhy zatížení (od 0 do 30 N). Posuvná podstava umožňuje pohyb ve všech třech osách (x, y, z), z tohoto důvodu není nutné během měření ručně pohybovat se vzorkem.

6.5.1 Popis zkoušky

Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 14577-1. Jednalo se o zkoušku podle Vickerse, tudíž indentorem byl pravidelný čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° . Nejprve zařízení provedlo kontrolní vtisk pro zjištění výchozí polohy pro měření. Pro vlastní měření bylo nutné vzorek posunout tak, aby vtisk indentoru nebyl ve stejném místě. Přístroj v průběhu měření při zatížení 0,5 N a výdrži 90 s vykresloval křivku zatěžující síly na hloubce vtisku. Po odtížení byly v grafu vykresleny dvě křivky, které určují plastickou a elastickou deformaci.

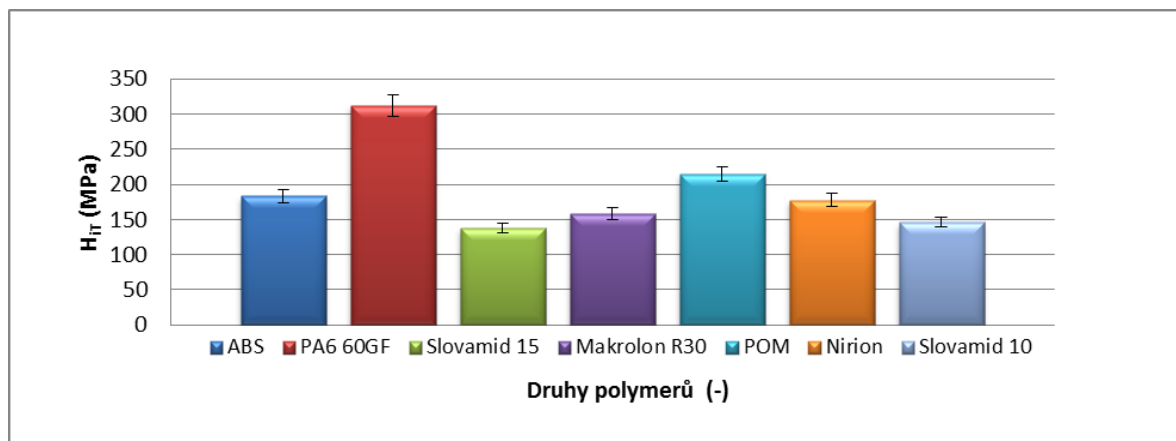


Obr. 31 Tvrdoměr Micro Combi Tester.

6.5.2 Vtisková tvrdost H_{IT}

Tab. 11 Průměrné hodnoty vtiskové tvrdosti H_{IT} .

| Vtisková tvrdost (MPa) | | | | | | | |
|------------------------|-----|----------|-------------|--------------|-----|--------|-------------|
| | ABS | PA6 60GF | Slovamid 15 | Makrolon R30 | POM | Nirion | Slovamid 10 |
| průměr | 183 | 313 | 138 | 158 | 215 | 178 | 146 |
| chyba σ | 9 | 16 | 7 | 8 | 11 | 9 | 7 |



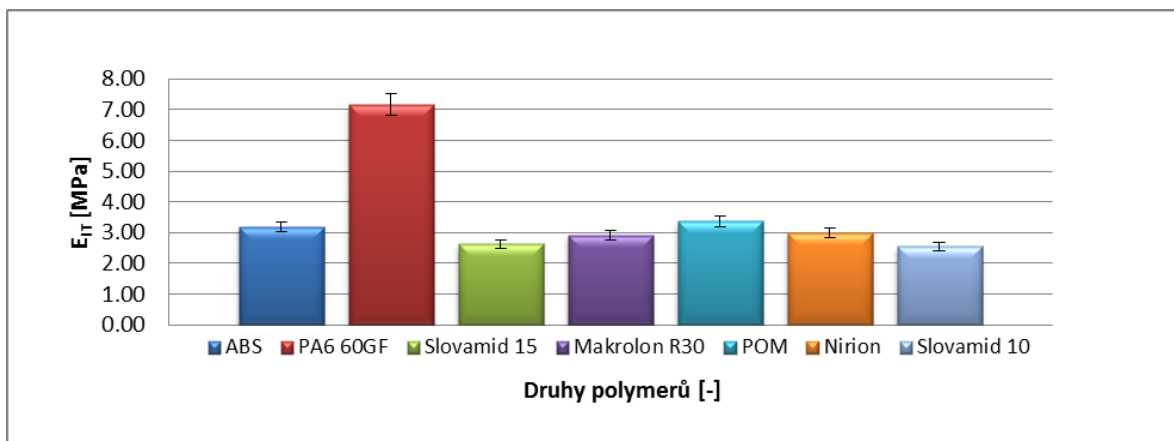
Obr. 32 Vtisková tvrdost H_{IT} .

Největší vtisková tvrdost byla zjištěna u polymeru PA6 60GF, $H_{IT} = (313 \pm 16)$ MPa. Nejmenší vtisková tvrdost byla u polymeru Slovamid 15, $H_{IT} = (138 \pm 7)$ MPa, jak je patrné na obr. 32.

6.5.3 Vtiskový modul E_{IT}

Tab. 12 Průměrné hodnoty vtiskového modulu E_{IT} .

| Vtiskový modul (MPa) | | | | | | | |
|----------------------|------|----------|-------------|--------------|------|--------|-------------|
| | ABS | PA6 60GF | Slovamid 15 | Makrolon R30 | POM | Nirion | Slovamid 10 |
| průměr | 3.20 | 7.16 | 2.64 | 2.92 | 3.37 | 3.00 | 2.55 |
| chyba σ | 0.16 | 0.36 | 0.13 | 0.15 | 0.17 | 0.15 | 0.13 |

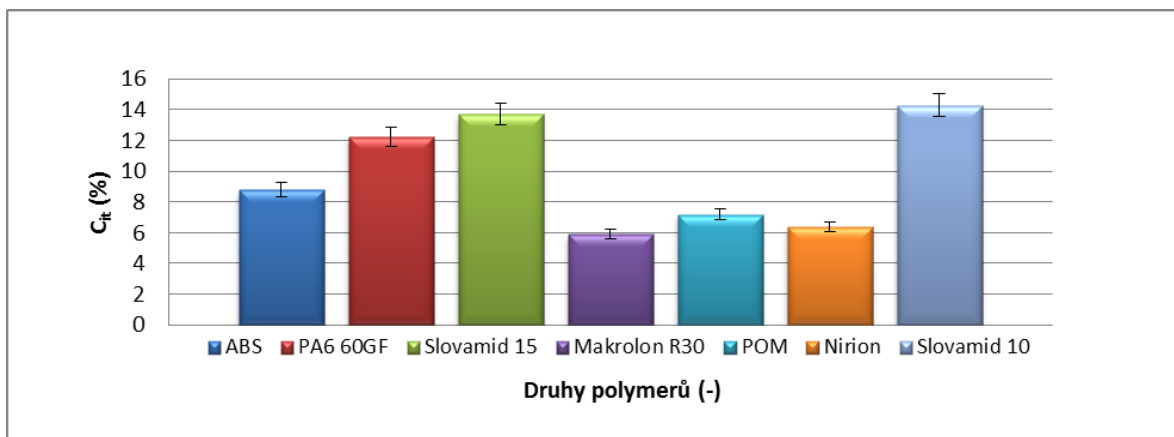

 Obr. 33 Vtiskový modul E_{IT} .

Největší hodnotu vtiskového modulu pružnosti, který reprezentuje tuhost testované povrchové vrstvy, vykázal PA6 60GF, $E_{IT} = (7,16 \pm 0,36)$ MPa. Naopak u polymeru Slovamid 10 byla hodnota vtiskového modulu pružnosti (tuhosti) nejnižší, $E_{IT} = (2,55 \pm 0,13)$ MPa, jak je patrné z obr. 33.

6.5.4 Vtiskové tečení C_{IT}

 Tab. 13 Průměrné hodnoty vtiskového tečení C_{IT} .

| Vtiskové tečení (%) | | | | | | | |
|---------------------|-----|----------|-------------|--------------|-----|--------|-------------|
| | ABS | PA6 60GF | Slovamid 15 | Makrolon R30 | POM | Nirion | Slovamid 10 |
| průměr | 9 | 12 | 14 | 6 | 7 | 6 | 14 |
| chyba σ | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 0.7 |

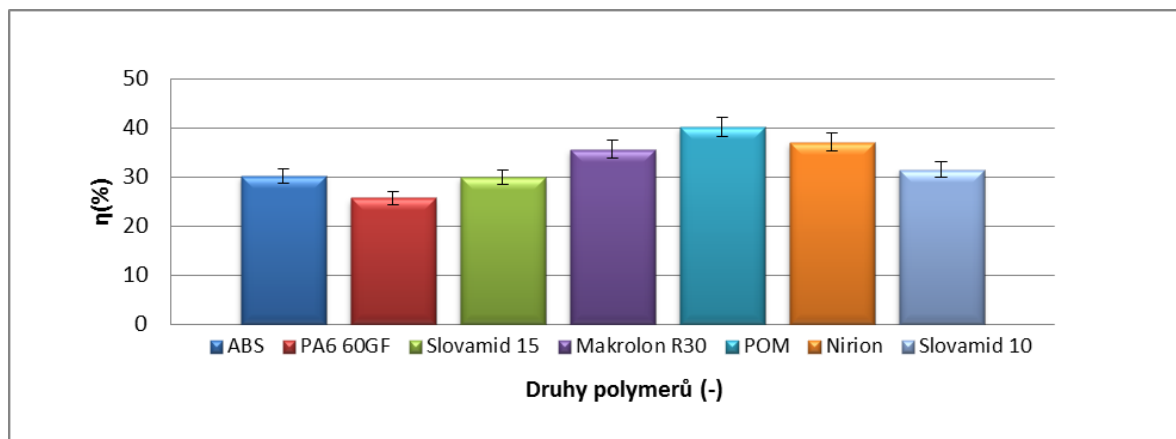

 Obr. 34 Vtiskové tečení C_{IT} .

U vtiskového tečení byla naměřena největší hodnota u polymeru Slovamid 10, $C_{IT} = (14 \pm 0,7) \%$. Nejnižší hodnota byla naměřena u polymeru Makrolon R30, $C_{IT} = (6 \pm 0,3) \%$, jak je patrné z obr. 34.

6.5.5 Koeficient zpětné relaxace η

Tab. 14 Průměrné hodnoty koeficientu zpětné relaxace η .

| Koeficient zpětné relaxace η | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------|----------|-------------|--------------|------|--------|-------------|
| | ABS | PA6 60GF | Slovamid 15 | Makrolon R30 | POM | Nirion | Slovamid 10 |
| průměr | 30.22 | 25.7 | 30.0 | 35.7 | 40.2 | 37.0 | 31.5 |
| chyba σ | 2 | 1.3 | 1.5 | 1.8 | 2.1 | 1.9 | 1.6 |



Obr. 35 Koeficient zpětné relaxace η .

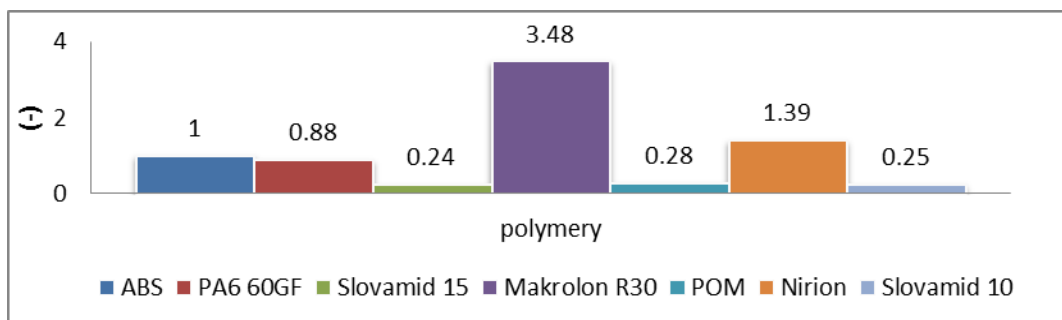
Největší koeficient zpětné relaxace byl naměřen u polymeru POM, $\eta = (40,2 \pm 2,1) \%$.

U polymeru PA6 60GF byla konstanta zpětné relaxace nejnižší, $\eta = (25,7 \pm 1,3) \%$, jak je patrné z obr. 35.

7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

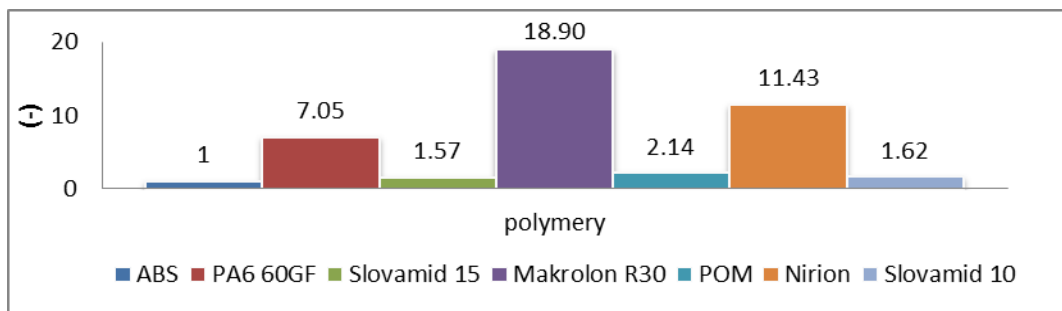
Praktická část bakalářské práce zahrnuje testování mechanických vlastností vybraných typů polymerních materiálů a porovnání jejich výsledků se základním polymerním materiálem ABS. Mezi alternativní polymerní materiály byly zahrnuty polymery PA6 60GF, Slovamid 15 (PA), Makrolon R30 (PC), POM, Nirion (PC), Slovamid 10 (PA). Byly provedeny následující testy mechanických vlastností, rázová zkouška v ohybu, tahová zkouška, zkouška tvrdosti Shore D, zkouška mikrotvrdosti. Pro snadnější orientaci a rychlé porovnání naměřených hodnot byly použity tzv. bezrozměrné hodnoty vyjádřené jako poměr jednotlivých měření k hodnotám dosaženým u původního materiálu (ABS). Bezrozměrné hodnoty byly následně graficky znázorněny a vyhodnoceny.

7.1 Vyhodnocení rázové zkoušky v ohybu



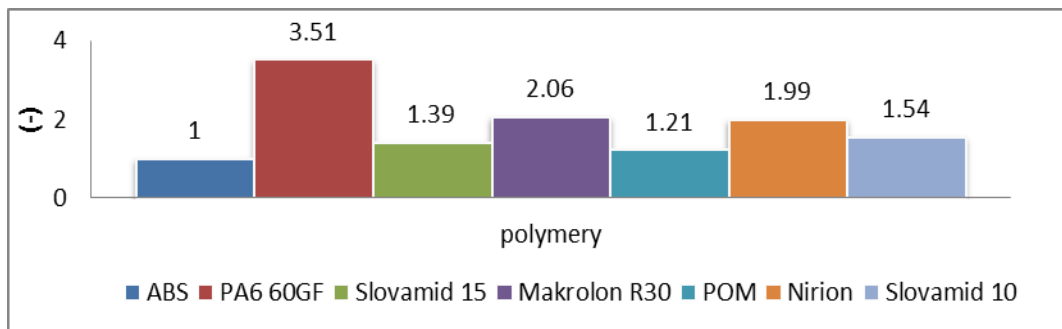
Obr. 36 Vrubová houževnatost.

Z výsledků měření rázové zkoušky v ohybu bylo zjištěno, že nejvyšší hodnota vrubové houževnatosti byla naměřena u polymeru Makrolon R30, nejmenší hodnota vrubové houževnatosti byla vykázána u polymeru Slovamid 10. Při bližším pohledu je zřejmé, že PC Makrolon R30 vykázal v průměru 3x větší hodnoty vrubové houževnatosti při porovnání se základním materiálem ABS. Dalším polymerem, který dosáhl vyšší hodnoty vrubové houževnatosti, byl materiál Nirion, jehož vrubová houževnatost byla v průměru o 39% vyšší než vrubová houževnatost u základního materiálu ABS. Největší pokles vrubové houževnatosti byl zaznamenán u polymeru Slovamid 15, POM a Slovamid 10, jejichž hodnoty dosáhly v průměru 25% v porovnání se základním materiálem, jak je patrné z obr. 36.



Obr. 37 Deformační práce.

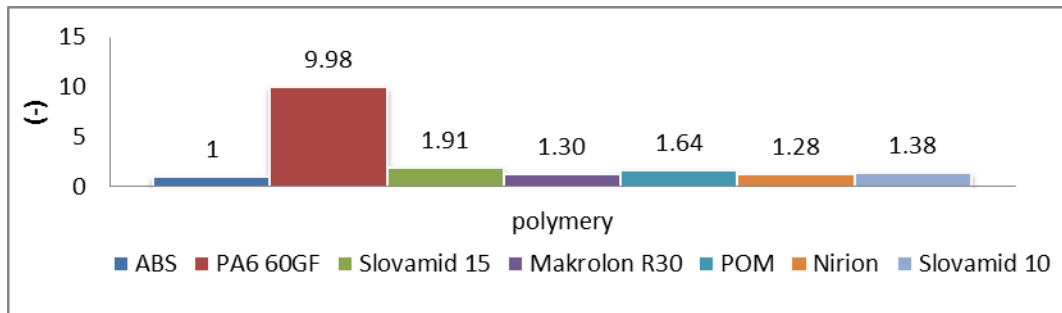
Při vyhodnocování deformační práce bylo zjištěno, že nejvyšší nárůst deformační práce vykázal Makrolon R30, naopak nejmenších hodnot bylo dosaženo u sledovaného základního materiálu ABS. Všechny typy vybraných materiálu vykázaly nárůst deformační práce v porovnání se základním materiálem. Polymer Makrolon R30 vykázal více než 18 násobný nárůst hodnoty vrubové houževnatosti v porovnání se základním materiálem. Nejmenší nárůst zaznamenal polymer Slovamid 15, u kterého nárůst vrubové houževnatosti byl o 57% v porovnání se základním materiálem, jak je patrné z obr. 37.



Obr. 38 Maximální síla.

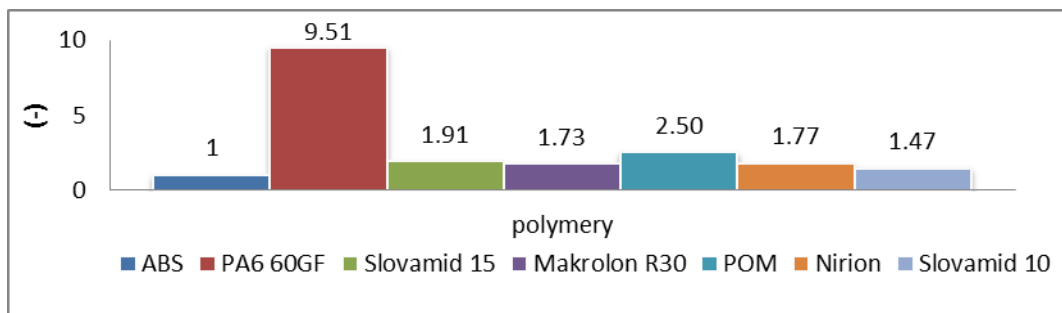
Výsledné hodnoty maximální síly zjištěné při rázové zkoušce v ohybu ukázaly, že všechny typy testovaných polymerních materiálu vykázaly nárůst maximální síly s porovnáním se základním materiálem ABS. Nejvyšší nárůst maximální síly vykázal materiál PA6 60GF, jehož průměrná hodnota byla více než trojnásobná. Nejmenší nárůst vykázal naopak materiál POM, u kterého zvýšení maximální síly s porovnáním se základním materiálem bylo o 21%, jak je patrné z obr. 38.

7.2 Vyhodnocení tahové zkoušky



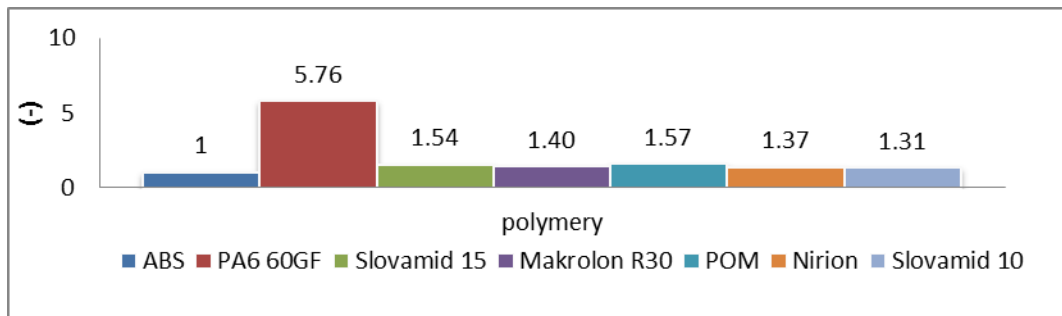
Obr. 39 Modul pružnosti.

Z výsledků zkoušky tahem bylo zjištěno, že nejvyšší nárůst modulu pružnosti v tahu, který reprezentuje tuhost zkušebního tělesa, vykázal materiál PA6 60GF. Výsledky dále ukázaly, že všechny vybrané testované polymerní materiály dostály vyšší hodnoty tuhosti v porovnání se základním sledovaným materiálem ABS. Více než devítinásobný nárůst hodnot tuhosti byl zaznamenán u polymeru PA6 60GF. Nejmenší nárůst tuhosti vykázal polymer Nirion, kde byl nárůst pouze o 28% v porovnání se základním materiálem, jak je patrné z obr. 39.



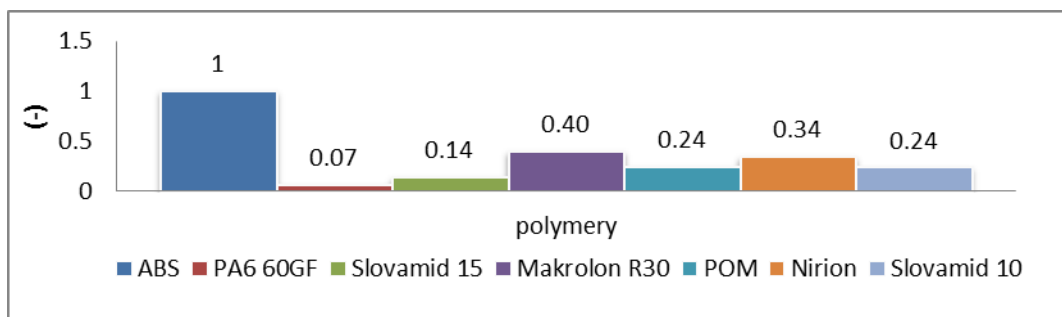
Obr. 40 Maximální síla.

Výsledné hodnoty maximální síly zjištěné při tahové zkoušce ukázaly, že všechny typy testovaných polymerních materiálů vykázaly nárůst maximální síly s porovnáním se základním materiálem ABS. Nejvyšší nárůst maximální síly vykázal materiál PA6 60GF, kde maximální síla byla více jak devítinásobná. Nejmenší nárůst naopak vykázal materiál Slovamid 10, u kterého zvýšení maximální síly s porovnáním se základním materiálem bylo o 47%, jak je patrné z obr. 38.



Obr. 41 Maximální napětí.

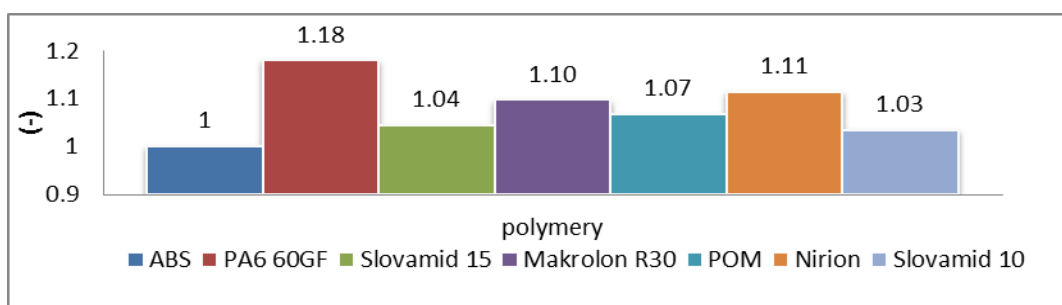
Maximální napětí naměřené při tahové zkoušce vykázal materiál PA6 60GF, kde byl nárůst více než pětinasobný. U všech polymerních materiálů byl zaznamenán nárůst v porovnání se základním materiálem ABS. Nejnižší nárůst vykázal materiál Slovamid 10, kde maximální napětí bylo navýšeno pouze o 31 %, jak je patrné z obr. 41.



Obr. 42 Tažnost.

Z výsledků měření tahové zkoušky je patrné, že hodnoty tažnosti vykázaly pokles u všech zmiňovaných polymerů. Největší pokles byl zaznamenán u polymeru PA6 60GF, kde tažnost byla pouze 7% v porovnání se základním materiálem. Nejnižší pokles byl zaznamenán u materiálu Makrolon R30, kde tažnosti poklesla o 40%.

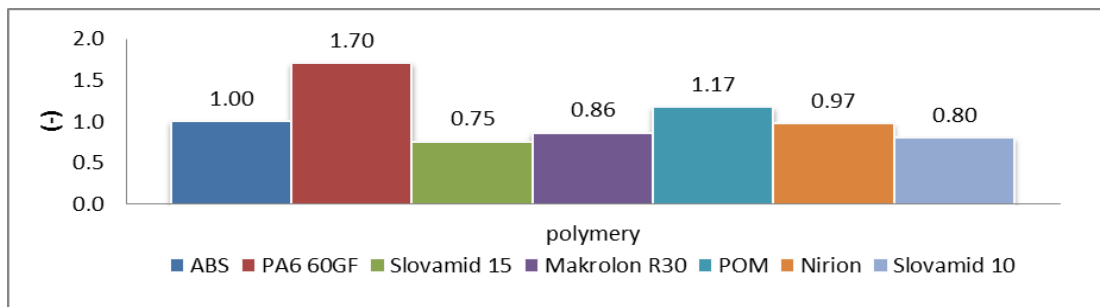
7.3 Vyhodnocení tvrdosti Shore D



Obr. 43 Tvrdost Shore D.

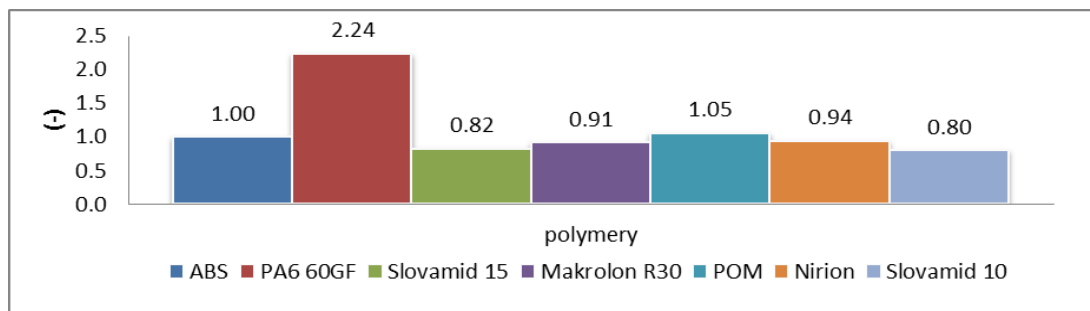
Výsledné hodnoty tvrdosti zjištěné při zkoušce Shore D ukázaly, že všechny typy testovaných polymerních materiálů vykázaly nárůst maximální síly s porovnáním se základním materiálem ABS. Nejvyšší nárůst tvrdosti dle Shore D vykázal materiál PA6 60GF. Materiály Slovamid 15, POM a Slovamid 10 vykázaly nárůst tvrdosti Shore D pouze do 10%, jak je patrné z obr. 38.

7.4 Vyhodnocení mikrotvrdosti



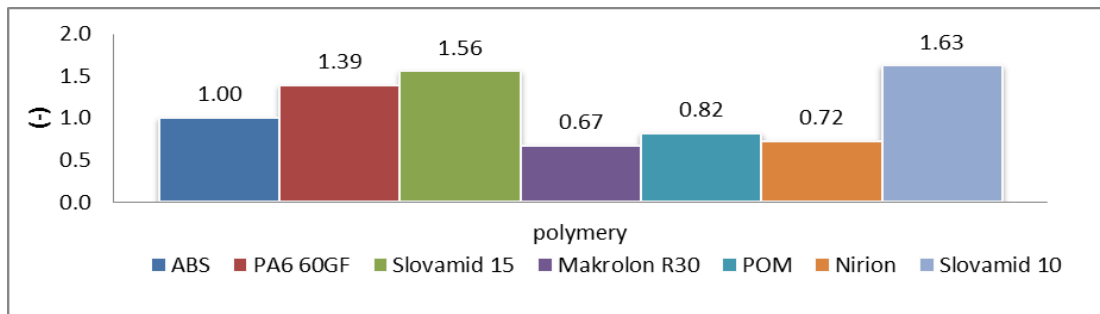
Obr. 44 Vtisková tvrdost.

Výsledné hodnoty vtiskové tvrdosti zjištěné při měření mikrotvrdosti ukázaly, že u polymeru PA6 60GF byl nárůst vtiskové tvrdosti v porovnání se základním materiálem o 70%. Dále polymer POM vykázal o 17% vyšší vtiskovou tvrdost oproti polymeru ABS. U ostatních srovnávaných materiálů byla vtisková tvrdost nižší než u základního materiálu ABS, jak je patrné z obr. 44.



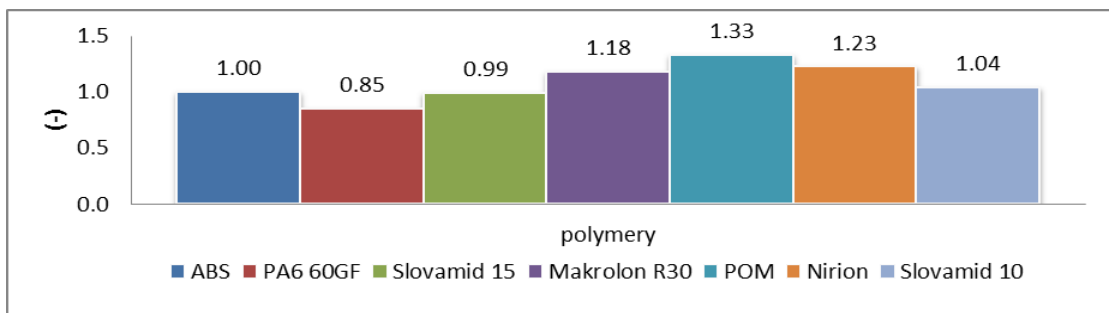
Obr. 45 Vtiskový modul.

Při vyhodnocování vtiskového modulu bylo zjištěno, že nejvyšší nárůst vykázal PA6 60GF (více jak dvojnásobný nárůst v porovnání s polymerem ABS). Materiály Makrolon R30, POM a Nirion měly srovnatelný vtiskový modul jako základní materiál. U polymerů Slovamid 15 a Slovamid 20 byl zjištěn pokles o 20%, jak je patrné z obr. 37.



Obr. 46 Vtiskové tečení.

U vtiskového tečení nejvyšší hodnotu vykázal Slovamid 10, kde nárůst v porovnání s původním materiálem byl 63%. Nárůst byl také znatelný u polymerů PA6 60GF a Slovamid 15, kde nárůst byl 39% respektive 56%, jak je patrné z obr. 46.



Obr. 47 Koeficient zpětné relaxace.

Z výsledků koeficientu zpětné relaxace bylo zjištěno, že srovnatelné vlastnosti s původním materiálem ABS byly u polymerů Slovamid 15 a Slovamid 10. Polymer PA6 60GF vykázal o 15 % nižší koeficient zpětné relaxace než původní materiál ABS. Největší zpětná relaxace byla zjištěna u polymeru POM, kde byl nárůst 33%, v porovnání se základním materiálem, jak je patrné z obr. 47.

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá materiálovým řešením zpětného zrcátka automobilu pro sportovní účely. Důraz je kladen především na zachování funkčnosti celého komponentu zpětného zrcátka. Na základě identifikační zkoušky byl jako základní materiál zvolen polymer ABS, následně byly vybrány alternativní typy polymerních materiálů PA6 60GF, Slovamid 15, Makrolon R30, POM, Nirion, Slovamid 10. Polymery byly následně srovnávány z hlediska mechanických vlastností se základním materiálem. Byly provedeny následující zkoušky: rázová zkouška v ohybu, tahová zkouška, zkouška tvrdosti Shore D a zkouška mikrotvrdosti. Naměřené výsledky byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z výsledků měření vyplynulo, že u zkoušky rázem v ohybu vykázal nejlepší vlastnosti polymer Makrolon R30. U vrubové houževnatosti i práce spotřebované na přeražení zkušebního tělesa vykázal nejvyšší hodnoty polymer Makrolon R30. Na druhém místě se umístil polymer Nirion.

U tahové zkoušky vykázal nejlepší vlastnosti polymer PA6 60GF, pouze tažnost měl nejnížší v porovnání s původním materiálem. Vykázal také nejlepší hodnoty u maximální pevnosti v tahu. Rovněž u maximální síly materiál PA6 60GF dosáhl nejvyšších hodnot. Tuhost, reprezentovaná modulem pružnosti v tahu byla rovněž u polymeru PA6 60GF nejvyšší.

Nejvyšší hodnotu tvrdosti Shore D vykázal polymer PA6 60GF.

Z výsledků měření mikrotvrdosti lze usoudit, že nejlepší vlastnosti vykázal polymer PA6 60GF. PA6 60GF dosáhl nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti a vtiskového modulu pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované povrchové vrstvy. Pokud hovoříme o vtiskovém tečení (kríp), zde dosáhl nejmenší hodnoty materiál Makrolon R30.

Při vyhodnocení všech měření bylo zjištěno, že ve statických zkouškách byly nejvyšší hodnoty vykázány u polymeru PA6 60GF. U dynamické zkoušky rázem v ohybu vykázal nejvyšší hodnoty polymer Makrolon R30. Zásadní roli při funkčnosti zrcátka hraje také hmotnost, která je u polymeru Makrolon R30 o 30% nižší než u polymeru PA6 60GF, který je také ekonomicky nákladnější. Z těchto důvodů byl zvolen polymer Makrolon R30 jako vhodný alternativní materiál pro výrobu zpětného zrcátka sportovního automobilu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1995. ISBN 80-708-0241-3.
- [2] *Pokročilé konstrukční materiály* [online]. Strojní fakulta, VŠB-TU Ostrava, 2009 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://projekt150.ha-vel.cz/home>
- [3] VACEK, Zdeněk. Historie použití plastů v automobilech: Z dehtu i konopí. *Veterán auto* [online]. 2011 [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: <http://veteran.auto.cz/clanek/393/historie-pouziti-plastu-v-automobilech-z-dehtu-i-konopi>
- [4] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I.: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-720-4193-2.
- [5] BĚHÁLEK, Luboš. *Přehled základních termoplastů, reaktoplastů a termoplastických elastomerů* [online]. Technická univerzita v Liberci, 2006 [cit. 2016-01-23]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/VIP%20PLASTY.pdf
- [6] BĚHÁLEK, Luboš.: Polymery [online]. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [7] *Konstrukce termoplastů a způsob jejich svařování* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2014 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/12501/Konstrukce%20z%20termoplastu%20a%20zp%C5%99osoby%20jejich%20svarovani.pdf?sequence=1>
- [8] Zpětné zrcátko. *Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Zp%C4%9Btn%C3%A9_zrc%C3%A1tko
- [9] JARUŠEK, Jaroslav. *Metody zkoumání polymerů*. 2. vyd. Pardubice: VŠCHT, 1984.
- [11] *Zkouška rázem v ohybu metoda Charpy* [online]. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava [cit. 2016-03-16]. Dostupné z: <https://www.fast.vsb.cz/export/sites/fast/206/cs/resene-projekty/frvs-2011-2894/zkouska-razem-v-ohybu-metodou-charpy.pdf>

- [12] BĚHÁLEK, Luboš.: Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání [online]. [cit. 2016-01-30]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [13] Bezpečností výbava (SKUPINA N, A, B, SP,ST) [online]. [cit. 2016-01-23]. Dostupné z: <http://www.autoklub.cz/dokument/4462-cl-253-bezpecnostni-vybava-skupina-n-a.html>
- [14] Citroen magazín [online]. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: http://www.citroen-magazin.cz/pdf/511_cm_02_2010.pdf
- [15] CERS performance [online]. [cit. 2016-01-23]. Dostupné z: <http://cersperformance.com/galerie/sezona-2015/>
- [16] Rázová kladiva HIT 50 J. *Zwick Roell* [online]. [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://www.zwick.cz/cs/produkty/produkty-pro-razove-zkousky/razova-kladiva/razova-kladiva-hit-do-50-j.html>
- [17] *Zkoušky tvrdosti* [online]. Plzeň [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf
- [18] *Měření mikrotvrdosti tenkých vrstev* [online]. Plzeň [cit. 2016-02-06]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/vrstvy-mikrotrvdost.html>
- [19] ARBURG ALLROUNDER 470H. *Arburg* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_ALLROUNDER_470H_TD_680311_en_GB.pdf
- [20] Zkoušky tvrdosti dle SHORE. *Testsysteme* [online]. Praha [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.testsysteme.cz/cz/zkusebni-laborator/provadime-zkousky-tvrdosti-materialu/zkousky-tvrdosti-dle-shore/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|--------------|------------------------------------|
| A | Tažnost |
| A_k | Vrubová houževnatost |
| ABS | Akrylonitrilbutadienstyren |
| ASA | Akrylonitril-styren-akrylát |
| b | Šířka vzorku |
| b_0 | Počáteční šířka vzorku |
| D | Průměr zkušební kuličky |
| E | Modul pružnosti v tahu |
| F | Zatěžující síla |
| F_{\max} | Největší síla |
| h | Tloušťka tělesa |
| h_k | Redukovaná tloušťka tělesa v místě |
| L | Celková délka zkušebního tělesa |
| L_0 | Počáteční délka zkušebního tělesa |
| $M_{o \max}$ | Maximální ohybový moment |
| n | Počet měření |
| PA | Polyamid |
| POM | Polyoxymetylen |
| PS | Polystyren |
| PVC | Polyvinylchlorid |
| S_0 | Počáteční průřez zkušebního tělesa |
| S | Průřez zkušebního tělesa |
| s | Průhyb zkušebního tělesa |
| SAN | Styren- akrylonitril |

| | |
|-----------------|--|
| SB | Styren-butadien |
| W | Deformační energie spotřebovaná k přeražení tělesa |
| W_0 | Modul průřezu v ohybu |
| \bar{x} | Odhad aritmetického průměru |
| x_i | Hodnota měřené veličiny |
| ε | Poměrné prodloužení |
| ε_f | Deformace v ohybu |
| σ | Smluvní napětí |
| σ_{fM} | Pevnost v ohybu |
| σ_m | Mez pevnosti |
| σ_M | Mez pevnosti v tlaku |
| σ_R | Mez pružnosti |
| μ | Poissonův poměr |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| <i>Obr. 1 Bakelitové součástky automobilu.</i> | 13 |
| <i>Obr. 2 Podíl použitých materiálů v automobilu.[2]</i> | 14 |
| <i>Obr. 3 Plastové dílce automobilu.[2]</i> | 15 |
| <i>Obr. 4 Zpětní zrcátka používané na závodních vozech Citroen DS3.</i> | 15 |
| <i>Obr. 5 Tvarované odrazové sklo pro lepší přehlednost za vozidlem.[8]</i> | 16 |
| <i>Obr. 6 Zobrazení pozorovacích úhlů ve vozidle.[8]</i> | 16 |
| <i>Obr. 7 Zpětné zrcátka používané na závodních vozech Citroen DS3.[15]</i> | 17 |
| <i>Obr. 8 Rozdělení polymerů.</i> | 19 |
| <i>Obr. 9 Zkouška tahem. [12]</i> | 29 |
| <i>Obr. 10 Poissonův poměr. [12]</i> | 30 |
| <i>Obr. 11 Zkouška tlakem. [12]</i> | 31 |
| <i>Obr. 12 Zkouška v ohybu. [12]</i> | 31 |
| <i>Obr. 13 Schéma Charpyho kladiva.[4]</i> | 33 |
| <i>Obr. 14 Druhy vtisků dle metod. [4]</i> | 34 |
| <i>Obr. 15 Tvrdoměr pro metodu Shore A, D. [20]</i> | 36 |
| <i>Obr. 16 Závislost zatížení na hloubce vtisku při měření mikrotvrdosti.[18]</i> | 37 |
| <i>Obr. 17 sušička Arburg Thermolift 100-2</i> | 40 |
| <i>Obr. 18 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470 H.</i> | 41 |
| <i>Obr. 19 Vrubovačka CEAST s mikrometrem.</i> | 42 |
| <i>Obr. 20 Charpyho kladivo ZWICK Roell HIT50J</i> | 44 |
| <i>Obr. 21 Vrubová houževnatost A_k.</i> | 45 |
| <i>Obr. 22 Deformační energie W_m.</i> | 46 |
| <i>Obr. 23 Maximální síla F_m.</i> | 46 |
| <i>Obr. 24 Zkušební stroj ZWICK 1456</i> | 48 |
| <i>Obr. 25 Srovnání modulu pružnosti.</i> | 49 |
| <i>Obr. 26 Maximální síla F_{max}.</i> | 49 |
| <i>Obr. 27 Maximální napětí R_m.</i> | 50 |
| <i>Obr. 28 Tažnost materiálů.</i> | 51 |
| <i>Obr. 29 Tvrdomer OMAG ART 13</i> | 52 |
| <i>Obr. 30 Tvrdost Shore D.</i> | 52 |
| <i>Obr. 31 Tvrdoměr Micro Combi Tester.</i> | 53 |

| | |
|--|----|
| <i>Obr. 32</i> Vtisková tvrdost H_{IT} | 54 |
| <i>Obr. 33</i> Vtiskový modul E_{IT} | 55 |
| <i>Obr. 34</i> Vtiskové tečení C_{IT} | 55 |
| <i>Obr. 35</i> Koeficient zpětné relaxace η | 56 |
| <i>Obr. 36</i> Vrubová houževnatost. | 57 |
| <i>Obr. 37</i> Deformační práce. | 58 |
| <i>Obr. 38</i> Maximální síla. | 58 |
| <i>Obr. 39</i> Modul pružnosti..... | 59 |
| <i>Obr. 40</i> Maximální síla. | 59 |
| <i>Obr. 41</i> Maximální napětí..... | 60 |
| <i>Obr. 42</i> Tažnost..... | 60 |
| <i>Obr. 43</i> Tvrdost Shore D..... | 60 |
| <i>Obr. 44</i> Vtisková tvrdost. | 61 |
| <i>Obr. 45</i> Vtiskový modul. | 61 |
| <i>Obr. 46</i> Vtiskové tečení. | 62 |
| <i>Obr. 47</i> Koeficient zpětné relaxace..... | 62 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| <i>Tab. 1 Technická data vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 470 H. [19]</i> | 41 |
| <i>Tab. 2 Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti A_k.</i> | 45 |
| <i>Tab. 3 Průměrné hodnoty deformační práce W_m.</i> | 45 |
| <i>Tab. 4 Průměrné hodnoty maximální síly F_m.</i> | 46 |
| <i>Tab. 5 Technická data stroje ZWICK 1456.</i> | 48 |
| <i>Tab. 6 Průměrné hodnoty modulu pružnosti E.</i> | 48 |
| <i>Tab. 7 Průměrné hodnoty maximální síly F_{max}.</i> | 49 |
| <i>Tab. 8 Průměrné hodnoty maximálního napětí R_m.</i> | 50 |
| <i>Tab. 9 Průměrné hodnoty tažnosti materiálů A.</i> | 50 |
| <i>Tab. 10 Průměrné hodnoty tvrdosti Shore D.</i> | 52 |
| <i>Tab. 11 Průměrné hodnoty vtiskové tvrdosti H_{IT}.</i> | 54 |
| <i>Tab. 12 Průměrné hodnoty vtiskového modulu E_{IT}.</i> | 54 |
| <i>Tab. 13 Průměrné hodnoty vtiskového tečení C_{IT}.</i> | 55 |
| <i>Tab. 14 Průměrné hodnoty koeficientu zpětné relaxace η.</i> | 56 |

SEZNAM PŘÍLOH

P I: CD ROM