

# **Vliv modifikace polypropylénu na jeho výsledné mechanické vlastnosti**

Bc. Martin Sládeček

---

Diplomová práce  
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Sládeček**

Osobní číslo: **T11036**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Vliv modifikace polypropylénu na jeho výsledné mechanické vlastnosti**

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 diplomové práce:  
Rozsah příloh:  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:  
**Dle doporučení vedoucího DP**

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. David Maňas, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství  
Datum zadání diplomové práce: **8. února 2013**  
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
děkan



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

Příjmení a jméno: Bc. Martin Sládeček

Obor: Výrobní inženýrství

## 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<sup>1)</sup>;
- 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<sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> 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<sup>3)</sup> 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 8.5.2013

Sládeček

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

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

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení 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.

<sup>2)</sup> 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, užíje-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> 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 užit 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 výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce je zaměřena na mechanické zkoušení polypropylenu modifikovaného různými druhy plniv.

Teoretická část popisuje obecné vlastnosti polypropylenu, jeho výrobu a využití v praxi. Dále je popsáno rozdělení plniv a poslední část je zaměřena na popis mechanických zkoušek.

Praktická část je zaměřena na popis použitých směsí, udává parametry použitých zařízení, na kterých byly materiály zpracovány. Dále popisuje průběh jednotlivých měření a parametrů zařízení, na nichž byla měření prováděna. Poslední část je věnována srovnání výsledků měření jednotlivých modifikací materiálu, diskusi a vyhodnocení měření.

Klíčová slova: polymer, polypropylen, kompozit, plnivo, mechanické vlastnosti, teplotní odolnost

## **ABSTRACT**

This diploma work is focused on mechanical testing of polypropylene modified by different types of fillers.

The theoretical part describes general properties of polypropylene, its production and use in practice. The following describes the distribution of fillers and the last part is focused on the description of the mechanical tests.

The practical part is focused on the description of used blends, gives the parameters of equipment on which the materials were processed. Further describes the process of measurement and parameters of the device on which the measurements were made. The last part is dedicated to the comparison of the measurement results of modified materials, discussion and evaluation of measurement.

Keywords: polymer, polypropylene, composite, filler, mechanical properties, temperature resistance

Touto cestou bych chtěl velice poděkovat panu Doc. Ing. Miroslavu Maňasovi CSc. za jeho odborné vedení, cenné informace, za jeho úsilí a pomoc při vypracovávání této diplomové práce.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 POLYPROPYLEN</b> .....	<b>11</b>
1.1 HISTORIE .....	11
1.2 VÝROBA .....	11
1.3 VLASTNOSTI .....	13
1.3.1 Mechanické vlastnosti PP .....	13
1.3.2 Fyzikální vlastnosti PP .....	13
1.4 VYUŽITÍ.....	14
1.4.1 Polypropylen a jeho využití v automobilovém průmyslu.....	15
<b>2 PLNIVA</b> .....	<b>16</b>
2.1 ROZDĚLENÍ A POPIS .....	17
2.1.1 Kompatibilizátory.....	18
2.1.2 Polypropylen plněný skleněným vláknem.....	19
2.1.3 PP plněný skleněnými kuličkami .....	22
2.1.4 PP plněný talkem (máskem).....	22
2.1.5 PP plněný uhličitanem vápenatým .....	23
2.1.6 Polypropylen plněný slídou .....	24
2.1.7 PP plněný wollastonitem .....	25
2.1.8 PP plněný nanoplňivý.....	25
2.1.9 Kompozity PP na bázi přírodních vláken.....	27
<b>3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY</b> .....	<b>29</b>
3.1 FYZIKÁLNÍ PODSTATA DEFORMACE A PORUŠENÍ .....	29
3.2 ZKOUŠKA TAHEM .....	30
3.3 HOUŽEVNATOST .....	31
3.4 RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST .....	33
3.5 ZKOUŠKA TLAKEM.....	34
3.6 ZKOUŠKA OHYBEM.....	35
3.7 ZKOUŠKY TVRDOSTI .....	35
3.7.1 Zkoušky tvrdosti podle Brinella .....	36
3.7.2 Zkoušky vtlačováním kuličky .....	36
3.7.3 Zkoušky tvrdosti podle Vickerse.....	36
3.7.4 Zkoušky tvrdosti podle Shoreho.....	36
3.7.5 Stanovení tvrdosti IHRD.....	37
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>38</b>
<b>4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI</b> .....	<b>39</b>
<b>5 VOLBA MATERIÁLŮ</b> .....	<b>40</b>
<b>6 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ</b> .....	<b>41</b>



<b>7</b>	<b>TAHOVÁ ZKOUŠKA.....</b>	<b>42</b>
7.1	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	42
7.2	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	43
7.2.1	Modul pružnosti v tahu .....	43
7.2.2	Maximální tahové napětí.....	45
7.2.3	Absolutní prodloužení .....	46
7.2.4	Práce spotřebovaná na porušení vzorku .....	48
<b>8</b>	<b>ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODOU CHARPY.....</b>	<b>50</b>
8.1	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	50
8.2	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	51
8.2.1	Vrubová houževnatost.....	52
8.2.2	Maximální síla.....	53
<b>9</b>	<b>RÁZOVÁ ZKOUŠKA PADAJÍCÍM TLOUKEM .....</b>	<b>55</b>
9.1	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	55
9.2	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	56
9.2.1	Maximální síla.....	56
9.2.2	Maximální práce.....	57
<b>10</b>	<b>ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI.....</b>	<b>58</b>
10.1	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	58
10.2	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	59
10.2.1	Vtisková tvrdost $H_{IT}$ .....	59
10.2.2	Vtiskový modul pružnosti $E_{IT}$ .....	60
10.2.3	Creep $C_{IT}$ .....	61
10.2.4	Závislost hloubky vtisku $P_d$ na aplikovaném zatížení $F_{AP}$ .....	62
10.2.5	Deformační práce $W$ .....	62
10.2.6	Závislost hloubky $P_d$ vtisku na čase $t$ .....	64
<b>11</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>65</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>76</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>77</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>79</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>81</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>83</b>

## ÚVOD

Polymery stále více nahrazují ostatní materiály. S rozvíjející se výrobou, klademe větší důraz na jakost a kvalitu výrobků. Především v technické praxi se zvyšují požadavky na mechanické vlastnosti materiálu.

Tyto mechanické vlastnosti je možné vylepšovat za pomoci nejrůznějších plniv, které se stávají velmi významnou součástí většiny polymerů. Pomocí nich jsme schopni upravit většinu jejich standardně uváděných vlastností (tzv. aktivní plniva), ale také například uspořit materiál a tím i finance nahrazením polymeru za levnější plniva, která vlastnosti samotného polymeru nemění (tzv. neaktivní plniva).

V této práci se zabývá jednotlivými plnivými ve spojení s polymerem polypropylen (PP). Plniva jsou blíže popsána v teoretické části, kde lze najít i jejich specifikace, názvy a konkrétní příklady využití, nejčastěji v automobilovém průmyslu. V tomto oboru plasty zaujímají významnou pozici co do užití v interiéru, tak i externích částech automobilů.

Všechny tyto materiály musí být odolné jak teplotně, tak i proti UV záření, kterému jsou materiály automobilu denně vystavovány. Stejně tak musí být odolné proti mechanickému poškození a jiným deformacím.

Zkoušení materiálů je proto nezbytné pro výběr vhodného materiálu pro jednotlivé použití. Velkou část těchto zkoušení zaujímají zkoušky mechanické, kterými se zabývá i tato práce. Mezi tyto zkoušky patří například zkoušky tahové, zkoušky mikrotvrdosti (statické zkoušky) rázové zkoušky vrubové houževnatosti, rázové zkoušky padajícím tloučkem a mnoho dalších.

Pomocí těchto zkoušek lze zjistit, jak se materiál deformuje za normálních teplot, ale i zvýšených či snížených teplot, podle prostředí, ve kterém se materiál bude v budoucnu využívat.

## I. TEORETICKÁ ČÁST

## 1 POLYPROPYLEN

Díky snadné dostupnosti surovin pro výrobu monomeru a poměrně levné výrobě se celkově polyolefiny řadí mezi cenově nejdostupnější polymery, které se rovněž vyznačují dobrou zpracovatelností nejproduktivnějšími technologickými postupy. Polypropylen patří mezi nejvýznamnější polyolefiny. S ohledem na svoji zpracovatelnost a již zavedené použití ve výrobě pouzder světlometů byl polypropylen vybrán pro studium v této práci.

### 1.1 Historie

První pokus o přípravu polypropylenu se váže k roku 1869, kdy ho připravil Berhelot reakcí propylenu s koncentrovanou kyselinou sírovou, vznikla však lepkavá hmota, prakticky nepoužitelná. Historie propylenu se tedy začala odvíjet díky německému chemikovi Karlu Zieglerovi, který v roce 1952 použil organokovové katalyzátory na bázi titanu a hliníku pro nízkotlakou polymerizaci ethylenu. Italský chemik Giulio Natta využil tento princip o rok později k syntéze isotaktického propylenu. Vznikl tak první syntetický stereoregulární polymer. [9]

Od 60. let 20. století prošel vývoj od katalyzátorů 1. generace, které dosahovaly nízké výťažky a produkovaly 5-10% ataktického podílu, až do současnosti, kdy jsou využívány nejmodernějšími katalyzátory na bázi metalocenů (např. methylaluminiumoxid). Oproti klasickým Ziegler-Nattovým katalyzátorům mají 10-100x větší katalytickou aktivitu, polymery připravené jejich pomocí mají užší distribuci molekulových hmotností, lepší mechanické vlastnosti. Obsah izotaktické složky je díky těmto katalyzátorům zvýšen až na více než 99 % [16,18]

### 1.2 Výroba

Polypropylen je lineární polymer, který se získává katalytickou polymerací propylenu  $\text{CH}_2=\text{CHCH}_3$  za přítomnosti Zieglerových-Nattových katalyzátorů, nejčastěji tvořených komplexem  $\text{TiCl}_3$  s diethylaluminiumchloridem nebo triethylalumiem. Jde o tuhé částice rozptýlené v polymerizujícím prostředí - heterogenní katalyzátory, proto mohou vznikat molekuly polymeru s různou taktidou. Výsledný produkt proto obsahuje vedle izotaktického podílu, ještě určitý ataktický podíl a dále jejich kombinace. Jejich vzájemný poměr je ovlivněn použitým katalyzátorem, rozpouštědlem a také podmínkami polymerace. Přítom-

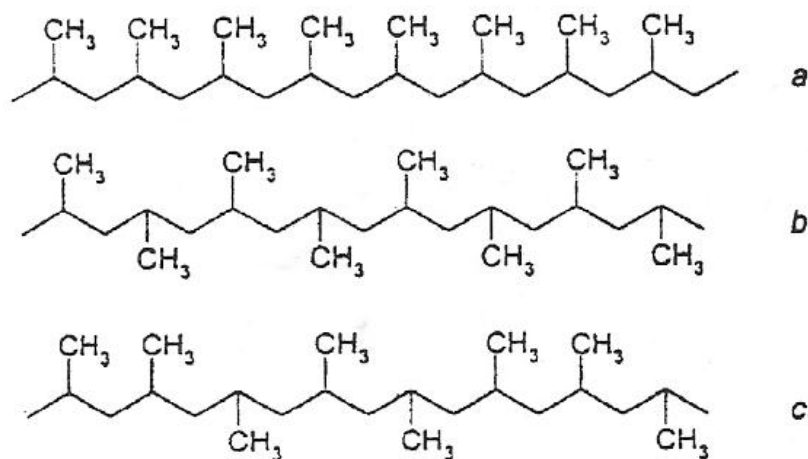
nost ataktického podílu zhoršuje mechanické vlastnosti a může docházet k fotooxidační degradaci. Podíl ataktické složky při polymeraci lze snížit až na 1% použitím metallocenových katalyzátorů. [9]

Podle uložení monomerních jednotek v makromolekule se rozlišuje polypropylen:

1. Izotaktický (postranní methylové skupiny jsou pouze na jedné straně hlavního polymerního řetězce) – makromolekula má tvar šroubovice s ternální symetrií (jeden závit šroubovice je tvořen třemi monomerními jednotkami).

Typy izotaktického polypropylenu:

- a) homopolymer (PP-H)
  - b) blokový kopolymer (PP-B)
  - c) statistický kopolymer propylenu s ethylenem (PR-P)
2. Syndiotaktický (postranní methylové skupiny se pravidelně střídají po obou stranách hlavního polymerního řetězce – pravidelnost molekulárního řetězce rozhoduje o schopnosti polymeru krystalizovat).
  3. Ataktický (polohy postranních methylových skupin se střídají nepravidelně po stranách polymerního řetězce). [9]



Obr. 1 Typy PP podle monomerních jednotek

a) Izotaktický, b) Syndiotaktický, c) Ataktický

### 1.3 Vlastnosti

Polypropylen je krystalický polymer o stupni krystalinity 60 až 75% a vzhledem ke své krystalinitě je neprůhledným polymerem. Polypropylen pro svou nepolární strukturu vykazuje výborné elektroizolační vlastnosti v široké oblasti frekvencí, je pevný i houževnatý, má vysoký bod tání (170°C) a poměrně vysokou teplotu použití (až 135°C).

Polypropylen s izotaktickou strukturou je nerozpustný ve všech organických rozpouštědlech až při 90°C se rozpouští v chlorovaných a aromatických uhlovodících a bobtná v ketonech, uhlovodících a esterech. Polypropylen je náchylný ke korozi pod napětím projevující se jako vznik trhlin. [9]

Tabulka 1 Vlastnosti jednotlivých stereoizomerů polypropylenu [9]

Vlastnost	Izotaktický	Syndiotaktický	Ataktický
Hustota ( kg/m <sup>3</sup> )	920 - 940	890 - 910	850 - 900
Teplota tání (°C)	165	135	-
Mez kluzu	vysoká	střední	Velmi nízká

#### 1.3.1 Mechanické vlastnosti PP

Youngův modul pružnosti	1 – 1,35 GPa
Pevnost v tahu	34 MPa
Tažnost	10 – 20 %
Tvrdość (Rockwell R)	80 – 110
Mez kluzu	0,316 – 0,548 GPa
Lomová houževnatost	3 – 4,5 MPa.m <sup>1/2</sup>

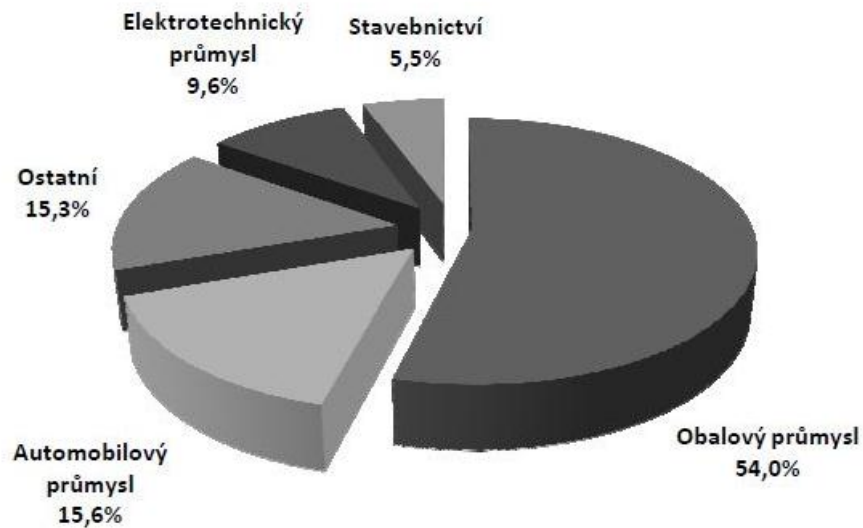
#### 1.3.2 Fyzikální vlastnosti PP

Teplota tavení	~165 °C
Maximální použitelná teplota	80 – 100 °C
Minimální použitelná teplota	-20 °C

Teplota degradace	286 °C
Tepelná vodivost	0,17 – 0,22 W/m.K
Měrné teplo	2 kJ/kg.K
Teplota skelného přechodu	-10 °C
Teplotní součinitel roztažnosti	$150 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

## 1.4 Využití

Polypropylen lze zpracovat prakticky všemi zpracovatelskými technologiemi – zvlákňuje se, vyfukováním se vyrábějí fólie i duté nádoby, vstříkují se drobné i rozměrné výrobky, vytlačují se trubky, profily a desky, lze svařovat a tepelně tvarovat. Uplatňuje se například i v automobilovém průmyslu na přístrojové desky. Vyrábějí se z něj součásti ventilátorů, vysavačů, kufrů, hraček, robotů a jiné. [19, 20]



Obr. 2 Rozdělení poptávky PP podle průmyslu [15]

### 1.4.1 Polypropylen a jeho využití v automobilovém průmyslu

PP je v automobilovém průmyslu široce využívaným materiálem. V interiéru automobilu je aplikovaný při konstrukci palubních desek, páček, ovládačů a textilních potahů. Objevují se i kombinace textilií s vytlačovaným PP. [13]

Na exteriéru automobilů nacházíme nárazníky, obložení, lišty a kliky produkované na bázi PP, který poskytuje výhodu nízkého koeficientu tepelné roztažnosti a měrné hmotnosti, vysokou odolnost vůči korozi a povětrnostním vlivům, dobrou zpracovatelnost a dobrý poměr mezi tuhostí a rázovou houževnatostí. Možnost obarvení PP v hmotě umožňuje redukovat potřebu lakování součástí z PP. [13]



## 2 PLNIVA

Plniva jsou nejčastěji nízkomolekulární materiály, které jsou přidávány do polymerních matic.

Jedná se o malé, pevné částice inertních materiálů, které se přidávají do pojiva s cílem zvýšit pevnost, tvrdost, tvarovou stálost, zlepšit zpracovatelnost, snížit hořlavost a smrštění, získat speciální požadované vlastnosti a většinou také pro zlevnění produktu. [10]

Zavedeme-li do polymerní matrice plnivo, mění se výsledné vlastnosti celého systému. Plnivo snižuje zpravidla deformační možnosti, ovlivňuje disipaci energie a strukturní pevnost. Důležitým faktorem jsou povrchové síly mezi plnivem a polymerní matricí, jakož i tvar částic. Ztužující plniva zvyšují strukturní pevnost a snižují tažnost. Mezi reálnými plnivy jsou rozdíly, které závisí na velikosti částic, vzdálenosti mezi jednotlivými částicemi a snášivosti. [7]

Plniva nejsou nezbytné pro každou polymerní směs, ale některé jsou životně důležité pro konkrétní koncové uživatele.

Základní požadavky na plniva [17]:

- nízké náklady,
- nízká specifická hmotnost,
- tepelná stabilita,
- lehce dostupné,
- neutrální (ani kyselé ani alkalické),
- snadná manipulace,
- nízká vodní a olejová absorpce (nasákavost),
- nesmějí absorbovat polymer,
- nesmějí zabraňovat toku polymeru.

Důležité parametry plniv – ovlivňující strukturu a vlastnosti polymerního kompozitu [17]:

- složení plniva,
- velikost plniva,

- distribuce velikostí,
- průměrná mezi-částicová vzdálenost,
- aspektní poměr, tedy i tvar (sférický, vláknitý, destičkovitý, ...),
- povrch částic (typ vazby, navlhavost, nukleární a katalytická aktivita),
- tvrdost, abrazivní chování během zpracování směsi,
- disperzní chování,
- závislost na zpracování.

## 2.1 Rozdělení a popis

V souvislosti s přidáváním plniv do polymerních matric hovoříme o tzv. kompozitech.

Kompozity jsou vícesložkové materiály složené ze dvou či více fází, které se liší fyzikálními, mechanickými a chemickými vlastnostmi. Matrice je spojitou fází kompozitu (v tomto případě PP), nespojitou fází tvoří plnivo. Plnivo je nositelem výrazně lepších vlastností (např. pevnost, modul pružnosti, tvrdost apod.) a jejím přidáním do matrice dojde k pozitivní změně vlastností získaného kompozitu. Specifickou vlastností kompozitu je tzv. synergismus - vlastnosti kompozitu jsou lepší, než součet vlastností jednotlivých složek. [15]

Tabulka 2 Vlastnosti vybraných druhů plniv [24]

Plnivo	Tvar plniva	Rozměr plniva ( $10^{-6}\text{m}$ )	l/d	Hustota ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
Skleněné mikrokuličky	koule	$\varnothing 2,5$	1	2,5
Uhlíčitán vápenatý $\text{CaCO}_3$	krychle	0,2 - 10	1	1,7
Kaolin	destička	0,5 x 5	3 - 10	2,6
Talek	destička	0,5 x 5	3 - 10	2,8
Skleněné vlákno	vlákno	10 x 200	20	2,5
Uhlíkové vlákno	vlákno	7 x 200	30	1,6
Montmorillonit	destička	0,001 x 0,2	100 - 500	2,4

Tabulka 3 Ovlivnění vlastností polymerů přidáním různých druhů plniv [24]

	Skleněné vlákno	Azbest	Uhlíkové vlákno	Whiskery	Syntetická vlákna	Celulóza	Slída	Talek	Uhlík	Křemenný písek	Kaolin	Skleněné kuličky	Kalciumkarbonát	Oxidy kovů	Saze
Pevnost v tahu	++	+	+	+-			+	0				+			
Pevnost v tlaku	+							+		+		+	+		
E-modul	++	++	++	+			++	+		+		+	+	+	+
Rázová houževnatost	-+	-	-	-	++	+	-+	-		-	-	-	-+	-	+
Snížení teplotní roztažnosti	+	+		+			+	+		+	+			+	
Snížení smrštění	+	+	+				+	+	+	+	+	+	+	+	+
Zlepšení vedení tepla		+	+					+	+	+			+		+
Pevnost za tepla	-+	+	-+				+	+			+		+	+	
Elektrická vodivost				+					+						+
Elektrický odpor							++	+			++			+	
Teplotní odolnost							+	+		+	+			+	+
Chemická odolnost		+					+	0	+		+	+			
Zlepšení otěru			+			+	+	+			+				
Erozní rychlost	-+	+					+				-		-		
Abraze forem a strojů	-	0		0	0	0		0	0	-		0	0		0
Snížení ceny	+	+				+	+	+	+	++	+	+	++		
	<b>Vláknitá plniva</b>						<b>Destičková plniva</b>			<b>Plniva tvaru koule</b>					
	<b>Vyztužující plniva</b>						<b>Nevyztužující plniva</b>								

++ silný vliv

+ slabý vliv

0 bez vlivu

- negativní vliv

### 2.1.1 Kompatibilizátory

Vlastnosti kompozitů jsou znatelně ovlivněny vzájemnou adhezí mezi plnivem a polymerní matricí. Při nedostatečné adhezí komponent dochází k poklesu mechanických vlastností v řádu desítek procent, neboť nedochází k účinnému přenosu napětí mezi polymerem a matricí. Navíc materiál plniva není dostatečně chráněn před poškozením a dochází také ke zvýšení navlhavosti materiálu. U polypropylenu je adheze na plniva problematickou oblastí vzhledem k nepolárnosti makromolekul PP. Řešením je tzv. kompatibilizace, která je uskutečněna roubováním polárních skupin do polymerního řetězce, využitím kopolymerů, úpravou povrchu plniva atd. Příkladem úpravy polypropylenu, zvyšující adhezí k plnivům, je

roubování řetězce anhydridem kyseliny maleinové (MA). Takto vzniklý kopolymer je schopný interagovat s polárními plnivými pomocí svých bočních skupin. [15]

Kompatibilizátory pro částicová plniva mají primárně za úkol zabránit jejich aglomeraci (ovlivňuje na reologii a mechanické vlastnosti). Vhodnými kompatibilizátory jsou titanáty, které také zlepšují adhezi mezi matricí a plnivem, mění hydrofobitu a snižují viskozitu systému s plnivem. [14]

Kopolymer PP-g-MA má uplatnění pro široké spektrum plniv. Používá se v kompozitech se skelnými vlákny, přírodními vlákny, talkem, jílem atd. V případě použití nepolárních plniv je potřebná také jejich povrchová úprava. Ta je zajištěna například oxidací, reakcí s hydroxidem a následným vznikem – OH bočních skupin, nebo navázáním jiných polárních funkčních skupin. Takto ošetřené povrchy plniv mají znatelně vyšší adhezi ke kopolymeru PP-g-MA. Na mikroskopickém snímku (Obrázek 12) můžeme vidět výrazný rozdíl v adhezi mezi matricí a plnivem. Současně bylo, v případě modifikace MA, ohybovými a tahuovými zkouškami zjištěno zlepšení mechanických vlastností o 30-39 %, v případě houževnatosti o 86 %. [15]

### 2.1.2 Polypropylen plněný skleněným vláknem

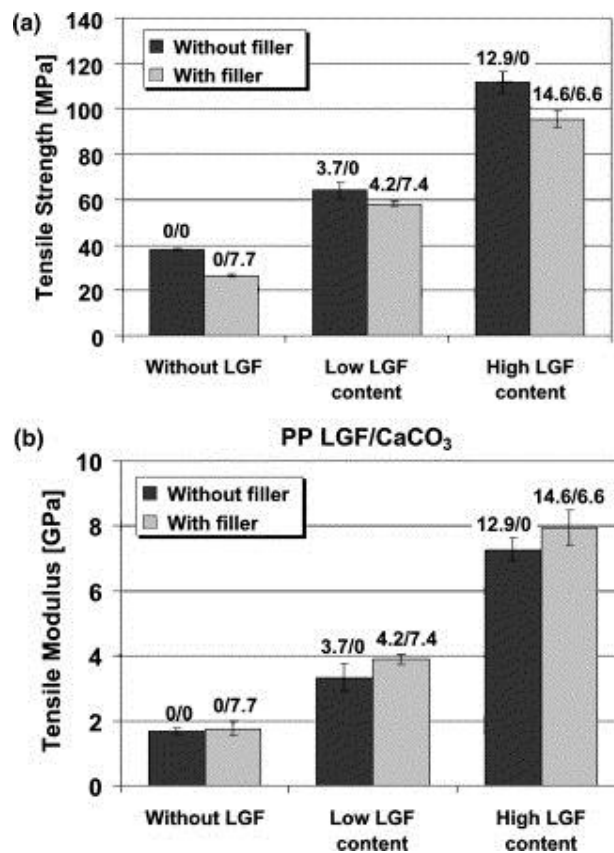
Skleněná vlákna patří mezi nejrozšířenější plniva polypropylenu. Průměr vláken je 3,5-24  $\mu\text{m}$ . Pro plnění plastů se používají vlákna vyráběná z E-skloviny (bezalkalická, nejčastěji používaná) a S-skloviny (o 70 % vyšší pevnost). Před kompaundací s polymerem se vlákna opatřují apretací, která chrání povrch vláken před poškozením. [15]

Obsah vláken: v praktických aplikacích je běžně používáno 20-60 % plnění. V případě pevnosti a rázové houževnatosti však toto platí zhruba do 40 % obsahu plniva. [14,15]

Krátká skleněná vlákna jsou označována jako GF, nebo SGF, délka vláken v granulátu je cca. 3 mm. Hlavním přínosem plnění krátkým vláknem je zvýšení modulu pružnosti a zvýšení teplotní odolnosti, která se může blížit až k teplotě tání. [15]

Dlouhá skleněná vlákna, označována jako LGF, jsou dodána do granulátu výrobním postupem, nazývaným pultruze, což je kontinuální způsob výroby, při němž je nekonečné vlákno vtlačováno do matrice, po ochlazení je nasycené vlákno sekáno na granule o délce cca 10 mm, což odpovídá také délce vlákna. [15]

Na rozdíl od krátkých skleněných vláken, nedochází při vstřikování u materiálů plněných LGF k ukládání vláken ve směru toku taveniny, ale ke vzniku trojrozměrné struktury (kost-ry dílu). Tato skutečnost má zásadní vliv na vlastnosti dílů vyráběných s plnivem LGF, především anizotropie smrštění a rozměrové stability, rázovou houževnatost, tepelnou odolnost, odolnost proti šíření trhliny, výborné creepové vlastnosti (tečení za studena), což je významné při dlouhodobém použití za vysokých teplot. Pozitivní vliv na modul pružnosti, v případě plnění LGF, roste s tloušťkou stěny vylisku. [15]



Obr. 3 Porovnání vlastností PP neplněného a plněného LGF

a) Pevnostní modul; b) Modul pružnosti [19]

### Aplikace PP plněného krátkým skleněným vláknem

Krátké skleněné vlákno je jako plnivo používáno u aplikací, kde jsou zvýšené požadavky na vyšší tuhost dílu oproti typům plněným minerálním plnivem, například tělesa světlometů. Vyvíjeny jsou také high-tech aplikace PP, jako náhrady jiných konstrukčních materiálů, např. řešení náhrady PA6, příp. PA66 plněného sklem u dílu VW sacího potrubí, kde byl

více než 20 let používaný původní materiál nahrazen PP plněným sklem s patentovaným složením. Požadavek na materiál je rozměrová stabilita, rozsah použití od  $-40$  do  $+120^{\circ}\text{C}$ , krátkodobě do  $140^{\circ}\text{C}$ , chemická odolnost, vysoká odolnost vibracím kombinována s nízkou únavou materiálu. Přínosem aplikace je celkové snížení nákladů a snížení hmotnosti až o 15%. [15]

### **Aplikace PP plněného dlouhým skleněným vláknem**

Dlouhé skleněné vlákno je díky výše popsaným vlastnostem úspěšně aplikováno v PP kompozitech, které slouží jako náhrada kovových materiálů, náhrada jiných dražších polymerů, hmotnosti a zvýšení užitných vlastností. Typickými aplikacemi jsou funkční a vzhledové části (přístrojové desky, dveřní moduly, nosiče baterií, spojkové pedály, řadicí páky, konzole, žaluzie HVAC, potrubí pro přívod vzduchu). [15]

Palubní deska osobních vozů - touto aplikací byl nahrazen běžně používaný blend PC/ABS. Bylo docíleno úspory hmotnosti realizované pomocí nižší měrné hmotnosti a snížení tloušťky stěn, a tím celkové úspory nákladů. [15]

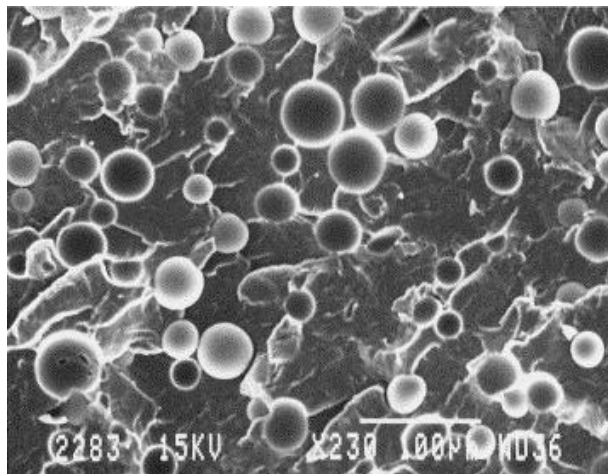


*Obr. 4 Dveřní modul automobilu z materiálu PP + LGF [2]*

### 2.1.3 PP plněný skleněnými kuličkami

Skleněné kuličky se vyrábějí z borokřemičitanového skla, jejich průměr je 7-8  $\mu\text{m}$ . Obsah plnění se pohybuje mezi 10-50 %. Jejich použití má vliv na zvýšení rázové houževnatosti, pevnosti v ohybu a tvrdosti, snížení smrštění. [4]

Na rozdíl od použití krátkého skleněného vlákna je rozdíl mezi smrštěním ve směru toku taveniny a kolmo na směr toku výrazně menší, což má vliv na menší deformace dílů. Díky této vlastnosti se skleněné kuličky používají jako náhrada skleněného vlákna, případně jako kombinace se skleněným vláknem. Pozitivní vliv na anizotropii smrštění je však za cenu nižších mechanických vlastností výsledného dílu. [4]



*Obr. 5* Mikroskopický snímek PP plněného skleněnými kuličkami [19]

### 2.1.4 PP plněný talkem (mastkem)

Jedná se o vodný křemičitan hořečnatý, nejměkčí minerál, s lamelární strukturou (tenké destičky hydroxidu hořečnatého mezi vrstvami siliky). Patří k nejpoužívanějším minerálním plnivům PP. Vliv talku: snižuje cenu, má dobrý poměr tuhosti a rázové houževnatosti, zlepšuje pevnost v tahu, rozměrovou stabilitu, chemickou a tepelnou odolnost. [15]

Mechanické vlastnosti výsledného kompozitu ovlivňuje nejen jeho podíl, ale také velikost a poměr rozměrů jeho částic. [15]

### **Aplikace PP plněného talkem**

Polypropylen plněný talkem je používán např. pro výrobu nárazníků a bočních lišt, palubních desek, součástí světlometů. [15]

Nárazníky a boční lišty Renault Scenic: jsou vyrobeny z kompaundu modifikovaného na zvýšenou rázovou houževnatost. Materiál splňuje požadavky na dobrou zpracovatelnost, odolnost UV záření, tvarovou stálost, vysokou rázovou houževnatost při nízkých teplotách. [15]



*Obr. 6 Renault Scenic [1]*

### **2.1.5 PP plněný uhličitanem vápenatým**

Tento minerál tvoří asi 65 % celkové spotřeby plniv do plastů (ročně asi 6 mil. tun), podíl spotřeby pro polyolefiny činí 10 %. Velikost částic plniva je od 5 do 100  $\mu\text{m}$ . Dělí se na přírodní, jehož vlastnosti, především bělost, velikost a tvar částic závisí na lokalitě těžby, a syntetické (srážené) typy které se vyznačují užší distribucí částic a vyšší čistotou. [15]

Ošetření povrchu: dle použité aplikace se provádí ošetření povrchu za pomoci kyseliny stearové ( $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ ) – za zvýšené teploty, dojde k přeměně na



[CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>16</sub>CO<sub>2</sub>]<sub>2</sub>Ca (kalcium-stearát = lubrikant). Ošetření povrchu zlepšuje procesní podmínky, mechanické vlastnosti a elektrické vlastnosti, lepší odolnost vlhkosti. [14]

Výhody uhličitanu vápenatého jako plniva jsou nízká cena, zdravotní nezávadnost, vysoký stupeň bělosti, dostupnost v širokém intervalu velikosti částic, možnost jejich povrchové úpravy, dobrá dispergovatelnost, nízký obsah vlhkosti (bez obsahu krystalické vody). Nevýhodou je nižší ztužující efekt, ve srovnání porovnání s jinými plnivy. [3]

### **Aplikace PP plněného CaCO<sub>3</sub>**

Uhličitanu vápenatého se jako plniva využívá především pro zvýšení tuhosti a snížení ceny materiálu. V případě náročnějších aplikací je nahrazen jinými minerálními plnivy, např. talkem. V současné době nabývají na významu nanoplňiva na bázi vápence. [15]

### **2.1.6 Polypropylen plněný slídou**

Slída je označení pro velmi širokou skupinu minerálů patřících mezi hlinitokřemičitany. Nejznámějším zástupcem je stříbřitě bílý až nažloutlý muskovit. Charakteristickou vlastností slídy je vrstevnatá struktura, díky níž se štěpí na tenké destičky, lamely. Pro účely plnění se slída mele na částice o velikosti 10 až 100 μm, kdy vykazuje největší plochu destičky. Slída je nevodivá, a nehořlavá. [23]

Díky její vrstevnaté struktuře se kompozity obsahující slídu vyznačují dobrou pevností v ohybu a tahu, vysokou tvrdostí, odolností proti poškrábání a odolností proti deformacím. Pro zvýšení rázové houževnatosti se kombinuje se skleněným vláknem. Slída v této kombinaci omezuje lámání skleněných vláken a pozitivně ovlivňuje zpracovatelské vlastnosti a vyjímání z forem. Zlepšení mechanických vlastností je také docíleno použitím kompatibilizérů PP-g-MA, nebo aminosilanů. [15]

### **Aplikace PP plněného slídou**

Kompozity PP se slídou jsou nejrozšířenějším způsobem využívání slídy, jako plniva.

Obvyklé plnění je 20-40%, vyjíměčně až 60%. Tyto kompozity jsou aplikovány pro výrobu přístrojových desek, ventilátorů, výplní dveří a sedadel. Vyrábí se také zpěňovaný PP plněný slídou, který se používá jako nehořlavé výplně. [15]

### 2.1.7 PP plněný wollastonitem

Wollastonit je minerální křemičitan vápenatý, vyznačuje se vysokou bělostí, nízkou navlhavostí. Kompozity plněné wollastonitem, v porovnání s kompozity plněnými ostatními minerálními plnivými vynikají vyšší odolností proti oděru. [15]

#### Aplikace wollastonitem plněných PP

Tyto kompozity se jeví jako vhodná alternativa ABS, nebo blendů PC/ABS pro interiérové aplikace v automobilovém průmyslu v případech, kdy ostatní kompozity PP-minerální plnivo nejsou, z důvodu menší odolnosti proti poškrábání použitelné. [15]

### 2.1.8 PP plněný nanoplňivými

Nanokompozity jsou kompozity obsahující plnivo, jehož rozměr je alespoň v jednom směru v řádech nanometrů. Malé rozměry plniva vedou ke zvětšení mezifázového povrchu mezi maticí a plnivem. Díky tomuto fázovému rozhraní dochází k interakci řetězce polymeru a plnivem, které zabraňuje pohybu segmentů, což ovlivňuje vlastnosti kompozitu. Vzhledem k velké ploše plniva není nutné dosahovat vysokého stupně plnění, ke zlepšení vlastností dochází již při nízkém obsahu plniva (3-5 %). Přínosem nanoplňiv je tedy získání lepších materiálových vlastností, než u klasických minerálních plniv, jako např. zvýšení rozměrové stability, modulu pružnosti, bariérových vlastností, tepelné odolnosti, zvýšení odolnosti proti poškrábání a to při současném nízké hmotnosti výrobku. [12]

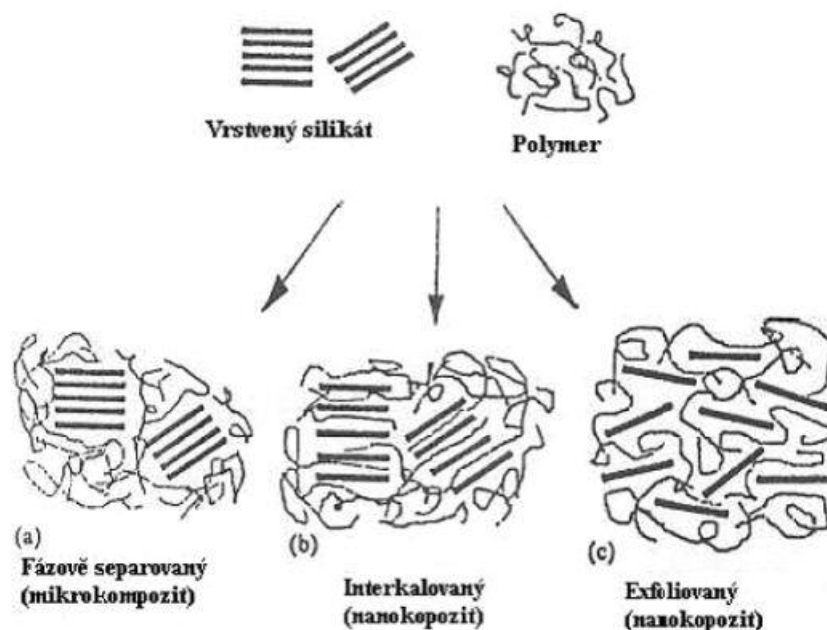
Mezi nanoplňiva řadíme minerální nanoplňiva, např. jíly, uhlíková nanovlákna, uhlíkové, nanotrubičky, fullereny (jedná se strukturní formu uhlíku tvořenou pěti, nebo šestiúhelníky). [14]

Vrstevnatá nanoplňiva – minerální jíly patří mezi nejvýznamnější plniva pro výrobu nanokompozitů PP. Vyznačují se vrstevnatou, destičkovou strukturou o tloušťce řádově v nm, a relativně velkou plochou. Nejvýznamnějším zástupcem jílu je aluminosilikátový minerál montmorillonit (MMT), patřící do skupiny smektitů. MMT se kromě velké plochy vyznačuje, strukturou „balíčku karet“, obsahuje aktivní místa na povrchu (na Si a Al navázaný OH skupiny).

Oproti klasickým, minerály plněným polymerům, se nanokompozity liší v dispergaci plniva. Z pohledu dispergace vrstev plniva můžeme tyto kompozity rozdělit do tří skupin:

1. jestliže zůstane zachována vrstevnatá struktura o tloušťce v řádech mikrometrů, jedná se o mikrokompozit (fázově separovaný nanokompozit)
2. pokud jsou molekuly polymeru zabudovány do vrstevnaté struktury, hovoříme o tzv. interkalovaném nanokompozitu. Za pomoci interkalačních činidel (např. alkylationiové soli) dochází interkalací ke zvětšování vzdálenosti mezi destičkami. Interkalace probíhá na principu výměny mezivrstevných kationtů s ionty činidla, nebo za pomoci interkalace dipólů činidla a mezivrstevného kationtu
3. po dosažení vysokého stupně interkalace dochází ke vzniku exfoliovaného nanokompozitu, kdy již nejsou vrstvy nanoplňiva pohromadě, ale jsou rovnoměrně rozptýleny v polymeru, dochází ke změně jejich tvaru z krychlového tvaru do tvaru destiček o velkém povrchu - cca  $700\text{m}^2/\text{g}$  plniva.

Vzhledem k tomu, že vrstevnaté silikáty jsou hydrofilní, je nutno, při plnění do PP matrice, upravit jejich povrch na organofilní pomocí vhodných interkalačních činidel. [12]



Obr. 7 Dispergace vrstevnatého nanoplňiva v polymerní matrici [6]

### Aplikace PP nanokompozitů

Blend PP+PS:

Díky použití nanoaditiv je možno získat stabilní blendy polypropylenu s jinými plasty, které jsou jinak s PP obtížně kompatibilní. Jako výchozí surovinu pro výrobu nanoaditiva může být využito materiálu bentonit (měkká, velmi jemnozrná, nehomogenní, různě zbarvená hornina složená z podstatné části z jílového minerálu montmorillonitu, křemičitého minerálu s vrstevnatou strukturou). [5]

Přidáním hydrofobizující látky dojde k oddálení jeho vrstev na cca 1,5-4 nm. Takto upravené nanoaditivum má strukturu destiček s tloušťkou 1 nm a průměr do 500 nm (na rozdíl od běžných plniv, jako např. talek s tloušťkou kolem 500 nm a průměrem 5 $\mu$ m). Díky malým rozměrům je umožněno vpravit toto aditivum do polypropylenu bez dalších kompatibilizérů. Koncentrace nanoplňiva se pohybuje okolo 5 %. K výsledné kompaundaci se používají extrudéry s vyvozující střední až vysoké smykové namáhání, díky němuž dojde k dokonalé dispergaci všech komponent a rozvrstvení nanoaditiva v tavenině. Každá jeho vrstva je obklopena maticí z plastu, současně dojde k jemnozrnému a rovnoměrnému rozdělení PS v PP matici. [15]

**Výhody blendu PP+PS oproti PP plněným minerály:** zpracování vstřikováním bez výraznějšího rozdílu oproti jiným, minerály plněným PP, shodná hodnota smrštění, takže lze použít stávající lisovací nástroje, nižší opotřebení nástrojů a zpracovatelských strojů, vyšší odolnost proti poškrábání, matný povrch a příjemný na omak, nižší hustota.

Díky výše uvedeným vlastnostem se tento materiál využívá na díly pro interiéry automobilů, podlahy, prostory kufru, náhrady lakovaných ABS aplikací. [15]

### 2.1.9 Kompozity PP na bázi přírodních vláken

Kompozity na bázi přírodních plniv jsou obecně označovány jako WPC (wood-plastic composites). Pro účely výroby WPC jsou používány rostliny jako např. bavlna, len, juta, konopí, sisal, stromy jehličnaté i listnaté, palmy, ramie (rostlina podobná kopřivě). Jejich aplikace jsou vedeny snahou o zvýšení podílu biologicky rozložitelných materiálů v automobilovém průmyslu. V současné době WPC patří k materiálům s nejvýše rostoucí spotřebou. Nejčastěji používanou technologií na zpracování WPC pro automobilové aplikace je vstřikování. [15]

Rozsáhlé použití rostlinných vláken a jejich produktů je díky vlastnostem, jako je nízká hustota, relativní vysoká pevnost a tuhost (v poměru k jejich hmotnosti), pozitivní akustic-

ké vlastnosti, neabrazivní povaha, možnost dosáhnout vysokého stupně plnění (60 až 80 %), zdravotní nezávadnost, snížení nákladů, hmotnosti vozidel a tím jejich spotřeby, zvýšení bezpečnosti cestujících. [15]

Nevýhody WPC jsou závislost fyzikálních vlastností na typu plniva ovlivněných zdrojem a sezónou sklizně, sklon k tvorbě agregátů, nízká tepelná stabilita a nízká odolnost proti vlhkosti. Vysoký sklon k vlhnutí vede ke vzniku dutin (porézní výrobky), což má za následek špatné mechanické vlastnosti a vede ke snížení rozměrové stability. Eliminace této vlastnosti je možná za pomoci hydrofilních přísad, např. PPgMA. Jednou z hlavních nevýhod WPC z rostlinných vláken je špatná kompatibilita mezi vlákny a PP matricí, a to díky vysoké polaritě plniva. Za účelem zlepšení adheze mezi vlákny a termoplastickou matricí se používá při úpravě vlastností rostlinných vláken kompatibilizátorů. [15]

Dalším problémem je teplota při zpracování, která omezuje výběr matrice materiálu. Rostlinná vlákna jsou složena z různých organických materiálů (především celulóza, lignin), a proto jejich tepelná zátěž vede k fyzikálním a chemickým změnám. Tepelná degradace těchto vláken vede ke špatným organoleptickým vlastnostem, jako je vůně a barva. Tepelná degradace může vést k tvorbě plynných produktů při zpracování (nad 200°C), což může mít za následek vysokou pórovitost, nízkou hustotu a snížení mechanických vlastností. [15]

Pevnostní vlastnosti WPC: jedním ze zásadních parametrů ovlivňujících mechanické vlastnosti WPC je velikost vláken. Krátká a drobná vlákna (průměrné velikosti částic 0,24 do 0,35 mm) vykazují lepší vlastnosti, poskytují vyšší specifický povrch, mají lepší slučitelnost s matricí. Ačkoliv mají přírodní vlákna horší mechanické vlastnosti v porovnání s průmyslově vyráběnými vlákny, nacházejí tato plniva uplatnění díky poměru výkon/náklady a jsou alternativou ke skleněným vláknům (cena lněných a konopných vláken je cca o 40% nižší) v aplikacích, kde nejsou tyto vlastnosti prioritní. [15]

### **Aplikace PP plněných WPC**

WPC na bázi PP jsou dosud využívány především pro interiérové aplikace jako např. obložení palubních desek, dveří, sedáky, opěradla, dále pak termo-akustické izolace, výplně dveří, u prakticky na všech hlavních výrobců automobilů. Aplikace WPC v exteriéru dosud nejsou výrazně rozšířeny. [15]

### 3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

#### 3.1 Fyzikální podstata deformace a porušení

Veškeré pozorované makroskopické deformační vlastnosti plastů jsou výsledkem jejich molekulární a nadmolekulární struktury a jejich změn v průběhu silového zatížení. [22]

Polymery jsou tvořeny dlouhými řetězci, atomy uvnitř řetězců jsou mezi sebou propojeny silnými kovalentními vazbami. Elastická deformace těchto vazeb ve smyslu jejich natažení je velmi obtížná. [21]

Poněkud nižší tuhost řetězců ve směru podélném mají polymery, u nichž sousední vazby svírají úhel menší než  $180^\circ$  a deformace se uskutečňuje elastickou změnou vazebních úhlů. Meziřetězcové vazby jsou většinou van der Waalsova typu. Jsou řádově slabší než kovalentní vazby. Vnější silovým působením či zvýšenou teplotou je lze snadno překonat. [8]

**Skelné polymery** – jsou amorfni polymery pod teplotou skelného přechodu a tvoří jednu z nejrozsáhlejších skupin mezi prakticky používanými plasty (např. PS, PVC, PMMA).

Atomy se nacházejí v relativně stabilních polohách. [21]

Mechanické vlastnosti jsou řízeny především mezimolekulárními vazbami. [17]

Při krátkodobém působení malých sil za nízkých teplot se viskózní vlastnosti skelných polymerů nemohou projevit, polymery se chovají elasticky. Základními mechanickými charakteristikami materiálu jsou elastické konstanty, například Youngův modul a Poissonova konstanta. [8]

Podrobíme-li skelné polymery větším deformacím, stále více se uplatňuje nelineární chování a plasticita. Základní zkouškou popisující chování látek v širokém rozsahu deformací je tahová zkouška. [11]

**Krystalické polymery** – čistě krystalické polymery neexistují. Výstižněji by jejich strukturu popisoval název semikrystalické či parakrystalické. Jejich deformační vlastnosti se dají dosti dobře odvodit z představy dvoufázové struktury. K vysvětlení mechanických vlastností se proto velmi dobře hodí modely převzaté z mechaniky kompozitů. Výsledné mechanické vlastnosti v sobě nesou jak znaky amorfních plastů, tak čistě krystalických látek.

Mechanické vlastnosti polymerů jsou odrazem jejich chemického složení, velikosti a tvaru makromolekul, nadmolekulární struktury (amorfní, krystalické), ale také závislosti na teplotě a čase. [21]

Příprava zkušebních těles:

- přímo ze zkoušených materiálů – příprava vulkanizací, lisováním, vstřikováním, odléváním v příslušných formách s tvarem zkušebního tělesa
- z hotových výrobků nebo polotovarů vysekáváním nebo frézováním.

Povrch zkušebních těles musí být hladký, bez vrubů, defektů, vzduchových bublin, trhlin, vrásek, cizích těles apod. [8]

Zkušební tělesa, která budou podrobena fyzikálním či mechanickým zkouškám nesmí být předem vystavena mechanickému, fyzikálnímu či chemickému namáhání, které by mohlo výsledky zkoušek ovlivnit. [21]

Před provedením vlastní zkoušky je nutné materiál (vzorky) nechat určitou dobu odležet v klimatizovaných prostorách za podmínek smluvní teploty a relativní vlhkosti. Délka kondicionování je předepsána v normě pro daný materiál. Pokud není uvedeno jinak, musí se zkušební tělesa zkoušet ve stejném prostředí, ve kterém byla kondicionována. [8]

Podle způsobu stanovení vlastnosti a podle účelu se mechanické vlastnosti dělí na [17]:

- krátkodobé (zkouška tahem, zkouška tvrdosti)
- dlouhodobé – ty se dále dělí podle charakteru působící síly na:
  - a) statické (relaxace napětí, creepové deformační zkoušky)
  - b) dynamické (rázová a vrbová houževnatost, cyklické zkoušky).

### 3.2 Zkouška tahem

Zkouška tahem při pomalém zatěžování a za tzv. okolní teploty (10 – 35°C) je zcela základní a nejběžněji prováděnou zkouškou mechanických vlastností u většiny konstrukčních materiálů. Výsledky zkoušky tahem do lomu představují tzv. základní mechanické vlastnosti. [21]

Zkušební těleso je protahováno ve směru své hlavní podélné osy konstantní rychlostí do jeho porušení nebo do okamžiku, kdy napětí v tahu nebo protažení dosáhnou předem zvolené hodnoty. [8]

Měří se zatížení působící na zkušební těleso a prodloužení nebo se přímo v průběhu zkoušky trvale zaznamenává síla a prodloužení tělesa. [21]

Příslušné normy uvádí:

- 1) Tvary zkušebních těles
  - a) oboustranné lopatky, pásky – plasty
  - b) lopatky oboustranné, kroužky (vnitřní průměr 44,6 mm, tloušťka stěny 4 mm nebo vnitřní průměr 8 mm, tloušťka stěny 1 mm) – pryže
- 2) Počet zkušebních těles (anizotropie)
- 3) Způsob měření rozměrů
- 4) Podmínky kondicionování
- 5) Upínání zkušebních těles
- 6) Rychlost provádění zkoušky. [21]

### 3.3 Houževnatost

Houževnatý materiál se vyznačuje vyšší hodnotou lomové energie, lom materiálu je postupný, „houževnatý“. Hodnota lomové houževnatosti závisí na soudržnosti fází, na objemovém podílu, ale i na průměru a vzdálenosti částic. U termoplastů je snaha zlepšovat houževnatost podporováním mikroplastických deformací. K tomu je ale potřeba dobré adheze mezi plnivem a matricí, dále zachování optimální velikosti částic a objemového podílu. Nelze říci, že čím pevnější spojení mezi fázemi, tím houževnatější materiál. Naopak např. u výše zmíněných epoxidových matricí s tuhými částicemi dochází ke křehkému lomu. První příznaky poškození se vyskytují, když kompozit obsahuje slabě nebo vůbec vázané částice, pak dochází k odtržení od matrice vedoucí, buď k tvorbě relativně stabilních dutin, nebo přímo k lomu. [21]

Pokud jsou dutiny vytvořeny od větších částic nebo agregátů, je velká pravděpodobnost vytvoření kritické velikosti trhliny. Větší částice působí jako defektory, nastává křehký lom



za mnohem většího napětí než u nevázaných částic. Také malé částice, zejména agregáty, mají možnost zamezit tvorbě dutin, tím se nahromadí napětí, až se poruší vazba s matricí a nastává křehký lom. Na druhé straně velké množství malých, rovnoměrně rozptýlených a slabě vázaných částic iniciuje vznik většího množství malých stabilních dutin, které umožní matrici se dále deformovat. Obecně nejhouževnatější materiál získáme z kompozitu obsahujícím téměř monodispergované rozptýlené částice střední velikosti. Malé částice s dobrou adhezí se také podílí na procesu zlepšování houževnatosti. Při zátěži v kompozitu nejprve nastane deformace matrice na mikroskopické úrovni (připomíná strukturu elastomeru v termoplastu) pak nastane deformace ve větším objemu matrice. Nevázané částice v houževnaté matrici mají vliv na mez kluzu a lomové chování. Tvorba dutin u dobře vázaných částic vyžaduje větší napětí a energii na deformaci a chování při lomu. Je sice jednoznačné, že např. při zvyšování deformační rychlosti při rázové zkoušce hodnocený parametr energie klesá, ale zatím nelze vyvodit jednoznačný závěr při zkoumání účinku zátěžové rychlosti na houževnatost, na rozdíl od zjištěného účinku teploty a napětí. Toto jednoznačné stanovení komplikuje někdy značný rozsah změn lomových charakteristik během času. [21]

Příčinou zdrojů defektu mohou být:

- Dutiny na fázovém rozhraní a kolmo působící k síle. Velikost a způsob deformace závisí na rychlosti deformace.
- Při rychlé deformaci se získá rychle dostatek energie na propojení malých defektů v makroskopickou trhlinu.
- Při pomalé deformaci roste omezený počet defektů do značné až kritické velikosti. Při procesu porušování vzniká buď dilatace objemu, což zapříčiňuje tvorbu některých dutin a puklin nebo vznikají lokální smykové deformace. [21]

Chování plněných termoplastů je určováno lomovým chováním matrice, hlavně její houževnatostí. Zhruba lze říci, že závislost na rychlosti deformace u kompozitu je určena závislostí na rychlosti deformace matrice. Při středních rychlostech deformace a nižších teplot převládá tvorba dutin a trhlin. Tvorba dutin se ale většinou dá potlačit buď snížením rychlosti deformace a vyšší teploty (přichází smykové deformace) nebo za působení rázové rychlosti i za pokojové teploty, při rázu se předá dostatečnou energii na tvorbu nestabilní trhliny s vyústěním v křehký makroskopický lom. [21]

Za přechod mezi křehkým a houževnatým chováním je zodpovědná kritická vzdálenost částic. Tato vzdálenost je pro danou matici specifická. Při nadkritických hodnotách objemového podílu částic (např. oblasti agregovaných částic), kde jsou částice blízko sebe, dochází k poklesu houževnatosti, což se vysvětluje vzájemným překrýváním napěťových polí v okolí částic a zvýšením napětí nad kritickou mez. Při optimalizaci houževnatostních charakteristik je nutno znát vzájemné korelace mezi morfologií a houževnatostí. S rostoucí koncentrací částic přitom klesá, to ovšem záleží, o jaký typ částic se jedná, ale na druhou stranu roste i odpor vůči iniciaci trhliny, také i množství energie spotřebované na růst trhliny. Klesající teplota mění přechod mezi křehkým a houževnatým chováním a to především u samotné matrice. Řízením podmínek při syntéze lze měnit vzdálenost mezi částicemi a tím ovlivňovat výsledné vlastnosti kompozitu. [21]

Tzv. aktivní plniva – částice velmi malých rozměrů, ale s velkým povrchem též zvyšují pevnost a houževnatost polymeru. Jsou to např. saze,  $\text{SiO}_2$ . Houževnatost můžeme ovlivnit buď vhodně zvolenými parametry při skladbě kompozitu nebo modifikací matrice přidáním vhodného elastomeru nebo použitím vhodného kopolymeru. [21]

### 3.4 Rázová houževnatost

Houževnatost patří spolu s pevností k nejdůležitějším materiálovým zkouškám. Je to schopnost materiálu odolávat iniciaci a šíření trhliny. Houževnatost představuje energii, kterou je materiál schopen lokálně absorbovat, než se poruší. [8]

Patří mezi zkoušky, které poskytují určité informace o chování plastů při nárazu. Výsledky stanovení závisí na druhu plastu, jeho složení, teplotě, zkušební metodě, podmínkách provedení, tvaru zkušebního tělesa. [21]

Houževnatost lze ovlivnit volbou aditiv. [8]

Rázová houževnatost je energie spotřebovaná na porušení zkušebního tělesa vztážená na plochu kritického průřezu zkušebního tělesa za předepsaných podmínek, označuje se  $a_n$  ( $\text{kJ/m}^2$ ). [21]

Vrubová houževnatost je plocha kritického průřezu v místě vrubu, označuje se  $a_k$  ( $\text{kJ/m}^2$ ). [21]

Rázová a vrubová houževnatost se dá měřit různými metodami např. Charpy, Izod, Dynstat, rázové zkoušky tahem a rázové zkoušky padajícím závažím. [21]

**METODA CHARPY:**

Dle ČSN EN ISO 179 z 6/1998

Kyvadlové kladivo s rozsahem podle typu materiálu a rozměru zkušebních těles, bývá opatřeno stupnicí, na které se absorbovaná energie  $W$  (spotřebovaná práce) odečítá přímo. Odečtené hodnoty mají ležet mezi 10 a 80% celkového rozsahu stupnice. [8]

Vruby ve zkušebních tělesech mohou mít různé tvary (normováno). Při zkoušce se tělesa ukládají tak, aby vrub byl v tahové oblasti (opačná strana tělesa než je provedena deformace). Vliv vrubu je značný, vrubová houževnatost až 10 krát nižší než rázová. [21]

Rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu:

$$a_n = \left( \frac{W}{b \cdot h} \right) \cdot 10^3 \quad (\text{kJ/m}^2) \quad (1)$$

kde  $W$  je deformační energie spotřebovaná k přeražení tělesa v J,

$b$  – šířka střední části tělesa v mm,

$h$  – tloušťka střední části tělesa v mm.

Rázová houževnatost zkušebních těles opatřených vrubem, tj. vrubová houževnatost:

$$a_k = \left( \frac{W}{b_k \cdot h} \right) \cdot 10^3 \quad (\text{kJ/m}^2) \quad (2)$$

kde  $b_k$  je šířka střední části tělesa pod vrubem v mm. [8]

**3.5 Zkouška tlakem**

Při deformaci v tlaku nastává zkracování zkušebního tělesa. [8]

U tuhých, tvrdých a křehkých plastů napětí v tlaku stoupá do meze pevnosti, která je destrukční mezí. Překročí-li napětí mez pevnosti, dojde k roztříštění nebo pomalejšímu rozdrcení materiálu. Často dochází k výskytu trhlin na povrchu zkušebního tělesa, aniž by došlo k velké deformaci a byla porušena celková soudržnost. [21]

Při stlačování houževnatých a měkčích plastů se těleso deformuje, aniž by docházelo k jeho viditelné destrukci. [8]

Zkušební tělesa mají tvar hranolu, válce nebo trubky – délka 10 až 50 mm, šířka 10 mm, tloušťka 4 mm. [8]

V průběhu zkoušky se stanovují síla (napětí) a odpovídající stlačení (poměrné stlačení) zkušebního tělesa. [21]

### 3.6 Zkouška ohybem

Při ohybové zkoušce se jedná o namáhání tlakem a tahem současně – v horních vrstvách je tlakové, směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tahové. [8]

Výsledkem zkoušky jsou ohybové křivky síla (napětí) – průhyb, z kterých se vyhodnocují potřebné charakteristické hodnoty. [8]

Zkouška dává konstrukční podklady pro plasty, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb, je zvláště vhodná pro křehké plasty, pro které je provedení zkoušky tahem obtížné. [8]

V průběhu zkoušky se zaznamenává síla (napětí) působící na těleso a velikost odpovídajícího průhybu zkušebního tělesa. Napětí v ohybu je podílem ohybového momentu  $M$  při zatížení  $F$  k modulu průřezu zkušebního tělesa  $W$ . [21]

### 3.7 Zkoušky tvrdosti

Podstatou zkoušek je vtlačování tvrdých hrotů definovaných tvarů za stanovených podmínek do povrchu zkušebního tělesa. [8]

Principem měření je určení vztahu mezi silou, která vtlačuje tvrdý hrot a plochou otisku, která vtlačováním hrotu vznikne. [21]

Vzhledem k tomu, že plasty jsou materiály převážně houževnaté a jejich povrchy se vtlačováním více či méně deformují, vyvinuly se tyto zkoušky v měření odporu celého objemu proti vtlačování hrotu. Nelze tedy měřit stopu po vpichu tvrdoměru, ale měří se rovnovážná hloubka vniknutí hrotu při určité konstantní síle vtlačování. [21]

Tvrdot je vlastně vyjádřením tuhosti plastů.

Metody měření se dělí podle tvaru hrotu:

- kuličkou nebo tyčinkou s kulovým zakončením,
- kuželem nebo jehlanem,
- komolým kuželem.

Tvrдость (tuhost) může být silně ovlivněna teplotou, stupněm navlhnutí u polárních plastů, stupněm krystalinity. Proto je důležité kondicionování. [21]

### 3.7.1 Zkoušky tvrdosti podle Brinella

- Konstantní průměr kuličky ( $5 \pm 0,1$ ) mm
- Konstantní zatížení
- Proměnnou je hloubka vtisku, která se po určité době odečítá pomocí hloubkového indikátoru. [8]

### 3.7.2 Zkoušky vtlačováním kuličky

- Průměr ocelové kuličky je konstantní ( $5 \pm 0,05$ ) mm
- Proměnnou je zatížení vybírané z řady hodnot (49, 132, 358, 961) N tak, aby hloubka vtisku byla po 30 s působení zatížení v rozmezí 0,15 až 0,35 mm
- Hloubka vtisku se měří pod zatížením, plocha povrchu vtlačení se vypočítává z jeho hloubky. [8]

### 3.7.3 Zkoušky tvrdosti podle Vickerse

- Vtlačuje se čtyřboký diamantový jehlan ( $136^\circ$ )
- Princip měření spočívá v tom, že po provedení vtisku určitou konstantní silou se měří úhlopříčky vzniklé stopy. [8]

### 3.7.4 Zkoušky tvrdosti podle Shoreho

- Pro měkčené plasty Shore A, pro houževnaté Shore D
- Hroty mají tvar kužele (typ D) nebo komolého kužele (typ A)

- Hodnota tvrdosti se odečítá se stupnice tvrdoměru za  $15 \pm 1$  sekund po jeho přiložení
- Výsledkem zkoušky je průměr z 5 měření. [8]

### **3.7.5 Stanovení tvrdosti IHRD**

- Měří se rozdíl mezi hloubkou vtlačení kuličky při malé konstantní síle (5 s) a velké celkové síle (30 s)
- Stupnice tvrdosti byla stanovena tak, že 0 představuje tvrdost materiálu s nulovým Youngovým modulem a 100 představuje tvrdost materiálu s nekonečným Youngovým modulem
- Pro viskoelastické materiály jsou stupnice IHRD a Shore A srovnatelné. [21]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Praktická část diplomové práce se zabývá porovnáním mechanických vlastností standardního materiálu polypropylenu (PP STANDARD) s modifikovanými typy označenými A, B, C, D. Modifikovaný polypropylen byl plněn různými druhy plniv (skleněné kuličky, skelná vlákna, talek) s rozdílným obsahem. Mechanické vlastnosti byly měřeny statickými a dynamickými zkouškami. Statické zkoušky byly reprezentovány tahovou zkouškou a zkouškou mikrotvrdomosti, dynamické potom rázovou zkouškou vrubové houževnatosti a rázovou zkouškou padajícím tloučkem.

Cílem diplomové práce bylo:

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



## 5 VOLBA MATERIÁLŮ

Pro veškeré mechanické zkoušky bylo použito 5 typů polypropylenu s různými druhy a s odlišnými poměry plniv. Zkušební vzorky připravené z těchto druhů materiálů nesou označení A, B, C, D a STANDARD. Jako porovnávací vzorek byl stanoven vzorek STANDARD, výsledky zkoušek jsou následně vyhodnoceny a porovnány s tímto vzorkem.

Jelikož cílem práce je zlepšit mechanické vlastnosti zkoušeného polypropylenu, měly by v ideálním případě ostatní vzorky vykazovat lepší mechanické vlastnosti v porovnání se vzorkem STANDARD.

*Tabulka 4* Přehled použitých materiálů

<b>Materiál</b>	<b>Materiál A</b>	<b>Materiál B</b>	<b>Materiál C</b>	<b>Materiál D</b>	<b>STANDARD</b>
<b>Složení</b>	Vlákná 10%	Vlákná 20%	Vlákná 10%	Vlákná 20%	Talek 40%
	Kuličky 10%	Kuličky 10%	Kuličky 5%	Kuličky 5%	

## 6 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Zkušební tělesa pro tahové zkoušky, zkoušky vrubové houževnatosti, zkoušky mikrotvrdosti i rázové zkoušky byla připravena vstřikováním na stroji Arburg ALLROUNDER 470 golden edition, jehož technické parametry najdeme v tabulce níže.

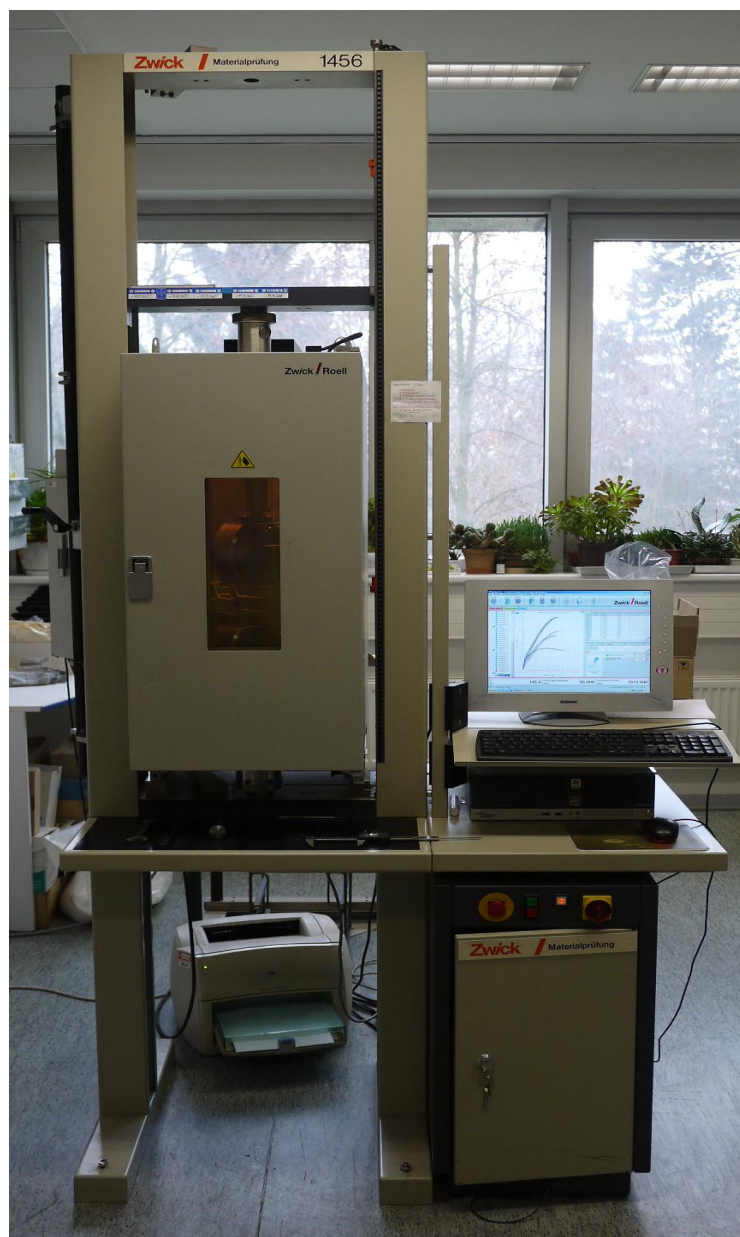
Tabulka 5 Parametry vstřikovacího stroje

Typ stroje	ALLROUNDER 470 golden edition	
Uzavírací jednotka		
uzavírací síla	1000	max. kN
otevírací síla / zvýšená otevírací síla	35 / 250	max. kN
otevření	500	max. mm
vzdálenost mezi vodícími sloupy	470x470	mm
velikost upínací desky (šířka x výška)	570x570	mm
vyhazovací síla	40	max. kN
zdvih vyhazovače	175	max. mm
Hydraulika, pohon		
výkon čerpadla	22	kW
celkový příkon stroje	33,9	kW
Vstřikovací jednotka		
průměr šneku	40	mm
poměr šneku	20	l / d
zdvih šneku	145	max. mm
objem dávky	182	max. cm <sup>3</sup>
vstřikovací tlak	2120	max. bar
vstřikovací rychlost (objemová)	168	max. cm <sup>3</sup> . s <sup>-1</sup>
zpětný tlak pozitivní / negativní	350 / 160	max. bar
krouticí moment šneku	700	max. Nm
přítlačná síla trysky	70	max. kN
objem násypky	50	l
Olejová náplň		
množství oleje	235	l
hmotnost stroje, bez oleje	3700	kg

## 7 TAHOVÁ ZKOUŠKA

### 7.1 Měřicí zařízení

Zařízení nám dovoluje zkoušku tahem, tlakem a ohybovou zkoušku. K ovládní stroje, ukládání a vyhodnocování dat získaných ze zkoušek slouží osobní počítač, který je součástí stroje a obsahuje software Test Xpert. Pro provedení zkoušky za zvýšené nebo snížené teploty je zařízení vybaveno temperační komorou, která je v případě potřeby instalována posunutím po kolejnicích. Technické parametry stroje můžeme shlédnout v tabulce.



Obr. 8 Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456

Tabulka 6 Parametry zkušebního stroje ZWICK ROELL 1456

Typ stroje	ZWICK ROELL 1456	
Strojová výška	1248	mm
Celková výška	2012	mm
Celková šířka	630	mm
Šířka pracovního prostoru	420	mm
Maximální zkušební síla	20	kN
Maximální rychlost posuvu příčniku	750	mm.min <sup>-1</sup>
Extenzometry měření protažení	macro	
	přídavný	
Vyhodnocovací software	master – tah	
	standard – ohyb a tlak	
	standardní hysterezní (cyklické) zkoušky	

## 7.2 Měření a vyhodnocení výsledků

Na zkušebním stroji bylo provedeno 10 měření pro každý materiál a pro každou teplotu, celkem tedy 50 měření pro každý druh polypropylenu.

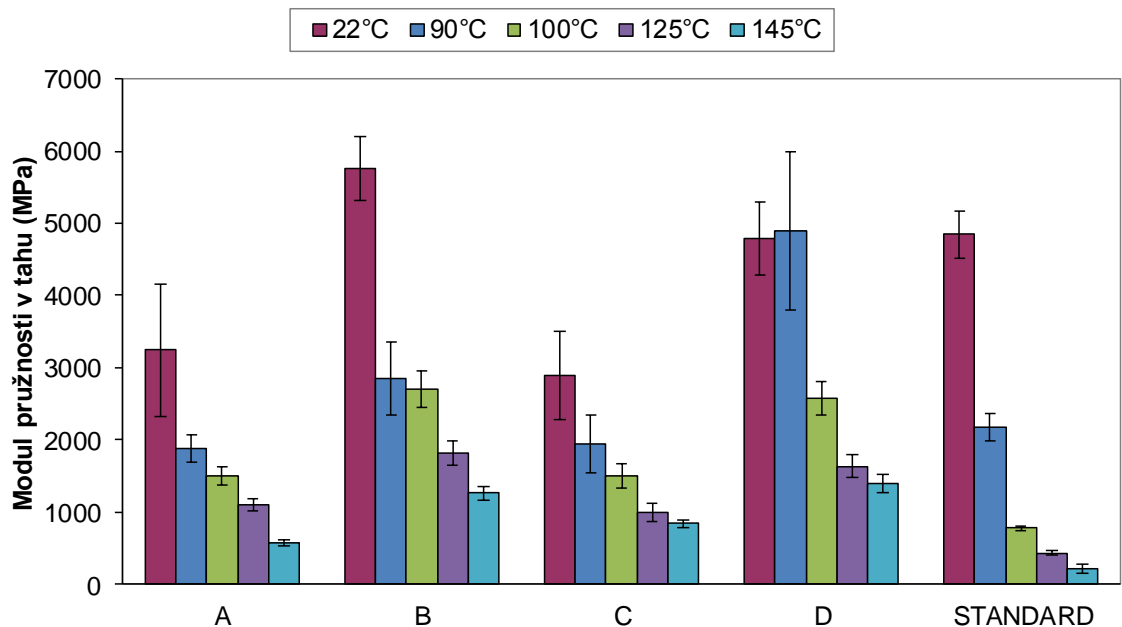
Při zvýšené teplotě bylo nejprve zapotřebí vzorky temperovat. Temperace probíhala přímo v upínací komoře tahového stroje zhruba 20 minut. Poté byl vzorek upnut a v ustáleném stavu probíhala samotná tahová zkouška.

### 7.2.1 Modul pružnosti v tahu

Modul pružnosti v tahu (neboli Youngův modul) lze definovat z Hookova zákona jako směrnice přímky procházející počátkem a charakterizuje nám tuhost testovaného zkušebního tělesa.

Tabulka 7 Hodnoty jednotlivých modulů pružnosti

Materiál	Teplota vzorku (°C)				
	22	90	100	125	145
A	3239	1882.22	1494	1099.3	565.43
B	5764	2845.56	2697	1813	1256
C	2887	1934.55	1496	990.2	838.71
D	4795	4897	2573	1634	1395
STANDARD	4846	2180	771.9	427.1	215



Obr. 9 Modul pružnosti v tahu

Při tahové zkoušce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnota modulu pružnosti v tahu při teplotě 22°C byla dosažena u materiálu B (5764 MPa). Naopak nejmenší hodnoty při teplotě 22°C byla zjištěna u materiálu STANDARD (4846 MPa), (Tabulka 7 a Obr. 9).

Nejvyšší hodnoty modulu pružnosti v tahu při teplotě 90°C byly naměřeny u materiálu D (4897 MPa), zatímco nejmenších hodnot dosáhl materiál A (1882 MPa), (Tabulka 7 a Obr. 9).

Z výsledku tahové zkoušky při teplotě 100 °C je patrné, že nejvyšší hodnoty modulu pružnosti v tahu, bylo dosaženo u materiálu B (2697 MPa). Nejmenší hodnoty modulu pružnosti v tahu při teplotě 100 °C dosáhl materiál STANDARD (771 MPa), (*Tabulka 7 a Obr. 9*).

Porovnáním výsledků tahové zkoušky bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty modulu pružnosti v tahu při teplotě 125°C dosáhl materiál B (1813 MPa), zatímco nejmenší hodnota byla zjištěna u materiálu STANDARD (427 MPa), (*Tabulka 7 a Obr. 9*).

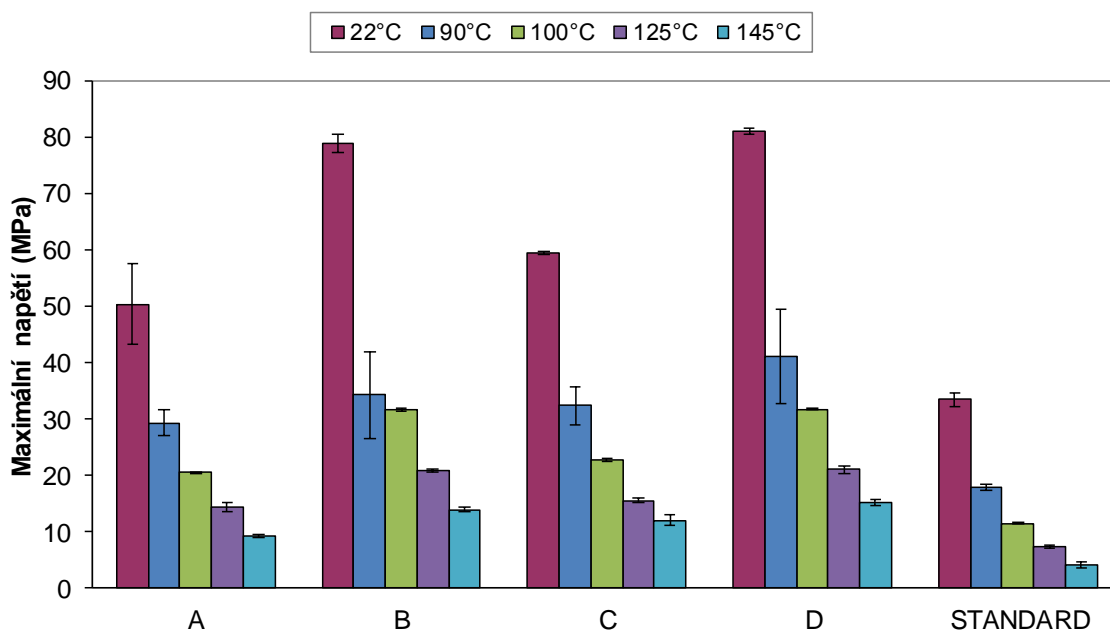
Výsledky modulu pružnosti v tahu, které byly měřeny při teplotě 145°C ukázaly, že nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u materiálu D (1395 MPa). Nejmenší hodnota modulu pružnosti v tahu byla zjištěna u materiálu STANDARD (215 MPa), (*Tabulka 7 a Obr. 9*).

### 7.2.2 Maximální tahové napětí

Velikost napětí ovlivňuje druh plniva a stejně tak i jeho poměr vůči ostatním plnivům a samotnému polypropylenu. Se zvyšující se teplotou maximální tahové napětí klesá, viz *Obr. 10*.

*Tabulka 8* Hodnoty jednotlivých maximálních napětí

	Teplota vzorku (°C)				
	22	90	100	125	145
Materiál	Dosažená hodnota maximálního napětí (MPa)				
A	50.33	29.29	20.42	14.25	9.13
B	78.85	34.2	31.49	20.9	13.8
C	59.44	32.33	22.68	15.45	11.94
D	81.02	41.07	31.73	20.95	15.21
STANDARD	33.36	17.75	11.47	7.226	4.09



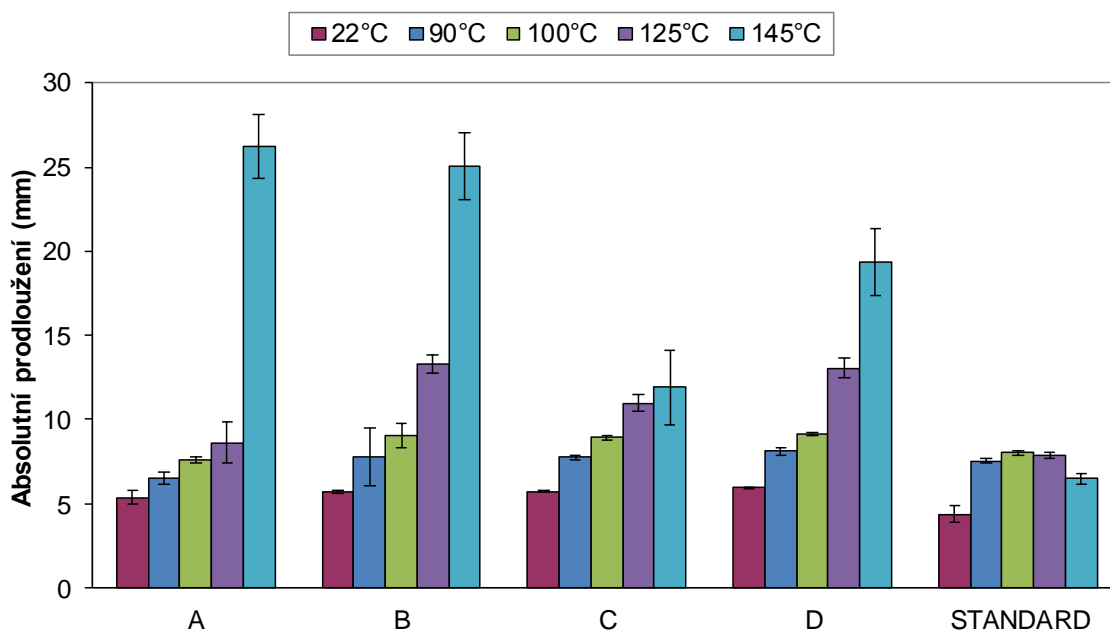
Obr. 10 Maximální napětí

Po vyhodnocení zkoušky tahem vyplynulo, že nejvyšší hodnoty maximálního napětí u testovaných materiálů při teplotách 22, 90, 100, 125 a 145°C dosáhl materiál D (81,41,31,20 a 15 MPa), naopak nejmenších hodnot maximálního napětí bylo dosaženo u materiálu STANDARD (33,17,11,7 a 4 MPa), jak je patrné z (Tabulka 8 a Obr. 10).

### 7.2.3 Absolutní prodloužení

Tabulka 9 Hodnoty jednotlivých absolutních prodloužení

Materiál	Teplota vzorku (°C)				
	22	90	100	125	145
	Dosažená hodnota absolutního prodloužení (mm)				
A	5.35	6.5	7.6	8.63	26.26
B	5.69	7.79	9.02	13.31	25.04
C	5.73	7.77	8.94	10.97	11.9
D	5.94	8.13	9.12	13.04	19.34
STANDARD	4.37	7.53	8.01	7.86	6.48



Obr. 11 Absolutní prodloužení

Při tahové zkoušce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnota absolutního prodloužení (deformace) při teplotě 22°C byla dosažena u materiálu D (5,94 mm). Naopak nejmenší hodnoty při teplotě 22°C byla zjištěna u materiálu STANDARD (4,37 mm), jak je patrné z (Tabulka 9 a Obr. 11).

Nejvyšší hodnoty absolutního prodloužení při teplotě 90°C byly naměřeny u materiálu D (8,13 mm), zatímco nejmenších hodnot dosáhl materiál A (6,5 mm), jak je patrné z (Tabulka 9 a Obr. 11).

Z výsledku tahové zkoušky při teplotě 100 °C je patrné, že nejvyšší hodnoty absolutního prodloužení bylo dosaženo u materiálu D (9,12 mm). Nejmenší hodnoty absolutního prodloužení při teplotě 100 °C dosáhl materiál A (7,6 mm), jak je patrné z (Tabulka 9 a Obr. 11).

Porovnáním výsledků tahové zkoušky bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty absolutního prodloužení při teplotě 125°C dosáhl materiál B (13,31 mm), zatímco nejmenší hodnota byla zjištěna u materiálu STANDARD (7,86 mm), jak je patrné z (Tabulka 9 a Obr. 11).

Výsledky absolutního prodloužení, které byly naměřeny při teplotě 145°C ukázaly, že nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u materiálu B (25,04 mm). Nejmenší hodnota absolutního



prodloužení byla zjištěna u materiálu STANDARD (6,68 mm), jak je patrné z (Tabulka 9 a Obr. 11).

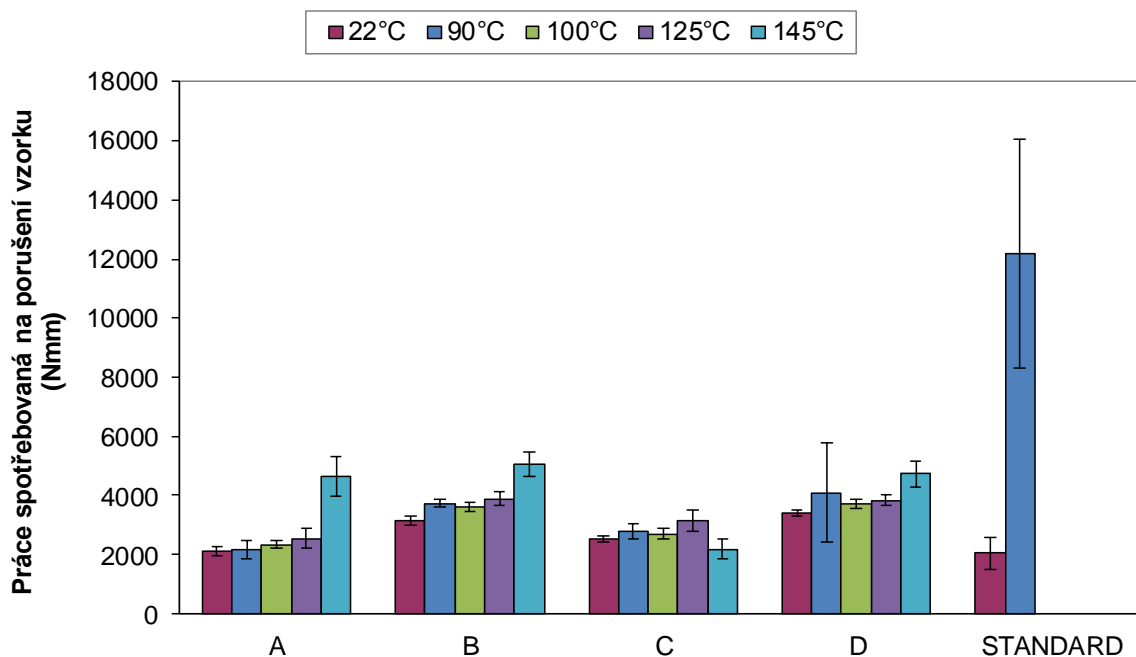
#### 7.2.4 Práce spotřebovaná na porušení vzorku

Práce, kterou musí měřící zařízení vynaložit na porušení zkoušeného vzorku.

Z obrázku (Obr. 12) vyplývá, že s rostoucí teplotou se práce zvyšuje. Děje se tak zejména proto, že materiál při zvyšující se teplotě měkne a stává se více tažným, pro porušení vzorku je proto zapotřebí většího prodloužení.

Tabulka 10 Práce spotřebovaná na porušení vzorku

Materiál	Teplota vzorku (°C)				
	22	90	100	125	145
	Práce spotřebovaná na porušení vzorku (J)				
A	2118.88	2159.99	2333.11	2550.87	4638.07
B	3150.12	3730.03	3615.46	3894.14	5052.97
C	2534.66	2765.34	2697.24	3132.21	2184.72
D	3405.22	4098.2	3705.21	3824.53	4739
STANDARD	2047.78	1292.19	Neměřeno	Neměřeno	Neměřeno



Obr. 12 Práce spotřebovaná na porušení vzorku

Výsledky měření vynaložené deformační práce při tahové zkoušce při teplotách 22, 90, a 125 °C ukázaly, že nejvyšší hodnoty byly naměřeny u materiálu D (3405, 4098 a 3705 J), zatímco nejmenší hodnoty byly zjištěny u materiálu STANDARD (2047, 1292 J). U teplot 125 a 145°C dosáhl nejvyšších hodnot deformační práce materiál B (3894, 5052 J), naopak nejmenší hodnoty byly zjištěny u materiálu STANDARD, jak je uvedeno v (Tabulka 10 a Obr. 12).

Na Obr. 13 je vzorek materiálu STANDARD, který byl protahován až do maximální pracovní výšky stroje. Materiál přesto nebyl porušen, další měření již proto nebyla u tohoto materiálu provedena.



Obr. 13 Maximální natažení vzorku STANDARD při tahové zkoušce

## 8 ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODOU CHARPY

### 8.1 Měřicí zařízení

Rázové zkoušky byly provedeny na zkušební stroji CAEST Resil Impactor Junior.



Obr. 14 Zkušební stroj CAEST Resil Impactor junior

Tabulka 11 Technické parametry zkušebního stroje CAEST Resil Impactor junior

Typ stroje	CAEST RESIL IMPACTOR JUNIOR	
Rozměry stroje		
Úhel břity kyvadla	30±1	°
Délka kyvadla	225	mm
Rozpětí podpěry	40-62-70	mm
Úhel vychýlení kyvadla	160	°
Dynamika stroje		
Energie	1.25	J
Rychlost rázu	2,9	mm/s

Jelikož se jednalo o měření vrubové houževnatosti, všechny vzorky byly opatřeny vrubem.

Vrubování probíhalo na stroji CEAST (*Obr. 15*).



*Obr. 15* Přístroj na ražení vrubů do zkušebních tělísek

## 8.2 Měření a vyhodnocení výsledků

Na zkušebním stroji bylo provedeno 10 měření pro každý materiál a pro každou teplotu, celkem tedy 50 měření pro každý druh polypropylenu.

Při zvýšené teplotě bylo nejprve zapotřebí vzorky temperovat. Temperace probíhala v upínací komoře tahového stroje zhruba 20 - 30 minut. Poté byl vzorek po jednom položen na zkušební stroj a provedena zkouška vrubové houževnatosti.

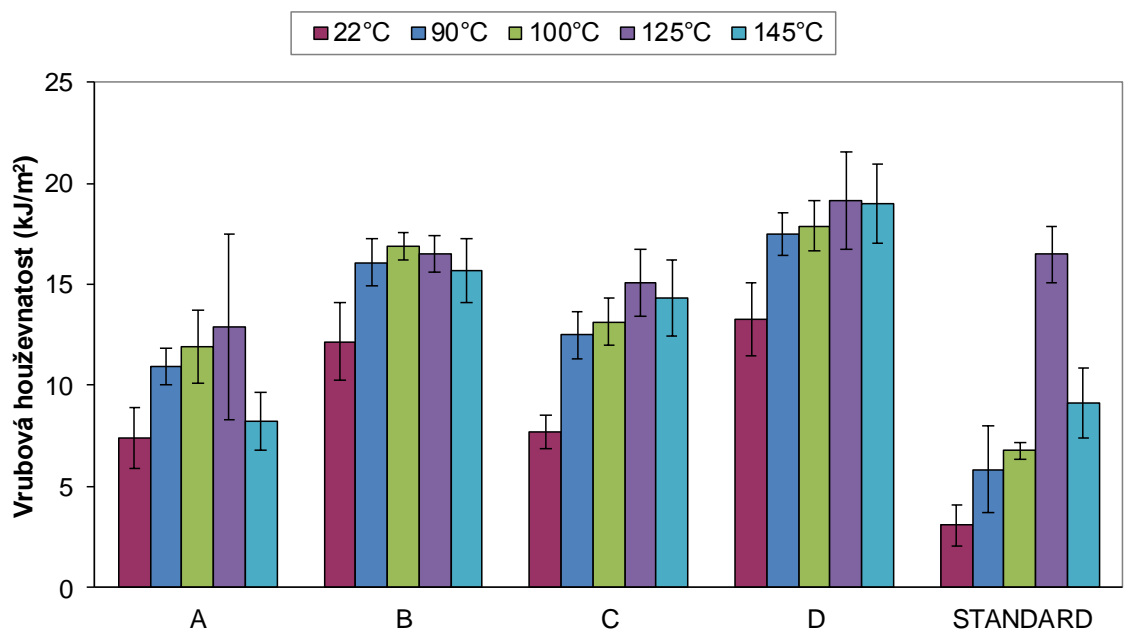
Výsledky byly zaznamenány za pomoci softwaru zkušebního stroje, vyhodnoceny a následně upraveny do výsledné podoby obrázků a tabulek.

### 8.2.1 Vrubová houževnatost

Houževnatost je schopnost materiálu zůstat při nárazech vcelku bez tvorby trhlin.

Tabulka 12 Hodnoty vrubové houževnatosti

Materiál	Teplota vzorku (°C)				
	22	90	100	125	145
Vrubová houževnatost (kJ/m <sup>2</sup> )					
A	7.39	10.91	11.92	12.89	8.22
B	12.15	16.09	16.86	16.50	15.66
C	7.68	12.48	13.15	15.04	14.30
D	13.25	17.48	17.89	19.13	19.01
STANDARD	3.05	5.81	6.75	16.50	9.13



Obr. 16 Vrubová houževnatost

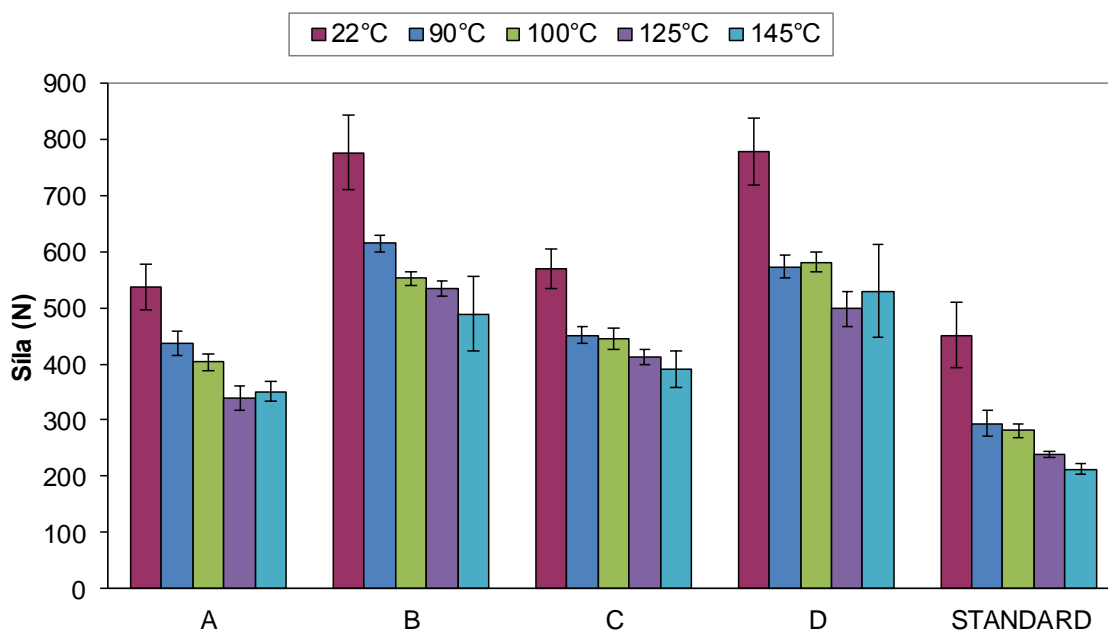
Z naměřených výsledků vrubové houževnatosti je patrné, že nejvyšší hodnot naměřených za teplot 22, 90, 100, 125, 145°C dosáhl materiál D (13,25; 17,48; 17,89; 19,13 a 19,01 kJ/m<sup>2</sup>), zatímco nejmenší hodnoty vrubové houževnatosti byly naměřeny pro teploty 22, 90 a 100°C u materiálu STANDARD (3,05; 5,81; 6,75 kJ/m<sup>2</sup>). Nejmenší hodnoty vrubové

houževnatosti měřené při teplotách 125 a 145°C byly zjištěny u materiálu A (12,89; 8,22 kJ/m<sup>2</sup>), jak je vidět z (*Tabulka 12 a Obr. 16*).

### 8.2.2 Maximální síla

*Tabulka 13* Hodnoty síly pro vrubovou houževnatost

Materiál	Teplota vzorku (°C)				
	22	90	100	125	145
A	536.67	435.97	402.94	340.18	351.14
B	776.90	614.69	552.43	534.40	489.53
C	568.56	451.09	445.67	412.90	391.10
D	777.78	573.73	581.16	498.10	529.61
STANDARD	451.22	294.17	280.94	238.97	212.85



*Obr. 17* Maximální síla (Charpy)

Z naměřených výsledků zkoušky vrubové houževnatosti je patrné, že nejmenších hodnot maximální síly zjištěných za teplot 22, 90, 100, 125, 145°C dosáhl materiál STANDARD (451,22; 294,17; 280,94; 238,97 a 212,85 N), zatímco největší hodnoty maximální síly byly naměřeny pro teploty 22, 100 a 145°C u materiálu D (777; 581; 529 N). Největší hodnoty

maximální síly při zkoušce vrubové houževnatosti měřené při teplotách 90 a 125°C byly zjištěny u materiálu B (614; 534 N), jak je vidět z (*Tabulka 13 a Obr. 17*).

## 9 RÁZOVÁ ZKOUŠKA PADAJÍCÍM TLOUKEM

Rázová zkouška padajícím tloukem je zkouška realizovaná dle normy ISO 6603-2. Zkouška byla realizována na zkušebních tělesech (destičkách), které byly vyrobeny technologií vstřikování. Na tyto destičky byl pouštěn tlouk a byla měřena práce potřebná pro vnik trhlín či porušení testovaného zkušebního tělesa.

### 9.1 Měřicí zařízení

Rázová zkouška padajícím tloukem byla prováděna na padostroji od firmy Zwick HIT230F s maximální energií padajícího tlouku 230J. Měření bylo provedeno vždy na pěti zkušebních tělesech. Naměřené hodnoty byly graficky zpracovány a vyhodnoceny.

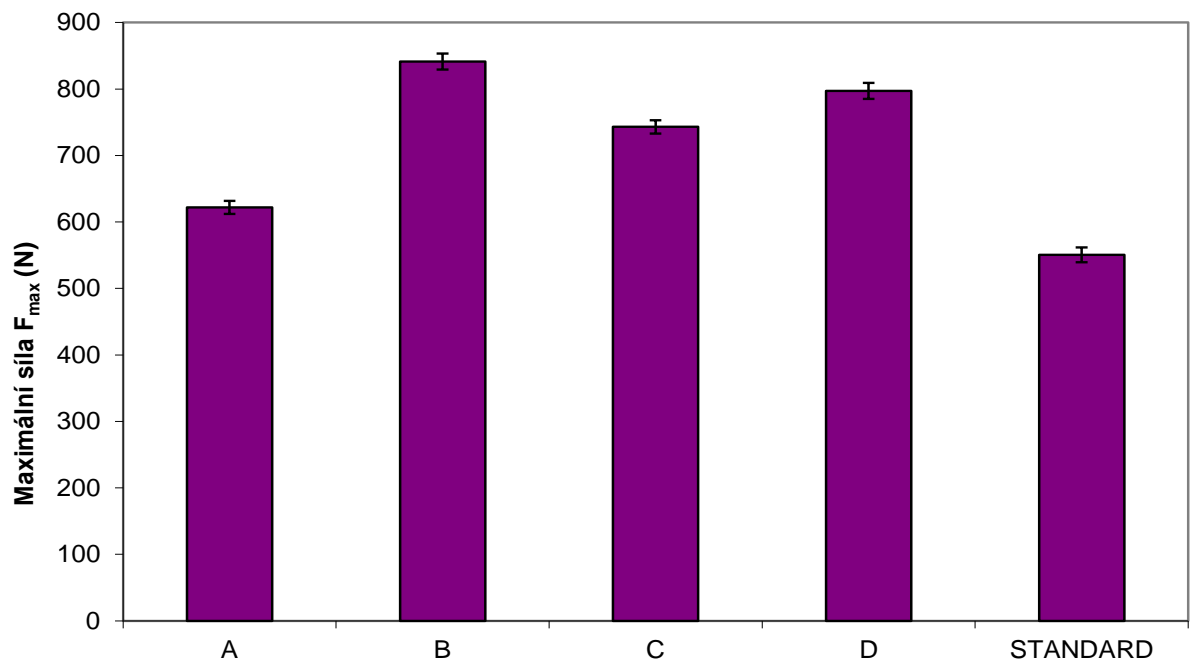


Obr. 18 Padostroj Zwick HIT230F



## 9.2 Měření a vyhodnocení výsledků

### 9.2.1 Maximální síla



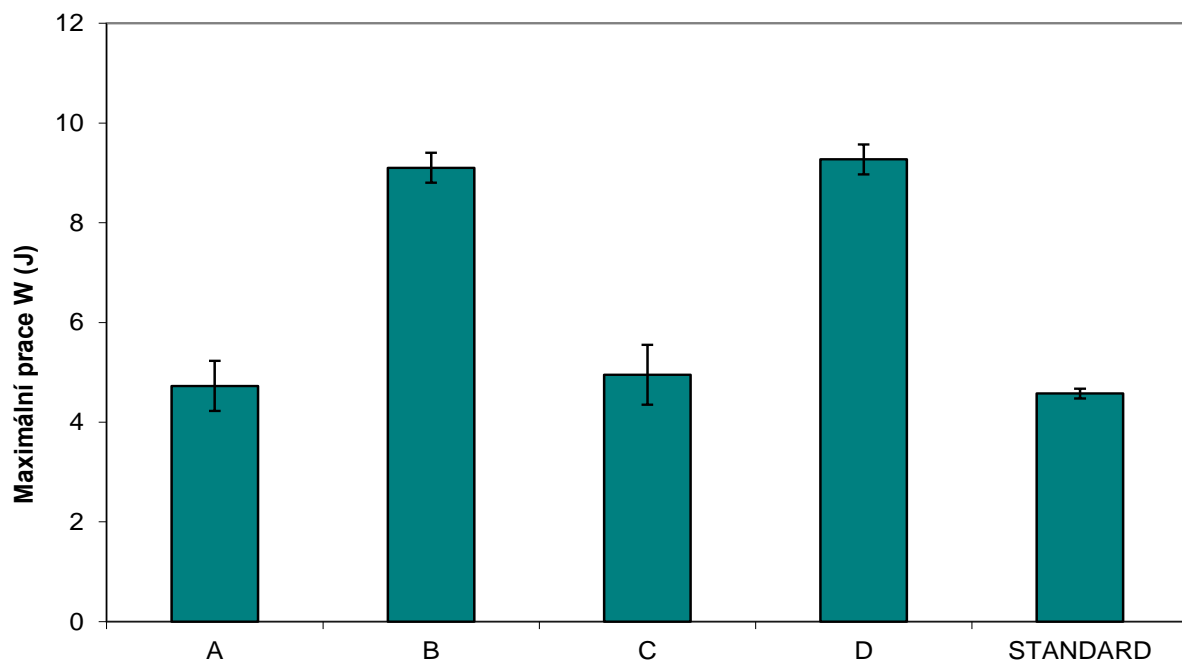
Obr. 19 Maximální síla (padostroj)

Tabulka 14 Hodnoty maximální síly

Materiál	$F_{\max}$ (N)
A	621.93
B	841.17
C	743.14
D	797.16
STANDARD	550.61

Z výsledků měření rázové zkoušky padajícím tloučkem je patrné, že největší hodnoty maximální síly byly zjištěny u materiálu B (841 N), naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny u materiálu STANDARD (550 N), jak je patrné z (Tabulka 14 a Obr. 19).

### 9.2.2 Maximální práce



Obr. 20 Maximální práce

Tabulka 15 Hodnoty maximální práce

Materiál	W (J)
A	4.73
B	9.1
C	4.95
D	9.27
STANDARD	4.57

Z výsledků měření rázové zkoušky padajícím tloučkem je patrné, že největší hodnoty maximální práce byly zjištěny u materiálu D (9,27 J), naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny u materiálu STANDARD (4,57 J), jak je patrné z (Tabulka 15 a Obr. 20).

## 10 ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI

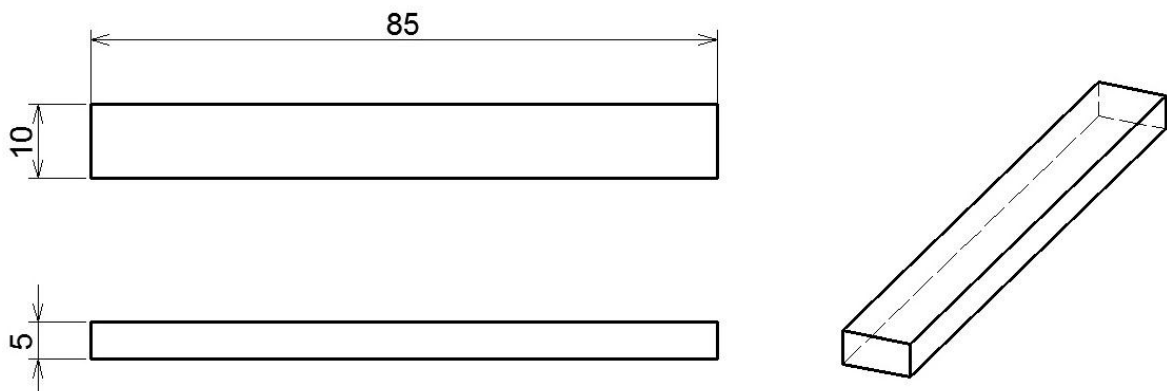
### 10.1 Měřicí zařízení

Měření mikrotvrdomosti bylo provedeno na přístroji Micro Combi Tester od firmy CSM Instruments dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Aplikované zatížení pro samotnou zkoušku mikrotvrdomosti bylo zvoleno 1N s vydrží 90s. Zatěžující a odtěžující rychlost byla použita 2N/min. Měření byla prováděnou metodou DSI (Depth Sensing Indentation – metoda Oliver & Pharr), pro niž byl zvolen český ekvivalent “Instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti“. Poissonovo číslo bylo odhadnuto 0,3 z důvodu, že nebylo možné změřit jeho hodnotu u testovaných zkušebních těles.



Obr. 21 Zkušební zařízení CSM Micro-combi tester

Obrázek (Obr. 22) uvádí tvar a rozměry zkušebních vzorků.



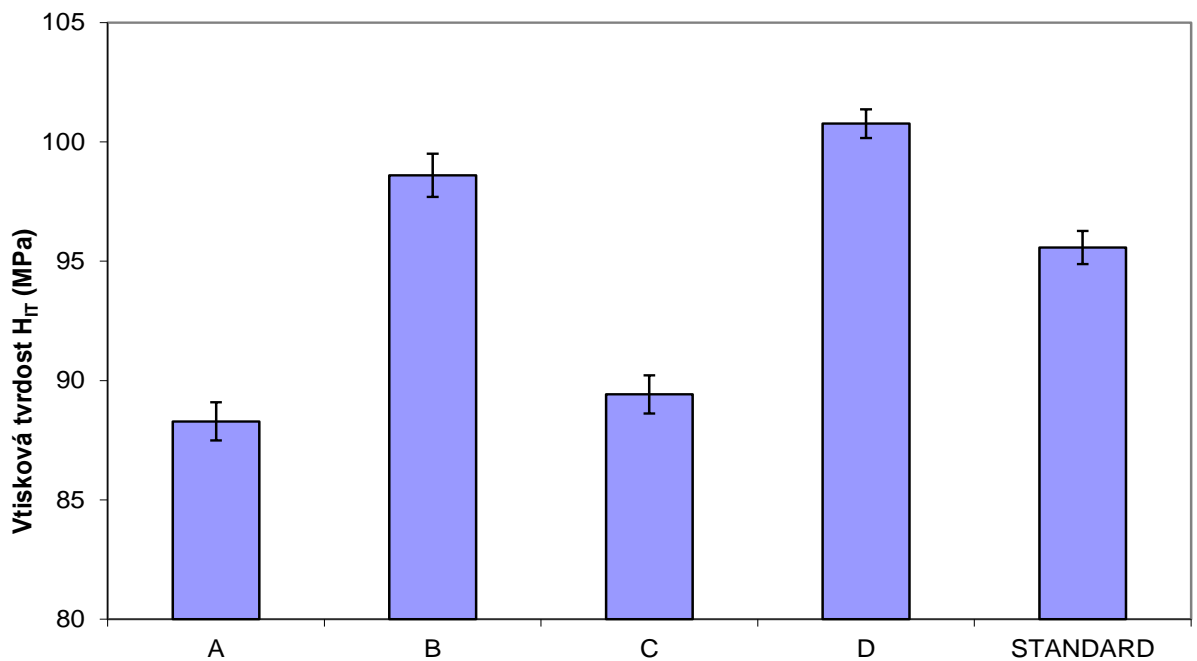
Obr. 22 Tvar a rozměry zkušebních vzorků

## 10.2 Měření a vyhodnocení výsledků

Na každém vzorku bylo provedeno 10 měření při zatížení 1 N. Vyhodnocovaly se následující veličiny: Vtisková tvrdost  $H_{IT}$ , vtiskový modul pružnosti  $E_{IT}$ , creep  $C_{IT}$ , elastická část práce vtisku  $W_{elast}$ , plastická část práce vtisku  $W_{plast}$  a závislost hloubky vtisku  $P_d$  na aplikovaném zatížení a čase.

### 10.2.1 Vtisková tvrdost $H_{IT}$

Jedná se o nejčastěji používané vyjádření tvrdosti ve spojení s metodou DSI.



Obr. 23 Vtisková tvrdost  $H_{IT}$

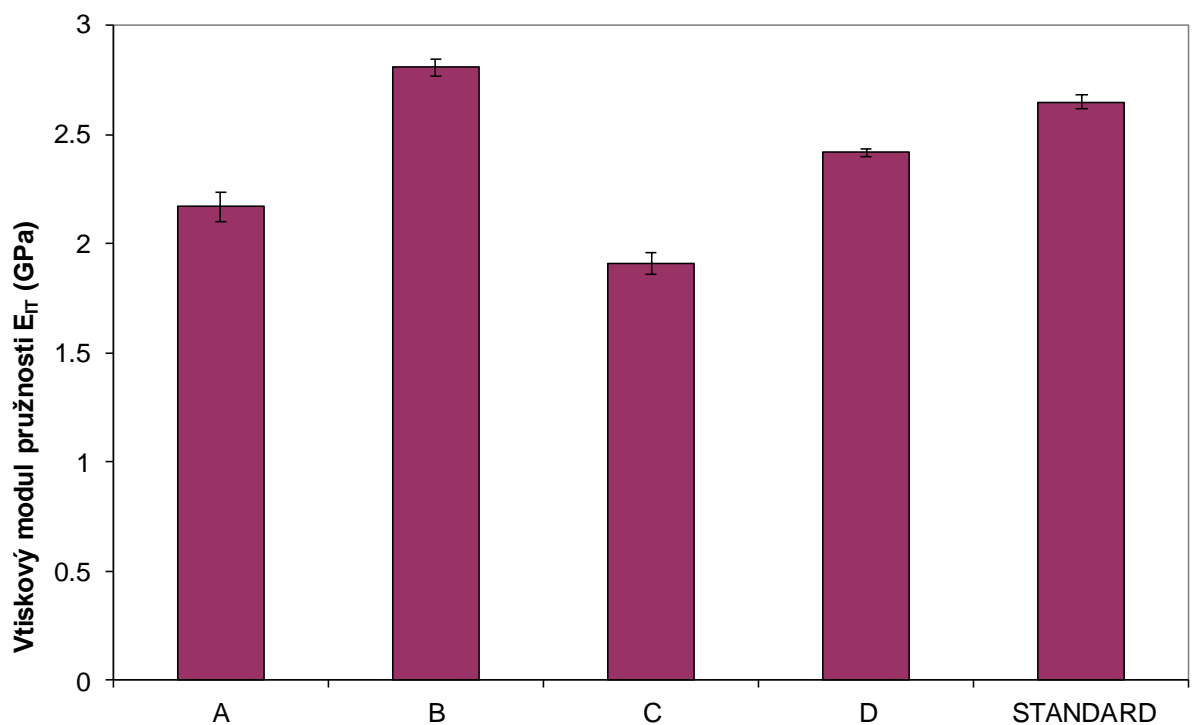
Tabulka 16 Maximální hodnoty vtiskové tvrdosti  $H_{IT}$

Materiál	$H_{IT}$ (MPa)
A	88.29
B	98.6
C	89.42
D	100.77
STANDARD	95.57

Z výsledků měření při zkoušce mikrotvrdosti je patrné, že největší hodnot vtiskové tvrdosti  $H_{IT}$  byly zjištěny u materiálu D (100 MPa), naopak nejmenších hodnot dosáhl materiál A (88 MPa), jak je patrné z (*Tabulka 16 a Obr. 23*).

### 10.2.2 Vtiskový modul pružnosti $E_{IT}$

V ideálním případě je jeho význam stejný jako u Youngova modulu, avšak v určité hloubce proniknutí indentoru styčná plocha závisí nejen na tvaru hrotu, ale i na pružné deformaci materiálu.



Obr. 24 Vtiskový modul pružnosti  $E_{IT}$

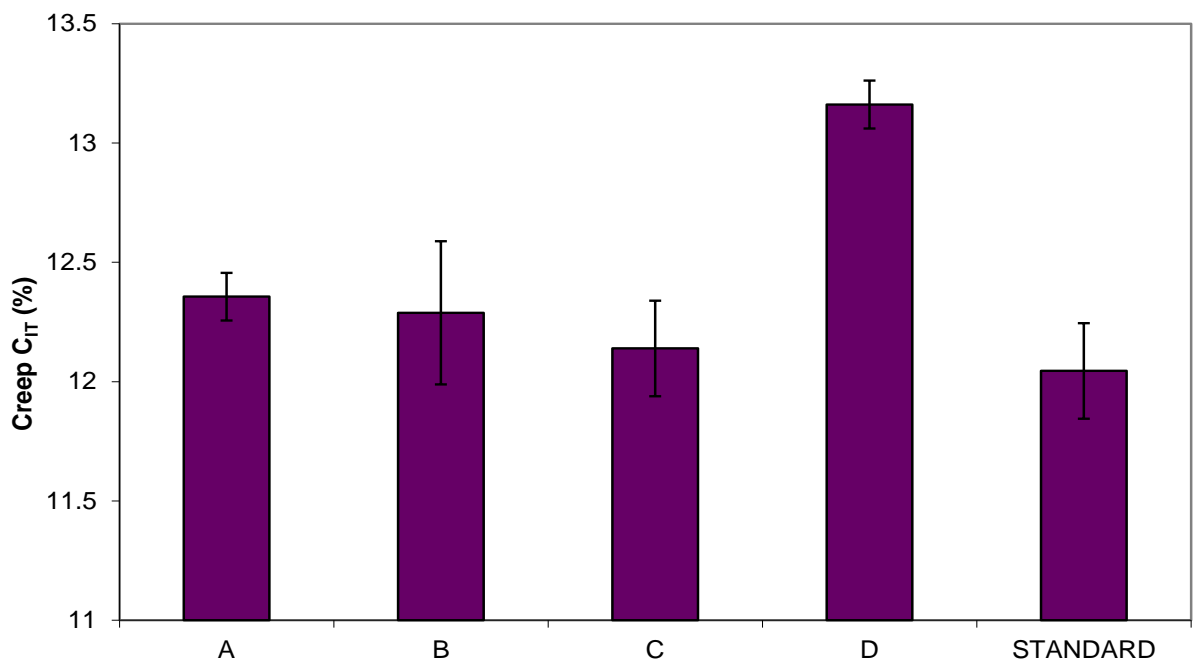
Tabulka 17 Maximální hodnoty vtiskového modulu pružnosti  $E_{IT}$

Materiál	$E_{IT}$ (GPa)
A	2.17
B	2.81
C	1.91
D	2.42
STANDARD	2.65

Z výsledků měření při zkoušce mikrotvrdomosti je patrné, že největší hodnot vtiskového modulu pružnosti  $E_{IT}$  byly zjištěny u materiálu B (2,81 GPa), naopak nejmenších hodnot dosáhl materiál C (1,91 GPa), jak je patrné z (Tab. 16 a Obr. 24).

### 10.2.3 Creep $C_{IT}$

Je definován jako relativní změna hloubky vtisku při konstantním zatížení.



Obr. 25 Creep  $C_{IT}$

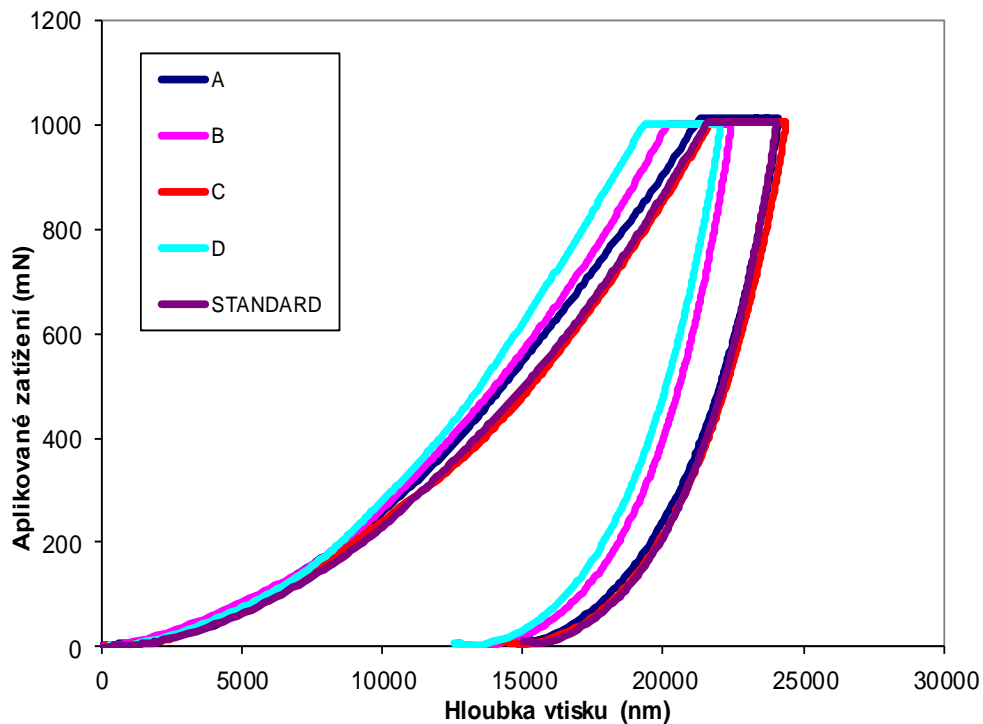
Tabulka 18 Creep  $C_{IT}$

Materiál	$C_{IT}$ (%)
A	12.36
B	12.29
C	12.14
D	13.16
STANDARD	12.05

Z výsledků měření při zkoušce mikrotvrdomosti je patrné, že největší hodnot tečení  $C_{IT}$  (creepu) byly zjištěny u materiálu D (13,16 %), naopak nejmenších hodnot dosáhl materiál STANDARD (12,05 %), jak je patrné z (*Tabulka 18 a Obr. 25*).

#### 10.2.4 Závislost hloubky vtisku $P_d$ na aplikovaném zatížení $F_{AP}$

Metoda DSI umožňuje doplnit naměřená data tvrdosti ještě o závislost zkušebního zatížení na hloubce vtisku (indentační křivka). Průběh indentačních křivek pro dané zatížení je zachycen na *Obr. 26*.

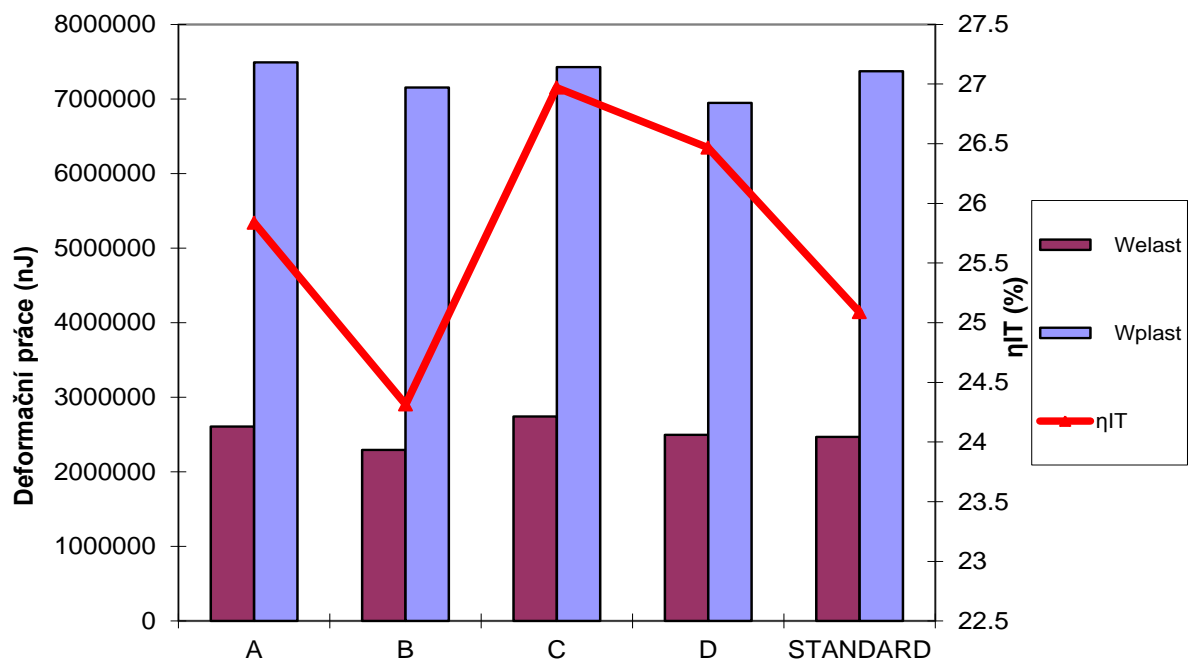


*Obr. 26* Závislost hloubky vtisku  $P_d$  na aplikovaném zatížení  $F_{AP}$

#### 10.2.5 Deformační práce $W$

Velikost celkové mechanické práce se rovná součtu elastické části a plastické části.

Koeficient zpětné relaxace  $\eta_{IT}$  je podíl elastické části práce a celkové mechanické práce, jenž nám umožňuje snadno charakterizovat deformační chování.

Obr. 27 Deformační práce  $W$ 

Tabulka 19 Hodnoty deformační práce a koeficientu zpětné relaxace

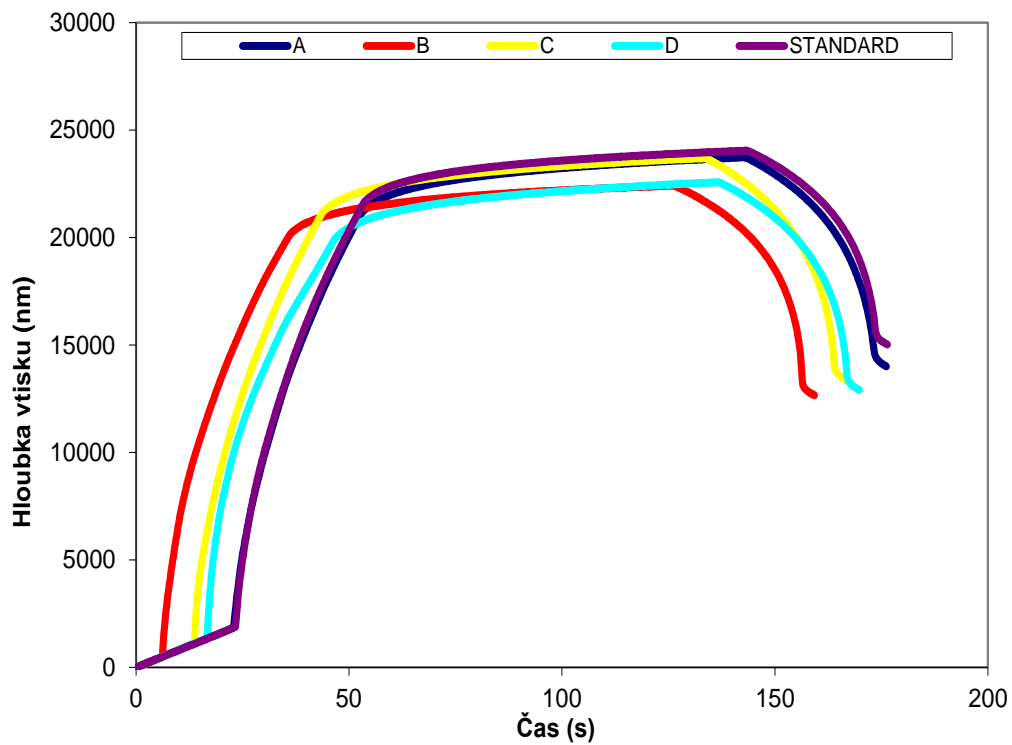
Materiál	$W_{elast}$ (nJ)	$W_{plast}$ (nJ)	$W_{total}$ (nJ)	$\eta_{IT}$ (%)
A	2608229.30	7489198.85	10097428.20	25.84
B	2293723.03	7152361.70	9446084.80	24.31
C	2740211.20	7427051.10	10167262.30	26.97
D	2496620.95	6946911.20	9443532.10	26.47
STANDARD	2466724.03	7370729.90	9837453.80	25.09

Velikost deformační práce při zkoušce mikrotvrlosti ukázala, že největší velikost její elastické části dosáhly největší hodnoty u materiálu C (2740211 nJ) a u plastické části materiál A (7489198 nJ). Nejmenší hodnoty elastické části deformační práce byly zjištěny u materiálu B (2293723 nJ) a u plastické části vykázal nejmenší hodnoty materiál D (6946911 nJ). Podíl  $W_e / W_{cel}$  byl největší u materiálu C (26,97 %) a nejmenší hodnoty dosáhl u materiálu B (24,31 %), jak je patrné (Tabulka 19 a Obr. 27).



### 10.2.6 Závislost hloubky $P_d$ vtisku na čase $t$

Následující obrázek (Obr. 28) je závislost hloubky vtisku na čase. Z počátku je zde patrný mírný nárůst hloubky vtisku, to je způsobeno velmi pozvolným náběhem zatížení. Opět se zde projevuje vyšší hodnota mikrotvrdomosti u vzorku A, B, C a D oproti STANDARDU, což dokazuje posun křivky k menším hodnotám hloubky vtisku.

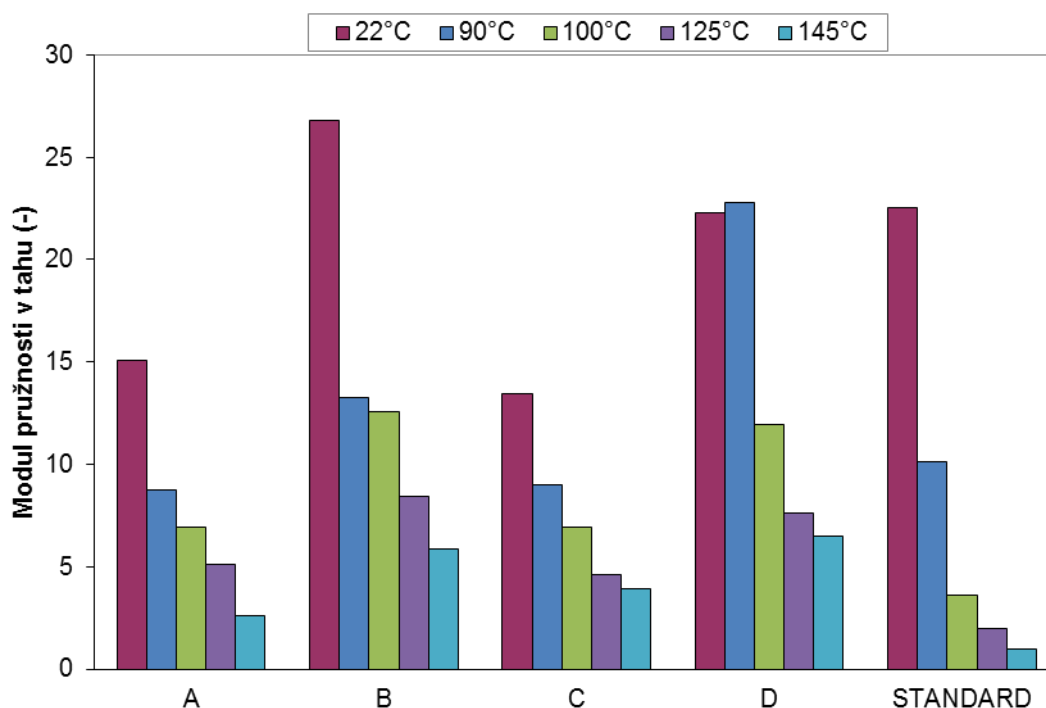


Obr. 28 Závislost hloubky vtisku  $P_d$  na čase  $t$

## 11 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Cílem praktické části diplomové práce bylo porovnat mechanické vlastnosti standardního materiálu (PP – plněný talkem) s modifikovanými materiály označenými A, B, C, D. Materiály byly modifikovány skelnými vlákny a skleněnými kuličkami. Mechanické vlastnosti byly testovány statickými zkouškami (zkouška tahem, zkouška mikrotvrdoosti) a dynamickými zkouškami (rázová zkouška vrubové houževnatosti, rázová zkouška padajícím tloučkem). Naměřené hodnoty byly graficky zpracovány a vyhodnoceny.

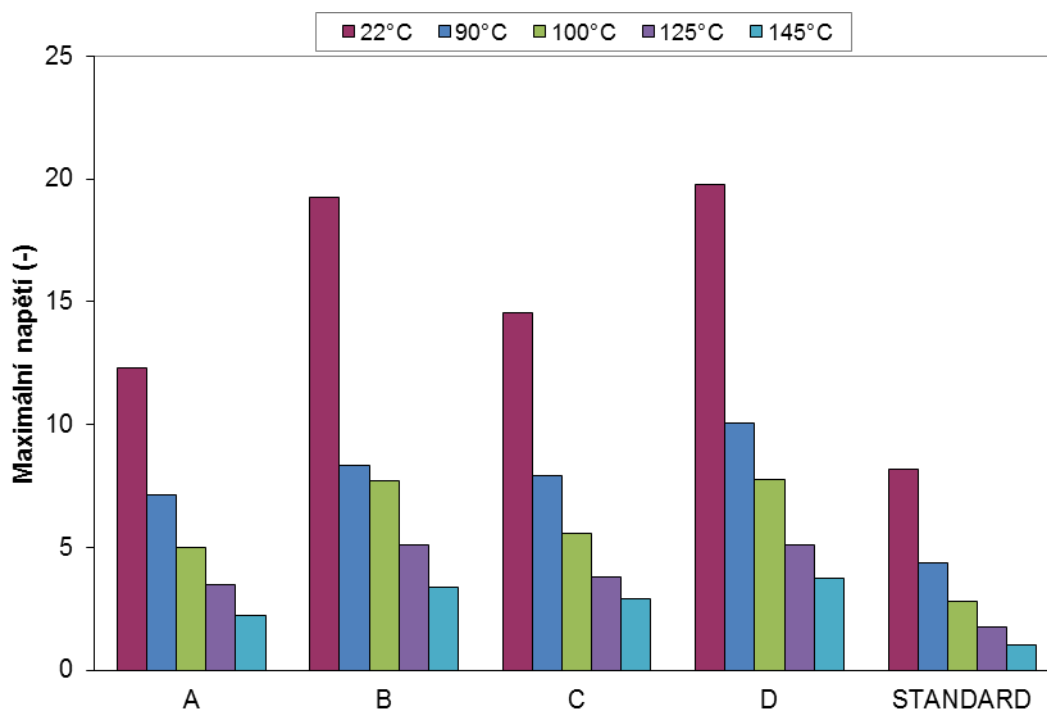
Z provedených experimentů byly soubory naměřených hodnot zpracovány a výsledky graficky znázorněny. Pro snadnější orientaci a rychlé porovnání naměřených hodnot, byly použity tzv. bezrozměrné hodnoty (-), vyjádřené jako poměr jednotlivých měření, k hodnotě materiálu standard dosažené v průběhu příslušného měření.



Obr. 29 Modul pružnosti v tahu (-)

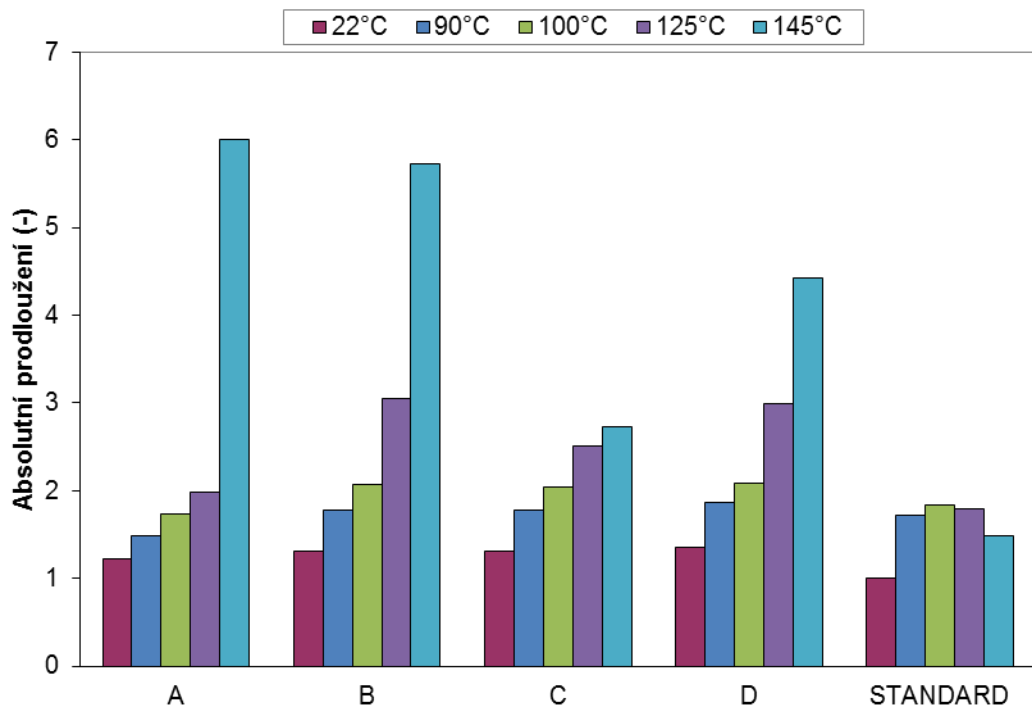
Porovnáním výsledků měření tahové zkoušky vyšlo najevo, že hodnoty modulu pružnosti v tahu, který reprezentuje tuhost testovaného materiálu, jsou zajímavé za teplot okolí (22°C) a za zvýšené teploty (90°C). Za těchto teplot vyšlo najevo, že materiál STANDARD nevykázal nejmenší hodnoty tuhosti. Výsledky ukázaly, že modifikované materiály A a C dosáhly za teplot 22 a 90°C menších hodnot tuhosti, než materiál

STANDARD plněný talkem. Teprve za teplot překračujících 100°C dochází k výraznému poklesu tuhosti materiálu STANDARD. Modifikované materiály vykazují mnohem větší hodnoty tuhosti, které se zvyšující se teplotou rostou až šestinásobně v porovnání s materiálem STANDARD. Je možné konstatovat, že z pohledu tuhosti jsou modifikované materiály za vyšší teploty mnohem tužší než materiál STANDARD (Obr. 29).



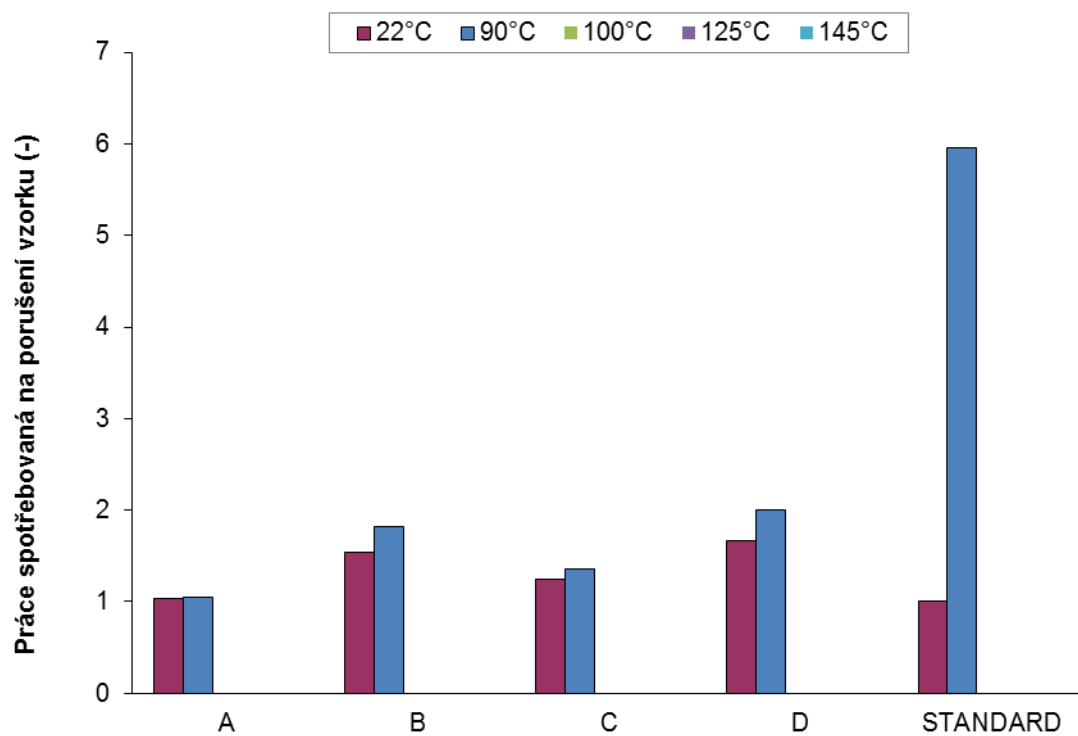
Obr. 30 Maximální napětí (-)

Výsledky tahové zkoušky ukázaly, že nejvyšších hodnot maximálního napětí dosáhly ve většině případů modifikované materiály. Z Obr. 30 je patrné, že materiál STANDARD dosáhl při tahové zkoušce nejhorších výsledků z hlediska maximální pevnosti materiálů. Již při teplotě okolí vykazaly modifikované materiály plněné skelnými vlákny a skleněnými kuličkami mnohem vyšší hodnoty maximálního napětí v porovnání s materiálem STANDARD. Narůst maximální pevnosti přesahoval v některých případech hranici 100%. Se zvyšující se teplotou byl zaznamenán pokles hodnot maximální pevnosti u všech sledovaných materiálů (modifikované i STANDARD), ale modifikované vykazovaly v porovnání se standardem stále narůstající hodnotu maximální pevnosti a to v některých případech až trojnásobnou. Tyto výsledky mohou být s největší pravděpodobností způsobeny rozdílným plnivem u jednotlivých testovaných materiálů.



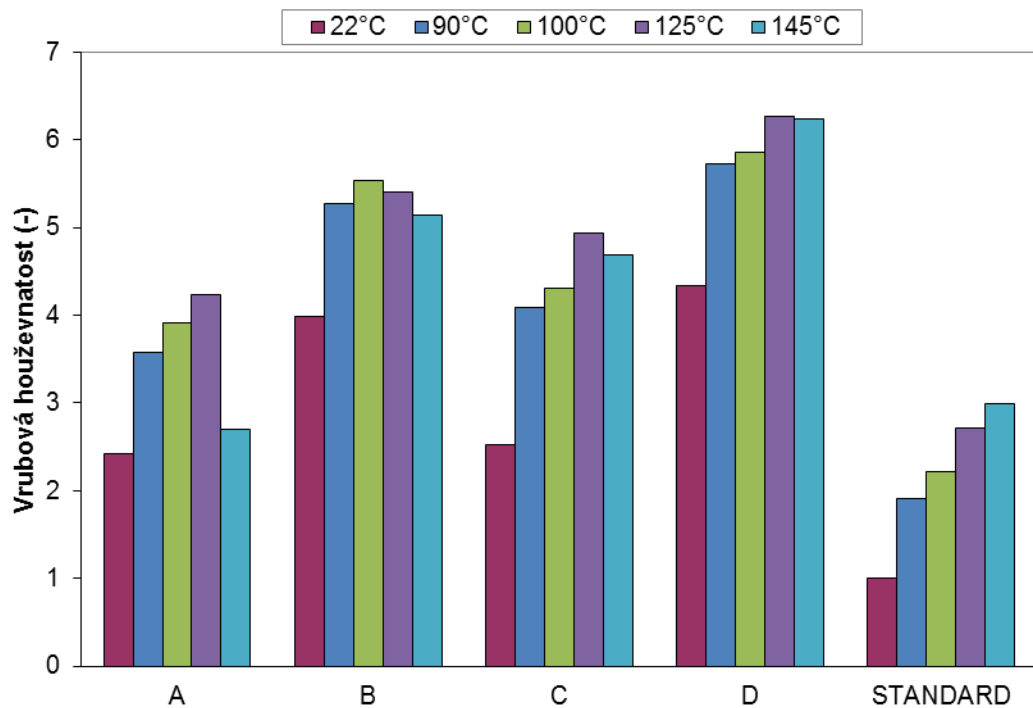
Obr. 31 Absolutní prodloužení (-)

Z naměřených výsledků je patrné, že největší hodnoty deformace vykazuje materiál STANDARD, zatímco nejmenší hodnoty deformace vykazují modifikované materiály. Za vyšších teplot vykázal materiál standard výraznou deformaci, které přesahovala rozměrové možnosti teplotní komory. Proto byl test u materiálu STANDARD vždy přerušen po dosažení 100% deformace.



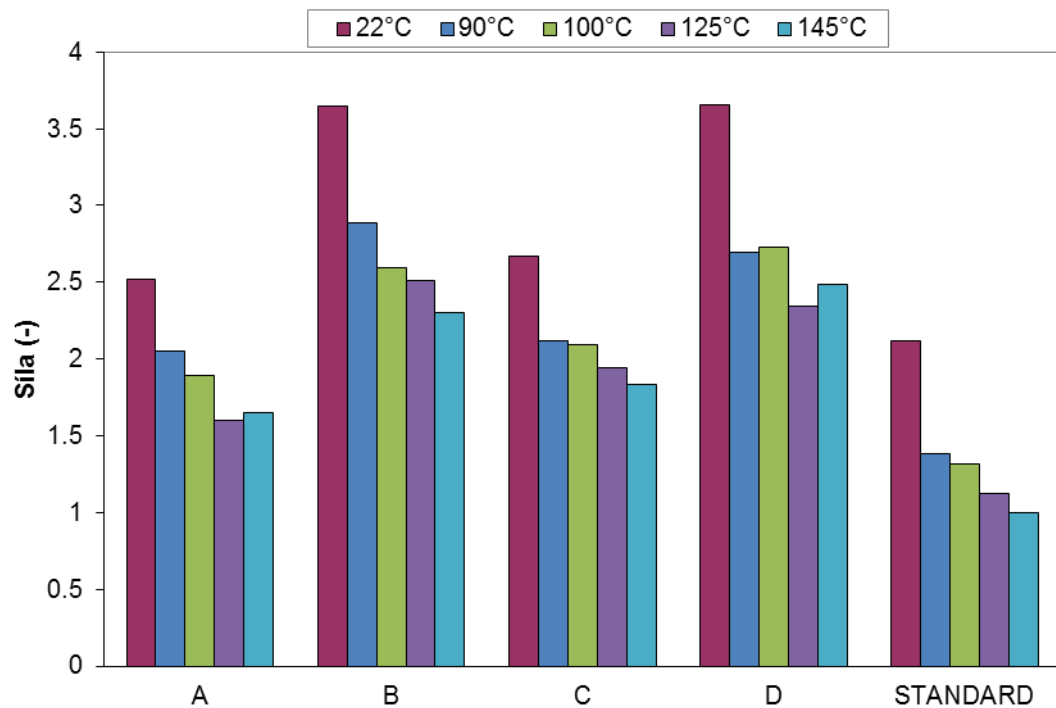
Obr. 32 Práce (-)

Obr. 32 udává poměry práce, kterou bylo třeba vykonat na porušení zkušebního tělesa. Jelikož u materiálu STANDARD nedošlo při teplotách 100, 125 a 145 °C a při maximálních rozměrových možnostech komory k porušení tělesa, nebylo možné práci vyhodnotit.



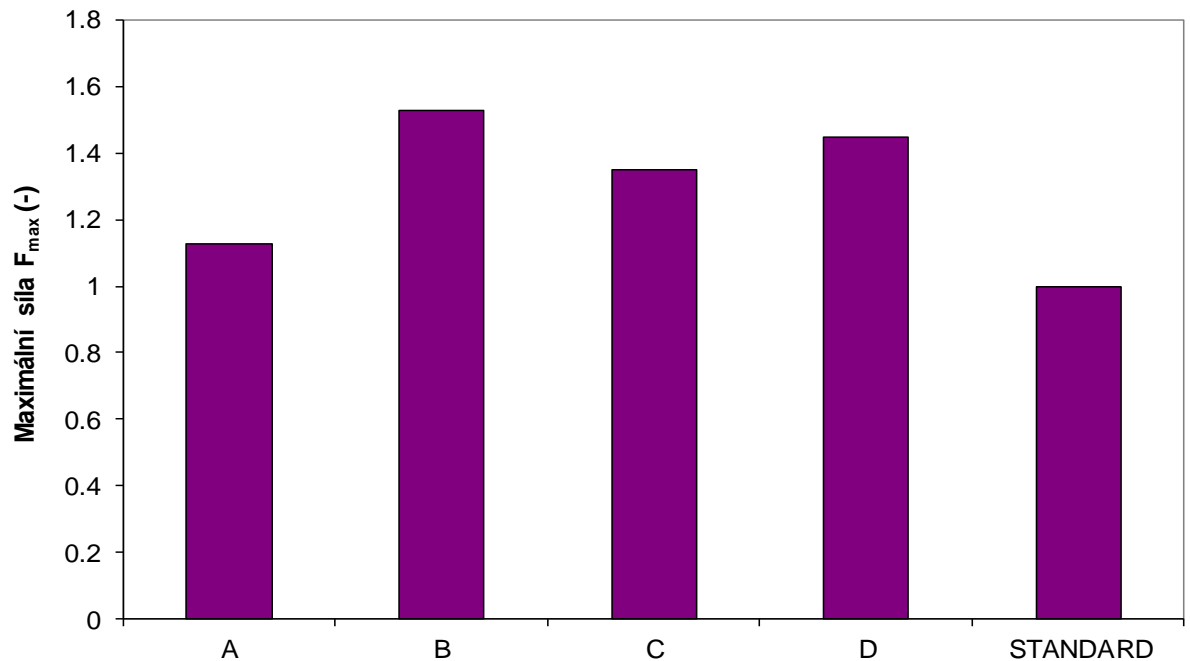
Obr. 33 Vrubová houževnatost (-)

Z výsledků rázové zkoušky vrubové houževnatosti je patrné, že nejvyšších hodnot vrubové houževnatosti za teplot do 100°C dosáhly modifikované materiály. Materiál STANDARD dosáhl v porovnání s modifikovanými materiály 6 krát menší hodnoty vrubové houževnatosti. Tyto rozdíly se však smazávají při nárůstu teploty nad 125°C. Při vyšších teplotách materiál STANDARD nedosahuje nejmenších hodnot vrubové houževnatosti (Obr. 33).



Obr. 34 Síla (-)

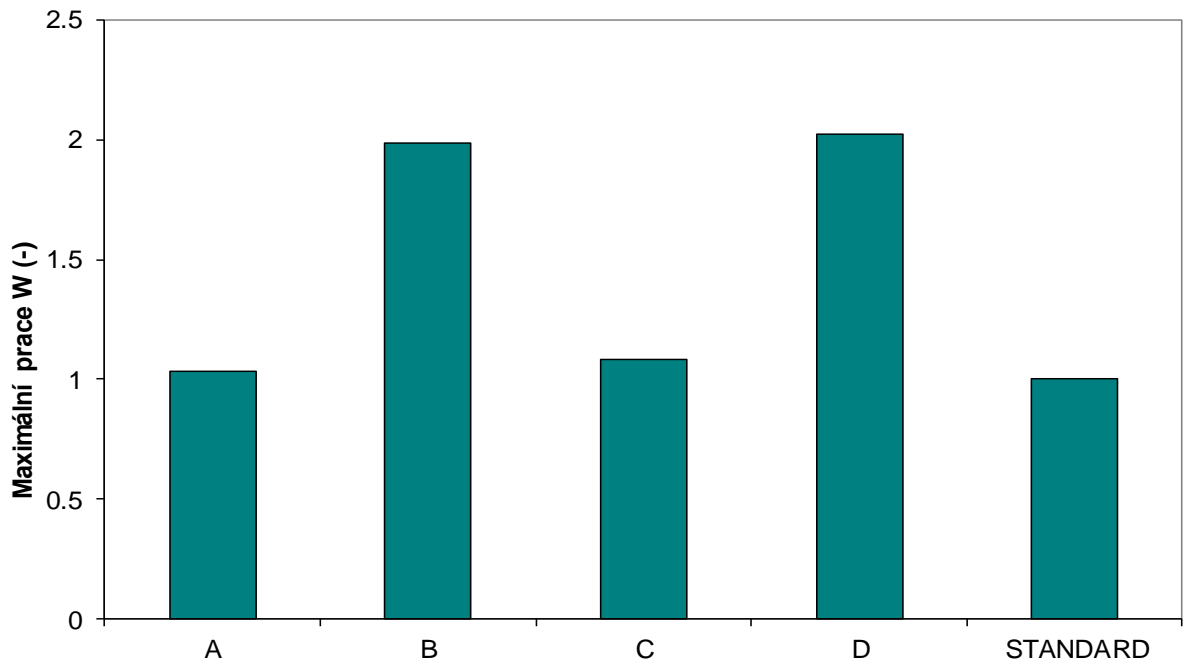
Hodnoty maximální síly dosažené v průběhu rázové zkoušky vrubové houževnatosti ukázaly, že je vykázaly modifikované materiály při všech teplotách. Naopak materiál STANDARD vykázal jak za teploty okolí, tak za zvýšené teploty nejmenší hodnoty maximální síly jak je patrné z *Obr. 34*.



Obr. 35 Maximální síla (-)

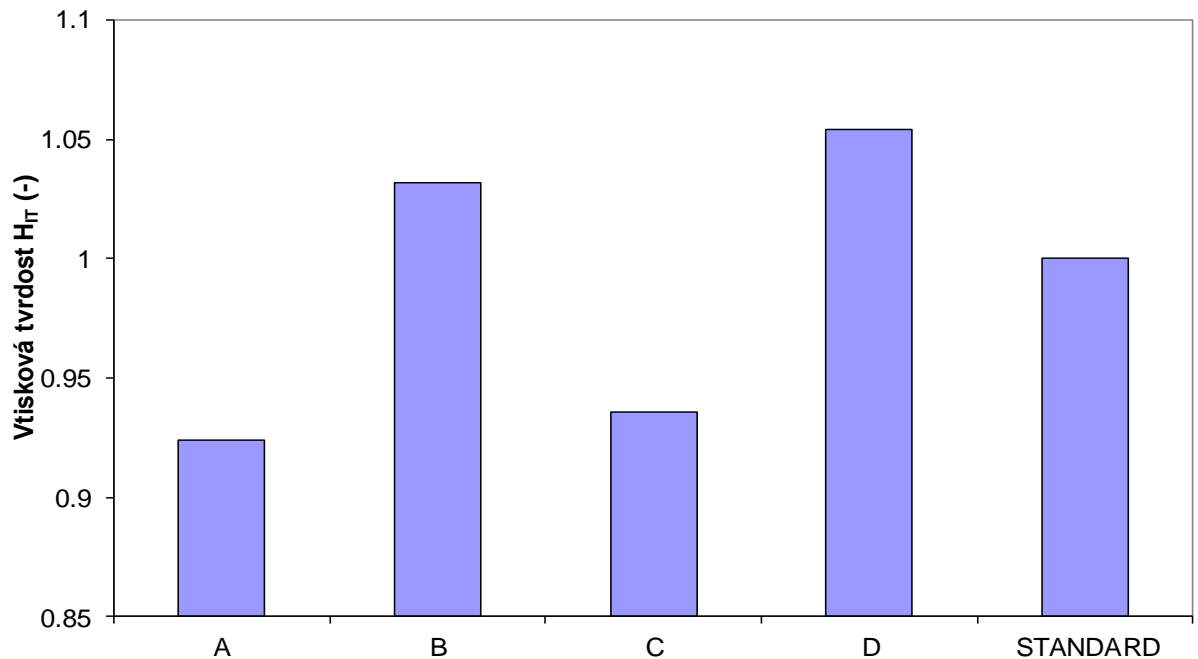
Při rázové zkoušce padajícím tloučkem bylo zjištěno, že nejlepších hodnot maximální síly dosáhly materiály B a D. U materiálu STANDARD byla naměřena hodnota maximální síly nejmenší. V porovnání se standardem můžeme pozorovat nárůst hodnot maximální síly v průměru o 50%. Tento nárůst je pravděpodobně způsoben rozdílným druhem plniva a jeho obsahem ve struktuře. Standardní materiál obsahuje pouze plnivo talek, zatímco materiály B a D obsahují plnivo skleněné kuličky a skelné vlákno (Obr. 35).





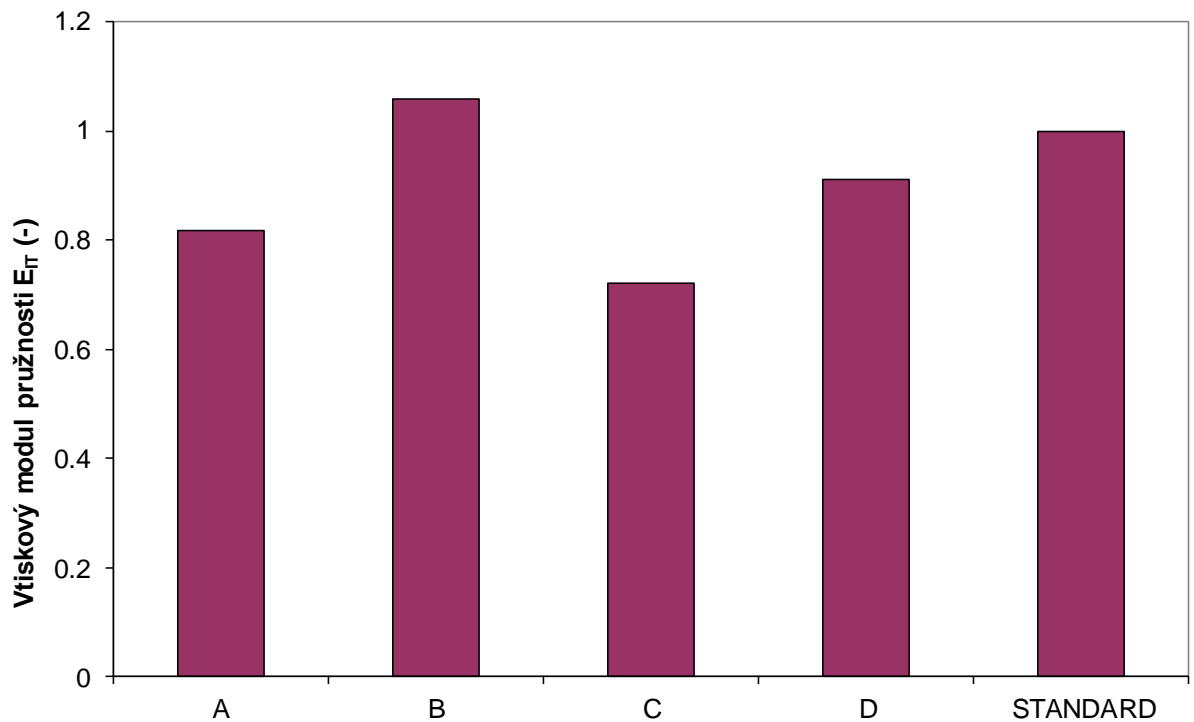
Obr. 36 Maximální práce (-)

Podobných výsledků jak u maximální síly bylo dosaženo i u maximální práce při rázové zkoušce padajícím tloučkem. Také zde dominují dva materiály B a D, které dosahují nejvyšší hodnoty maximální práce. Narůst u těchto dvou materiálů je v průměru o 100% v porovnání s hodnotami, které dosahuje materiál STANDARD. Ten dosáhl nejmenších hodnot maximální práce. Zde můžeme pozorovat ještě větší rozdíl v naměřených hodnotách. To může být způsobeno právě rozdílným dávkováním a samotným druhem plniva (Obr. 36).



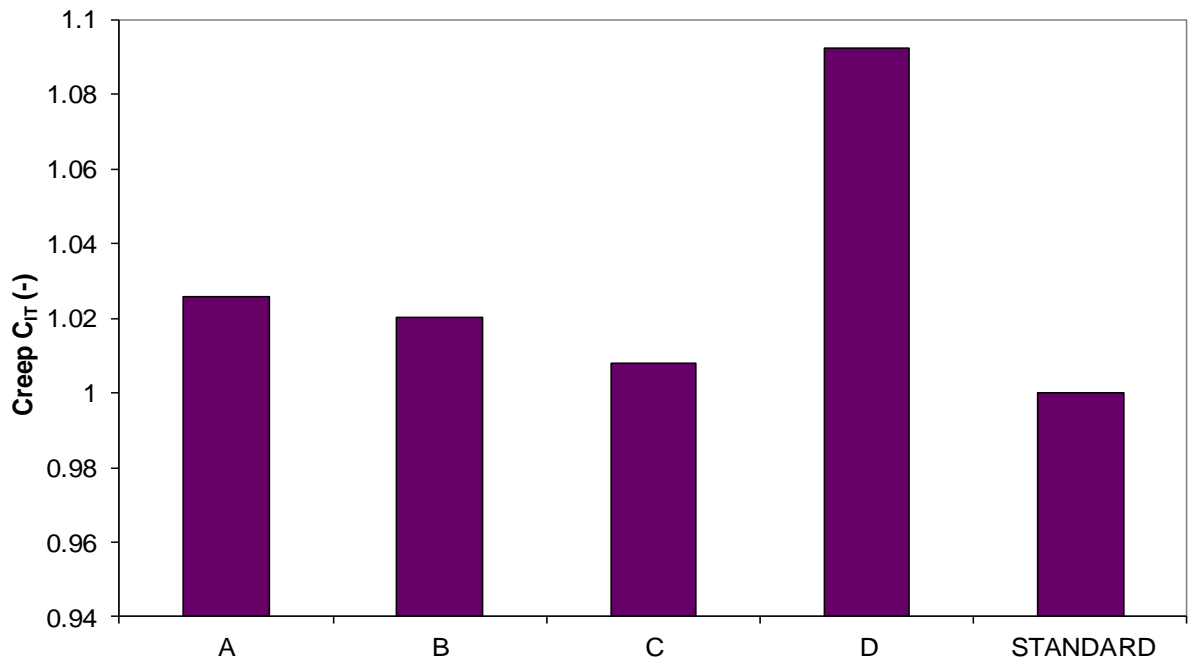
*Obr. 37* Vtisková tvrdost (-)

K velmi zajímavým výsledkům dospělo měření mikrotvrdosti. Zde nedosáhl nejhorších hodnot vtiskové tvrdosti materiál STANDARD, jak by se dalo očekávat, ale materiály modifikované sklenými vlákny a skleněnými kuličkami. Standardní materiál plněný talkem zde dosáhl třetí nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti. Je však nutné podotknout, že pokles u modifikovaných materiálů vykazuje v průměru pouze 5 %. Narůst vtiskové tvrdosti u materiálů B a D je však také pouze o jednotky procent, což v průměru ukazuje hranici 5 % jak je patrné z *Obr. 37*.



Obr. 38 Vtiskový modul pružnosti (-)

Pokud se podíváme na hodnoty vtiskové modulu pružnosti, které reprezentuje mikrotuhost povrchové vrstvy je z nich patrné, že v porovnání se standardem nedochází k žádnému výraznějšímu nárůstu hodnot u modifikovaných materiálů. Materiál B zaznamenal opravdu mírný nárůst, který je však možné zahrnout do chyby měření. U ostatních modifikovaných materiálů ovšem došlo k poklesu hodnot mikrotuhosti a to v některých případech o více jak 20% jak je patrné z Obr. 38.



Obr. 39 Creep (-)

Velmi důležitou hodnotou měřenou při zkoušce mikrotvrlosti je hodnota vtiskového tečení (creepu), která nám dává informaci o odolnosti daného testovaného materiálu proti konstantnímu zatížení za jednotku času. Čím menší bude hodnota microcreepu, tím bude materiál odolnější vůči deformaci způsobující jeho tečení. Nejvyšší hodnoty zde dosáhly překvapivě modifikované polymery, které vykazovaly nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti. Ta se však příliš nelišila od materiálu STANDARD. Nejmenší hodnotu microcreepu vykázal materiál STANDARD, který by měl mít z hlediska tečení nejlepší vlastnosti. Naopak modifikované materiály budou zřejmě náchylnější k deformaci při dlouhodobém zatížení. O tom svědčí také nárůst hodnot microcreepu u modifikovaného materiálu D v průměru o 10%.

## ZÁVĚR

Předložená diplomová práce se zabývá porovnáním mechanických vlastností standardně používaného polypropylenu (PP – STANDARD) s modifikovanými, které byly označeny A, B, C, D. Modifikovaný polypropylen obsahoval odlišné druhy plniva s různým obsahem. Mechanické vlastnosti byly zkoušeny statickými zkouškami, které reprezentovaly zkoušky tahem a mikrotvrdot, dynamické zkoušky reprezentovala rázová zkouška vrubové houževnatosti a rázová zkouška padajícím tloukem.

Z naměřených hodnot tahové zkoušky vyplynulo, že nejlepších mechanických vlastností bylo dosaženo u modifikovaných materiálů a to při testování za teploty okolí i za vyšších teplot. Materiál STANDARD dosáhl při měření maximálního napětí nejmenších hodnot. Modifikované materiály dosáhly při vyšších teplotách 3 krát větších hodnot maximálního napětí (materiál D) v porovnání s materiálem STANDARD.

Při pohledu na tuhost testovaných materiálů je patrné, že materiál STANDARD nedosáhl do teploty 100°C nejhorsích hodnot tuhosti. Ty dosáhly materiály modifikované A a C. Tyto výsledky mohou poukázat na problém při dlouhodobém zatížení. Pokud ovšem bude testování probíhat nad teplotou 100°C, bude materiál STANDARD vykazovat hodnoty tuhosti v porovnání s modifikovanými materiály téměř 6 krát menší.

Při testování vlastností povrchové vrstvy standardního a modifikovaných materiálů se ukázalo, že nárůst vtiskové tvrdosti nebyl nijak výrazný a pohyboval se pouze v jednotkách procent. V případě mikrotuhosti povrchové vrstvy došlo dokonce u modifikovaných materiálů k jejímu poklesu, kromě jednoho (materiál D), který vykázal mírný nárůst o dvě procenta. Tyto výsledky korespondují do jisté míry s výsledky tuhosti získané zkouškou tahem. Také výsledky mikrocreepů naznačily možné problémy z hlediska tečení u modifikovaných materiálů. Nejlepší hodnoty mikrocreepů (vtiskového tečení) byly zjištěny u materiálu STANDARD. Modifikovaný materiál vykazující nejvyšší hodnotu vtiskové tvrdosti měl absolutně nejvyšší hodnotu mikrocreepu.

Pokud se týká odolnosti materiálu proti rázu, vykazovaly největší odolnost materiály modifikované sklenými vlákny a skelnými kuličkami. Naopak materiál STANDARD vykázal 3x menší hodnoty vrubové houževnatosti v porovnání s modifikovanými materiály. Také u padostroje byl u modifikovaných materiálů 100% nárůst maximální práce.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] carpages.co.uk [online]. 2013 [cit. 2013-01-10]. Dostupné z WWW: <[online]. 2013 [cit. 2013-01-10]. *Bentonit*. Dostupné z WWW: <<http://www.carpages.co.uk/renault/renault-megane-part-2-05-04-05.asp>>.
- [2] compositesworld.com [online]. 2013 [cit. 2013-01-10]. Dostupné z WWW: <[online]. 2013 [cit. 2013-01-10]. *Bentonit*. Dostupné z WWW: <<http://www.compositesworld.com/products/alternative-to-long-glass-filled-pp>>.
- [3] ČAUČÍK, Pavol, *Prísady do plastov*. Vyd. 1. Bratislava: Alfa Bratislava, 1985. 488 s.
- [4] ČERNÝ, Vít, *Použití polymerních kompozitů v automobilovém průmyslu*. Zlín, 2007. 57 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická.
- [5] geofond.cz [online]. 2013 [cit. 2013-01-10]. *Bentonit*. Dostupné z WWW: <[http://www.geofond.cz/dokumenty/nersur\\_rocenky/rocenkanerudy99/html/bentonit.html](http://www.geofond.cz/dokumenty/nersur_rocenky/rocenkanerudy99/html/bentonit.html)>.
- [6] HNILIČKA, Jakub, *Studium možnosti hodnocení interkalace / exfoliace systému polymer / jíl*. Zlín, 2006. 98 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická.
- [7] KAUSCH, H., BEGUELIN, P., *Deformation and Fracture Mechanisms in Filled Polymers*. Macromol. Symp. 2001.
- [8] LÁNGOVÁ, E., *Vliv podílu kaučuku a plniva na mechanické vlastnosti kompozit / epoxidová pryskyřice/silikonový kaučuk/uhlíkové saze*. Zlín, 2008. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [9] LAPČÍK, Ľubomír; RAAB, Miroslav, *Nauka o materiálech II*. Zlín: UTB ve Zlíně, 2004.
- [10] MALÁČ, J., *Gumárenská technologie*. Přednášky UTB FT, 2007.
- [11] MEISSNER, B., ZILVAR, V., *Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1. vydání, Praha: SNTL, 1987.
- [12] MIŠKOLCI, Michal, *Polymerní nanokompozity pro interierové části automobilů*. Brno, 2009. 32 s. Bakalářská práce. VUT v Brně, fakulta chemická.

- [13] MIZERA, A., *Teplotní odolnost vybraných polymerů*. Zlín, 2009. 102 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati, fakulta technologická.
- [14] NAVRÁTILOVÁ, Jana. *Prísady do plastů*. UTB ve Zlíně.
- [15] NAVRÁTILOVÁ, Věra. *Materiály na bázi polypropylenu v automobilovém průmyslu*. Zlín, 2011. 60 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická.
- [16] Petroleum.cz [online]. 2007-2013 [cit. 2013-01-29]. *Výroba polypropylenu*. Dostupné z WWW: <[petroleum.cz/vyrobky/polypropylen-vyroba.aspx](http://petroleum.cz/vyrobky/polypropylen-vyroba.aspx)>.
- [17] POKLUDA, J., KROUPA, F., OBDRŽÁLEK, L., *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek*, 1. vydání, Brno: PC-DIR spol. s.r.o. – Nakladatelství, 1994. ISBN 80-214-0575-9.
- [18] PROKOPOVÁ, Irena, *Makromolekulární chemie*. Praha: Vysoká škola chemickotechnologická, 2004. ISBN 978-80-7080-662-3.
- [19] sciencedirect.com [online]. 2013 [cit. 2013-01-10]. *Glass beads*. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386198005321>>.
- [20] SKALSKÝ, M., *Reologie vysoce viskózních polyolefinů*. Zlín, 2001. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati.
- [21] SKOVAJSA, Lukáš, *Vliv změny procesních parametrů vstřikování na výsledné mechanické vlastnosti plněných polymerů*. Zlín, 2011. 111 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická.
- [22] STOKLASA, K., *Makromolekulární chemie 2 - Skripta*, UTB ve Zlíně
- [23] wikipedia.cz [online]. 2013 [cit. 2013-01-10]. *Slída*. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/S1%C3%ADda>>.
- [24] ZEMAN, Lubomír, *Vstřikování plastů*. Praha, 2009. 248 s. ISBN 978-80-7300-250-3.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PP	Polypropylen
UV	Ultra-fialové
K	Kelvin
CaCO <sub>3</sub>	Uhličitan vápenatý
Ø, d	Průměr
l	Délka
s	Sekunda
MA	Kyselina maleinová
OH	Hydroxid
GF, SGF	Krátká skleněná vlákna
LGF	Dlouhá skleněná vlákna
PA6	Polyamid 6
PA66	Polyamid 66
PC	Polykarbonát
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
PMMA	Polymethylmetakrylát
ABS	Akrylonitril-butadien styren
VW	Volkswagen
MMT	Montmorillonit
Si	Křemík
Al	Hliník
WPC	Kompozity na bázi přírodních plniv
a <sub>k</sub>	Vrubová houževnatost



---

$a_n$	Rázová houževnatost
J	Joule
W	Deformační energie
b	Šířka
h	Tloušťka
N	Newton
Pa	Pascal
DSI	Instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti
$H_{IT}$	Vtisková tvrdost
$E_{IT}$	Vtiskový modul pružnosti
$C_{IT}$	Creep
$W_{elast}$	Elastická část práce
$W_{plast}$	Plastická část práce
$P_d$	Hloubka vtisku
$F_{AP}$	Aplikované zatížení
$\eta_{IT}$	Koeficient zpětné relaxace

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1</i> Typy PP podle monomerních jednotek .....	12
<i>Obr. 2</i> Rozdělení poptávky PP podle průmyslu [15] .....	14
<i>Obr. 3</i> Porovnání vlastností PP neplněného a plněného LGF .....	20
<i>Obr. 4</i> Dveřní modul automobilu z materiálu PP + LGF [2].....	21
<i>Obr. 5</i> Mikroskopický snímek PP plněného skleněnými kuličkami [19].....	22
<i>Obr. 6</i> Renault Scenic [1] .....	23
<i>Obr. 7</i> Dispergace vrstevnatého nanoplňiva v polymerní matrici [6].....	26
<i>Obr. 8</i> Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456 .....	42
<i>Obr. 9</i> Modul pružnosti v tahu.....	44
<i>Obr. 10</i> Maximální napětí.....	46
<i>Obr. 11</i> Absolutní prodloužení .....	47
<i>Obr. 12</i> Práce spotřebovaná na porušení vzorku .....	48
<i>Obr. 13</i> Maximální natažení vzorku STANDARD při tahové zkoušce .....	49
<i>Obr. 14</i> Zkušební stroj CAEST Resil Impactor junior .....	50
<i>Obr. 15</i> Přístroj na ražení vrubů do zkušebních tělísek .....	51
<i>Obr. 16</i> Vrubová houževnatost .....	52
<i>Obr. 17</i> Maximální síla (Charpy).....	53
<i>Obr. 18</i> Padostroj Zwick HIT230F .....	55
<i>Obr. 19</i> Maximální síla (padostroj) .....	56
<i>Obr. 20</i> Maximální práce.....	57
<i>Obr. 21</i> Zkušební zařízení CSM Micro-combi tester .....	58
<i>Obr. 22</i> Tvar a rozměry zkušebních vzorků .....	58
<i>Obr. 23</i> Vtisková tvrdost $H_{IT}$ .....	59
<i>Obr. 24</i> Vtiskový modul pružnosti $E_{IT}$ .....	60
<i>Obr. 25</i> Creep $C_{IT}$ .....	61
<i>Obr. 26</i> Závislost hloubky vtisku $P_d$ na aplikovaném zatížení $F_{AP}$ .....	62
<i>Obr. 27</i> Deformační práce $W$ .....	63
<i>Obr. 28</i> Závislost hloubky vtisku $P_d$ na čase $t$ .....	64
<i>Obr. 29</i> Modul pružnosti v tahu (-).....	65
<i>Obr. 30</i> Maximální napětí (-).....	66
<i>Obr. 31</i> Absolutní prodloužení (-) .....	67

---

<i>Obr. 32</i> Práce (-) .....	68
<i>Obr. 33</i> Vrubová houževnatost (-) .....	69
<i>Obr. 34</i> Síla (-) .....	70
<i>Obr. 35</i> Maximální síla (-) .....	71
<i>Obr. 36</i> Maximální práce (-) .....	72
<i>Obr. 37</i> Vtisková tvrdost (-) .....	73
<i>Obr. 38</i> Vtiskový modul pružnosti (-) .....	74
<i>Obr. 39</i> Creep (-) .....	75

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1</i> Vlastnosti jednotlivých stereoizomerů polypropylenu [9].....	13
<i>Tabulka 2</i> Vlastnosti vybraných druhů plniv [24] .....	17
<i>Tabulka 3</i> Ovlivnění vlastností polymerů přidáním různých druhů plniv [24] .....	18
<i>Tabulka 4</i> Přehled použitých materiálů .....	40
<i>Tabulka 5</i> Parametry vstřikovacího stroje .....	41
<i>Tabulka 6</i> Parametry zkušebního stroje ZWICK ROELL 1456 .....	43
<i>Tabulka 7</i> Hodnoty jednotlivých modulů pružnosti .....	44
<i>Tabulka 8</i> Hodnoty jednotlivých maximálních napětí .....	45
<i>Tabulka 9</i> Hodnoty jednotlivých absolutních prodloužení .....	46
<i>Tabulka 10</i> Práce spotřebovaná na porušení vzorku.....	48
<i>Tabulka 11</i> Technické parametry zkušebního stroje CAEST Resil Impactor junior.....	50
<i>Tabulka 12</i> Hodnoty vrubové houževnatosti .....	52
<i>Tabulka 13</i> Hodnoty síly pro vrubovou houževnatost .....	53
<i>Tabulka 14</i> Hodnoty maximální síly.....	56
<i>Tabulka 15</i> Hodnoty maximální práce.....	57
<i>Tabulka 16</i> Maximální hodnoty vtiskové tvrdosti $H_{IT}$ .....	59
<i>Tabulka 17</i> Maximální hodnoty vtiskového modulu pružnosti $E_{IT}$ .....	60
<i>Tabulka 18</i> Creep $C_{IT}$ .....	61
<i>Tabulka 19</i> Hodnoty deformační práce a koeficientu zpětné relaxace .....	63