

Studium creepového chování za zvýšených teplot

Bc. Pavel Petrovaj

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. Pavel PETROVAJ

Osobní číslo: T11166

Studijní program: N3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Konstrukce technologických zařízení

Forma studia: prezenční

Téma práce: Studium creepového chování za zvýšených teplot

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární studii na dané téma.**
- 2. Provedte creepovou zkoušku zadaného materiálu.**
- 3. Statisticky zpracujte výsledky měření.**
- 4. Vyhodnoťte výsledky měření.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. GITTUS, John. Creep, viscoelasticity and creep fracture in solids. London: Applied Science Publishers, 1975, xxviii, 725 s. ISBN 0-85334-597-x.
2. Technická norma ČSN ISO 899-1 Stanovení kríповého chování, ČNI, 2004, Praha, 20s. Dále dle doporučení vedoucího DP.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Řezníček

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: Petrovaj, Pavel

Obor: KTZ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 10.5.2013

Petrovaj

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jim 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

Náplní této diplomové práce je studium creepového chování polymerních materiálů za zvýšených teplot.

Součástí práce je teoretická část, která se zabývá polymerními materiály, tečením materiálu, měřením teploty, délek a základními pojmy, které se týkají statistiky. Ve druhé části je popsána příprava zkušebních vzorků. Je zde také popsáno měřicí zařízení a jsou zde také zpracována naměřená data. Creep byl měřen při různých teplotách a pro dva různé materiály - polykarbonát a polyamid6.6.

Klíčová slova: creep, polymery, polykarbonát, polyamid6.6

ABSTRACT

The aim of this thesis is a study of creep behavior of polymer materials during increased temperatures.

Part of this thesis is the theoretical part, which deals with polymer materials, creep of material, temperature measurements, lengths and basic concepts which are related to statistics. The second part describes the preparation of test samples. There is also described a measuring device and there are also processed measurement data. Creep was measured at different temperatures and for two different materials - polycarbonate and polyamid6.6.

Keywords: creep, polymers, polycarbonate, polyamid6.6

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Martinu Řezníčkovi za pomoc, kterou mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vladimíru Šumberovi za pomoc při výrobě zkušebních tělísek.

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

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 POLYMERY.....	12
1.1 DĚLENÍ DLE PŮVODU	12
1.2 DĚLENÍ DLE CHOVÁNÍ ZA ZVÝŠENÉ TEPLoty	13
1.3 DĚLENÍ DLE TVARU MOLEKUL	13
1.4 DĚLENÍ DLE NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURY	15
1.5 DĚLENÍ DLE APLIKACE	16
2 ZKOUŠKA TAHEM.....	17
2.1 TAHOVÁ KŘIVKA	17
2.2 NAPĚŤOVÉ A DEFORMAČNÍ CHARAKTERISTIKY	18
2.3 ZKUŠEBNÍ TĚLESA	19
3 CREEP - TEČENÍ MATERIÁLU	20
3.1 CREEPOVÉ ZKOUŠKY	20
3.1.1 Creepová zkouška za konstantního zatížení.....	21
3.1.2 Creepová zkouška za konstantního napětí	21
3.1.3 Creepová zkouška v ohybu	22
3.2 FYZIKÁLNÍ MECHANISMY CREEPU	22
3.3 REOLOGICKÉ MODELY	23
3.4 VLASTNOSTI OVLIVŇUJÍCÍ CREEP	25
4 MĚŘENÍ TEPLoty	27
4.1 DOTYKOVÉ TEPLOMĚRY	27
4.2 BEZDOTYKOVÉ TEPLOMĚRY	28
5 MĚŘENÍ DÉLEK.....	30
5.1 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	30
5.2 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	31
5.3 PŘESNOST MĚŘENÍ.....	31
5.4 CHYBY MĚŘENÍ	32
6 ZÁKLADY STATISTIKY.....	34
6.1 ZÁKLADNÍ SOUBOR (POPULACE)	34
6.2 VÝBĚROVÝ SOUBOR (VÝBĚR).....	35
6.3 POPISNÉ CHARAKTERISTIKY STATICKÝCH SOUBORŮ	36
6.4 STŘEDNÍ HODNOTY.....	37
6.5 GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ DAT	39
6.5.1 Boxplot diagram (krabicový diagram)	39
6.5.2 Bodový graf.....	40
II PRAKTICKÁ ČÁST	41
7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	42

7.1	VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	42
7.2	VSTŘIKOVANÉ MATERIÁLY	43
7.2.1	Polykarbonát (PC).....	43
7.2.2	Polyamid 6.6 (PA6.6).....	44
7.3	MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ.....	45
8	VOLBA ZATÍŽENÍ	47
9	PODMÍNKY PŘI ZKOUŠCE	48
10	KONTROLA NAMĚŘENÝCH DAT.....	49
10.1	MATERIÁL PC – ZATÍŽENÍ 5,5KG.....	49
10.2	MATERIÁL PA6.6 – ZATÍŽENÍ 9KG.....	50
10.3	MATERIÁL PC – KONSTANTNÍ TEPLOTA	52
11	VYHODNOCENÍ	53
11.1	MATERIÁL PC, ZATÍŽENÍ 5,5KG.....	53
11.2	MATERIÁL PA6.6, ZATÍŽENÍ 9KG	57
11.3	MATERIÁL PC, KONSTANTNÍ TEPLOTA 80°C	61
	ZÁVĚR	65
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	66
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ	69
	SEZNAM TABULEK.....	71
	SEZNAM PŘÍLOH.....	72

ÚVOD

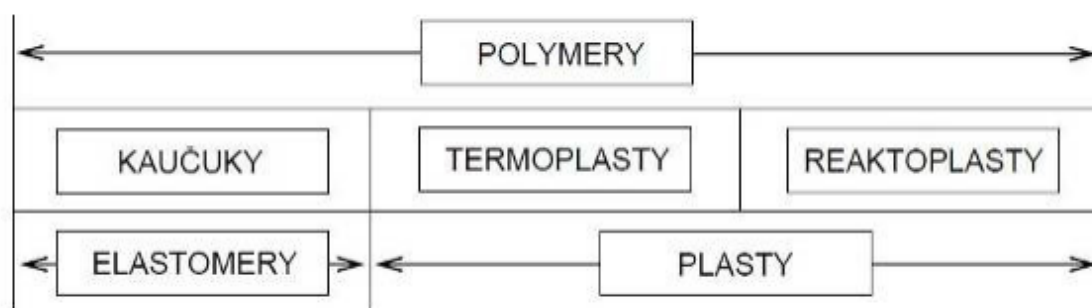
Trend využívání polymerních materiálů má díky jejich cenové dostupnosti a široké škále fyzikálních vlastností stále rostoucí tendenci. Z tohoto důvodu je nutností znát jejich vlastnosti a chování za různých podmínek.

Pokud vystavíme materiál dlouhodobému napětí, které je pod mezí kluzu nebo mezí pevnosti dochází k jevu, který nazýváme creep (tečení). Creep je termín, který popisuje pomalý růst deformace pevného materiálu, vznikající pod konstantním zatížením. Tato deformace se může stát tak velkou, že díl již nebude moci vykonávat svou funkci. Creepové deformace se nevyskytují náhle, ale jsou závislé na čase. Rozsah teplot, ve které se tyto deformace mohou vyskytovat, se liší podle použitých materiálů. Creepové deformace jsou důležité nejen v systémech, kde jsou vysoké teploty jako v jaderných elektrárnách, proudových motorech a výměnících tepla, ale také u objektů, které se vyskytují v každodenním životě.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

Polymery jsou chemické látky, které mají širokou škálu vlastností. Jsou složeny z velkého počtu atomů vázaných chemickými vazbami do dlouhých řetězců. Ve svých obrovských molekulách nejčastěji obsahují atomy uhlíku, vodíku, kyslíku, chloru, dusíku a jiných prvků. Pravidelně opakující se část řetězce nazýváme stavební nebo také monomerní jednotky (mery). Počet monomerních jednotek v řetězci udává polymerační stupeň n . Hodnota polymeračního stupně nabývá hodnot mezi $10 - 10^6$. Sloučeniny, které mají polymerační stupeň $n < 10$ se nazývají oligomery, s vyšším $n > 10$ se nazývají polymery. [2]



Obr. 1 Základní dělení polymerů

Klasifikace polymerů

Polymery lze rozdělit podle několika kritérií. Nejzákladnějším rozdělením je dělení na polymery přírodní a syntetické. Dále dělíme polymery podle chování za zvýšené teploty, dle tvaru molekul, dle nadmolekulární struktury a také dle použití. [2]

1.1 Dělení dle původu

Podle původu rozlišujeme polymery na přírodní a syntetické.

Přírodní polymery se dále dělí na:

- Původní
- modifikované (chemicky upravené).

Syntetické polymery se dělí podle typu chemických reakcí, kterými vznikají, na:

- Polymery připravené polymerací,
- polymery připravené polykondenzací,
- polymery připravené polyadící.

1.2 Dělení dle chování za zvýšené teploty

- **Termoplasty** – Termoplasty jsou polymery, které zahříváním měknou, stávají se plastickými a mohou se tvarovat. Tato změna je vratná. Patří sem například polyethylen (PE), polyamid (PA), polypropylen (PP). [1]
- **Reaktoplasty** – Při zahřívání těchto materiálů, dochází k chemické reakci, při které přecházejí ze stavu lineárního do stavu zesíťovaného. Této přeměně se říká vytvrzování. Po vytvrzení je reaktoplast dále netavitelný a nerozpustný. Patří sem například epoxidová pryskyřice a polyesterové hmoty. [1]



Obr. 2 Nadmolekulární struktura reaktoplastu

- **Elastomery** – Jsou to pružné materiály, které mají schopnost se při zatížení vnější silou deformovat a po jejím odstranění se vrátit do původního stavu. Vyrábí se vulkanizací. Mají dlouhé a velmi málo propojené řetězce. [1]

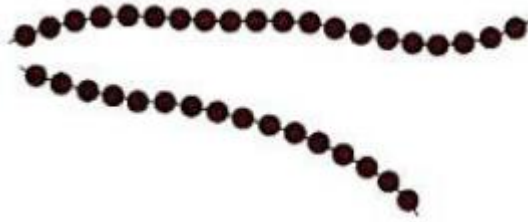


Obr. 3 Nadmolekulární struktura elastomeru

1.3 Dělení dle tvaru molekul

- **Lineární** – Vznikají tak, že se monomerní molekuly řadí za sebou. Takto řazené molekuly se k sobě mohou více přiblížit. Z tohoto důvodu mají lineární polymery vyšší hustotu. (Například vysokohustotní polyetylen - HDPE). Také jsou obvykle

dobře rozpustné a tavitelné. V tuhém stavu jsou houževnaté a v tekutém stavu se vyznačují dobrou zpracovatelností. [1]



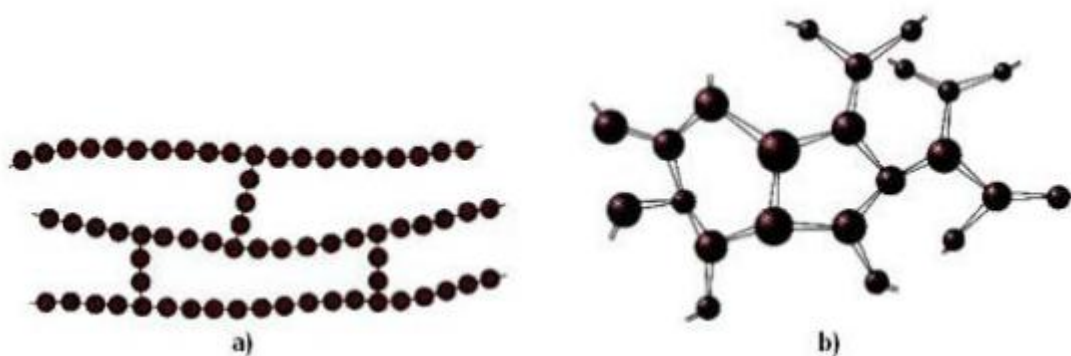
Obr. 4 Lineární struktura [3]

- **Rozvětvené** – Vyznačují se bočními větvemi na základním řetězci molekul. Tyto boční větve způsobují, že se makromolekuly k sobě nepřiblíží jako v případě lineárního řetězce a tudíž má polymer nižší hustotu. (Například nízkohustotní polyethylen - LDPE) Boční řetězce jsou také příčinou zhoršení většiny mechanických vlastností. [1]



Obr. 5 Rozvětvená struktura [3]

- **Zesíťované** – Makromolekulární řetězce jsou mezi sebou propojeny tak, že vytváří prostorovou síť. Tato síť má za následek ztrátu tavitelnosti a rozpustnosti polymeru. Zesíťované polymery jsou tvrdé, tuhé a odolné proti zvýšené teplotě. Nevýhodou je nízká odolnost proti rázovému namáhání. Nízká hustota sítě je charakteristická pro elastomery, vysoká pro reaktoplasty. [1]

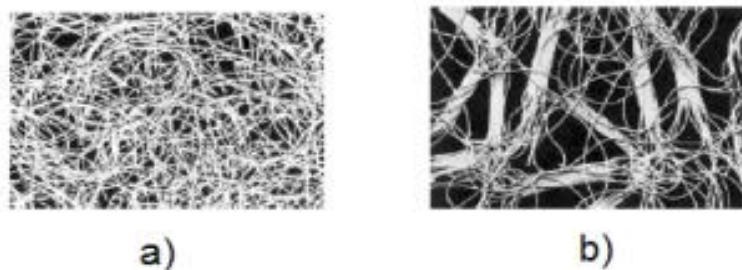


Obr. 6 Zesíťovaná struktura [3]

a – makromolekuly se zkříženými vlákny, b – prostorově zesíťované makromolekuly

1.4 Dělení dle nadmolekulární struktury

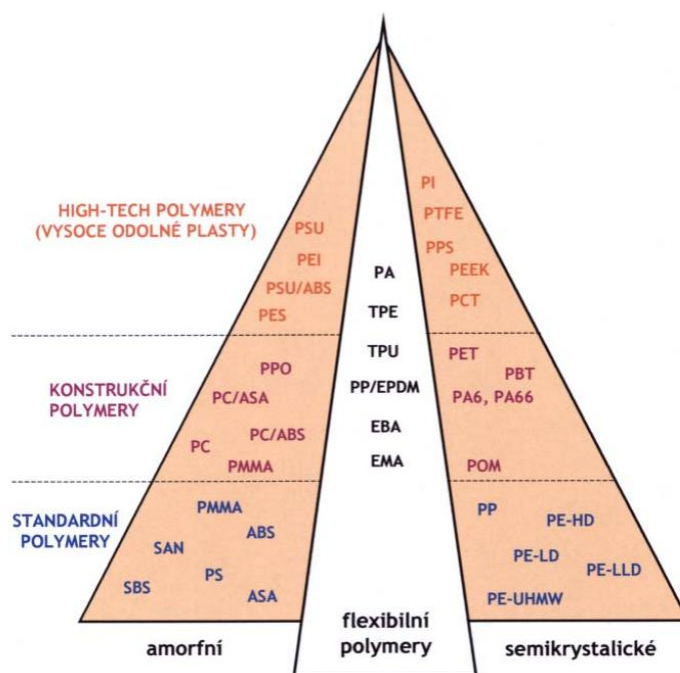
- **Amorfní** – Struktura bez jakékoliv uspořádanosti. Základním morfologickým útvarem jsou globuly (klubíčka) o velikosti 10 až 30 nm. Tyto globule vznikají z chaoticky stočených makromolekul. Amorfní polymery jsou tvrdé, křehké, transparentní. [1]
- **Semi-krytalické** – Částečně uspořádaná struktura. Základním morfologickým útvarem jsou tzv. lamely, fibrily – tenké hranoly. Míru uspořádanosti určuje tzv. stupeň krystalinity. Stupeň krystalinity je relativní podíl krystalických oblastí ku celkové hmotě polymeru. [1]
- **Krytalické** – Dokonale uspořádaná struktura. V reálných technologických podmínkách zpracování ale není možnost dokonalé krystalizace, krystalizuje jen určitá část polymeru. [1]



Obr. 7 Nadmolekulární struktura polymeru *a – amorfní molekuly v LDPE, b - částečně krystalické molekuly v HDPE* [22]

1.5 Dělení dle aplikace

- **Standardní polymery** – Tyto polymery jsou nejlevnější, zabírají nejvyšší podíl v objemu výroby. Patří sem například polyetylen (PE), polypropylen (PP), polymethylmetakrylát (PMMA) a další. [4]
- **Konstrukční polymery** – Polymery s vyšší cenou než standardní polymery, ale také s lepšími užitnými vlastnostmi. Patří sem například polykarbonát (PC), polyamidy (PA), polyuretan (PU) a další. [4]
- **High-tech polymery** (vysoce odolné plasty) – Skupina materiálů s nejvyšší cenou a nejlepšími užitnými vlastnostmi. Patří sem například polytetrafluoretylen (PTFE), polyimidi (PI), polyetheretherketon (PEEK) a další. [4]



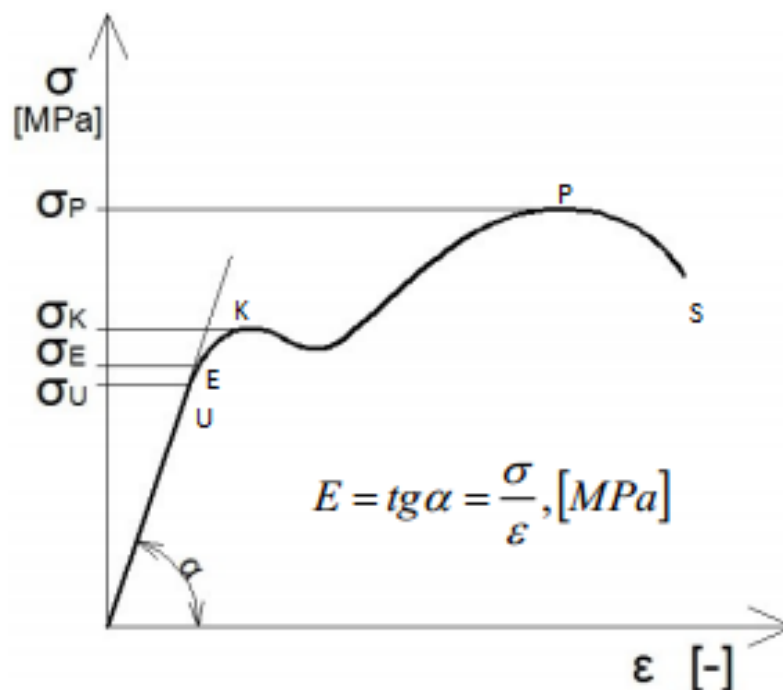
Obr. 8 Rozdělení polymerů dle aplikace a nadmolekulární struktury [5]

2 ZKOUŠKA TAHEM

Zkouška jednoosým tahem je jedna z nejdůležitějších a nejpoužívanějších zkoušek materiálů vůbec. Touto zkouškou experimentálně získáváme závislost napětí na deformaci. Zkouška spočívá v deformaci zkušební tyče jednoosým tahovým zatížením obvykle do přetržení pro stanovení jedné nebo více napěťových a deformačních charakteristik zavedených v normě. [6]

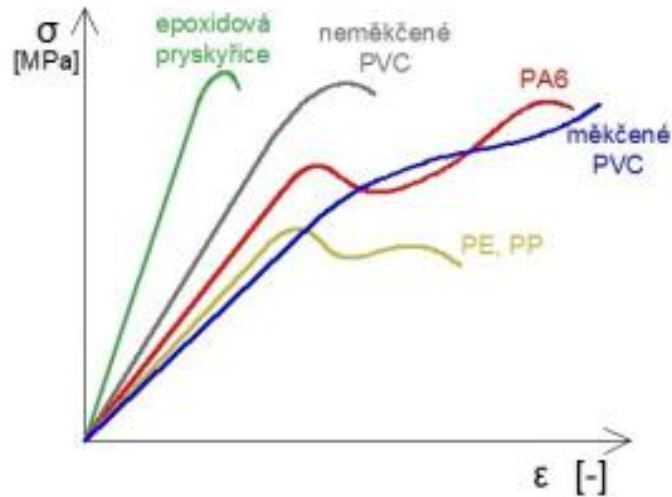
2.1 Tahová křivka

Tato křivka je grafickým znázorněním závislosti napětí σ na poměrném prodloužení ϵ . Na této křivce můžeme vyznačit několik důležitých bodů. Bod U se nazývá mez úměrnosti. Do tohoto bodu je celková deformace přímo úměrná napětí, v této části platí Hookův zákon. Bod E se nazývá mez pružnosti, jedná se o největší napětí, kterého lze dosáhnout, aniž v materiálu vznikne trvalé přetvoření. V bodě K se nachází mez kluzu, což je napětí, při němž začínají vznikat v materiálu trvalé plastické deformace. Bod, ve kterém dosáhne zatěžující síla svého maxima, se nazývá mez pevnosti v tahu – bod P. V bodě S dochází k přetržení zkušebního tělesa. [6]



Obr. 9 Tahová křivka [6]

Na obr. 10 jsou znázorněny tahové křivky různých polymerních materiálů. Způsob provedení tahové zkoušky pro polymerní materiály jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 527 – 2.



Obr. 10 Tahové křivky různých materiálů

2.2 Napět'ové a deformační charakteristiky

Napět'ové charakteristiky: R_m , R_e .

Deformační charakteristiky: A , Z .

- Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]
 - napětí, odpovídající největšímu zatížení, které předchází porušení tyče

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [\text{MPa}] \quad (1)$$

- Mez kluzu v tahu R_e [MPa] nebo $R_{p0,2}$ [MPa]
 - je nejmenší napětí, které způsobí rozvoj výrazných plastických deformací

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} [\text{MPa}] \quad (2)$$

- Tažnost A [%]
 - poměrná podélná trvalá deformace vyjádřená v %

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 = \frac{L_U - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

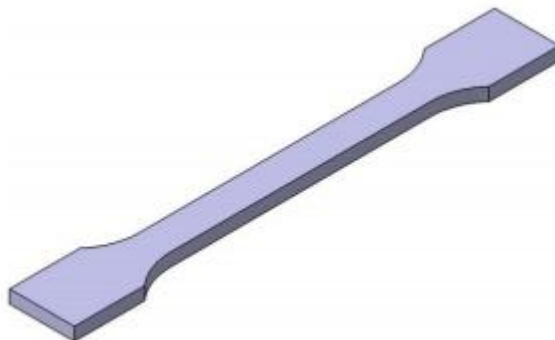
- Kontrakce Z [%]

- největší trvalé zúžení průměru, odměřené po přetržení v místě lomu, vyjádřené v %

$$Z = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 = \frac{S_0 - S_U}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

2.3 Zkušební tělesa

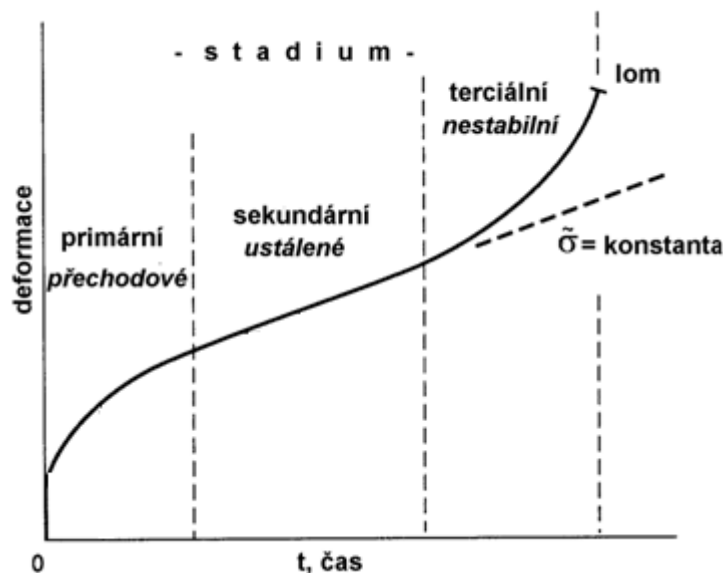
Tvar a rozměry zkušebních těles pro tahovou zkoušku jsou přesně definovány normou. Zkušební tělesa mají tvar oboustranných lopatek. Tento tvar je zvolen záměrně, protože umožňuje pevné uchycení tělíska v čelistech a napětí je koncentrováno do zúžené části tělesa. Rozměry jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 527.



Obr. 11 Zkušební těleso

3 CREEP - TEČENÍ MATERIÁLU

Creepová deformace je pomalá, spojitá deformace probíhající v čase. Je funkcí napětí, času a teploty. U polymerů se projevuje především nad teplotou skelného přechodu T_g . Creep (tečení) se obvykle popisuje tzv. creepovou křivkou, což je závislost poměrného prodloužení zkušebního vzorku na čase. Tuto křivku lze rozdělit do tří částí. V primární části se rychlost deformace zmenšuje. V sekundární části se rychlost deformace ustaluje, v tomto stadiu se určuje rychlost creepu. V terciální části se začínají projevovat lokální poruchy materiálu, zmenšuje se plocha průřezu až do lomu. Creepová křivka je znázorněna na obr. 12.



Obr. 12 Creepová křivka

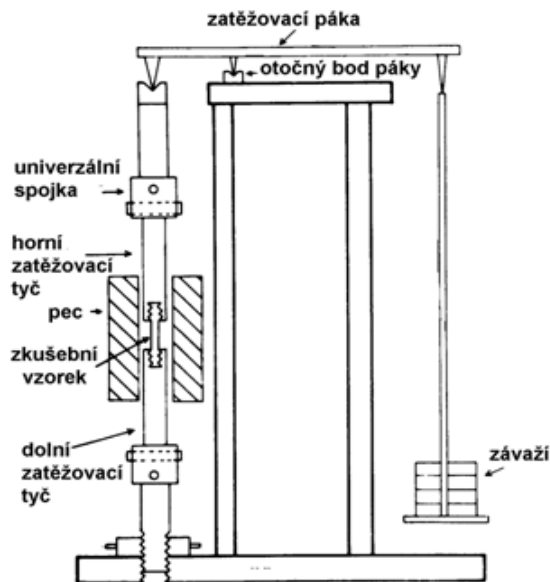
3.1 Creepové zkoušky

Nejčastěji se creepové zkoušky provádějí v tahu. V normách jsou ovšem uvedeny i zkoušky v ohybu a tlaku, které jsou snadno proveditelné a k jejich provedení stačí poměrně jednodušší zařízení. Způsob vyhodnocení je u všech druhů zkoušek stejný. Důvodem proč se většinou používá creepová zkouška v tahu je jednodušší deformační mechanismus.

Creepové zkoušky se provádějí při konstantním zatížení (působící síle), případně při konstantním napětí. Při konstantním zatížení skutečné napětí při zkoušce vzrůstá. Časově náročnější jsou tedy zkoušky při konstantním napětí.

3.1.1 Creepová zkouška za konstantního zatížení

Pro tyto zkoušky, se používají zařízení, která nejsou příliš složitá, aby vydržela měření dlouhá i několik let. Používají se dva druhy zařízení, s přímým zatížením anebo systém využívající pákový mechanismus se závažím. Během této zkoušky dochází k nárůstu skutečného napětí.



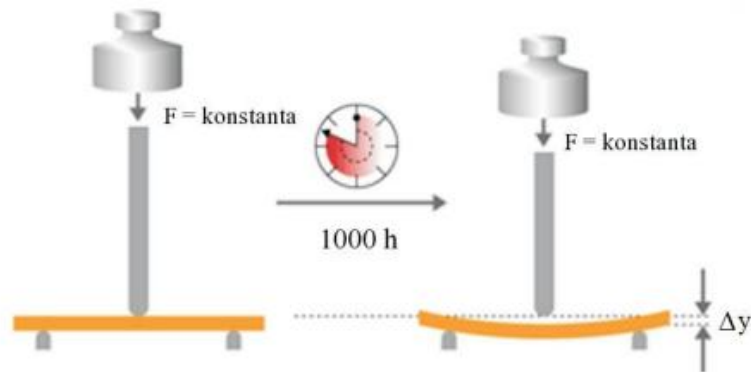
Obr. 13 Zařízení pro měření creepu za konstantního zatížení

3.1.2 Creepová zkouška za konstantního napětí

Tato zkouška je také nazývána jako Andradeho zkouška tečení. Závaží zavěšené na zkoušeném vzorku je vytvarováno a ponořeno do kapaliny o hustotě ρ . V závislosti na prodloužení zkušební vzorku se závaží ponořuje do kapaliny a tím klesá působící síla. Tvar závaží zaručuje dosažení skutečného konstantního napětí při rovnoměrné deformaci zkušební vzorku.

3.1.3 Creepová zkouška v ohybu

Vyhodnocení a postup je u této zkoušky shodný jako u zkoušek v tahu. Tato zkouška je nejvhodnější pro krátké časové intervaly měření a pro materiály, které jsou křehké. U této zkoušky měříme průhyb y . Vyhodnocuje se závislost průhybu y na čase. [12]



Obr.14 Creepová zkouška v ohybu [23]

3.2 Fyzikální mechanismy creepu

Obecně lze říci, že pro každou skupinu materiálů jsou rozdílné mechanismy tečení. Mechanismus creepu může být různý i pro daný materiál, vlivem podmínek zatěžování (teplota, napětí). Základní příčinou časově závislé deformace – creepu je pohyb atomů nebo molekul v pevné fázi. Pohyb atomů je vyvolán tepelnou aktivací. [7]

Makromolekulární síť polymeru je složena z částečně pohyblivých částí, je propojena do sebe navzájem zaklesnutými smyčkami a také se v ní nachází krystalické oblasti. Toto je předpoklad pro teorii molekulárních přeskoků, kterou lze podložit viskózní a elastické chování polymerů. [7]

K molekulárním přeskokům dochází ve směru vnějšího zatížení, vlivem působením tepelného pohybu a vnějšího namáhání. Nad teplotou skelného přechodu vznikají molekulární dutiny a z tohoto důvodu je nejvyšší pravděpodobnost přeskoků právě nad touto teplotou. K většině přeskoků dochází v amorfní oblasti. U krystalických struktur dochází k přeskokům jen v místech poruch anebo na rozhraní. [7]

3.3 Reologické modely

Creepové chování lze popsat různými reologickými modely. Limitní stavy popisují dva základní modely – model ideálně viskózní látky a model ideálně elastické látky. Polymery se těmto extrémům, v závislosti na vnějších podmínkách, více či méně přibližují. Obecně je však chování polymerních látek viskoelastické. Viskoelastické chování lze docela dobře přiblížit kombinací pístu (tok) a pružiny (elasticita), což jsou základní prvky reologických modelů. Kombinací těchto základních prvků mohou vzniknout dvou, tří i čtyřprvkové modely. Nejjednoduššími dvouprvkovými modely jsou Kelvinův a Maxwellův model. [8]

- **Model ideálně elastické látky** – Deformace elastické látky je dokonale vratná. Látka se chová jako pružina, reaguje okamžitě. Při malých deformacích platí Hookův zákon. [8]

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (5)$$

τ – smykové napětí,

G – smykový modul pružnosti,

γ – smyková deformace.



Obr. 15 Model ideálně elastické látky

- **Model ideálně viskózní látky** – látka se chová jako písta, deformuje se s časovým zpožděním a nevratně. Pokud je tok ustálený, pak podle Newtonova zákona platí, že smykové napětí je přímo úměrné rychlosti smykové deformace. [8]

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (6)$$

τ – smykové napětí,

η – smyková viskozita,

$\dot{\gamma}$ – rychlost smykové deformace.



Obr. 16 Model ideálně viskózní látky

- **Kelvinův model** – Základní model popisující creepové chování materiálu. Vznikne paralelní kombinací elastického a viskózního členu. Deformace tohoto modelu je vratnou deformací, k jejímu vymizení po odlehčení však nedochází okamžitě. Napětí získáme z rovnice:

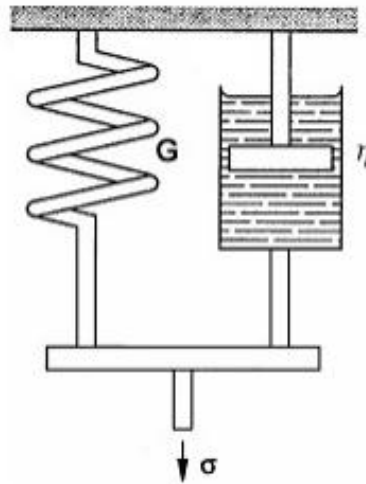
$$\tau(t) = \tau_V(t) + \tau_E(t) \quad (7)$$

τ – smykové napětí celkové,

τ_V – smykové napětí elastické složky,

τ_E – smykové napětí viskózní složky,

t – čas. [9]



Obr. 17 Kelvinův model

- **Maxwellův model** – Je tvořen sériovým spojením viskózního a elastického členu. Důsledkem zatížení je nevratná viskózní deformace a vratná elastická deformace. Rychlost deformace vyjadřuje rovnice:

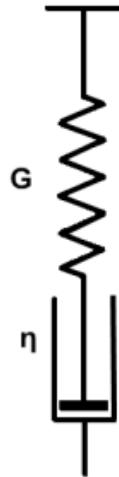
$$\dot{\gamma}(t) = \dot{\gamma}_V(t) + \dot{\gamma}_E(t) \quad (8)$$

$\dot{\gamma}(t)$ – smyková deformace celková,

$\dot{\gamma}_V(t)$ – smyková deformace viskózní složky,

$\dot{\gamma}_E(t)$ – smyková deformace elastické složky,

t – čas. [9]



Obr. 18 Maxwellův model

3.4 Vlastnosti ovlivňující creep

Creepové chování omezuje použití polymerních materiálů jako konstrukční materiály. Snižuje totiž jejich životnost. Nejvíce creepové chování ovlivňují zejména tyto vlastnosti:

- **Molekulární struktura** – u lineárních polymerů je creep výraznější z důvodu krátkých řetězců. U rozvětvených a zesíťovaných struktur je smýkání obtížnější. Vliv má i molekulová hmotnost. Pokud roste molekulová hmotnost, projevy creepu jsou menší. [9]
- **Nadmolekulární struktura** – krystalinita polymeru ovlivňuje creep takovým způsobem, že amorfni materiály jsou méně odolnější vůči creepu, než krystalické nebo semi-krystalické polymery. [9]
- **Relaxační čas** – po odlehčení tělesa dojde k odlehčení napnutých a stočených částí řetězců, jež jsou mezi zapleteninami. Ty se následně chovají jako pružiny a tím odbourávají prvotní creepové deformace. Tato vlastnost se ovšem liší od jednoduchého viskozního chování. [9]
- **Teplota skelného přechodu** – tato teplota je charakteristická pro každý polymer. Vliv tečení pod teplotou skelného přechodu je u většiny materiálů zanedbatelný. S rostoucí teplotou skelného přechodu slábnou sekundární vazby, vodíkové můstky a Van der Waalsovy síly, které drží jednotlivé molekuly v řetězci polymeru. Toto zeslábnutí sekundárních vazeb umožňuje klouzání molekulových řetězců po sobě.

Tab. 1 Teploty skelného přechodu

	druh plastu	T _g [°C]
semikrystalické plasty	LDPE	-120
	HDPE	-120
	POM	-50
	PP	-15
	PA 6	50
	PA 6.6	50
	PTFE	126
	PEEK	143
	PI	> 400
amorfní plasty	PVC	87
	PS	95
	ASA	100
	SAN	105
	ABS	105
	PMMA	110
	PC	150
	PSU	190

Náchylnost polymerního materiálu k tečení se dá snížit vytvořením kompozitního materiálu. Výroby kompozitu dosáhneme plněním plastové matrice skleněným, popřípadě křemeným prachem. Tyto kompozity se používají například v automobilovém průmyslu.

Nejvíce odolným materiálem vůči creepu je kompozit s dlouhými vlákny (GFRP, CFRP), tyto dlouhá vlákna přenášejí zatížení a jsou velice pevná a odolná vůči tečení.

4 MĚŘENÍ TEPLoty

Teplota je jednou z nejdůležitějších stavových veličin ovlivňující téměř všechny stavy a procesy v přírodě. Při měření teploty nestačí použít přesného teploměru a zaručit správné čtení údajů, ale je nutno teploměr zabudovat tak, aby správně měřil. [10]

K měření teploty lze využít řadu fyzikálních principů, jako například teplotní roztažnosti látek, změny elektrického odporu vodičů a polovodičů, vznik elektrického napětí a podobně. Aby ale bylo dosaženo stejných výsledků měření, bylo nutno sestavit jednotnou teplotní stupnici, která by nebyla závislá na zvoleném principu měření. Takovou stupnicí je termodynamická teplotní stupnice, odvozená z účinnosti vratného tepelného stroje (Carnotův ideální stroj). Termodynamická teplotní stupnice začíná na nejnižší možné teplotě - absolutní (teplotní) nule. Jednotkou je *kelvin* K , základní jednotka SI. Absolutní nula je definována trojným bodem vody. Jen při této teplotě se samotná voda současně vyskytuje ve třech skupenstvích – vodní pára, voda, led. Tato teplota má hodnotu $273,16\text{ K} = 0,01^\circ\text{C}$. V běžné praxi se ovšem používá *Celsiova (teplotní) stupnice*, jednotkou této stupnice je $^\circ\text{C}$, $^\circ\text{C}$ je 1/100 rozpětí mezi bodem tuhnutí a bodem varu vody. Termodynamickou teplotu je zvykem označovat T (K) a Celsiovu teplotu t ($^\circ\text{C}$). Vzájemný vztah stupnic je:

[10,11]

$$T = T_0 + t = 273,15 + t \quad (11)$$

Rozdělení teploměrů

Podle oblasti použití lze teploměry rozdělit na dotykové a bezdotykové. Dotykové teploměry jsou při měření v přímém dotyku s měřeným prostředím (objektem). Bezdotykové teploměry využívají tepelného záření vyšetřovaného objektu. [10]

4.1 Dotykové teploměry

Tyto teploměry se rozdělují podle fyzikálního principu, na kterém fungují:

- **Dilatační** – jejich funkčním principem je využití teplotní roztažnosti látek všech skupenství. Podle tohoto principu a podle konstrukce lze dilatační teploměry rozdělovat na tyčové, bimetalické, skleněné, tlakové kapalinové a plynové.
- **Parní** – využívají teplotní závislost tlaku syté páry teploměrové kapaliny.

- **Odporové** – Využívají k měření teploty teplotní závislosti elektrického odporu materiálu. Tuto závislost vyjadřuje teplotní součinitel α (K^{-1}), jehož střední hodnotu pro teplotní rozsah od 0 do $100^{\circ}C$ udává vztah:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0} \quad (12)$$

Kde R_0 a R_{100} je odpor materiálu při teplotách 0 a $100^{\circ}C$. K měření teploty se využívá především čistých kovů (platina, měď a nikl) a polovodičů.

- **Termoelektrické** – využívají k měření teploty termoelektrického jevu v termoelektrickém článku.
- **Speciální** – využívají změn vybraných fyzikálních vlastností tuhých látek a kapalin s teplotou (například měknutí, tavení, index lomu apod.). Jedná se především o barevné indikátory teploty a optoelektronické snímače teploty. [10]



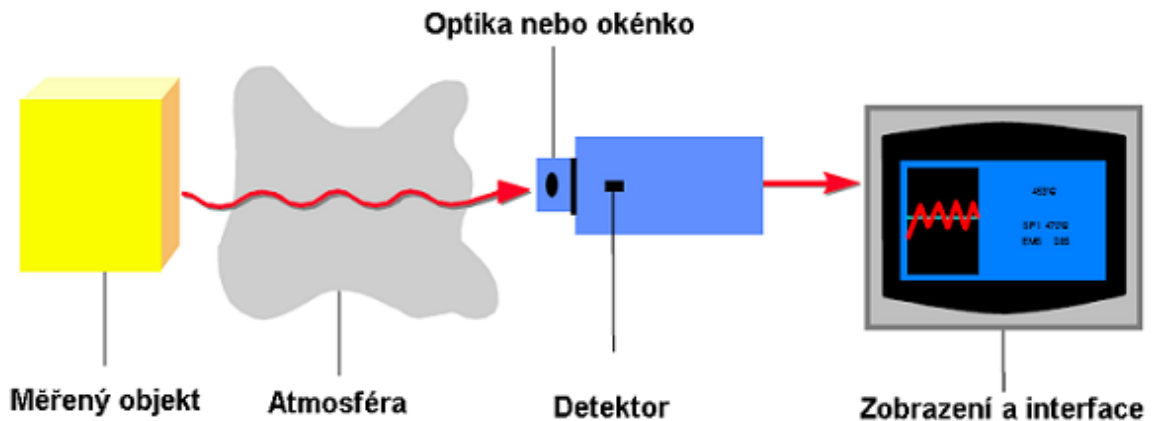
Obr. 19 Příklady dotykových teploměrů

4.2 Bezdotykové teploměry

Bezdotykové teploměry používané pro měření teploty povrchů těles a vnitřních prostorů jsou založeny na principu měření tepelného, přesněji elektromagnetického záření, které tyto tělesa vysílají. Povrch absolutně černého tělesa, který pohlcuje a vyzařuje elektromagnetické záření bez omezení, vyzařuje energii, jejíž množství je závislé na teplotě tohoto absolutně černého tělesa a na vlnové délce záření. Vlnové délky, ve kterých těleso energii vyzařuje, mohou být teoreticky od nuly až do nekonečna, významné jsou však jen v malém rozpětí (zhruba desetiny až sta μm). Vlnová délka, na které absolutně černé těleso vyzařuje maximálně, závisí na teplotě tělesa podle Wienova posouvacího zákona: [11]

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{konst.} \quad (\text{konst.} = 2897,8 \mu m \cdot K) \quad (13)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že pokud teplota klesá, tak se maximum posouvá směrem k větším vlnovým délkám. S tím souvisí optimální rozpětí vlnových délek pro určitý rozsah měřených teplot. Pro teploty připadající v úvahu v technice prostředí jsou to vlnové délky z infračervené části spektra. Reálná tělesa vyzařují méně než těleso černé, snížení je dáno činitelem poměrné zářivosti ε -emisivitou. U tělesa ideálně šedého je *emisivita* konstantní pro všechny vlnové délky, u reálných těles však na vlnové délce závisí. [11]



Obr. 20 Princip bezdotykového měření teploty objektu prostřednictvím infračerveného záření [11]

Přesnost měření může ovlivňovat i záření z okolí odražené měřeným tělesem do přístroje. Naprosto zásadním způsobem naruší přesnost měření nerespektování zorného pole přístroje - měřené těleso musí vyplnit (či přesahovat) minimální plochu udávanou výrobcem v závislosti na vzdálenosti tělesa od objektivu. Přístroj musí být také správně zaměřen - hledáčkem nebo vestavěným laserovým ukazovátkem. [11]

Dle rozsahu vlnových délek využívaných pro měření mohou být bezdotykové teploměry *monochromatické* (teoreticky jedna vlnová délka, prakticky úzký rozsah vlnových délek), *pásmové* (širší rozsah vlnových délek) a *úhrnné* (celé spektrum). Zvláštním případem jsou teploměry *poměrové*, tyto teploměry teplotu vyhodnocují na základě měření při dvou vlnových délkách. [11]

Výhodou bezdotykového měření je minimalizace vlivu přístroje na měřené těleso a velmi rychlá odezva. [11]

5 MĚŘENÍ DÉLEK

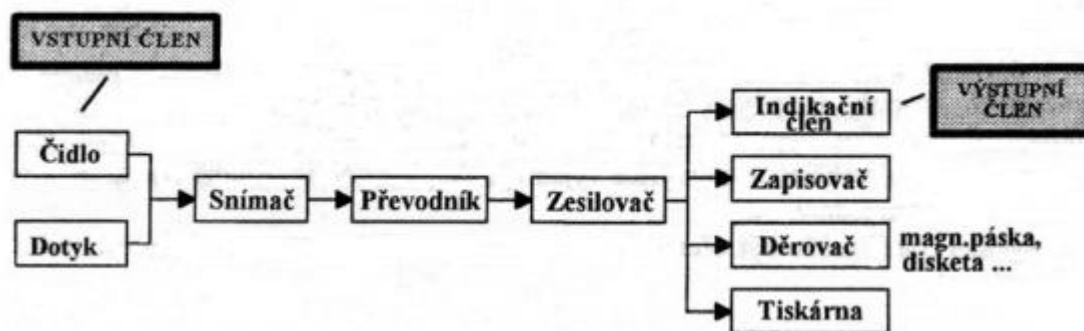
Délkou rozumíme vodorovnou vzdálenost mezi dvěma body vyjádřenou v délkových jednotkách. Základní délkovou jednotkou je podle ČSN 01 1300 metr, který je definován takto: Metr je délka dráhy, kterou uletí světelný paprsek ve vakuu za $1/299\,792\,458$ s. Z metru jsou odvozeny další jednotky pro měření délek, které jsou násobky nebo zlomky metru (mm, cm, km).

5.1 Měřicí zařízení

K popisu zařízení, které jsou používány při měření, se používá řada různých termínů. Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii uvádí řadu názvů, které se navzájem nevylučují. [15]

Základní pojmy:

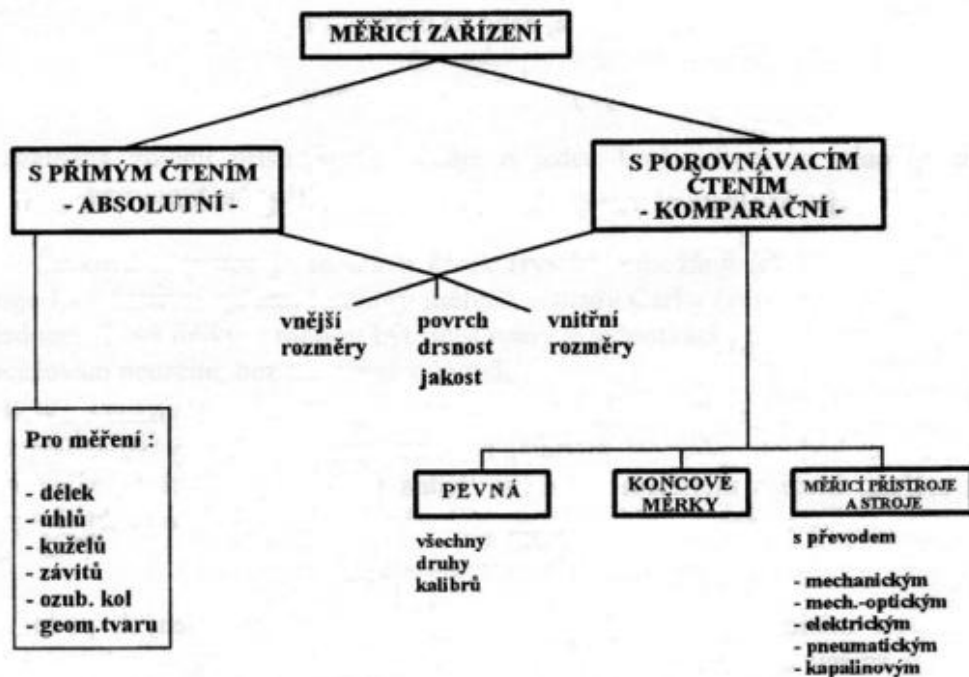
- **Měřicí přístroj** – zařízení, které je určeno k měření jako samotné nebo s přidavným zařízením.
- **Ztělesněná míra** – měřidlo, které během používání reprodukuje trvalým způsobem jednu nebo více známých hodnot dané veličiny (závaží, koncová měrka).
- **Měřicí převodník** - je měřicí prostředek sloužící k převodu měřené veličiny na jinou veličinu či na jinou hodnotu téže veličiny (termočlánek, termometr).
- **Měřicí řetězec** - je řada prvků měřicího přístroje nebo měřicího systému, které získávají, upravují a přenášejí, popř. zpracovávají informace o měřených veličinách. [16]



Obr. 21 Měřicí řetězec [15]

5.2 Měřicí zařízení

Rozdělení měřicích přístrojů může být definováno z celé řady hledisek. Základní rozdělení je na obr. 22.



Obr. 22 Měřicí zařízení - rozdělení

5.3 Přesnost měření

Přesnost měření je těsnost shody mezi výsledkem měření a (konvenčně) pravou hodnotou měřené veličiny. Přesnost je kvalitativní pojem a nedá se přímo kvantifikovat. Při hodnocení jakosti konkrétního měřidla nás zajímá přesnost měřidla, která je definována pro určité konstantní podmínky (vnější prostředí - teplota, tlak, vlhkost, časový gradient teploty atd.), včetně kvalifikace pozorovatele. [15]

K základním charakteristikám patří:

- **Rozlišitelnost indikačního zařízení:** kvantitativní vyjádření způsobilosti indikačního zařízení rozlišit velmi blízké hodnoty indikované veličiny. Rozlišitelnost je interpretována například jako hodnota jednoho dílku stupnice.
- **Největší dovolená chyba měřidla:** extrémní hodnota chyby daného měřidla povolená specifikacemi, normou, garantovaná výrobcem atd. Největší dovolená chyba

měřidla je zpravidla větší než rozlišitelnost, proto při odečítání měřené hodnoty na stupnici neodhadujeme zlomky nejmenšího dílku.

- **Nejistota měření:** výsledek k vyhodnocování měření, charakterizující rozsah hodnot, v němž leží pravá hodnota měřené veličiny, obecně s danou věrohodností.
- **Opakovatelnost** výsledků měření je těsnost shody mezi výsledky po sobě následujících měření téže měřené veličiny, provedených za stejných podmínek měření. Podmínky opakovatelnosti: tentýž postup měření, tentýž pozorovatel, tentýž měřicí přístroj, totéž místo, opakování v průběhu krátké časové periody. Opakovatelnost může být kvantitativně vyjádřena charakteristikami rozptylu výsledků.
- **Reprodukovatelnost** výsledků měření je těsnost shody mezi výsledky měření téže veličiny provedenými za změněných podmínek měření. Mezi změněné podmínky měření lze zahrnout: princip měření, metodu měření, pozorovatele, měřicí přístroj, referenční etalon, místo, podmínky použití, čas. Reprodukovatelnost může být kvantitativně vyjádřena charakteristikami rozptylu výsledků. [15]

5.4 Chyby měření

Absolutní chyba měření je rozdíl mezi výsledkem měření a (konvenčně) pravou hodnotou měřené veličiny.

$$\Delta = x_m - x_p \quad (14)$$

Kde x_m je změřená hodnota měřené veličiny a x_p je (konvenčně) pravá hodnota měřené veličiny.

Protože v praxi není možné pravou hodnotu měřené veličiny získat, nahrazujeme ji tzv. konvenčně pravou hodnotou, která se blíží pravé hodnotě s dostatečnou přesností. Konvenčně pravá hodnota se získá pomocí metod měření, které jsou řádově 3 až 10krát přesnější.

- **Relativní chyba** je podíl chyby měření a pravé hodnoty měřené veličiny, kterou je možné vyjádřit v procentech.

$$\Delta r = \frac{x_m - x_p}{x_p} \cdot 100 [\%] \quad (15)$$

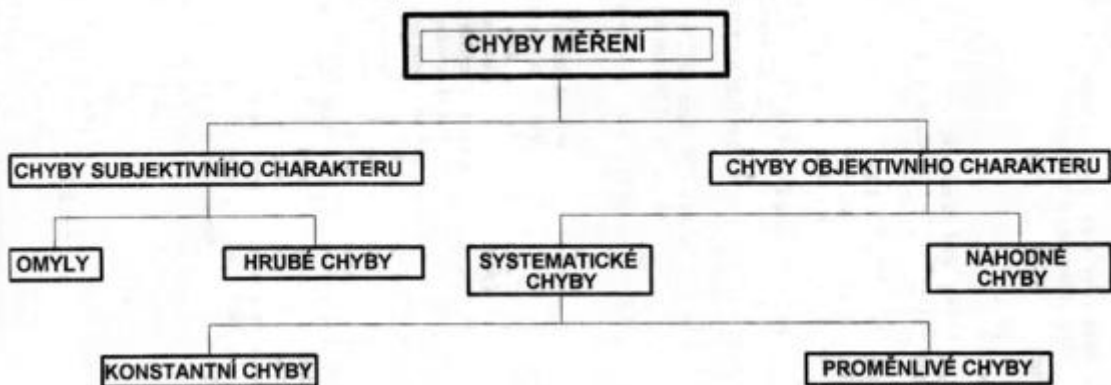
- **Náhodná chyba** je výsledek měření mínus střední hodnota, která by vznikla z nekonečného počtu měření téže měřené veličiny uskutečněné za podmínek opakovatelnosti.
- **Systematická chyba** je střední hodnota, která by vznikla z nekonečného počtu měření téže měřené veličiny, uskutečněných za podmínek opakovatelnosti, od které se odečte pravá hodnota měřené veličiny. [15]

Chyba měření:

$$\Delta = \Delta_s + \delta, \quad (16)$$

kde Δ_s je systematická chyba

δ – náhodná chyba.



Obr. 23 Chyby měření [15]

6 ZÁKLADY STATISTIKY

Statistika je věda, která se snaží zkoumat reálná data a s pomocí teorie pravděpodobnosti se tato data snaží popisovat. Ve statistice se pracuje s několika základními pojmy.

V první řadě jde o *statistický soubor*, což je konečná množina nějakých dat, která chceme zkoumat. Data mohou být obecná, může to být v zásadě cokoliv. Pokud chcete zkoumat průměrný plat v České republice, bude statistickým souborem množina všech lidí v České republice. Počet prvků ve statistickém souboru se nazývá rozsah souboru. Rozsah námi definovaného statistického souboru by tak byl roven počtu obyvatel České republiky. [16]

Dále existuje pojem *statistická jednotka*, což je konkrétní prvek statistického souboru. V našem případě by tak statistická jednotka byl jeden konkrétní člověk. [16]

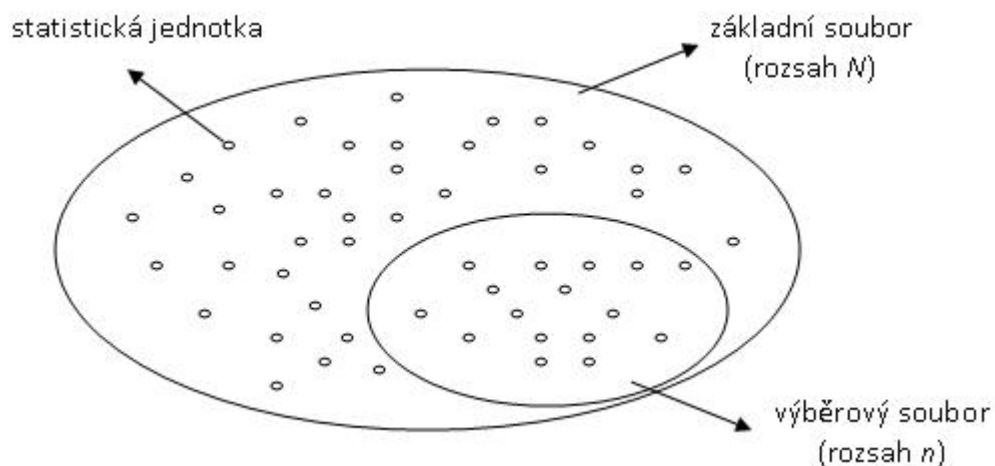
Nakonec máme *statistický znak*, což je to, co chceme měřit. V našem příkladě by statistickým znakem byl právě plat. Statistický znak může být buď kvalitativní nebo kvantitativní. Kvantitativní (kvantita = množství, počet) znak je takový znak, který je vyjádřitelný čísly (například zrovna ten plat, výška, počet dětí, ...), kvalitativní znak je pak vyjádřitelný slovně (barva, ano/ne, zaměstnání, ...). [16]

6.1 Základní soubor (populace)

Je soubor všech statistických jednotek (jedinců). Tento soubor je cílem statistického zkoumání. Může teoreticky obsahovat všechny hodnoty, které mohou být při sledování dané vlastnosti získány, tzn., jde o oblast sledování, kterou chápeme jako souhrn hodnot, které tuto oblast tvoří. Rozsah (počet členů) základního souboru označujeme N . Tento rozsah, může být nekonečný i konečný – zejména z časového hlediska:

- Nekonečný rozsah – oblast sledování je vymezena prakticky nekonečně, eventuálně ji nemůžeme časově vymežit,
- konečný rozsah – oblast sledování je přesně vymezena.

Protože rozsah populace je zpravidla velmi značný, zjištění zkoumaných vlastností u všech členů nebývá často vůbec prakticky možné nebo bývá nesmírně časově náročné a velmi nákladné. Proto se většinou dané měření (experiment) provede jen u vybraných statistických jednotek (jedinců) ze základního souboru, kteří představují pouze jakýsi jeho vzorek – tvoří tzv. výběrový soubor. [17]



Obr. 24 Soubory

6.2 Výběrový soubor (výběr)

Je soubor určitého konečného počtu n jedinců vybraných ze základního souboru. U těchto vybraných jedinců je pak následně provedeno praktické měření zkoumané vlastnosti. Na základě zkoumání vlastností výběrového souboru se vyvozují vlastnosti celé populace („statistická indukce“ – dedukce závěrů), z tohoto důvodu by měl být výběrový soubor co nejvhodnějším představitelem základního souboru. K zajištění dostatečné reprezentativnosti výběrového souboru, je potřeba provádět výběr do tohoto souboru náhodně. [17]

Náhodným výběrem se rozumí, že jedinci tohoto výběrového souboru (prakticky naměřené hodnoty) byly vybrány nezávisle tak, aby všichni jedinci ze základního souboru (hodnoty, které jsou teoreticky k dispozici) měly stejnou možnost být zahrnuty do výběru. Zcela náhodný výběr ze základního souboru do výběrového souboru není možný. Na náhodnost výběru má vždy určitý vliv chyba při vybírání. K vybírání se proto volí metody, které tuto chybu při vybírání minimalizují. Náhodnosti nejlépe dosáhneme, pokud při výběru použijeme tabulku náhodných čísel. [17]

Tabulka náhodných čísel se skládá z číslic 0 až 9 seřazených zcela náhodným způsobem, tj. nezávisle za sebou. Tyto tabulky náhodných čísel bývají uspořádány pomocí nějakého znáhodňovacího procesu, který generuje všechny číslice se stejnou pravděpodobností a nezávisle na předchozím výsledku. Všechny tabulky náhodných čísel se po jejich sestavení podrobují testování, zda neobsahují nějaké nenáhodnosti, jako je například příliš často se vyskytující některá číslice, (v tabulce náhodných čísel musí být všechny číslice zastoupeny zhruba ve stejném počtu), periodické opakování některých čísel apod. Ani po tomto testování nemusí být tabulky dokonalé, neboť náhodnost mohla být porušena jiným (ne-

kontrolovatelným) způsobem. Všestranný test náhodnosti, který by prozkoumal náhodnost z hlediska všech jejich vlastností, neexistuje. Tabulky náhodných čísel se používají v případech, kdy je potřeba dosáhnout náhodného seřazení anebo v případech, kdy je třeba zajistit náhodné vybírání. [17]

Náhodného výběru ze základního souboru dosáhneme za pomoci tabulek náhodných čísel např. tímto způsobem: všechny hodnoty základního souboru, které jsou pro výběr dostupné, se po řadě očíslovají (0 až poslední hodnota základního souboru). Do výběrového souboru se použije zvolený počet " n " (např. $n = 5$) hodnot ze základního souboru, a to těch, jejichž čísla se shodují s posloupností prvních " n " náhodných čísel připadajících v úvahu počínaje od libovolného místa tabulky náhodných čísel. [17]

6.3 Popisné charakteristiky statických souborů

Pro popis vlastností základního souboru se dá použít několik popisných statistických charakteristik. Indikátory, které nám udávají informaci o tom, kde se nachází střed souboru, se obecně nazývají střední hodnoty (např. aritmetický průměr, medián a další.) Další důležité indikátory popisují rozptýlení hodnot sledované veličiny kolem středu souboru. Některé statistické znaky mohou být velmi proměnlivé (variabilní) ve svých hodnotách v populaci, jiné naopak vykazují velmi úzkou koncentraci pozorovaných hodnot kolem středu celé populace. Statistické charakteristiky charakterizující rozptýlení hodnot v souboru se obecně nazývají míry variability (např. variační rozpětí, rozptyl, směrodatná odchylka a další).

Popisné charakteristiky statistických souborů jako jsou střední hodnoty nebo míry variability nazýváme *parametry*, pokud se jedná o popis či charakteristiku základního souboru (populace). V praxi nejsme schopni obsáhnout do statistického zkoumání celou populaci, tak aby se dalo přesně stanovit skutečné hodnoty těchto popisných parametrů. Proto postupujeme tak, že ze základního souboru vybereme jeden nebo několik výběrových souborů a z těchto výběrových dat vypočteme tzv. *výběrové charakteristiky*, které pak používáme při odhadování skutečných parametrů základního souboru. Výpočtem odhadů přesných hodnot parametrů základního souboru se zabývají speciální statistické metody odhadování parametrů.[18]

Podle zavedené statistické konvence se používají pro označování skutečných (přesných) parametrů populace řecká písmena a pro označování výběrových charakteristik (odhadů skutečných parametrů) písmena latinské abecedy. [18]

K nejčastěji používaným charakteristikám středu statistického souboru patří: střední hodnota (aritmetický průměr), medián, modus, geometrický průměr. K nejčastěji používaným charakteristikám variability souboru patří: variační rozpětí, rozptyl, směrodatná odchylka, variační koeficient, střední chyba průměru (směrodatná chyba průměru). [18]

6.4 Střední hodnoty

Většinu hodnot sledovaného statistického znaku je možno v základních i výběrových souborech obvykle nalézt zhruba v místě, kde se nachází střed celého rozmezí pozorovaných hodnot. Pro vyjádření této koncentrace hodnot blízko středu souboru se používají střední hodnoty.[18]

- **Aritmetický průměr** - je průměr všech hodnot ve statistickém souboru. Průměr vypočteme tak, že sečteme všechny hodnoty a vydělíme je počtem hodnot v souboru. [16]

Výpočet střední hodnoty (průměru) μ pro základní soubor:

$$\mu = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i \quad (17)$$

Výpočet střední hodnoty (průměru) \bar{x} pro výběrový soubor:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (18)$$

Průměr je ovlivněn extrémními hodnotami, pokud se v souboru vyskytují. Extrémními hodnotami souboru rozumíme jednu nebo několik málo hodnot, které jsou oproti ostatním zjištěným hodnotám příliš malé nebo velké. Průměr je správnou charakteristikou souboru pouze tehdy, je-li soubor z hlediska zkoumaného znaku dostatečně stejnorodý (odpovídá Gaussovu normálnímu rozdělení pravděpodobnosti). V ostatních případech, hlavně při malém rozsahu souboru, může být aritmetický průměr zkreslen případnými extrémními hodnotami souboru. [16]

- **Modus** {mod(μ) pro základní soubor, mod(x) pro výběrový soubor} - hodnota, která se v daném statistickém souboru vyskytuje nejčastěji (je to hodnota znaku s největší relativní četností). Představuje jakousi typickou hodnotu sledovaného souboru a jeho určení předpokládá rozřídění souboru podle obměn znaku. Výhodou

modu je, že ho lze snadno použít i pro nečíselná data, kde např. aritmetický průměr použít nelze. Např. modus souboru (jablko, pomeranč, hruška, pomeranč, jablko, jablko, hruška) je jablko. [18]

- **Medián** { $\text{med}(\mu)$ pro základní soubor, $\text{med}(x)$ pro výběrový soubor } - je hodnota, která leží ve středu tabulky uspořádané od nejmenší do nejvyšší hodnoty šetřeného znaku. Je-li počet jednotek souboru liché číslo, je medián sledovaného znaku ta jeho hodnota, která leží „uprostřed“. Je-li počet jednotek souboru sudé číslo, je medián sledovaného znaku aritmetickým průměrem těch jeho dvou hodnot, které jsou „nejblíže středu“. Základní výhodou mediánu jako statistického ukazatele je fakt, že není ovlivněn extrémními hodnotami. Proto se často používá v případě šikmých rozdělení, u kterých aritmetický průměr dává obvykle nevhodné výsledky. Nevýhodné je obvykle použití mediánu u souborů, ve kterých sledovaný znak nabývá jen dvou možných hodnot. Tam se medián chová stejně jako modus: je hrubým měřítkem vlastností rozdělení a v případě, že obě kategorie jsou zastoupeny zhruba stejně, je velmi nestabilní. [18]
- **Harmonický průměr** (μ_h pro základní soubor, x_h pro výběrový soubor) - Je definován jako podíl rozsahu souboru (počtu členů) a součtu převrácených hodnot znaků. Jinými slovy je to převrácená hodnota aritmetického průměru převrácených hodnot zadaných členů. Používá se, pokud potřebujeme hodnotu, která zastupuje ostatní, co se týče převrácených hodnot, například při výpočtu průměrné rychlosti na úsecích stejné délky. Dále jsou-li hodnoty znaku nerovnoměrně rozloženy kolem aritmetického průměru, nebo když jsou hodnoty extrémně nízké či vysoké. [18]

$$x_h = \frac{n}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_j}} \quad (19)$$

- **Geometrický průměr** (μ_g pro základní soubor, x_g pro výběrový soubor) - Je definován jako n -tá odmocnina součinu nezáporných čísel. Geometrický průměr je hodnota, která udává v jistém smyslu typickou hodnotu souboru čísel tím, že nahrazuje hodnoty, co se týče jejich součinu. Geometrický průměr má smysl všude, kde má nějaký informační smysl součin hodnot proměnné. Z praktického hlediska platí,

že logaritmus geometrického průměru je roven aritmetickému průměru logaritmovaných hodnot souboru. [18]

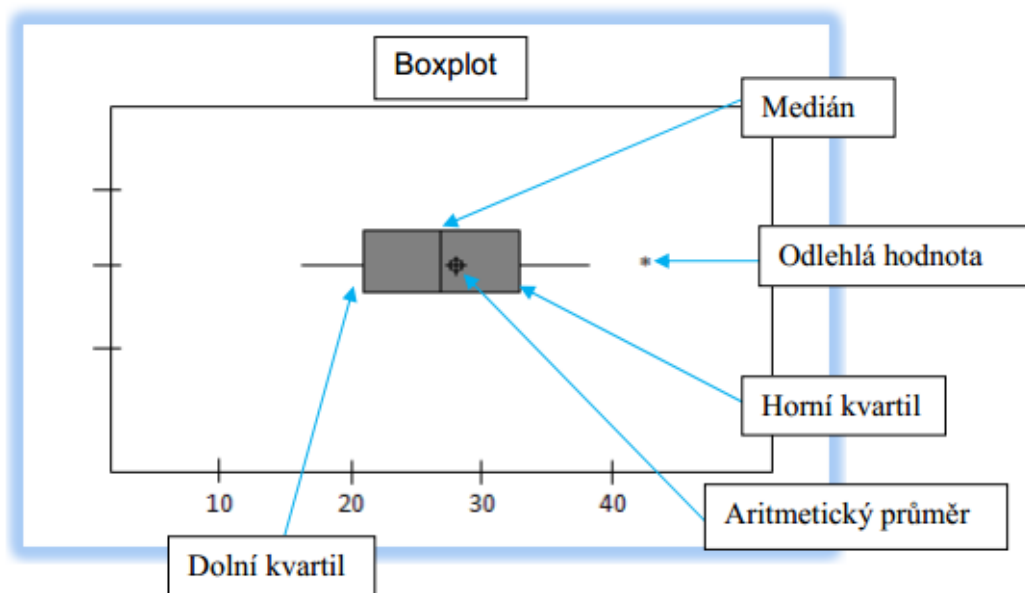
$$x_g = \sqrt[n]{x_1 \dots x_n} \quad (20)$$

6.5 Grafické zobrazení dat

Pro prezentaci statistických údajů je velmi důležité používat různé grafické způsoby. Každý typ grafického zobrazení hodnot má svoje omezení, ale zároveň i své výhody.

6.5.1 Boxplot diagram (krabicový diagram)

Umožňuje posoudit symetrii a variabilitu datového souboru a existenci odlehlých či extrémních hodnot. Pomocí tohoto grafu můžeme data rozdělit na vnitřní, vnější a odlehlá. Základním prvkem grafu je obdélník, jehož hrany tvoří hodnoty dolního a horního kvartilu. Uvnitř tohoto obdélníku je 50% hodnot výběru. Čarou uvnitř obdélníku je vyznačen medián, popř. křížkem průměr. Z obdélníku vedou dvě úsečky kolmé k hranám, jejichž délka je dána vzdáleností vnitřních hradeb od hrany obdélníku. [19]



Obr. 25 Boxplot diagram

Vnitřní hradby se vypočtou:

$$h_D = x_{0,25} - 1,5(x_{0,75} - x_{0,25}) \quad (21)$$

$$h_H = x_{0,75} + 1,5(x_{0,75} - x_{0,25}) \quad (22)$$

Vnější hrady se vypočtou:

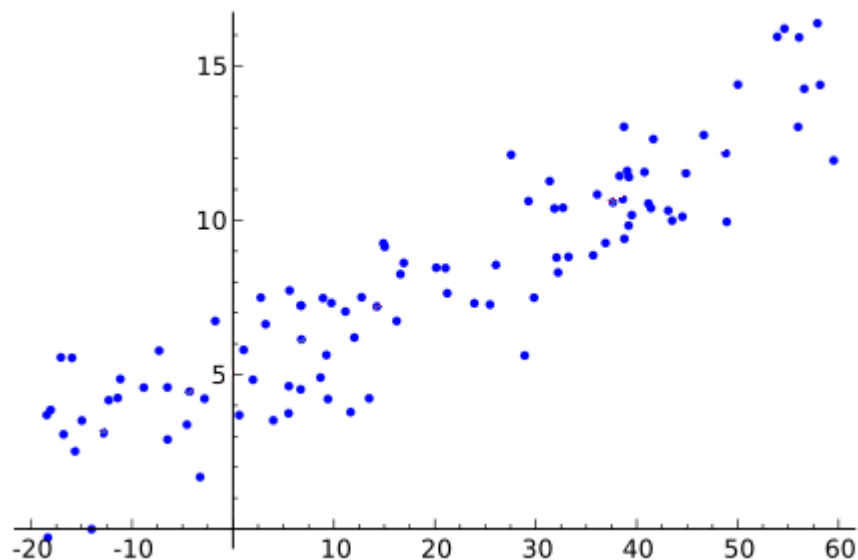
$$H_D = x_{0,25} - 3(x_{0,75} - x_{0,25}) \quad (23)$$

$$H_H = x_{0,75} + 3(x_{0,75} - x_{0,25}) \quad (24)$$

Hradby slouží pro identifikaci dat ve výběru. Hodnoty uvnitř vnitřních hradeb jsou hodnoty přilehlé, hodnoty mezi vnitřními a vnějšími hradbami jsou hodnoty vnější a hodnoty vně vnějších hradeb jsou hodnoty vzdálené nebo jinak odlehlé. Do grafu se zakresluje i minimum a maximum jako body. [19]

6.5.2 Bodový graf

Bodový graf je matematické schéma užívající kartézských souřadnic pro zobrazení souboru dat o dvou proměnných. Data jsou zobrazena jako jednotlivé body, kde horizontální osu určuje hodnota první proměnné a vertikální osu hodnota druhé proměnné. Při konstrukci diagramu je vhodné dát nezávislou proměnnou na osu x a závislou na osu y a vynést hodnoty v podobě bodů. Když bod padne na stejné místo, měl by být nakreslen hned vedle, aby byly vidět oba. Body buď vytvoří opticky přímo viditelnou závislost, nebo je možné provést rozdělení oblasti na čtyři stejně velké kvadranty tak, aby případná nelineární závislost byla lépe patrná. Výsledkem může být i potvrzení, že proměnné nejsou vzájemně závislé. [20]

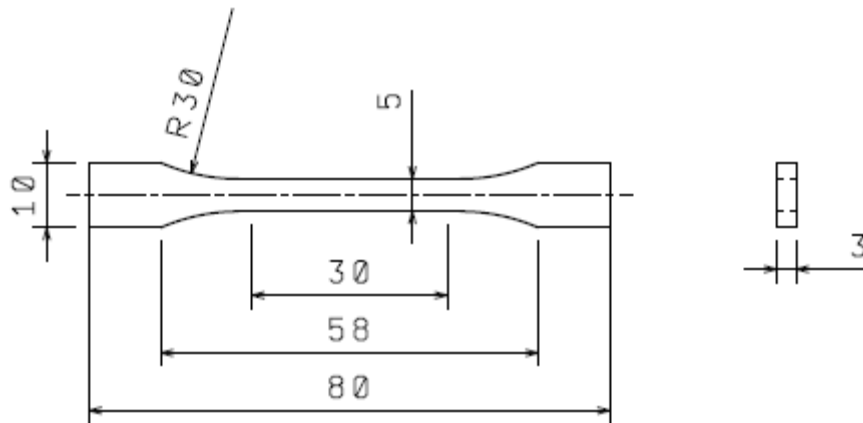


Obr. 26 Bodový graf

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Všechna zkušební tělesa byla vyrobena technologií vstřikování. Tvar a rozměry zkušebních těles pro creepovou zkoušku jsou stejné jako pro tahovou zkoušku. Tělesa mají tvar oboustranné lopatky. V našem případě byla použita menší ze zkušebních těles dle normy ČSN EN ISO 527-2 typ 1BA.



Obr. 27 Rozměry zkušebního tělesa

7.1 Vstřikovací stroj

Vstřikování probíhalo na vstřikovacím stroji ARBURG Allrounder 170 U. Jedná se o horizontální typ vstřikovacího stroje. V tab. 2 jsou uvedeny základní informace o stroji.



Obr. 28 ARBURG Allrounder 170 U

Tab. 2 Parametry vstřikovacího stroje

Technické údaje	
Výrobce	ARBURG
Označení	Allrounder 170 U
Uzavírací síla	150 kN
Maximální rozměr formy	170x170x200 mm
Průměr šneku	22 mm
Maximální vstřikovaný objem	34 cm ³
Hmotnost	1740 kg

7.2 Vstřikované materiály

Celkem byly testovány 2 materiály a to polykarbonát (PC) a polyamid6.6 (PA6.6).

7.2.1 Polykarbonát (PC)

Polykarbonáty patří mezi termoplastické polymery čili termoplasty. Snadno se zpracovávají např. vstřikováním nebo lisováním za tepla. Mají dobrou tepelnou odolnost, odolnost proti nárazu a dobré optické vlastnosti. Patří proto mezi komoditní plasty. Název polykarbonátů je odvozený od funkčních karbonátových (uhličitanových) skupin (-O-(C=O)-O-), které v jejich řetězci spojují monomerní jednotky.

Polykarbonát se používá např. jako materiál pro výrobu domácího i laboratorního nádobí, elektronických přístrojů, displejů, osvětlení apod. Je také základním materiálem pro výrobu kompaktních disků. Rovněž skla ochranných brýlí, zejména vojenských s balistickou odolností jsou převážně vyrobena z polykarbonátu. Prodává se např. pod obchodními názvy Makrolon, Lexan nebo Calibre. Tento materiál byl před vstřikováním sušen a to dle doporučení výrobce 4 hodiny při teplotě 120°C.



Obr. 29 Výrobky z polykarbonátu

7.2.2 Polyamid 6.6 (PA6.6)

PA6.6 je semikrystalický až krystalický materiál, který má jednu z nejvyšších teplot tání mezi všemi komerčně dostupnými polyamidy. Jakostní třídy se vyznačují pevností a tuhostí, která je zachována i při zvýšených teplotách. PA6.6 po tvarování pohlcuje vlhkost, zadržení vody však není tak vysoké jako u PA6. Absorpce vlhkosti závisí na složení materiálu, tloušťce stěn a podmínkách prostředí. Rozsah navlhavosti ovlivňuje rozměrovou stabilitu a vlastnosti, které je nutné vzít v úvahu pro návrh produktu. Přidávají se různé modifikátory ke zlepšení mechanických vlastností. Skelná vlákna jsou nejběžnějším plnidlem. Přidáním elastomerů, například EPDM nebo SBR, se zlepšují odolnosti proti rázu. Viskozita PA66 je malá, proto dobře teče, což umožňuje tvarování tenkých komponent. Tečení však není tak dobré jako u PA6. Viskozita závisí na teplotě. Je odolný vůči většině rozpouštědel, ale ne vůči silným kyselinám nebo oxidačním činidlům. Používá se v automobilovém průmyslu, na kryty přístrojů, obecně tak, kde se vyžaduje odolnost proti rázům a pevnost.



Obr. 30 Výrobky z polyamidu

Tab. 3 Nastavené parametry pro PC

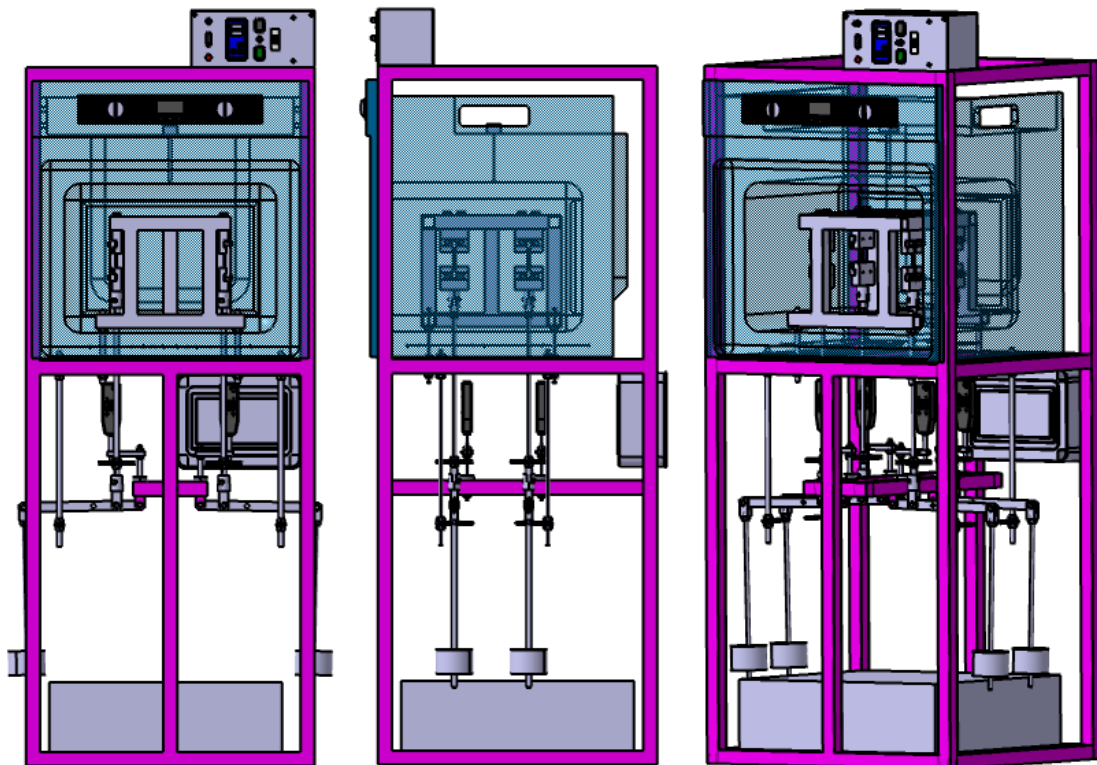
Polykarbonát (PC)	
Sušení	120°C/4 hod.
Dráha dávkování	44 mm
Teplota formy	70°C
Teplota vstupního pásma	285°C
Teplota přechodového pásma	295°C
Teplota výstupního pásma	300°C
Teplota na trysce	305°C
Vstřikovací rychlost	50 mm/s
Bod přepnutí	10 mm
Dotlak	1000 bar
Doba chlazení	30 s

Tab. 4 Nastavené parametry pro PA 6.6

Polyamid 6.6	
Sušení	-
Dráha dávkování	55 mm
Teplota formy	90°C
Teplota vstupního pásma	250°C
Teplota přechodového pásma	280°C
Teplota výstupního pásma	285°C
Teplota na trysce	290°C
Vstřikovací rychlost	40 mm/s
Bod přepnutí	15 mm
Dotlak	800 bar
Doba chlazení	20 s

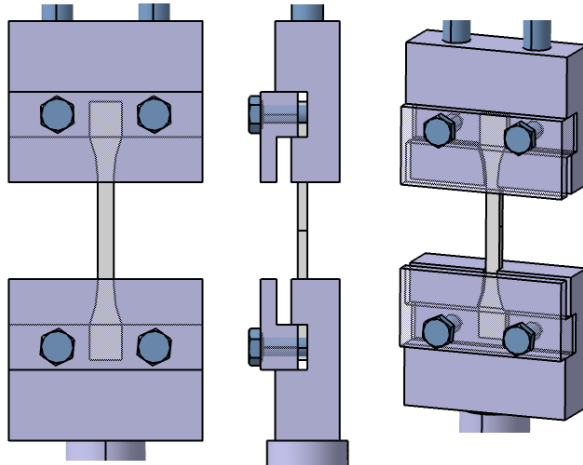
7.3 Měřicí zařízení

Data byla naměřena na zařízení, které bylo už dříve sestrojeno ke studiu creepového chování za zvýšených teplot. Pro naše měření byla vyrobena nová táhla, která nebyla součástí tohoto zařízení. Toto zařízení umožňuje měření čtyř zkušebních tělísek současně.



Obr. 31 Měřicí zařízení

Zkušební tělísko bylo upnuto do upínacích čelistí, které zaručují, že nedojde k proklouznutí, či dokonce uvolnění zkušebního tělíska v průběhu měření. Čelisti jsou připevněny k měřicímu zařízení pomocí šroubů.

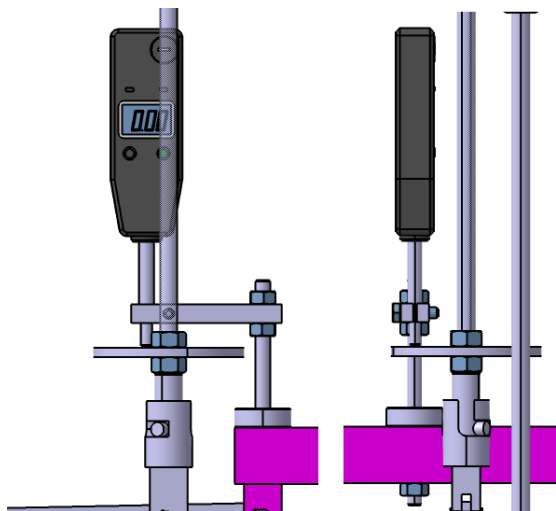


Obr. 32 Upínací čelisti

Naměřené hodnoty byly zaznamenávány pomocí digitálního úchylkoměru Mitutoyo série 575. Tento úchylkoměr byl kabelem propojen s počítačem, který každých 5 vteřin zaznamenával naměřenou hodnotu. Základní údaje o digitálním úchylkoměru jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5 Specifikace digitálního úchylkoměru

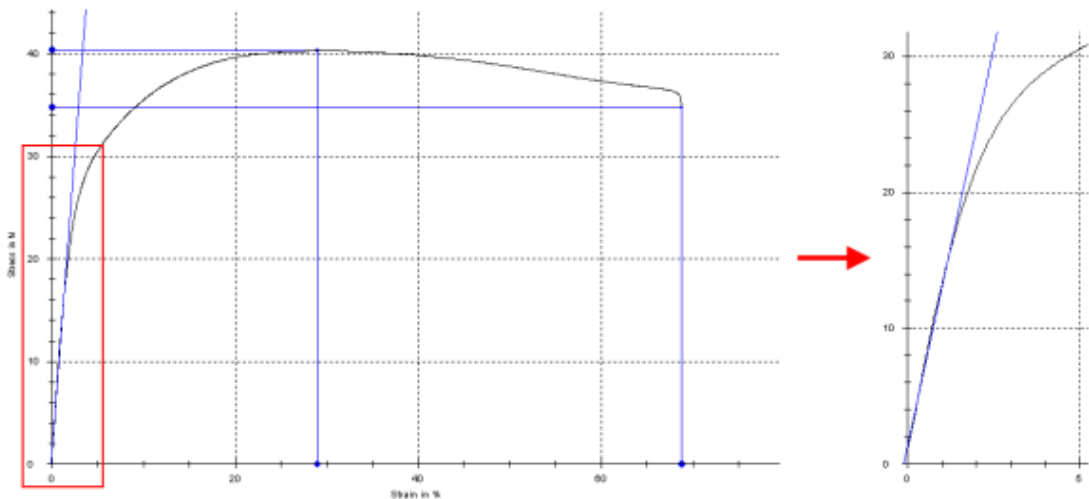
Číslicový krok	Rozsah měření	Přesnost	Měřící síla	Hmotnost
0,01 mm	25,4 mm	0,02 mm	$\leq 1,8$ N	140 g



Obr. 33 Upnutí úchylkoměru

8 VOLBA ZATÍŽENÍ

Základním kritériem pro volbu velikosti závaží je podmínka, že velikost napětí při měření musí ležet v lineární oblasti chování materiálu. Z tohoto důvodu byla jako první provedena tahová zkouška na trhacím stroji Zwick Roell 1456. Po vyhodnocení této zkoušky bylo zvoleno závaží. Pro materiál PA6.6 bylo zvoleno závaží 9kg. Pro materiál PC bylo zvoleno závaží 5,5kg, pro tuto velikost závaží byla provedena série creepových zkoušek za konstantního zatížení. Pro tento materiál byla dále provedena série creepových zkoušek za konstantní teploty, při kterých se měnila velikost závaží. Pro tuto sérii zkoušek byl zvolen rozsah zatížení 5 – 6,5kg.



Obr. 34 Lineární oblast

Tab. 6 Zvolené zatížení pro sérii zkoušek za konstantního zatížení

Materiál	Velikost závaží
PC	5,5kg
PA6,6	9kg

Tab. 7 Zvolené zatížení pro sérii zkoušek za konstantní teploty

Materiál	Velikost závaží
PC	5; 5,5; 6; 6,5kg

9 PODMÍNKY PŘI ZKOUŠCE

Creepová zkouška za konstantního zatížení trvala 24 hodin. Hodnoty prodloužení byly zaznamenávány v intervalu 5ti sekund. Velikosti zatížení byly zvoleny pro materiál PC 5,5kg a pro materiál PA6.6 9kg. Teploty, při kterých probíhalo měření, byly v rozsahu 20 až 120°C. Bylo provedeno 6 sérií, teplota se měnila vždy po 20ti stupních. Pro každou sérii bylo změřeno 12 vzorků.

Creepová zkouška za konstantní teploty trvala také 24 hodin. Teplota, při které tato zkouška probíhala, byla 80°C. Byly provedeny 4 série zkoušek, každá série při jiném zatížení. Velikosti zatížení jsou uvedeny v tab. 9. Pro každou sérii bylo změřeno 8 vzorků.

Tab. 8 Podmínky při zkoušce za konstantního zatížení

Parametr	Hodnota
Počet zkušebních těles	4
Závaží	dle materiálu
Interval odečítání deformace	5s
Doba trvání zkoušky	24h
Teplota	20,40,60,80,100,120°C

Tab. 9 Podmínky při zkoušce za konstantní teploty

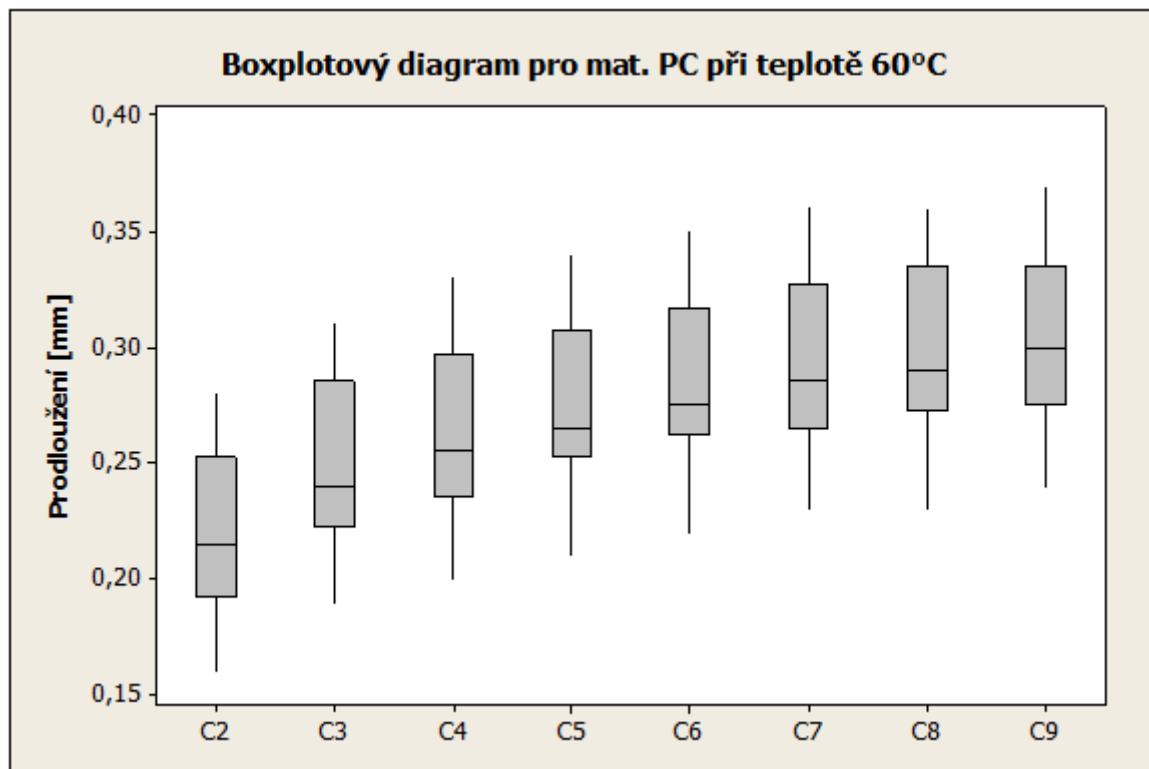
Parametr	Hodnota
Počet zkušebních těles	4
Závaží	5; 5,5; 6; 6,5 kg
Interval odečítání deformace	5s
Doba trvání zkoušky	24h
Teplota	80°C

10 KONTROLA NAMĚŘENÝCH DAT

Existence podezřelých a vychýlených hodnot byla kontrolována pomocí boxplotového diagramu. Pokud by se vyskytly podezřelé nebo vychýlené hodnoty, bylo by potřeba se jimi zabývat. Z důvodu velkého množství naměřených dat byla data kontrolována ve tříhodinovém intervalu. Nejsou zde uvedeny všechny boxplotové diagramy z důvodu přehlednosti. Zbylé diagramy se nachází na příloženém CD. Všechny grafy byly sestrojeny v programu Minitab 15.

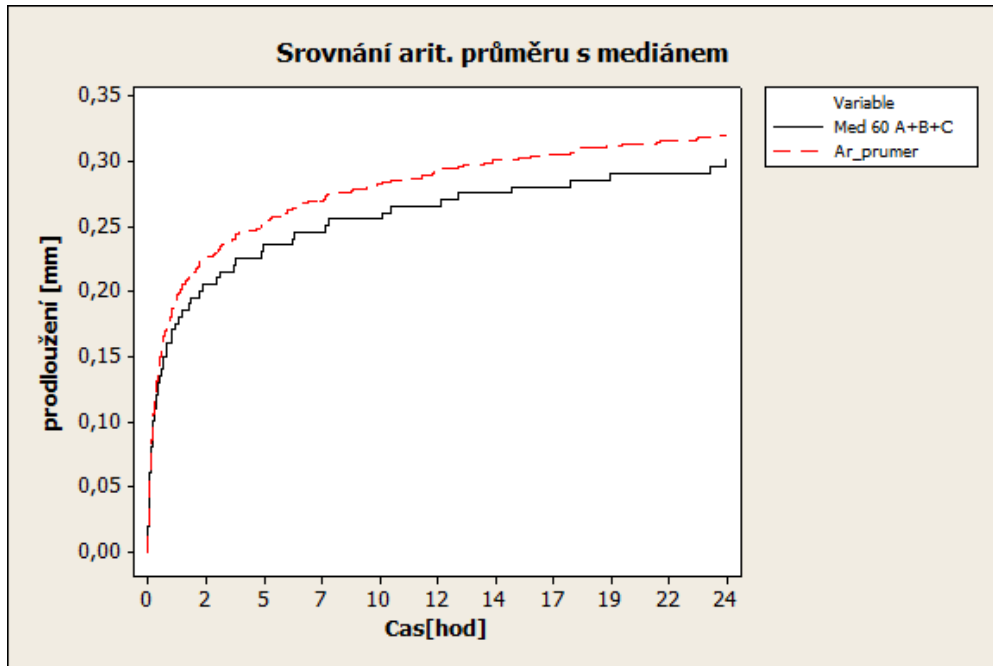
10.1 Materiál PC – zatížení 5,5kg

Na obr. 35 je sestrojen boxplotový diagram pro materiál PC, při teplotě 60°C a zatížení 5,5kg. Z grafu lze vyčíst, že se nevyskytly žádné podezřelé nebo vychýlené hodnoty.



Obr. 35 Boxplot diagram

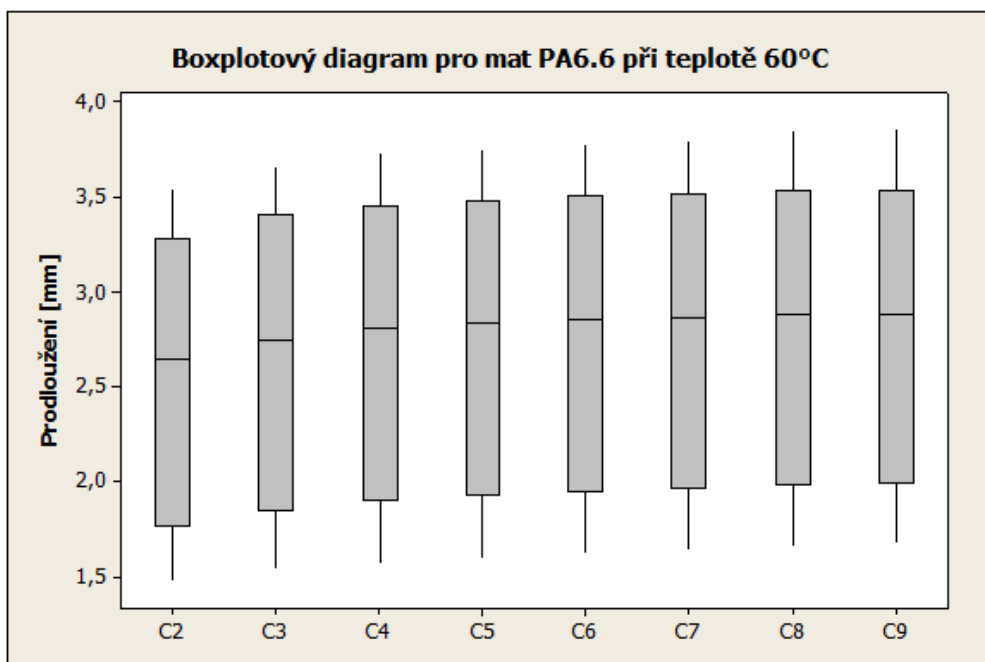
Na obr. 36 je zobrazeno srovnání odhadu aritmetického průměru a mediánu. Z Grafu lze vyčíst, že měřená data mají stejnou charakteristiku.



Obr. 36 Srovnání arit. průměru s mediánem - PC

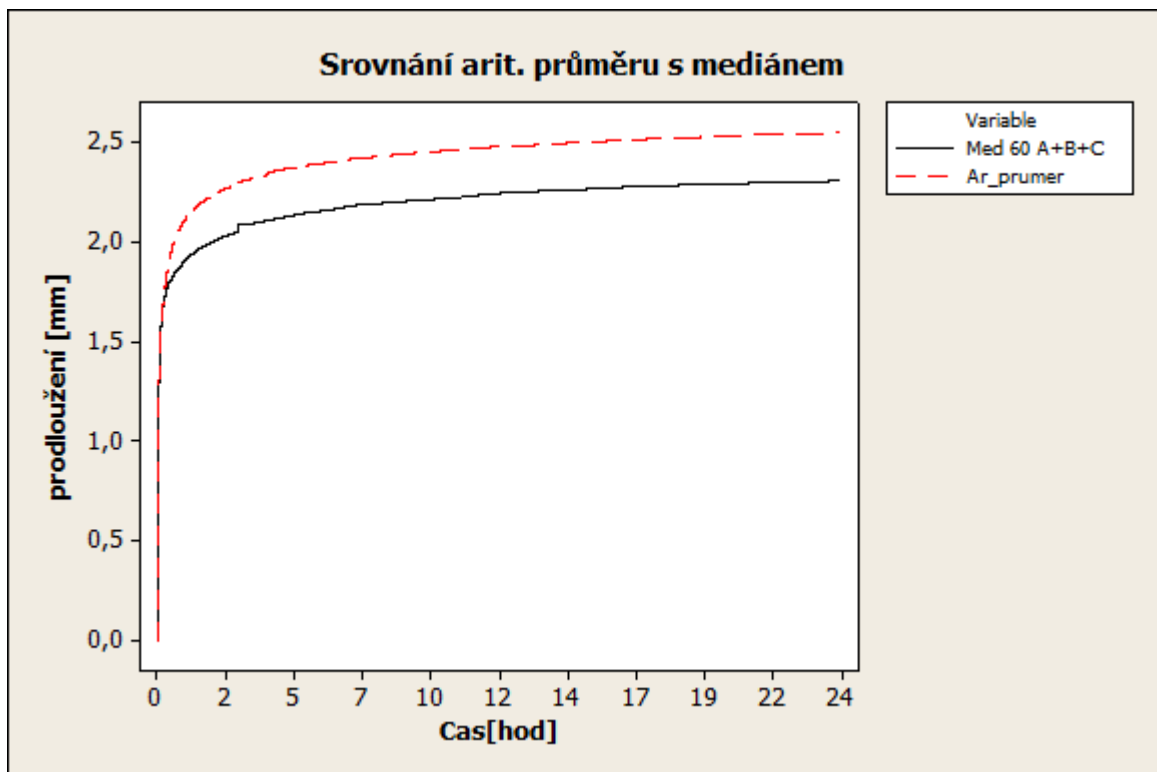
10.2 Materiál PA6.6 – zatížení 9kg

Na obr. 37 je opět boxplotový diagram, tentokrát pro materiál PA6.6, při teplotě 60°C a zatížení 9kg. Z diagramu lze vyčíst, že se nevyskytly žádné podezřelé nebo vychýlené hodnoty.



Obr. 37 Boxplot diagram

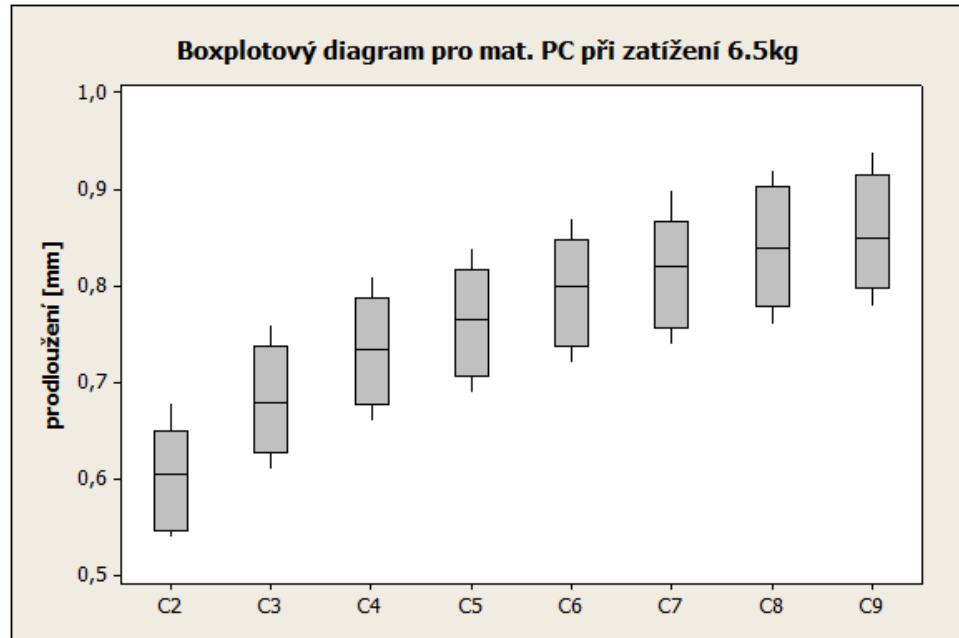
Na obr. 38 je opět zobrazeno srovnání odhadu aritmetického průměru a mediánu. Z Grafu lze vyčíst, že měřená data mají stejnou charakteristiku.



Obr. 38 Srovnání arit. průměru s mediánem – PA6.6

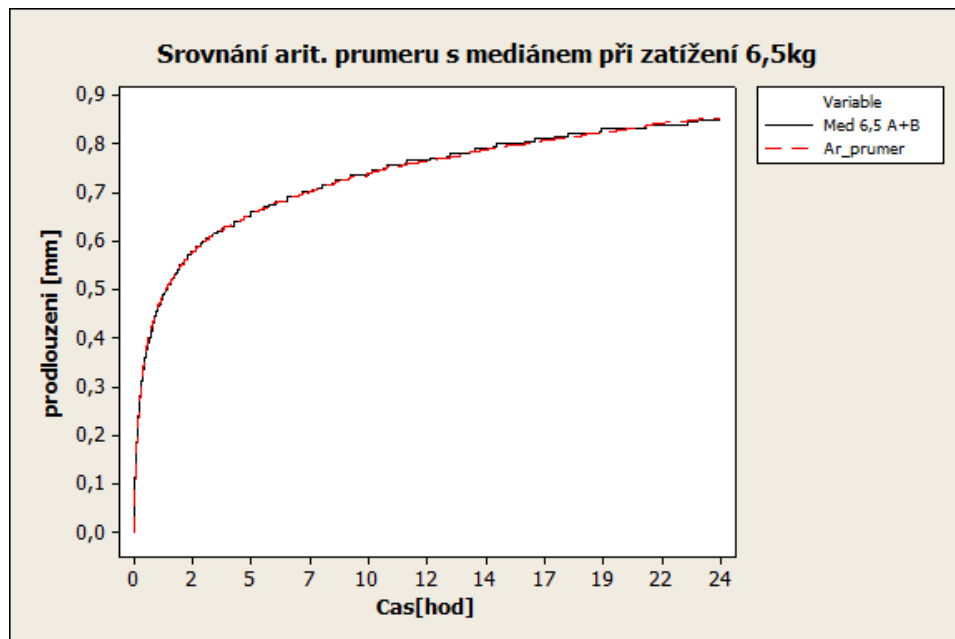
10.3 Materiál PC – konstantní teplota

Na obr. 39 je opět boxplotový diagram, tentokrát pro materiál PC při teplotě 80°C a zatížení 6,5kg. Opět se nevyskytly žádné podezřelé nebo vychýlené hodnoty.



Obr. 39 Boxplot diagram

Na obr. 40 je opět znázorněn odhad aritmetického průměru a mediánu. Z Grafu lze vyčíst, že měřená data mají stejnou charakteristiku.



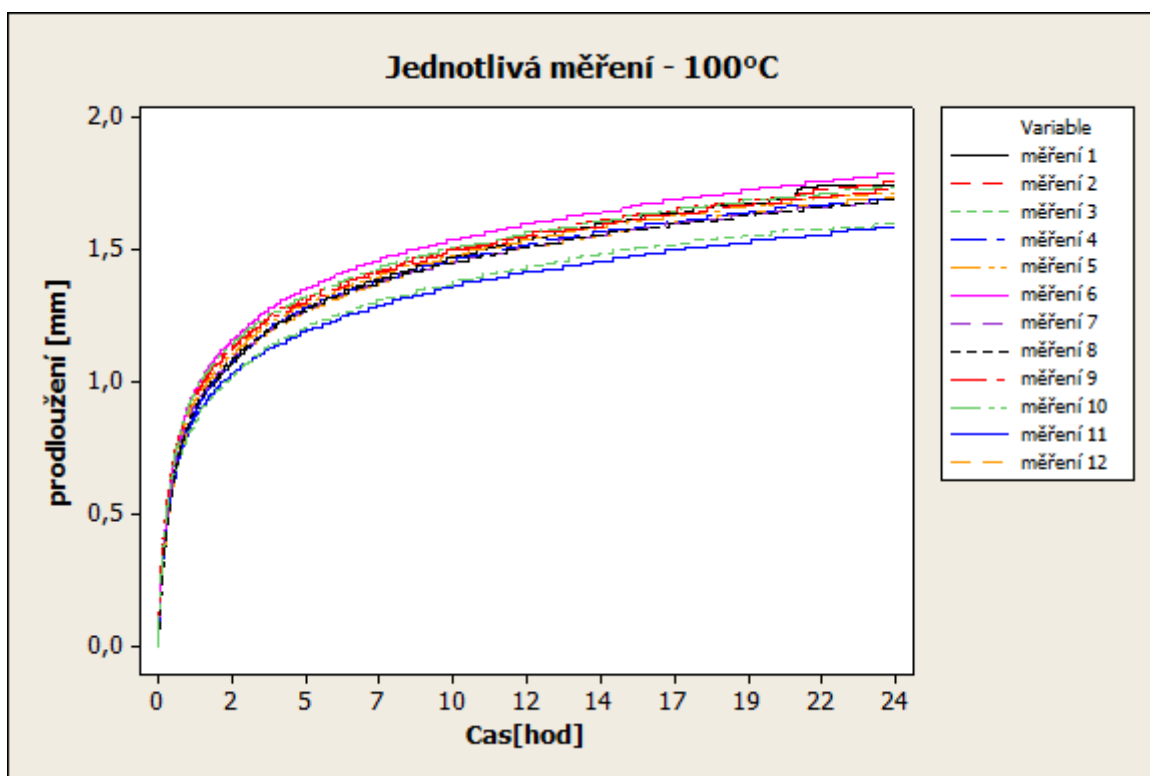
Obr. 40 Srovnání arit. průměru s mediánem – PC, konstantní teplota

11 VYHODNOCENÍ

Vzhledem k malému počtu měření, bylo při vyhodnocení naměřených dat pracováno s aritmetickými průměry. Ke statickému vyhodnocení a zpracování naměřených dat protažení zkušebních těles při creepových testech byl použit program Minitab 15.

11.1 Materiál PC, zatížení 5,5kg

Na obr. 41 jsou znázorněna jednotlivá měření při teplotě 100°C. Minimální naměřená hodnota je v tomto případě 1,60mm. Maximální změřená hodnota 1,79mm. Kvůli přehlednosti neuvádím stejný graf pro ostatní teploty, ale pouze tabulku s hodnotami – tab. 10.

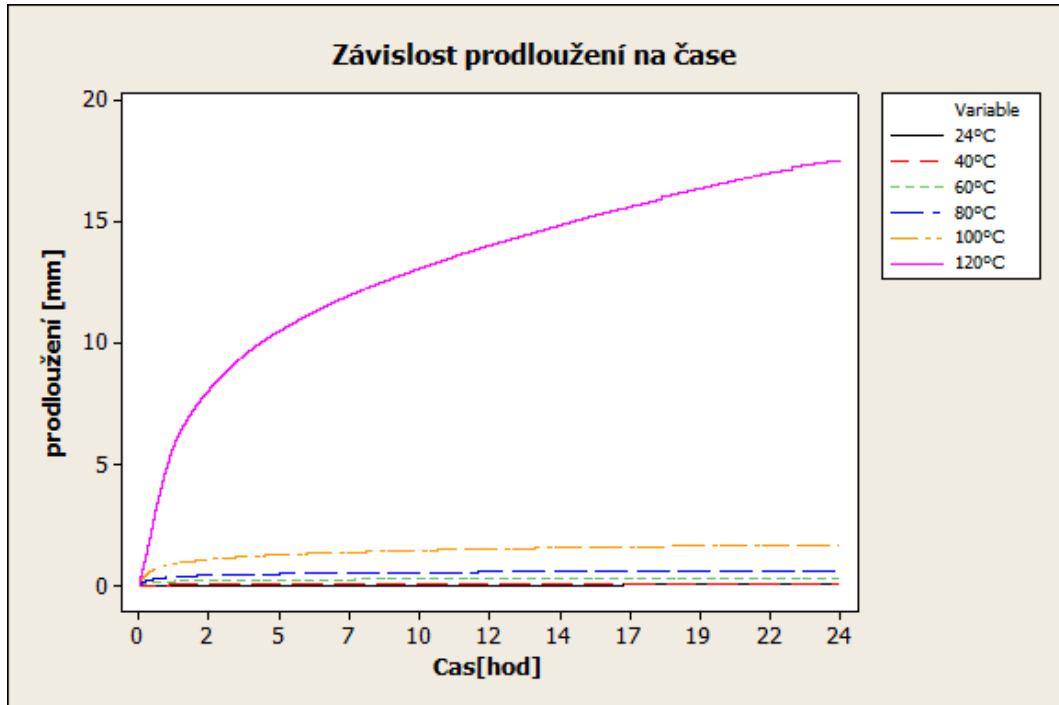


Obr. 41 Jednotlivá měření při teplotě 100°C

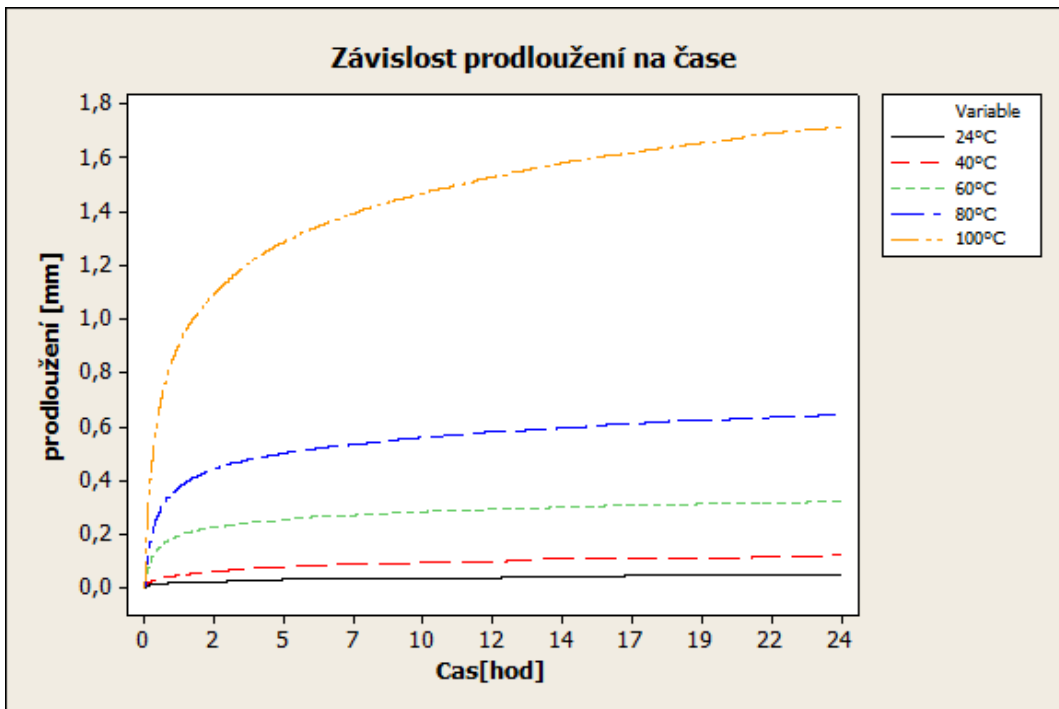
Tab. 10 Hodnoty maximálních a minimálních hodnot deformace

teplota	minimální hodnota	maximální hodnota	rozptyl
20°C	0,03mm	0,05mm	0,02mm
40°C	0,09mm	0,14mm	0,05mm
60°C	0,27mm	0,37mm	0,10mm
80°C	0,57mm	0,72mm	0,15mm
100°C	1,60mm	1,79mm	0,19mm
120°C	12,39mm	21,00mm	8,61mm

Na obr. 42 je znázorněna závislost prodloužení zkušebního tělíska na čase při všech měřených teplotách. Na obr. 43 je znázorněna stejná závislost, ovšem s tím rozdílem, že je vynechána teplota 120°C. Tato teplota byla vynechána z důvodu lepšího znázornění měřítka.

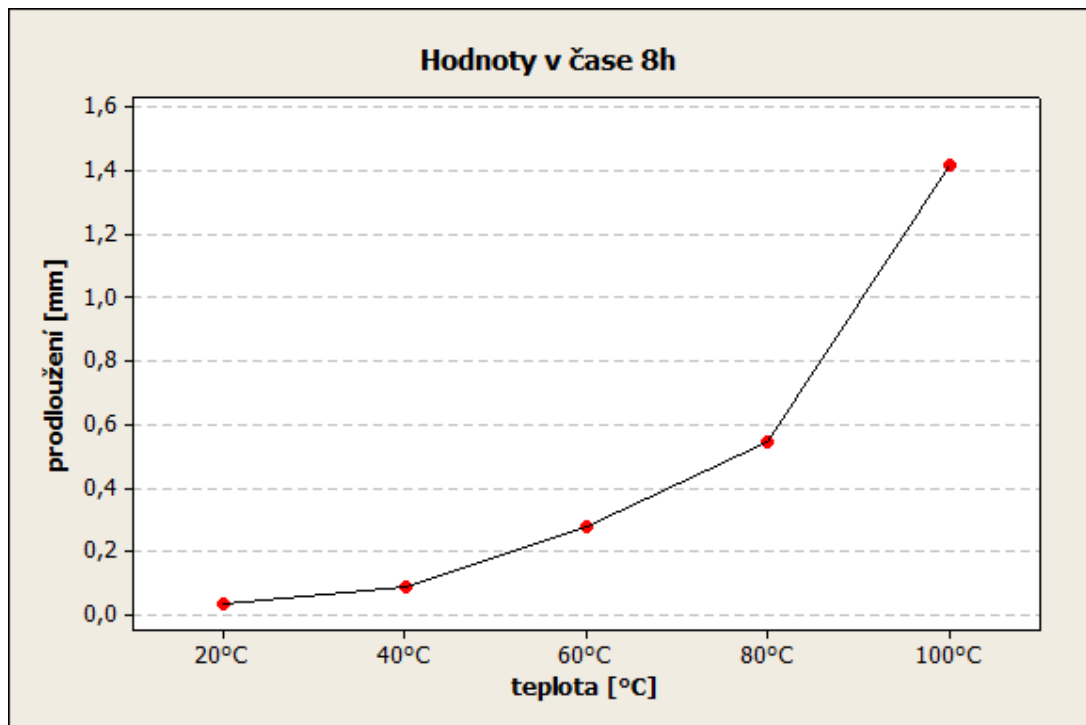


Obr. 42 Závislost prodloužení na čase – PC

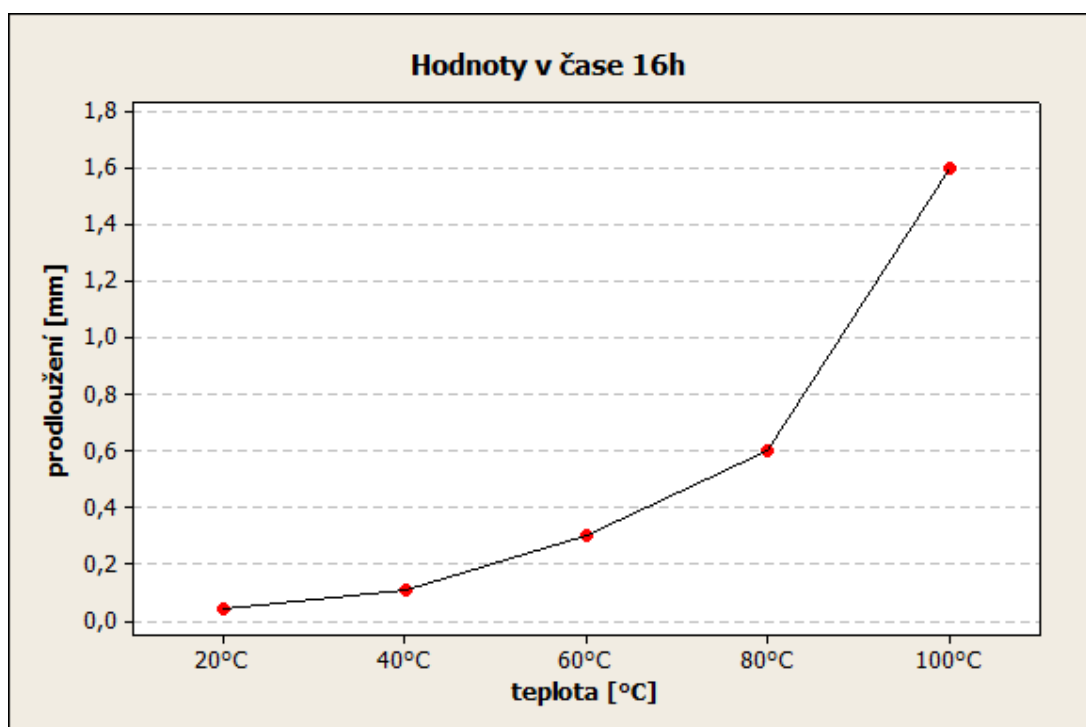


Obr. 43 Závislost prodloužení na čase bez 120°C – PC

Na obrázcích 44, 45 a 46 jsou znázorněny změřené hodnoty v čase 8, 16 a 24 hodin. Srovnáním těchto hodnot bylo usouzeno, že při teplotě 20°C a v čase 8 hodin dojde k prodloužení, které se na celkovém prodloužení podílí ze 75%. U všech měřených teplot došlo k prodloužení nad 70% do osmi hodin od začátku měření, při délce měření 24 hodin.



Obr. 44 Hodnoty v čase 8h – PC

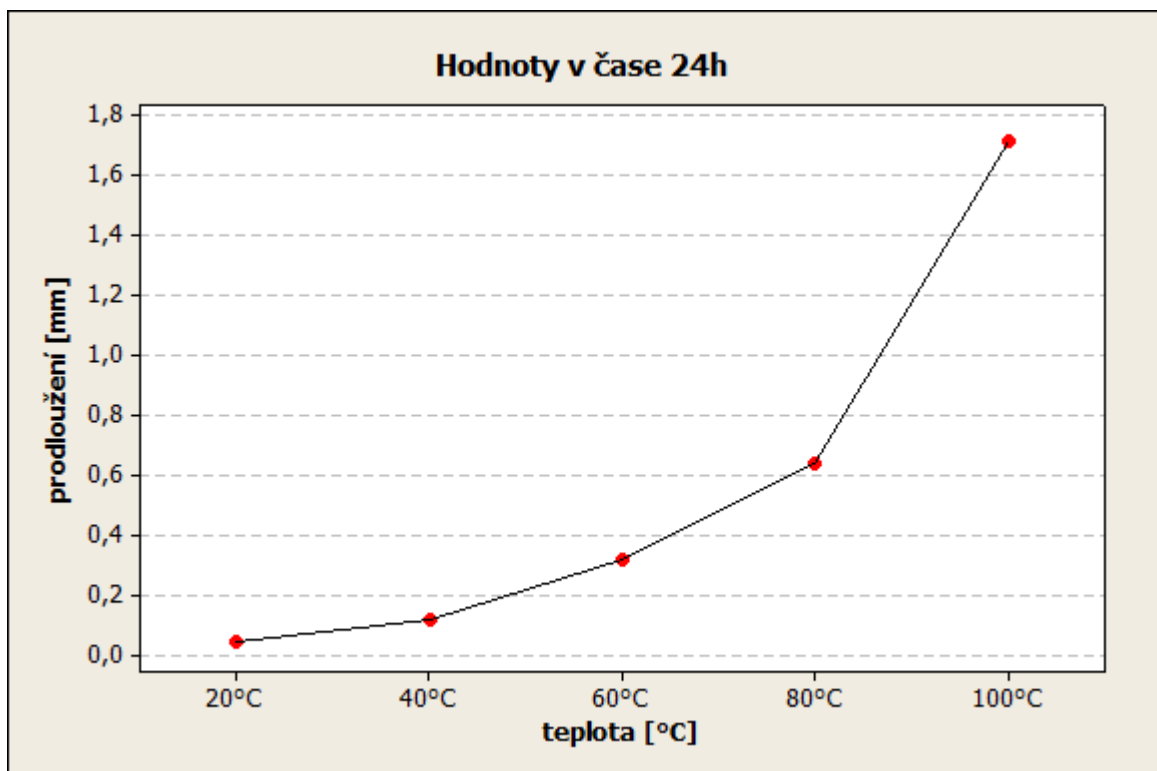


Obr. 45 Hodnoty v čase 16h – PC

Tab. 11 Hodnoty poměrného prodloužení v čase 8 a 16 hodin - PC

teplota	poměrné prodloužení v čase 8h	poměrné prodloužení v čase 16h
20°C	75,00%	91,70%
40°C	73,70%	90,50%
60°C	86,20%	95,30%
80°C	84,60%	94,30%
100°C	83,00%	93,90%
120°C	70,40%	87,60%

V tab. 11 jsou uvedeny hodnoty poměrného prodloužení v čase 8 a 16 hodin. Z tabulky lze vyčíst, že k největšímu prodloužení došlo v první třetině měření. Ve druhé části měření už prodloužení zkušebních těles nepokračovalo stejným tempem.



Obr. 46 Hodnoty v čase 24h – PC

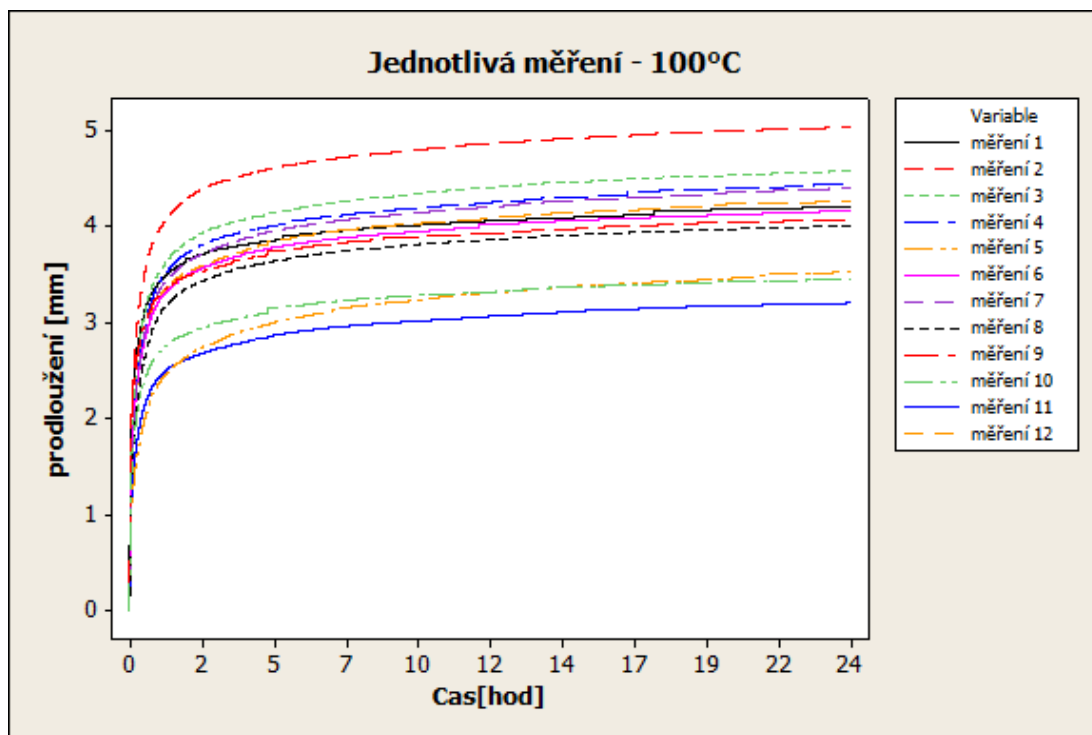
Na obr. 46 můžeme vidět hodnoty prodloužení v čase 24 hodin pro téměř všechny teploty. Záměrně je zde vynechána teplota 120°C (opět kvůli měřítku svislé osy). Při této teplotě došlo k výrazně vyšší deformaci než při ostatních teplotách a to z toho důvodu, že tato teplota se již blíží teplotě skelného přechodu zkoušeného materiálu, při které je creep výraznější. Hodnoty deformací pro všechny měřené teploty v čase 24 hodin jsou uvedeny v tab. 12.

Tab. 12 Maximální deformace - PC

teplota	deformace
20°C	0,045mm
40°C	0,119mm
60°C	0,319mm
80°C	0,641mm
100°C	1,711mm
120°C	17,591mm

11.2 Materiál PA6.6, zatížení 9kg

Vyhodnocení materiálu polyamid6.6 proběhlo stejným způsobem jako v předchozím případě. Na obr. 47 je opět zobrazen graf pro jednotlivá měření při teplotě 100°C. Hodnoty minimálních a maximálních hodnot pro všechny teploty jsou uvedeny v tab. 13.

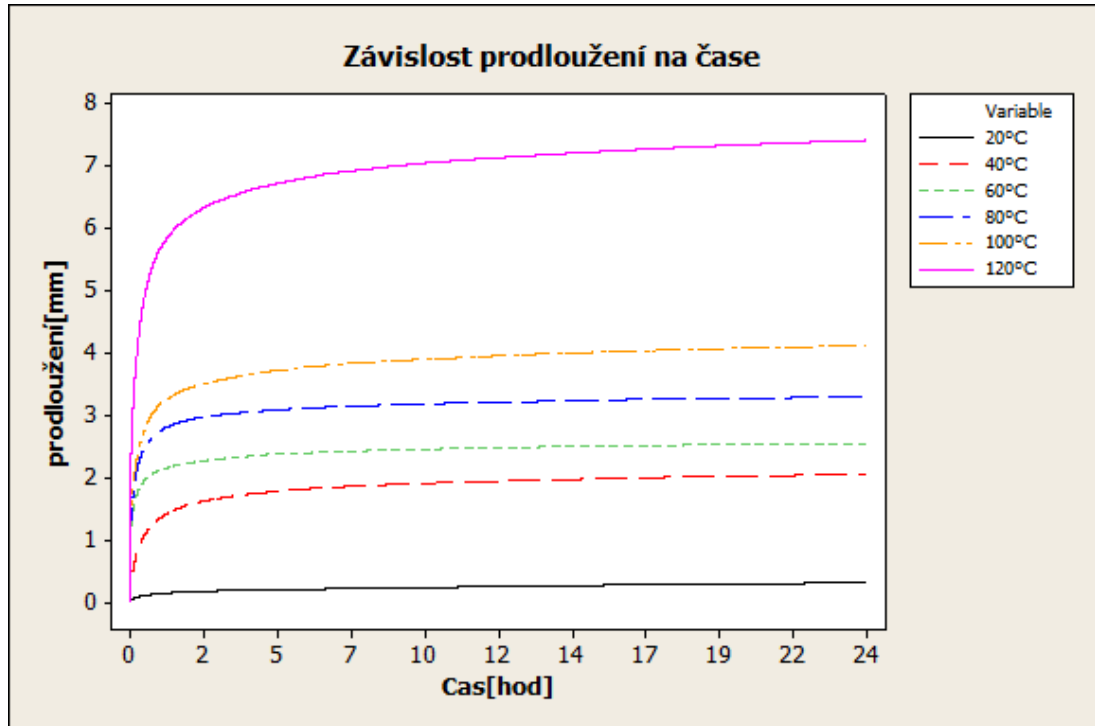


Obr. 47 Jednotlivá měření při teplotě 100°C – PA6.6

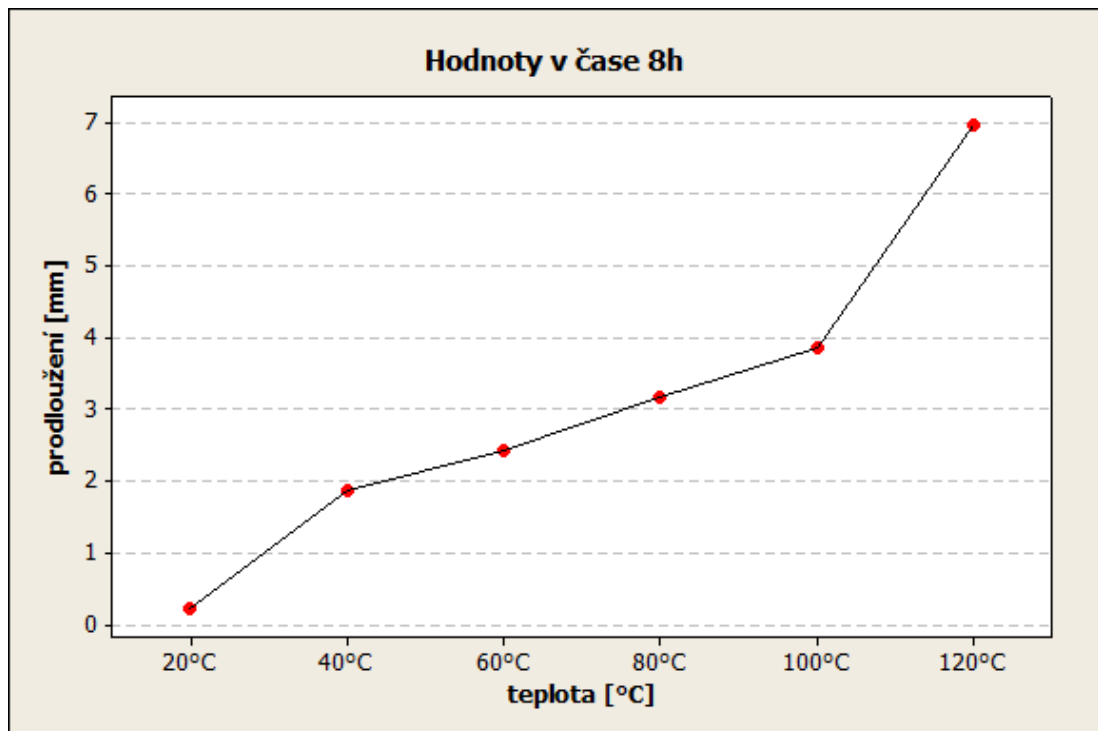
Tab. 13 Hodnoty maximálních a minimálních hodnot deformace

teplota	minimální hodnota	maximální hodnota	rozptyl
20°C	0,21mm	0,45mm	0,24mm
40°C	1,72mm	2,59mm	0,87mm
60°C	1,68mm	3,86mm	2,18mm
80°C	2,06mm	4,20mm	2,14mm
100°C	3,20mm	5,03mm	1,83mm
120°C	4,03mm	11,65mm	7,62mm

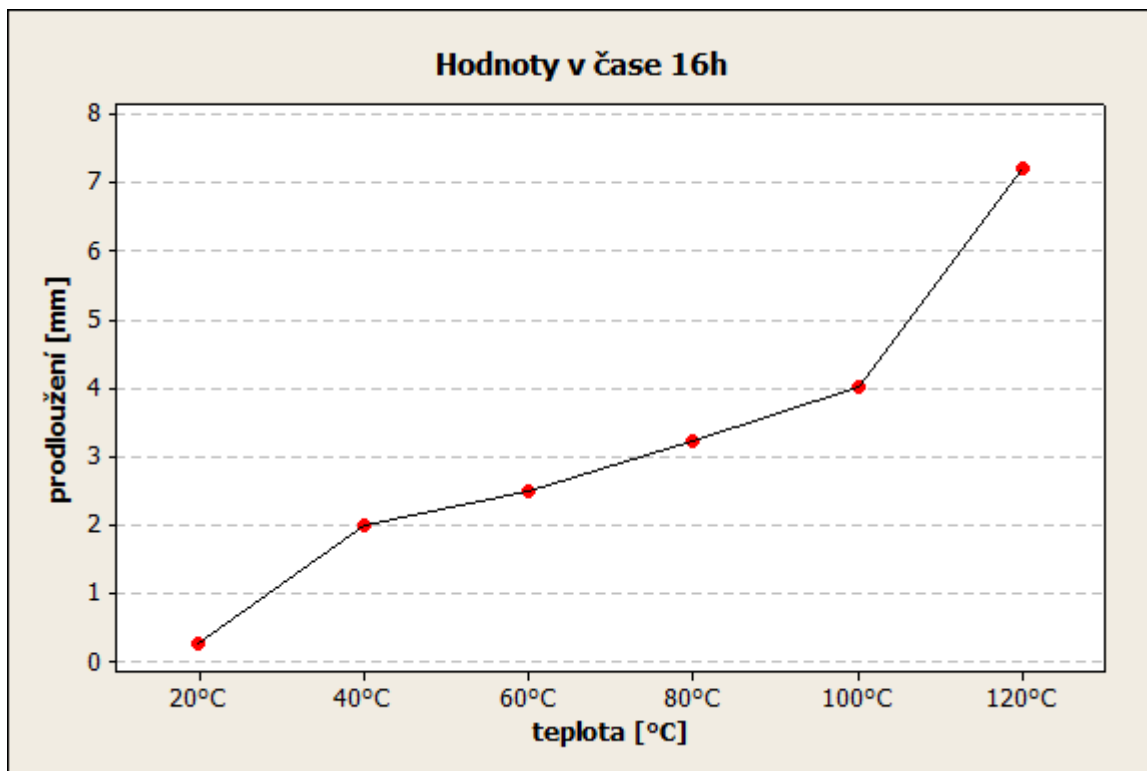
Na obr. 48 můžeme vidět průběh deformace zkušebních těles pro všechny měřené teploty. V tomto případě nedošlo při nejvyšší teplotě k tak výraznému skoku jako u polykarbonátu z důvodu vyšší teploty skelného přechodu polyamidu 6.6.



Obr. 48 Závislost prodloužení na čase – PA6.6



Obr. 49 Hodnoty v čase 8h – PA6.6

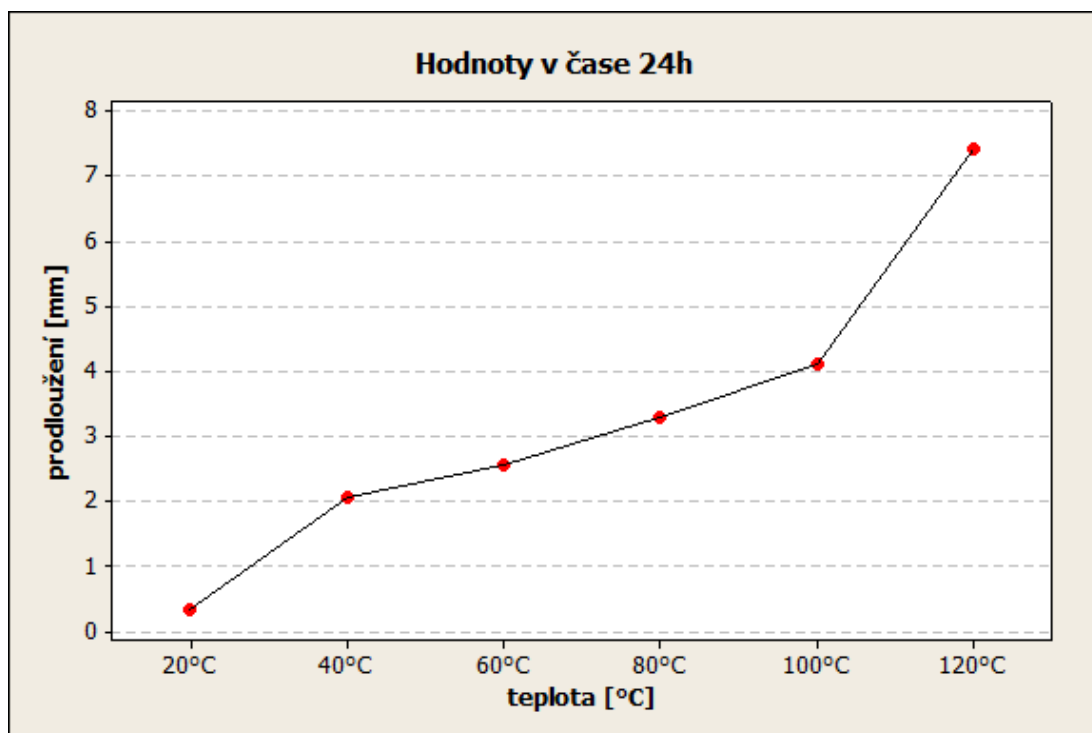


Obr. 50 Hodnoty v čase 16h – PA6.6

Srovnáním hodnot v čase 8, 16 a 24 hodin bylo zjištěno poměrné prodloužení v čase 8 a 16 hodin vzhledem k celkovému prodloužení. V porovnání s polykarbonátem bylo zjištěno, že polyamid6.6 dosáhl vyšších hodnot v čase 8 hodin. V čase 16 hodin se však už tyto hodnoty příliš neliší. Z toho vyplývá, že materiál polykarbonát tekl ve druhé části měření rychleji než polyamid6.6.

Tab. 14 Hodnoty poměrného prodloužení v čase 8 a 16 hodin – PA6.6

teplota	poměrné prodloužení v čase 8h	poměrné prodloužení v čase 16h
20°C	71,20%	86,60%
40°C	91,50%	97,02%
60°C	95,50%	98,40%
80°C	95,90%	98,60%
100°C	93,90%	97,70%
120°C	93,70%	97,70%



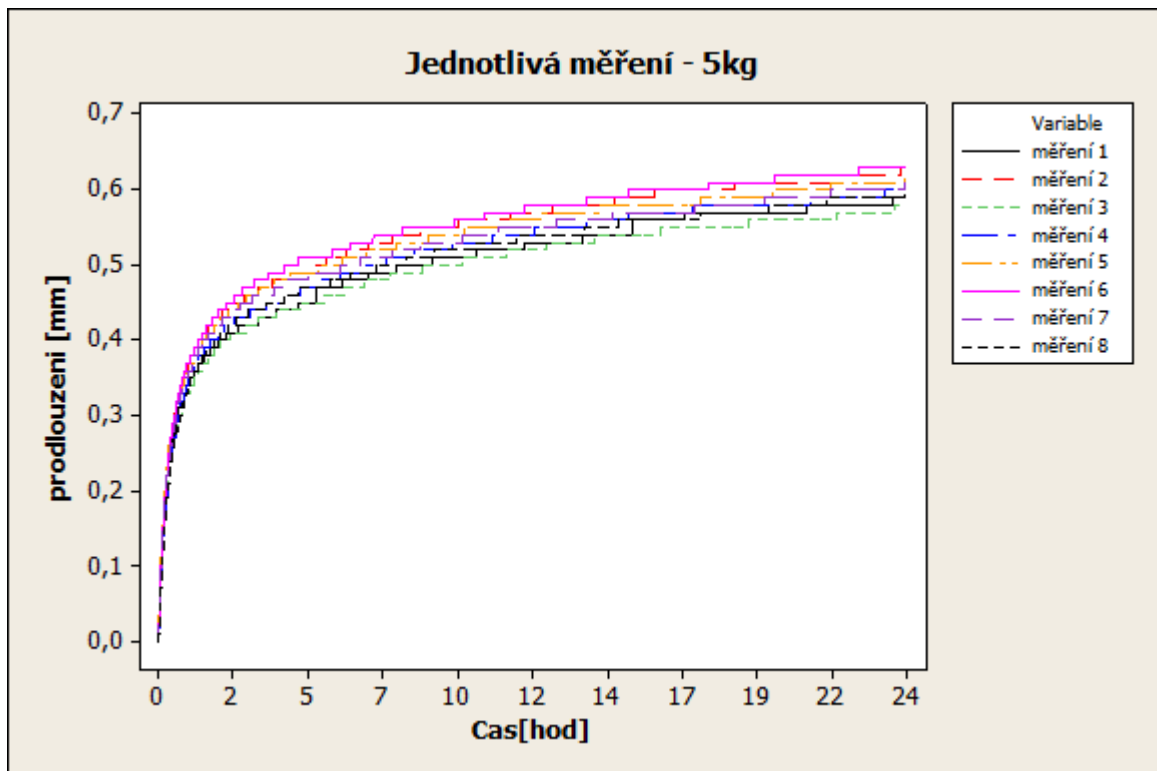
Obr. 51 Hodnoty v čase 24h – PA6.6

Tab. 15 Maximální deformace PA6.6

teplota	maximální deformace
20°C	0,313mm
40°C	2,046mm
60°C	2,55mm
80°C	3,29mm
100°C	4,11mm
120°C	7,41mm

11.3 Materiál PC, konstantní teplota 80°C

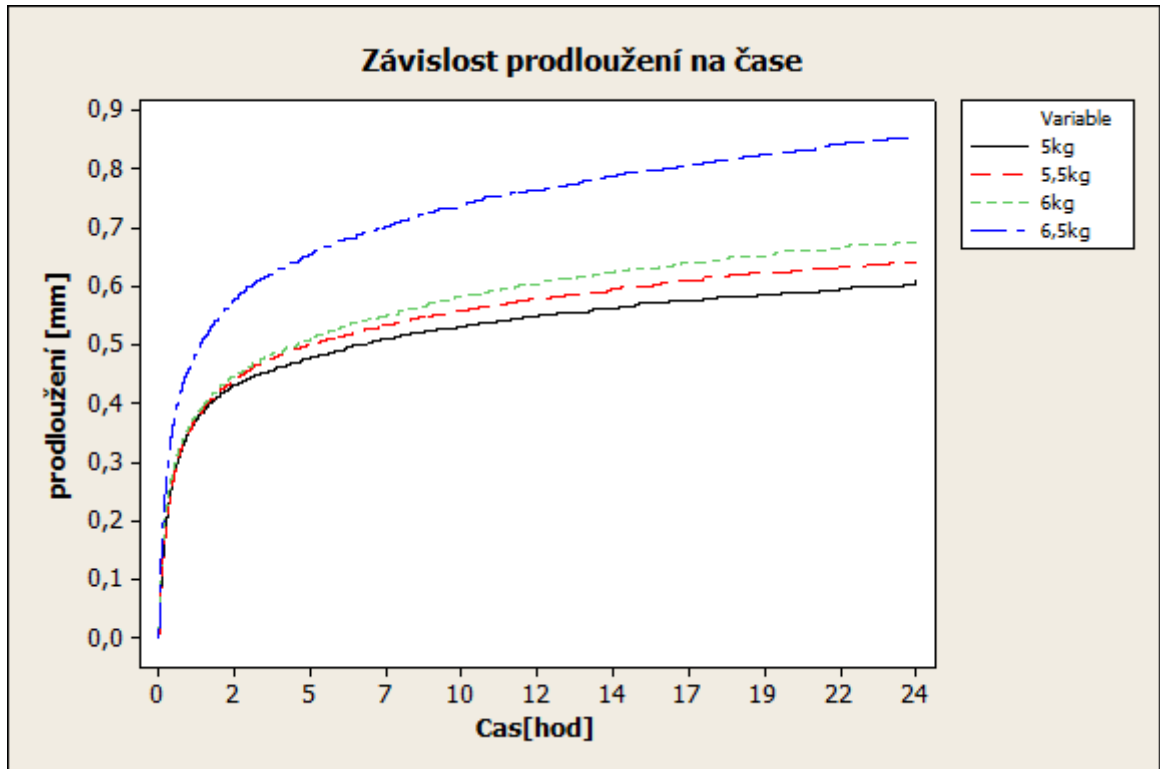
Materiál polykarbonát byl dále měřen při konstantní teplotě 80°C, pro různá zatížení. Na obr. 52 můžeme vidět průběh jednotlivých měření pro zatížení 5kg. Při zkouškách za konstantní teploty bylo provedeno vždy 8 měření pro každé zatížení. Minimální a maximální hodnoty můžeme vidět v tab. 16.



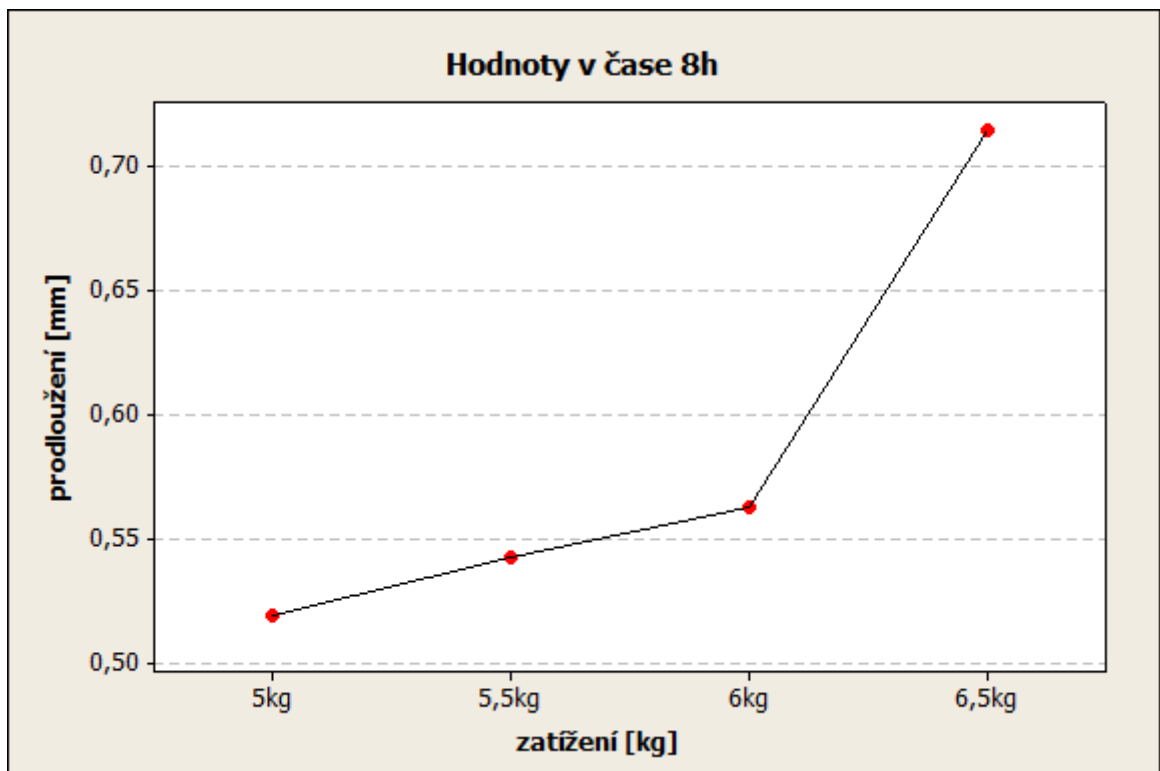
Obr. 52 Jednotlivá měření - 5kg

Tab. 16 Hodnoty maximálních a minimálních hodnot deformace

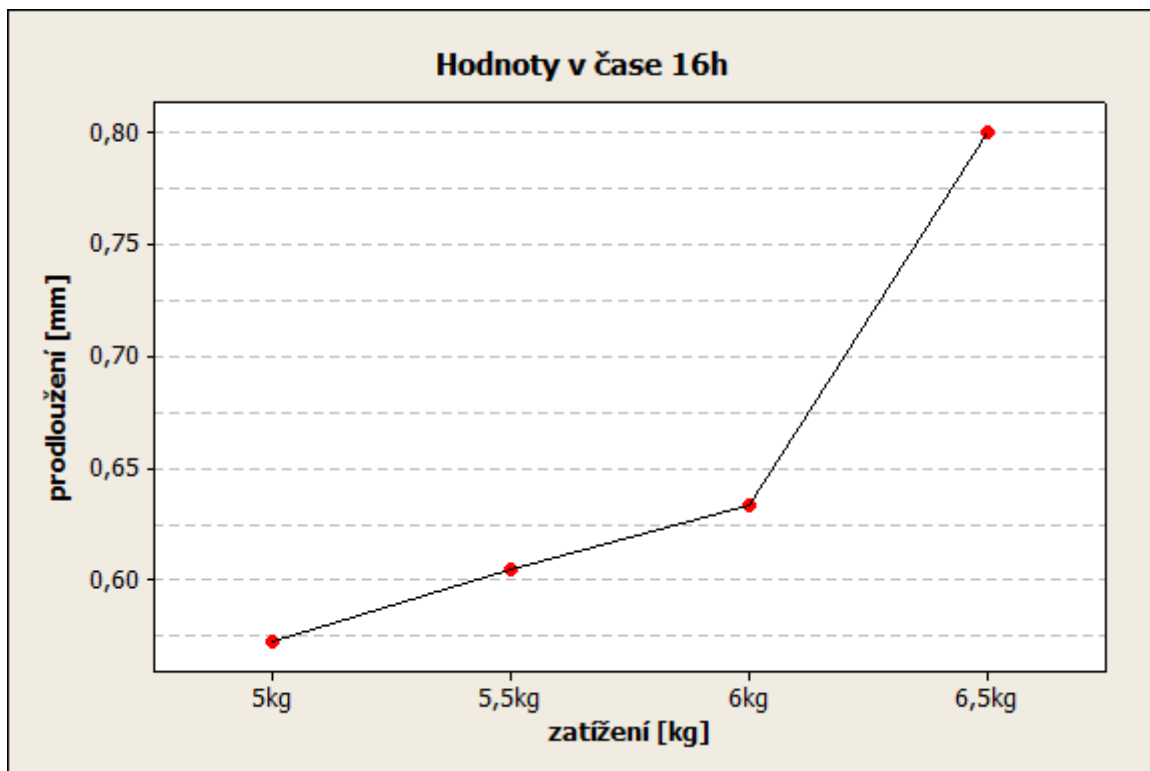
zatížení	minimální hodnota	maximální hodnota	rozptyl
5kg	0,58mm	0,63mm	0,05mm
5,5kg	0,57mm	0,72mm	0,15mm
6kg	0,64mm	0,72mm	0,08mm
6,5kg	0,78mm	0,94mm	0,16mm



Obr. 53 Závislost prodloužení na čase – PC, konst. teplota



Obr. 54 Hodnoty v čase 8h – PC, konst. Teplota

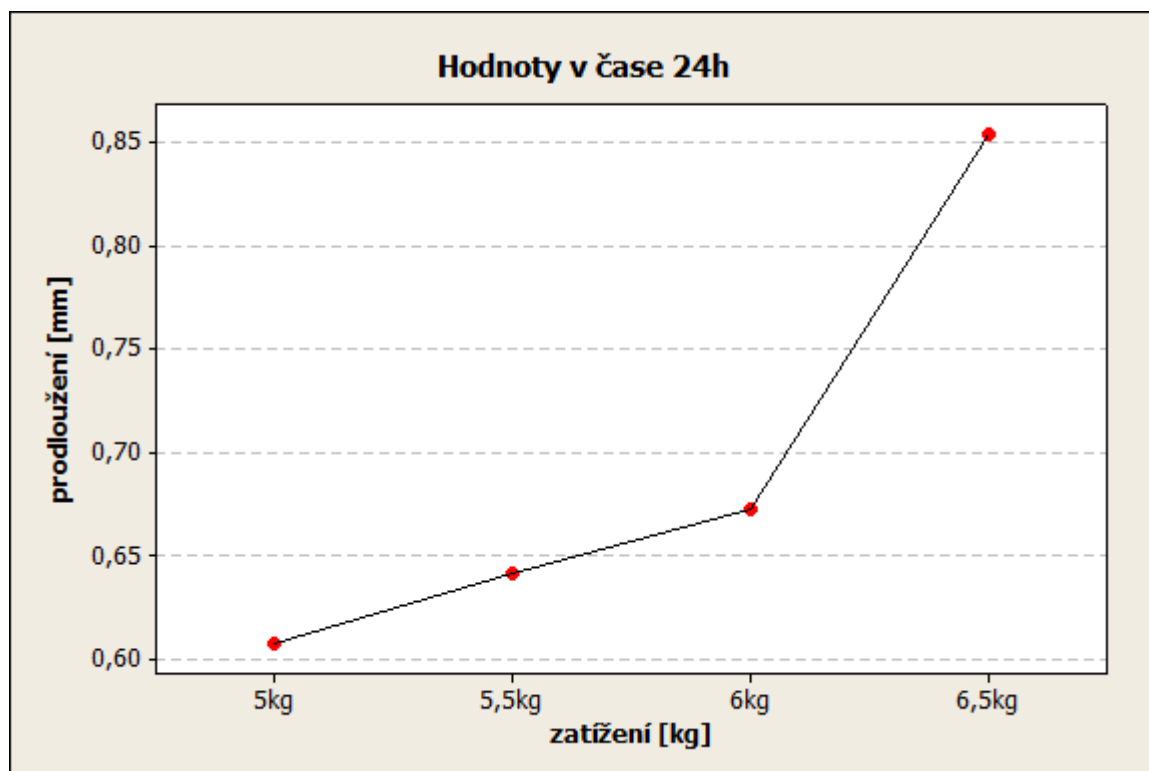


Obr. 55 Hodnoty v čase 16h

Tab. 17 Hodnoty poměrného prodloužení v čase 8 a 16 hodin

Hmotnost závaží	poměrné prodloužení v čase 8h	poměrné prodloužení v čase 16h
5kg	85,39%	94,20%
5,5kg	84,60%	94,30%
6kg	83,64%	94,30%
6,5kg	83,60%	93,70%

V tab. 17 jsou uvedeny vypočtené hodnoty poměrného prodloužení v čase 8 a 16 hodin vzhledem k celkovému prodloužení. Na obr. 55 si můžeme všimnout, že při zatížení 6,5kg došlo relativně k výrazně vyšší deformaci, než při předchozích třech měřeních. Hodnoty maximálních deformací uvedeny v tab. 18.



Obr. 56 Hodnoty v čase 24h – PC, kons. teplota

Tab. 18 Maximální deformace PC, konst. teplota

Hmotnost závaží	maximální deformace
5kg	0,61mm
5,5kg	0,64mm
6kg	0,67mm
6,5kg	0,85mm

ZÁVĚR

Náplní této diplomové práce bylo studium creepového chování za zvýšených teplot.

Teoretická část je rozdělena do několika kapitol. V první kapitole je uvedeno dělení polymerních materiálů a to z několika hledisek. Následující kapitola se věnuje zkoušce tahem, protože creepová tahová zkouška vychází právě z této zkoušky a také je tato zkouška důležitá pro volbu zatížení při měření creepových vlastností materiálu. Třetí kapitola se věnuje samotnému creepu. Zbývající tři kapitoly teoretické části se zabývají měřením teplot, délek a základy statistiky. Z těchto tří kapitol je nejvíce pozornosti věnováno základům statistiky a to z důvodu vyhodnocování naměřených dat v praktické části.

V praktické části jsou uvedeny základní informace o testovaných materiálech, vstříkování zkušebních vzorků a měřícím zařízení. Poté už následuje práce s naměřenými hodnotami. Jako první bylo nutné zkontrolovat naměřená data. Ke kontrole bylo použito boxplotových diagramů, pomocí kterých byla kontrolována přítomnost podezřelých nebo vychýlených hodnot. Dále bylo ke kontrole použito srovnání odhadu aritmetického průměru s odhadem mediánu. Pomocí tohoto grafu bylo zjištěno, že data mají stejný charakter. Po kontrole naměřených dat následovalo samotné vyhodnocení. Z grafu závislosti prodloužení na čas, bylo zjištěno, že u polykarbonátu při teplotě 120°C došlo k výraznému nárůstu hodnoty maximální deformace ve srovnání s ostatními měřenými teplotami. Tento jev nastal z toho důvodu, že měření probíhalo za teploty, která se již velmi blíží teplotě skelného přechodu daného materiálu. U polyamidu6.6 nedošlo při teplotě 120°C k tak výraznému odskoku této hodnoty, z důvodu vyšší teploty skelného přechodu polyamidu6.6. Dále byla u všech teplot porovnávána hodnota prodloužení v čase 8 a 16 hodin s maximální hodnotou deformace. Tímto porovnáním bylo zjištěno, že u polykarbonátu dojde v čase 8 hodin k prodloužení, které se na celkové deformaci podílí průměrně z 78,8%. U polyamidu6.6 byla tato hodnota 91,1%. Tyto hodnoty se však již v čase 16 hodin liší jen minimálně, z toho vyplývá, že polykarbonát tekl v čase 8 až 16 hodin rychleji než polyamid6.6.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LENFELD, P. *Technologie II: Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. [cit. 2012-12-26]. Dostupný z WWW:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [2] DUCHÁČEK, V. *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*, 2 vyd.; VSCHT: Praha, 2006. 280 s. ISBN 80-7080-617-6
- [3] *Plasty* [online]. [cit. 2012-12-26]. Dostupný z WWW:
<http://ateam.zcu.cz/download/plasty.pdf>
- [4] ČERMÁK, R. *Konstrukční polymery I* [online]. [cit. 2012-12-26]
Dostupný z WWW:
http://procesniinzenyrstvi.wz.cz/2_rocnik/polymery/KP_P_2009.pdf
- [5] *Vlastnosti a inženýrské aplikace plastů: Technická univerzita v Liberci* [online]. [cit. 2012-12-126]. Dostupný z WWW:
<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/vip.htm>
- [6] RYBNÍKÁŘ, F., et al. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Praha, SNTL, MÍR, 1965. 420 s. ISBN 04-628-65
- [7] MARÁK, M. *Experimentální studium krátkodobého tečení polypropylenu při ohybu*. Diplomová práce, UTB ve Zlíně, 2010
- [8] *Deformační chování polymerních látek*, [online]. [cit. 2012-12-26]. Dostupný z WWW: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_01.pdf
- [9] *Viskoelastická*, [online]. [cit. 2012-12-28]. Dostupný z WWW:
<http://www.matmodel.cz/content/files/studijni-podklady/Viskoelasticita.pdf>
- [10] JENČÍK, J., VOLF, J., et al. *Technická měření*. [online] [cit. 2008-11-11].
[http://www.strojar.com/upload/skripta/notime/Technicka_mereni_\(OCR\).pdf](http://www.strojar.com/upload/skripta/notime/Technicka_mereni_(OCR).pdf)
- [11] *Teplota a její měření* [online]. [cit. 2012-12-29]. Dostupný z WWW:
<http://www.tzb-info.cz/3115-teplota-a-jeji-mereni>
- [12] SCHÄTZ, M.; VONDRÁČEK, P. *Zkoušení polymerů*, 2 vyd.; VSCHT: Praha, 1988. 264 s. ISBN není

- [13] SLAVÍK, M. a kol. *Chemie pro fakultu strojní TUL* [online]. 2010 [cit. 2013-03-03]. Dostupný z WWW: <http://www.kch.tul.cz/>
- [14] *Křipové chování plastů*, [online]. [cit. 2013-03-03]. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/projekty/frvs2660/poster2.pdf>
- [15] PERNÍKÁŘ, *Technická měření*. [online] [cit. 2013-03-03]. Dostupný z WWW: <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TechnickaMereni.pdf>
- [16] *Základy statistiky*, [online]. [cit. 2013-03-03]. Dostupný z WWW: <http://www.matweb.cz/zaklady-statistiky#gsc.tab=0>
- [17] *Statistické soubory*, [online]. [cit. 2013-03-03]. Dostupný z WWW: <http://cit.vfu.cz/stat/fvl/teorie/Predn1/soubory.htm>
- [18] *Popisné charakteristiky statistických souborů*, [online]. [cit. 2013-03-03].
Dostupný z WWW:
<http://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn1/strednih.htm#apruer>
- [19] *Popisná statistika*, [online]. [cit. 2013-03-03]. Dostupný z WWW:
<http://athena.zcu.cz/kurzy/spne/000/HTML/34/>
- [20] JESSICA M. *Seeing Through Statistics* 3rd Edition, Thomson Brooks/Cole, 2005, ISBN 0-534-39402-7

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

F _m	Maximální síla.
S ₀	Původní průřez.
S _u	Průřez vzorku v místě lomu.
L ₀	Počáteční měřená délka zkušební tyče.
L _u	Konečná měřená délka zkušební tyče.
T _g	Teplota skelného přechodu.
τ	Smykové napětí.
G	Smykový modul pružnosti.
γ	Smyková deformace.
η	Smyková viskozita.
$\dot{\gamma}$	Rychlost smykové deformace.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Základní dělení polymerů</i>	12
<i>Obr. 2 Nadmolekulární struktura reaktoplastu</i>	13
<i>Obr. 3 Nadmolekulární struktura elastomeru</i>	13
<i>Obr. 4 Lineární struktura [3]</i>	14
<i>Obr. 5 Rozvětvená struktura [3]</i>	14
<i>Obr. 6 Zesíťovaná struktura [3]</i>	15
<i>Obr. 7 Nadmolekulární struktura polymeru a – amorfní molekuly v LDPE, b - částečně krystalické molekuly v HDPE [22]</i>	15
<i>Obr. 8 Rozdělení polymerů dle aplikace a nadmolekulární struktury [5]</i>	16
<i>Obr. 9 Tahová křivka [6]</i>	17
<i>Obr. 10 Tahové křivky různých materiálů</i>	18
<i>Obr. 11 Zkušební těleso</i>	19
<i>Obr. 12 Creepová křivka</i>	20
<i>Obr. 13 Zařízení pro měření creepu za konstantního zatížení</i>	21
<i>Obr. 14 Creepová zkouška v ohybu [23]</i>	22
<i>Obr. 15 Model ideálně elastické látky</i>	23
<i>Obr. 16 Model ideálně viskózní látky</i>	23
<i>Obr. 17 Kelvinův model</i>	24
<i>Obr. 18 Maxwellův model</i>	25
<i>Obr. 19 Příklady dotykových teploměrů</i>	28
<i>Obr. 20 Princip bezdotykového měření teploty objektu prostřednictvím infračerveného záření [11]</i>	29
<i>Obr. 21 Měřicí řetězec [15]</i>	30
<i>Obr. 22 Měřicí zařízení - rozdělení</i>	31
<i>Obr. 23 Chyby měření [15]</i>	33
<i>Obr. 24 Soubory</i>	35
<i>Obr. 25 Boxplot diagram</i>	39
<i>Obr. 26 Bodový graf</i>	40
<i>Obr. 27 Rozměry zkušebního tělesa</i>	42
<i>Obr. 28 ARBURG Allrounder 170 U</i>	42
<i>Obr. 29 Výrobky z polykarbonátu</i>	43
<i>Obr. 30 Výrobky z polyamidu</i>	44

<i>Obr. 31</i> Měřicí zařízení.....	45
<i>Obr. 32</i> Upínací čelisti.....	46
<i>Obr. 33</i> Upnutí úchylkoměru	46
<i>Obr. 34</i> Lineární oblast	47
<i>Obr. 35</i> Boxplot diagram	49
<i>Obr. 36</i> Srovnání arit. průměru s mediánem - PC.....	50
<i>Obr. 37</i> Boxplot diagram	50
<i>Obr. 38</i> Srovnání arit. průměru s mediánem – PA6.6	51
<i>Obr. 39</i> Boxplot diagram	52
<i>Obr. 40</i> Srovnání arit. průměru s mediánem – PC, konstantní teplota	52
<i>Obr. 41</i> Jednotlivá měření při teplotě 100°C	53
<i>Obr. 42</i> Závislost prodloužení na čase – PC	54
<i>Obr. 43</i> Závislost prodloužení na čase bez 120°C – PC.....	54
<i>Obr. 44</i> Hodnoty v čase 8h – PC	55
<i>Obr. 45</i> Hodnoty v čase 16h – PC	55
<i>Obr. 46</i> Hodnoty v čase 24h – PC	56
<i>Obr. 47</i> Jednotlivá měření při teplotě 100°C – PA6.6	57
<i>Obr. 48</i> Závislost prodloužení na čase – PA6.6	58
<i>Obr. 49</i> Hodnoty v čase 8h – PA6.6	58
<i>Obr. 50</i> Hodnoty v čase 16h – PA6.6	59
<i>Obr. 51</i> Hodnoty v čase 24h – PA6.6	60
<i>Obr. 52</i> Jednotlivá měření - 5kg	61
<i>Obr. 53</i> Závislost prodloužení na čase – PC, konst. teplota.....	62
<i>Obr. 54</i> Hodnoty v čase 8h – PC, konst. Teplota.....	62
<i>Obr. 55</i> Hodnoty v čase 16h	63
<i>Obr. 56</i> Hodnoty v čase 24h – PC, kons. teplota.....	64

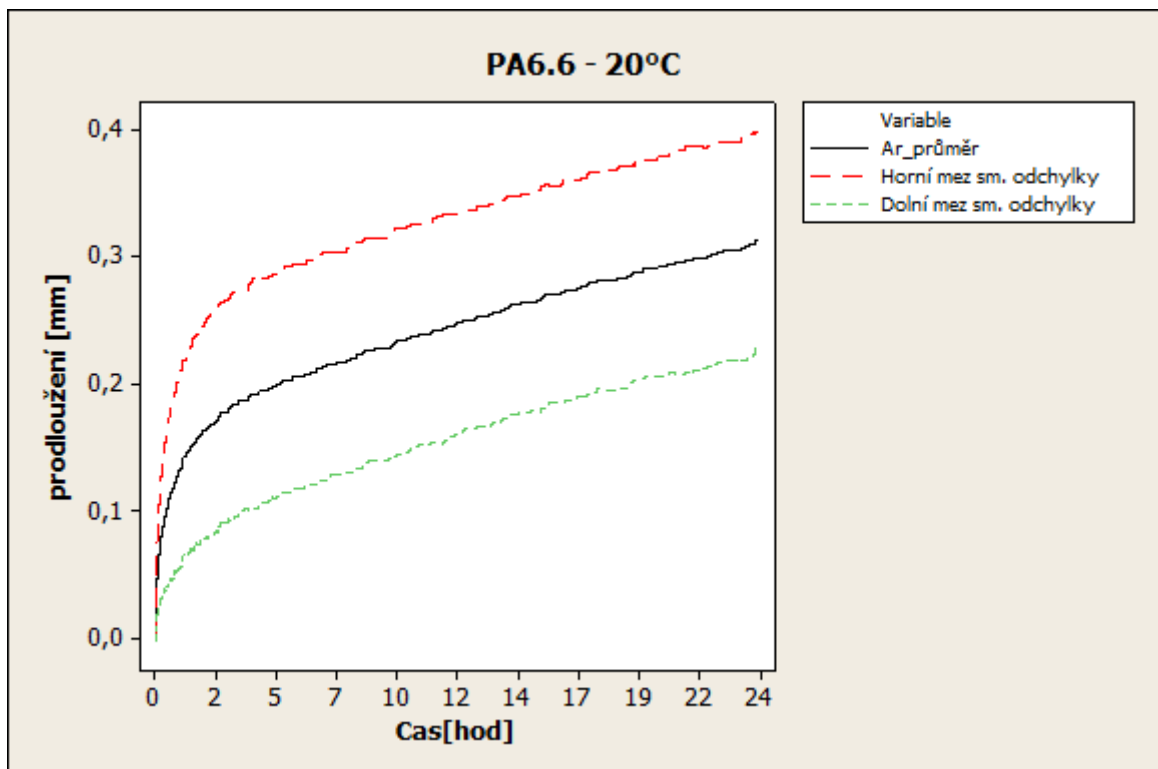
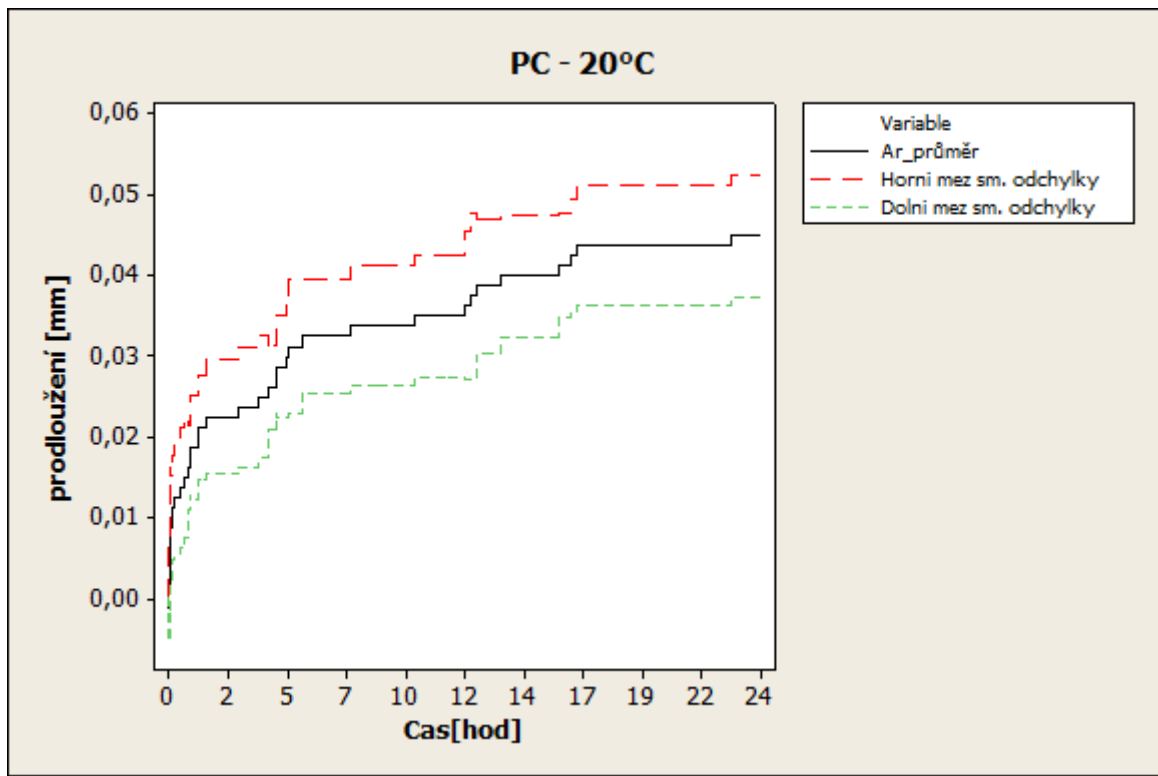
SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Teploty skelného přechodu</i>	26
<i>Tab. 2 Parametry vstřikovacího stroje</i>	43
<i>Tab. 3 Nastavené parametry pro PC</i>	44
<i>Tab. 4 Nastavené parametry pro PA 6.6</i>	45
<i>Tab. 5 Specifikace digitálního úchylkoměru</i>	46
<i>Tab. 6 Zvolené zatížení pro sérii zkoušek za konstantního zatížení</i>	47
<i>Tab. 7 Zvolené zatížení pro sérii zkoušek za konstantní teploty</i>	47
<i>Tab. 8 Podmínky při zkoušce za konstantního zatížení</i>	48
<i>Tab. 9 Podmínky při zkoušce za konstantní teploty</i>	48
<i>Tab. 10 Hodnoty maximálních a minimálních hodnot deformace</i>	53
<i>Tab. 11 Hodnoty poměrného prodloužení v čase 8 a 16 hodin - PC</i>	56
<i>Tab. 12 Maximální deformace - PC</i>	57
<i>Tab. 13 Hodnoty maximálních a minimálních hodnot deformace</i>	57
<i>Tab. 14 Hodnoty poměrného prodloužení v čase 8 a 16 hodin – PA6.6</i>	59
<i>Tab. 15 Maximální deformace PA6.6</i>	60
<i>Tab. 16 Hodnoty maximálních a minimálních hodnot deformace</i>	61
<i>Tab. 17 Hodnoty poměrného prodloužení v čase 8 a 16 hodin</i>	63
<i>Tab. 18 Maximální deformace PC, konst. teplota</i>	64

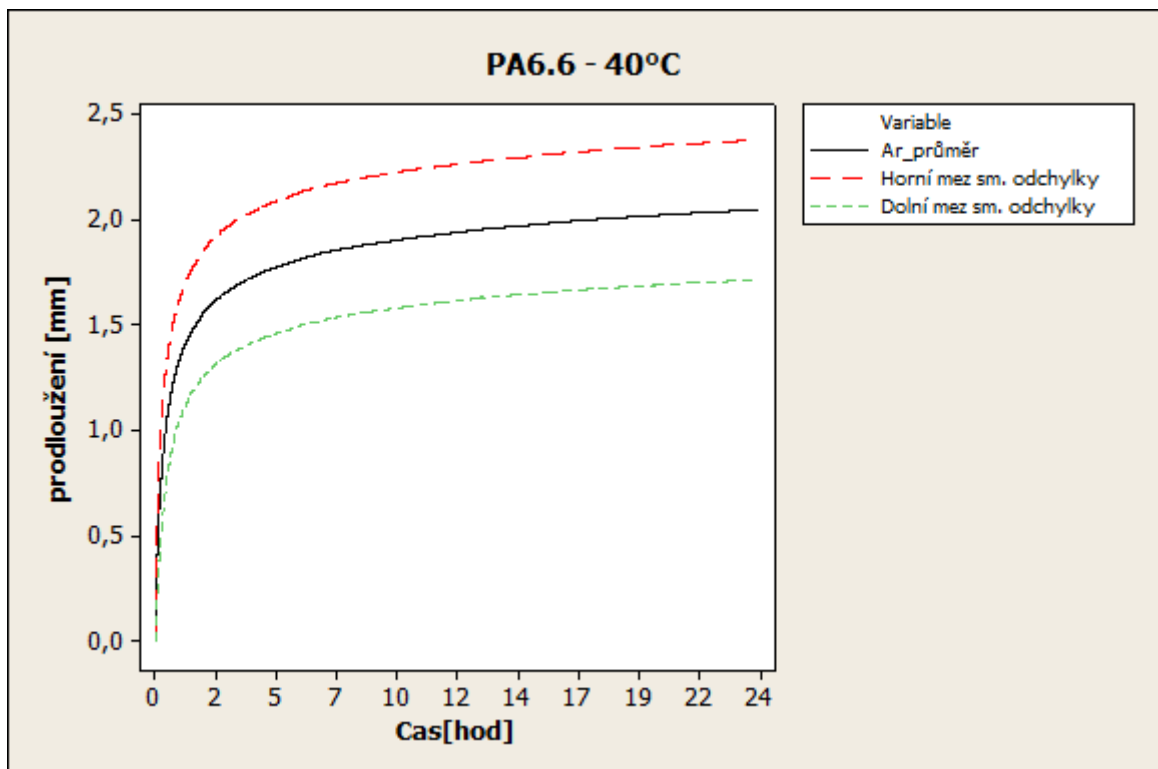
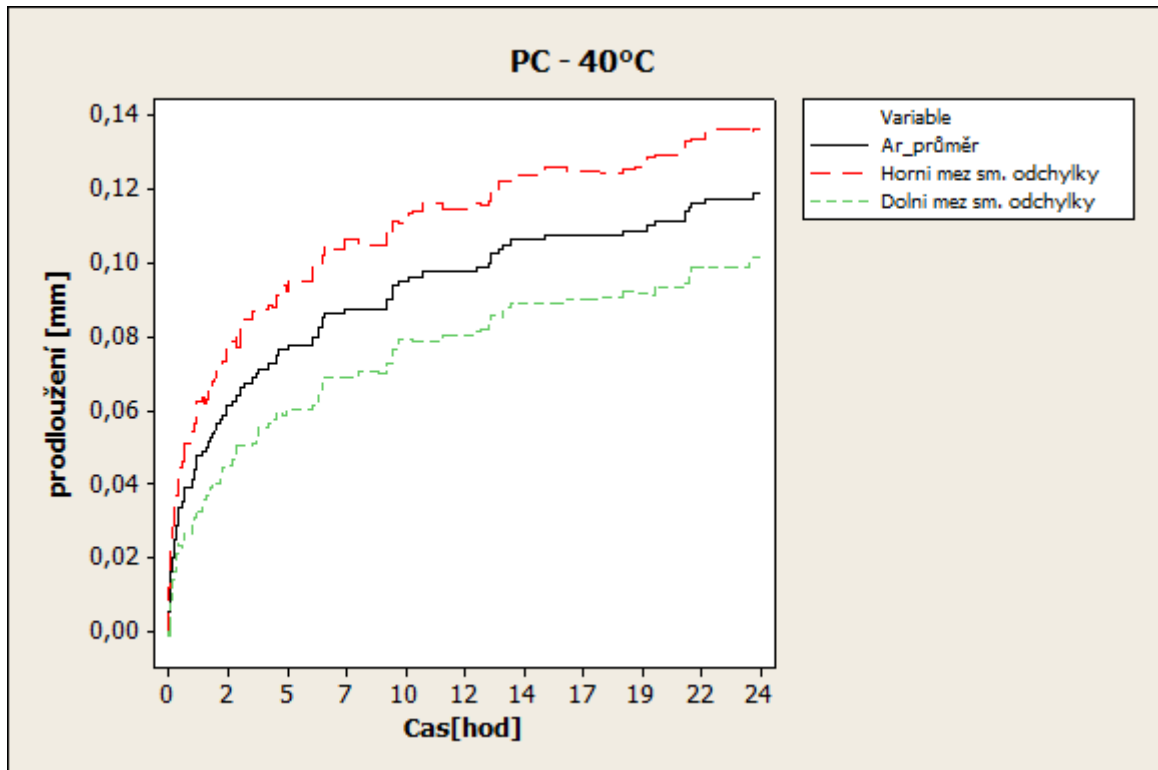
SEZNAM PŘÍLOH

- P I ZOBRAZENÍ ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU PŘI TEPLOTĚ
20°C**
- P II ZOBRAZENÍ ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU PŘI TEPLOTĚ
40°C**
- P III ZOBRAZENÍ ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU PŘI TEPLOTĚ
60°C**
- P IV ZOBRAZENÍ ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU PŘI TEPLOTĚ
80°C**
- P V ZOBRAZENÍ ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU PŘI TEPLOTĚ
100°C**
- P VI ZOBRAZENÍ ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU PŘI TEPLOTĚ
120°C**
- P VII ZOBRAZENÍ ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU PŘI ZKOUŠCE
ZA KONSTANTNÍ TEPLoty**
- P VIII ZOBRAZENÍ ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU PŘI ZKOUŠCE
ZA KONSTANTNÍ TEPLoty**
- P IX CD S DATY**

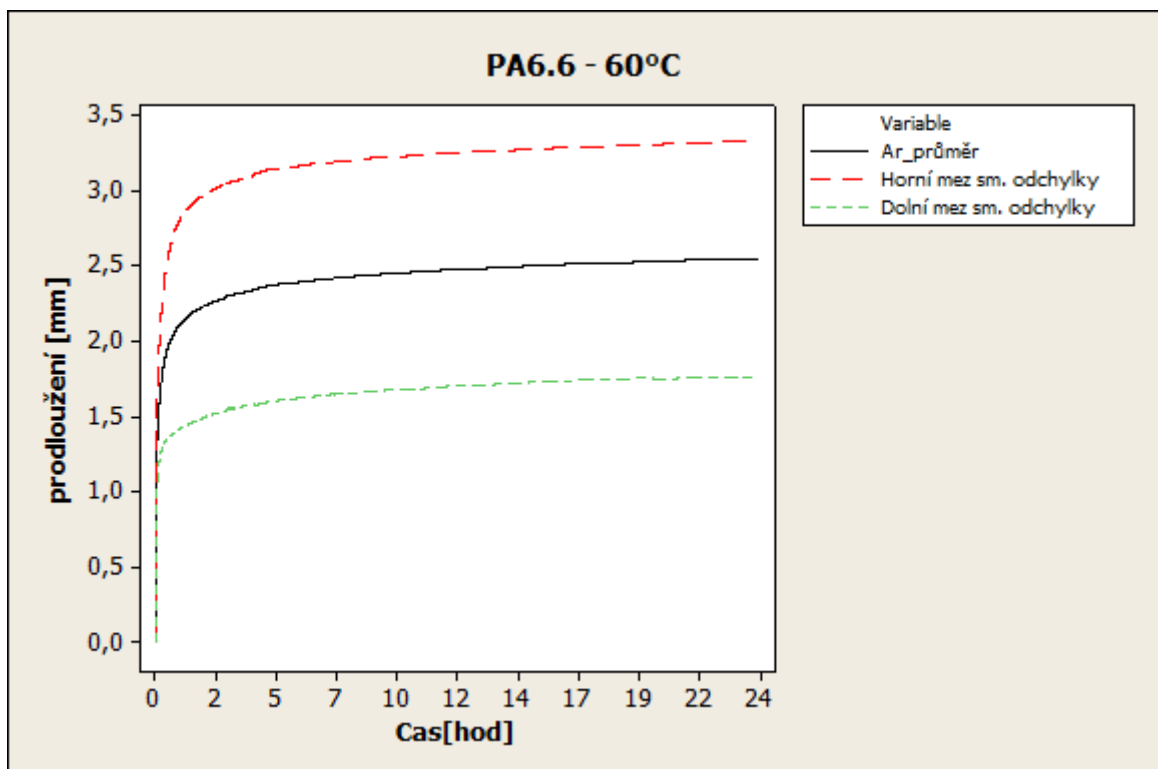
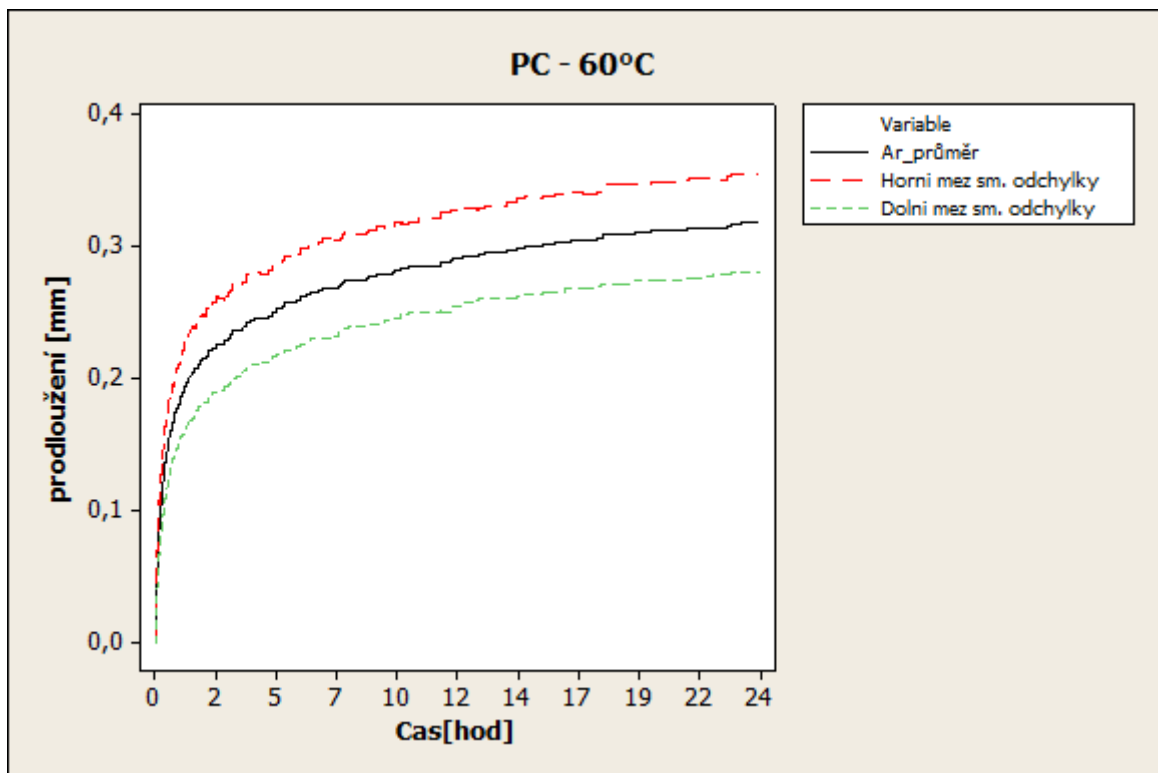
PŘÍLOHVA P I: ZOBRAZENÍ ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU PŘI TEPLOTĚ 20°C



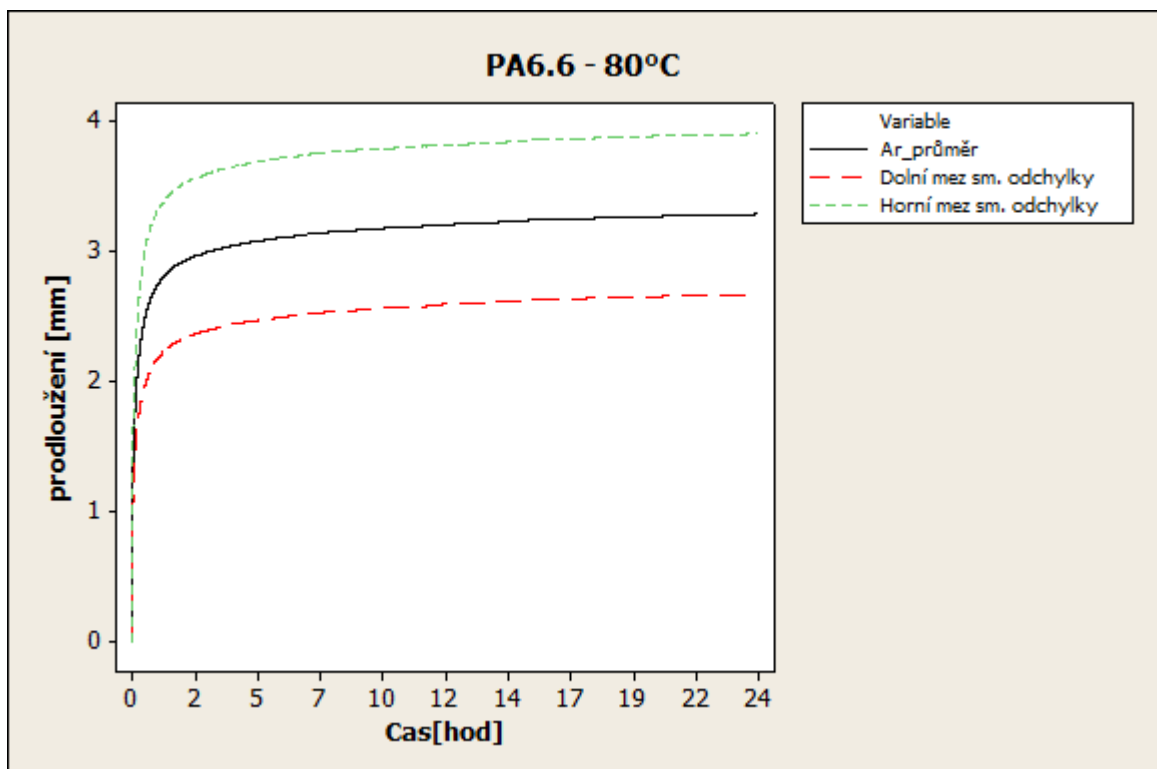
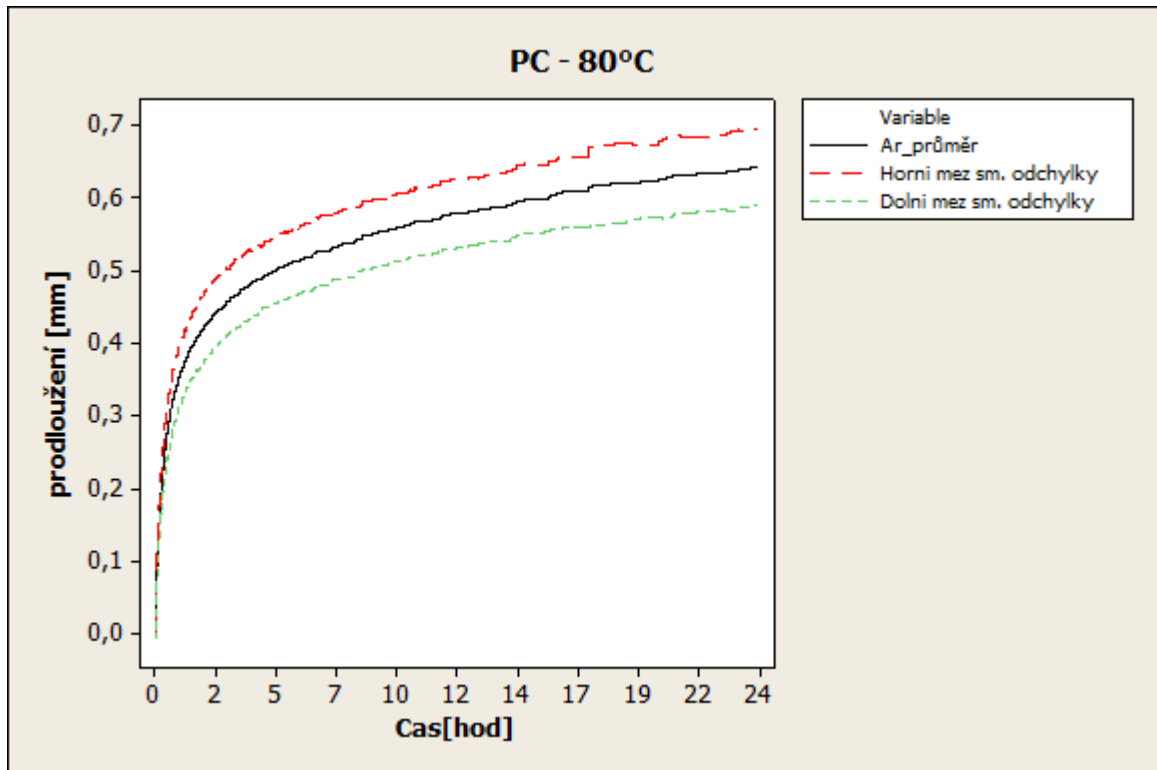
PŘÍLOHA P II: ZOBRAZENÍ ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU PŘI TEPLOTĚ 40°C



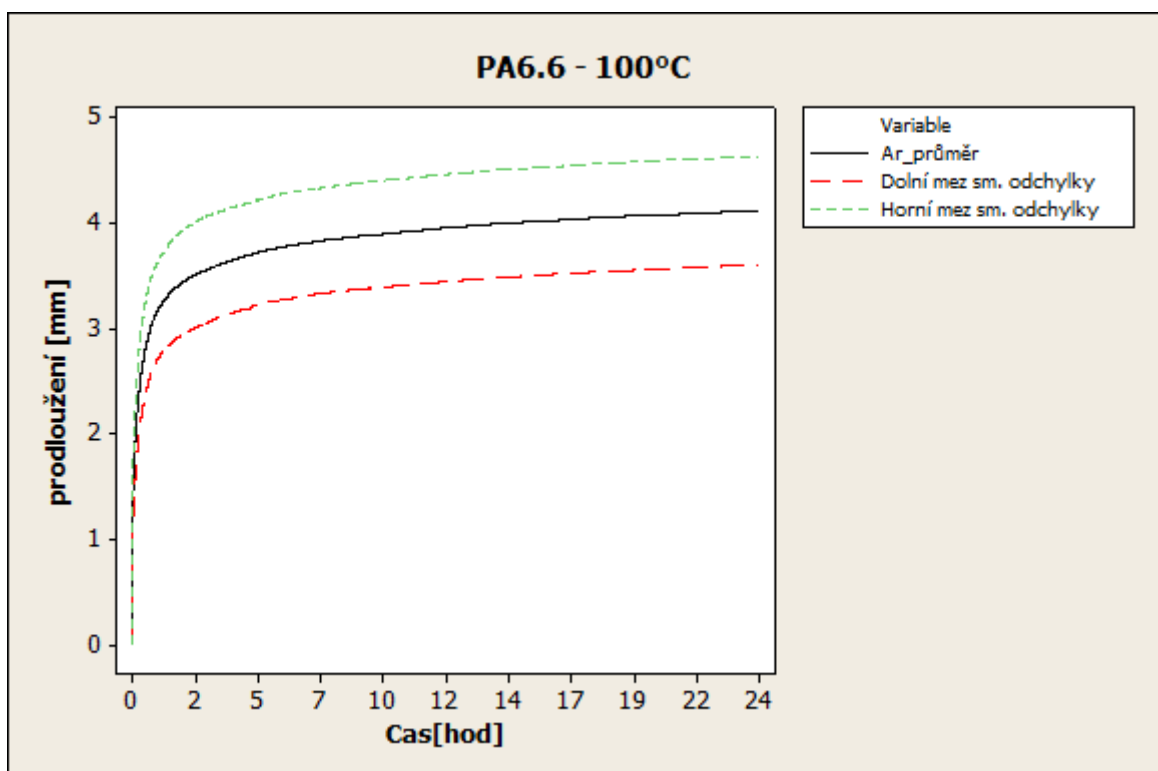
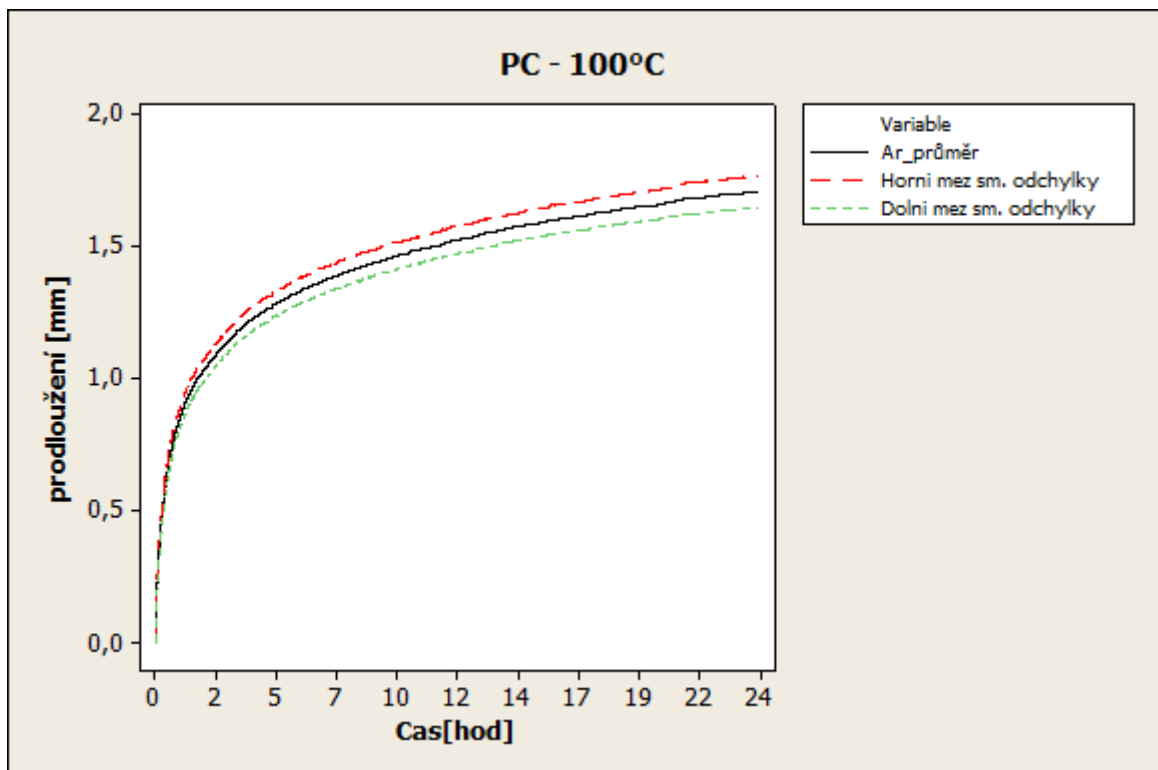
PŘÍLOHA PIII: ZOBRAZENÍ ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU PŘI TEPLOTĚ 60°C



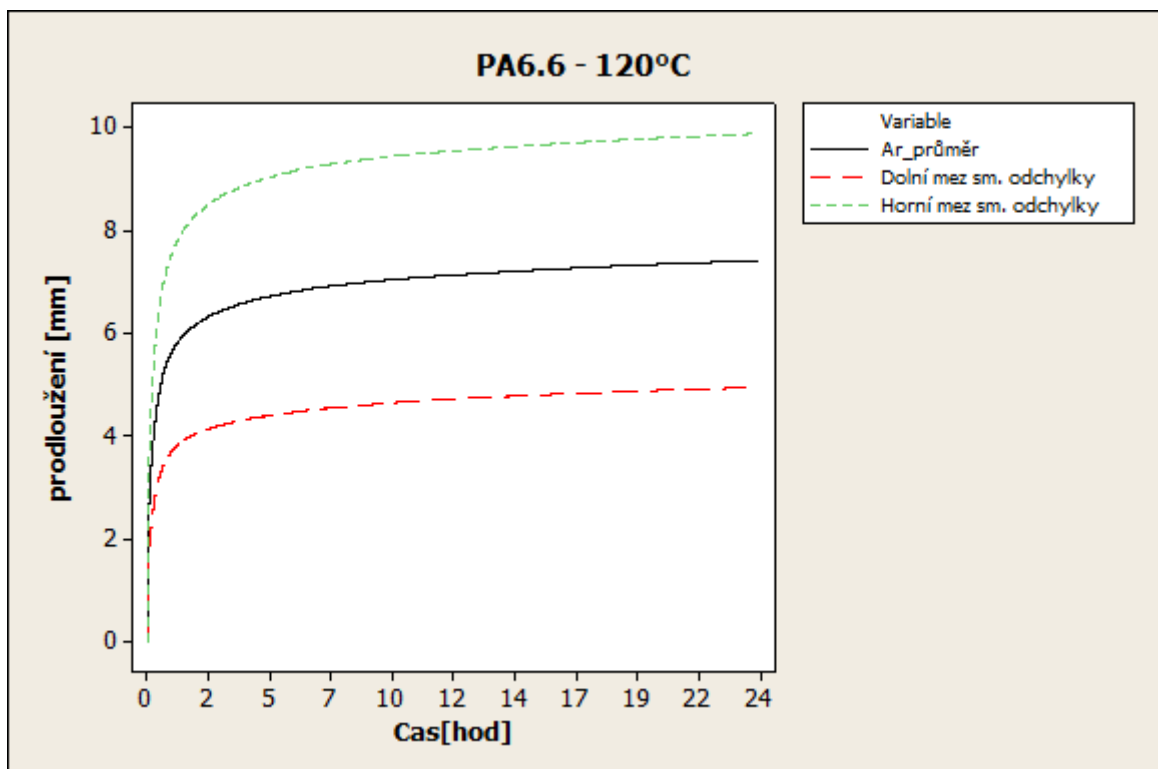
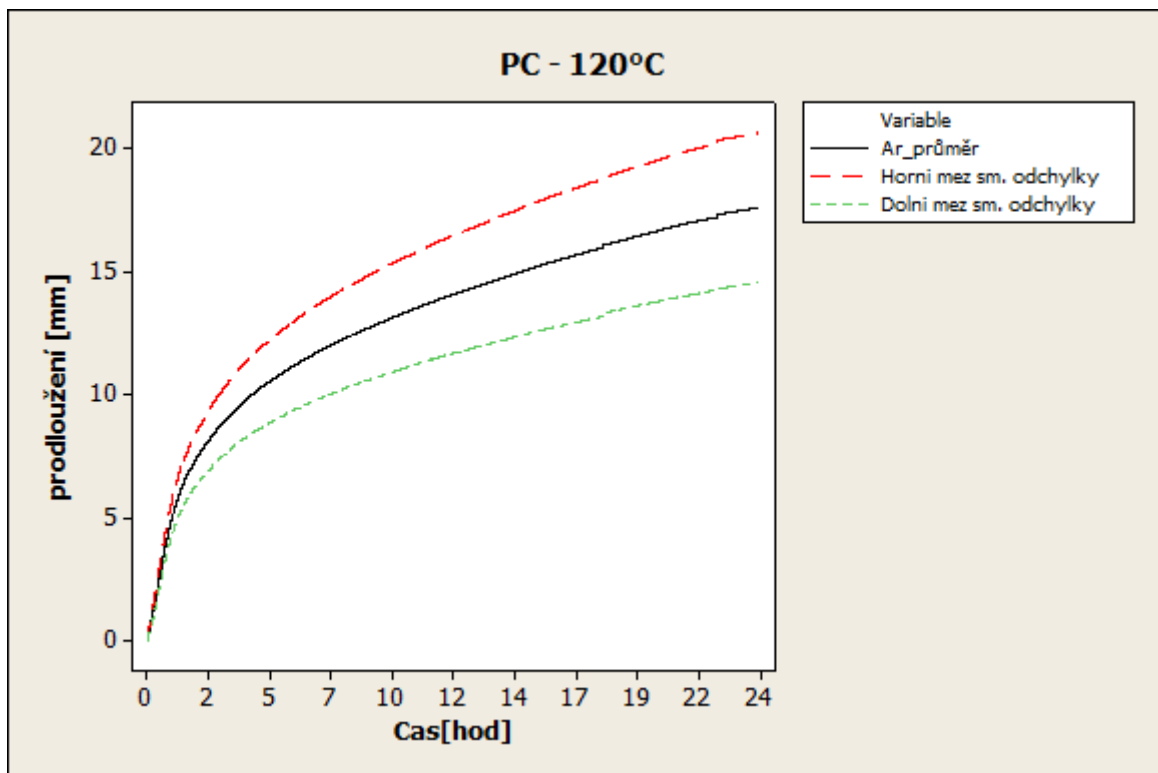
PŘÍLOHA PIV: ZOBRAZENÍ ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU PŘI TEPLOTĚ 80°C



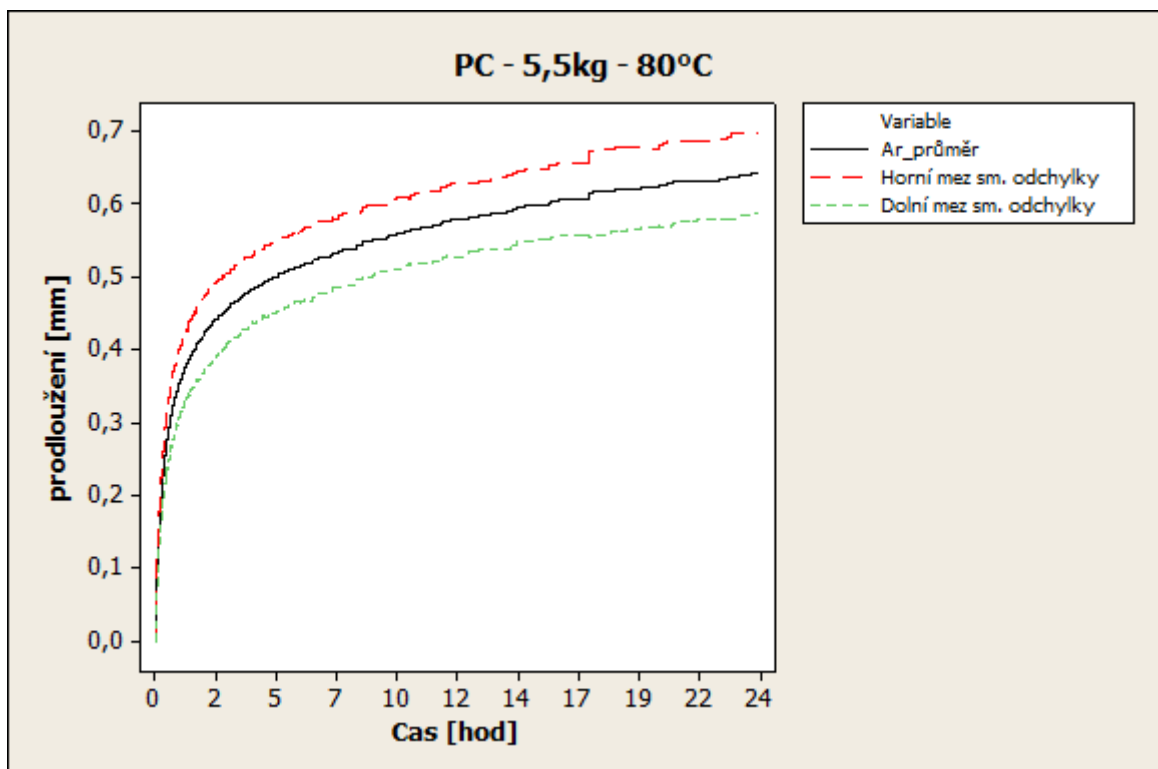
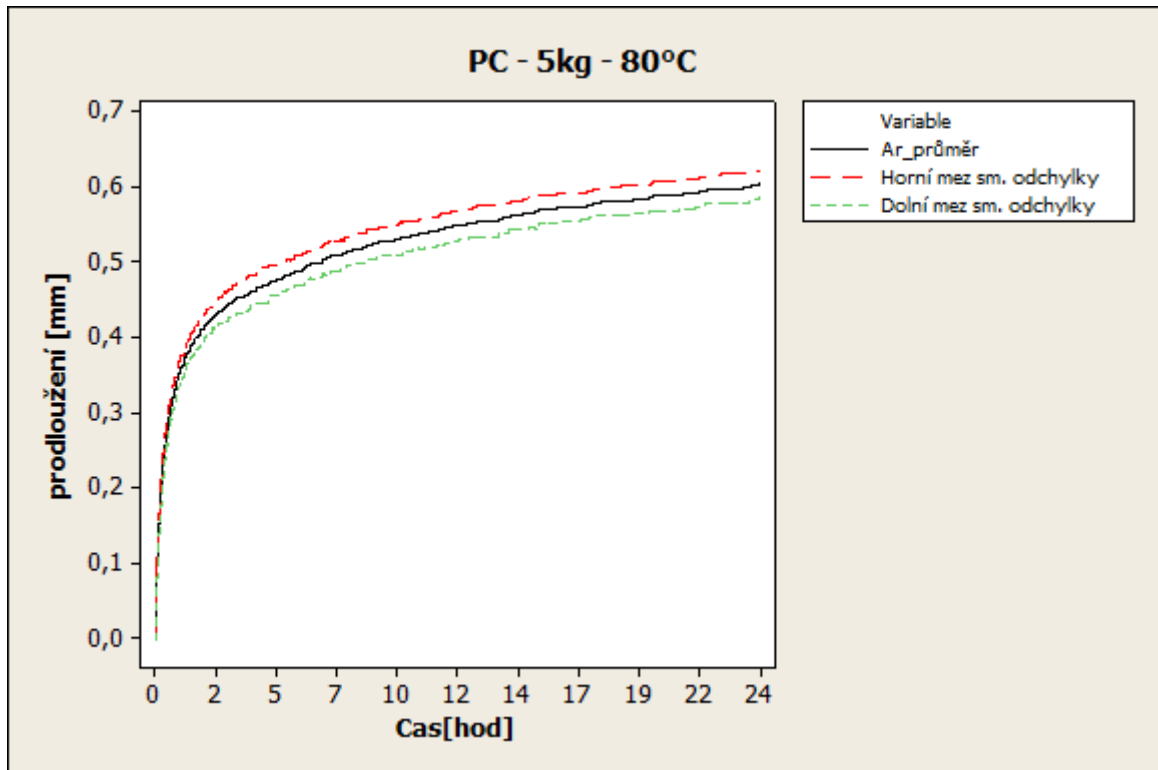
PŘÍLOHA PV: ZOBRAZENÍ ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU PŘI TEPLOTĚ 100°C



PŘÍLOHA PVI: ZOBRAZENÍ ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU PŘI TEPLOTĚ 120°C



PŘÍLOHA PVII: ZOBRAZENÍ ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU PŘI ZKOUŠCE ZA KONSTANTNÍ TEPLoty



PŘÍLOHA PVIII: ZOBRAZENÍ ARITMETICKÉHO PRŮMĚRU PŘI ZKOUŠCE ZA KONSTANTNÍ TEPLoty

