

# Vliv klimatických podmínek na vlastnosti vybraných polymerů

Bc. Oldřich Černoch

---

Diplomová práce  
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2017/2018

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Oldřich Černoch**  
Osobní číslo: **T16209**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Řízení jakosti**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv klimatických podmínek na vlastnosti vybraných typů polymerů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární rešerše na danou problematiku.**
- 2. Výroba a příprava zkušebních těles.**
- 3. Provedení experimentů.**
- 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:

**Ing. Martin Bednařík, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**2. ledna 2018**

Termín odevzdání diplomové práce:

**18. května 2018**

Ve Zlíně dne 2. února 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.

*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

*ředitel ústavu*

## 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, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 11.05.2018



<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 nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

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

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

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



<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 užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Práce popisuje fyzikální změny polymerů HIPS Edistir SR 550 a ABS Starex HF-0660I vystavených 7, 14, 21 a 28 dní teplotě  $(80 \pm 0,3)$  °C spolu s relativní vlhkostí  $(60 \pm 3)$  % a teplotě  $(-20 \pm 0,3)$  °C. Byla provedena tahová zkouška, rázová zkouška v tahu, rázová a vrubová houževnatost Charpy, byla změřena tvrdost Shore D a mikrotvrdost, barevnost, teplota skelného přechodu a změny chemické struktury pomocí FTIR spektroskopie.

Klíčová slova: polymer, ABS, HIPS, stárnutí, klimatické podmínky, oxidace, houževnatost, tahová zkouška, tvrdost, mikrotvrdost, kolorimetrie, DSC, FTIR

## **ABSTRACT**

This thesis examines physical changes of HIPS Edistir SR 550 and ABS Starex HF-0660I polymers exposed to temperature  $(80 \pm 0,3)$  °C and  $(60 \pm 3)$  % of relative humidity and to temperature  $(-20 \pm 0,3)$  °C for 7, 14, 21 and 28 days. The changes were described by tensile tests, tensile-impact strength test, impact and notched impact Charpy tests, Shore D hardness test, microhardness test, colorimetry, DSC and FTIR spectroscopy.

Keywords: polymer, ABS, HIPS, aging, climatic conditions, oxidation, toughness, tensile test, hardness, microhardness, colorimetry, DSC, FTIR

Tímto děkuji vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Martinu Bednaříkovi, Ph.D. za jeho vedení, čas, úsilí a odborné rady, které mi v průběhu tvorby této práce věnoval.

Děkuji regionálnímu výzkumnému centru CEBIA-Tech za spolupráci, technickou podporu a zapůjčení přístrojového vybavení pro provedení klimatického stárnutí a mechanických zkoušek materiálů.

Děkuji panu Ing. Aleši Mizerovi, Ph.D. za odborné rady, osobní přístup, čas a úsilí mi věnované při tvorbě této práce.

Děkuji Ing. Aleně Kalendové, Ph.D. za pomoc při provedení testů zkoumaných materiálů na FTIR spektroskopu a DSC přístroji.

Děkuji doc. Ing. Martině Hřibové, Ph.D. za odborné rady a náměty týkající se této práce.

Děkuji panu Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za provedení testů mikrotvrlosti zkoumaných materiálů.

V neposlední řadě děkuji také své rodině a známým, kteří mi poskytovali materiální a psychickou podporu během let mého studia.

Motto:

„Snažte se dělat věci nejlépe na světě a svět si vyšlape cestičku k vašim dveřím.“

Tomáš Baťa (1876 – 1932)

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

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>12</b>
<b>1 CHARAKTERISTIKA POLYMERŮ.....</b>	<b>13</b>
1.1 STRUKTURA POLYMERŮ .....	13
1.2 FÁZOVÝ STAV.....	13
1.3 MOLÁRNÍ HMOTNOST .....	14
1.4 TEPLOTA SKELNÉHO PŘECHODU .....	15
<b>2 STYRENOVÉ POLYMERY .....</b>	<b>16</b>
2.1 MODIFIKOVANÉ STYRENOVÉ POLYMERY.....	16
2.2 MECHANIKA HOUŽEVNATÝCH POLYSTYRENŮ .....	17
2.3 HOUŽEVNATÝ POLYSTYREN (HIPS) .....	18
2.4 AKRYLONITRILBUTADIENSTYREN (ABS).....	19
<b>3 KLIMATICKÉ STÁRNUTÍ A ODOLNOST POLYMERŮ.....</b>	<b>20</b>
3.1 ODOLNOST VŮČI POVĚTRNOSTI .....	20
3.1.1 Přirozené povětrnostní stárnutí .....	21
3.1.2 Urychlené povětrnostní stárnutí .....	22
3.2 ODOLNOST VŮČI KYSLÍKU .....	22
3.3 ODOLNOST VŮČI TEPLOTĚ .....	24
3.3.1 Teplotní stárnutí .....	24
3.3.2 Teplotní odolnost .....	25
3.3.3 Zkoušky teplotní odolnosti.....	26
3.3.4 Termodegradace .....	26
3.4 TERMOOXIDACE .....	26
3.4.1 Termické stárnutí polystyrenových kopolymerů .....	28
3.5 VLIV VLNKOSTI .....	30
3.6 VLIV KOMBINACE KYSLÍKU A VLNKOSTI .....	31
<b>4 DEGRADACE POLYMERŮ.....</b>	<b>32</b>
4.1 MECHANISMUS DEGRADACE .....	32
4.2 ZMĚNY NA MOLEKULÁRNÍ ÚROVNI.....	33
4.2.1 Oxidace .....	33
4.2.2 Hydrolýza.....	33
4.2.3 Změna molekulové hmotnosti.....	33
4.3 ZMĚNY NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURY .....	33
4.3.1 Sekundární krystalizace .....	33
4.3.2 Relaxace vnitřního pnutí .....	34
4.4 ZMĚNY MAKROSKOPICKÉ .....	34
4.4.1 Změna barvy a lesku .....	34
4.4.2 Žloutnutí.....	35

4.4.3	Vznik trhlin .....	35
<b>5</b>	<b>MECHANICKÉ ZKOUŠKY POLYMERŮ .....</b>	<b>36</b>
5.1	ZKUŠEBNÍ TĚLESA .....	36
5.1.1	Tvar zkušebních těles .....	37
5.1.2	Příprava zkušebních těles .....	37
5.1.3	Kondicionace zkušebních těles .....	37
5.2	TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	38
5.2.1	Průběh zkoušky .....	38
5.2.2	Tahová křivka.....	39
5.3	RÁZOVÉ ZKOUŠKY DYNAMICKÉ .....	41
5.4	RÁZOVÁ A VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY .....	42
5.5	TAHOVÁ ZKOUŠKA RÁZEM .....	43
5.6	ZKOUŠKA TVRDOSTI.....	44
5.6.1	Princip měření tvrdosti .....	44
5.6.2	Tvrdost Shore D .....	44
5.6.3	Mikrotvrdost.....	45
<b>6</b>	<b>METODY ANALÝZY POLYMERŮ .....</b>	<b>47</b>
6.1	INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE .....	47
6.2	DIFERENČNÍ SKENOVACÍ KALORIMETRIE.....	48
6.3	KOLORIMETRIE.....	50
6.3.1	Princip metody .....	50
6.3.2	Popis barevnosti, barevný prostor .....	51
6.3.3	Geometrie měření .....	52
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>CÍL PRÁCE .....</b>	<b>54</b>
<b>8</b>	<b>POUŽITÉ MATERIÁLY .....</b>	<b>55</b>
8.1	HOUŽEVNATÝ POLYSTYREN .....	55
8.2	AKRYLONITRILBUTADIENSTYREN .....	55
<b>9</b>	<b>PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....</b>	<b>56</b>
<b>10</b>	<b>TEPLOTNÍ STÁRNUTÍ MATERIÁLŮ.....</b>	<b>57</b>
<b>11</b>	<b>POPIS ZKOUŠEK .....</b>	<b>58</b>
11.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	58
11.2	RÁZOVÁ ZKOUŠKA V TAHU .....	58
11.2.1	Postup měření.....	58
11.3	MĚŘENÍ RÁZOVÉ A VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI.....	59
11.3.1	Postup měření.....	59
11.4	MĚŘENÍ TVRDOSTI.....	59
11.4.1	Postup měření.....	60
11.5	MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI .....	60
11.5.1	Postup měření.....	60



11.6	MĚŘENÍ BAREVNOSTI .....	61
11.6.1	Postup měření .....	61
11.7	MĚŘENÍ TEPLoty SKELNÉHO PŘECHODU .....	61
11.7.1	Postup měření .....	62
11.8	FTIR SPEKTROSKOPIE .....	63
11.8.1	Postup měření .....	63
<b>12</b>	<b>STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ DAT.....</b>	<b>64</b>
12.1	KVARTILY .....	64
12.2	BOXPLOTOVÝ GRAF.....	64
12.3	TESTOVÁNÍ HYPOTÉZ .....	65
12.3.1	Princip testování hypotéz .....	65
12.3.2	Kruskal-Wallisův test.....	65
<b>13</b>	<b>VÝSLEDKY ZKOUŠEK MATERIÁLU HIPS.....</b>	<b>67</b>
13.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	67
13.1.1	Modul pružnosti v tahu .....	67
13.1.2	Rychlost deformace 50 mm.min <sup>-1</sup> – napětí na mezi pevnosti .....	68
13.1.3	Rychlost deformace 50 mm.min <sup>-1</sup> – tažnost.....	69
13.1.4	Rychlost deformace 200 mm.min <sup>-1</sup> – napětí na mezi pevnosti .....	70
13.1.5	Rychlost deformace 200 mm.min <sup>-1</sup> – tažnost.....	71
13.1.6	Rychlost deformace 600 mm.min <sup>-1</sup> – napětí na mezi pevnosti .....	73
13.1.7	Rychlost deformace 600 mm.min <sup>-1</sup> – tažnost.....	74
13.1.8	Vzájemné srovnání .....	75
13.1.9	Fotografie .....	76
13.2	RÁZOVÁ ZKOUŠKA V TAHU .....	77
13.2.1	Nominální energie rázu 15 J .....	77
13.2.2	Nominální energie rázu 25 J .....	78
13.2.3	Nominální energie rázu 50 J .....	79
13.2.4	Vzájemné srovnání .....	80
13.2.5	Fotografie .....	81
13.3	RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY.....	81
13.4	VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY .....	83
13.5	VRUBOVÉ ČÍSLO .....	85
13.6	TVRDOST.....	86
13.7	MIKROTVRDOST .....	87
13.8	BAREVNOST .....	88
13.8.1	HIPS HOT .....	89
13.8.2	HIPS COLD .....	90
13.9	DSC – HIPS HOT .....	91
13.10	DSC – HIPS COLD .....	92
13.11	FTIR SPEKTROSKOPIE – HIPS HOT .....	93
13.12	FTIR SPEKTROSKOPIE – HIPS COLD .....	95

<b>14</b>	<b>VÝSLEDKY MATERIÁLU ABS</b> .....	<b>97</b>
14.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	97
14.1.1	Modul pružnosti v tahu .....	97
14.1.2	Rychlost deformace 50 mm.min <sup>-1</sup> – napětí na mezi pevnosti .....	98
14.1.3	Rychlost deformace 50 mm.min <sup>-1</sup> – tažnost.....	99
14.1.4	Rychlost deformace 200 mm.min <sup>-1</sup> – napětí na mezi pevnosti .....	100
14.1.5	Rychlost deformace 200 mm.min <sup>-1</sup> – tažnost.....	101
14.1.6	Rychlost deformace 600 mm.min <sup>-1</sup> – napětí na mezi pevnosti .....	103
14.1.7	Rychlost deformace 600 mm.min <sup>-1</sup> – tažnost.....	104
14.1.8	Vzájemné srovnání .....	105
14.1.9	Fotografie .....	106
14.2	RÁZOVÁ ZKOUŠKA V TAHU .....	107
14.2.1	Nominální energie rázu 15 J .....	107
14.2.2	Nominální energie rázu 25 J .....	108
14.2.3	Nominální energie rázu 50 J .....	109
14.2.4	Vzájemné srovnání.....	110
14.2.5	Fotografie .....	111
14.3	RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY .....	111
14.4	VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY .....	113
14.5	VRUBOVÉ ČÍSLO .....	114
14.6	TVRDOST.....	116
14.7	MIKROTVRDOST .....	117
14.8	BAREVNOST .....	118
14.8.1	ABS HOT .....	119
14.8.2	ABS COLD .....	120
14.9	DSC – ABS HOT .....	121
14.10	DSC – ABS COLD .....	122
14.11	FTIR SPEKTROSKOPIE – ABS HOT .....	123
14.12	FTIR SPEKTROSKOPIE – ABS COLD .....	125
	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>127</b>
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>133</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>134</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>138</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>141</b>
	<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>145</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>148</b>

## ÚVOD

Polymery HIPS a ABS jsou dvousložkové polymerní směsi sestávající ze sklovité matrice a elastomerních globulárních částic polybutadienu naroubovaných k řetězcům matrice.

Tyto modifikované styrenové plasty nalézají široké využití v mnoha odvětvích průmyslu jako konstrukční plasty. Výhodně spojují houževnatost elastomerů s tuhostí a odolností termoplastů. Aplikace nalézají v průmyslových odvětvích pro výrobu krytů, nádob, dílů chladniček a jiných domácích spotřebičů, armatur, nenáročných dílů ve strojírenství, dílů v automobilovém průmyslu aj. Tyto aplikace často zatěžují použité polymery výrazně zvýšenými či sníženými teplotami. Dlouhodobé vystavení polymerů nestandardním teplotním podmínkám způsobuje nevratnou změnu řady makroskopických vlastností zapříčiněnou vnitřními chemickými pochody. Změny způsobené teplotním stárnutím jsou často nežádoucí a omezují či vylučují daný polymer k určité aplikaci za nestandardních teplotních podmínek.

Polymery HIPS a ABS vynikají chemickou odolností, dobrými mechanickými vlastnostmi i odolností proti přirozenému stárnutí. Jsou však náchylné ke klimatickému stárnutí, zvláště k fotodegradaci a oxidaci. Teplotní stárnutí HIPS a ABS je doprovázeno výrazným úbytkem houževnatosti a žloutnutím polymeru, což by z pohledu praktického využití mohlo být nežádoucí.

Tato práce zkoumá tepelné stárnutí polymerů HIPS a ABS analýzou fyzikálních změn po 7, 14, 21 a 28 dnech působení konstantních klimatických podmínek. Vedle mechanických zkoušek tahových, rázových, zkoušek tvrdosti a mikrotvrdosti byly vzorky podrobeny měření změny barevnosti pro objektivní hodnocení průběhu žloutnutí, metodou DSC byla změřena změna skelného přechodu indikující strukturní změny a pomocí FTIR spektroskopie byly zjištěny změny chemické struktury.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 CHARAKTERISTIKA POLYMERŮ

Polymery sestávají z makromolekul s vysokou relativní molekulovou hmotností (desítky tisíc až miliony), tj. o několik řádů vyšší než u nízkomolekulárních látek.

## 1.1 Struktura polymerů

Makromolekuly vznikají spojováním molekul nízkomolekulárních látek – monomerů – chemickými vazbami. Mohou vzniknout buďto z cyklických molekul monomeru či z molekul obsahujících alespoň jednu dvojnou vazbu. Z molekuly monomeru zabudováním do makromolekuly vznikne základní stavební jednotka polymeru – mer. [1]

Dle počtu druhů merů v makromolekule se polymery rozdělují na homopolymery (jeden druh meru), kopolymery (dva druhy merů) a terpolymery (tři druhy merů). Kopolymery dále dělíme na statistické, kdy se v řetězci nahodile střídají mery, blokové, jejichž řetězce jsou tvořeny dvěma nebo více bloky merů jednoho druhu a roubované, které mají na základním řetězci z merů jednoho druhu „naroubované“ postranní řetězce merů jiného druhu. Vlastnosti roubovaných a blokových kopolymerů se liší od kopolymerů statistických i přes fakt, že jsou stejného poměrného složení dvou druhů merů. [1]

KOPOLYMER STATISTICKÝ	-A-B-A-B-B-B-A-B-B-A-A-B-A-B-B-A-A-A-A-B-																																			
KOPOLYMER ALTERNUJÍCÍ	-A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-																																			
KOPOLYMER BLOKOVÝ	-A-A-A-B-B-B-A-A-A-B-B-B-A-A-A-B-B-B-A-A-																																			
KOPOLYMER ROUBOVANÝ	-A-A-A-Y-A-A-A-Y-A-A-A-Y-A-A-A-Y-A-A-A-Y-																																			
	<table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;"> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">B</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;"> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">B</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;"> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">B</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;"> </td> </tr> </tbody> </table>						B	B	B	B	B						B	B	B	B	B						B	B	B	B	B					
B	B	B	B	B																																
B	B	B	B	B																																
B	B	B	B	B																																

Obr. 1. Druhy kopolymerů. Písmena A a B znázorňují dvojfunkční mery, Y trojfunkční jednotky – místa větvení u roubovaných a zesíťovaných polymerů.

## 1.2 Fázový stav

Dle pravidelnosti geometrického uspořádání řetězců v tuhé fázi rozlišujeme uspořádaný stav semikrystalický a neuspořádaný stav amorfni.



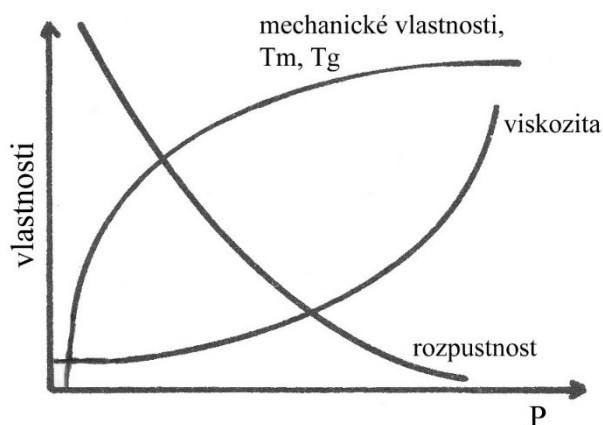
Polymery se mohou vyskytovat ve čtyřech fázových stavech:

- semikrystalickém
- amorfním
  - o sklovitém – nedeformovatelný, prakticky bez toku materiálu;
  - o kaučukovitém – vratný tok řetězců, schopnost velké deformace malou silou;
  - o plastickém – dochází k nevratnému toku řetězců.

O fázovém stavu polymeru za běžných podmínek rozhoduje jeho chemické složení a molekulová hmotnost látky. Z hlediska chování za různých teplot lze amorfní polymer charakterizovat teplotou zesklnění  $T_g$  a krystalický teplotou tání  $T_m$ . [1]

### 1.3 Molární hmotnost

Vlastnosti lineárních a rozvětvených polymerů jsou významně závislé na jejich molekulové hmotnosti. Má-li makromolekulární látka vykazovat určitou mechanickou vlastnost, musí mít minimální polymerační stupeň  $P$ , tj. počet merů v molekule, v rozmezí od 40 do 80. Po překročení této hodnoty, nabývá polymer teprve pro praxi významných hodnot mechanické pevnosti, která se s rostoucím polymeračním stupněm zvyšuje. Naproti tomu tokové vlastnosti se s rostoucím  $P$  prudce zhoršují. Proto mají v praxi používané polymery určitou hodnotu  $P$ , která představuje kompromis mezi dobrými mechanickými vlastnostmi a snadnou zpracovatelností. [2]



Obr. 2. Závislost některých vlastností polymerů na polymeračním stupni  $P$ . [2]

## 1.4 Teplota skelného přechodu

Teplota skelného přechodu  $T_g$  se makroskopicky projevuje výraznými změnami fyzikálních vlastností, jako je změna viskozity či změna modulu pružnosti. Pod teplotou skelného přechodu je polymer tvrdý, křehký a má vysoký modul pružnosti. Nad  $T_g$  polymer nabývá kaučukovitou pružnost, kdy modul  $E$  poklesne zhruba o tři řády. Materiál se stává viskoelastický v důsledku zvýšení pohyblivosti segmentů makromolekul. Kromě toho nastává změna optických a tepelných vlastností.

$T_g$  souvisí se změnou segmentové pohyblivosti řetězců a je přímo úměrná mezimolekulárním silám. Čím silněji jsou řetězce vzájemně vázány mezimolekulárními silami, tím menší je segmentová pohyblivost a tím vyšší je  $T_g$ . [2]

Teplota skelného přechodu roste se zvyšujícím se polymeračním stupněm a snižuje se za přítomnosti nízkomolekulárních sloučenin (změkčovadla, vlhkost, zbytky monomeru) v důsledku snížené interakce mezi makromolekulami.

Pod  $T_g$  ustává pohyb větších molekulárních řetězců, vyskytují se ale i místně omezené pohyby jako částečné rotace a pohyby malých molekulárních úseků a skupin. Tato pohyblivost vysvětluje, že řada amorfních polymerů má i pod  $T_g$  určitou houževnatost a schopnost deformace. [2]

*Tab. 1. Teplota skelného přechodu v závislosti na podílu styrenu v kopolymeru styren-butadien. [3]*

$w_s$ [%]	0	30	50	60	70	80	90	100
$T_g$ [°C]	-100	-72	-46	-24	-4	14	34	100

Teplotu skelného přechodu je možno ovlivnit vzájemnou modifikací polymerů jejich kopolymerací, kdy je výsledná  $T_g$  značně rozdílná od  $T_g$  jednotlivých čistých složek. V Tab. 1 je uvedena závislost teploty skelného přechodu na podílu styrenu  $w_s$  ( $T_g = 100$  °C) v jeho kopolymeru s butadienovým kaučukem ( $T_g = -100$  °C). Lze vyzorovat, že při vzrůstajícím obsahu složky s vysokou  $T_g$  se plynule zvyšuje  $T_g$  i celé směsi.

Ve směsi nemísitelných či omezeně mísitelných polymerů si naproti tomu každá složka zachovává svou  $T_g$  a směs jako celek vykazuje dvě teploty skelného přechodu. [3]

## 2 STYRENOVÉ POLYMERY

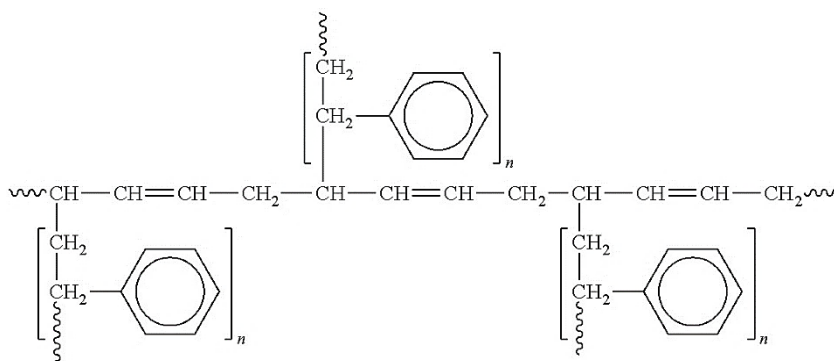
Styrenové polymery zahrnují velkou skupinu makromolekulárních látek, jejichž základní stavební složkou je styren. Polystyrenové plasty patří společně s polyolefiny a polyvinylchloridem mezi nejvíce používané polymery. [3]

### 2.1 Modifikované styrenové polymery

Polystyrenové plasty představují velké možnosti v oblasti modifikace vlastností fyzikálními a chemickými cestami. Chemická modifikace je prováděna při syntéze polymeru kopolymerací, roubováním či síťováním několika monomerních složek. Jiná modifikace polystyrenových plastů spočívá v jejich směšování s jinou polymerní či nepolymerní složkou. Mezi základní skupiny modifikovaných polystyrenových plastů patří:

- houževnatý polystyren (zvýšená houževnatost),
- kopolymer SAN (zlepšená chemická odolnost),
- polymer ABS (zvýšená houževnatost i lepší chemická odolnost),
- lehčený polystyren (nízká hustota a dobré tepelně izolační vlastnosti).

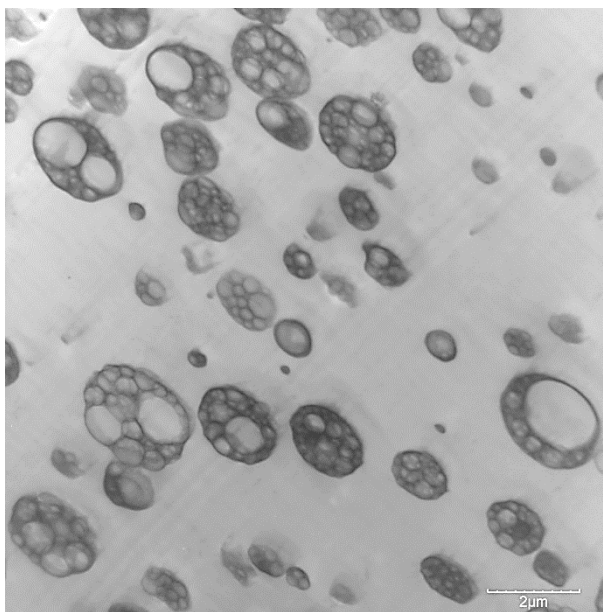
Pro výrobu homopolymeru a kopolymerů styrenu se používá především radikálová polymerace. Polystyren je tvrdý, křehký, průhledný polymer s dobrými elektroizolačními vlastnostmi. Za běžných podmínek je dostatečně odolný vůči oxidaci, ovšem fotooxidací a termooxidací žloutne a křehne. Odolává účinkům alkoholů, minerálních olejů a zásad. Teplotní hranice jeho použitelnosti je 75 °C. Homopolymer polystyren se používá k výrobě nenáročného spotřebního zboží jako kelímky, misky, dětské hračky, ozdobné předměty; pěnový polystyren je hojně užíván ve stavebnictví a v obalové technice. [1]



Obr. 3. Strukturní vzorec houževnatého polystyrenu – postranní větve polystyrenu naroubované na hlavním řetězci butadienového kaučuku. [4]

Polystyrenové plasty modifikované kaučukem spojují v optimálním poměru tuhost plastu s houževnatostí kaučuku. Mají dvoufázovou strukturu, kdy je zesítěný kaučuk rozptýlen ve formě malých globulárních částic v PS či SAN matrici. PB latex je obvykle vyroben emulzní polymerací 1,3-butadienu a tyto částice jsou v matrici zakotveny roubováním PS či SAN na řetězce kaučuku. Postranní naroubované větve PS či SAN jsou pak kotveny do termoplastické matrice zapletením řetězců.

Se zvyšujícím se obsahem kaučuku se zvyšuje houževnatost polymeru, ovšem klesá jeho tuhost a odolnost proti stárnutí. Mechanické vlastnosti jednotlivých komerčních produktů jsou ovlivněny obsahem kaučukové složky, velikostí částic kaučuku, stupněm zesítění kaučuku, charakterem a stupněm roubování, přítomností inkluzí termoplastické složky v kaučukových částicích, distribucí molekulových hmotností aj. Modul pružnosti houževnatých polystyrenů je dán především vlastnostmi polystyrenové matrice. [3]



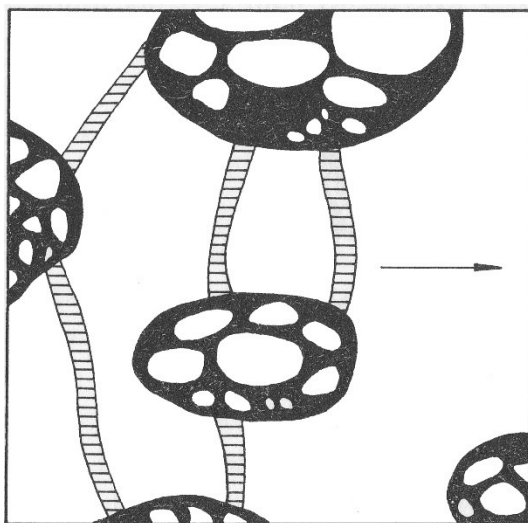
*Obr. 4. TEM snímek houževnatého polystyrenu. Tmavé částice kaučuku v PS matrici. [5]*

Houževnaté polystyreny lze zpracovávat všemi způsoby jako se zpracovává homopolymer PS – vstřikováním, vytlačováním, vyfukováním, tvarováním.

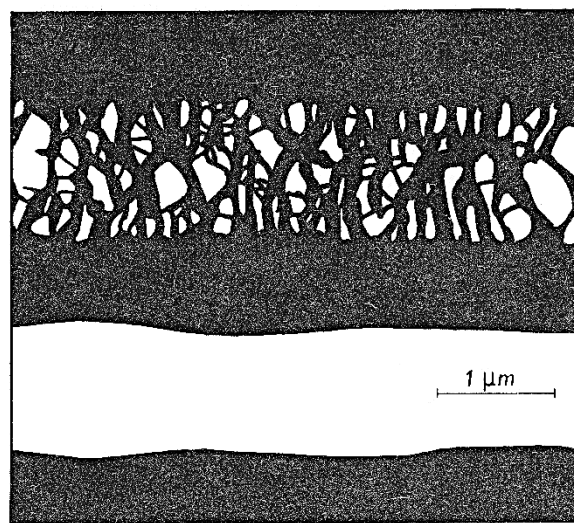
## **2.2 Mechanika houževnatých polystyrenů**

Kaučukové částice působí ve sklovité matrici především jako koncentrátoři napětí vyvolávající iniciaci velkého množství mikroskopických puklin v obklopující matrici. Tyto

pukliny nemají volný povrch, ovšem jsou vyplněny orientovanými fibrilami kolnými na směr namáhání, podléhající místní plastické deformaci.



Obr. 5. Pukliny v houževnatém polystyrenu. Směr působícího napětí znázorněn šipkou, kaučuková fáze černě, polystyrenová bíle, trhliny šrafovane. [3]



Obr. 6. Schematické znázornění rozdílu mezi puklinou (v horní části obrázku) a trhlinou (ve spodní části obrázku) v houževnatém polystyrenu. [3]

Tyto oblasti se liší od okolního polymeru hustotou a indexem lomu světla. Odlišný rozptyl světla v těchto nehomogenitách způsobuje vznik viditelných jemných trhlinek a tzv. napětové zbledení („stress whitening“) při lomu houževnatých polymerů. Přítomnost velkého objemu dutin (až 60 % objemu pukliny) v těchto zónách pak zapříčiňuje, že při deformaci protahováním nedochází u houževnatých polystyrenů k významnějšímu zmenšování plochy průřezu zkušebního tělesa. [3]

K iniciaci puklin dochází především na mezifázovém rozhraní v rovníkových oblastech kaučukových částic vzhledem ke směru zatížení. Při nárazu se velká část mechanické energie spotřebuje na iniciaci a růst velkého počtu mikroskopických puklin s velkým množstvím jednotlivých fibril a není pak k dispozici energie pro iniciaci velkých štěpných trhlin vedoucích k lomu materiálu. Po vytvoření puklin sdílí kaučukové částice zatížení společně s maticí a původně kulové částice se deformují na elipsoidní.

### 2.3 Houževnatý polystyren (HIPS)

Houževnatý polystyren („Impact Polystyrene“ - PS-I či též „High Impact Polystyrene“ – HIPS) je kaučukem modifikovaný polystyren. Obsah modifikujícího kaučuku se pohybuje



okolo 5 %; u speciálních typů může být i více. Nejčastěji se jedná o butadienový kaučuk, mohou být použity i jiné elastomery a kopolymery dienu. HIPS je oproti PS neprůhledný a vyniká dvou- až čtyřnásobně vyšší houževnatostí. Ostatní mechanické vlastnosti se příliš nemění. [1] [3]

Zpracovává se nejčastěji vytlačováním a vstřikováním. Používá se pro výrobu nádob, kontejnerů, krytů, dílů chladniček, potřeb pro domácnost, dílů automobilů aj.

Tab. 2. Srovnání vlastností PS, HIPS a ABS. [1]

Materiálová vlastnost	PS	HIPS	ABS
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	1050	1040	1040
Pevnost v tahu [MPa]	38 ÷ 40	30 ÷ 35	40 ÷ 45
Pevnost v ohybu [MPa]	85 ÷ 120	70 ÷ 90	60 ÷ 90
Rázová houževnatost [ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	16 ÷ 20	25 ÷ 60	70 ÷ 160
Min. teplota trvalého použití [ $^{\circ}\text{C}$ ]	-10	-30	-20
Max. teplota trvalého použití [ $^{\circ}\text{C}$ ]	50	65	80
Navlhavost [%]	0,1	0,2	0,3
Teplota skelného přechodu [ $^{\circ}\text{C}$ ]	100	34*	105

\* Tg pro PS-I s obsahem kaučuku 10 %. [3]

## 2.4 Akrylonitrilbutadienstyren (ABS)

ABS je směs akrylonitrilu, butadienu a styrenu. Podíl kaučukové složky bývá vyšší než u HIPS, a to 10 až 25 % u komerčních produktů. Vlivem akrylonitrilové složky má kopolymer vysokou chemickou a tepelnou odolnost a butadien mu dodává vysokou houževnatost. To při zachování dostatečné pevnosti i tuhosti materiálu.

Kopolymery ABS jsou dobře zpracovatelné prakticky všemi běžnými technologiemi, nejčastěji vstřikováním a vytlačováním. Povrch výrobků z ABS je lesklý a tvrdý a může být snadno galvanicky pokoven. ABS se obecně používá pro výrobky a součástky ve strojírenství, v automobilovém průmyslu, ve stavebnictví, pro díly domácích spotřebičů, armatury a trubky, či v obalové technice. [1] [3]

Přítomnost polární nitrilové skupiny způsobuje určitou afinitu ABS k vodní vlhkosti. Zvýšený objem vlhkosti způsobuje změnu mechanických a zpracovatelských vlastností. Mezi nevýhody ABS patří jeho hořlavost a malá odolnost proti povětrnosti a povrchově aktivním látkám. [3]

### 3 KLIMATICKÉ STÁRNUTÍ A ODOLNOST POLYMERŮ

Změny vyvolané dlouhodobým působením vnějšího prostředí na materiál jsou označovány jako stárnutí polymerů. Zásadní vliv na proces stárnutí má především světlo (příp. sluneční svit), UV záření, teplota a její změny, vlhkost vzduchu, vzdušný kyslík a ozon. Soubor těchto faktorů vnějšího okolí působících na materiál je nazýván klimatickými podmínkami. Ostatní vlivy jako chemické látky, prach, proudění vzduchu, působení mikroorganismů či jiné faktory jsou sledovány jen ve zvláštních případech. [1]

Působením těchto faktorů se postupně zhoršují vlastnosti polymerů, což může vést k předčasnému funkčnímu selhání výrobku či k jeho nepoužitelnosti k určené aplikaci. Souhrn nevratných (ve velké většině případů i nežádoucích) pomalých změn vlastností materiálu za dlouhodobého působení uvedených vlivů je označován jako stárnutí. Procesy stárnutí materiálu jsou tedy činitelem limitujícím životnost výrobku.

Životnost je definována dobou, po níž prakticky významné vlastnosti materiálu jsou udržovány na určité úrovni zaručující splnění kvalitativních požadavků pro daný účel. [3]

*Tab. 3. Odolnost nestabilizovaných polymerů dle působení vnějších vlivů (1 – výborná odolnost, 2 – dobrá odolnost, 3 – částečná odolnost, 4 – špatná odolnost). [6]*

Polymer	foto-oxidace	termo-oxidace	ozon	vlhkost
Polyolefiny	4	3 ÷ 4	1	1
Fluoroplasty	1	1	1	1
Polyvinylchlorid	3	3	1	2
Polystyren	4	2	1	1
ABS	4	4	1	2
Polykarbonáty	3	2	1	2
Polyamidy	3	3	1	3
Pryže z přírodního kaučuku	4	4	4	2
Pryže z butadienového k.	4	4	4	2

#### 3.1 Odolnost vůči povětrnosti

Jsou-li výrobky z polymerů vystaveny účinkům povětrnosti, po určité době se projeví změny vzhledu i mechanických vlastností. Zkoušení odolnosti polymerů proti povětrnosti je prováděno buďto umělým či urychleným stárnutím. Často se přistupuje k metodě urych-

leného stárnutí polymerů, jelikož poskytuje výsledky v podstatně kratším čase. Takto získané výsledky ovšem nelze bezvýhradně přenášet na proces přirozeného stárnutí; dosahuje jeho efektu jen přibližně. [1]

Hlavním procesem uplatňujícím se při povětrnostním stárnutí polystyrenových plastů je fotooxidace, přičemž zvýšená teplota a přítomnost monomerního styrenu urychlují probíhající procesy. Hydrolytické pochody jsou charakteristické pro jiné typy polymerů, mohou se ale v menší míře specificky uplatňovat i v případě polymerů ABS. U polystyrenových plastů modifikovaných nenasyčenými kaučuky může být průběh stárnutí negativně ovlivněn působením ozonu v ovzduší.

První vizuálně pozorovatelnou změnou povětrnostního stárnutí polystyrenových plastů je oxidační žloutnutí polystyrenu spojené se ztrátou lesku způsobenou vznikem mikrotrhlinek na povrchu, mění se i mechanické vlastnosti. [3] [7]

### 3.1.1 Přirozené povětrnostní stárnutí

Zkoušky přirozeného povětrnostního stárnutí jsou značně časově náročné, poskytují však spolehlivé informace o chování materiálu v určitých klimatických podmínkách. Mají ovšem výsledky omezené pouze pro danou geografickou oblast a mají význam, pokud se provádí dlouhodobě, minimálně po době tří let. [8]

Zkušební tělesa sejmутá ze zkušebního stojanu se nejdříve pečlivě vizuálně zkontrolují, vyhodnotí se jejich vnější změny, očistí se a umístí se do standardního zkušebního prostředí na dobu minimálně 24 hodin. Stárnutí je následně vyhodnoceno dle následující tabulky:

Tab. 4. Základní kritéria pro hodnocení stárnutí. [8]

Vnější vzhled exponované části	Ztráta lesku, změna barvy, vznik trhlin, vznik propadlin či nerovností, eroze vodou, prachem, prasknutí zkušebního tělesa
Hmota	Změna hmotnosti, úbytek změkčovadel
Rozměry	Změna délky, šířky, tloušťky, průměru...
Mechanické vlastnosti	Rázová houževnatost, protažení při přetržení, mez pevnosti v tahu, mez pevnosti v ohybu
Dielektrické vlastnosti	Povrchový izolační odpor, objemový elektrický odpor, elektrická průrazná pevnost
Mechanické vlastnosti exponovaného povrchu	Křehkost povrchové vrstvy (vznik trhlin při ohybu tělesa), tvrdost povrchové vrstvy

### 3.1.2 Urychlené povětrnostní stárnutí

Cílem urychleného povětrnostního stárnutí polymerů je zkrátit dlouhodobé zkoušky přirozeného stárnutí. Tělesa jsou v tomto případě umístěna do přístroje uměle simulujícího složky přirozené povětrnosti – tzv. veterometru. Základním kritériem, podle něhož se odvozuje délka expozice těles v přístroji a na přirozené povětrnosti, je ekvivalent množství světelné energie dopadající na plošnou jednotku vzorků. Změny vlastností zkušebních těles se hodnotí stejně jako u zkoušek přirozeného stárnutí.

## 3.2 Odolnost vůči kyslíku

Vzdušný kyslík způsobuje degradaci polymerů. Při běžné teplotě a bez působení světelného záření se toto tzv. oxidační stárnutí projeví až po velmi dlouhé době, řádově deseti či více let. Přitom stupeň polymerace, konfigurace řetězce, ani koncové skupiny nemají na odolnost proti oxidaci významný vliv. [7] Zvýšená teplota ovšem oxidaci významně urychluje a dochází k tzv. termooxidačnímu stárnutí.

Podléhají mu zejména nenasycené polymery, v jejichž řetězcích vznikají hydroperoxidové skupiny -OOH reakcí kyslíku s atomy uhlíku spojenými se sousedním atomem uhlíku dvojnou vazbou. Hydroperoxidové skupiny se snadno štěpí na radikály, které zahajují řetězovou oxidační reakci, vedoucí k degradaci polymeru. [1]

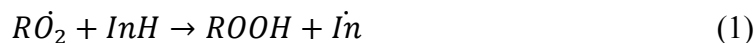
Mezi polymery náchylné k oxidaci patří polyolefiny, styrenové polymery, polykarbonáty a zejména pryže z nenasycených kaučuků. V praxi jsou takto postihnuty kaučuky obsahující v makromolekule dvojnou vazbu, které jsou snadno oxidovatelné i při normální teplotě a za nepřístupu světla. Bez přísady antioxidantů jsou v praxi téměř nepoužitelné, jelikož zdegradují již v řádech měsíců. [7]

Vedle chemického složení má na odolnost polymerů významný vliv difuze a propustnost kyslíku v materiálu. Ta se odvíjí od morfologie polymeru, kdy v amorfních polymerech je difuze kyslíku mnohem rychlejší než v polymerech krystalických. [6] [7]

Tab. 5. Propustnost polymerů pro kyslík při 30 °C. [1]

Polymer	$B \times 10^{19} [\text{m}^2\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}]$
Polyolefiny	38 ÷ 413
Fluoroplasty	2 ÷ 7
Polyvinylchlorid	9
Polystyren	112
Polykarbonáty	150
Polyamidy	3
Přírodní kaučuk	1730
Butadienový kaučuk	1440

Ochrana polymeru proti oxidaci spočívá zejména v zabránění jejímu řetězovému průběhu, který má v nechráněném polymeru autokatalycký průběh (je katalyzována vlastními reakčními produkty). Látky zpomalující oxidační a tepelně-oxidační stárnutí jsou nazývány antioxidanty. Tyto látky inhibují napadání substrátu kyslíkem. Mechanismus působení spočívá především v reakci s radikálem  $RO_2$ :



Nejvýznamnějšími antioxidanty přerušující řetězovou reakci oxidace jsou látky fenolického a aminového typu. Radikály  $\dot{In}$  nejsou schopny dále rozvíjet řetězovou reakci a zanikají terminačními reakcemi



čímž vznikají nereaktivní produkty.

Standardní polystyren je za běžných podmínek dostatečně odolný vůči krátkodobé tepelné degradaci a termooxidaci. Ovšem houževnaté typy polystyrenů jsou k termooxidaci vysoce citlivé z důvodu obsahu nenasyceného kaučuku obsahujícího oxidovatelné dvojně vazby. Obsah antioxidantů je obvykle 0,1 ÷ 0,25 hm. %. V polymerech ABS je obsah modifikujícího kaučuku obvykle mnohem vyšší než v houževnatém polystyrenu a jsou často aplikovány pro náročná použití. V důsledku toho také vzrůstají požadavky na jejich stabilizaci a obsah antioxidantů bývá 0,25 ÷ 1,0 hm. % a používají se účinnější typy. Praktická použitelnost houževnatých polystyrenů je tedy podmíněna účinnou stabilizací. [3]

V případech, kdy jsou tyto látky do polymerů přidávány výrobcem v závěrečné fázi výroby ve velmi malých koncentracích (desetiny DSP) pro ochranu polymerů např. během sušení

či skladování, jsou označovány jako stabilizátory. U houževnatých polystyrenů se přidávají antioxidanty již při polymeraci z důvodu jejich menšího znehodnocení procesními podmínkami. [1] [3]

Podle jejich chemického účinku lze antioxidanty rozdělit do dvou skupin:

- a) Látky přerušující řetězovou autooxidaci inhibicí radikálů vzniklých rozpadem hydroperoxidu nebo radikálů vzniklých reakcí primárních radikálů s makromolekulami polymeru. Příkladem jsou deriváty aminů a fenolů.
- b) Látky zabraňující iniciaci řetězové autooxidační reakce rozkladem hydroperoxidů bez vzniku radikálů. Bývají též označovány jako disaktivátory hydroperoxidů či tzv. preventivní antioxidanty. Patří k nim např. estery kyseliny fosforité a některé sirnaté organické sloučeniny, zejm. thioly (merkaptany) a sulfidy.

### 3.3 Odolnost vůči teplotě

Změny, k nimž dochází v polymerech při jejich vystavení zvýšeným teplotám, závisí nejen na druhu polymeru, ale také na reálných podmínkách působícího prostředí. Probíhá-li tepelné namáhání materiálu v inertní atmosféře či v prostředí vakua, jedná se o tepelnou degradaci (tepelné stárnutí). Probíhá-li tento proces za přítomnosti kyslíku, je označován jako termooxidační degradace (termooxidační stárnutí). [3]

Účinek zvýšené teploty se u polymerů může projevit dvojitým způsobem: [1]

- a) Polymer měkne, případně začne téct v důsledku překonání přitažlivých sil mezi řetězci zvýšením kinetické energie přijatým teplem;
- b) Změna struktury – makromolekulární látky se štěpí na nízkomolekulární produkty, příp. až na monomer beze změny chemického složení, tzv. *depolymerace*. Jiné odštěpují nízkomolekulární zplodiny doprovázené změnou chemického složení, tzv. *destrukce*. Tato se může projevit vznikem příčných vazeb mezi řetězci a polymer takto síťuje. U semikrystalických polymerů může také docházet ke změně podílu krystalinity. [8] [7]

#### 3.3.1 Teplotní stárnutí

Teplotní stárnutí je dlouhodobé vystavení polymerních materiálů účinkům teploty nad  $60 \div 70$  °C, což jsou teploty podstatně nižší, než při jakých nastává tepelný rozklad. Při tepelném stárnutí dochází ke změně molekulární, příp. i nadmolekulární struktury polymerů a probíhají změny materiálu chemické i fyzikální povahy.

Z chemických procesů může probíhat síťování, oxidace, odbourávání polymeru či odštěpování substituentů. K fyzikálním pochodům patří změny nadmolekulární struktury, mění se počet i velikost krystalů. Dochází k relaxaci napětí a vznikají hmotové ztráty vytěkáním změkčovadel, stabilizátorů a jiných přísad, jejichž migrace z materiálu může stárnutí urychlit. Tyto unikají přímo do ovzduší, nebo migrují na povrch materiálu, kde ulpívají a tvoří souvislý film či tzv. vykvétání. [7]

Krátkodobý ohřev (např. při zpracování) zpravidla nevyvolá hlubší změny ve vlastnostech polymeru, naproti tomu dlouhodobé tepelné působení může vyvolat nevratné změny vlastností. Krátkodobé teplotní zkoušky mají zpravidla pouze orientační charakter. [6]

### 3.3.2 Teplotní odolnost

Metody určující vliv teploty na materiál zkoumají vlastnosti:

- Při teplotě zkoušky (zvýšené/snížené) zahrnující dostatečnou předchozí temperaci,
- Zkouška po určité době tepelného namáhání s temperací na teplotu okolí před zkouškou.

Každý polymerní materiál je použitelný v určitém teplotním rozmezí. Se stoupající či klesající teplotou se jeho vlastnosti mění v závislosti na typu polymeru a teplotě. U polymerů s lineárními řetězci jsou makromolekuly vzájemně vázány sekundárními vazbami, jejichž pevnost se stoupající teplotou významně klesá. Naopak u prostorově vázaných polymerů či polykondenzátů jsou makromolekuly vázány primárními vazbami, jejichž pevnost se v širokém rozsahu teplot nemění. [1]

Tab. 6. Mezní teploty dlouhodobé použitelnosti polymerů. [1]

Polymer	Mezní teplota [°C]
Polypropylen	100
Fluoroplasty	250
Polyvinylchlorid	60
Polystyren	80
Polykarbonáty	130
Polyamidy	80 ÷ 120
Pryže z přírodního kaučuku	70
Pryže z butadienového kaučuku	80



### 3.3.3 Zkoušky teplotní odolnosti

Polymery podléhají vlivem teploty k různým strukturním změnám, jejichž průběh bývá ovlivňován vlhkostí, světlem, kyslíkem, příp. jinými faktory. Zahříváním nastávají v materiálu některé nevratné změny jako degradace řetězců, ztráta či migrace změkčovadel na povrch, oxidace aj.

Odolnost polymerů vůči teplotě lze vyjádřit jako souhrn změn fyzikálních, mechanických, elektrických a jiných vlastností v závislosti na teplotě a čase. Zkouškami se zjišťuje rychlost změn probíhajících v materiálu při daných teplotách a po určitém čase. Za předpokladu získání více dat při různých podmínkách lze sestavit křivky tepelné odolnosti vymezující teplotní oblast použitelnosti materiálu. [8]

Zjišťování dlouhodobé teplotní odolnosti krátkodobými zkouškami nemusí vždy poskytovat spolehlivé výsledky. U některých polymerních materiálů se vlastnosti mění zpočátku rychleji a jejich změna se časem ustálí, kdežto u jiných má změna na začátku pomalý průběh a v průběhu času dochází k výraznému tepelnému znehodnocení. Krátkodobé zkoušky mohou poskytovat opačné výsledky. [8]

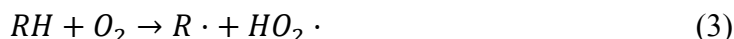
### 3.3.4 Termodegradace

Tepelný rozklad polymerů je vyvolaný účinkem tepelné energie za předpokladu jejího působení v inertní atmosféře či ve vakuu. Průběh je charakterizován vznikem těkavých produktů a uhlíkatého zbytku zpravidla nedefinovatelného složení. V některých případech se získá monomer ve velkém výtěžku. Termodegradace se výrazně projevuje při působení teplot nad cca 200 °C. Tento efekt se může projevit zejména při zpracování polymerů, kdy jsou tyto vystaveny vysokým zpracovatelským teplotám. [3] [6]

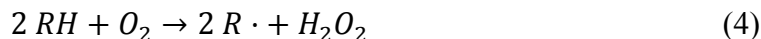
## 3.4 Termooxidace

Při vystavení polymeru atmosféře obsahující kyslík dochází k termooxidaci. U některých polymerů probíhá termooxidace znatelnou rychlostí již při teplotách jen o málo vyšších než laboratorní. Účinek oxidace na polymery se projevuje rozličnými způsoby. Dochází k trhání řetězců, jejich větvení či síťování. Obecně mohou tyto reakce probíhat současně a podle podmínek může některá z nich převládnout. [8]

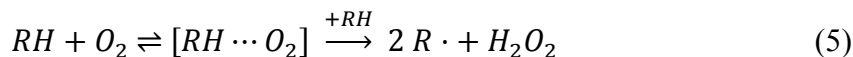
Termooxidace polymerů je radikálová reakce probíhající autokatalyticky. Ke štěpení vazeb v hlavním řetězci dochází iniciací přímou reakcí polymeru s molekulárním kyslíkem:



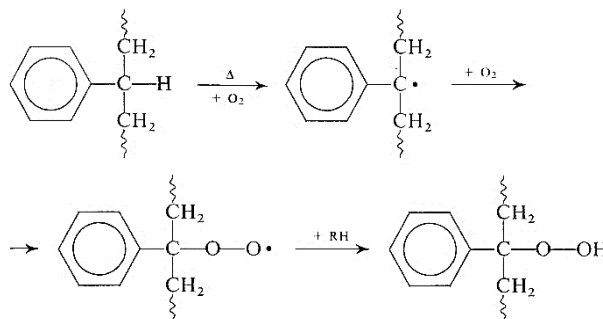
Pokud nejsou v systému další látky schopné iniciovat řetězovou radikálovou reakci (např. peroxidy), je považována za nejpravděpodobnější reakce trimolekulární



přičemž se předpokládá jejich průběh přes vznik komplexu mezi polymerem a kyslíkem:

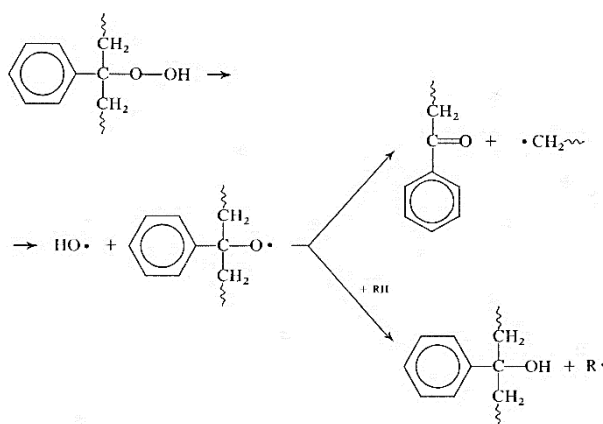


Ve výše uvedených rovnicích označuje RH polymerní substrát, v němž H je nejsnáze odštěpitelný vodíkový atom. V molekule homopolymeru styrenu je nejlabilnějším atomem vodík na terciálním uhlíku, na němž vzniká radikál a v dalších krocích se vytváří hydroperoxid:



Obr. 7. Oxidace homopolymeru styrenu. [3]

Časová závislost koncentrace hydroperoxidů v PS prochází určitým maximem, kdy v pozdějších stádiích termooxidace převládají spíše reakce jejich rozpadu. Konečnými produkty jsou látky acetofenonové struktury vznikající za současného štěpení makromolekul:

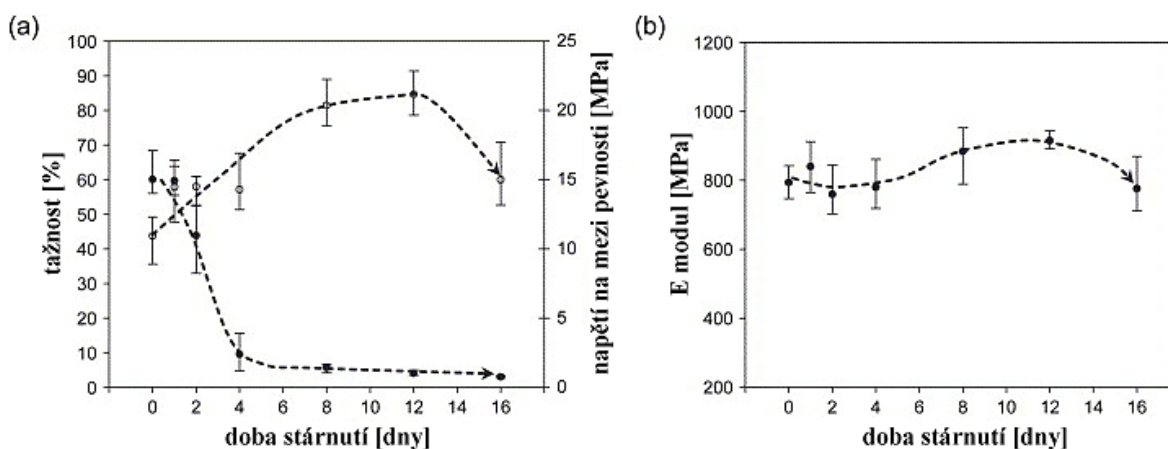


Obr. 8. Rozpad hydroperoxidů a štěpení makromolekuly. [3]

Polystyren je poměrně dost odolný vůči termooxidaci. Její aktivační energie je  $105 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Při teplotách kolem  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  nastává pomalá termooxidace, teprve nad  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  probíhá velmi rychle. [3]

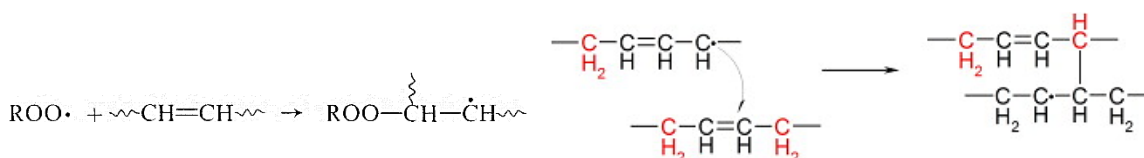
### 3.4.1 Termické stárnutí polystyrenových kopolymerů

Teplotní stárnutí pod teplotou  $T_g$  polymerů HIPS a ABS je komplexní jev obsahující fyzikální a chemickou podstatu. Z fyzikálního hlediska dochází k přeskupení řetězců směřující k vnitřní rovnováze. Z chemické podstaty dochází k reakcím polymeru s kyslíkem. Studie ukazují, že při krátkodobé teplotní zátěži převažuje fyzikální stárnutí nad chemickým projevujícím se zvýšením pevnosti v tahu a výrazným snížením tažnosti. Při dlouhodobějším stárnutí dominuje chemické stárnutí nad fyzikálním a dochází ke snížení pevnosti v tahu a E modulu. [9] [10]



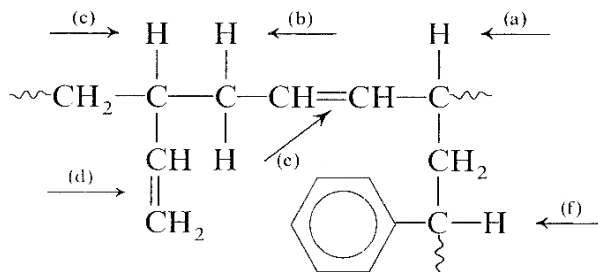
Obr. 9. Závislost mechanických vlastností – (●) tažnosti, (○) pevnosti a b) E modulu na čase při termooxidaci HIPS 90 °C. [9]

Z důvodu přítomnosti dvojných vazeb v polymerech a kopolymerech dienu vyznačují vysokou citlivostí ke kyslíku již za mírně zvýšených teplot. Tato vlastnost se přenáší i na houževnaté typy polystyrenových plastů, k jejichž modifikaci bylo použito nenasycených kaučuků. V takových systémech je nejspíše odštěpitelným atomem vodík na uhlíku v poloze  $\alpha$ , vzhledem ke dvojným vazbám (Obr. 11, místa a, b, c). Dvojným vazbám PB složky (Obr. 11, místa d, e) nejsou při nízkoteplotní oxidaci přímo napadány kyslíkem, ale k poklesu nenasycenosti dochází spíše sekundárními reakcemi (síťováním):



Obr. 10. Mechanismy síťování PB složky – vlevo prostřednictvím peroxidového radikálu, vpravo radikálem vzniklým odtržením vodíku z hlavního řetězce. [3] [11]

Možnost přímé iniciace kyslíku s dvojnou vazbou se připouští při teplotách okolo 100 °C. Za teplot nad 230 °C má již významný podíl i iniciace na terciálním vodíku (Obr. 11, místo f) naroubovaného polystyrenového řetězce.

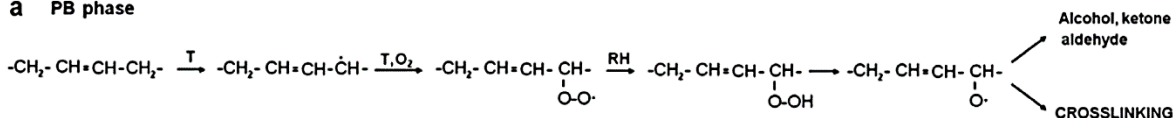


Obr. 11. Kopolymer butadienu a styrenu;  
oxidovatelná místa. [3]

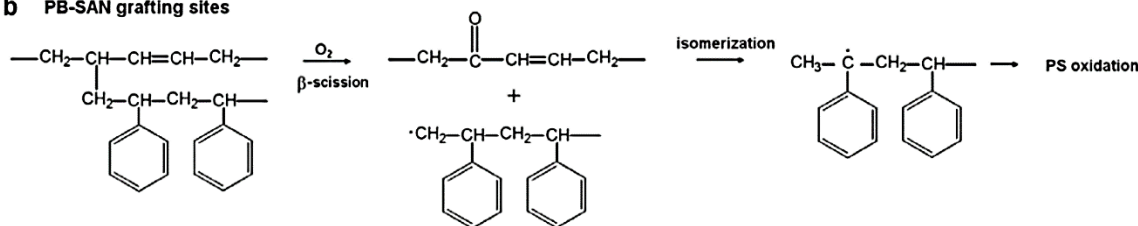
Studie [9] [12] [13] ukazují, že termooxidace HIPS a ABS je iniciována v řetězcích naroubované matrice na kaučuk v oblasti rozhraní fází za vzniku hydroperoxidových skupin (Obr. 12). Současně je iniciována rychlá oxidace a síťování kaučukových částic. Produkty degradace PB následně iniciují pomalou oxidaci matrice. Reakce se vyznačují počáteční indukční periodou odvislou od teploty a atmosférického tlaku vzduchu. Následuje autokatalytický průběh reakcí a po dosažení maximální rychlosti má konečné stadium autoretardační charakter. Vyšší stupeň roubování zlepšuje odolnost polymeru proti termooxidaci. [3]

Oxidační degradace PB fáze vede mj. k zesítnění kaučuku a k odštěpení naroubovaných polystyrenových řetězců. Důsledkem je především znehodnocení houževnatosti, která je podmíněna u těchto polymerů optimálními elastickými vlastnostmi kaučukové fáze a optimálním stupněm naroubování.

#### a PB phase

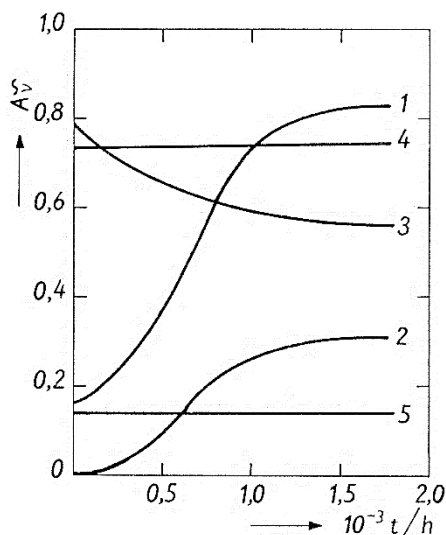


#### b PB-SAN grafting sites

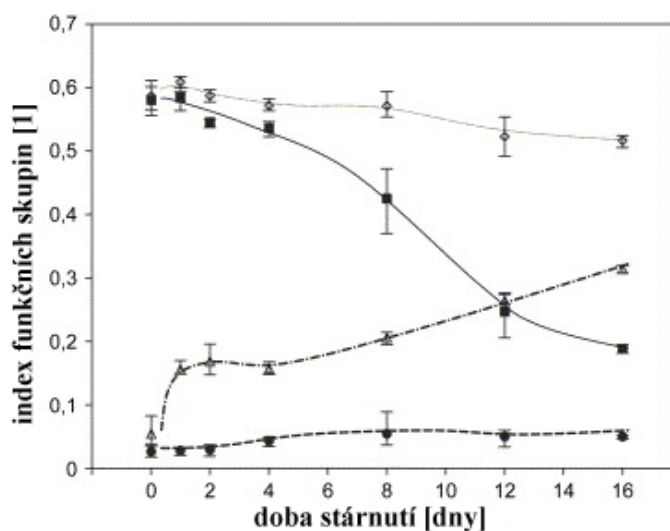


Obr. 12. Schéma oxidace PB složky ABS vedoucí k síťování kaučuku či vznik -OH, aldehydických a ketonických skupin (nahore) a štěpení roubovaných řetězců PB-SAN (dole). [9]

Dle studií se tepelným stárnutím ABS při 70 °C již po dvou měsících snížila rázová houževnatost a tažnost asi na 50 % původní hodnoty, přičemž pevnost v tahu a ohybu se prakticky nezměnila. Podobný průběh byl zjištěn také při 60 °C, kdy u houževnatého polystyrenu a ABS byl zaznamenán pokles rázové houževnatosti na 50 % své původní hodnoty již po 750 hodinách. [3]



Obr. 13. Průběh termooxidace ABS při 70 °C – změny absorpance: (1) karbonylové (2) hydroxylové (3) trans-1,4 (4) nitrilové (5) a fenylové skupiny. [3]



Obr. 14. Průběh termooxidace HIPS při 90 °C – změny indexu funkčních skupin: (◇) vinyl-1,2 (■) trans-1,4 (△) karbonylové a (●) hydroxylové skupiny. [9]

IR spektra při termooxidaci kaučukem modifikovaných polystyrenových plastů vykazují nárůst obsahu kyslíkatých sloučenin – karbonylové ( $1800 \div 1620 \text{ cm}^{-1}$ ) a hydroxylové skupiny ( $3600 \div 3100 \text{ cm}^{-1}$ ) a úbytek obsahu dvojných vazeb ( $1000 \div 880 \text{ cm}^{-1}$ ): trans-1,4 ( $966 \text{ cm}^{-1}$ ), vinyl-1,2 ( $911 \text{ cm}^{-1}$ ), cis-1,4 ( $730 \text{ cm}^{-1}$ ). [3] [9]

### 3.5 Vliv vlhkosti

Voda buďto v kapalné formě či ve formě vzdušné vlhkosti znatelně ovlivňuje vlastnosti a proces stárnutí polymerů. Vlhkost může působit přímo na něj či na přísady v něm obsažené. Navlhavé jsou polymery obsahující hydrolyzovatelné skupiny (amidové, esterové, nitrilové) ve svých makromolekulách či v molekulách svých přísad a plniv. Vodní páry ze vzduchu se přenášejí do polymeru, přičemž některé molekuly vody se naváží na řetězec polymeru pomocí mezimolekulárních sil. [7]

Vzdušná vlhkost se udává jako absolutní či relativní hodnota. Hodnota absolutní vlhkosti udává, jaké množství vody je ve vzduchu k dispozici pro její absorbování polymerem. Hodnota relativní vlhkosti je důležitá zejm. ve vztahu k nebezpečí kondenzace vlhkosti na povrchu materiálu. Množství absorbované vody z ovzduší závisí na teplotě polymeru a na relativní vlhkosti vzduchu. Absorpce vlhkosti polymerem probíhá do okamžiku rovnováhy jeho vlhkosti s okolním vzduchem. Rychlost vyrovnání vlhkosti je odvislá od typu polymeru a relativní vlhkosti vzduchu. Proces absorpce vody i sušení je vratný. [14]

Tab. 7. Rozdělení polymerů dle navlhavosti. [14]

skupina polymerů	obsah vlhkosti [hm. %]	příklady
nenaflhavé	< 0,1	PE, PP, PS, PTFE
málo navflhavé	0,1 ÷ 0,5	ABS, SAN, PC
středně navflhavé	0,5 ÷ 2,0	POM, PMMA, PVC, PA11
silně navflhavé	> 2,0	PA6, PA66, PUR

Fyzikálně chemický účinek vody na polymery se projevuje botnáním, změnou krystalinity, vylouhováním přísad apod. Některé polymery jsou citlivé k působení vody a vzdušené vlhkosti. Absorbovaná voda může v polymerech působit jako změkčovadlo a významně tedy ovlivňovat jejich mechanické vlastnosti zvětšováním volného objemu polymeru (oddalováním řetězců). Sorpce vody je doprovázena mírnou změnou objemu tělesa. [7]

### 3.6 Vliv kombinace kyslíku a vlhkosti

S působením kyslíku současně s vlhkostí se lze setkat při skladování polymerů či při jejich aplikaci v uzavřených prostorách za nepřístupu vzduchu (uvnitř přístrojů, v budovách apod.)

Jak vyplývá z výzkumů tohoto problému, přítomnost vlhkosti urychluje oxidaci polymerů v nepřítomnosti světla. Hlavní příčinou tohoto degradačního procesu, který probíhá při zvýšených teplotách do 100 °C není hydrolyza amidových vazeb, ale oxidace polymerního řetězce. K významnějšímu uplatnění hydrolytického štěpení dochází až při teplotách nad 100 °C. Urychlující vliv vody na oxidaci polymerů je vysvětlován tak, že voda zvětšuje vzdálenost mezi makromolekulami a umožňuje lepší průnik kyslíku do blízkosti řetězců, popř. usnadňuje odvádění reakčních produktů. [7]

## 4 DEGRADACE POLYMERŮ

Degradace polymerů je proces, při němž dochází ke snížení průměrného polymerizačního stupně polymerů. Zároveň se může měnit i konstituce strukturních jednotek řetězců.

### 4.1 Mechanismus degradace

Odbourávání polymerů spojené se štěpením kovalentních vazeb v hlavních řetězcích makromolekul může být výsledkem působení tepla, světla, ultrazvuku, mechanického namáhání apod., ale např. i hydrolýzy či oxidace. Z hlediska mechanismu odbourávání makromolekul lze rozlišit depolymeraci (vztah 6) a štěpení řetězců (vztah 7). [15]



Odbourání hlavního řetězce probíhá v zásadě dvěma způsoby:

- Statistické štěpení řetězců – sled jednotlivých štěpných reakcí na různých místech řetězce podmíněných jeho chemickou konfigurací, či statistickým rozdělením míst. Vznikají tak segmenty řetězce o různé molekulové hmotnosti.
- Depolymerace vedoucí ke vzniku monomeru, zpravidla o vysokém relativním výtěžku.

Degradační síťování převládá při tepelném stárnutí pryží z homo- a kopolymerů butadienu, nebo v závěrečné fázi destrukce PVC.

Degradační změny v prvním stadiu jsou pouze obtížně sledovatelné, protože změny jsou zpočátku nevýrazné a lze je odhalit pouze velmi citlivými metodami. Výrazné změny nastávají u základních mechanických vlastností, mění se vzhled materiálu, probíhají tvarové změny, a další změny fyzikální, jako např. dielektrické a optické vlastnosti.

Druhy degradace polymerů dle faktorů, které ji způsobují, jsou: termická, oxidační, chemická, mechanická, biologická, radiační.

K depolymeraci dochází u polymerů, jejichž makromolekuly neobsahují skupiny schopné chemicky reagovat při teplotách depolymerace či je-li jejich vazebná energie značně vysoká. Polymery obsahující snadno odštěpitelné reaktivní skupiny uvolňují nízkomolekulární produkty (např. vodu, chlorovodík, alkohol), čímž destruuují dříve, než by mohlo dojít k jejich depolymeraci. Např. PVC a polychloropren se rozkládá za vzniku chlorovodíku, PVA za vzniku kyseliny octové.

## 4.2 Změny na molekulární úrovni

Nejvýznamnější změny probíhající v polymerech v průběhu stárnutí jsou: oxidace, odštěpování nízkomolekulárních látek, vznik a zánik dvojných vazeb, štěpení řetězců až depolymerace, hydrolýza, síťování. Průběh těchto reakcí lze sledovat prostřednictvím chemických, fyzikálních a elektrických metod. [8]

### 4.2.1 Oxidace

Při oxidaci se většina kyslíku (asi 70 %) váže na řetězce polymeru za vzniku nových kyslíkatých skupin. Vznikají zejména karbonylové skupiny – ketonické, aldehydické, karboxylové, esterové, laktonové. Jejich vývoj lze sledovat infračervenou spektroskopií. V průběhu oxidace vznikají rovněž peroxidové a hydroperoxidové skupiny. Při odštěpování nízkomolekulárních látek nebo štěpením řetězců vznikají dvojně vazby, IR spektroskopie však neposkytuje spolehlivé výsledky. [6]

### 4.2.2 Hydrolýza

Významnou degradační reakcí je hydrolýza probíhající především u polymerů syntetizovaných polykondenzací. Hydrolýzou vznikají nové funkční skupiny -COOH, -OH, -NH<sub>2</sub> a nízkomolekulární produkty.

### 4.2.3 Změna molekulové hmotnosti

Stanovení molekulové hmotnosti je jednou z nejdůležitějších metod, prostřednictvím níž lze sledovat průběh stárnutí. V průběhu degradace však zpravidla probíhají konkurenční reakce – štěpení řetězců a jejich síťování. Štěpení vede ke snižování molekulové hmotnosti, síťování má účinek opačný. Ke sledování změn je možno použít termickou analýzu, rozptyl světla, gelovou chromatografii, viskozimetrii, aj. [6]

## 4.3 Změny nadmolekulární struktury

V průběhu stárnutí dochází u polymerů ke změnám nadmolekulární struktury, což vede ke změně mechanických vlastností, k rozměrovým a tvarovým změnám, mění se rozpustnost, teplota tání či zpracovatelnost.

### 4.3.1 Sekundární krystalizace

Průběh krystalizace semikrystalických polymerů lze rozdělit na dvě fáze – primární a sekundární krystalizaci. Primární krystalizace je definována rovnovážným stavem hustoty



polymeru. V některých případech není po ztuhnutí polymeru dosaženo konečné meze krystalizace a tato pokračuje pomalu dále, což je charakterizováno vzrůstem hustoty. Tento jev je označován jako sekundární krystalizace a její rychlost je přibližně o dva řády nižší než rychlost primární krystalizace a vždy je doprovázena reorganizací zbytkové amorfni fáze. Důsledkem jsou změny fyzikálních vlastností, tvarové změny či vznik trhlinek. [6] [8]

#### **4.3.2 Relaxace vnitřního pnutí**

U polymerů v průběhu jejich zpracování či při mechanickém opracování vzniká vnitřní pnutí. Vnitřní pnutí je způsobeno převážně faktem, že jednotlivé řetězce nemají dostatek času, aby zaujaly polohu s minimálním obsahem volné energie. Nejčastěji se objevuje při vstřikovávání do studených forem. Stykem taveniny polymeru s povrchem formy rychle ztuhne vrchní vrstva materiálu a mezi ní a pomaleji chladnoucím jádrem vzniká vnitřní pnutí, které může vést až k deformaci výrobku.

Pozvolným ohříváním materiálu nad teplotu  $T_g$  lze vnitřní pnutí odstranit, nebo podstatně snížit. Nad teplotou  $T_g$  je výrobek udržován tak dlouho, až se molekuly uvedou do rovnovážného stavu. Chlazení musí být pomalejší než ohřev. Změny prostorového uspořádání řetězců v objemu materiálu s sebou mohou přinést změny tvaru či objemu výrobku. [6]

### **4.4 Změny makroskopické**

V průběhu stárnutí se první pozorovatelné změny objevují často na povrchu výrobku. Dochází ke zmatnění povrchu, zhoršení transparency, nastávají barevné změny. Objevují se mikrotrhliny až trhliny větších rozměrů. [6]

#### **4.4.1 Změna barvy a lesku**

U bezbarvých a bíle zbarvených materiálů dochází stárnutím ke žloutnutí až hnědnutí. Tato změna může být vyvolána nečistotami ve výrobku, které samy podléhají barevné změně, či se jedná o degradaci samotného polymeru. Tato změna je často u polymerních výrobků nežádoucí a lze ji potlačit použitím antioxidantů a světelných stabilizátorů.

Povrch materiálu také v průběhu stárnutí ztrácí svůj lesk, který lze sledovat až do stadia tvorby trhlinek měřením odraženého světla. Ztráta lesku je způsobena rozrušením povrchové vrstvy výrobku, v pozdějších fázích stárnutí se u některých polymerů vytváří silně degradovaná vrstva, kterou lze z povrchu setřít. V jiných případech může být ztráta lesku

způsobena migrací přísad z objemu materiálu na jeho povrch, dochází k tzv. vykvétání, vypocování a křídování. Také v těchto případech lze vrstvu z povrchu snadno setřít. [6]

#### 4.4.2 Žloutnutí

Žloutnutí polystyrenu a jeho kopolymerů je způsobeno oxidací v průběhu stárnutí. Proces urychluje působení světla a zvýšené teploty. Významně k němu dochází při vystavení polymeru teplotám nad 80 °C. Při normální teplotě a za nepřístupu světla polystyren nežloutne ani za dobu několika let. Z toho vyplývá, že příčinou žloutnutí polystyrenu je vznik oxidačních struktur. Nasvědčuje tomu i fakt, že antioxidanty žloutnutí zabraňují. [3] [7] [16]

Žloutnutí polystyrenových plastů ABS a HIPS je doprovázeno poklesem molekulové hmotnosti a poklesem rázové houževnatosti a tuhosti. Mechanismus oxidace polystyrenu byl několikrát zkoumán, není však na tuto problematiku jednotné a jasné vysvětlení. [3] [16] [17]

#### 4.4.3 Vznik trhlin

Vznikem trhlinek na povrchu polymerního materiálu může mít nejrůznější příčiny. Zaprvé je to degradace polymeru vlivem působení okolního prostředí, tj. povětrnostní stárnutí, mechanické namáhání, vnitřní pnutí a jeho relaxace, či koroze chemickými látkami. Vývoj povrchových trhlinek urychluje degradaci výrobku a může vést až k jeho rozpadu na kousky či prach. Počáteční mikrotrhlinky se zvětšují do hloubky i délky, spojují se a vzrůstá jejich množství. Trhlinky umožňují degradačním vlivům působení do hloubky materiálu, který tímto degraduje i ve svém objemu. [6]

## 5 MECHANICKÉ ZKOUŠKY POLYMERŮ

Výrobky z polymerů jsou při svém použití vedle namáhání klimatického často namáhány mechanicky. Mechanickými zkouškami jsou hodnoceny jejich mechanické vlastnosti. Tyto zkoušky jsou normalizovány z důvodu opakovatelnosti měření a reprodukovatelnosti výsledků. Normy předepisují typy zkušebních těles a způsob jejich výroby, průběh mechanických zkoušek a jejich vyhodnocení. Mechanické zkoušky (na rozdíl od fyzikálních či analytických) většinou vedou k nevratnému poškození zkušebního tělesa. [6]

Průběh degradace materiálu je sledován vývojovými křivkami sledované vlastnosti, přičemž se hodnota nedegradovaného materiálu vyjadřuje hodnotou 100 %. Na základě výsledků zkoušek lze predikovat chování materiálu při jeho praktické aplikaci.

Průběh stárnutí je nejčastěji sledován prostřednictvím zkoušek tahových, tlakových, ohybových, rázových, vrubové houževnatosti, tvrdosti, opotřebení, únavových zkoušek atd. [6]

Dle charakteru působení zatěžující síly lze mechanické zkoušky dělit na: [18]

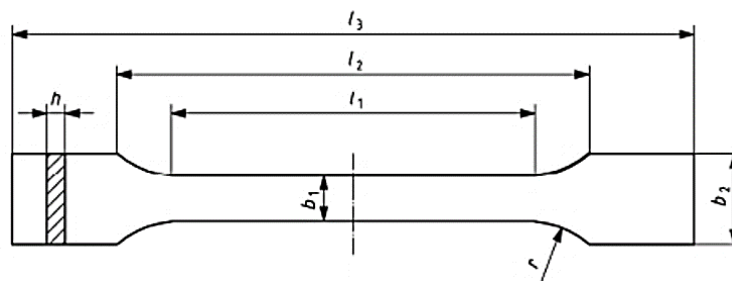
- a) statické zkoušky – zkušební těleso je zatěžováno pozvolně se měnící silou působící nejčastěji až do okamžiku poškození tělesa. Zjišťuje se chování materiálu za konkrétních podmínek napětí, deformace, teploty a času. Patří zde zkoušky tahové, tlakové, ohybové, zkoušky tvrdosti, krípkové zkoušky aj.
- b) dynamické zkoušky – zatěžující síla se mění skokově, či v krátkém časovém úseku. Zde patří zkoušky rázové a vrubové houževnatosti, zkoušky odrazové pružnosti aj.
- c) únavové zkoušky – dlouhodobé experimenty zkoumání mechanických vlastností, obvykle do okamžiku porušení zkušebního tělesa.

### 5.1 Zkušební tělesa

Mechanické vlastnosti polymerů jsou dány jednak jejich vnitřní strukturou (chemické složení, krystalinita, molekulová hmotnost a její distribuce, obsah nečistot aj.), ale v nemalé míře i způsobem přípravy zkušebních tělísek. Tato jsou vyráběna vstřikováním, lisováním, vytvrzováním ve formě, obráběním či vyříznutím materiálu a jeho opracováním. Jejich příprava a kondicionace před provedením zkoušek jsou doporučeny zkušebními a materiálovými normami. [18]

### 5.1.1 Tvar zkušebních těles

Pro reprodukovatelnou přípravu zkušebních těles jsou tato rozměrově a tvarově definována normou ČSN EN ISO 20753, která také udává jejich určení pro mechanické a fyzikální zkoušky. Taktéž v každé normě mechanické zkoušky je definován doporučený typ zkušebního tělesa. Nejpoužívanějšími tvary těles jsou „lopatka“ (typ A) a „hranol“ (typ B). Ačkoliv jsou rozměry těles dány rozměry dutiny vstřikovací formy zahrnující vliv smrštění materiálu, mohou tělesa z důvodu relaxace napětí či sekundárního smrštění po vstřikování změnit své rozměry. Z tohoto důvodu je nutno změřit rozměry průřezů těles každé zkoušené sady za účelem přesného výpočtu měřených hodnot. [19]



Obr. 15. Víceúčelové zkušební těleso typu A. [20]

### 5.1.2 Příprava zkušebních těles

Podmínky zpracování polymerních výrobků mají velký vliv na vlastnosti použitého materiálu, čímž ovlivňují i naměřené hodnoty zkoušek. Přesné definování parametrů vstřikovacího procesu je předpoklad pro získání srovnatelných a reprodukovatelných hodnot. [21] Příprava zkušebních těles vstřikováním je normalizována pod ČSN EN ISO 294-1. Tato norma udává obecné podmínky vstřikování těles a konstrukci vstřikovací formy. Konkrétní procesní podmínky a úprava granulátu před vstřikováním pro jednotlivé materiály jsou dány příslušnými materiálovými normami.

### 5.1.3 Kondicionace zkušebních těles

Vlastnosti polymerů jsou značně ovlivněny teplotou a vlhkostí, a navíc zkušební tělesa jsou během své přípravy vystavena podmínkám neodpovídajícím jejich ustálenému stavu. Je to např. problematika krystalinity při vstřikování, vznik mechanických napětí v materiálu, snížení vlhkosti procesem vstřikování apod. Z tohoto důvodu se zkušební tělesa musí upravit do standardního stavu (rovnováhy tělesa ve vztahu k teplotě a vlhkosti). [22] [18] Kondicionování spočívá v uložení těles do prostředí s určitou relativní vlhkostí a teplotou po daný čas. Během této doby dojde k vyrovnání teploty a vlhkosti materiálu s okolím, částečně proběhne smrštění a odstranění vnitřních pnutí. Ze znalostí průběhu sorpce vody či

vodní páry zkoušeným polymerem jsou určeny podmínky kondicionace. Relativní vlhkost uzavřeného prostoru lze upravit pomocí klimatizační skříně, exsikátoru či nasycených roztoků solí.

V zájmu přesnosti měření je nejvhodnější umístit zkušební zařízení do kondicionovaného prostoru. To však často není technicky možné, a proto alespoň se má vlastní měření provést bezprostředně po vyjmutí vzorku z kondicionovaného prostoru. [8] [18]

Prostředí pro kondicionování a zkoušení je definováno v normě ČSN EN ISO 291 a pro konkrétní polymery jsou podmínky upřesněny v jejich materiálových normách.

## 5.2 Tahová zkouška

Princip tahové zkoušky spočívá v zatěžování zkušební tělesa postupně se zvyšující tahovou silou předepsanou rychlostí, obvykle až do mechanického porušení tělesa. Cílem zkoušky je stanovení napěťových a deformačních charakteristik zkoušeného materiálu.

V případě zatěžování jednoosým tahem izotropních materiálů je napětí rozloženo rovnoměrně po celém průřezu zkušební tělesa. V důsledku anizotropie polymerů je však napětí rozloženo nerovnoměrně a vznikají smyková napětí. Při tváření taveniny polystyrenových plastů mají jejich molekuly tendenci orientovat se ve směru toku, čímž dochází ke vzniku anizotropních molekulárních struktur s různým stupněm orientace makromolekul, důsledkem čehož je rozdílnost vlastností v jednotlivých směrech.

Průběh křivky pracovního diagramu je odvislý od materiálu a podmínek zkoušky, zejména teploty a rychlosti deformace (Obr. 19). Rychlost deformace v tahu se volí co nejmenší, aby se plně projevil charakteristické vlastnosti polymeru. Pro určité aplikace se naopak volí rychlosti vyšší, aby se projevilo jejich chování při namáhání rázovým tahem. [8]

Zkouška je prováděna na univerzálním zkušebním stroji dle normy ČSN EN ISO 527.

### 5.2.1 Průběh zkoušky

Grafickým znázorněním tahové zkoušky je pracovní diagram znázorňující deformační chování za podmínek zatěžování tělesa. Pracovní diagram závislosti napětí  $\sigma_T$  na poměrném prodloužení měřené části zkušební tělesa  $\varepsilon$  představuje pro každý materiál charakteristickou křivku pro dané zkušební podmínky. [8] Prodloužení tělesa je sledováno extenzometry (průtahoměry) a proměnná zatěžující síla je v praxi vztahována na původní hodnotu průřezu. V takovém případě hovoříme o tzv. smluvním napětí:

$$\sigma_T = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

S prodlužováním tělesa se mění jeho původní délka  $l_0$  na  $l$  a tento děj je vyjadřován jako poměrné prodloužení (deformace v tahu):

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad [1] \quad (9)$$

Pro zkoušku v tahu v počáteční části křivky platí Hookeův zákon udávající přímou úměru deformace na použité síle:

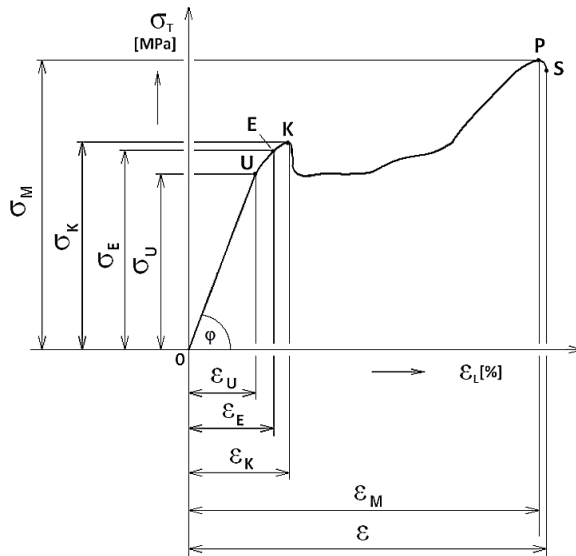
$$\varepsilon = K\sigma_T \quad [1] \quad (10)$$

$K$  je součinitel úměrnosti udávající poměrnou deformaci k jednotkovému napětí. V geometrickém vyjádření se jedná o směrnici přímky závislosti tahového napětí na poměrné deformaci. Jeho převrácená hodnota je  $E$ , modul pružnosti v tahu (tzv. Youngův modul).

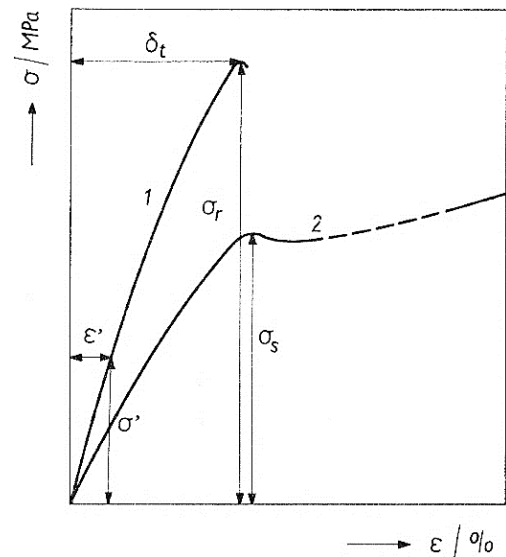
Výše uvedené vztahy platí vždy jen přibližně, protože v praxi není u žádného materiálu dodržena přísně lineární závislost prodloužení na tahovém napětí a objevují se odchylky od Hookova zákona. [8]

### 5.2.2 Tahová křivka

Na křivce pracovního diagramu lze vyčíst důležité napětíové body charakterizující mechanické chování materiálu:

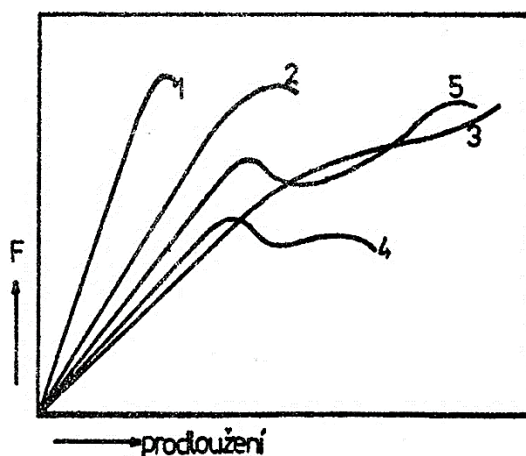


Obr. 16. Obecná tahová křivka. [8]

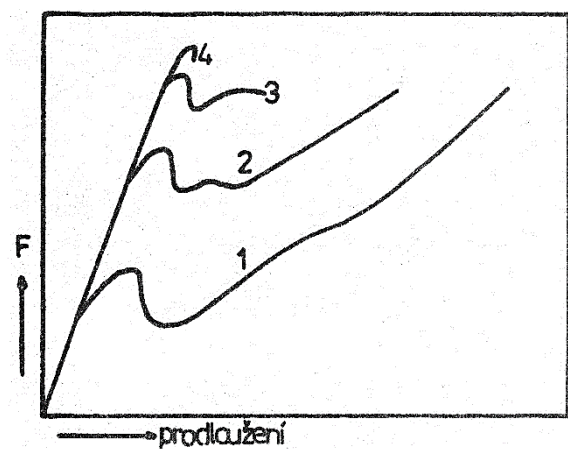


Obr. 17. Idealizovaná tahová křivka standardního (1) a houževnatého (2) polystyrenu. [3]

Materiály mají své charakteristické tahové křivky, odrážející jejich mechanické vlastnosti. Na Obr. 18 křivka 1 ilustruje materiál s malou tažností (reaktoplasty, PS), křivka 2 málo houževnatý materiál, kdy se těleso přetrhne krátce po překročení meze úměrnosti (neměkčený PVC), křivka 3 materiál s velkou tažností bez meze kluzu (měkčený PVC), křivka 4 má dolní a horní mez kluzu (PE, PP), křivka 5 odpovídá polymeru, u nějž se tahové vlastnosti prodloužením zlepšují (PA). [8] [18] Průběh takové křivky polystyrenu je typický pro křehké materiály. K lomu dochází před mezí kluzu a jeho tažnost dosahuje asi 1,5 až 5 %. Naproti tomu houževnaté typy polystyrenu vykazují přibližně až 10krát vyšší tažnost a jejich tahová křivka je charakteristická mezí kluzu. [3]



Obr. 18. Charakteristické tahové křivky různých typů materiálů. [18]



Obr. 19. Tvary tahové křivky dle rychlosti deformace u PP (1 < 2 < 3 < 4). [18]

### 5.3 Rázové zkoušky dynamické

Mechanické zkoušky rázem charakterizují chování materiálu při působení napětí ve velmi krátkém čase. Pomalým zvětšováním napětí působícího na těleso dojde u houževnatých materiálů ke značným deformacím a těleso není porušeno vůbec, nebo až za velkých deformací. Se zvyšující se rychlostí zatížení tělesa se materiály jeví jako křehké, což má za následek, že polymerní materiály dojdou k porušení již při malé deformaci.

Pro navrhování rázově namáhaných výrobků je nutno znát jejich rázové charakteristiky. Za namáhání rázem označujeme deformace tělesa o rychlosti  $1 \div 10$  m/s a jejich výsledky nelze všeobecně přenášet na různé tvary výrobků. [18] Při rázovém namáhání může dojít k porušení tělesa křehkým či houževnatým lomem, jemuž vždy předchází plastická deformace. Lom houževnatý je vždy spojen s tokem a také s molekulárním procesem skluzu a částečným rozbalením molekulárních klubek. Velká část rázové energie se právě vynaloží na tyto dva děje. V případě křehkého lomu se většina rázové energie spotřebuje na roztržení hlavních a vedlejších molekulárních vazeb. Energie pro uskutečnění křehkého lomu se vyznačuje velkými rozptyly hodnot, jelikož lom začíná vždy v místech mikrotrhlin či nečistot v materiálu, jejichž výskyt bývá velmi těžko předvídatelný a charakterizovatelný.

Rázová houževnatost materiálu souvisí s jeho schopností rychle absorbovat energii, tj. schopností deformace při určité rychlosti. Rázové kyvadlo přenáší při nárazu svou kinetickou energii na zkušební těleso. To se zpočátku deformuje pružně, následně plasticky do té míry, až dojde k jeho porušení. Závisí nejen na druhu polymeru, jeho složení, teplotě, jeho vlhkosti, historii stárnutí, ale také na zkušební metodě, podmínkách zkoušky a tvaru i rozměrech zkušebního tělesa. Polymery s teplotou skelného přechodu vyšší, než je standardní teplota prostředí, jsou při běžné teplotě křehké a při rázové zkoušce snadno prasknou křehkým lomem. Jedná se o amorfnní polymery s lineární či rozvětvenou strukturou. Naopak polymery s teplotou  $T_g$  pod  $23$  °C vykazují velkou houževnatost a tvárnost lomu.

V takových případech se zkušební těleso na půlce své délky opatří vrubem, čímž při aplikaci napětí dojde ke jeho koncentraci v místě vrubu a dojde k porušení i houževnatých materiálů, které bez vrubu nepraskají. Pak hovoříme o tzv. vrubové houževnatosti. Na oslabení vrubem jsou citlivé polymery ve skelném stavu. Sledováním charakteristik vrubové houževnatosti lze předpovídat chování materiálu oslabeném trhlinami čili jeho náchylnost ke snížení houževnatosti (zvýšení křehkosti) při porušení jeho povrchu. Vrubová houževnatost bývá přibližně 5 až 10krát nižší. [18]



Lze vypočítat tzv. vrubové číslo, které je poměrem rázové ku vrubové houževnatosti:

$$k_V = \frac{a_K}{a_N} \quad (11)$$

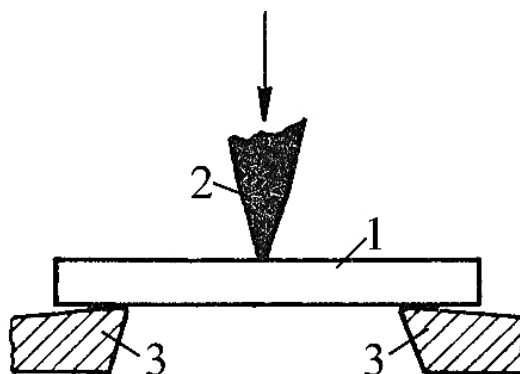
Vrbové číslo v určitých mezích charakterizuje křehkost látky, ovšem za předpokladu, že hodnoty houževnatostí byly stanoveny za stejných podmínek a vzorky se lišily jen přítomností vrubu. [18]

Rázové zkoušky polymerů se provádí především v ohybu pomocí kyvadlového kladiva metodou Charpy či Izod, existují také rázové zkoušky v tahu, ohybu a krutu. Rázová kladiva jsou výměnná (s různou nominální energií) pro měření rozličných materiálů s rozdílnou houževnatostí, a také pro zkoumání rozdílů v chování materiálu při odlišných deformačních energiích. [23]

#### 5.4 Rázová a vrubová houževnatost Charpy

Při zkoušce rázové houževnatosti metodou Charpy je zkušební těleso tvaru hranolu vodorovně umístěno na podpěrách, opřeno o dvě patky na své nejdelsí straně a je přeraženo klínovitým nosem rázového kyvadlového kladiva v polovině vzdálenosti mezi těmito podpěrami. [24] [18]

Měřítkem houževnatosti materiálu je deformační práce vynaložená na porušení tělesa daná plochou pod křivkou napětí – deformace. V praxi má nad konvenčními tahovými křivkami význam zejména rázová houževnatost za podmínek rychlých deformací, k jakým dochází při nárazu či pádu předmětu.



Obr. 20. Schéma zařízení pro zkoušku rázové houževnatosti metodou Charpy (1 – zkušební těleso, 2 – nos rázového kladiva, 3 – opěrné patky). [3]

Hodnoty rázové a vrubové houževnatosti silně závisí na geometrii zkušebního tělesa, tvaru vrubu, vzdálenosti opětných patek, rychlosti dopadu rázového kladiva aj. a možnost jejich využití pro predikci chování hotových výrobků v reálných podmínkách aplikace je většinou dosti omezená. [3]

Podstatou zkoušky je stanovení rázové práce potřebné k porušení vzorku dynamickým ohybem. Tato se stanoví jako rozdíl potenciální energie kladiva před nárazem a po něm zmenšený o ztráty třením kladiva v jeho uložení. Zavěšené kyvadlo má ve své horní poloze potenciální energii:

$$E_P = mgh_1 \quad [\text{J}] \quad (12)$$

Po přeražení vzorku se kyvadlo dostane do výšky  $h_2$ . Spotřebovaná práce  $A_N$  na přeražení tělesa je:

$$A_N = mg(h_1 - h_2) = mgl(\cos \beta - \cos \alpha) \quad [\text{J}] \quad (13)$$

Rázová houževnatost je pak poměr práce vztažená na plochu jeho průřezu  $S$ :

$$a_k = \frac{A_N}{bt} \times 10^3 \quad [\text{kJ.m}^{-2}] \quad (14)$$

Jelikož se část energie kladiva po nárazu spotřebuje i na odhození zlomeného vzorku, nelze výsledky zkoušek různých materiálů bez výhrad srovnávat.

Při zkoušce vrubové houževnatosti se tělísko opatřené vrubem pokládá tak, aby vrub byl na opačné straně, než dopadá kladivo. Vrub se tedy nachází v tahové oblasti. Vrubová houževnatost se vypočte obdobně jako u rázové houževnatosti (vztah 14), plocha průřezu se v tomto případě počítá v místě zeslabení vrubem. [24]

Zkoušky rázové a vrubové houževnatosti metodou Charpy jsou normalizovány pod ČSN EN ISO 179.

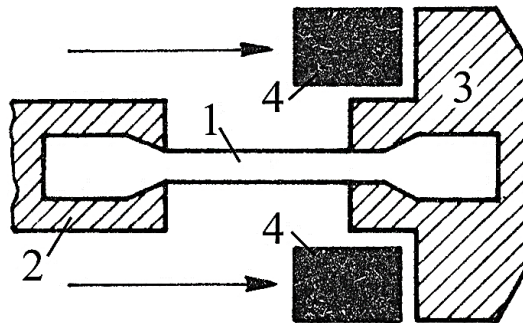
## 5.5 Tahová zkouška rázem

Zkouška se podobá rázové houževnatosti Charpy, ovšem zkušební těleso je na jednom konci je uchyceno v čelistech pevné patky, druhý konec tělesa je upevněn v příčnicku, na nějž udeří kladivo a dojde k přetržení tělesa. Těleso je přeraženo v nejnižším bodě jediného kyvu kladiva tahově-rázového zařízení.

Lze sledovat vliv velikosti kinetické energie na rázovou houževnatost materiálu použitím kladiv o různé nominální energii. Měří se energie potřebná k přetržení tělesa a tato vztažená

na jeho průřez vyjadřuje rázovou houževnatost materiálu v tahu. Výpočty a podstaty charakteristik rázové houževnatosti v tahu jsou analogické těm rázové houževnatosti metodou Charpy (vztah 14). [25] [8]

Zkouška rázové houževnatosti v tahu polymerů je dána normou ČSN EN ISO 8256.



Obr. 21. Schéma zařízení pro zkoušku rázové houževnatosti v tahu (1 – zkušební těleso, 2 – pevná patka, 3 – příčník, 4 – kyvadlo). [3]

## 5.6 Zkouška tvrdosti

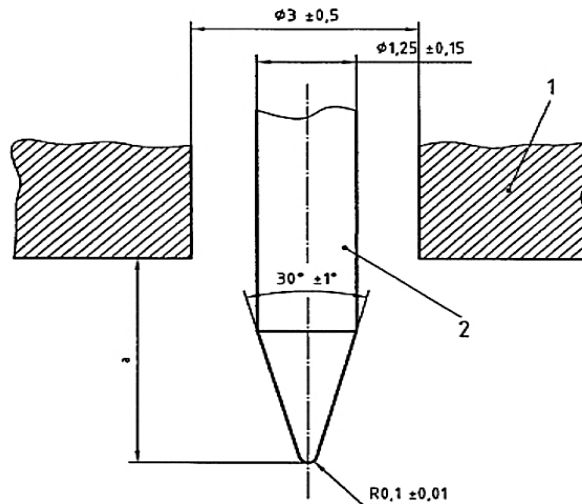
Tvrdoměr je jednou z charakteristických mechanických vlastností materiálů. Je definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Pro veličinu tvrdosti používáme značku H.

### 5.6.1 Princip měření tvrdosti

Přístroje pro měření tvrdosti jsou obvykle konstruovány na principu vtlačování tělíska (indentoru) do povrchu materiálu. Tvrdoměr je pak vyhodnocena dle hloubky vtisku indentoru či jeho plošných rozměrů. Hloubka vtlačení je nepřímo úměrná tvrdosti materiálu. Hodnota tvrdosti je obvykle uváděna bez jednotek, pouze s udáním způsobu měření či stupnice tvrdoměru. V případech, kdy je tvrdost odvozena ze vztahu mezi tlakovou silou a plochou vtisku, je hodnota tvrdosti uváděna v megapascalích. Hodnoty tvrdosti jsou odvislé od doby tlakového působení indentoru, na jeho geometrii a rozměrech, velikosti zatížení, elastických vlastností zkoušeného materiálu a na teplotě při zkoušce. [8]

### 5.6.2 Tvrdoměr Shore D

Metoda pro stanovení tvrdosti většiny termoplastů a reaktoplastů vtlačováním hrotu tvrdoměru Shore typu D do materiálu. Spočívá v měření hloubky vtlačení hrotu do materiálu za daných podmínek. Tvrdoměr se stanovuje na počátku vtlačování hrotu (tzv. okamžitá hodnota tvrdosti) či po  $15 \pm 1$  sekundách. Tato zkouška je empirická, tj. že neexistuje žádný přímý vztah mezi jakoukoliv základní vlastností materiálu a naměřenou tvrdostí. [18] [26]



Obr. 22. Zkušební hrot tvrdoměru typu D  
(1 – opěrná patka, 2 – zkušební hrot, a – vysunutí hrotu). [26]

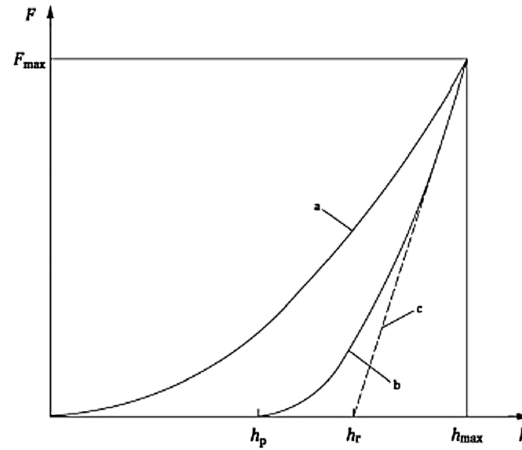
Zkouška tvrdosti Shore D je prováděna dle ČSN EN ISO 868.

### 5.6.3 Mikrotvrdoměr

Mikrotvrdoměr je měřena pomocí mikrotvrdoměru, což je v podstatě zkouška tvrdosti podle Vickerse, avšak indentační jehlan zanechává stopu o rozměrech v řádech mikrometrů a jeho zatížení je rovněž několikanásobně nižší (méně než 2 N). [27]

Mikrotvrdoměr se měří zpravidla u tenkých nánosů a u malých strukturních jednotek hmoty, jako jsou např. sférolity či amorfní fáze v polymerech. Pro studium takto malých oblastí není možno použít klasických zkoušek měření tvrdosti, jelikož indentory jsou příliš velké a zasahují do několika strukturních fází současně, stejně tak i do velké hloubky materiálu.

Povrch zkoušeného materiálu musí být dokonale rovný a hladký, nejlépe obroušen a vy-leštěn. Mikrotvrdoměr se používá ve spojení s mikroskopem, podle něž lze přesně určit místo měření a lze jím přesně odečíst délku úhlopříček vtisku. [18] Hloubka vtisku v řádech desítek mikrometrů předurčuje tuto metodu vhodnou k měření tvrdosti tenkých vrstev.



Obr. 23. Schematické znázornění zkušebního procesu měření mikrotvrdomosti (*a* – aplikace zkušebního zatížení, *b* – odlehčení zatížení, *c* – tečna ke křivce *b* z bodu  $F_{max}$ ). [27]

Instrumentovaná zkouška spočívá ve sledování zatěžovací síly a hloubky vtisku indentoru v průběhu času. Lze zvolit režim konstantního zatížení a jako funkce času je sledována hloubka vtisku či je po zvolené době udržována konstantní hloubka vtisku a funkcí času je zde změna zatěžující síly. Tyto dva druhy závislostí charakterizují elasticko-plastické chování materiálu.

Zkouška pro kovy je normalizována pod ČSN EN ISO 14577, lze ji však použít i pro nekovové materiály.

## 6 METODY ANALÝZY POLYMERŮ

Následující metody se používají k analýze vnitřní chemické struktury polymerů a ke zjištění jejich fyzikálních vlastností. Mohou poskytnout informace ať už přímo či nepřímo o procesech, které v materiálu proběhnou v důsledku degradace a stárnutí.

### 6.1 Infračervená spektroskopie

IR spektroskopie dává nejvýznamnější informace o molekulové struktuře látek. Metoda využívá vzájemné interakce elektromagnetického záření s látkou, kdy dochází k předání energie částicím látky po kvantech rovnajících se rozdílu možných energetických stavů daného atomu. Pro každou látku je toto kvantum charakteristické a odezva interakce záření s látkou nabývá diskrétní povahu. Absorpční pásová spektra vznikají při přechodu molekuly z energeticky nižšího stavu do energeticky vyššího absorpcí záření, přičemž dochází ke změně jejich vibračních či rotačně vibračních stavů. IR spektroskopie využívá elektromagnetické záření o vlnových délkách  $0,77 \mu\text{m} \div 1000 \mu\text{m}$ , což odpovídá vlnočtu  $10 \div 12500 \text{ cm}^{-1}$ . [28]

Absorpční IR spektroskopie je obecně užívanou technikou pro kvalitativní i kvantitativní analýzu polymerů umožňující:

- identifikaci látek (srovnání naměřeného spektra s katalogovým či známým spektrem);
- zjištění přítomnosti funkčních skupin (-CO, -CN, -OH, -CH<sub>3</sub>, C=C aj.);
- studium vodíkových vazeb (rozlišení inter- a intra- molekulárních vazeb);
- určení konfigurace a konformace řetězců polymeru;
- určení krystalinity;
- kvantitativní analýzu směsí.

Kvalitativní analýza využívá přítomnosti či absence charakteristických absorpčních pásů odpovídajících jednotlivým funkčním skupinám vyskytujících se v určitých oblastech vlnočtu. Tato poloha je navíc dána nejbližšími okolními skupinami v molekule. Z relativních intenzit příslušných absorpčních pásů lze usuzovat na jejich obsah v polymeru. Kvalitativní analýzou lze také detekovat přítomnost a obsah nízkomolekulárních látek (zbytky monomeru, změkčovadla, přísady aj.).

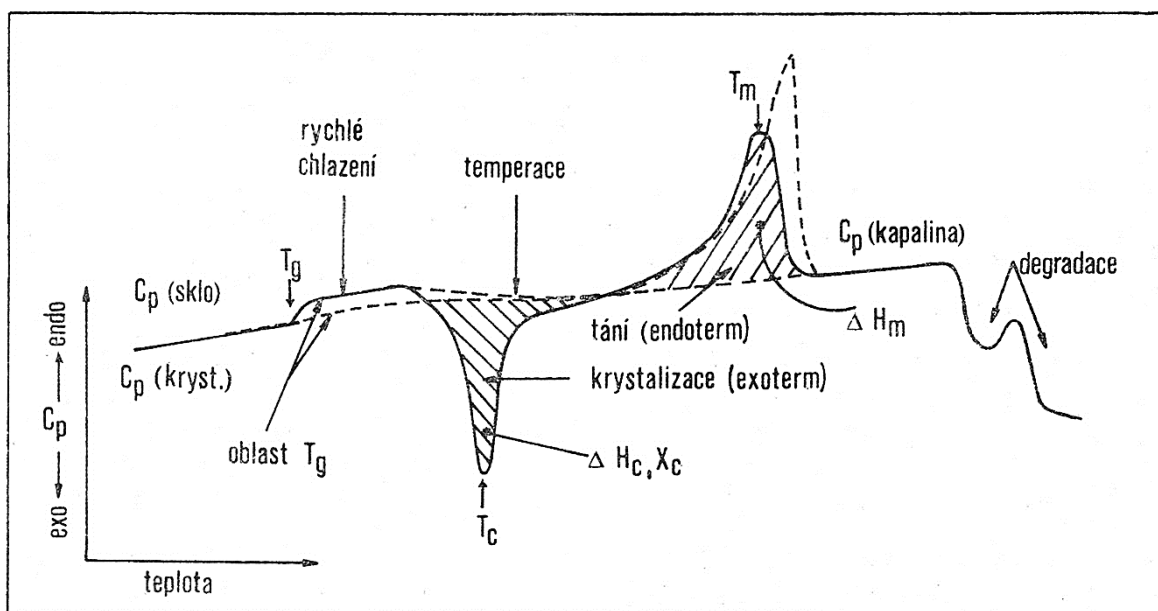
FTIR je druh IR spektroskopie pracující na principu interference spektra a využívající Fourierovu transformaci pro získání spektrálních křivek.

U kopolymerů a mísitelných polymerních směsí nemusí být výsledné spektrum pouhým součtem spekter jednotlivých složek, ale v důsledku interakce mezi polárními skupinami v řetězcích může dojít ke změnám intenzit i vlnočtu pásů. [28]

## 6.2 Diferenční skenovací kalorimetrie

Diferenční skenovací (též kompenzační) kalorimetrie (Differential Scanning Calorimetry, „DSC“) je jedna z metod termické analýzy. Termická analýza je experimentální metodika měření fyzikálních veličin látek v závislosti na teplotě.

DSC pracuje na principu měření energie nutné k dosažení nulového teplotního rozdílu mezi látkou měřenou a referenční, tudíž sleduje kompenzační tepelný tok v závislosti na teplotě či čase. Zařízení DSC se skládá ze dvou lineárně vyhřívaných termostatů. Jeden z nich obsahuje misku se zkoumaným vzorkem, druhý obsahuje misku prázdnou coby referenci. V průběhu zahřívání vzorku probíhají fyzikální změny vzorku svou povahou endotermické (tání, var, sublimace, rozkladné reakce, fázové přechody) a exotermické (krystalizace, oxidace). Tyto energetické pochody narušují termodynamickou rovnováhu mezi vzorkem a referencí a zaznamenávají se do grafu jako tepelný tok vzorkem přijatý či odevzdaný v závislosti na teplotě. [28]



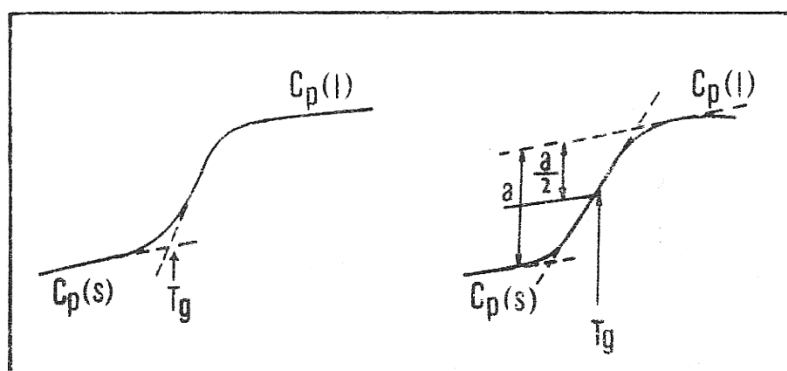
Obr. 24. Modelová DSC křivka polymeru. [28]

Metoda DSC umožňuje určit:

- měrné teplo  $c_p$ ,
- entalpie  $H$  a entropie  $S$ ,

- teplotu skelného přechodu  $T_g$ ,
- krystalinitu  $x_c$ , teplo krystalizace  $\Delta H_f$ , rychlost krystalizace  $v_c$ ,
- teplotu tání  $T_m$ , teplo tání  $\Delta H_m$ , stabilitu krystalitů,
- průběh kinetiky termické či oxidační degradace,
- průběh kinetiky polymerace.

Metodou lze pozorovat i kvantifikovat přechody I. a II. řádu a různé druhy reakcí. Přechody I. řádu (tání, krystalizace) teoreticky poskytují úzké výrazné píky, ovšem u polymerů vykazujících se polydisperzitou a různou konformací a konfigurací řetězců, se píky rozšiřují. Fázové přechody II. řádu (skelný přechod) se projevují skokovou změnou tvaru křivky z důvodu změny tepelné kapacity. Chemické reakce vykazují široké a nesymetrické pásy.



Obr. 25. Grafická extrapolace  $T_g$  polymerů. Vlevo  $T_g$  bod extrapolovaného nástupu, vpravo  $T_g$  inflexním bodem. [28]

Teplota skelného přechodu se určuje grafickou extrapolací – buďto bodem extrapolovaného nástupu či inflexním bodem. V oblasti  $T_g$  se často objevují anomálie spojené s tepelnou historií vzorku či s fyzikálním stárnutím. Tento jev je označován jako hystereze a nastává při rozdílných rychlostech ochlazování a zahřívání, kdy se systém při zahřívání vrací do rovnovážného stavu. Velikost píků roste s dobou ustanovování rovnováhy. Hodnota  $T_g$  je relevantní pouze za předpokladu stejné (či velmi podobné) rychlosti chlazení a rychlosti zahřívání vzorku. Též tlak použitý při výrobě vzorků má na průběh DSC křivky v oblasti  $T_g$  vliv. Skelné přechody vzorků připravených pod tlakem se projevují při nižší teplotě než u vzorků připravených beztlakově. Dalšími faktory ovlivňujícími průběh DSC křivky jsou forma vzorku (folie, prášek, hrudky) a teplotní režim přístroje. [28]

Z poznatků uvedených v odstavci výše je pro relevantní výsledky teploty  $T_g$  nutno vzorek při DSC měření dvakrát zahřát a ochladit za stejných podmínek. Při prvním zahřátí se odstraní tepelná historie vzorku daná jeho výrobním procesem a roztaje v homogenní kus



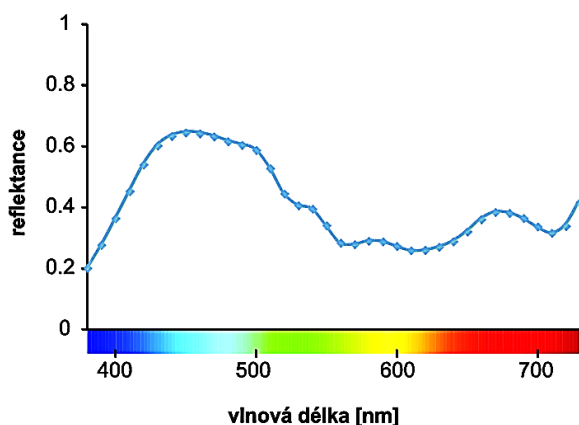
materiálu. Následně se vzorek ochladí a zahřeje podruhé. Z druhého zahřívání se poté určí „pravá“ křivka materiálu, z níž se charakteristiky odečítají.

### 6.3 Kolorimetrie

Kolorimetrie je metoda objektivního popisu barevnosti látek.

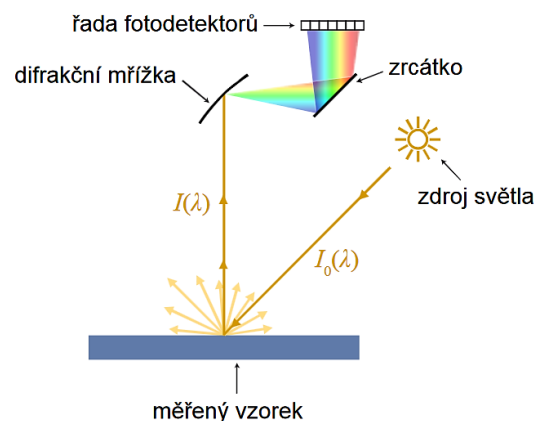
#### 6.3.1 Princip metody

Barevnost je z fyzikálního hlediska schopnost látky odrážet či propouštět určité části spektra viditelného světla ( $\lambda \approx 380 \div 750$  nm). Kolorimetrie je právě založena na principu měření reflektance vzorku či jeho transmitance elektromagnetického záření ve viditelné části spektra. Pro vzorek je takto vytvořena charakteristická křivka interakce světla s látkou. K měření barevnosti netransparentních vzorků se používají reflexní spektrofotometry (Obr. 27). Ty se liší teplotou chromatičnosti světla zdroje a geometrií odrazu.



Obr. 26. Remisní křivka modrého vzorku.

[29]



Obr. 27. Obecné schéma spektrofotometru.

[29]

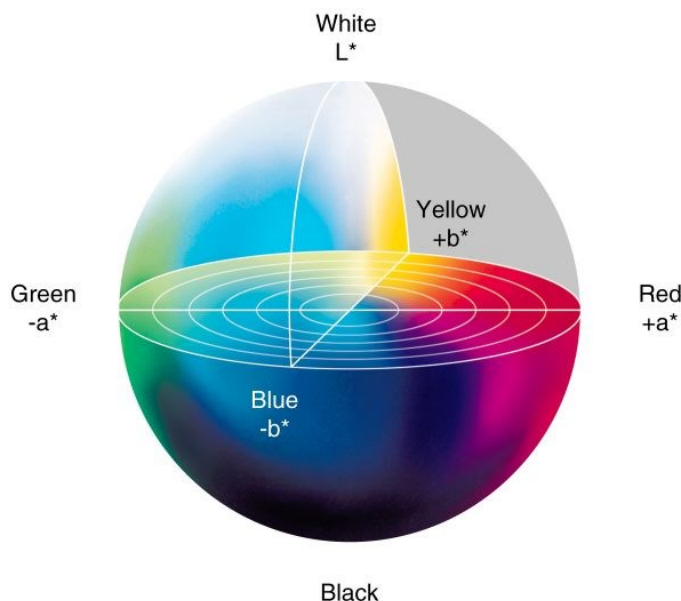
Pro změření intenzity odraženého světla vzorkem  $I(\lambda)$  je nutno světlo rozložit pomocí difrakční mřížky. Intenzita dopadajícího světla  $I_0(\lambda)$  je změřena při kalibraci přístroje pomocí dokonale bílé plochy. Tímto se před měřením získá tzv. absolutní bílá. Barevnost je pak vyjádřena poměrem intenzit odraženého ku dopadajícímu světlu napříč spektrem o vlnových délkách  $400 \div 700$  nm v 10 nm intervalech. Je zaznamenána tzv. remisní křivka, která udává závislost podílu odraženého světla na hodnotě vlnové délky, a je pro každou barvu charakteristická. Kromě barevnosti tělesa záleží i na struktuře jeho povrchu a úhlu odrazu paprsku mezi zdrojem a snímačem světla. [29] [30]

### 6.3.2 Popis barevnosti, barevný prostor

K popisu barvy lze využít tři charakteristik:

- odstín – přirovnání ke spektrální barvě (modrá, zelená, žlutá, červená);
- sytost – intenzita světla v dané oblasti proti celkové intenzitě;
- jas – absolutní množství odraženého světla.

Tyto tři popisné parametry lze vyjádřit jako bod v barevném prostoru. Nejčastěji se používá trichromatický prostor CIELAB  $L^*a^*b^*$  standardizovaný Mezinárodní komisí pro osvětlení (CIE). Parametr  $L^*$  udává měrnou světlost barvy od absolutně černé po dokonale bílou, parametr  $a^*$  pozici na ose od zelené po červenou a  $b^*$  pozici na ose od žluté po modrou barvu. Jakákoliv barva může být tedy vyjádřena třemi souřadnicemi  $L^*$ ;  $a^*$ ;  $b^*$ . Tyto tři parametry jsou bezrozměrné a mohou nabývat hodnot  $\langle -100; 100 \rangle$ .



Obr. 28. Barevný prostor CIELAB  $L^*a^*b^*$ . [30]

Při porovnávání barev se určí standard a použije se metoda difference jejich souřadnic (vzdálenosti jejich bodů v prostoru) vůči sobě pomocí odchylky  $\Delta E^*$ . Tato sestává z dílčích diferencí barevných souřadnic:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (15)$$

$$\Delta L^* = L^*_{STANDARD} - L^*_{VZOREK} \quad (16)$$

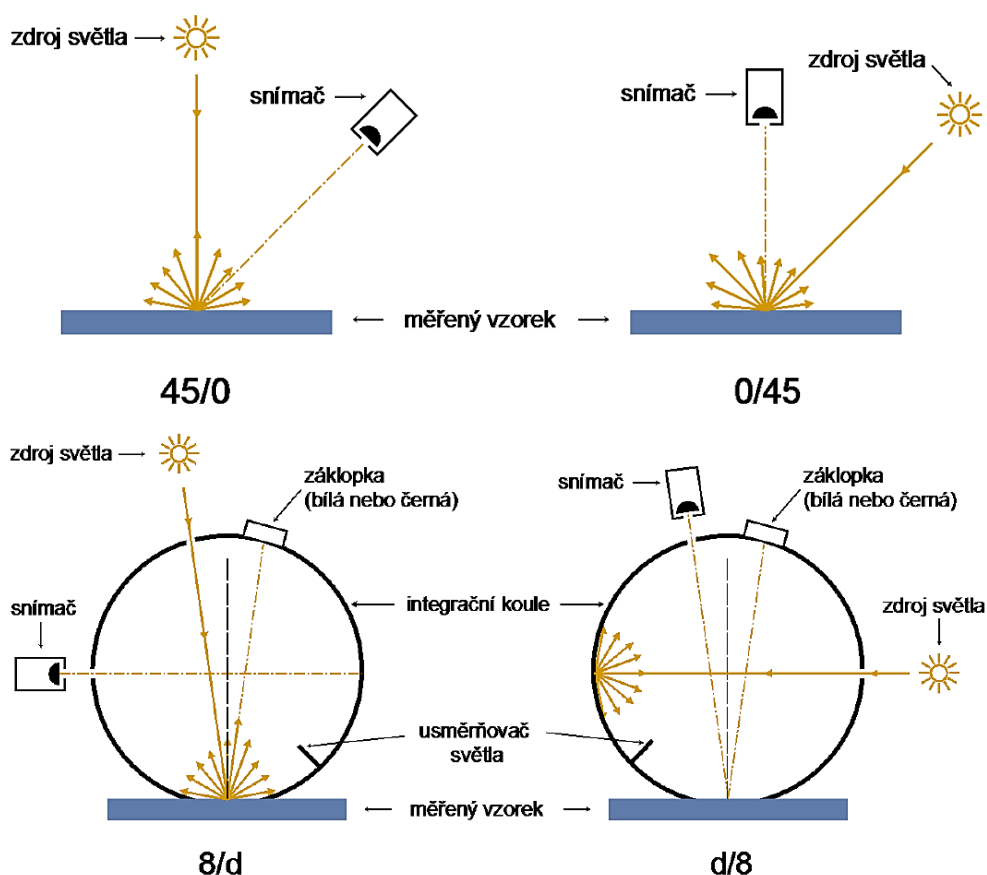
$$\Delta a^* = a^*_{STANDARD} - a^*_{VZOREK} \quad (17)$$

$$\Delta b^* = b^*_{STANDARD} - b^*_{VZOREK} \quad (18)$$

Pokud je hodnota  $\Delta E^*$  menší než 1, je barevná odlišnost vzorků zanedbatelná. [30]

### 6.3.3 Geometrie měření

Pro měření barevnosti odrazem konstruovány spektrofotometry se čtyřmi druhy geometrií dráhy zdroj světla – vzorek – detektor. Geometrie měření neboli úhel dopadu světla na povrch a následná detekce odraženého světla, určuje způsob vnímání barev. Struktura povrchu odraz světla ovlivňuje a hodnoty barevnosti pro matný, lesklý či jinak texturovaný povrch budou vykazovat odlišnosti. Geometrie měření jsou typu 45/0; 0/45; 8/d a d/8. První číslo udává úhel dopadu světla na povrch vzorku, druhé číslo udává úhel, pod nímž je odražené světlo detekováno. Označení „d“ znamená difuzní osvětlení. U geometrií s integrační koulí je povrch osvětlen ze všech stran, nebo je ze všech stran odražené světlo detekováno. Tím je měření do jisté míry nezávislé na struktuře povrchu a tyto dvě metody umožňují do měření zahrnout složku z přímého odrazu („specular included“) nebo ji vyloučit („specular excluded“). Nezahrnout přímý odraz do vyhodnocení barevnosti se doporučuje u vysoce lesklých materiálů, kde je přímý odraz nejvýraznější. [29]



Obr. 29. Čtyři druhy geometrií měření barevnosti spektrofotometrem. [29]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 7 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je zjistit změny fyzikálních vlastností polymerů HIPS a ABS po odeznění působení klimatických podmínek snížené teploty, zvýšené teploty a vlhkosti po daných časových úsecích, maximálně po čtyřech týdnech.

Jedna sada vzorků byla umístěna do termokomory a vystavena konstantnímu působení zvýšené teploty ( $80 \pm 0,3$ ) °C v kombinaci s relativní vlhkostí vzduchu ( $60 \pm 3$ ) % - dále jen „zvýšená teplota“, „HOT“ či „H“ a druhá sada vzorků působení teploty ( $-20 \pm 0,3$ ) °C - dále jen „snížená teplota“, „COLD“ či „C“. Vzorky byly odebírány po 7, 14, 21 a 28 dnech od jejich umístění do komory.

Skupiny vzorků jsou pro jednoduchou identifikaci označeny druhem materiálu (HIPS/ABS), číslem udávajícím počet týdnů teplotního namáhání (1/2/3/4) a druhem teploty (viz výše – HOT/COLD – H/C). Materiály teplotně nezátížené jsou označeny jako „originál“ či „0“.

Zkoušky materiálů byly provedeny v době od 24 do 48 hodin po vyjmutí vzorků z klimakomory. 24hodinový časový úsek od okamžiku vyjmutí vzorků z komory byl určen pro teplotní kondicionaci vzorků ve zkušebním prostředí.

Neklimatizovaná zkušební tělesa byla odzkoušena ještě před započítáním klimatických záteží vzorků.

## 8 POUŽITÉ MATERIÁLY

Zkoumanými materiály jsou houževnatý polystyren (HIPS) a akrylonitrilbutadienstyren (ABS). Oba polymery jsou modifikované polystyrenové plasty.

### 8.1 Houževnatý polystyren

Byl použit materiál Edistir SR 550 od výrobce Versalis. Jedná se o termoplast ISO 2897-PS-I,M,083-12-07-18. Následující tabulka uvádí překlad normativního popisu a udává jeho účel a vlastnosti:

*Tab. 8. Význam označení materiálu Edistir SR 550 dle ČSN EN ISO 19063.*

Blok	Význam bloku	Hodnota bloku
ISO 2897 PS-I	materiál	houževnatý polystyren
M	způsob zpracování	vstřikování
083	teplota měknutí dle Vicata	80 ÷ 85 °C
12	hmotnostní index toku taveniny	8 ÷ 16 g/10 min
07	vrubová houževnatost Charpy	6 ÷ 9 kJ/m <sup>2</sup>
18	Youngův ohybový modul	1500 ÷ 2000 MPa

Jak vyplývá z označení materiálu dle normy, není tento HIPS plněný, barvený, procesně stabilizovaný či stabilizovaný proti působení tepla nebo světla.

Doporučená kondicionaci tohoto materiálu dle normy [31] je při (23 ± 2) °C a relativní vlhkosti (50 ± 10) % po dobu minimálně 16 hodin.

### 8.2 Akrylonitrilbutadienstyren

Byl použit materiál Starex HF-0660I od výrobce Samsung Cheil Industries. Je určen pro obecné použití, např. pro výrobu malých domácích spotřebičů a zařízení, hraček, v automobilovém průmyslu a pro drobné domácí potřeby. [32] [33]

Výrobce neposkytl informace o stabilizaci polymeru či o přesném zastoupení jeho složek.

Doporučená kondicionace tohoto materiálu dle normy [34] je při (23 ± 2) °C a relativní vlhkosti (50 ± 10) % po dobu minimálně 16 hodin.

## 9 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

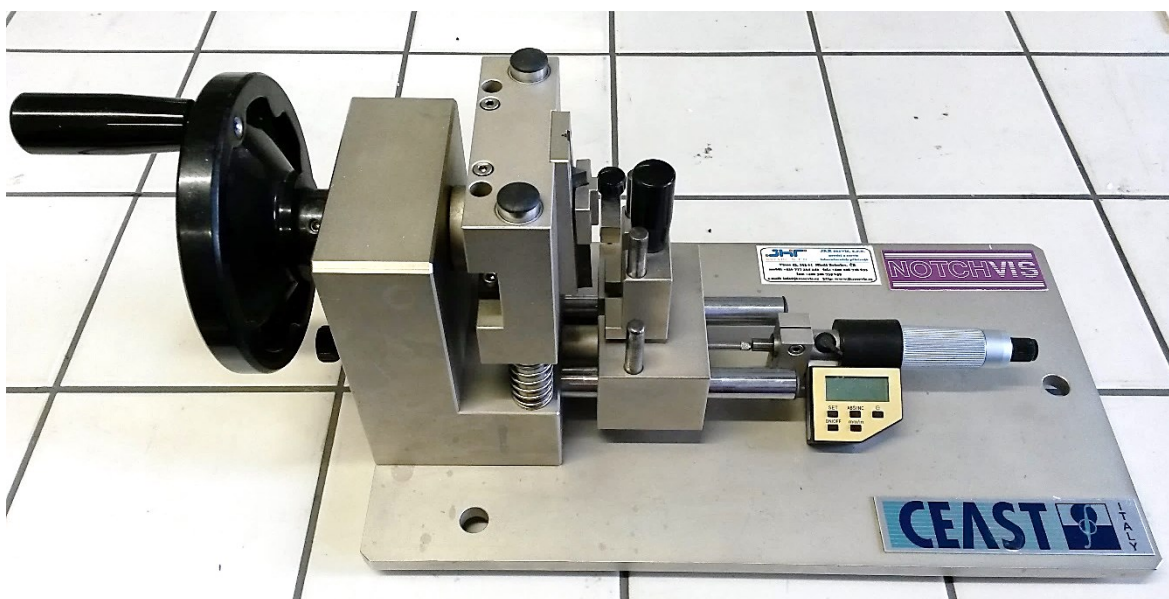
Zkušební tělesa byla vyrobena dle ČSN EN ISO 294-1 vstřikováním materiálů Edistir SR 550 (PS-I) a STAREX ABS HF-0660I (ABS) na strojích Arburg Allrounder 470 H pro výrobu těles A1 + B1 a Arburg Allrounder 170 U pro výrobu těles A12.

Procesní podmínky jsou uvedeny v přílohách P I a P II. Výstříky zkušebních těles byly po zchlazení ručně zbaveny vtokového systému jeho ustrížením.

Tab. 9. Technické parametry použitých vstřikovacích strojů.

Technické údaje	Vstřikovací stroj	
	Arburg Allrounder 470 H 1000-400	Arburg Allrounder 170 U 150
Max. objem jedné dávky [cm <sup>3</sup> ]	201	10,5
Max. uzavírací síla [kN]	1000	150
Průměr šneku [mm]	35	15
Vzdálenost mezi sloupky [mm]	470 x 470	170 x 170
Max. vyhazovací síla [kN]	40	16

Pro zkoušku vrubové houževnatosti byly v tělesech B1 vytvořeny vruby tvaru V (45°) o hloubce 2,0 mm ruční vrubovačkou CEAST NotchVis opatřenou mikrometrickým ručním posuvem. Vruby v tělesech byly vytvořeny ještě před jejich umístěním do klimatických komor.



Obr. 30. Ruční vrubovačka CEAST NotchVis.

## 10 TEPLOTNÍ STÁRNUTÍ MATERIÁLŮ

Zkušební tělesa jednoho materiálu byla umístěna do dvou klimatických komor Angelantoni Discovery DM340C na ocelové rošty rovnoměrně do jedné vrstvy. Současně byla v jedné komoře nastavena zvýšená teplota, ve druhé komoře teplota snižena. Časomíra byla spuštěna až v okamžiku dosažení požadovaných teplot a vzorky byly postupně odebírány v týdenních intervalech ( $168 \pm 1$ ) hod.



Obr. 31. Umístění zkušebních těles v klimakomoře.

Po vytažení vzorků z komor byly v jedné vrstvě teplotně kondicionovány při teplotě  $22 \pm 1$  °C a relativní vlhkosti  $25 \div 35$  %. Po dokončení čtvrtého týdne stárnutí těles jednoho materiálu byla do komor vložena tělesa druhého materiálu a celý cyklus se opakoval.

Tab. 10. Technické parametry klimakomor Angelantoni Discovery DM340C.

Objem komory	337 litrů
Rozsah teploty	$-75$ °C $\div$ $180$ °C
Rozsah hodnoty relativní vlhkosti (při teplotách $10$ °C $\div$ $95$ °C)	$10$ % $\div$ $98$ %
Max. teplotní fluktuace	$\pm 0,3$ °C
Max. fluktuace relativní vlhkosti	$\pm 3$ %
Max. rychlost ohřívání	$4,5$ °C.min <sup>-1</sup>
Max. rychlost chlazení	$2,3$ °C.min <sup>-1</sup>



## 11 POPIS ZKOUŠEK

### 11.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena dle normy ISO 527 na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456 opatřeném pneumatickými čelistmi 5 kN. Rychlosti posuvu příčnicku byly zvoleny 50, 200 a 600 mm.min<sup>-1</sup> pro charakterizaci chování materiálů při různých rychlostech zatěžování. Měření E modulu bylo provedeno při rychlosti 1 mm.min<sup>-1</sup>.

#### Charakteristiky zkoušky:

- Zkušební těleso: A1
- Předzatížení vzorku: 2 N
- Počáteční vzdálenost mezi čelistmi: 115 mm
- Počáteční vzdálenost mezi extenzometry: 50 mm
- Snímač síly: 2kN

#### Podmínky měření:

- Rozsah teploty  
23,1 ÷ 24,9 °C
- Rozsah vlhkosti  
23,4 ÷ 33,7 %

### 11.2 Rázová zkouška v tahu

Rázová zkouška v tahu byla měřena podle normy ISO 8256 rázovým kladivem Zwick Roell HIT50. Byly zvolena kyvadla o jmenovité energii 15 J, 25 J a 50 J pro sledování chování materiálů při různých hodnotách energie rázu.

#### Charakteristiky zkoušky:

- Zkušební těleso: A12
- Jmenovitá nárazová rychlost kyvadla: 3,807 m s<sup>-1</sup>
- Vzdálenost mezi čelistmi: 40 mm
- Hmotnost příčnicku: 120 g
- Způsob korekce tření kyvadla v uložení: naprázdno

#### Podmínky měření:

- Rozsah teploty  
22,9 ÷ 24,2 °C
- Rozsah vlhkosti  
28,8 ÷ 39,7 %

#### 11.2.1 Postup měření

- 1) Kyvadlo bylo prokývnuto naprázdno pro stanovení a kompenzaci ztrát třením v uložení kyvadla.
- 2) Zkušební těleso bylo upnuto do příčnicku za pomoci speciálního přípravku.
- 3) Těleso i s příčnickem bylo vloženo do stojanu stroje a upnuto do čelisti.
- 4) Kyvadlo bylo spuštěno, po přeražení vzorku bylo zastaveno ruční brzdou.

### 11.3 Měření rázové a vrubové houževnatosti

Rázová a vrubová houževnatost byla měřena podle normy ISO 197 rázovým kladivem Zwick Roell HIT50.

**Charakteristiky zkoušky:**

- Zkušební těleso: B1
- Jmenovitá energie kyvadla: 50 J
- Jmenovitá nárazová rychlost kyvadla: 3,807 m s<sup>-1</sup>
- Vzdálenost opěrných patek: 50 mm
- Způsob korekce tření kyvadla v uložení: naprázdno

**Podmínky měření:**

- Rozsah teploty  
22,9 ÷ 24,2 °C
- Rozsah vlhkosti  
28,8 ÷ 39,7 %

#### 11.3.1 Postup měření

- 1) Kyvadlo bylo prokývnuto naprázdno pro stanovení a kompenzaci ztrát třením v uložení kyvadla.
- 2) Zkušební těleso bylo umístěno na podpěry a opřeno o patky stylem „edgewise“.
- 3) V případě měření vrubové houževnatosti bylo těleso umístěno na podpěry vrubem ve směru kyvu kladiva stylem „edgewise“ a vrub byl vycentrován na střed mezi patkami středící ručičkou.
- 4) Kyvadlo bylo spuštěno, po přeražení vzorku bylo zastaveno ruční brzdou.

### 11.4 Měření tvrdosti

Tvrdost byla měřena tvrdoměrem Shore D OMAG AFFRI Y5030 dle normy ISO 868. Oproti normě byl zvolen počet 15 měření pro statistické vyhodnocení.

Tvrdoměr byl součástí stojanu ART 13 od stejného výrobce. Tvrdoměr byl propojen s digitálním vyhodnocovacím zařízením AFFRI Hardness Tester pro automatické vyhodnocení měření.

**Charakteristiky zkoušky:**

- Zkušební těleso: A1
- Hmotnost přitlačného závaží: 6 kg
- Doba zatížení: 15 s

**Podmínky měření:**

- Rozsah teploty  
22,6 ÷ 24,0 °C
- Rozsah vlhkosti  
22,5 ÷ 31,3 %

### 11.4.1 Postup měření

- 1) Zkušební těleso bylo položeno na výsuvnou ocelovou podložku rozšířenou koncovou částí tělesa pod tvrdoměr.
- 2) Zatlačením páky stojanu byla podložka se zkušebním tělesem přiblížena ke hrotu tvrdoměru a plynulým a dalším rychlým zatlačením páky dolů došlo ke kontaktu tvrdoměru s tělesem. Tvrdoměr byl celou dobu pomocí stojanu přitlačován kolmo k tělesu hmotností 6 kg.
- 3) Po odečtu času byla vyhodnocovacím zařízením odečtena hodnota tvrdosti a byla uvolněna páka, čímž došlo k odsunutí podložky s tělesem.
- 4) Měření tvrdosti každé skupiny bylo provedeno na 3 tělesech, každé bylo změřeno 5krát v místě rozšířených konců, ovšem vždy v jiném místě a v dostatečné vzdálenosti od okraje.

## 11.5 Měření mikrotvrdosti

Měření mikrotvrdosti bylo provedeno na zařízení pro měření mikrotvrdosti a mikrovrpových testů CSM Micro Combi Tester.

### Charakteristiky zkoušky:

- Zkušební těleso: B1
- Zatížení indentoru: 1 N
- Doba zatížení: 90 s
- Metoda: Oliver & Pharr
- Vzorkovací frekvence: 10 Hz

### Podmínky měření:

- Rozsah teploty  
22,6 ÷ 24,0 °C
- Rozsah vlhkosti  
22,5 ÷ 31,3 %

### 11.5.1 Postup měření

- 1) Zkušební těleso bylo upnuto do čelistí přístroje.
- 2) Postupným posuvem bylo optikou najeto nad povrch tělesa a určen nulový bod dotykem indentoru silou 0,025 N.
- 3) Bylo nadefinováno obdélníkové pole 5 bodů měření po šířce tělesa a 6 bodů po jeho délce v rozestupech 500 μm mezi sebou v obou směrech.
- 4) Měření tvrdosti bylo následně automaticky provedeno ve všech 30 bodech nadefinovaného pole.

## 11.6 Měření barevnosti

Měření barevnosti vzorků bylo provedeno na spektrofotometru HunterLab UltraScan PRO D65. Důležitým faktorem je zde skutečnost, že měření proběhlo najednou až po ukončení teplotního namáhání všech sad vzorků a všech materiálů. Barevnost byla vyhodnocena v barevném prostoru CIELAB  $L^*a^*b^*$  pomocí programu EasyMatch QC.

### Charakteristiky zkoušky:

- Zkušební těleso: B1
- Geometrie přístroje: d/8
- Snímané spektrum: 400 ÷ 700 nm
- Metoda měření: Reflectance Specular Included

### Podmínky měření:

- Rozsah teploty  
23,3 ÷ 24,1 °C
- Rozsah vlhkosti  
24,4 ÷ 25,6 %

### 11.6.1 Postup měření

- 1) Byla provedena standardizace „absolutní bílé“ změřením barevnosti kalibrační bílé dlaždice a „absolutní černé“ změřením barevnosti kalibrační světelné pasti.
- 2) Pro samotné měření byla použita metoda „Average Method“ s použitím 3 kusů vzorků, kdy z jednotlivých souborů byla změřena barevnost tří těles, z nichž program vytvořil průměrné hodnoty barevnosti a vznikl tak bod v barevném prostoru reprezentující daný soubor těles.
- 3) Pro studium vývoje žloutnutí vzorků byl změřen barevný standard neklimatizovaných těles „0“ daného materiálu a pomocí grafu 2D Color Plot srovnány ostatní soubory klimatizovaných těles.

## 11.7 Měření teploty skelného přechodu

Teplota skelného přechodu byla měřena prostřednictvím přístroje Mettler Toledo DSC 1.

### Charakteristiky zkoušky:

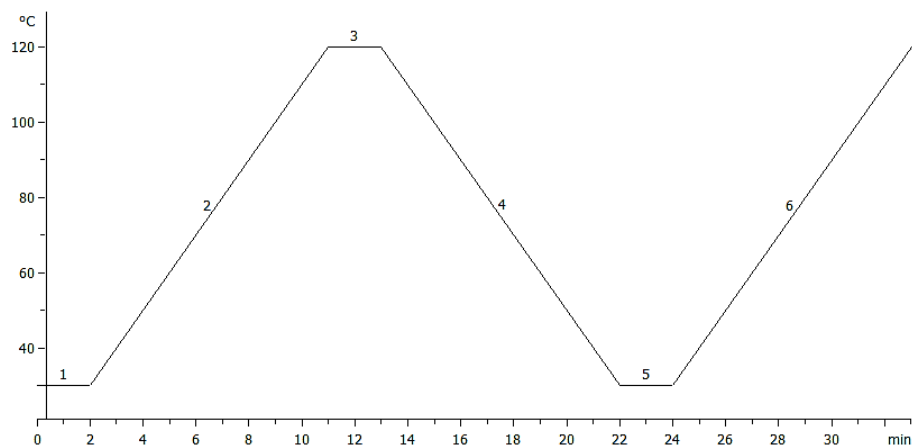
- Zkušební těleso: B1
- DSC pánvičky: ME-27331 40  $\mu$ l
- Rychlost zahřívání vzorku: 10 K.min<sup>-1</sup>
- Rychlost ochlazování vzorku: 10 K.min<sup>-1</sup>
- Počet cyklů ohřev-chlazení: 2
- Vzorkovací frekvence cyklu: 1 Hz
- Metoda určení T<sub>g</sub>: Midpoint ISO (inflexní bod)

### Podmínky měření:

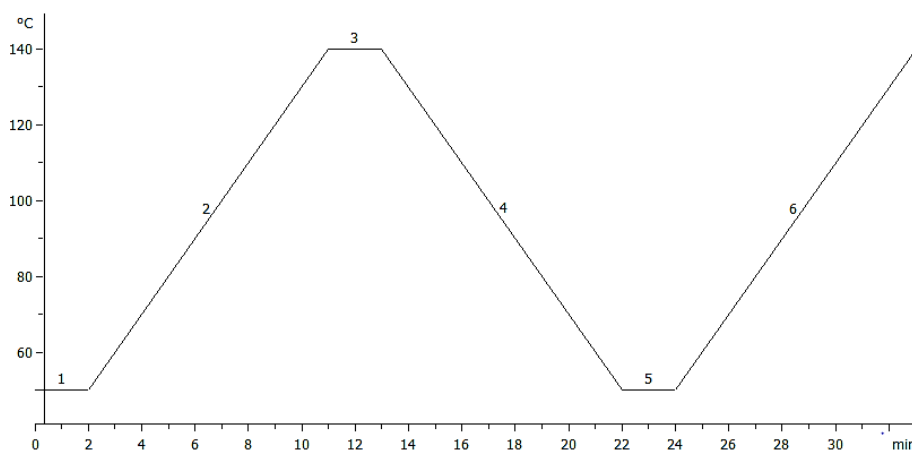
- Rozsah teploty  
22,5 ÷ 24,6 °C
- Rozsah vlhkosti  
23,1 ÷ 29,4 %

### 11.7.1 Postup měření

- 1) Ručně odstříhnutý kus (cca 1 cm) zkušební tělesa B1 byl uchycen do upínacích čelistí mikrotomu Leica RM2255 a jedním zakrojením byla odebrána povrchová vrstva o tloušťce 50  $\mu\text{m}$ .
- 2) Odřezek byl rozkrojen skalpelem na menší kousky a tyto byly vloženy do DSC pánvičky ME-27331 40  $\mu\text{l}$ .
- 3) Byly nastaveny teplotní charakteristiky programu automatického měření pro dané materiály (Obr. 32 a Obr. 33) a byl uložen pro pozdější měření jednotlivých vzorků.
- 4) Pánvička se vzorkem byla vložena do komory přístroje a proběhlo měření.
- 5) Změřené křivky byly vyhodnoceny v programu Mettler STARe Evaluation proložení funkce Glass Transition v oblasti změny tepelné kapacity. Proložené úsečky byly ručně přizpůsobeny křivce a program vyhodnotil charakteristiky skelného přechodu.



Obr. 32. Grafické znázornění teplotního cyklu DSC měření HIPS.



Obr. 33. Grafické znázornění teplotního cyklu DSC měření ABS.

## 11.8 FTIR spektroskopie

Měření bylo provedeno na spektrometru Nicolet Avatar 320 FT-IR. Vyhodnocení křivek bylo provedeno v programu OMNIC.

### Charakteristiky zkoušky:

- Zkušební těleso: B1
- Snímaný vlnčet:  $4000 \div 535 \text{ cm}^{-1}$
- Rozlišení:  $2 \text{ cm}^{-1}$

### Podmínky měření:

- Rozsah teploty  
 $22,5 \div 24,6 \text{ °C}$
- Rozsah vlhkosti  
 $23,1 \div 29,4 \%$

### 11.8.1 Postup měření

- 1) Snímač byl očištěn pomocí papírového tamponu a propylalkoholu.
- 2) Byla nasnímána křivka pozadí.
- 3) Těleso bylo přiloženo na snímač a přitlačeno přítlačným hrotem.
- 4) Byla nasnímána křivka materiálu.
- 5) Od křivky materiálu byl proveden odečet křivky pozadí.

## 12 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ DAT

Naměřené soubory dat v této práci vykazují normální i neznámá rozdělení, často se vyznačují velkými hodnotami rozptylu, značně se liší v hodnotách šikmosti a špičatosti a často obsahují odlehlé hodnoty. Bylo proto přistoupeno k vyjádření výsledků pomocí odhadu mediánu ve formátu  $\tilde{x}_{Q_1}^{Q_3}$  a statistickému vyhodnocení mediánovým testem hypotéz. Medián je mírou centrální tendence výběrového souboru a patří mezi kvantilové charakteristiky, které jsou méně citlivé na odlehlé hodnoty než charakteristiky momentové. [35]

### 12.1 Kvartily

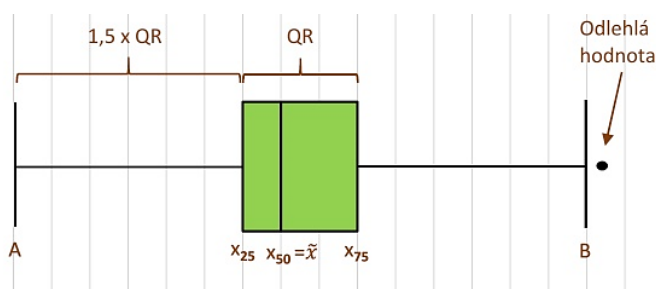
Kvartily jsou kvantily, které dělí uspořádaný soubor prvků na čtyři části, přičemž každá část obsahuje 25 % prvků. Kvartily jsou tři: *dolní kvartil*  $\tilde{x}_{0,25}$  ( $Q_1$ ) oddělující čtvrtinu nejmenších hodnot. Prostřední kvartil je *medián*  $\tilde{x}_{0,5}$  ( $M$ ) a rozděluje výběr prvků na dvě stejné části, z nichž každá obsahuje 50 % prvků. Jsou-li prvky seříděny podle velikosti vzestupně, je medián pro  $n$  liché  $\tilde{x}_{0,5} = x_k$ , kde  $k = \frac{n+1}{2}$  a pro  $n$  sudé  $\tilde{x}_{0,5} = \frac{x_{(k)} + x_{(k+1)}}{2}$  kde  $k = \frac{n}{2}$ . Třetím kvantilem je *horní kvartil*  $\tilde{x}_{0,75}$  ( $Q_3$ ) který vymezuje 75 % nejmenších prvků od 25 % největších. [35]

Z kvantilových odhadů rozptýlení se používá interkvartilové rozpětí IQR:

$$IQR = (\tilde{x}_{0,75} - \tilde{x}_{0,25}) \quad (19)$$

### 12.2 Boxplotový graf

Boxplotový či „krabicový“ graf znázorňuje rozptyl hodnot a symetrii souboru pomocí poloh kvartilů. Dále znázorňuje symetrii u konců rozdělení a identifikuje odlehlé hodnoty. Vnitřní část grafu tvoří obdélník vymezený  $Q_1$  a  $Q_3$ , od něj pokračují úsečky o délkách  $1,5 \times IQR$  ukončené mezemi – vnitřními hradbami A a B. Prvky výběru ležící mimo interval vnitřních hradeb jsou považovány za podezřelé, obvykle vybočující body. Pro ideální normální rozdělení je boxplot symetrický podle polohy mediánu.



Obr. 34. Obecný boxplotový graf. [36]

## 12.3 Testování hypotéz

Testování statistických hypotéz je nástroj pro posouzení, zda experimentálně získaná data vyhovují danému předpokladu. Úlohou hypotéz je rozhodnout na základě informací získaných z náhodných výběrů, zda přijmeme či zamítneme určité tvrzení o základním souboru. Nástroj pro toto rozhodování se nazývá statistický test. [37] [35]

### 12.3.1 Princip testování hypotéz

Při testování hypotéz porovnáváme dvě hypotézy (tvrzení), které stanovíme na začátku testování:

- $H_0$  hypotéza nulová (testovaná) – tvrzení, o němž předpokládáme, že platí. Obvykle označuje nulový rozdíl, např.  $\mu_1 = \mu_2$ ,  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ ,  $m = konst.$  apod.
- $H_A$  hypotéza alternativní – popírá platnost hypotézy nulové, jde o její logický opak, obvykle vyjadřuje diferenci či závislost mezi testovanými soubory.

Druhým krokem je stanovení hladiny významnosti  $\alpha$ , neboli pravděpodobnosti (míru rizika), že  $H_0$  neoprávněně zamítneme, i když platí (tzv. chyba I. druhu – volí se, obvykle 0,05 a méně). Na základě hladiny významnosti je vypočítána *kritická hodnota* (specifický kvantil příslušného statistického rozdělení). [37] [35]

Následuje výpočet *testovacího kritéria*, na jehož základě provádíme rozhodnutí o platnosti (neplatnosti) nulové hypotézy. Na základě srovnání těchto hodnot je potvrzena či vyvrácena platnost  $H_0$ . Převedením testovací statistiky do pravděpodobnostní škály dostaneme hodnotu  $p$ , která kvantifikuje pravděpodobnost realizace hodnoty testovací statistiky, pokud nulová hypotéza platí. Vyhodnocení je tak:

- v případě, že  $p < \alpha$  – zamítáme  $H_0$  ve prospěch  $H_A$  a mezi testovanými soubory je „statisticky významný rozdíl“,
- či pokud  $p > \alpha$  –  $H_0$  nezamítáme a mezi soubory je „statisticky nevýznamný rozdíl“.

### 12.3.2 Kruskal-Wallisův test

Jedná se o neparametrický test (nepředpokládá normální rozdělení testovaných souborů) pro porovnání mediánů více než dvou výběrových souborů; testuje hypotézu o jejich shodnosti. Výhoda mediánových testů je, že k jejich použití není nutný předpoklad podobnosti rozptylů výběrových souborů a normality dat. S výhodou se také používají u souborů s odlehlými hodnotami.



V této práci je třeba statisticky dokázat, zda vystavení zkušebních těles klimatickým podmínkám významně mění sledovanou (měřenou) veličinu. K tomu bude sloužit soustava Kruskal-Wallisových testů:

Tab. 11. Testy rovnosti mediánů naměřených souborů dat.

č. testu	znění hypotézy	vysvětlení
1	$H_0: \tilde{X}_{originál} = \tilde{X}_{1H} = \tilde{X}_{2H} = \tilde{X}_{3H} = \tilde{X}_{4H}$ $H_A: \text{NON}$	Testuje shodnost mediánů klimatizovaných těles HOT včetně originálu.
2	$H_0: \tilde{X}_{1H} = \tilde{X}_{2H} = \tilde{X}_{3H} = \tilde{X}_{4H}$ $H_A: \text{NON}$	Testuje shodnost mediánů pouze klimatizovaných těles HOT.
3	$H_0: \tilde{X}_{originál} = \tilde{X}_{1C} = \tilde{X}_{2C} = \tilde{X}_{3C} = \tilde{X}_{4C}$ $H_A: \text{NON}$	Testuje shodnost mediánů klimatizovaných těles COLD včetně originálu.
4	$H_0: \tilde{X}_{1C} = \tilde{X}_{2C} = \tilde{X}_{3C} = \tilde{X}_{4C}$ $H_A: \text{NON}$	Testuje shodnost mediánů pouze klimatizovaných těles COLD.

Všechny hypotézy jsou testovány na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ , což znamená, že  $H_0$  zamítám či nezamítám s možností omylu 5 %.

V případě platnosti  $H_0$  u testu 1(3) platí i  $H_0$  u testu 2(4). Z toho vyplývá, že celý soubor klimatizovaných těles má stejnou hodnotu mediánu sledované veličiny jako originál. V tomto případě neměl proces tepelného stárnutí na sledovanou veličinu významný vliv. Všechny tyto výběrové soubory pochází z jednoho základního souboru.

V případě zamítnutí  $H_0$  u testu 1(3) a zároveň v případě platnosti  $H_0$  u testu 2(4) můžeme konstatovat, že klimatizovaná tělesa mají stejnou hodnotu mediánu, která se ovšem liší od mediánu originálu. Vyplývá, že vystavení těles klimatickým podmínkám způsobilo změnu sledované veličiny, která se ovšem po dobu tepelného stárnutí již neměnila. Výběrové soubory klimatizovaných těles pochází z jiného základního souboru než výběrový soubor originálu.

V případě zamítnutí  $H_0$  u testu 1(3) i u testu 2(4) se mediány všech souborů vzájemně významně liší – u klimatizovaných těles i v porovnání s mediánem originálu. V tomto případě všechny soubory dat pochází z jiných základních souborů.

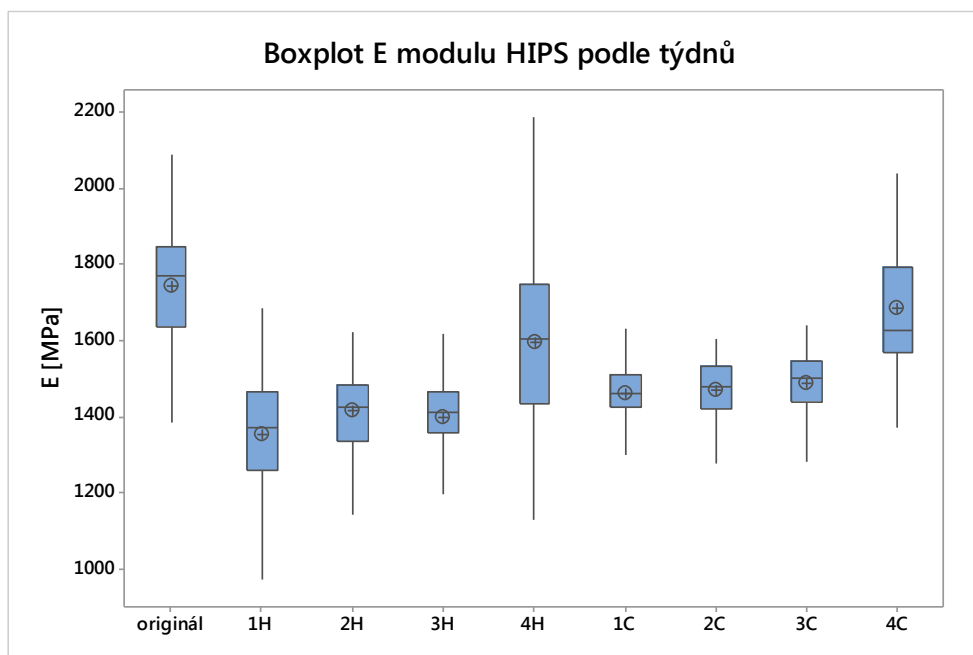
## 13 VÝSLEDKY ZKOUŠEK MATERIÁLU HIPS

### 13.1 Tahová zkouška

#### 13.1.1 Modul pružnosti v tahu

Tab. 12. Charakteristiky souborů měření  $E$  modulu materiálu HIPS.

soubor	$n$ [1]	$\bar{E}$ [MPa]	$s_E$ [MPa]	$V_E$ [%]	$min_E$ [MPa]	$Q_1$ [MPa]	$\tilde{E}$ [MPa]	$Q_3$ [MPa]	$max_E$ [MPa]	$IQR$ [MPa]
originál	150	1742,2	137,7	7,90	1386,2	1634,5	1769,8	1844,0	2089,5	209,5
1H	75	1353,1	148,6	10,98	974,1	1258,9	1370,4	1466,3	1684,1	207,4
2H	75	1414,2	108,5	7,67	1094,0	1335,1	1425,5	1484,8	1624,0	149,7
3H	75	1398,3	123,9	8,86	959,7	1356,0	1411,4	1464,2	1663,2	108,2
4H	75	1593,4	228,4	14,33	722,8	1436,1	1603,7	1748,6	2184,8	312,5
1C	75	1462,6	78,0	5,33	1249,8	1424,9	1459,5	1510,3	1662,2	85,5
2C	75	1469,9	80,5	5,48	1145,0	1420,8	1478,8	1531,3	1603,2	110,4
3C	75	1487,5	89,3	6,01	1224,8	1438,6	1502,9	1546,8	1642,0	108,2
4C	75	1682,8	171,9	10,21	1371,8	1569,0	1625,4	1790,5	2193,8	221,6



Obr. 35. Graf vývoje  $E$  modulu materiálu HIPS.

Vyhodnocení:

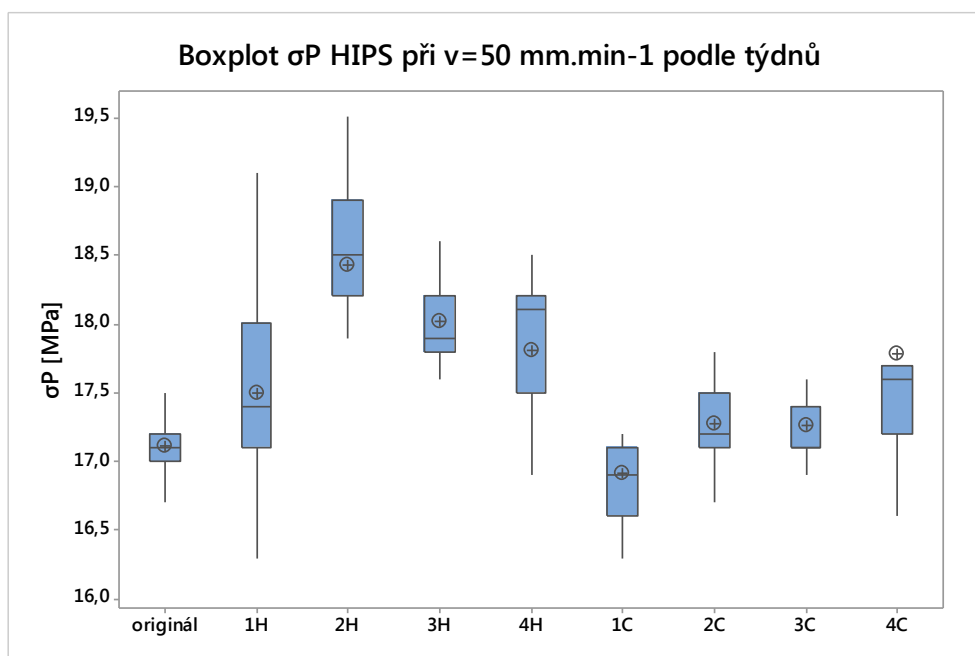
- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{E}_{HIPS\ HOT}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 2)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{E}_{HIPS\ HOT}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{E}_{HIPS\ COLD}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 4)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{E}_{HIPS\ COLD}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.

Stárnutí za zvýšené i snížené teploty zapříčinilo pokles E modulu oproti originálu  $1769,8 \frac{1844,0}{1634,5}$  MPa u všech souborů vždy na nižší hodnotu, nejméně na  $1370,4 \frac{1466,3}{1258,9}$  MPa (-22,6 %) v prvním týdnu u HOT těles, a  $1459,5 \frac{1510,3}{1424,9}$  MPa (-17,5 %) v prvním týdnu u COLD těles.

### 13.1.2 Rychlost deformace $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ – napětí na mezi pevnosti

Tab. 13. Charakteristiky měření napětí na mezi pevnosti v tahu materiálu HIPS při rychlosti deformace  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

soubor	$\frac{n}{[1]}$	$\frac{\bar{\sigma}_P}{[MPa]}$	$\frac{s_{\sigma_P}}{[MPa]}$	$\frac{V_{\sigma_P}}{[\%]}$	$\frac{\min_{\sigma_P}}{[MPa]}$	$\frac{Q_1}{[MPa]}$	$\frac{\bar{\sigma}_P}{[MPa]}$	$\frac{Q_3}{[MPa]}$	$\frac{\max_{\sigma_P}}{[MPa]}$	$\frac{IQR}{[MPa]}$
originál	30	17,117	0,221	1,29	16,6	17,0	17,1	17,2	17,5	0,2
1H	15	17,500	0,676	3,86	16,3	17,1	17,4	18,0	19,1	0,9
2H	15	18,427	0,678	3,68	16,5	18,2	18,5	18,9	19,5	0,7
3H	15	18,020	0,857	4,76	15,8	17,8	17,9	18,2	19,5	0,4
4H	15	17,813	0,583	3,27	16,4	17,5	18,1	18,2	18,5	0,7
1C	15	16,913	0,473	2,80	16,3	16,6	16,9	17,1	18,4	0,5
2C	15	17,280	0,278	1,61	16,7	17,1	17,2	17,5	17,8	0,4
3C	15	17,267	0,547	3,17	16,5	17,1	17,1	17,4	19,0	0,3
4C	15	17,780	0,933	5,25	16,6	17,2	17,6	17,7	19,6	0,5



Obr. 36. Graf vývoje napětí na mezi pevnosti v tahu HIPS při rychlosti deformace  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

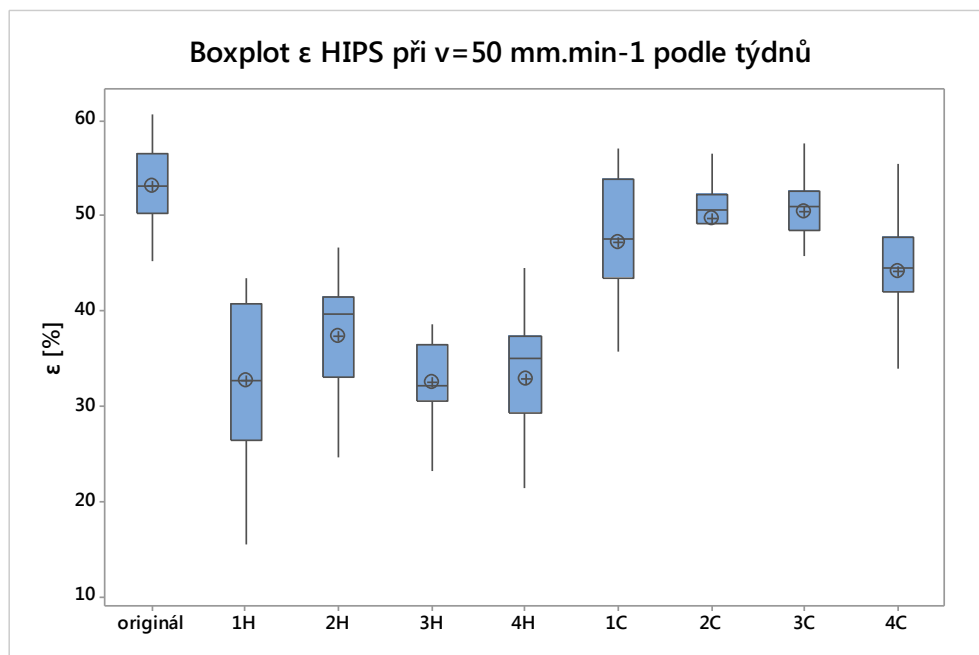
Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\sigma}_P_{HIPS\ HOT\ v=50}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 2)  $p = 0,001 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\sigma}_P_{HIPS\ HOT\ v=50}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\sigma}_P_{HIPS\ COLD\ v=50}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 4)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\sigma}_P_{HIPS\ COLD\ v=50}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.

### 13.1.3 Rychlost deformace 50 mm.min<sup>-1</sup> – tažnost

Tab. 14. Charakteristiky souborů měření tažnosti materiálu HIPS při rychlosti deformace 50 mm.min<sup>-1</sup>.

soubor	$n$ [1]	$\bar{\epsilon}$ [%]	$s_{\epsilon}$ [%]	$V_{\epsilon}$ [%]	$min_{\epsilon}$ [MPa]	$Q_1$ [%]	$\tilde{\epsilon}$ [%]	$Q_3$ [%]	$max_{\epsilon}$ [MPa]	$IQR$ [%]
originál	30	53,10	3,83	7,22	45,3	50,2	53,1	56,5	60,6	6,3
1H	15	32,77	8,61	26,29	15,5	26,5	32,7	40,8	43,5	14,3
2H	15	37,28	6,13	16,43	24,6	33,0	39,7	41,5	46,7	8,5
3H	15	32,59	4,70	14,43	23,2	30,5	32,1	36,4	38,7	5,9
4H	15	32,82	9,29	28,31	8,8	29,3	35,1	37,3	44,5	8,0
1C	15	47,13	9,56	20,29	19,9	43,4	47,6	53,9	57,1	10,5
2C	15	49,71	5,35	10,77	38,0	49,2	50,6	52,2	56,5	3,0
3C	15	50,38	3,72	7,38	41,7	48,5	50,9	52,6	57,5	4,1
4C	15	44,14	5,76	13,05	33,9	42,0	44,5	47,8	55,5	5,8



Obr. 37. Graf vývoje tažnosti HIPS při rychlosti deformace 50 mm.min<sup>-1</sup>.

Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\epsilon}_{HIPS\ HOT\ v=50}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 2)  $p = 0,195 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\epsilon}_{HIPS\ HOT\ v=50}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\epsilon}_{HIPS\ COLD\ v=50}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 4)  $p = 0,020 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\epsilon}_{HIPS\ COLD\ v=50}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.

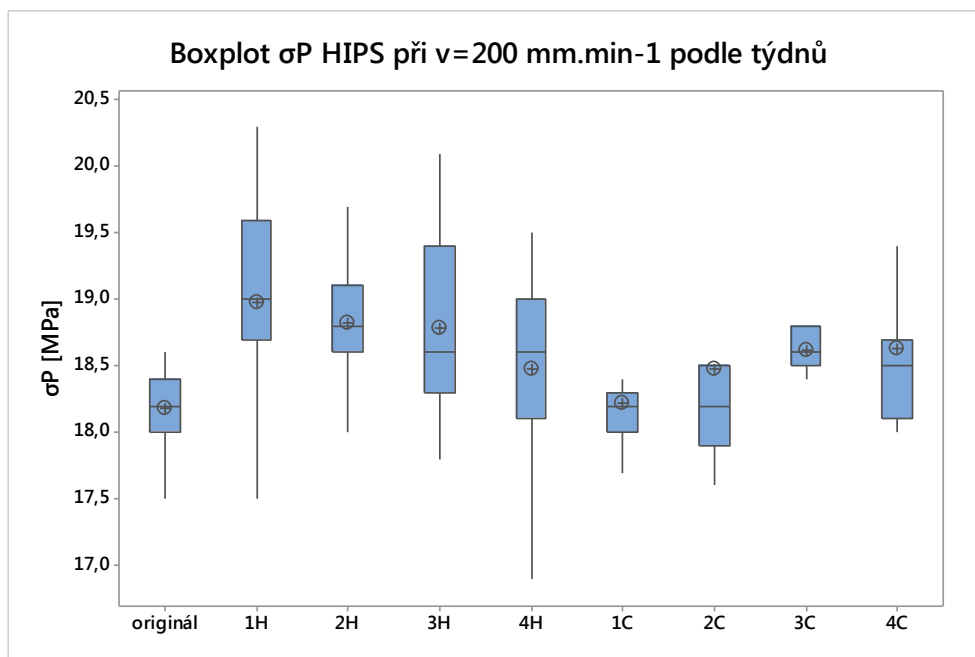
Stárnutí za zvýšené teploty zapříčinilo u všech HOT souborů nárůst pevnosti v tahu oproti originálu  $17,1 \frac{17,2}{17,0}$  MPa na maximum  $18,5 \frac{18,9}{18,2}$  MPa (+8,2 %) v týdnu druhém. Tažnost se v prvním týdnu snížila z hodnoty originálu  $53,1 \frac{53,1}{50,2}$  % na  $32,7 \frac{40,8}{26,5}$  % (-38,4 %) a dále se významně neměnila.

Snížená teplota způsobila mírné zvýšení pevnosti na hodnotu maxima  $17,6 \frac{17,7}{17,2}$  MPa (+2,9 %) v týdnu čtvrtém. Hodnoty tažnosti byly u všech COLD souborů nižší než hodnota originálu, nejméně  $44,5 \frac{47,8}{42,0}$  % (-16,2 %) v týdnu čtvrtém.

### 13.1.4 Rychlost deformace 200 mm.min<sup>-1</sup> – napětí na mezi pevnosti

Tab. 15. Charakteristiky souborů měření napětí na mezi pevnosti v tahu materiálu HIPS při rychlosti deformace 200 mm.min<sup>-1</sup>.

soubor	$\frac{n}{[1]}$	$\frac{\bar{\sigma}_p}{[MPa]}$	$\frac{s_{\sigma_p}}{[MPa]}$	$\frac{V_{\sigma_p}}{[%]}$	$\frac{\min_{\sigma_p}}{[MPa]}$	$\frac{Q_1}{[MPa]}$	$\frac{\bar{\sigma}_p}{[MPa]}$	$\frac{Q_3}{[MPa]}$	$\frac{\max_{\sigma_p}}{[MPa]}$	$\frac{IQR}{[MPa]}$
originál	30	18,187	0,261	1,43	17,5	18,0	18,2	18,4	18,6	0,4
1H	15	18,973	0,896	4,72	16,8	18,7	19,0	19,6	20,3	0,9
2H	15	18,820	0,557	2,96	17,8	18,6	18,8	19,1	19,9	0,5
3H	15	18,787	0,690	3,67	17,8	18,3	18,6	19,4	20,1	1,1
4H	15	18,473	0,658	3,56	16,9	18,1	18,6	19,0	19,5	0,9
1C	15	18,227	0,622	3,41	17,5	18,0	18,2	18,3	20,2	0,3
2C	15	18,473	0,896	4,85	17,6	17,9	18,2	18,5	20,4	0,6
3C	15	18,620	0,560	3,01	17,7	18,5	18,6	18,8	20,3	0,3
4C	15	18,627	0,707	3,79	18,0	18,1	18,5	18,7	20,8	0,6



Obr. 38. Graf vývoje napětí na mezi pevnosti v tahu HIPS při rychlosti deformace  $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

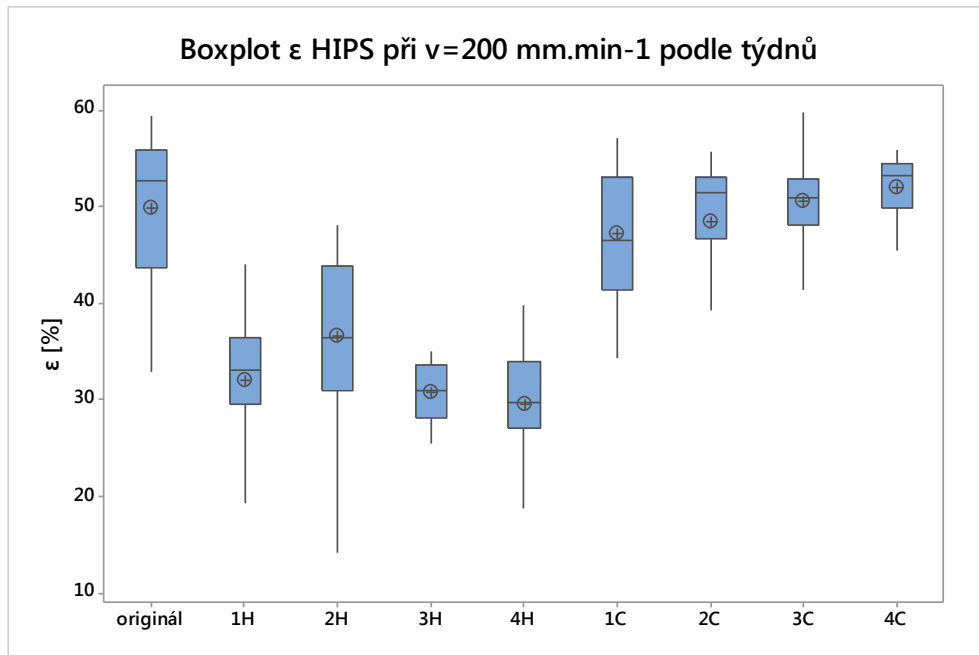
Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\sigma}_P \text{ HIPS } \text{HOT } v=200$  se v průběhu času významně mění.
- 2)  $p = 0,178 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\sigma}_P \text{ HIPS } \text{HOT } v=200$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,002 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\sigma}_P \text{ HIPS } \text{COLD } v=200$  se v průběhu času významně mění.
- 4)  $p = 0,014 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\sigma}_P \text{ HIPS } \text{COLD } v=200$  jsou vzájemně statisticky odlišné.

### 13.1.5 Rychlost deformace $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ – tažnost

Tab. 16. Charakteristiky souborů měření tažnosti materiálu HIPS při rychlosti deformace  $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

soubor	$n$ [1]	$\bar{\epsilon}$ [%]	$s_{\epsilon}$ [%]	$V_{\epsilon}$ [%]	$\frac{\min_{\epsilon}}{[MPa]}$	$Q_1$ [%]	$\bar{\epsilon}$ [%]	$Q_3$ [%]	$\frac{\max_{\epsilon}}{[MPa]}$	IQR [%]
originál	30	49,77	7,73	15,53	32,9	43,7	52,7	55,8	59,3	12,1
1H	15	32,09	7,49	23,35	15,2	29,6	33,0	36,4	44,1	6,8
2H	15	36,67	8,74	23,84	14,2	31,0	36,5	43,9	48,0	12,9
3H	15	30,79	5,57	18,09	18,4	28,1	30,9	33,6	44,4	5,5
4H	15	29,56	6,00	20,29	18,8	27,0	29,8	34,0	39,8	7,0
1C	15	47,21	6,65	14,09	34,3	41,3	46,5	53,0	57,1	11,7
2C	15	48,36	7,92	16,39	24,2	46,6	51,5	53,0	55,6	6,4
3C	15	50,51	5,11	10,11	41,3	48,0	50,9	52,9	59,8	4,9
4C	15	51,94	3,20	6,16	45,5	49,8	53,1	54,5	55,8	4,7



Obr. 39. Graf vývoje tažnosti HIPS při rychlosti deformace 200 mm.min<sup>-1</sup>.

Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\epsilon}_{HIPS\ HOT\ v=200}$  se v průběhu času významně mění.
- 2)  $p = 0,025 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\epsilon}_{HIPS\ HOT\ v=200}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,291 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\epsilon}_{HIPS\ COLD\ v=200}$  se v průběhu času významně nemění.
- 4)  $p = 0,147 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\epsilon}_{HIPS\ COLD\ v=200}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.

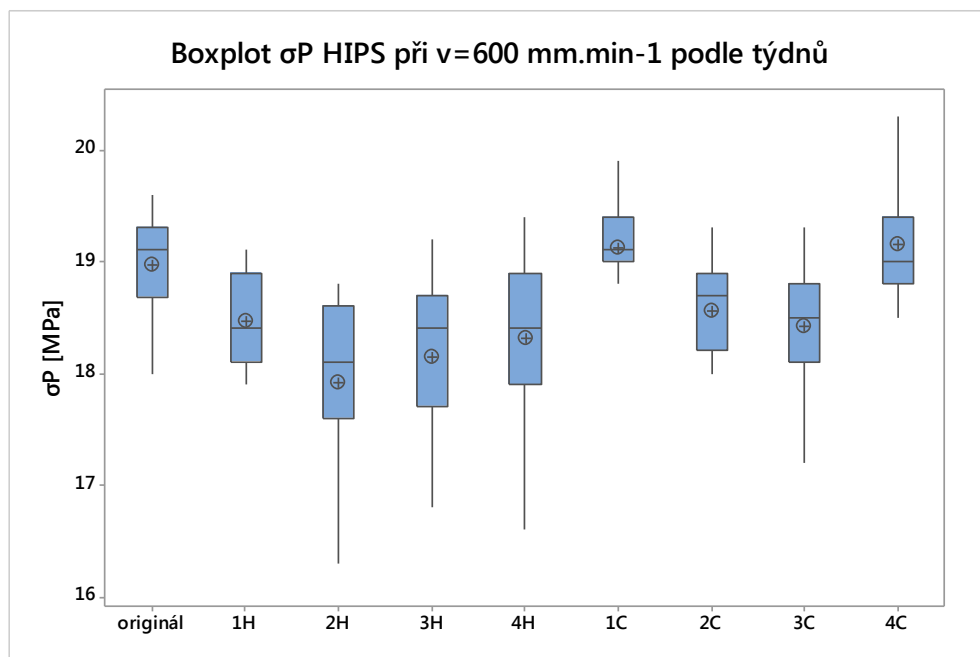
Stárnutí za zvýšené teploty zapříčinilo nárůst pevnosti v tahu z hodnoty originálu  $18,2 \frac{18,4}{18,0}$  MPa na hodnotu  $19,0 \frac{19,6}{18,7}$  MPa (+2,7 %) v prvním týdnu a dále se významně neměnila. Hodnoty tažnosti všech souborů HOT těles se oproti originálu  $52,7 \frac{55,8}{43,7}$  % snížily, nejméně na  $29,8 \frac{34,0}{27,0}$  % (-43,5 %) v týdnu čtvrtém.

Snížená teplota způsobila mírné zvýšení pevnosti nejvýše na hodnotu  $18,6 \frac{18,8}{18,5}$  MPa (+2,2 %), tažnost se oproti originálu významně nezměnila.

### 13.1.6 Rychlost deformace 600 mm.min<sup>-1</sup> – napětí na mezi pevnosti

Tab. 17. Charakteristiky souborů měření napětí na mezi pevnosti v tahu materiálu HIPS při rychlosti zatěžování 600 mm.min<sup>-1</sup>.

soubor	$n$ [1]	$\bar{\sigma}_P$ [MPa]	$s_{\sigma_P}$ [MPa]	$V_{\sigma_P}$ [%]	$\min_{\sigma_P}$ [MPa]	$Q_1$ [MPa]	$\tilde{\sigma}_P$ [MPa]	$Q_3$ [MPa]	$\max_{\sigma_P}$ [MPa]	$IQR$ [MPa]
originál	30	18,973	0,408	2,15	18,0	18,7	19,1	19,3	19,6	0,6
1H	15	18,460	0,400	2,16	17,9	18,1	18,4	18,9	19,1	0,8
2H	15	17,913	0,721	4,02	16,3	17,6	18,1	18,6	18,8	1,0
3H	15	18,140	0,899	4,96	15,8	17,7	18,4	18,7	19,2	1,0
4H	15	18,307	0,731	4,00	16,6	17,9	18,4	18,9	19,4	1,0
1C	15	19,127	0,395	2,07	18,1	19,0	19,1	19,4	19,9	0,4
2C	15	18,553	0,560	3,02	17,0	18,2	18,7	18,9	19,3	0,7
3C	15	18,427	0,559	3,03	17,2	18,1	18,5	18,8	19,3	0,7
4C	15	19,153	0,708	3,70	17,8	18,8	19,0	19,4	20,5	0,6



Obr. 40. Graf vývoje napětí na mezi pevnosti v tahu HIPS při rychlosti deformace 600 mm.min<sup>-1</sup>.

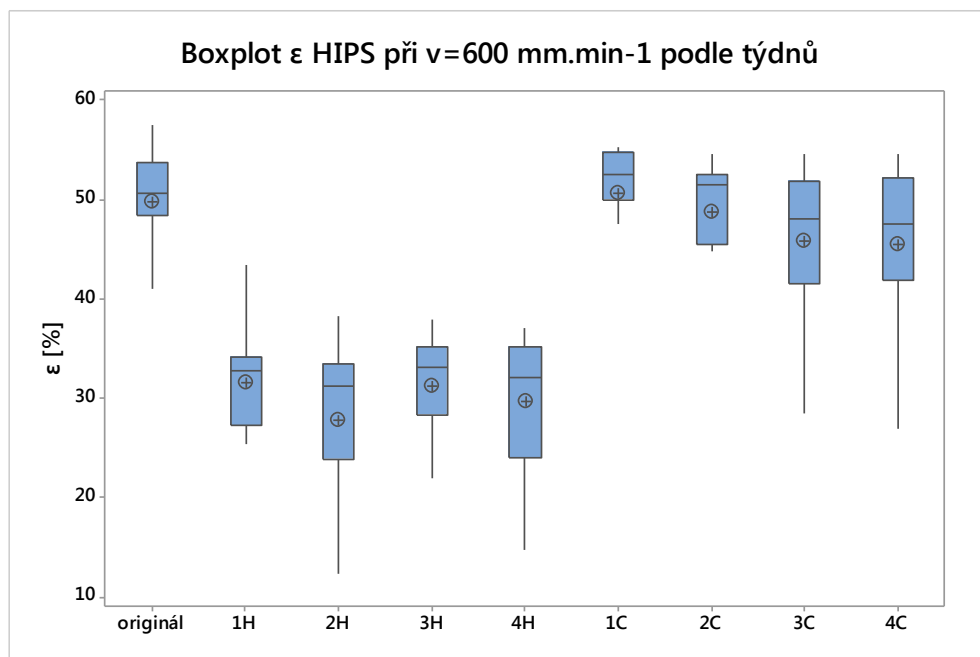
Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\sigma}_P_{HIPS\ HOT\ v=600}$  se v průběhu času významně mění.
- 2)  $p = 0,250 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\sigma}_P_{HIPS\ HOT\ v=600}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\sigma}_P_{HIPS\ COLD\ v=600}$  se v průběhu času významně mění.
- 4)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\sigma}_P_{HIPS\ COLD\ v=600}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.



13.1.7 Rychlost deformace 600 mm.min<sup>-1</sup> – tažnostTab. 18. Charakteristiky souborů měření tažnosti materiálu HIPS při rychlosti zatěžování 600 mm.min<sup>-1</sup>.

soubor	$\frac{n}{[1]}$	$\frac{\bar{\epsilon}}{[\%]}$	$\frac{s_{\epsilon}}{[\%]}$	$\frac{V_{\epsilon}}{[\%]}$	$\frac{min_{\epsilon}}{[MPa]}$	$\frac{Q_1}{[\%]}$	$\frac{\bar{\epsilon}}{[\%]}$	$\frac{Q_3}{[\%]}$	$\frac{max_{\epsilon}}{[MPa]}$	$\frac{IQR}{[\%]}$
originál	30	49,71	6,85	13,79	20,6	48,3	50,7	53,7	57,5	5,4
1H	15	31,53	7,19	22,80	13,6	27,2	32,7	34,2	43,4	7,0
2H	15	27,85	9,92	35,60	1,7	23,8	31,2	33,5	38,3	9,7
3H	15	31,31	4,58	14,62	21,9	28,3	33,1	35,1	38,0	6,8
4H	15	29,67	6,79	22,88	14,8	24,1	32,1	35,2	37,1	11,1
1C	15	50,54	6,03	11,93	35,3	50,0	52,5	54,8	55,3	4,8
2C	15	48,80	5,56	11,40	32,8	45,5	51,5	52,5	54,5	7,0
3C	15	45,79	7,18	15,68	28,4	41,6	48,1	51,8	54,6	10,2
4C	15	45,53	8,15	17,89	26,9	41,8	47,5	52,2	54,6	10,4

Obr. 41. Graf vývoje tažnosti HIPS při rychlosti deformace 600 mm.min<sup>-1</sup>.

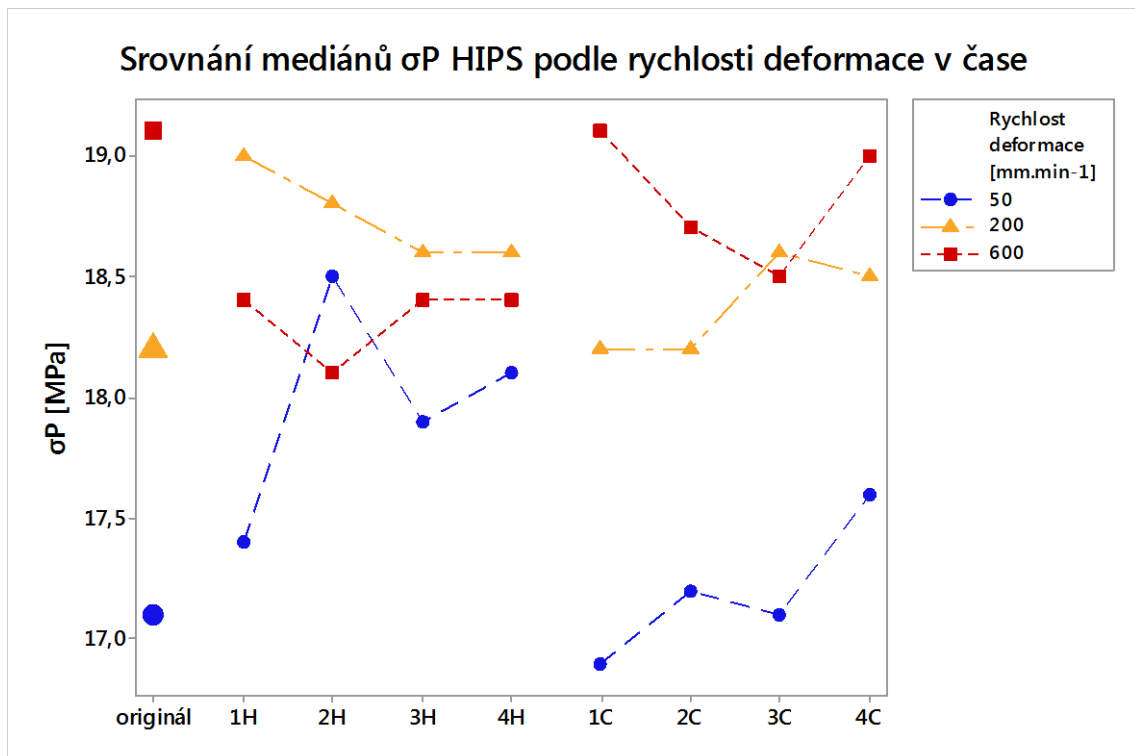
Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\epsilon}_{HIPS \text{ HOT } v=600}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 2)  $p = 0,788 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\epsilon}_{HIPS \text{ HOT } v=600}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,042 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\epsilon}_{HIPS \text{ COLD } v=600}$  se v průběhu času významně nemění.
- 4)  $p = 0,057 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\epsilon}_{HIPS \text{ COLD } v=600}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.

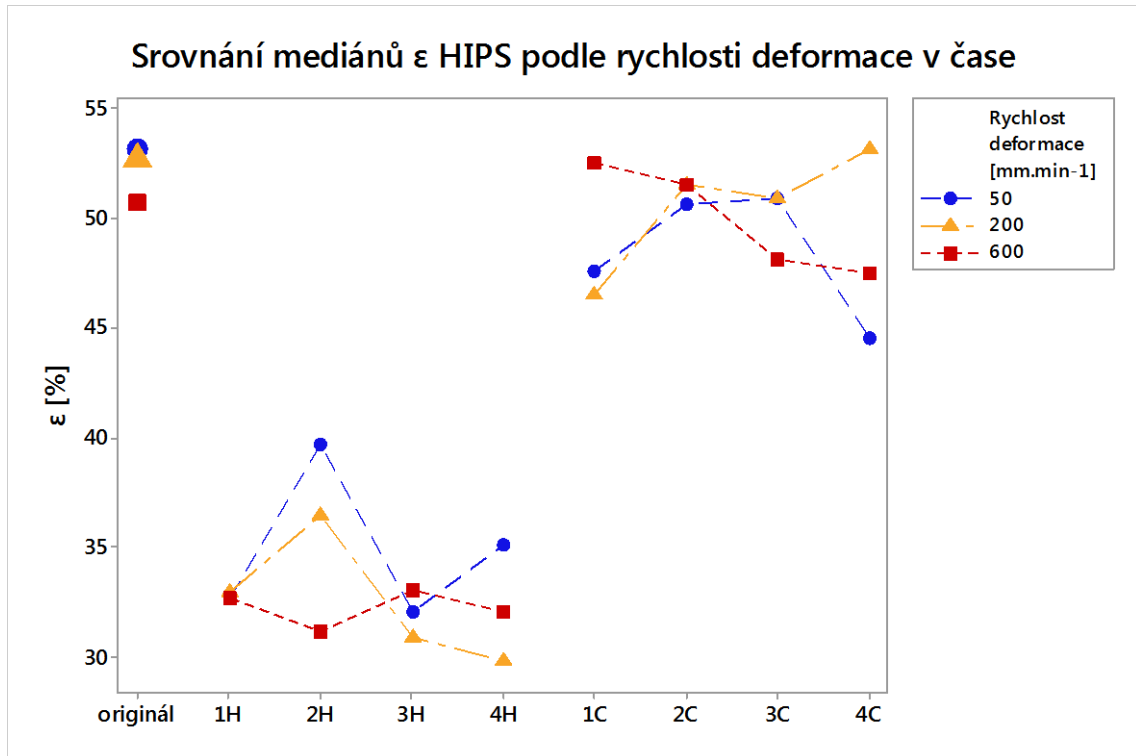
Stárnutí za zvýšené teploty zapříčinilo pokles pevnosti všech souborů HOT těles z hodnoty originálu  $19,1 \frac{19,3}{18,7}$  MPa na hodnotu  $18,4 \frac{18,9}{18,1}$  MPa (-3,7 %) v prvním týdnu a dále se významně neměnila. Hodnota tažnosti se snížila z hodnoty originálu  $50,7 \frac{53,7}{48,3}$  % na hodnotu  $32,7 \frac{34,2}{27,2}$  % (-35,5 %) v prvním týdnu a dále se významně neměnila.

Snížená teplota způsobila mírné snížení pevnosti na hodnotu minima  $18,5 \frac{18,8}{18,1}$  MPa (-3,1 %) v týdnu třetím, tažnost se oproti originálu významně nezměnila.

### 13.1.8 Vzájemné srovnání

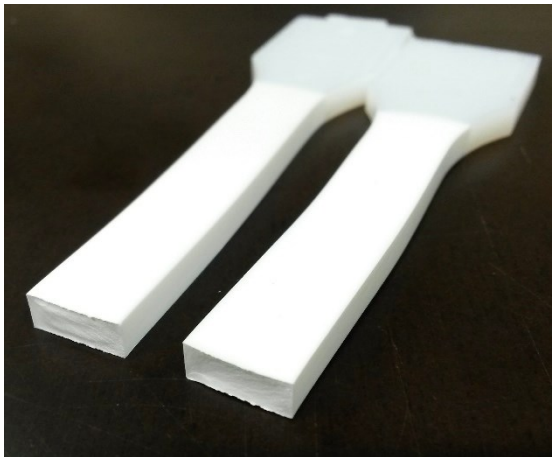


Obr. 42. Srovnání mediánů napětí na mezi pevnosti materiálu HIPS v čase podle rychlosti deformace.

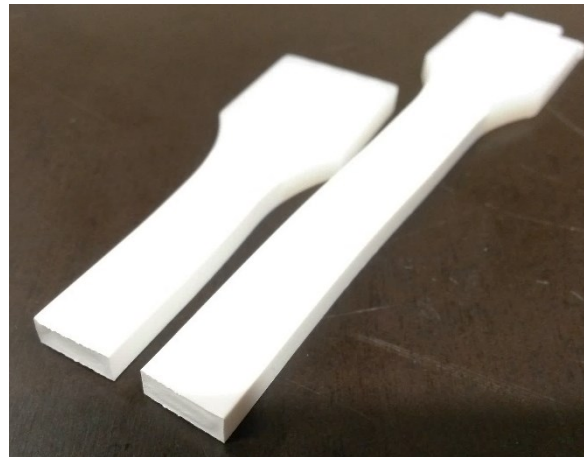


Obr. 43. Srovnání mediánů tažnosti materiálu HIPS v čase podle rychlosti deformace.

### 13.1.9 Fotografie



Obr. 44. Zkušební těleso HIPS 0 po tahové zkoušce – křehký lom.



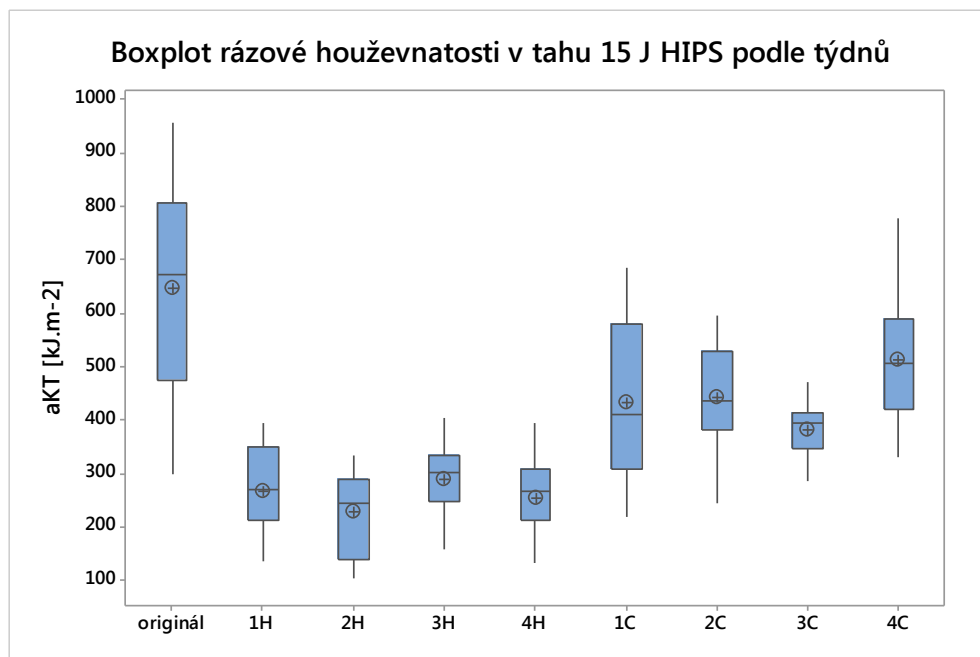
Obr. 45. Zkušební těleso HIPS 4H po tahové zkoušce – křehký lom.

## 13.2 Rázová zkouška v tahu

### 13.2.1 Nominální energie rázu 15 J

Tab. 19. Charakteristiky měření rázové houževnatosti v tahu materiálu HIPS při energii rázu 15 J.

soubor	$n$ [1]	$\bar{a}_{KT}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$s_{a_{KT}}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$V_{a_{KT}}$ [%]	$\min_{a_{KT}}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_1$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\bar{a}_{KT}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_3$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\max_{a_{KT}}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$IQR$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]
originál	30	648,2	185,5	28,61	297,4	473,1	672,7	806,4	957,1	333,3
1H	15	266,7	86,3	32,35	136,2	211,9	269,3	348,2	394,4	136,3
2H	15	227,1	76,6	33,73	104,1	140,7	244,0	290,2	334,0	149,5
3H	15	289,7	61,1	21,11	158,3	246,8	303,0	333,3	405,6	86,5
4H	15	255,1	68,0	26,64	132,8	211,9	265,4	307,0	394,0	95,1
1C	15	431,3	144,7	33,55	219,5	307,9	409,5	578,5	683,9	270,6
2C	15	441,9	105,2	23,80	244,5	380,9	436,3	530,0	596,6	149,0
3C	14	380,3	49,7	13,06	285,3	347,5	393,5	413,3	469,9	65,7
4C	15	512,2	125,1	24,43	329,8	419,8	504,9	589,4	778,2	169,6



Obr. 46. Graf vývoje rázové houževnatosti v tahu HIPS při energii rázu 15 J.

#### Vyhodnocení

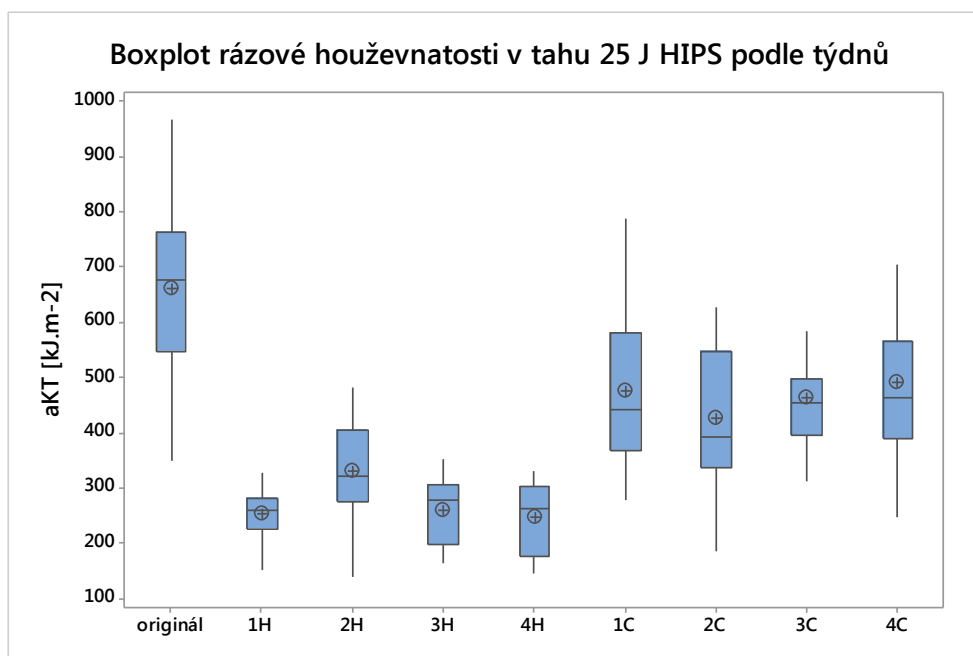
- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{KT \text{ HIPS } HOT \ 15J}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 2)  $p = 0,137 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{KT \text{ HIPS } HOT \ 15J}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{KT \text{ HIPS } COLD \ 15J}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 4)  $p = 0,019 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{KT \text{ HIPS } COLD \ 15J}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.

U všech souborů rázová houževnatost v tahu 15 J oproti hodnotě originálu  $672,7 \frac{806,4}{473,1} \text{ kJ.m}^{-2}$  poklesla. Stárnutí za zvýšené teploty zapříčinilo pokles houževnatosti v prvním týdnu na  $269,3 \frac{348,2}{211,9} \text{ kJ.m}^{-2}$  (-60,0 %) a dále se významně neměnila. Snížená teplota způsobila snížení houževnatosti na minimum  $393,5 \frac{413,3}{347,5} \text{ kJ.m}^{-2}$  (-41,5 %) v týdnu třetím.

### 13.2.2 Nominální energie rázu 25 J

Tab. 20. Charakteristiky souborů měření rázové houževnatosti v tahu materiálu HIPS při energii rázu 25 J.

soubor	$n$ [1]	$\bar{a}_{KT}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$s_{a_{KT}}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$V_{a_{KT}}$ [%]	$\min_{a_{KT}}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_1$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\tilde{a}_{KT}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_3$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\max_{a_{KT}}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	IQR [kJ.m <sup>-2</sup> ]
originál	30	660,7	152,0	23,01	348,5	546,1	675,9	762,7	966,1	216,5
1H	15	252,3	55,7	22,06	151,1	225,4	260,1	281,8	328,6	56,4
2H	15	331,1	100,1	30,23	139,2	276,1	320,7	403,9	480,9	127,7
3H	15	260,7	61,1	23,43	163,9	197,3	278,8	306,0	353,2	108,7
4H	15	246,3	64,4	26,16	146,0	177,2	262,6	301,8	329,9	124,6
1C	15	475,3	151,0	31,77	279,4	366,8	442,6	580,5	788,5	213,7
2C	15	425,3	139,9	32,89	184,6	337,4	393,6	545,9	627,0	208,5
3C	15	464,5	88,7	19,10	311,8	395,0	454,4	497,4	673,0	102,4
4C	15	490,2	147,0	29,99	247,2	390,3	463,1	566,5	836,3	176,2



Obr. 47. Graf vývoje rázové houževnatosti v tahu HIPS při energii rázu 25 J.

Vyhodnocení:

1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{KT \text{ HIPS } HOT \text{ 25J}}$  se v průběhu času statisticky významně mění.

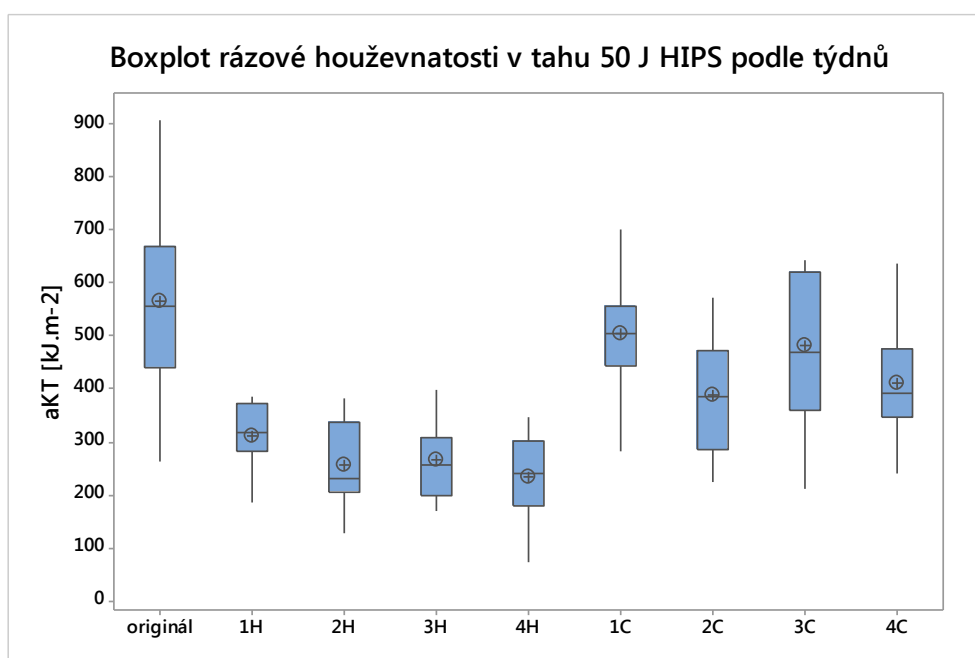
- 2)  $p = 0,032 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{KT\ HIPS\ HOT\ 25J}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{KT\ HIPS\ COLD\ 25J}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 4)  $p = 0,778 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{KT\ HIPS\ COLD\ 25J}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.

U všech souborů rázová houževnatost v tahu 25 J oproti originálu  $675,9 \frac{762,7}{546,1} \text{ kJ.m}^{-2}$  poklesla. Stárnutí za zvýšené teploty zapříčinilo pokles houževnatosti na hodnotu minima  $260,1 \frac{281,8}{225,4} \text{ kJ.m}^{-2}$  (-61,5 %) v prvním týdnu. Snížená teplota způsobila snížení houževnatosti v prvním týdnu na  $442,6 \frac{580,5}{366,8} \text{ kJ.m}^{-2}$  (-34,5 %) a dále se významně neměnila.

### 13.2.3 Nominální energie rázu 50 J

Tab. 21. Charakteristiky souborů měření rázové houževnatosti v tahu materiálu HIPS při energii rázu 50 J.

soubor	$n$ [1]	$\bar{a}_{KT}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$s_{a_{KT}}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$V_{a_{KT}}$ [%]	$\min_{a_{KT}}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_1$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\tilde{a}_{KT}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_3$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\max_{a_{KT}}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	IQR [kJ.m <sup>-2</sup> ]
originál	30	566,3	170,9	30,18	264,0	439,4	555,5	669,2	907,6	229,9
1H	15	312,7	57,0	18,21	186,7	282,9	318,5	372,5	385,5	89,6
2H	14	257,8	77,1	29,90	128,3	204,1	231,3	337,2	382,1	133,2
3H	15	267,8	75,4	28,15	168,7	199,0	257,1	307,5	398,9	108,5
4H	15	235,6	78,9	33,50	73,0	178,7	241,4	301,5	346,8	122,8
1C	15	504,5	112,9	22,39	280,8	443,5	505,3	554,6	701,3	111,1
2C	14	387,1	101,9	26,32	224,7	286,3	385,8	471,4	573,1	185,1
3C	15	480,5	134,5	27,99	212,1	358,3	469,4	618,5	643,5	260,2
4C	15	412,2	115,0	27,89	241,2	347,9	392,9	476,6	636,5	128,6



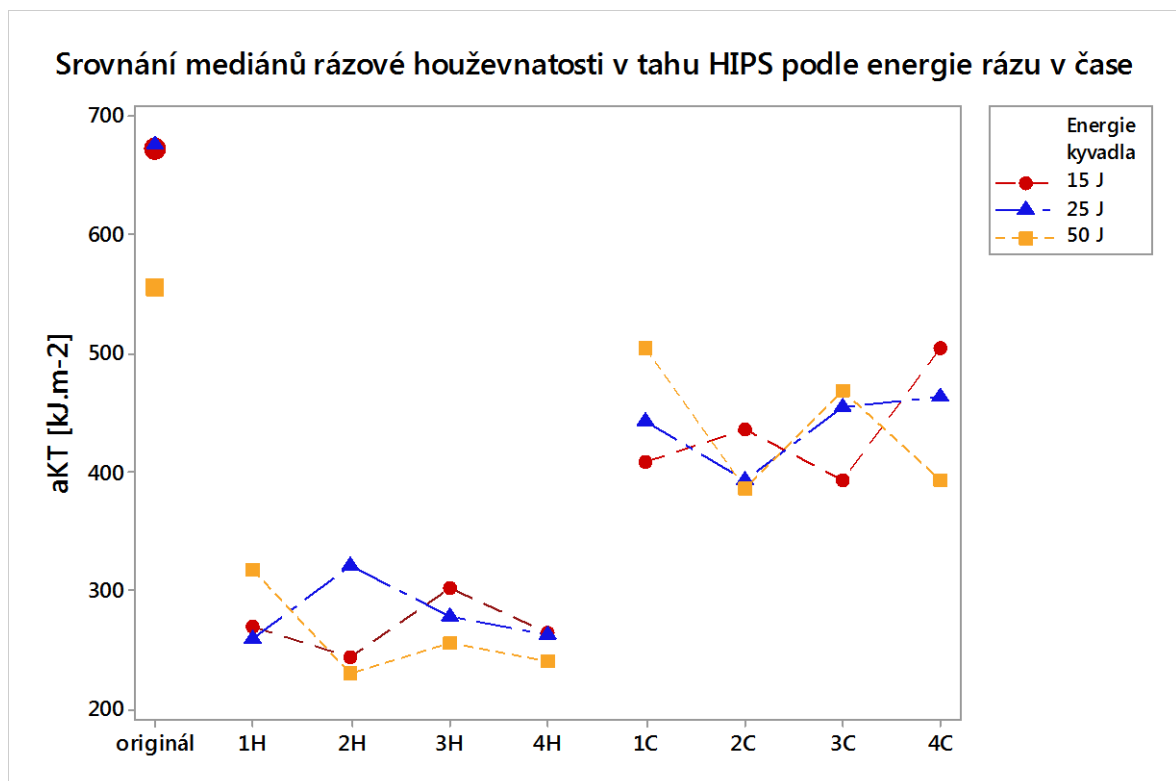
Obr. 48. Graf vývoje rázové houževnatosti v tahu HIPS při energii rázu 50 J.

Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{KT\ HIPS\ HOT\ 50J}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 2)  $p = 0,053 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{KT\ HIPS\ HOT\ 50J}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,002 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{KT\ HIPS\ COLD\ 50J}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 4)  $p = 0,030 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{KT\ HIPS\ COLD\ 50J}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.

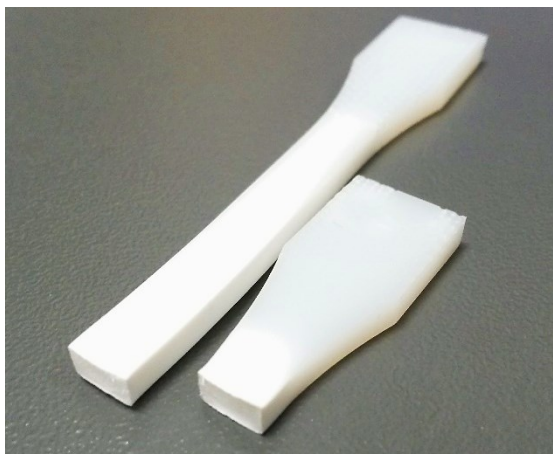
U všech souborů rázová houževnatost v tahu 50 J oproti originálu  $555,5 \frac{669,2}{439,4} \text{ kJ.m}^{-2}$  poklesla. Stárnutí za zvýšené teploty zapříčinilo pokles houževnatosti v prvním týdnu na  $318,5 \frac{372,5}{282,9} \text{ kJ.m}^{-2}$  (-42,6 %) a dále se významně neměnila. Snížená teplota způsobila snížení houževnatosti na minimum  $385,8 \frac{471,4}{286,3} \text{ kJ.m}^{-2}$  (-30,5 %) v týdnu druhém.

### 13.2.4 Vzájemné srovnání

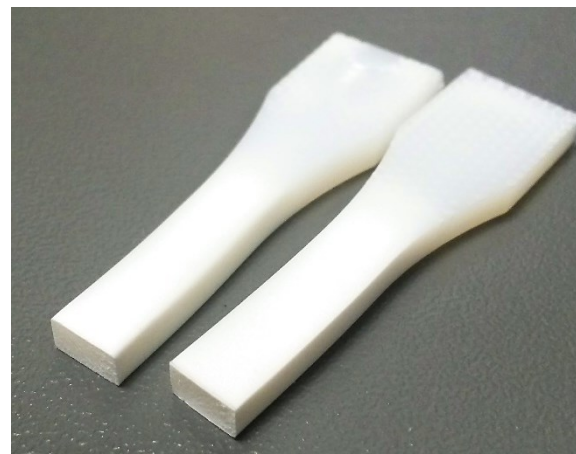


Obr. 49. Srovnání mediánů rázové houževnatosti v tahu v čase podle energie rázu.

## 13.2.5 Fotografie



Obr. 50. Zkušební těleso HIPS 0 po tahové zkoušce rázem – křehký lom.



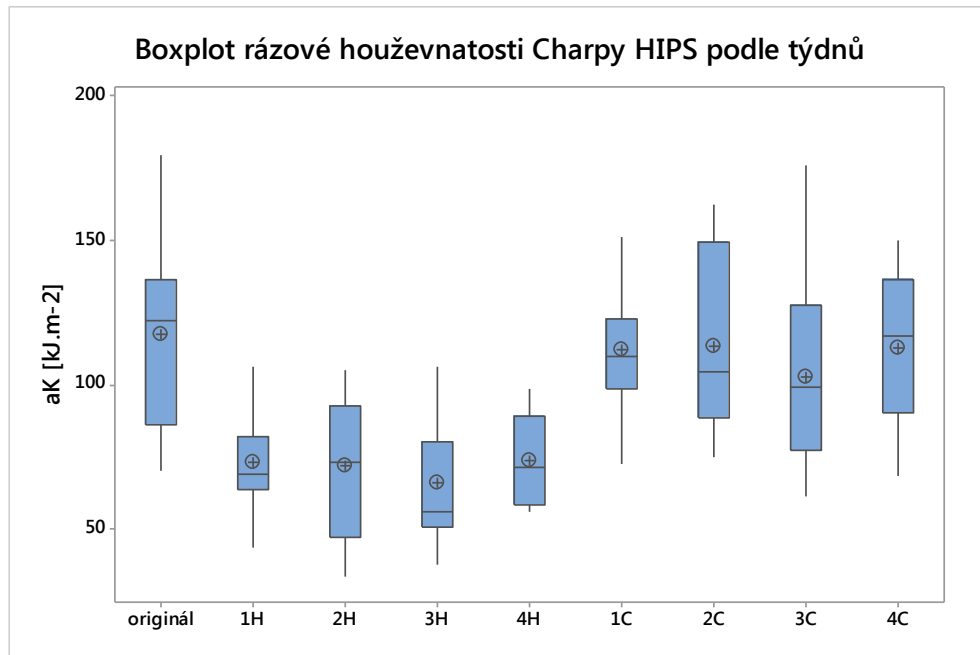
Obr. 51. Zkušební těleso HIPS 4H po tahové zkoušce rázem – křehký lom.

## 13.3 Rázová houževnatost Charpy

Tab. 22. Charakteristiky souborů měření rázové houževnatosti v ohybu materiálu HIPS.

soubor	$n$ [1]	$\bar{a}_K$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$s_{a_K}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$V_{a_K}$ [%]	$min_{a_K}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_1$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\tilde{a}_K$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_3$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$max_{a_K}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	IQR [kJ.m <sup>-2</sup> ]
originál	30	117,59	31,57	26,85	70,52	86,34	122,31	136,57	180,09	50,23
1H	15	73,13	15,50	21,19	43,87	64,00	68,85	81,93	106,52	17,93
2H	15	72,06	23,54	32,66	33,53	47,30	73,40	92,84	105,25	45,54
3H	15	66,09	21,23	32,12	37,58	50,87	56,01	80,23	106,37	29,36
4H	15	73,89	14,10	19,08	56,09	58,75	71,29	89,36	98,90	30,61
1C	15	112,21	25,40	22,63	72,69	98,47	110,19	123,27	166,00	24,80
2C	15	113,61	29,72	26,16	74,77	88,38	104,56	149,50	162,46	61,12
3C	15	102,88	32,47	31,56	61,33	77,20	99,59	127,65	176,27	50,45
4C	15	113,12	26,19	23,15	68,38	90,16	116,86	136,51	150,16	46,35



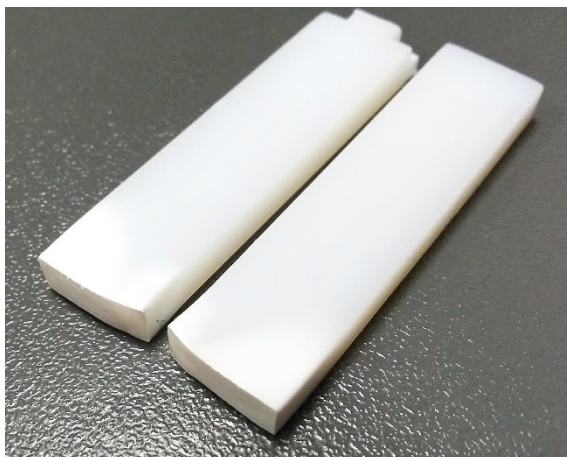


Obr. 52. Graf vývoje rázové houževnatosti v ohybu HIPS.

Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{K HIPS HOT}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 2)  $p = 0,591 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{K HIPS HOT}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,659 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{K HIPS COLD}$  se v průběhu času statisticky významně nemění.
- 4)  $p = 0,676 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{K HIPS COLD}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.

Stárnutí těles za zvýšené teploty způsobilo snížení rázové houževnatosti u všech souborů HOT těles, oproti originálu  $122,31 \frac{136,57}{86,34} \text{ kJ.m}^{-2}$  se hodnota snížila na  $68,85 \frac{81,93}{64,00} \text{ kJ.m}^{-2}$  (-43,7 %) a dále se významně neměnila. Snížená teplota hodnotu rázové houževnatosti originálu významně nezměnila.



Obr. 53. Zkušební těleso HIPS 0 po zkoušce Charpy – křehký lom.

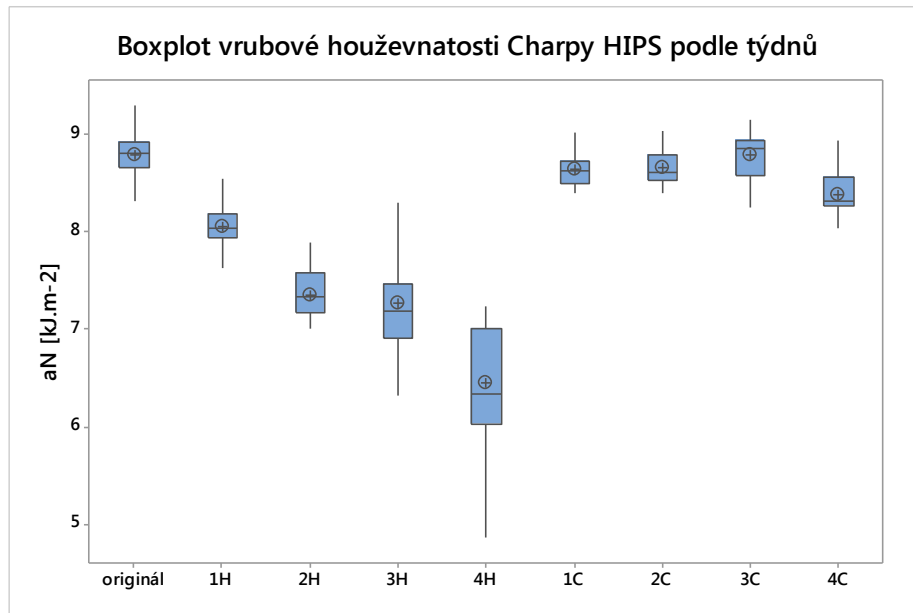


Obr. 54. Zkušební těleso HIPS 4H po zkoušce Charpy – křehký lom.

### 13.4 Vrubová houževnatost Charpy

Tab. 23. Charakteristiky souborů měření vrubové houževnatosti v ohybu materiálu HIPS.

soubor	$n$ [1]	$\bar{a}_N$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$s_{a_N}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$V_{a_N}$ [%]	$\min_{a_N}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_1$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\tilde{a}_N$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_3$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\max_{a_N}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	IQR [kJ.m <sup>-2</sup> ]
originál	30	8,783	0,209	2,37	8,32	8,66	8,81	8,92	9,29	0,27
1H	15	8,059	0,228	2,83	7,63	7,93	8,03	8,18	8,55	0,25
2H	15	7,347	0,358	4,88	6,46	7,17	7,34	7,58	7,89	0,41
3H	15	7,273	0,589	8,10	6,32	6,91	7,18	7,47	8,68	0,56
4H	15	6,444	0,644	9,99	4,87	6,03	6,34	7,00	7,23	0,97
1C	15	8,634	0,167	1,93	8,39	8,50	8,63	8,73	9,01	0,23
2C	15	8,651	0,175	2,03	8,40	8,52	8,60	8,78	9,03	0,26
3C	15	8,779	0,241	2,75	8,24	8,58	8,85	8,93	9,14	0,35
4C	15	8,383	0,233	2,78	8,03	8,26	8,32	8,56	8,94	0,30

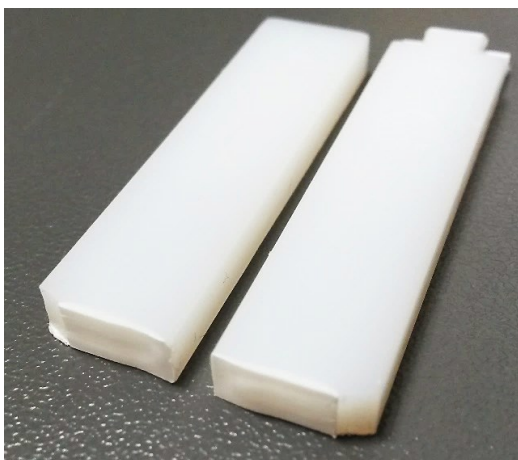


Obr. 55. Graf vývoje vrubové houževnatosti v ohybu materiálu HIPS.

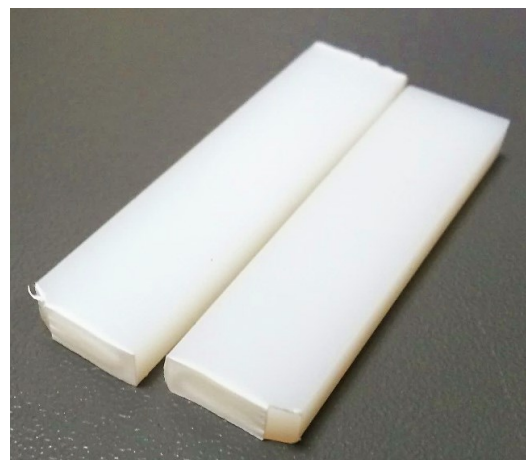
Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{N\ HIPS\ HOT}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 2)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{N\ HIPS\ HOT}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{N\ HIPS\ COLD}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 4)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{N\ HIPS\ COLD}$  jsou vzájemně statisticky odlišné

Stárnutí těles za zvýšené teploty způsobilo snížení vrubové houževnatosti u všech souborů úměrně délce stárnutí. Oproti originálu  $8,81 \frac{8,92}{8,66} \text{ kJ.m}^{-2}$  se hodnota snížila na minimum  $6,34 \frac{7,00}{6,03} \text{ kJ.m}^{-2}$  (-28,0 %) v týdnu čtvrtém. Snížená teplota způsobila jen mírné snížení houževnatosti na  $8,32 \frac{8,56}{8,26} \text{ kJ.m}^{-2}$  (-5,6 %) v týdnu čtvrtém.



Obr. 56. Zkušební těleso HIPS 0 opatřené vrubem po zkoušce Charpy – křehký lom.



Obr. 57. Zkušební těleso HIPS 4H s vrubem po zkoušce Charpy – křehký lom.

### 13.5 Vrubové číslo

Tab. 24. Hodnoty vrubového čísla HIPS podle týdnů.

soubor	originál	1H	2H	3H	4H	1C	2C	3C	4C
$k_V$ [1]	13,9	8,6	10,0	7,8	11,2	12,8	12,2	11,3	14,1

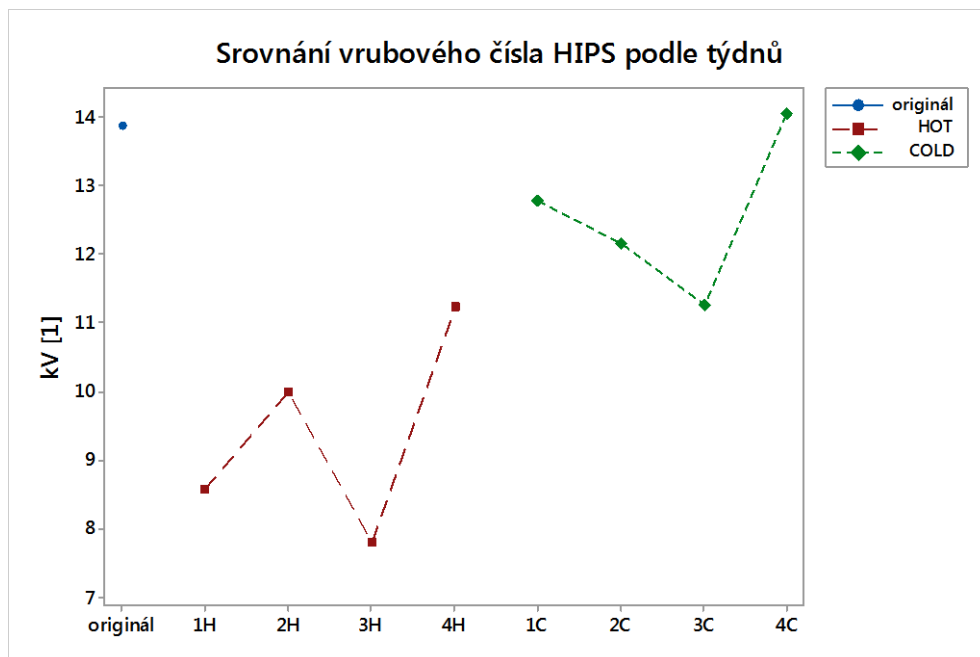
Vzorový výpočet vrubového čísla dle vztahu 11 pro originální HIPS:

$$k_{V \text{ HIPS } 0} = \frac{\tilde{a}_{K \text{ HIPS } 0}}{\tilde{a}_{N \text{ HIPS } 0}}$$

$$k_{V \text{ HIPS } 0} = \frac{122,31}{8,81}$$

$$k_{V \text{ HIPS } 0} = 13,9$$

Stárnutí za zvýšené teploty způsobilo pokles vrubového čísla oproti originálu 13,9 na hodnoty 7,8 až 10,0. Snížená teplota ponížila vrubové číslo jen mírně na hodnoty 11,3 až 14,1.

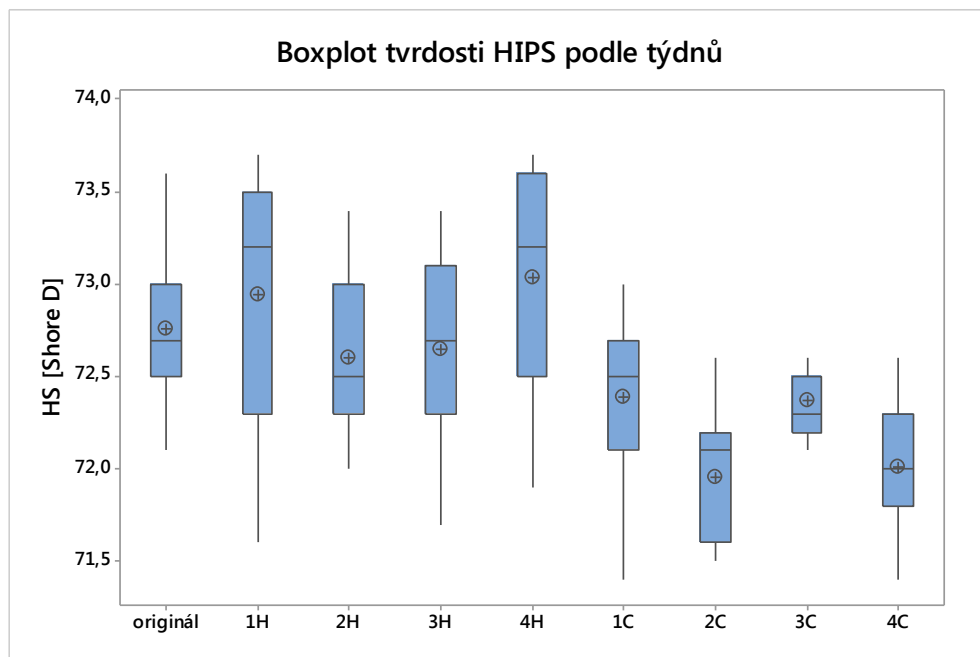


Obr. 58. Graf vývoje vrubového čísla materiálu HIPS.

### 13.6 Tvrdost

Tab. 25. Charakteristiky souborů měření tvrdosti materiálu HIPS.

soubor	$\frac{n}{[1]}$	$\frac{\bar{H}_S}{[ShoreD]}$	$\frac{s_{H_S}}{[ShoreD]}$	$\frac{V_{H_S}}{[%]}$	$\frac{\min_{H_S}}{[ShoreD]}$	$\frac{Q_1}{[ShoreD]}$	$\frac{\tilde{H}_S}{[ShoreD]}$	$\frac{Q_3}{[ShoreD]}$	$\frac{\max_{H_S}}{[ShoreD]}$	$\frac{IQR}{[ShoreD]}$
originál	15	72,760	0,356	0,49	72,1	72,5	72,7	73,0	73,6	0,5
1H	15	72,947	0,699	0,96	71,6	72,3	73,2	73,5	73,7	1,2
2H	15	72,607	0,394	0,54	72,0	72,3	72,5	73,0	73,4	0,7
3H	15	72,653	0,498	0,69	71,7	72,3	72,7	73,1	73,4	0,8
4H	15	73,033	0,585	0,80	71,9	72,5	73,2	73,6	73,7	1,1
1C	15	72,387	0,437	0,60	71,4	72,1	72,5	72,7	73,0	0,6
2C	15	71,953	0,380	0,53	71,5	71,6	72,1	72,2	72,6	0,6
3C	15	72,373	0,258	0,36	72,1	72,2	72,3	72,5	73,1	0,3
4C	15	72,013	0,354	0,49	71,4	71,8	72,0	72,3	72,6	0,5



Obr. 59. Graf vývoje tvrdosti materiálu HIPS.

Vyhodnocení:

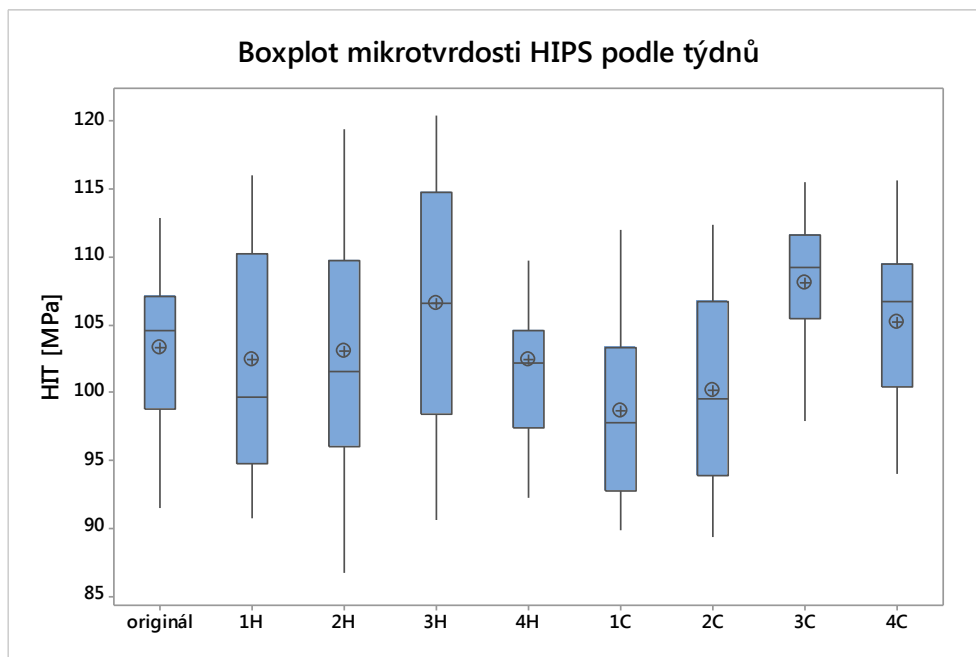
- 1)  $p = 0,102 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{H}_{S_{HIPS\ HOT}}$  se v průběhu času statisticky významně nemění.
- 2)  $p = 0,075 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{H}_{S_{HIPS\ HOT}}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{H}_{S_{HIPS\ COLD}}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 4)  $p = 0,002 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{H}_{S_{HIPS\ COLD}}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.

Stárnutí za zvýšené teploty významně nezměnilo tvrdost originálu  $72,7^{73,0}_{72,5}$  Shore D. Stárnutí za snížené teploty způsobilo u všech souborů mírný pokles tvrdosti na minimum  $72,0^{72,3}_{71,8}$  Shore D (-1,0 %) v týdnu čtvrtém.

### 13.7 Mikrotvrdost

Tab. 26. Charakteristiky souborů měření mikrotvrdosti materiálu HIPS.

soubor	$n$ [1]	$\bar{H}_{IT}$ [MPa]	$s_{H_{IT}}$ [MPa]	$V_{H_{IT}}$ [%]	$\min_{H_{IT}}$ [MPa]	$Q_1$ [MPa]	$\tilde{H}_{IT}$ [MPa]	$Q_3$ [MPa]	$\max_{H_{IT}}$ [MPa]	IQR [MPa]
originál	30	103,25	5,69	5,51	91,48	98,81	104,52	107,04	112,87	8,22
1H	30	102,36	10,17	9,93	90,70	94,70	99,60	110,17	135,44	15,47
2H	30	103,03	8,68	8,43	86,71	95,97	101,55	109,77	119,42	13,80
3H	30	106,62	8,49	7,97	90,56	98,41	106,60	114,75	120,38	16,33
4H	30	102,47	7,63	7,45	92,19	97,42	102,18	104,58	125,04	7,16
1C	30	98,59	6,46	6,55	89,83	92,70	97,74	103,30	111,91	10,60
2C	30	100,12	7,05	7,04	89,32	93,82	99,58	106,68	112,34	12,87
3C	30	108,04	4,69	4,34	97,89	105,47	109,21	111,59	115,49	6,12
4C	30	105,14	6,01	5,71	93,96	100,47	106,65	109,44	115,60	8,97



Obr. 60. Graf vývoje mikrotvrdosti materiálu HIPS.

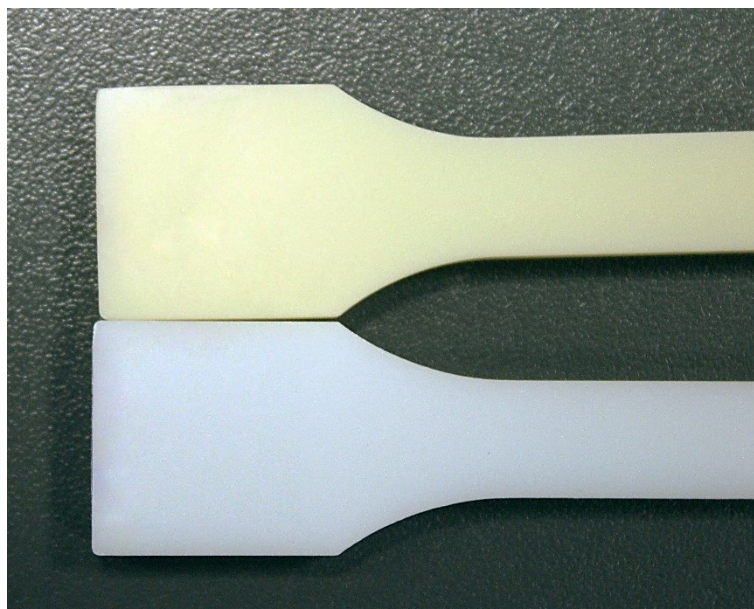
Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,144 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{H}_{IT \text{ HIPS } HOT}$  se v průběhu času statisticky významně nemění.
- 2)  $p = 0,114 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{H}_{IT \text{ HIPS } HOT}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{H}_{IT \text{ HIPS } COLD}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 4)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{H}_{IT \text{ HIPS } COLD}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.

Stárnutí za zvýšené teploty významně nezměnilo hodnotu mikrotvrlosti originálu  $104,52^{107,04}_{98,81}$  MPa. Stárnutí za snížené teploty snížilo hodnotu mikrotvrlosti v prvních dvou týdnech; minimum  $97,74^{103,30}_{92,70}$  MPa (-6,5 %) v prvním týdnu. U 3. a 4. týdne se hodnota naopak zvýšila na maximum  $109,21^{111,59}_{105,47}$  MPa (+4,5 %)

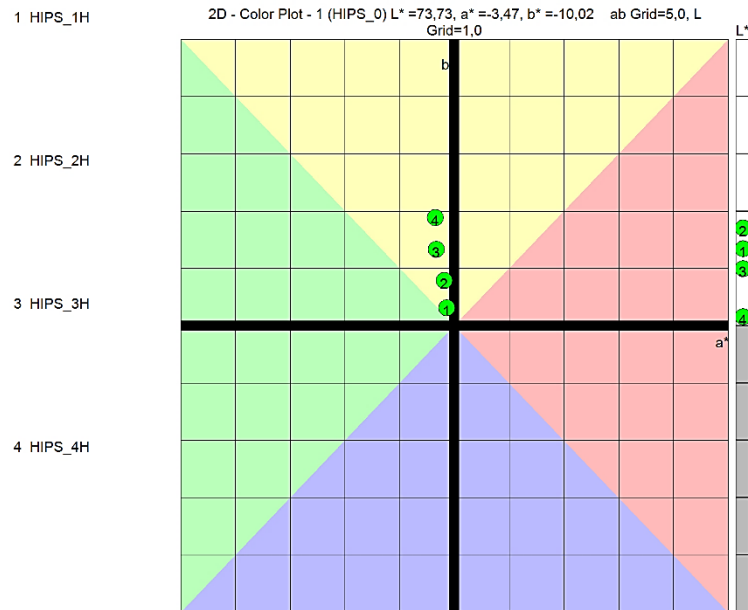
### 13.8 Barevnost

Tělesa vystavená zvýšené teplotě v průběhu stárnutí změnila subjektivně barvu oproti originálu více do žluté a tmavší barvy. Tato barevná změna byla úměrná délce vystavení teplotě. Tělesa vystavená snížené teplotě objektivně barvu oproti originálu nezměnila.



*Obr. 61. Srovnání barvy klimatizovaného tělesa HIPS 4H (nahore) a originálního HIPS.*

13.8.1 HIPS HOT



Obr. 62. Barevný kříž srovnání HIPS HOT těles oproti standardu.

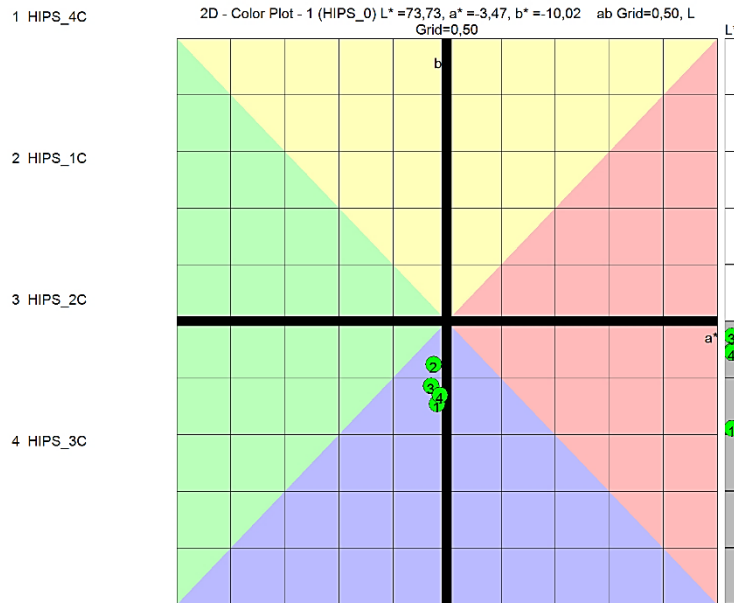
Vzorky HIPS HOT mají oproti standardu (originál) žlutější barvu intenzivnější úměrně délce klimatického stárnutí. Ve čtvrtém týdnu stárnutí se hodnota  $db^*$  lišila o 9,53 oproti standardu. Celková barevnost se změnila o 9,67.

Tab. 27. Hodnoty barevnosti HIPS HOT těles.

soubor	L*	a*	b*	dL*	da*	db*	dE*
standard	73,73	-3,47	-10,02	73,73	-3,47	-10,02	0,00
1H	75,06	-4,10	-8,51	1,52	-0,55	1,66	2,32
2H	75,42	-4,32	-6,10	1,88	-0,77	4,06	4,54
3H	74,72	-5,04	-3,38	1,18	-1,49	6,79	7,05
4H	73,88	-5,14	-0,63	0,34	-1,6	9,53	9,67



13.8.2 HIPS COLD



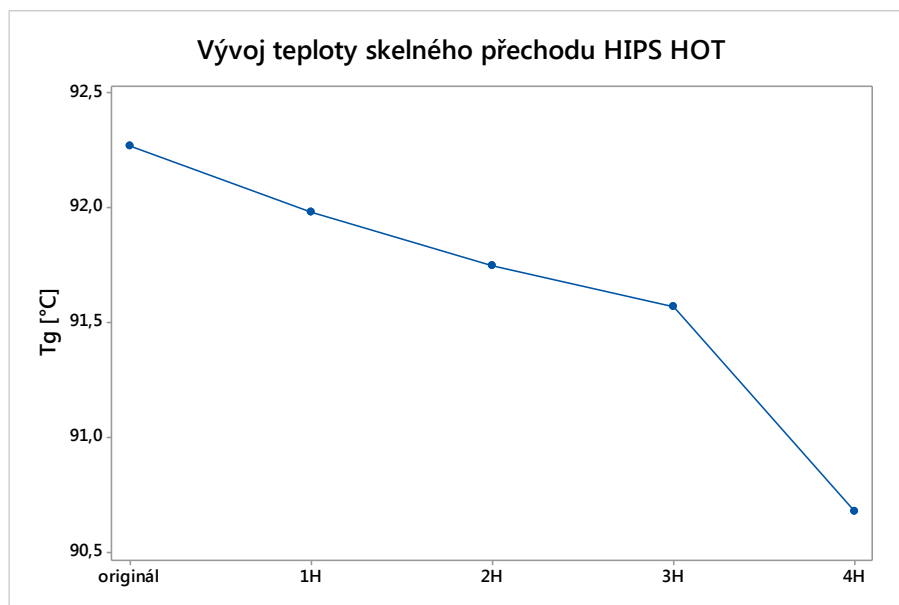
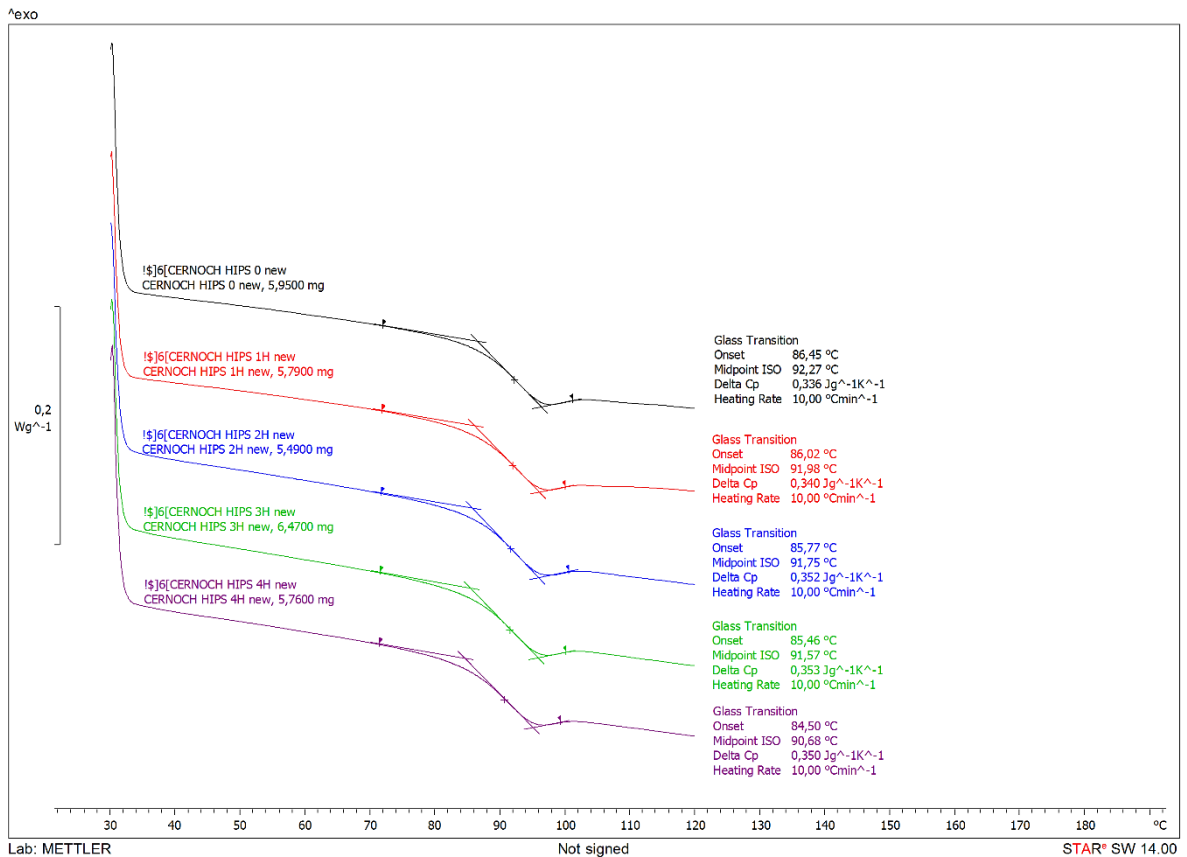
Obr. 63. Barevný kříž srovnání HIPS COLD těles oproti standardu.

Vzorky HIPS COLD mají oproti standardu (originál) méně žlutou barvu úměrnou délce klimatického stárnutí. Ve čtvrtém týdnu stárnutí se hodnota  $db^*$  lišila o  $-0,59$  oproti standardu. Hodnota celkové barevné změny  $dE^*$  nabyla hodnoty nejvýše  $0,96$ , čímž se dá barevná změna považovat za zanedbatelnou.

Tab. 28. Hodnoty barevnosti HIPS COLD těles.

soubor	L*	a*	b*	dL*	da*	db*	dE*
standard	73,73	-3,47	-10,02	73,73	-3,47	-10,02	0,00
1C	73,46	-3,59	-10,40	-0,08	-0,05	-0,24	0,25
2C	73,60	-3,61	-10,59	0,06	-0,07	-0,43	0,44
3C	73,45	-3,53	-10,68	-0,09	0,01	-0,51	0,52
4C	72,78	-3,56	-10,75	-0,76	-0,01	-0,59	0,96

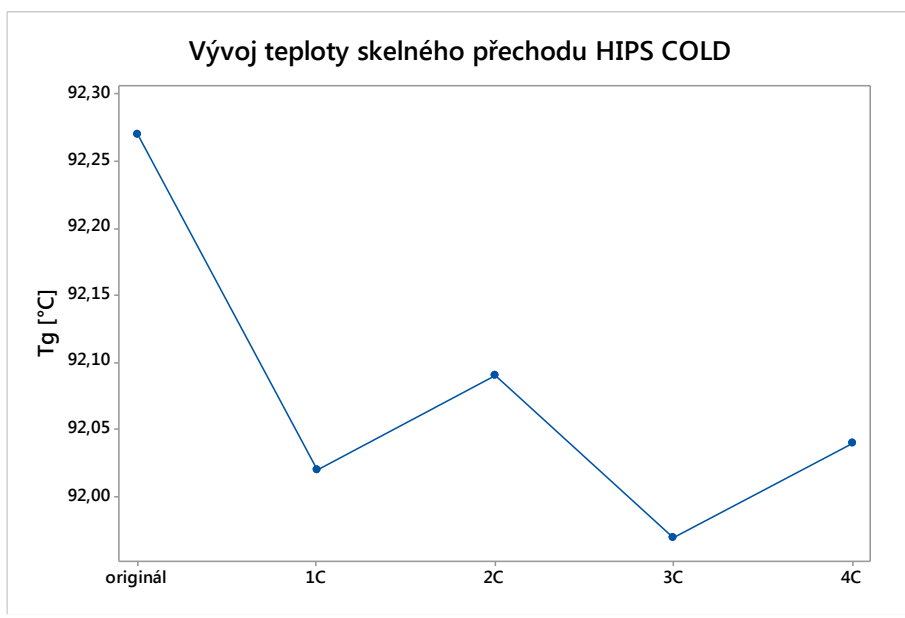
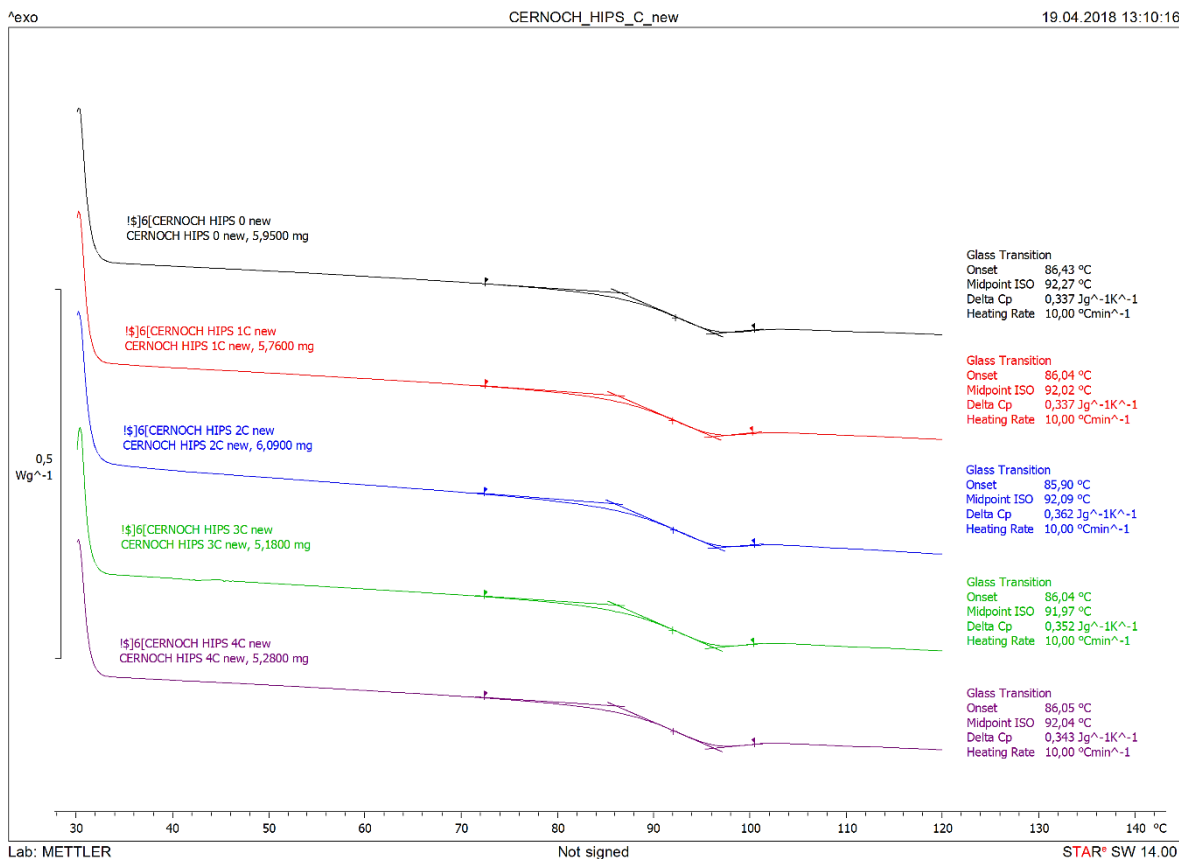
## 13.9 DSC – HIPS HOT



Obr. 64. Vývoj teploty skelného přechodu HIPS HOT.

Teplota skelného přechodu HIPS HOT plynule klesala z hodnoty 92,27 °C na teplotu 90,68 °C. Mezi 3. a 4. týdnem byl pokles hodnoty Tg výraznější než v předchozích obdobích. Plynulý pokles hodnoty Tg úměrný délce stárnutí může být způsoben snižováním molekulové hmotnosti polymeru (štěpení řetězců).

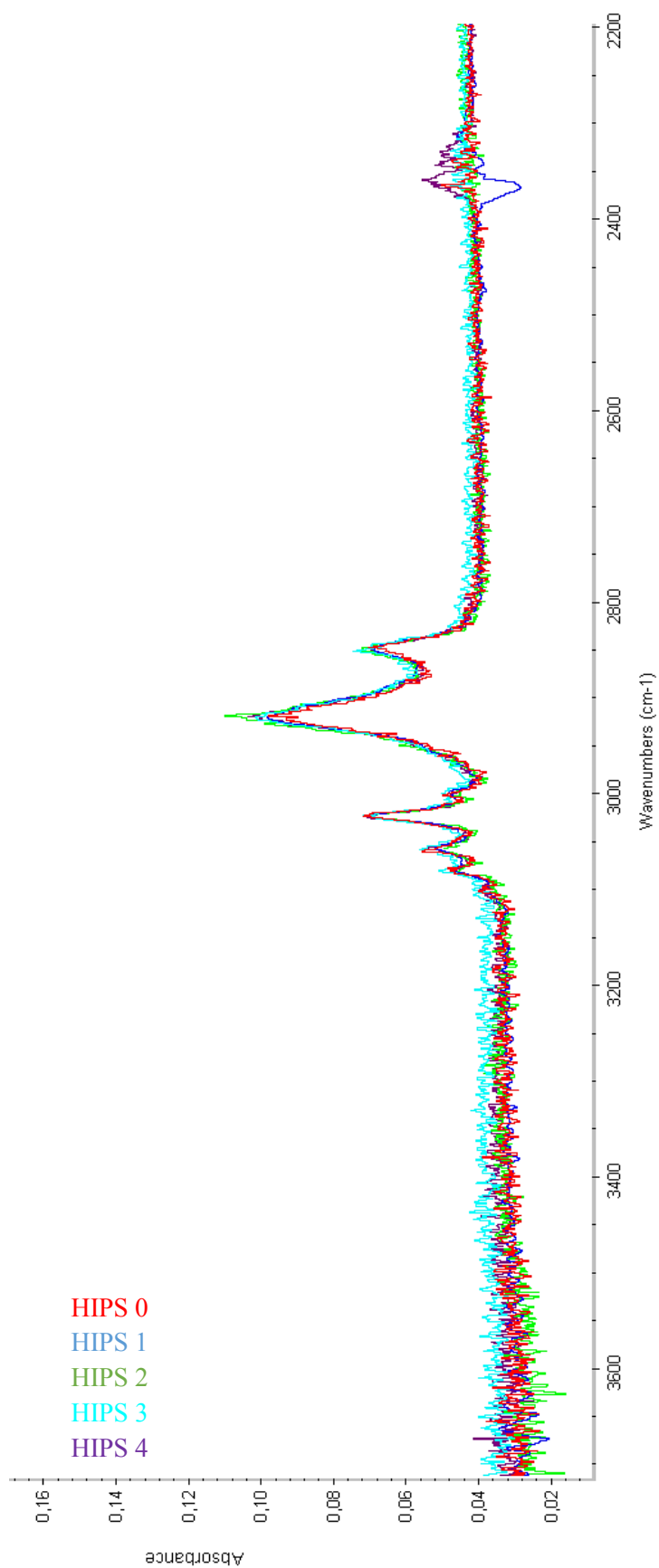
### 13.10 DSC – HIPS COLD



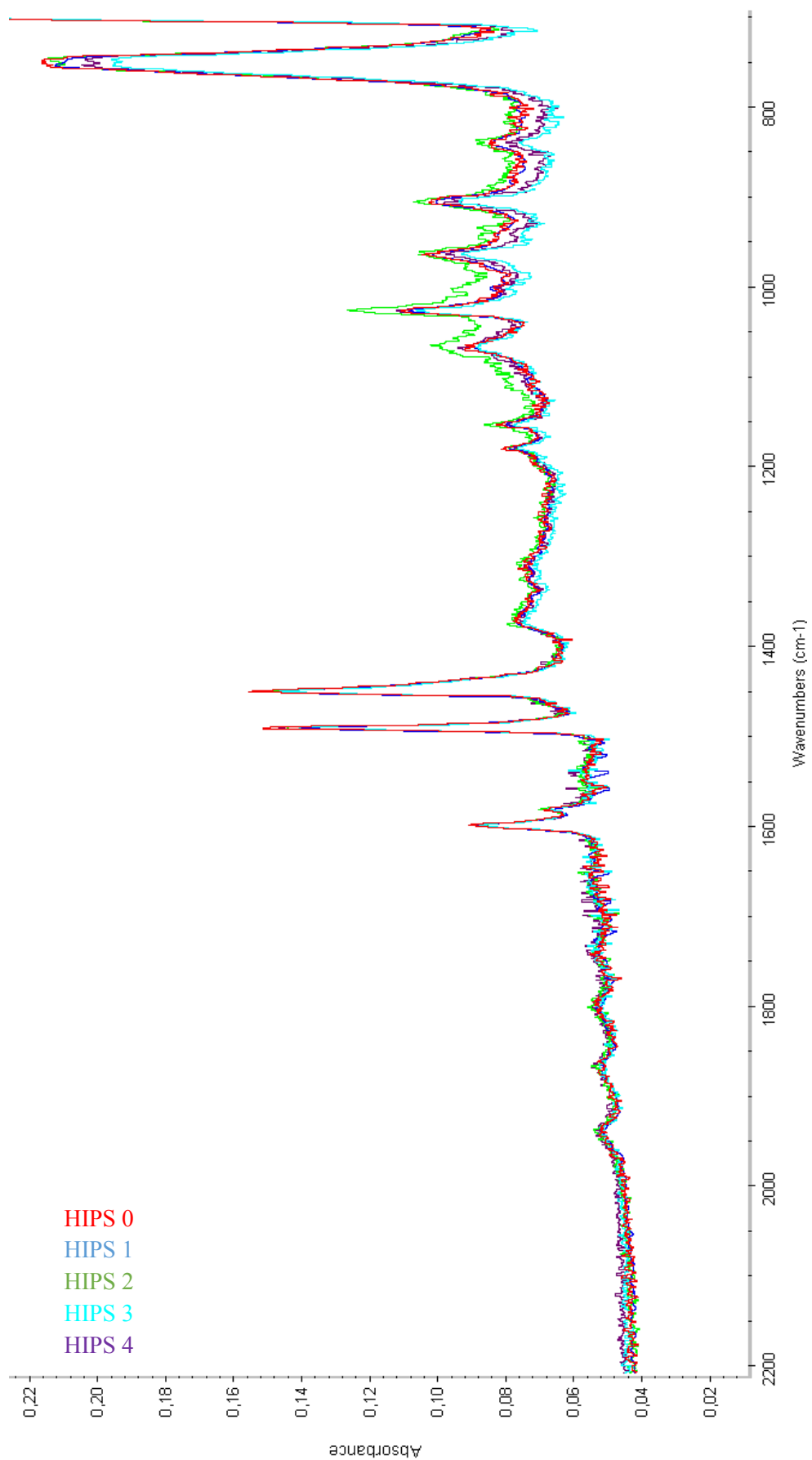
Obr. 65. Vývoj teploty skelného přechodu HIPS COLD.

Teplota skelného přechodu HIPS COLD fluktovala v rozmezí 91,97 °C až 92,27 °C bez trendového vývoje mezi klimatizovanými tělesy. Rozdíl v hodnotě Tg mezi originálem a klimatizovanými tělesy může být způsoben fyzikálním stárnutím, nevýrazné kolísání Tg klimatizovaných těles je způsobeno chybou metody určení inflexního bodu.

## 13.11 FTIR spektroskopie – HIPS HOT

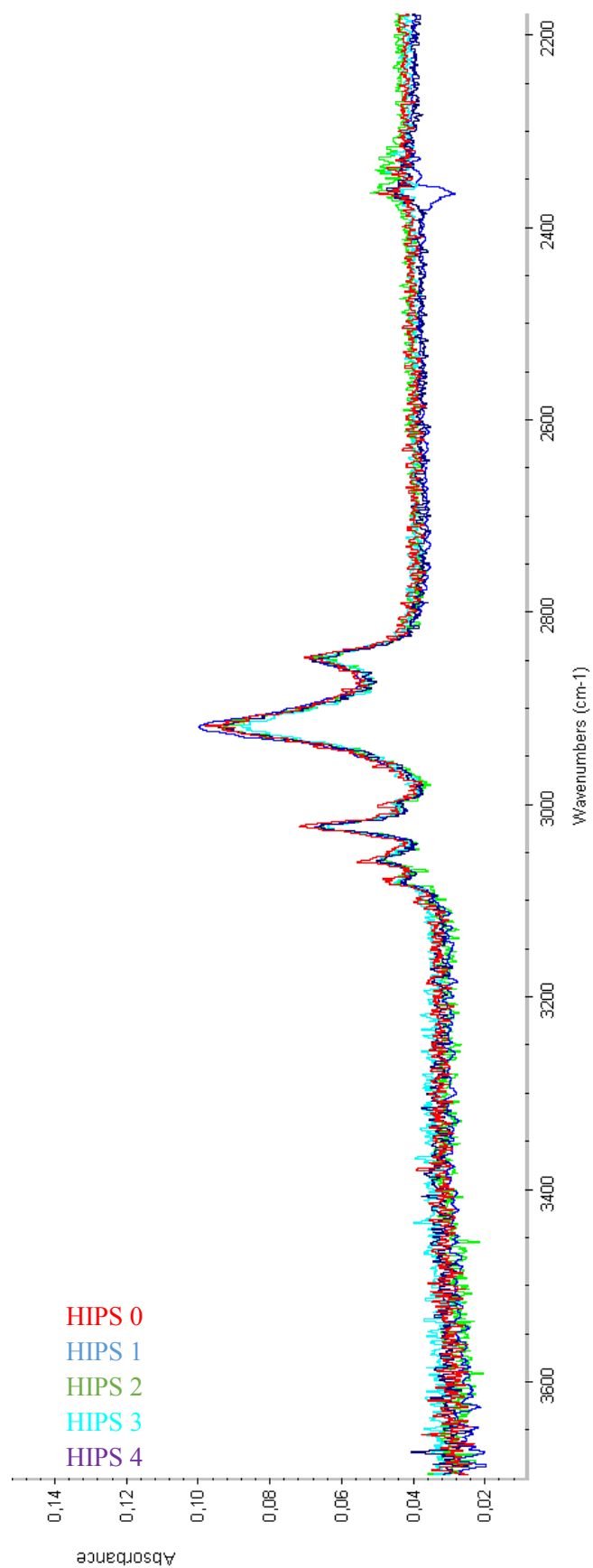


Obr. 66. FTIR část spektra 3700 ÷ 2200 cm<sup>-1</sup> materiálu HIPS HOT.

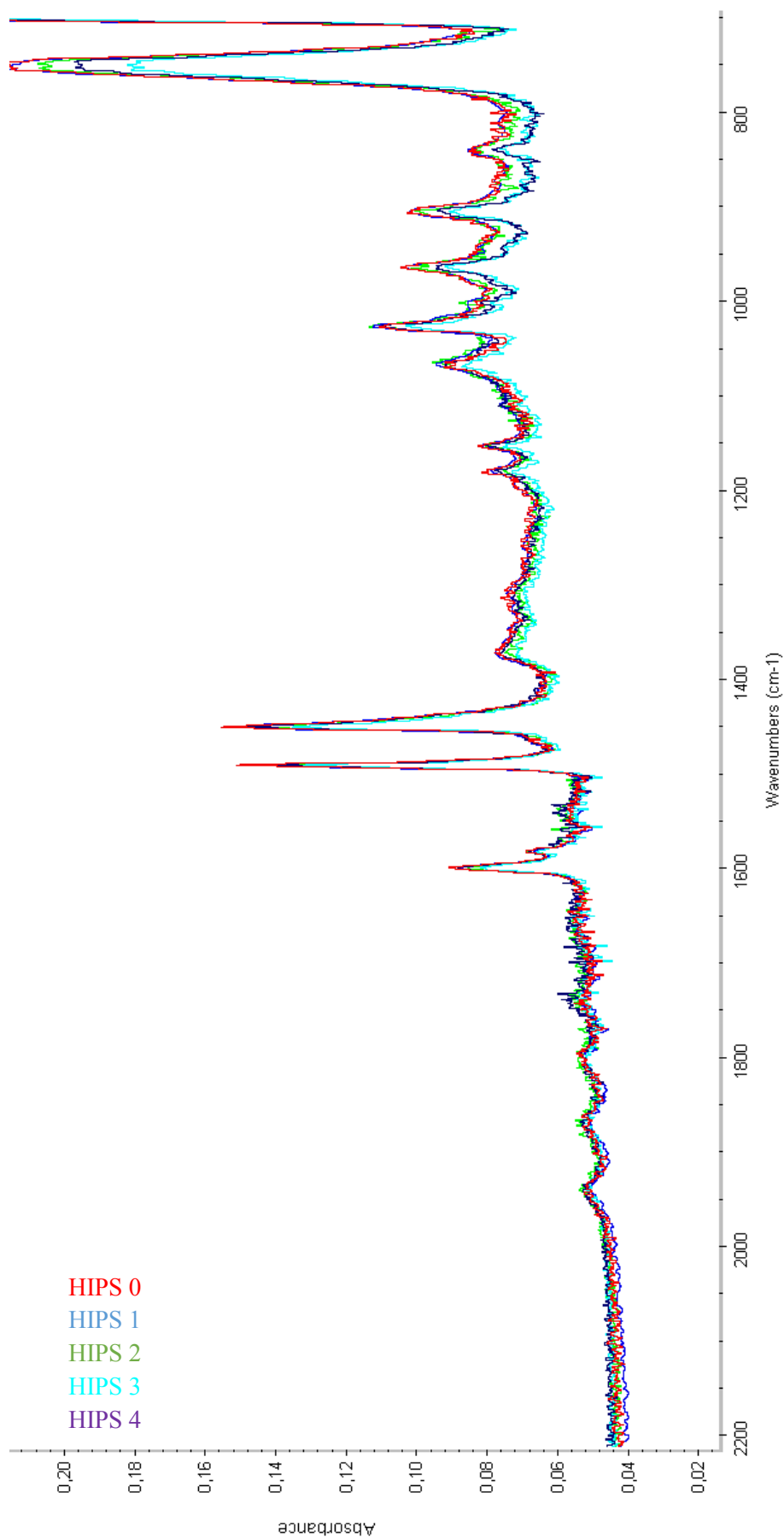


Obr. 67. FTIR část spektra 2200 ÷ 700 cm<sup>-1</sup> materiálu HIPS HOT.

## 13.12 FTIR spektroskopie – HIPS COLD



Obr. 68. FTIR část spektra  $3700 \div 2200 \text{ cm}^{-1}$  materiálu HIPS COLD.



Obr. 69. FTIR část spektra  $2200 \div 700 \text{ cm}^{-1}$  materiálu HIPS COLD.

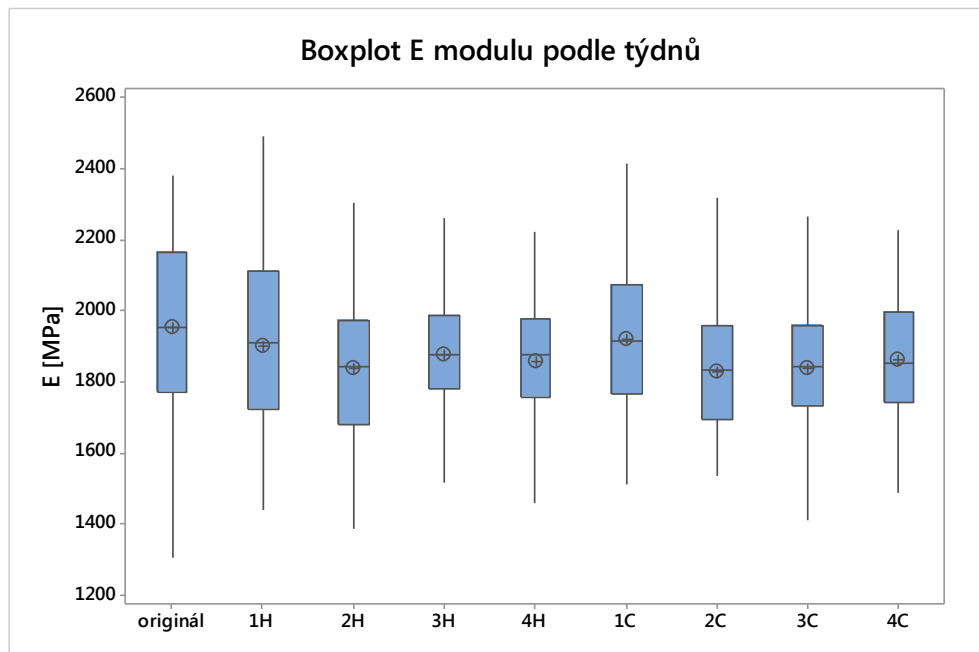
## 14 VÝSLEDKY MATERIÁLU ABS

### 14.1 Tahová zkouška

#### 14.1.1 Modul pružnosti v tahu

Tab. 29. Charakteristiky souborů měření  $E$  modulu materiálu ABS.

soubor	$n$ [1]	$\bar{E}$ [MPa]	$s_E$ [MPa]	$V_E$ [%]	$\min_E$ [MPa]	$Q_1$ [MPa]	$\tilde{E}$ [MPa]	$Q_3$ [MPa]	$\max_E$ [MPa]	$IQR$ [MPa]
originál	75	1956,6	233,1	11,91	1303,7	1773,3	1954,7	2168,6	2384,1	395,3
1H	75	1900,9	237,5	12,50	1439,2	1723,4	1910,0	2114,7	2495,6	391,3
2H	75	1840,3	187,0	10,16	1386,7	1681,0	1845,2	1975,4	2308,7	294,4
3H	75	1877,8	168,8	8,99	1398,1	1782,5	1879,0	1990,1	2264,3	207,5
4H	75	1858,5	208,1	11,20	1244,9	1760,3	1877,8	1977,4	2378,2	217,2
1C	75	1922,5	217,3	11,30	1512,9	1768,3	1918,2	2073,7	2419,2	305,4
2C	75	1828,4	228,0	12,47	794,1	1695,5	1833,3	1960,9	2322,9	265,4
3C	75	1837,7	217,1	11,81	1129,0	1732,0	1843,7	1958,1	2265,9	226,1
4C	75	1864,1	186,4	10,00	1265,4	1745,1	1855,2	2000,3	2227,7	255,1



Obr. 70. Graf vývoje  $E$  modulu materiálu ABS.

Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,015 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{E}_{ABS\ HOT}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 2)  $p = 0,358 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{E}_{ABS\ HOT}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,003 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{E}_{ABS\ COLD}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 4)  $p = 0,100 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{E}_{ABS\ COLD}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.

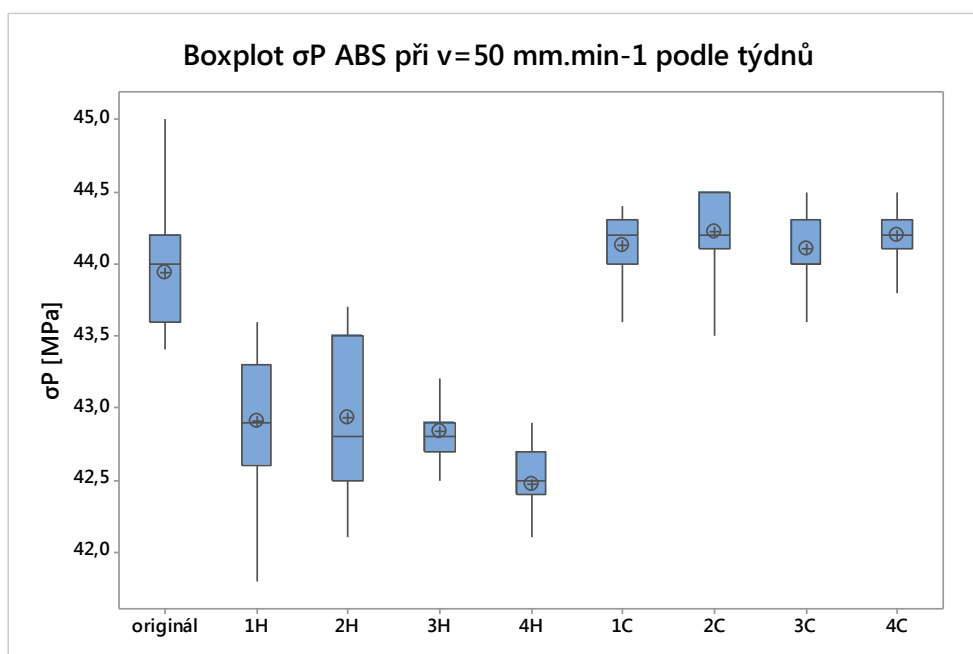


Stárnutí za zvýšené teploty zapříčinilo mírné snížení hodnoty E modulu originálu  $1954,7 \frac{2168,6}{1773,3}$  MPa na hodnotu  $1910,0 \frac{2114,7}{1723,4}$  MPa (-2,3 %) v prvním týdnu a dále se významně neměnila. Totéž lze sledovat u COLD těles, kdy došlo k poklesu E modulu na  $1918,2 \frac{2073,7}{1768,3}$  MPa (-1,9 %) a dále se významně neměnil.

#### 14.1.2 Rychlost deformace $50 \text{ mm.min}^{-1}$ – napětí na mezi pevnosti

Tab. 30. Charakteristiky měření napětí na mezi pevnosti v tahu materiálu ABS při rychlosti deformace  $50 \text{ mm.min}^{-1}$ .

soubor	$\frac{n}{[1]}$	$\frac{\bar{\sigma}_P}{[MPa]}$	$\frac{s_{\sigma_P}}{[MPa]}$	$\frac{V_{\sigma_P}}{[\%]}$	$\frac{\min_{\sigma_P}}{[MPa]}$	$\frac{Q_1}{[MPa]}$	$\frac{\tilde{\sigma}_P}{[MPa]}$	$\frac{Q_3}{[MPa]}$	$\frac{\max_{\sigma_P}}{[MPa]}$	$\frac{IQR}{[MPa]}$
originál	15	43,933	0,568	1,29	42,6	43,6	44,0	44,2	45,0	0,6
1H	15	42,913	0,469	1,09	41,8	42,6	42,9	43,3	43,6	0,7
2H	15	42,933	0,523	1,22	42,1	42,5	42,8	43,5	43,7	1,0
3H	15	42,833	0,199	0,46	42,5	42,7	42,8	42,9	43,2	0,2
4H	15	42,467	0,294	0,69	41,7	42,4	42,5	42,7	42,9	0,3
1C	15	44,127	0,231	0,52	43,6	44,0	44,2	44,3	44,4	0,3
2C	15	44,22	0,314	0,71	43,5	44,1	44,2	44,5	44,5	0,4
3C	15	44,107	0,228	0,52	43,6	44,0	44,0	44,3	44,5	0,3
4C	15	44,193	0,263	0,60	43,6	44,1	44,2	44,3	44,7	0,2



Obr. 71. Graf vývoje napětí na mezi pevnosti ABS při rychlosti tahové deformace  $50 \text{ mm.min}^{-1}$ .

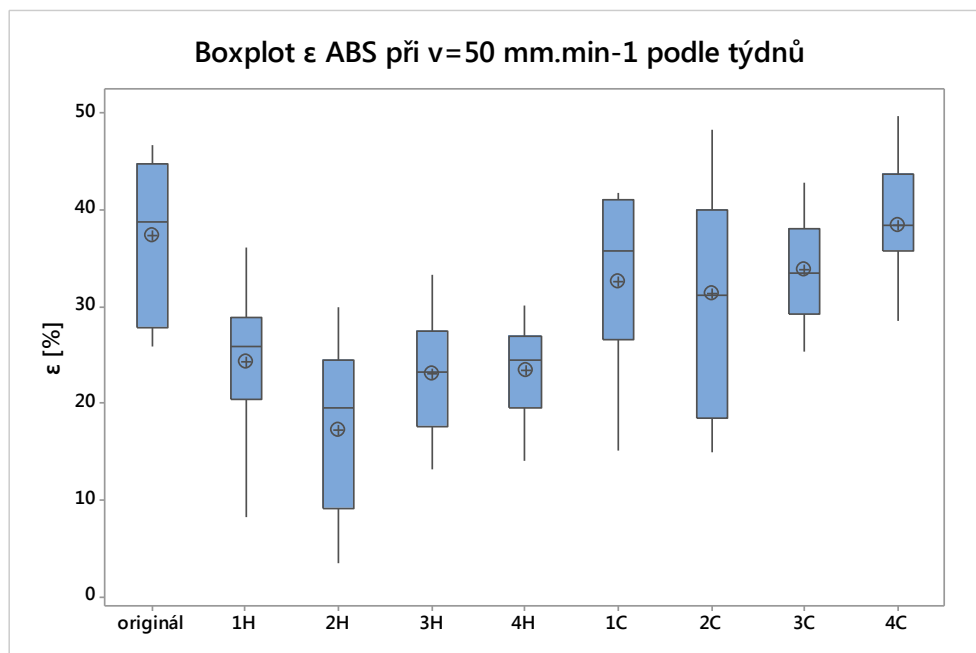
Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\sigma}_{P ABS HOT v=50}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 2)  $p = 0,005 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\sigma}_{P ABS HOT v=50}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,114 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\sigma}_{P ABS COLD v=50}$  se v průběhu času významně nemění.
- 4)  $p = 0,397 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\sigma}_{P ABS COLD v=50}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.

### 14.1.3 Rychlost deformace 50 mm.min<sup>-1</sup> – tažnost

Tab. 31. Charakteristiky souborů měření tažnosti materiálu ABS při rychlosti deformace 50 mm.min<sup>-1</sup>.

soubor	$n$ [1]	$\bar{\epsilon}$ [%]	$s_{\epsilon}$ [%]	$V_{\epsilon}$ [%]	$min_{\epsilon}$ [MPa]	$Q_1$ [%]	$\tilde{\epsilon}$ [%]	$Q_3$ [%]	$max_{\epsilon}$ [MPa]	$IQR$ [%]
originál	15	37,35	7,43	19,89	25,8	27,8	38,7	44,8	46,6	17,0
1H	15	24,23	7,69	31,75	8,3	20,4	25,9	28,8	36,0	8,4
2H	15	17,20	8,97	52,17	3,5	9,1	19,5	24,5	30,0	15,4
3H	15	23,04	5,75	24,94	13,1	17,6	23,3	27,5	33,3	9,9
4H	15	23,46	4,73	20,18	14,0	19,6	24,5	26,9	30,1	7,3
1C	15	32,64	8,52	26,12	15,2	26,5	35,7	41,0	41,8	14,5
2C	15	31,26	10,88	34,80	15,0	18,5	31,2	39,9	48,2	21,4
3C	15	33,77	5,50	16,27	25,4	29,2	33,5	38,1	42,8	8,9
4C	15	38,43	7,21	18,75	21,2	35,7	38,4	43,7	49,7	8,0



Obr. 72. Graf vývoje tažnosti ABS při rychlosti deformace 50 mm.min<sup>-1</sup>.

Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\bar{\varepsilon}_{ABS\ HOT\ v=50}$  se v průběhu času významně mění.
- 2)  $p = 0,123 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\bar{\varepsilon}_{ABS\ HOT\ v=50}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,149 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\bar{\varepsilon}_{ABS\ COLD\ v=50}$  se v průběhu času významně nemění.
- 4)  $p = 0,148 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\bar{\varepsilon}_{ABS\ COLD\ v=50}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.

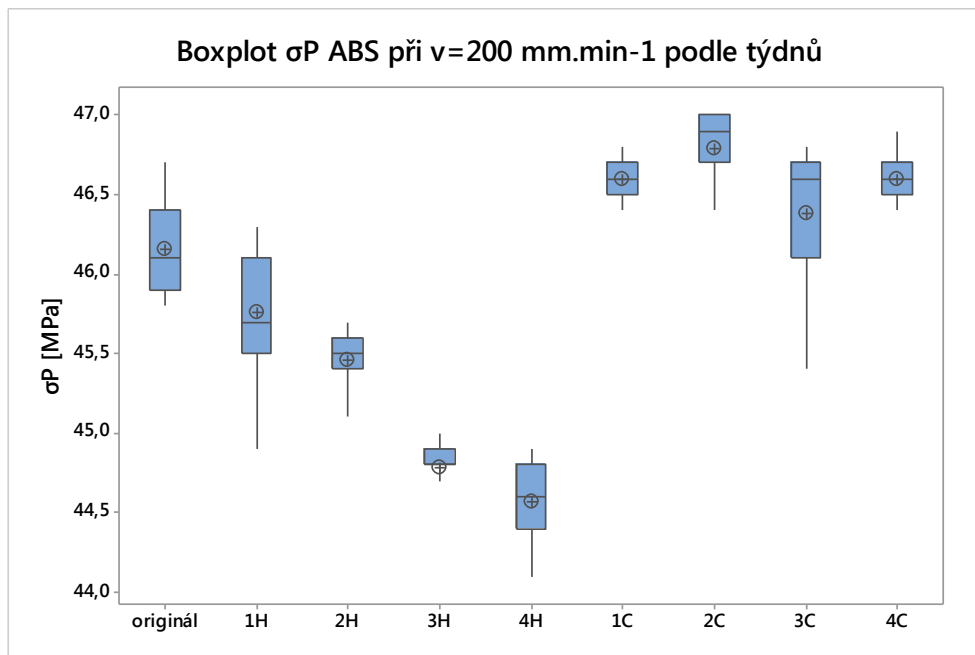
Stárnutí za zvýšené teploty zapříčinilo u všech HOT souborů pokles pevnosti v tahu úměrný délce stárnutí oproti originálu  $44,0 \frac{44,2}{43,6}$  MPa na nejméně  $42,5 \frac{42,7}{42,4}$  MPa (-3,4 %) v týdnu čtvrtém. Tažnost se v prvním týdnu snížila z hodnoty originálu  $38,7 \frac{44,8}{27,8}$  % na  $28,8 \frac{36,0}{25,9}$  % (-33,1 %) a dále se významně neměnila.

Snížená teplota nezpůsobila statisticky významné rozdíly pevnosti v tahu ani tažnosti oproti hodnotám originálu.

#### 14.1.4 Rychlost deformace $200\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ – napětí na mezi pevnosti

Tab. 32. Charakteristiky souborů měření napětí na mezi pevnosti v tahu materiálu ABS při rychlosti deformace  $200\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ .

soubor	$n$ [1]	$\bar{\sigma}_p$ [MPa]	$s_{\sigma_p}$ [MPa]	$V_{\sigma_p}$ [%]	$\min_{\sigma_p}$ [MPa]	$Q_1$ [MPa]	$\bar{\sigma}_p$ [MPa]	$Q_3$ [MPa]	$\max_{\sigma_p}$ [MPa]	IQR [MPa]
originál	15	46,16	0,267	0,58	45,8	45,9	46,1	46,4	46,7	0,5
1H	15	45,76	0,374	0,82	44,9	45,5	45,7	46,1	46,3	0,6
2H	15	45,46	0,159	0,35	45,1	45,4	45,5	45,6	45,7	0,2
3H	15	44,78	0,240	0,54	44,0	44,8	44,8	44,9	45,1	0,1
4H	15	44,567	0,247	0,55	44,1	44,4	44,6	44,8	44,9	0,4
1C	15	46,60	0,273	0,58	46,0	46,5	46,6	46,7	47,1	0,2
2C	15	46,793	0,274	0,59	46,0	46,7	46,9	47,0	47,0	0,3
3C	15	46,38	0,459	0,99	45,4	46,1	46,6	46,7	46,8	0,6
4C	15	46,60	0,151	0,32	46,4	46,5	46,6	46,7	46,9	0,2



Obr. 73. Graf vývoje napětí na mezi pevnosti ABS při rychlosti tahové deformace  $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

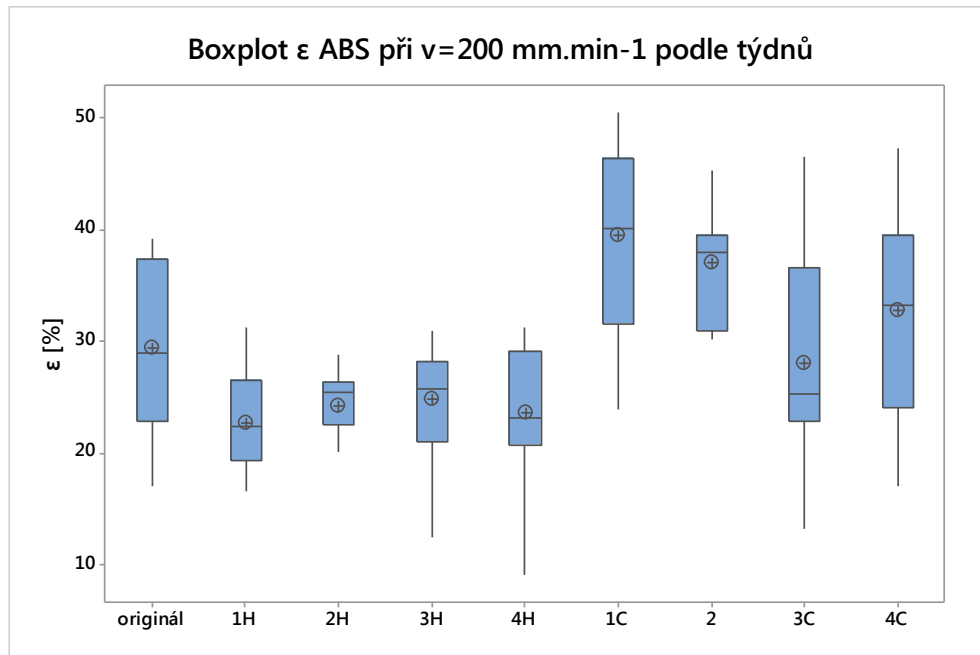
Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\sigma}_{P \text{ ABS } HOT \ v=200}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 2)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\sigma}_{P \text{ ABS } HOT \ v=200}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\sigma}_{P \text{ ABS } COLD \ v=200}$  se v průběhu času významně mění.
- 4)  $p = 0,006 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\sigma}_{P \text{ ABS } COLD \ v=200}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.

#### 14.1.5 Rychlost deformace $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ – tažnost

Tab. 33. Charakteristiky souborů měření tažnosti materiálu ABS při rychlosti deformace  $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

soubor	$n$ [1]	$\bar{\varepsilon}$ [%]	$s_{\varepsilon}$ [%]	$V_{\varepsilon}$ [%]	$\frac{\min_{\varepsilon}}{[MPa]}$	$Q_1$ [%]	$\bar{\varepsilon}$ [%]	$Q_3$ [%]	$\frac{\max_{\varepsilon}}{[MPa]}$	IQR [%]
originál	15	29,42	7,82	26,59	17,1	22,8	28,9	37,4	39,1	14,6
1H	15	22,73	6,01	26,44	7,1	19,3	22,4	26,6	31,2	7,3
2H	15	24,28	5,79	23,86	11,5	22,6	25,4	26,4	33,5	3,8
3H	15	24,85	4,94	19,9	12,5	21,1	25,7	28,2	31,0	7,1
4H	15	23,57	6,08	25,78	9,2	20,7	23,2	29,1	31,3	8,4
1C	15	39,45	7,90	20,03	24,0	31,5	40,1	46,3	50,4	14,8
2C	15	37,02	5,09	13,74	30,2	30,9	37,9	39,4	45,3	8,5
3C	15	28,03	9,49	33,87	13,3	22,9	25,3	36,6	46,4	13,7
4C	15	32,81	10,08	30,71	17,1	24,1	33,3	39,4	47,2	15,3



Obr. 74. Graf vývoje tažnosti ABS při rychlosti tahové deformace 200 mm.min<sup>-1</sup>.

Vyhodnocení:

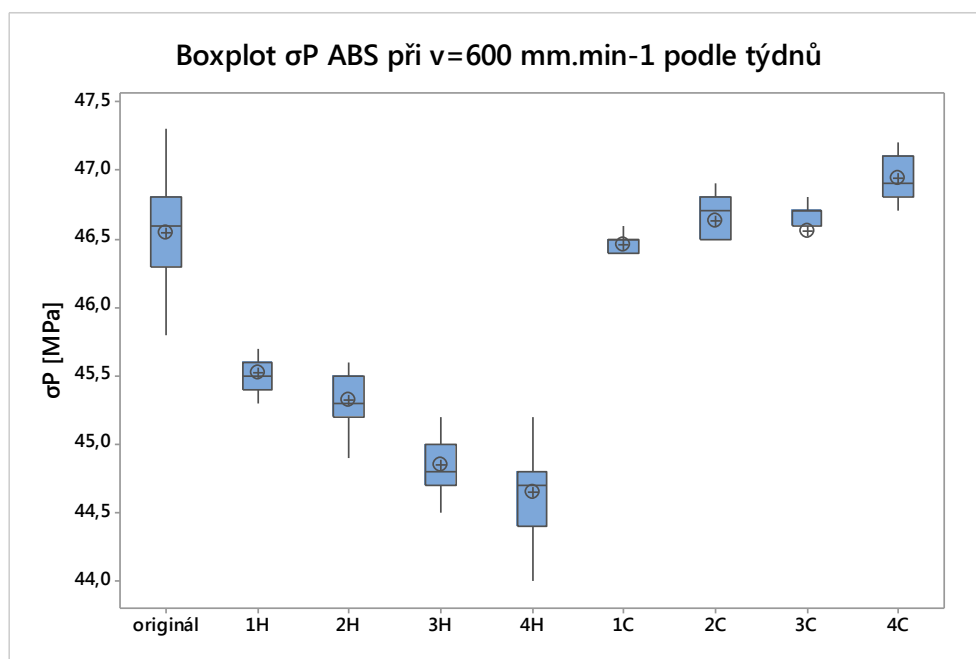
- 1)  $p = 0,140 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\epsilon}_{ABS\ HOT\ v=200}$  se v průběhu času významně nemění.
- 2)  $p = 0,669 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\epsilon}_{ABS\ HOT\ v=200}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,001 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{\epsilon}_{ABS\ COLD\ v=200}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 4)  $p = 0,004 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{\epsilon}_{ABS\ COLD\ v=200}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.

Stárnutí za zvýšené teploty zapříčinilo pokles pevnosti v tahu všech souborů HOT těles úměrný délce stárnutí z hodnoty originálu  $46,1 \frac{46,4}{45,9}$  MPa na hodnotu minima  $44,6 \frac{44,8}{44,4}$  MPa (-3,3 %) v týdnu čtvrtém. Hodnoty tažnosti se významně nelišily od hodnoty originálu  $28,9 \frac{37,4}{22,8}$  %.

Snížená teplota způsobila mírné zvýšení pevnosti nejvýše na hodnotu  $46,9 \frac{47,0}{46,7}$  MPa (+1,7 %), tažnost vzrostla na maximum  $40,1 \frac{46,3}{31,5}$  MPa (+38,8 %) v prvním týdnu a ve třetím týdnu klesla na  $25,3 \frac{36,6}{22,9}$  MPa (-12,5 %).

14.1.6 Rychlost deformace 600 mm.min<sup>-1</sup> – napětí na mezi pevnostiTab. 34. Charakteristiky souborů měření napětí na mezi pevnosti v tahu materiálu ABS při rychlosti zatěžování 600 mm.min<sup>-1</sup>.

soubor	$\frac{n}{[1]}$	$\frac{\bar{\sigma}_P}{[MPa]}$	$\frac{s_{\sigma_P}}{[MPa]}$	$\frac{V_{\sigma_P}}{[\%]}$	$\frac{\min_{\sigma_P}}{[MPa]}$	$\frac{Q_1}{[MPa]}$	$\frac{\bar{\sigma}_P}{[MPa]}$	$\frac{Q_3}{[MPa]}$	$\frac{\max_{\sigma_P}}{[MPa]}$	$\frac{IQR}{[MPa]}$
originál	15	46,547	0,412	0,89	45,8	46,3	46,6	46,8	47,3	0,5
1H	15	45,520	0,121	0,27	45,3	45,4	45,5	45,6	45,7	0,2
2H	15	45,320	0,174	0,38	44,9	45,2	45,3	45,5	45,6	0,3
3H	15	44,853	0,196	0,44	44,5	44,7	44,8	45,0	45,2	0,3
4H	15	44,653	0,309	0,69	44,0	44,4	44,7	44,8	45,2	0,4
1C	15	46,453	0,099	0,21	46,2	46,4	46,5	46,5	46,6	0,1
2C	15	46,633	0,213	0,46	46,0	46,5	46,7	46,8	46,9	0,3
3C	15	46,553	0,437	0,94	45,1	46,6	46,7	46,7	46,9	0,1
4C	15	46,947	0,141	0,30	46,7	46,8	46,9	47,1	47,2	0,3

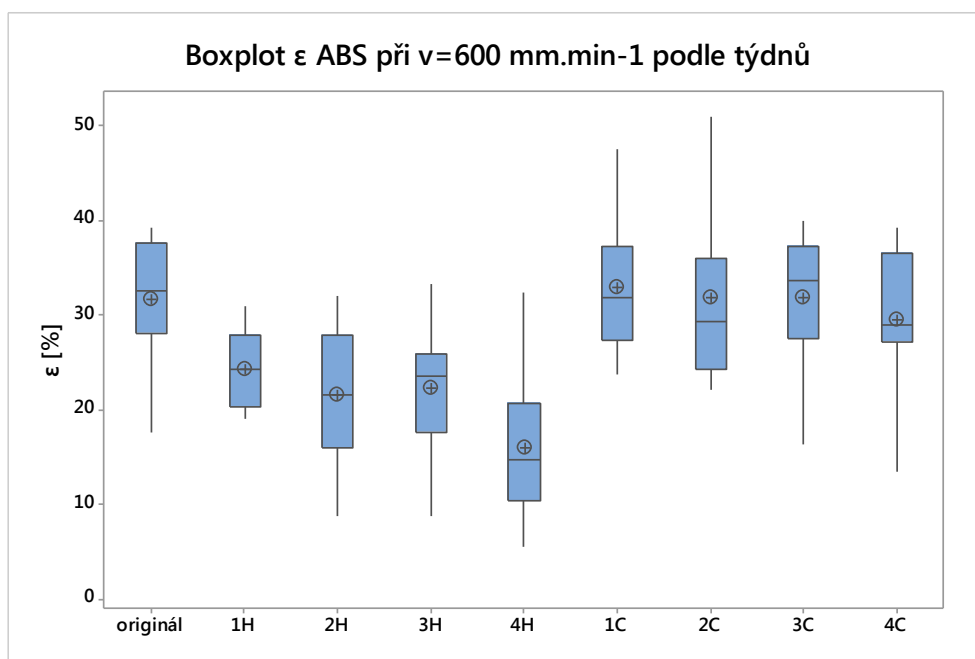
Obr. 75. Graf vývoje napětí na mezi pevnosti v tahu ABS při rychlosti deformace 600 mm.min<sup>-1</sup>.

Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\bar{\sigma}_P_{ABS\ HOT\ v=600}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 2)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\bar{\sigma}_P_{ABS\ HOT\ v=600}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\bar{\sigma}_P_{ABS\ COLD\ v=600}$  se v průběhu času významně mění.
- 4)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\bar{\sigma}_P_{ABS\ COLD\ v=600}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.

14.1.7 Rychlost deformace 600 mm.min<sup>-1</sup> – tažnostTab. 35. Charakteristiky souborů měření tažnosti materiálu ABS při rychlosti zatěžování 600 mm.min<sup>-1</sup>.

soubor	$\frac{n}{[1]}$	$\frac{\bar{\epsilon}}{[\%]}$	$\frac{s_{\epsilon}}{[\%]}$	$\frac{V_{\epsilon}}{[\%]}$	$\frac{\min_{\epsilon}}{[MPa]}$	$\frac{Q_1}{[\%]}$	$\frac{\bar{\epsilon}}{[\%]}$	$\frac{Q_3}{[\%]}$	$\frac{\max_{\epsilon}}{[MPa]}$	$\frac{IQR}{[\%]}$
originál	15	31,59	6,86	21,73	17,6	28,1	32,6	37,6	39,3	9,5
1H	15	24,37	4,26	17,47	19,1	20,3	24,3	27,8	31,0	7,5
2H	15	21,62	6,59	30,47	8,9	16,0	21,6	27,9	32	11,9
3H	15	22,37	6,96	31,11	8,8	17,6	23,5	25,9	33,2	8,3
4H	15	16,04	7,65	47,68	5,6	10,4	14,7	20,6	32,3	10,2
1C	15	32,90	7,13	21,68	23,8	27,3	31,8	37,3	47,5	10,0
2C	15	31,83	8,49	26,69	22,2	24,3	29,4	36,0	50,9	11,7
3C	15	31,77	7,02	22,09	16,3	27,6	33,7	37,2	40,0	9,6
4C	15	29,42	7,69	26,15	13,4	27,2	28,9	36,6	39,2	9,4

Obr. 76. Graf vývoje tažnosti ABS při rychlosti deformace 600 mm.min<sup>-1</sup>.

Vyhodnocení:

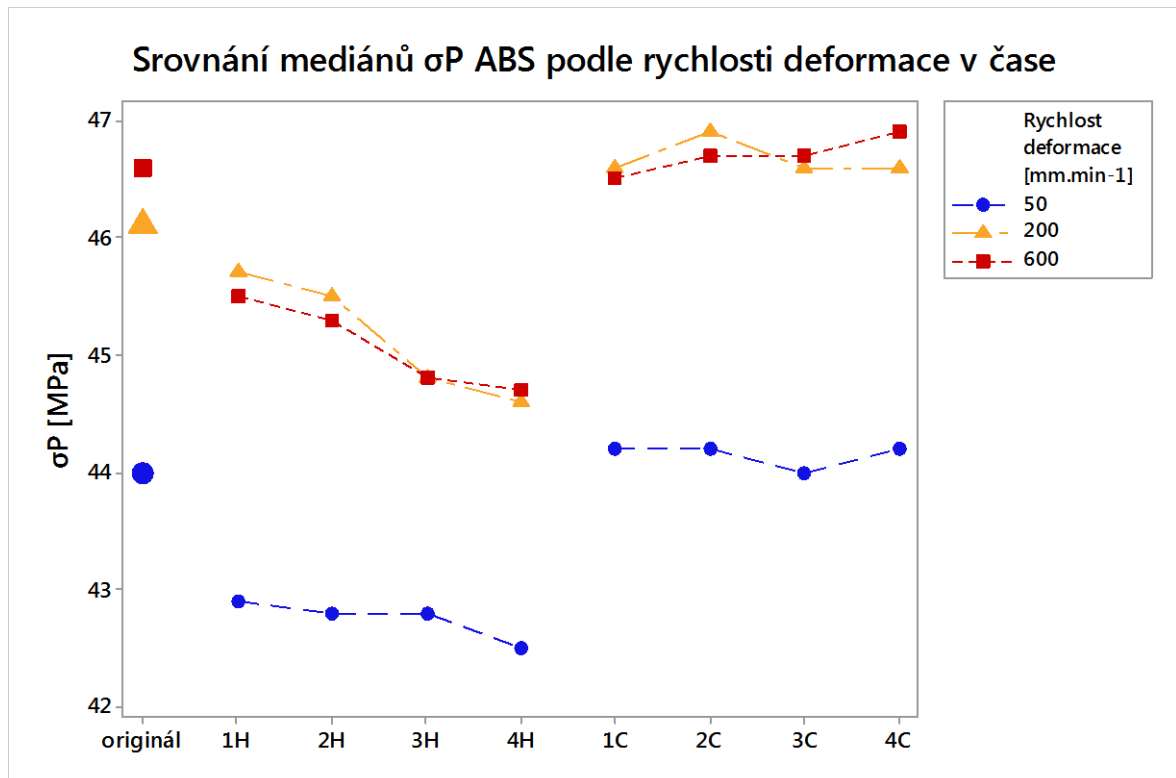
- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\bar{\epsilon}_{ABS\ HOT\ v=600}$  se v průběhu času významně mění.
- 2)  $p = 0,010 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\bar{\epsilon}_{ABS\ HOT\ v=600}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,836 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\bar{\epsilon}_{ABS\ COLD\ v=600}$  se v průběhu času významně nemění.
- 4)  $p = 0,757 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\bar{\epsilon}_{ABS\ COLD\ v=600}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.

Stárnutí za zvýšené teploty zapříčinilo pokles pevnosti v tahu všech souborů HOT těles úměrný délce stárnutí z hodnoty originálu  $46,6 \frac{46,8}{46,3}$  MPa na hodnotu minima  $44,7 \frac{44,8}{44,4}$  MPa

(-4,1 %) v týdnu čtvrtém. Hodnoty tažnosti všech HOT souborů byly nižší než hodnota originálu  $32,6 \frac{37,6}{28,1} \%$ , nejméně  $14,7 \frac{20,6}{10,4} \%$  (-54,9 %) v týdnu čtvrtém.

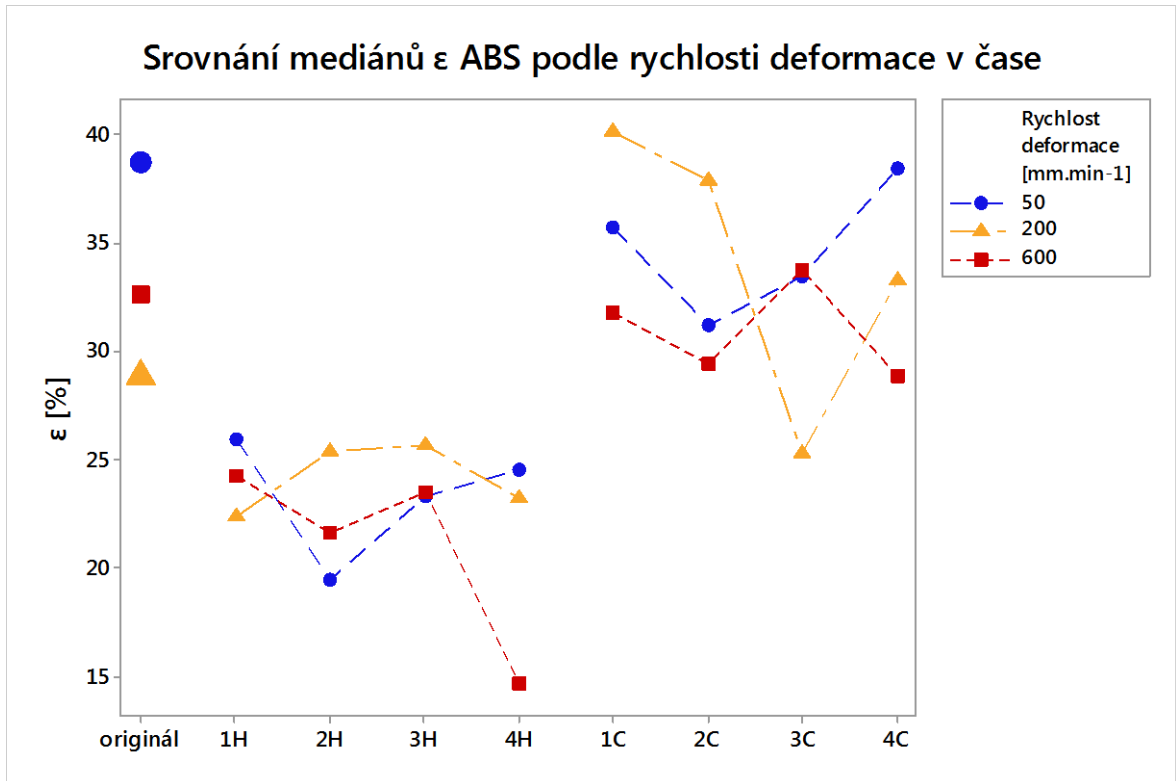
Snížená teplota způsobila mírné zvýšení pevnosti nejvýše na hodnotu  $46,9 \frac{47,1}{46,8}$  MPa (+0,6 %), tažnost se od originálu významně nezměnila.

#### 14.1.8 Vzájemné srovnání



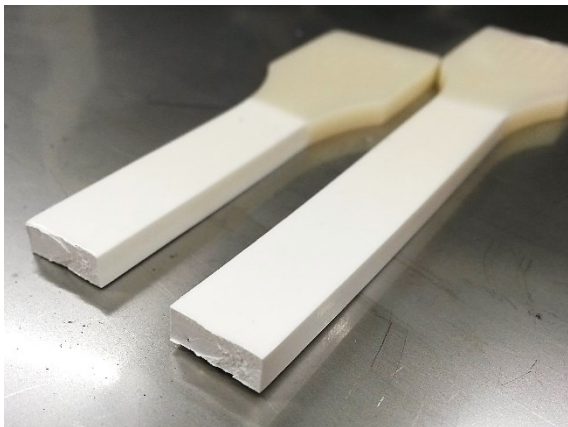
Obr. 77. Srovnání mediánů napětí na mezi pevnosti ABS v čase podle rychlosti deformace.



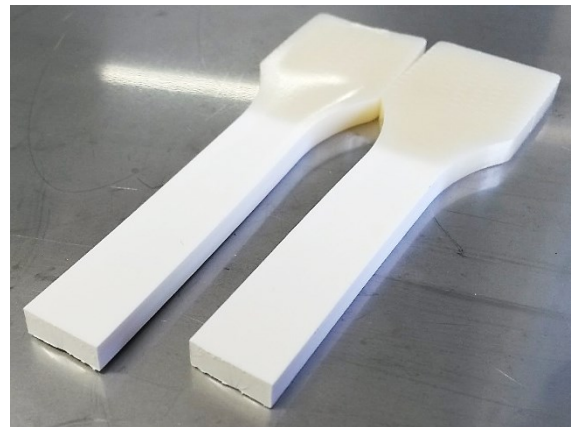


Obr. 78. Srovnání mediánů tažnosti ABS v čase podle rychlosti deformace.

#### 14.1.9 Fotografie



Obr. 79. Zkušební těleso ABS 0 po tahové zkoušce – křehký lom.



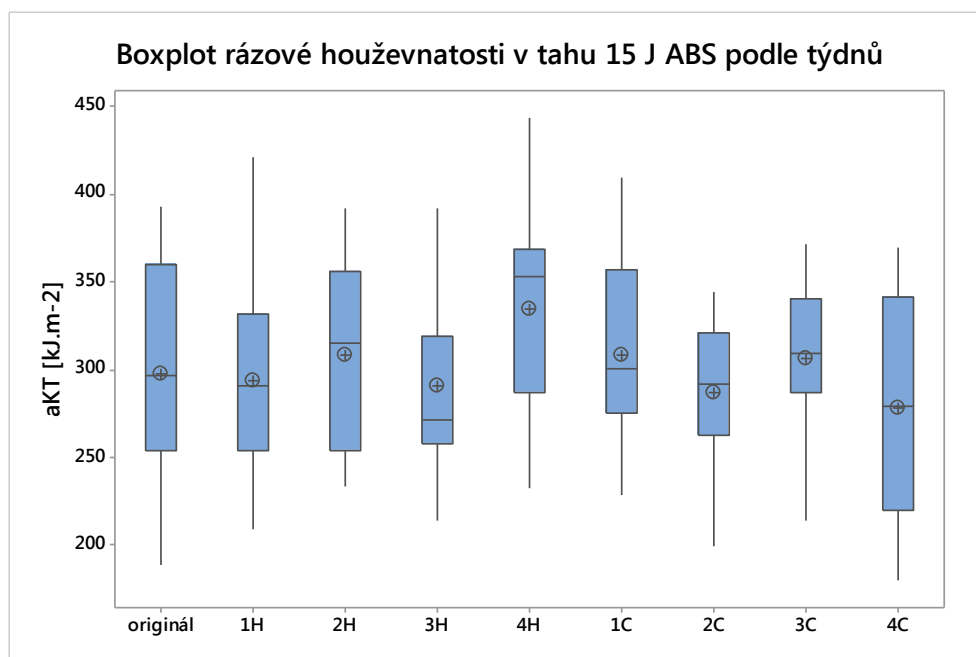
Obr. 80. Zkušební těleso ABS 4H po tahové zkoušce – křehký lom.

## 14.2 Rázová zkouška v tahu

### 14.2.1 Nominální energie rázu 15 J

Tab. 36. Charakteristiky měření rázové houževnatosti v tahu materiálu ABS při energii rázu 15 J.

soubor	$n$ [1]	$\bar{a}_{KT}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$s_{a_{KT}}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$V_{a_{KT}}$ [%]	$\min_{a_{KT}}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_1$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\bar{a}_{KT}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_3$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\max_{a_{KT}}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$IQR$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]
originál	15	297,3	64,4	21,66	189,1	254,2	297,0	359,7	392,4	105,5
1H	15	293,8	54,4	18,50	208,9	253,6	291,1	331,6	420,6	78,0
2H	15	307,9	54,0	17,56	233,4	253,7	315,4	355,8	392,3	102,1
3H	15	291,2	60,7	20,86	213,8	257,8	271,0	318,6	435,7	60,8
4H	15	334,8	58,9	17,60	232,6	286,9	352,6	368,6	443,2	81,7
1C	15	307,8	51,5	16,72	228,2	274,9	300,7	356,6	409,6	81,7
2C	15	286,5	39,7	13,85	199,2	262,9	291,5	321,1	344,3	58,1
3C	15	306,7	41,2	13,43	214,4	287,1	308,9	340,4	371,2	53,3
4C	15	277,8	62,7	22,56	180,2	219,4	278,8	341,0	369,1	121,6



Obr. 81. Graf vývoje rázové houževnatosti v tahu ABS při energii rázu 15 J.

Vyhodnocení:

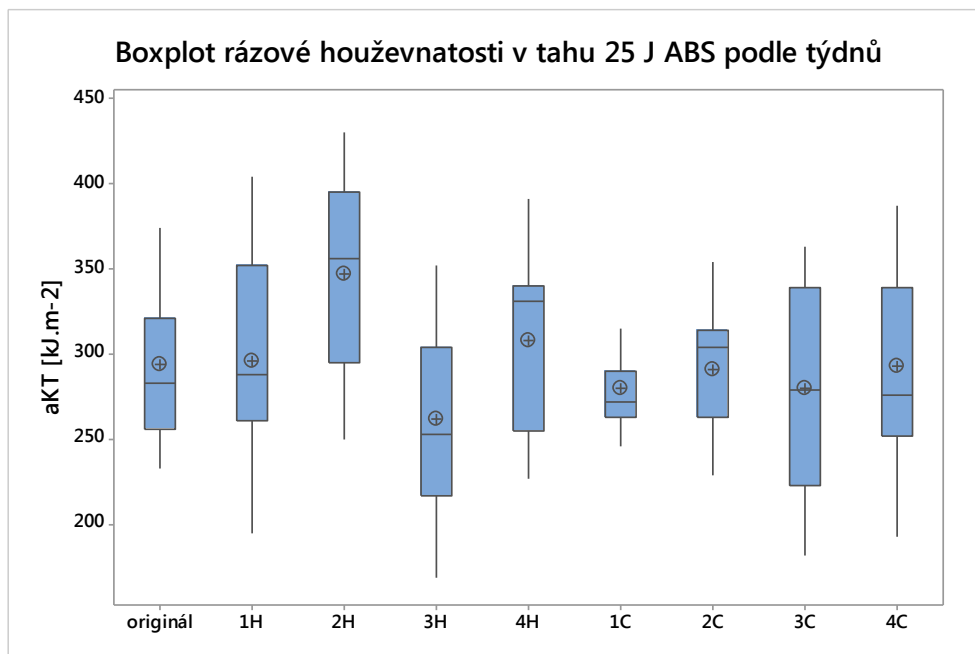
- 1)  $p = 0,213 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{KT\ ABS\ HOT\ 15J}$  se v průběhu času významně nemění.
- 2)  $p = 0,121 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{KT\ ABS\ HOT\ 15J}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,609 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{KT\ ABS\ COLD\ 15J}$  se v průběhu času významně nemění.
- 4)  $p = 0,427 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{KT\ ABS\ COLD\ 15J}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.

U všech souborů se rázová houževnatost v tahu 15 J oproti hodnotě originálu 282,8  $\frac{321,4}{255,7}$  kJ.m<sup>-2</sup> významně nezměnila.

#### 14.2.2 Nominální energie rázu 25 J

Tab. 37. Charakteristiky souborů měření rázové houževnatosti v tahu materiálu ABS při energii rázu 25 J.

soubor	$n$ [1]	$\bar{a}_{KT}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$s_{a_{KT}}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$V_{a_{KT}}$ [%]	$\frac{min_{a_{KT}}}{n}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_1$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\tilde{a}_{KT}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_3$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$max_{a_{KT}}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	IQR [kJ.m <sup>-2</sup> ]
originál	15	293,7	45,7	15,57	232,2	255,7	282,8	321,4	374,2	65,7
1H	15	295,8	63,9	21,59	194,2	260,5	287,9	351,9	404,3	91,4
2H	15	346,6	56,9	16,42	249,4	294,6	355,7	394,9	429,8	100,3
3H	15	261,8	54,6	20,85	168,2	216,6	253,0	303,7	351,9	87,1
4H	15	307,9	51,6	16,75	226,9	255,1	330,4	339,5	390,6	84,4
1C	15	279,8	39,7	14,20	212,6	262,5	271,9	289,8	374,3	27,3
2C	15	290,7	36,6	12,59	228,4	263,0	303,4	314,2	353,7	51,2
3C	15	279,4	60,1	21,53	181,2	222,4	278,6	338,9	363,4	116,5
4C	15	293,3	56,9	19,39	192,2	251,7	276,1	339,3	387,1	87,5



Obr. 82. Graf vývoje rázové houževnatosti v tahu ABS při energii rázu 25 J.

Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,007 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{KT\ ABS\ HOT\ 25J}$  se v průběhu času významně mění.
- 2)  $p = 0,005 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{KT\ ABS\ HOT\ 25J}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,887 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{KT\ ABS\ COLD\ 25J}$  se v průběhu času významně nemění.

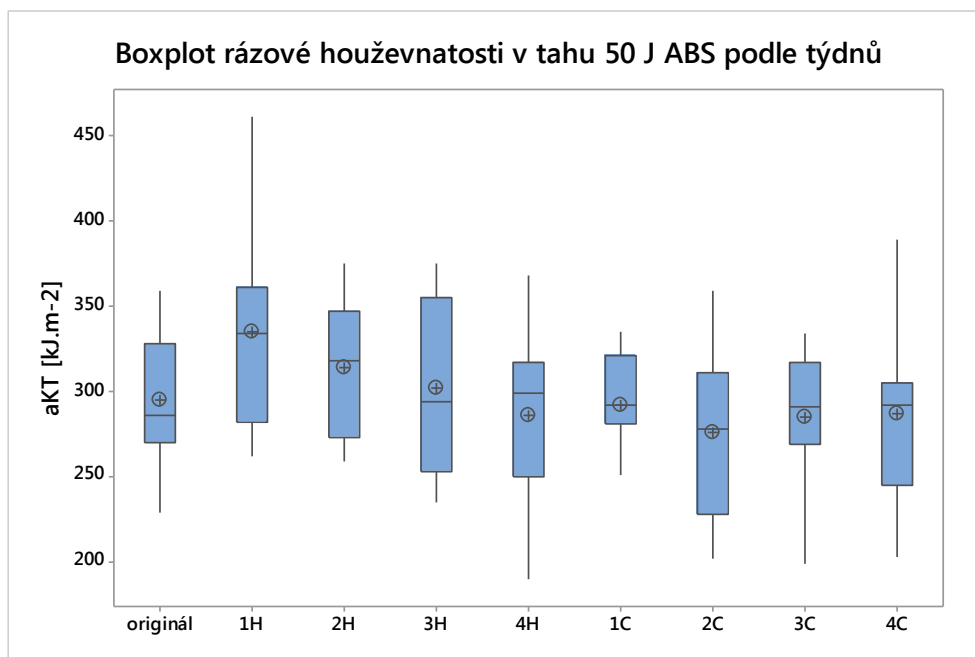
4)  $p = 0,860 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{KT ABS COLD 25J}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.

Stárnutí za zvýšené teploty vykazovalo oproti originálu  $282,8 \frac{321,4}{255,7} \text{ kJ.m}^{-2}$  nárůst rázové houževnatosti v tahu 25 J v týdnu druhém na maximum  $355,7 \frac{394,9}{294,6} \text{ kJ.m}^{-2}$  (+25,8 %), ale i její pokles v týdnu třetím na minimum  $253,0 \frac{303,7}{216,6} \text{ kJ.m}^{-2}$  (-10,5 %). Snížená teplota významně nezměnila hodnotu rázové houževnatosti v tahu originálu.

### 14.2.3 Nominální energie rázu 50 J

Tab. 38. Charakteristiky souborů měření rázové houževnatosti v tahu materiálu ABS při energii rázu 50 J.

soubor	$n$ [1]	$\bar{a}_K$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$s_{a_K}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$V_{a_K}$ [%]	$\min_{a_K}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_1$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\tilde{a}_K$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_3$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\max_{a_K}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	IQR [kJ.m <sup>-2</sup> ]
originál	15	294,6	37,3	12,67	228,7	269,8	286,4	328,1	358,9	58,3
1H	15	335,0	56,1	16,73	261,8	281,9	334,3	361,0	460,7	79,0
2H	15	314,0	39,5	12,58	259,3	273,3	317,6	347,0	375,0	73,7
3H	15	302,4	53,8	17,78	234,9	253,3	294,1	354,6	375,3	101,3
4H	15	285,7	52,8	18,46	190,1	249,6	298,4	317,1	367,8	67,5
1C	15	292,2	47,2	16,15	206,3	281,0	291,4	321,1	392,6	40,1
2C	15	275,6	52,5	19,07	201,8	228,1	277,9	311,2	359,4	83,1
3C	15	285,0	38,0	13,35	198,7	268,5	290,6	316,8	333,9	48,3
4C	15	286,7	47,1	16,41	202,7	244,5	292,2	305,4	389,1	60,8



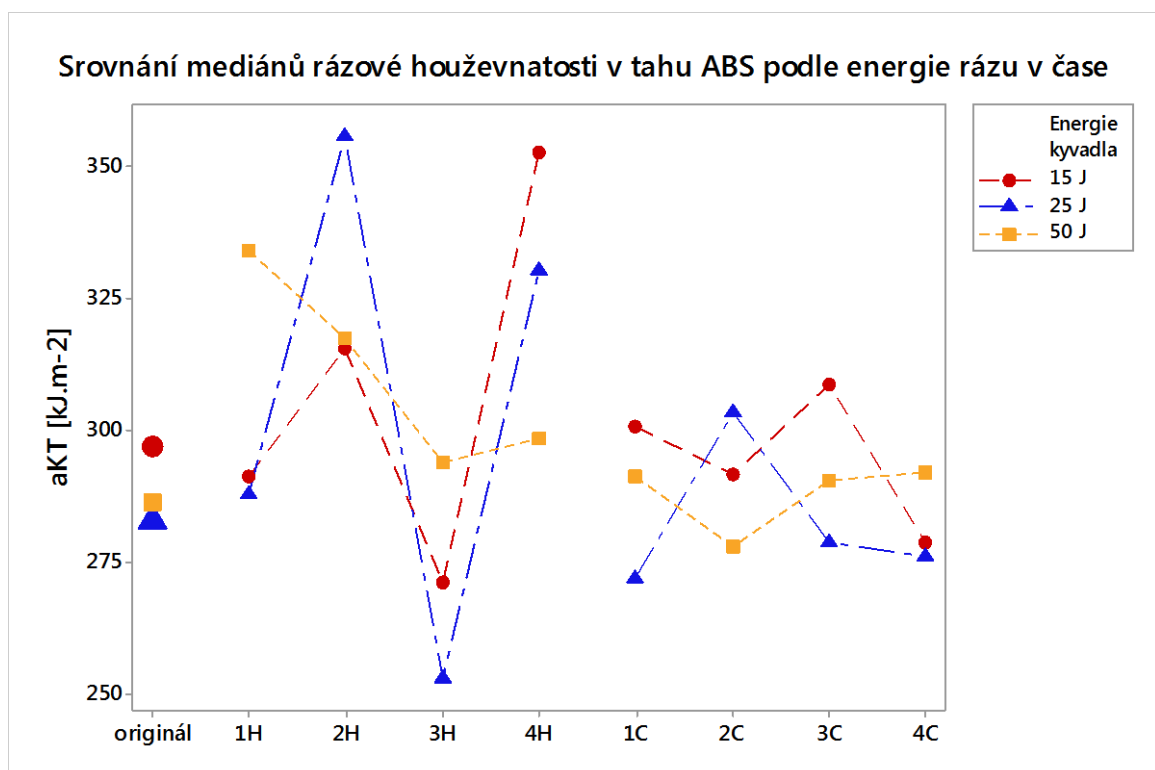
Obr. 83. Graf vývoje rázové houževnatosti v tahu HIPS při energii rázu 50 J.

Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,168 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{KT\ ABS\ HOT\ 50J}$  se v průběhu času významně nemění.
- 2)  $p = 0,157 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{KT\ ABS\ HOT\ 50J}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,886 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{KT\ ABS\ COLD\ 50J}$  se v průběhu času významně nemění.
- 4)  $p = 0,832 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{KT\ ABS\ COLD\ 50J}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.

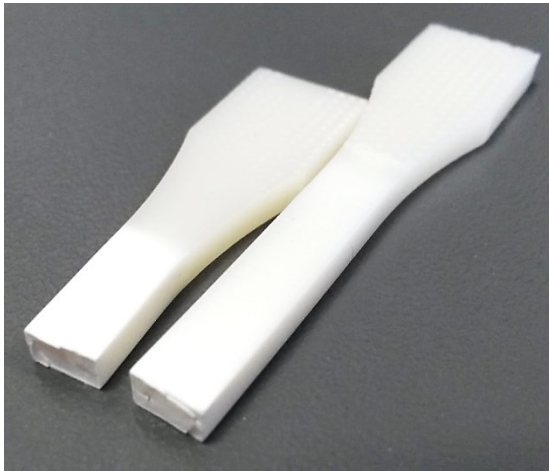
U všech souborů se rázová houževnatost v tahu 50 J oproti hodnotě originálu  $286,4^{328,1}_{269,8}$  kJ.m<sup>-2</sup> významně nezměnila.

#### 14.2.4 Vzájemné srovnání



Obr. 84. Srovnání mediánů rázové houževnatosti v tahu v čase podle energie rázu.

### 14.2.5 Fotografie



Obr. 85. Zkušební těleso ABS 0 po tahové zkoušce rázem – křehký lom.

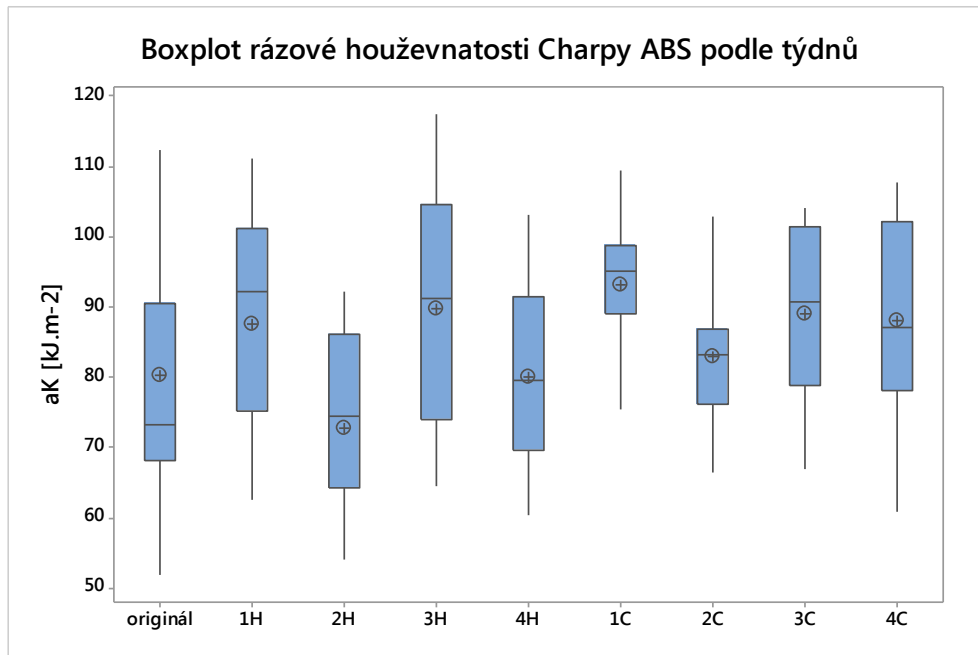


Obr. 86. Zkušební těleso ABS 4H po tahové zkoušce rázem – křehký lom.

## 14.3 Rázová houževnatost Charpy

Tab. 39. Charakteristiky souborů měření rázové houževnatosti v ohybu materiálu ABS.

soubor	$n$ [1]	$\bar{a}_K$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$s_{a_K}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$V_{a_K}$ [%]	$\min_{a_K}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_1$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\tilde{a}_K$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_3$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\max_{a_K}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	IQR [kJ.m <sup>-2</sup> ]
originál	30	80,28	16,15	20,12	51,96	68,21	73,25	90,41	112,48	22,19
1H	15	87,50	15,92	18,19	62,60	75,25	92,31	101,32	111,27	26,07
2H	15	72,85	12,75	17,50	54,05	64,23	74,38	86,23	92,28	22,00
3H	15	89,68	16,63	18,55	64,44	74,03	91,31	104,53	117,43	30,50
4H	15	79,97	13,42	16,78	60,35	69,71	79,54	91,52	103,21	21,81
1C	15	93,28	9,57	10,26	75,44	88,98	95,21	98,78	109,50	9,80
2C	15	82,98	9,82	11,83	66,40	76,09	83,30	86,87	102,83	10,78
3C	15	89,12	11,78	13,22	67,09	78,90	90,81	101,47	104,10	22,57
4C	15	88,05	15,03	17,07	60,95	78,15	87,13	102,23	107,84	24,08



Obr. 87. Graf vývoje rázové houževnatosti v ohybu ABS.

Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,035 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{K\ ABS\ HOT}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 2)  $p = 0,016 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{K\ ABS\ HOT}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,021 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{K\ ABS\ COLD}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 4)  $p = 0,090 > \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{K\ ABS\ COLD}$  nejsou vzájemně statisticky odlišné.

Stárnutí těles za zvýšené teploty způsobilo mírné zvýšení rázové houževnatosti u všech souborů HOT těles, oproti originálu  $73,25 \frac{90,41}{68,21}$  kJ.m<sup>-2</sup> maximálně na  $92,31 \frac{101,32}{75,25}$  kJ.m<sup>-2</sup> (+26,0 %) v prvním týdnu. Snížená teplota způsobila zvýšení rázové houževnatosti na  $95,21 \frac{98,78}{88,98}$  kJ.m<sup>-2</sup> (+30,0 %) v týdnu prvním a dále se hodnota významně neměnila.



Obr. 88. Zkušební těleso ABS 0 po zkoušce Charpy – křehký lom.

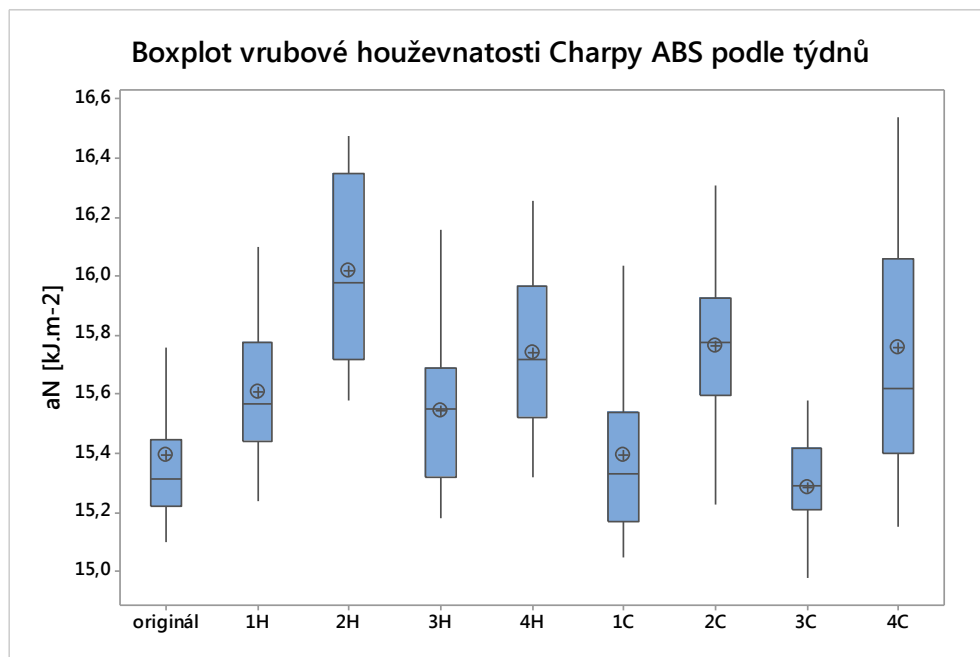


Obr. 89. Zkušební těleso ABS 4H po zkoušce Charpy – křehký lom.

## 14.4 Vrubová houževnatost Charpy

Tab. 40. Charakteristiky souborů měření vrubové houževnatosti v ohybu materiálu ABS.

soubor	$n$ [1]	$\bar{a}_N$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$s_{a_N}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$V_{a_N}$ [%]	$\min_{a_N}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_1$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\tilde{a}_N$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$Q_3$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$\max_{a_N}$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]	$IQR$ [kJ.m <sup>-2</sup> ]
originál	30	15,397	0,341	2,22	14,76	15,22	15,32	15,45	16,56	0,23
1H	15	15,611	0,228	1,46	15,24	15,44	15,57	15,78	16,10	0,34
2H	15	16,019	0,304	1,90	15,58	15,72	15,98	16,35	16,48	0,63
3H	15	15,543	0,266	1,71	15,18	15,32	15,55	15,69	16,16	0,37
4H	15	15,741	0,302	1,92	15,32	15,52	15,72	15,97	16,26	0,45
1C	15	15,398	0,295	1,91	15,05	15,17	15,33	15,54	16,04	0,37
2C	15	15,765	0,315	2,00	15,23	15,60	15,78	15,93	16,31	0,33
3C	15	15,286	0,252	1,65	14,80	15,21	15,29	15,42	15,76	0,21
4C	15	15,759	0,450	2,86	15,15	15,40	15,62	16,06	16,54	0,66



Obr. 90. Graf vývoje vrubové houževnatosti v ohybu ABS.

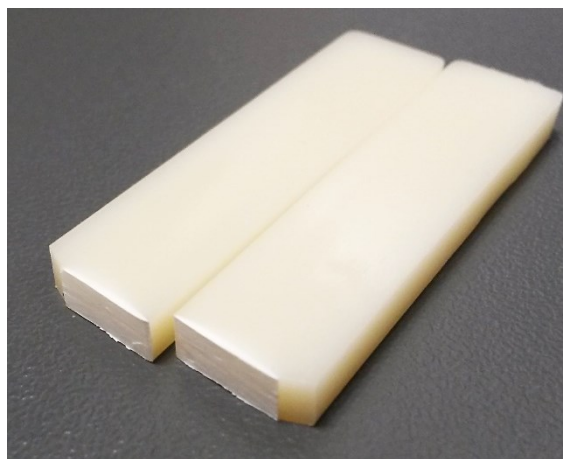
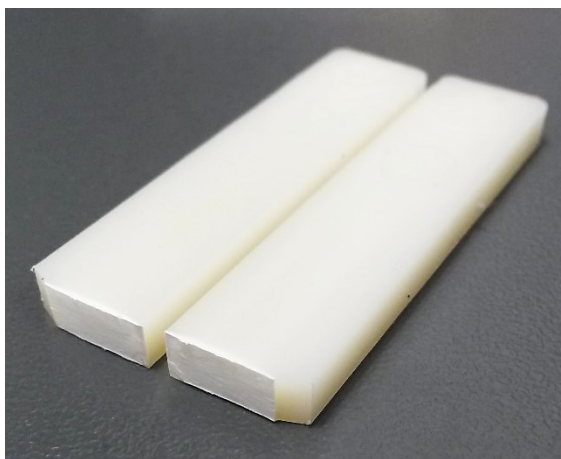
Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{N\text{ ABS HOT}}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 2)  $p = 0,001 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{N\text{ ABS HOT}}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{a}_{N\text{ ABS COLD}}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 4)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{a}_{N\text{ ABS COLD}}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.

Stárnutí těles za zvýšené i snížené teploty způsobilo mírné zvýšení vrubové houževnatosti u všech souborů těles oproti originálu 15,32<sup>15,45</sup>/<sub>15,22</sub> kJ.m<sup>-2</sup> na maximum 15,98<sup>16,35</sup>/<sub>15,72</sub> kJ.m<sup>-2</sup>



(+4,3 %) u HOT těles v týdnu druhém a na maximum  $15,78 \frac{15,93}{15,60} \text{ kJ.m}^{-2}$  (+3,0 %) u COLD těles. Jediný pokles oproti originálu nastal u souboru 3C, kdy houževnatost poklesla na  $15,29 \frac{15,42}{15,21} \text{ kJ.m}^{-2}$  (-0,2 %).



Obr. 91. Zkušební těleso ABS 0 opatřené vrubem po zkoušce Charpy – křehký lom. Obr. 92. Zkušební těleso ABS 4H opatřené vrubem po zkoušce Charpy – křehký lom.

## 14.5 Vrubové číslo

Tab. 41. Hodnoty vrubového čísla ABS podle týdnů.

soubor	originál	1H	2H	3H	4H	1C	2C	3C	4C
$k_V$ [1]	4,8	5,9	4,7	5,9	5,1	6,2	5,3	5,9	5,6

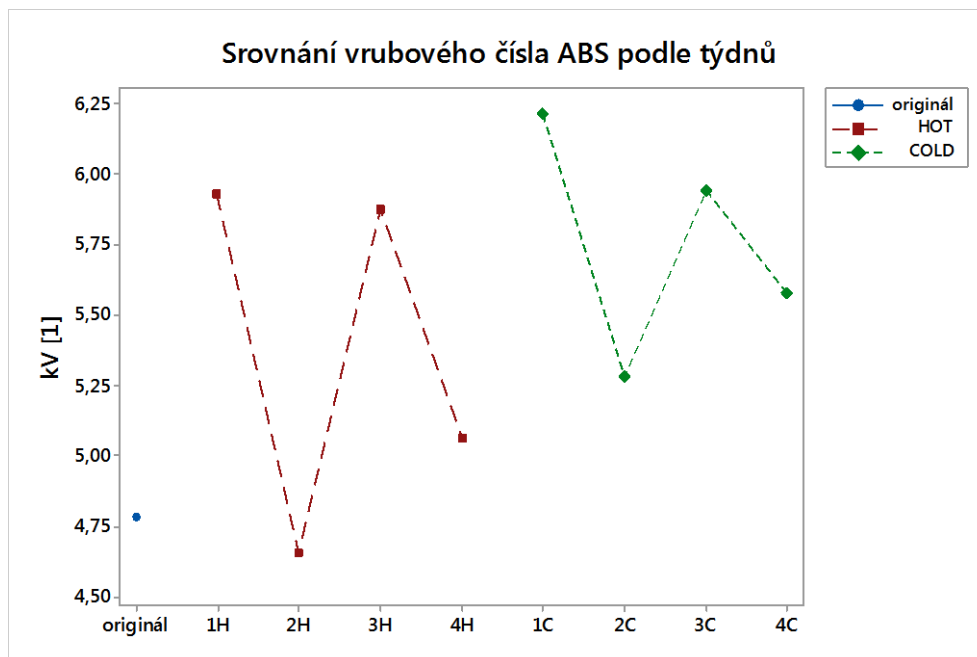
Vzorový výpočet vrubového čísla dle vztahu 11 pro originální ABS:

$$k_{V \text{ ABS } 0} = \frac{\tilde{\alpha}_{K \text{ ABS } 0}}{\tilde{\alpha}_{N \text{ ABS } 0}}$$

$$k_{V \text{ ABS } 0} = \frac{73,25}{15,32}$$

$$k_{V \text{ ABS } 0} = 4,8$$

Stárnutí za zvýšené teploty způsobilo zvýšení vrubového čísla oproti originálu 4,8 na hodnotu až 5,9, byl zaznamenán však i mírný pokles na hodnotu 4,7 u souboru 2H. Stárnutí za snížené teploty zvýšilo vrubové číslo na hodnoty 5,3 až 6,2.

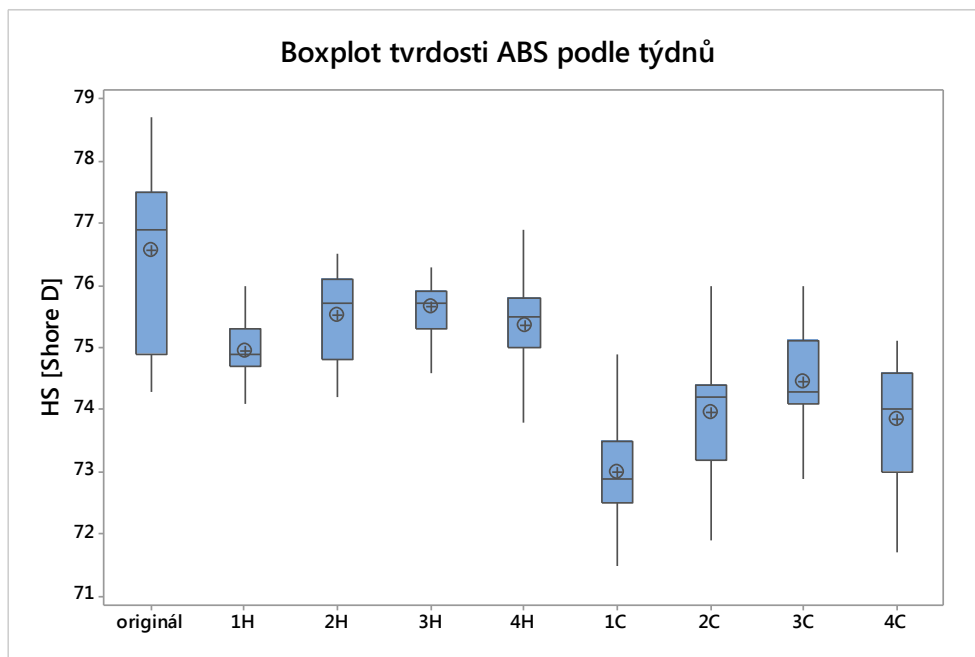


Obr. 93. Graf vývoje vrubového čísla materiálu ABS v čase.

## 14.6 Tvrдост

Tab. 42. Charakteristiky souborů měření tvrdosti materiálu ABS.

soubor	$\frac{n}{[1]}$	$\frac{\bar{H}_S}{[ShoreD]}$	$\frac{s_{H_S}}{[ShoreD]}$	$\frac{V_{H_S}}{[\%]}$	$\frac{\min_{H_S}}{[ShoreD]}$	$\frac{Q_1}{[ShoreD]}$	$\frac{\bar{H}_S}{[ShoreD]}$	$\frac{Q_3}{[ShoreD]}$	$\frac{\max_{H_S}}{[ShoreD]}$	$\frac{IQR}{[ShoreD]}$
originál	15	76,560	1,404	1,83	74,3	74,9	76,9	77,5	78,7	2,6
1H	15	74,947	0,517	0,69	74,1	74,7	74,9	75,3	76,0	0,6
2H	15	75,520	0,721	0,96	74,2	74,8	75,7	76,1	76,5	1,3
3H	15	75,653	0,553	0,73	74,6	75,3	75,7	75,9	76,9	0,6
4H	15	75,367	0,773	1,03	73,8	75,0	75,5	75,8	76,9	0,8
1C	15	72,993	0,838	1,15	71,5	72,5	72,9	73,5	74,9	1,0
2C	15	73,967	1,143	1,55	71,9	73,2	74,2	74,4	76,0	1,2
3C	15	74,440	0,813	1,09	72,9	74,1	74,3	75,1	76,0	1,0
4C	15	73,840	1,011	1,37	71,7	73,0	74,0	74,6	75,1	1,6



Obr. 94. Graf vývoje tvrdosti ABS.

Vyhodnocení:

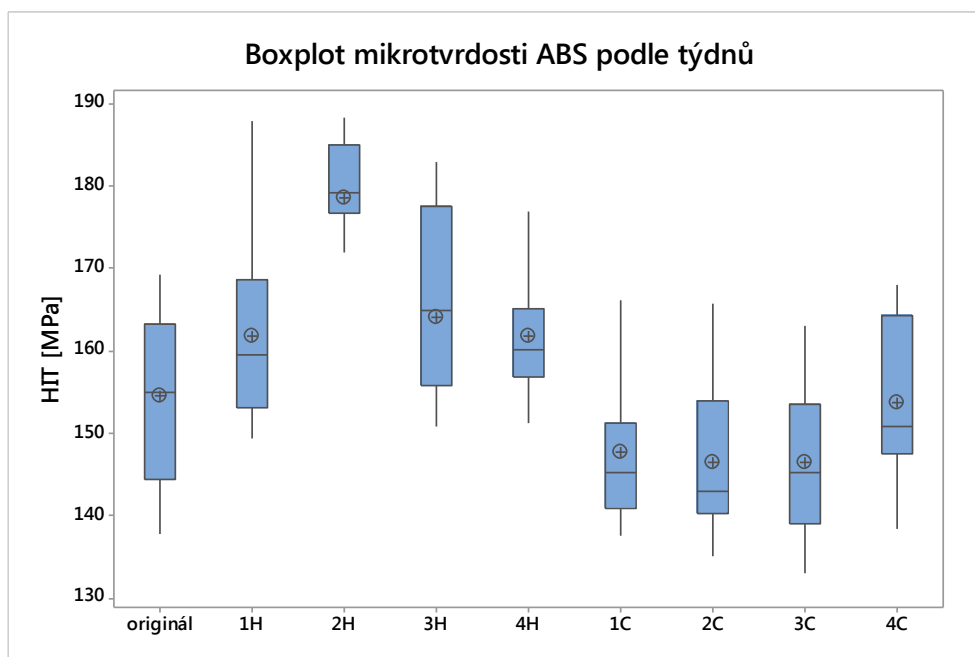
- 1)  $p = 0,002 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{H}_{S_{ABS\ HOT}}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 2)  $p = 0,017 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{H}_{S_{ABS\ HOT}}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{H}_{S_{ABS\ COLD}}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 4)  $p = 0,001 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{H}_{S_{ABS\ COLD}}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.

Stárnutí za zvýšené i snížené teploty ponížilo hodnotu tvrdosti u všech souborů HOT i COLD těles oproti hodnotě tvrdosti originálu  $76,9 \frac{77,5}{74,9}$  Shore D na hodnotu minima  $74,9 \frac{75,3}{74,7}$  Shore D (-2,6 %) u HOT těles a  $72,9 \frac{73,5}{72,5}$  Shore D (-5,2 %) u COLD těles.

## 14.7 Mikrotvrdość

Tab. 43. Charakteristiky souborů měření mikrotvrdości materiálu ABS.

soubor	$n$ [1]	$\bar{H}_{IT}$ [MPa]	$s_{HIT}$ [MPa]	$V_{HIT}$ [%]	$\min_{HIT}$ [MPa]	$Q_1$ [MPa]	$\tilde{H}_{IT}$ [MPa]	$Q_3$ [MPa]	$\max_{HIT}$ [MPa]	$IQR$ [MPa]
originál	30	154,49	10,01	6,48	137,74	144,40	155,05	163,22	169,33	18,82
1H	30	161,88	10,78	6,66	149,31	153,04	159,47	168,56	187,89	15,52
2H	30	178,59	8,47	4,74	155,31	176,68	179,28	184,91	188,29	8,23
3H	30	164,01	20,87	12,72	69,80	155,84	164,93	177,57	182,89	21,73
4H	30	161,81	7,64	4,72	151,22	156,83	160,14	165,04	182,96	8,21
1C	30	147,76	8,84	5,98	137,68	140,84	145,35	151,18	167,13	10,34
2C	30	146,48	9,17	6,26	135,10	140,23	142,89	153,98	165,65	13,75
3C	30	146,40	8,34	5,70	133,08	138,95	145,26	153,55	163,00	14,60
4C	30	153,64	9,28	6,04	138,43	147,60	150,81	164,22	167,91	16,61



Obr. 95. Graf vývoje mikrotvrdości ABS.

Vyhodnocení:

- 1)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{H}_{IT ABS HOT}$  se v průběhu času statisticky významně mění.
- 2)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{H}_{IT ABS HOT}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.
- 3)  $p = 0,000 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnota  $\tilde{H}_{IT ABS HOT}$  se v průběhu času statisticky významně mění.

4)  $p = 0,003 < \alpha = 0,05 \rightarrow$  Hodnoty  $\tilde{H}_{IT\ ABS\ HOT}$  jsou vzájemně statisticky odlišné.

Stárnutí za zvýšené teploty zvýšilo hodnotu mikrotvrdomosti u všech souborů HOT těles oproti originálu  $155,05 \begin{smallmatrix} 163,22 \\ 144,40 \end{smallmatrix}$  MPa, maximálně na  $179,28 \begin{smallmatrix} 184,91 \\ 176,68 \end{smallmatrix}$  MPa (+15,6 %) v týdnu druhém. Stárnutí za snížené teploty snížilo hodnotu mikrotvrdomosti u všech COLD těles, minimálně na  $142,89 \begin{smallmatrix} 153,98 \\ 140,23 \end{smallmatrix}$  MPa (-7,8 %) v týdnu druhém.

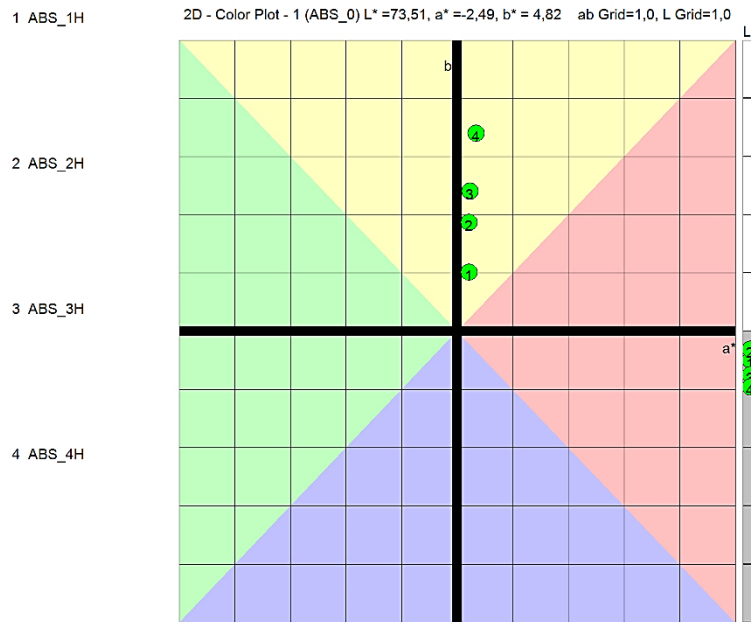
## 14.8 Barevnost

Tělesa vystavená zvýšené teplotě v průběhu stárnutí změnila subjektivně barvu oproti originálu více do žluté a tmavší barvy. Tato barevná změna byla úměrná délce vystavení teplotě. Barva těles vystavených snížené teplotě objektivně barvu nezměnila.



*Obr. 96. Srovnání barevnosti klimatizovaného tělesa ABS 4H (vpravo) a originálního ABS.*

14.8.1 ABS HOT



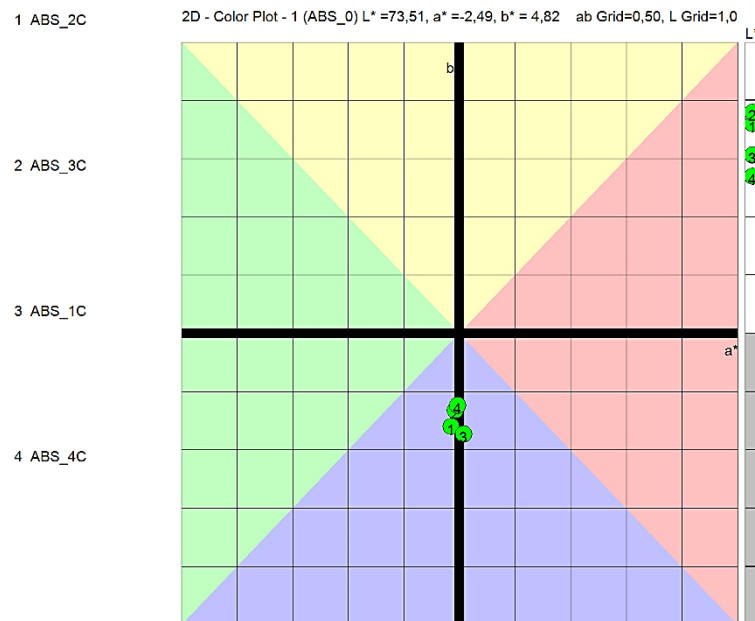
Obr. 97. Barevný kříž srovnání ABS HOT těles oproti standardu.

Vzorky ABS HOT mají oproti standardu (originál) žlutější barvu intenzivnější úměrně délce stárnutí. Ve čtvrtém týdnu stárnutí se hodnota  $db^*$  lišila o 3,39 oproti standardu. Celková barevnost se změnila o 3,54.

Tab. 44. Hodnoty barevnosti ABS HOT těles.

soubor	L*	a*	b*	dL*	da*	db*	dE*
standard	73,51	-2,49	4,82	73,51	-2,49	4,82	0,00
1H	73,01	-2,26	5,82	-0,51	0,23	1,01	1,15
2H	73,19	-2,26	6,68	-0,32	0,23	1,86	1,90
3H	72,76	-2,24	7,21	-0,76	0,24	2,40	2,53
4H	72,55	-2,13	8,21	-0,97	0,35	3,39	3,54

## 14.8.2 ABS COLD



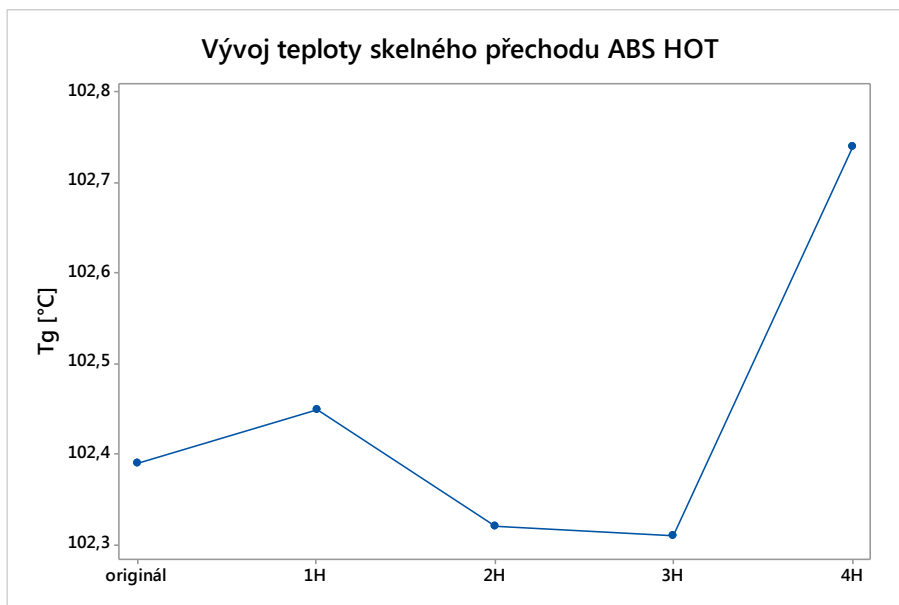
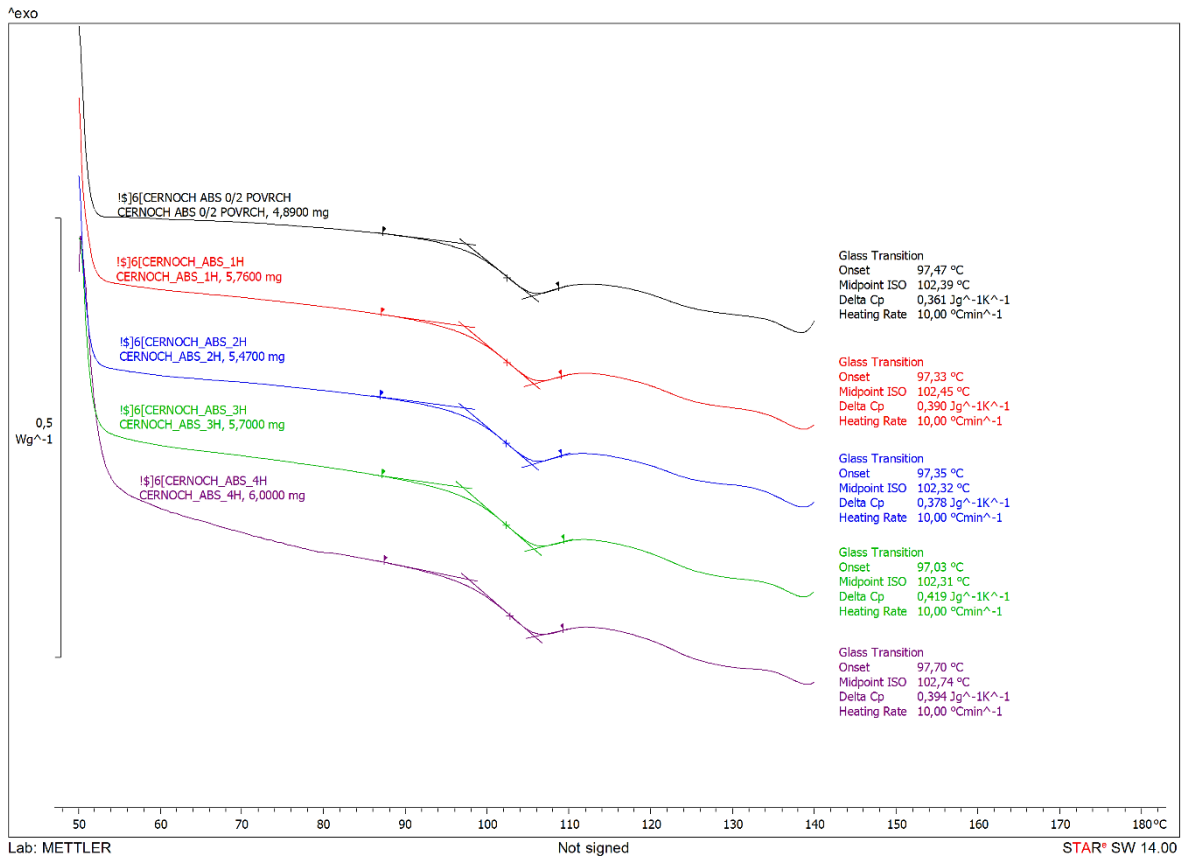
Obr. 98. Barevný kříž srovnání ABS COLD těles oproti standardu.

Vzorky ABS COLD mají oproti standardu (originál) méně žlutou barvu úměrnou délce klimatického stárnutí. V prvním týdnu stárnutí se hodnota  $db^*$  lišila o  $-0,87$  oproti standardu a dalším postupem stárnutí v chladu se odstín žluté přibližoval blíže standardu. Hodnota celkové barevné změny  $dE^*$  nabyla hodnoty nejvýše  $3,84$ .

Tab. 45. Hodnoty barevnosti ABS COLD těles.

soubor	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$dL^*$	$da^*$	$db^*$	$dE^*$
standard	73,51	-2,49	4,82	73,51	-2,49	4,82	0,00
1C	76,57	-2,44	3,95	3,05	0,05	-0,87	3,18
2C	77,10	-2,56	4,01	3,58	-0,07	-0,81	3,67
3C	77,30	-2,52	4,15	3,78	-0,03	-0,67	3,84
4C	76,20	-2,5	4,2	2,69	-0,01	-0,62	2,76

### 14.9 DSC – ABS HOT

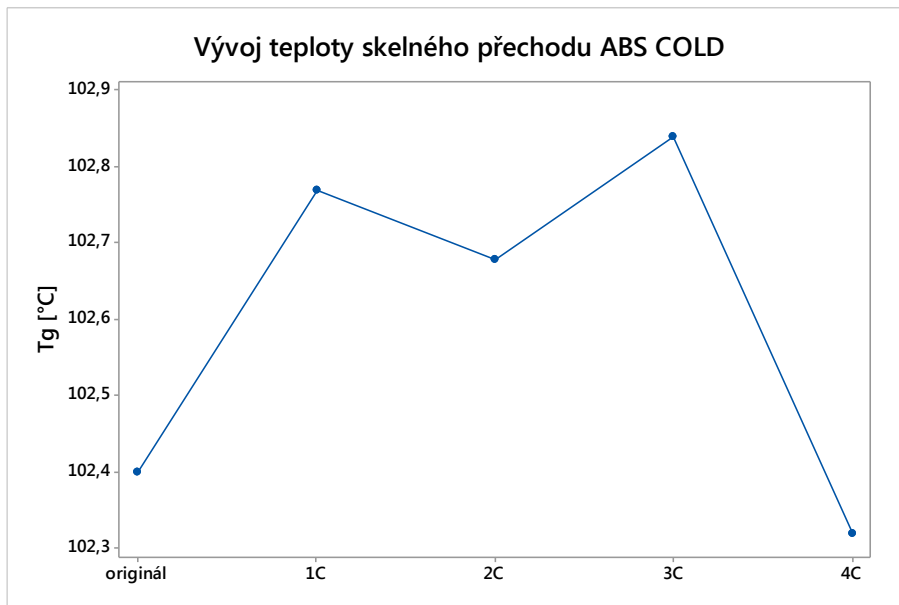
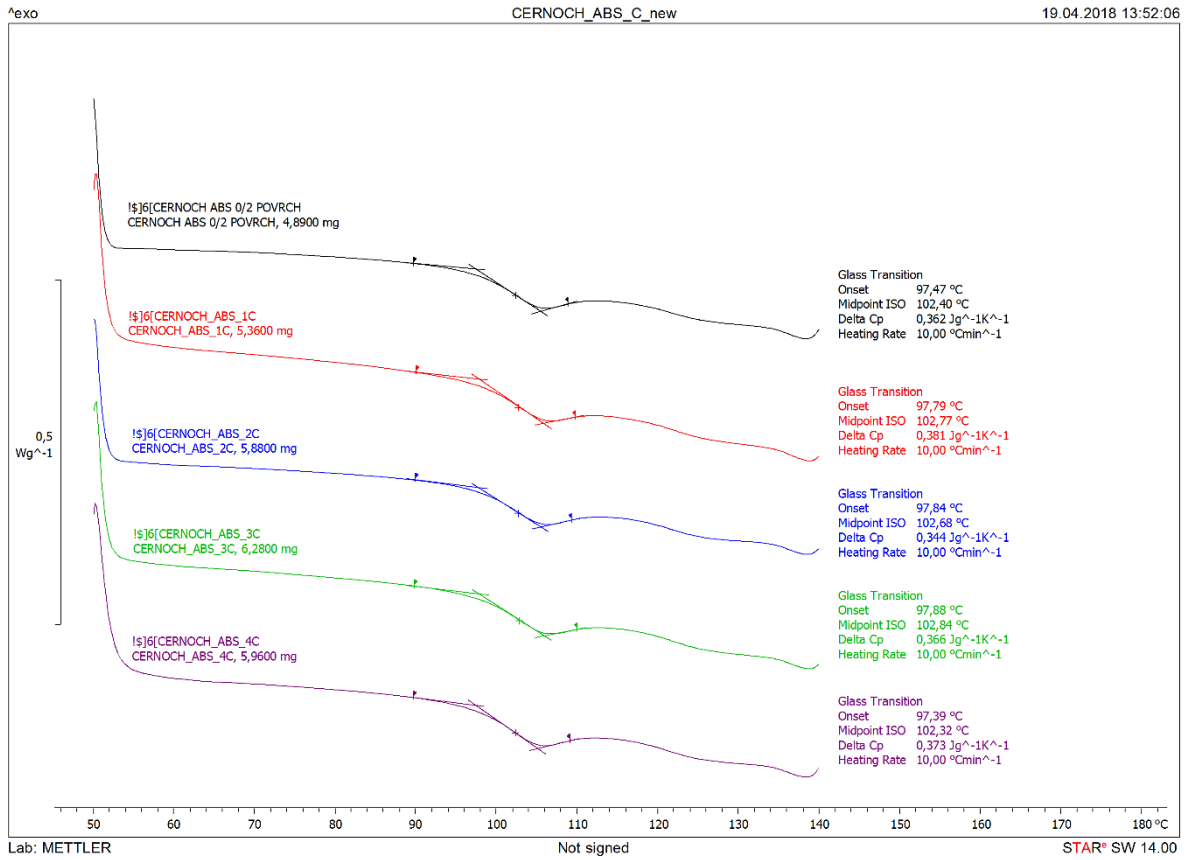


Obr. 99. Vývoj teploty skelného přechodu ABS HOT.

Teplota skelného přechodu ABS HOT fluktovala mezi teplotami  $102,31\text{ }^{\circ}C$  až  $102,74\text{ }^{\circ}C$  bez trendového vývoje. Nevýznamné kolísání  $T_g$  je způsobeno chybou metody určení inflexního bodu  $T_g$ .



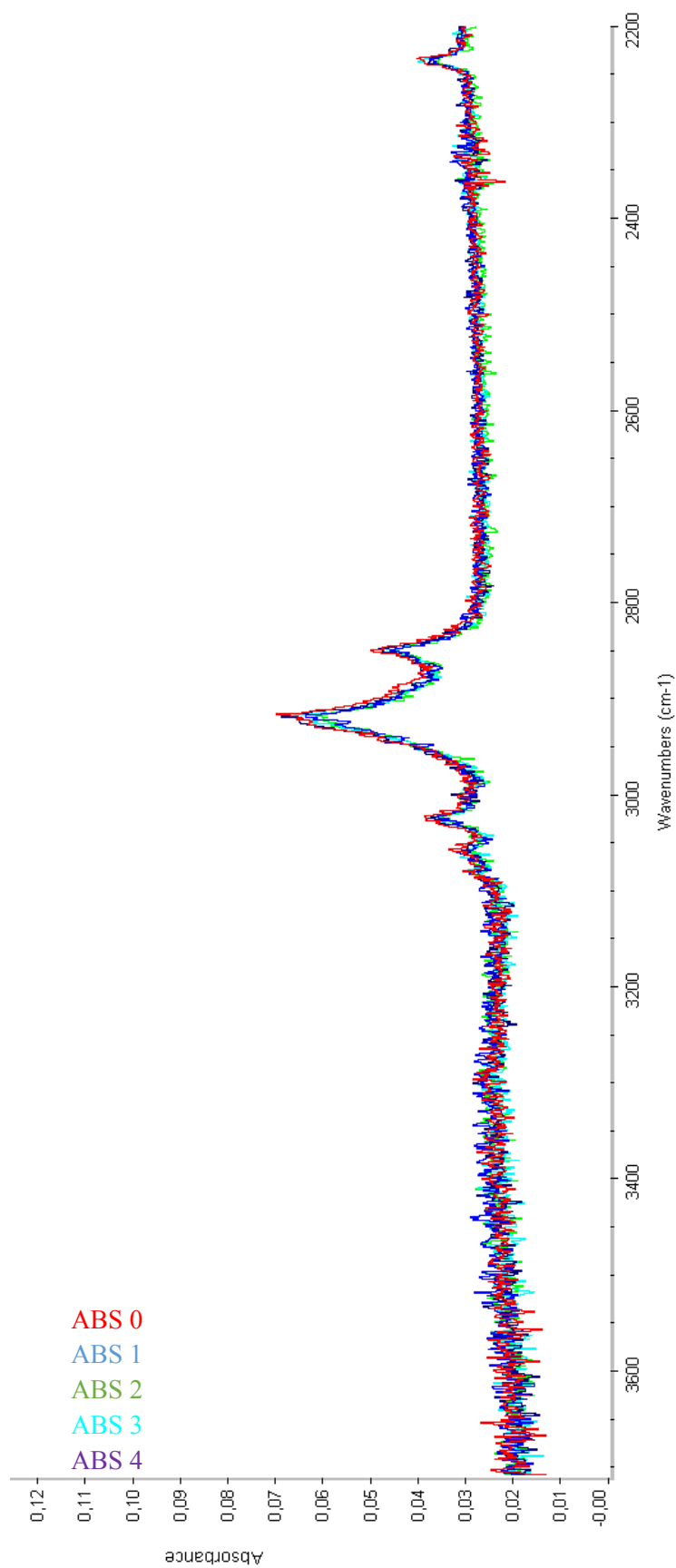
### 14.10 DSC – ABS COLD



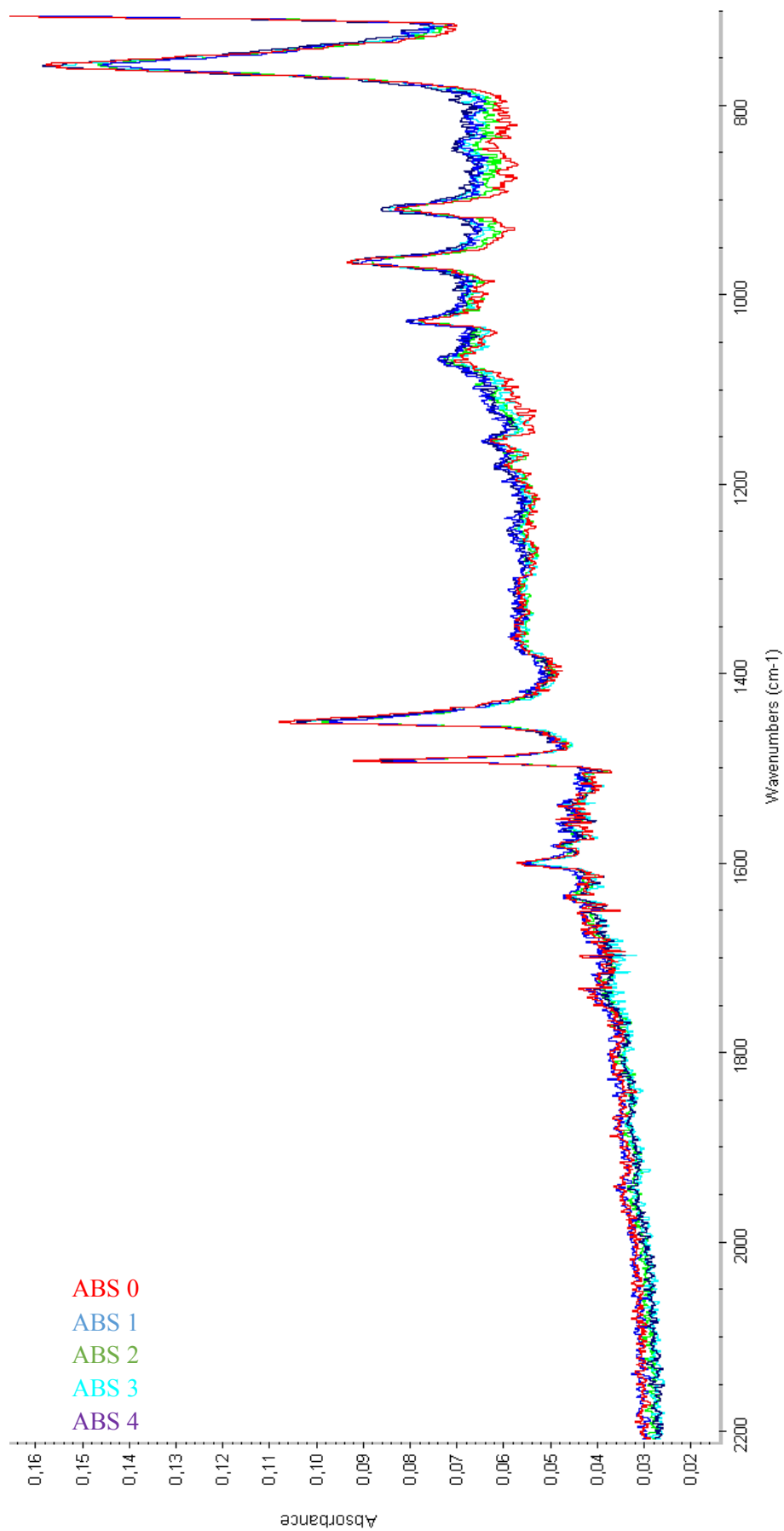
Obr. 100. Vývoj teploty skelného přechodu ABS COLD.

Teplota skelného přechodu ABS COLD fluktovala mezi teplotami 102,32 °C až 102,84 °C bez trendového vývoje. Nevýznamné kolísání Tg je způsobeno chybou metody určení inflexního bodu Tg.

## 14.11 FTIR spektroskopie – ABS HOT

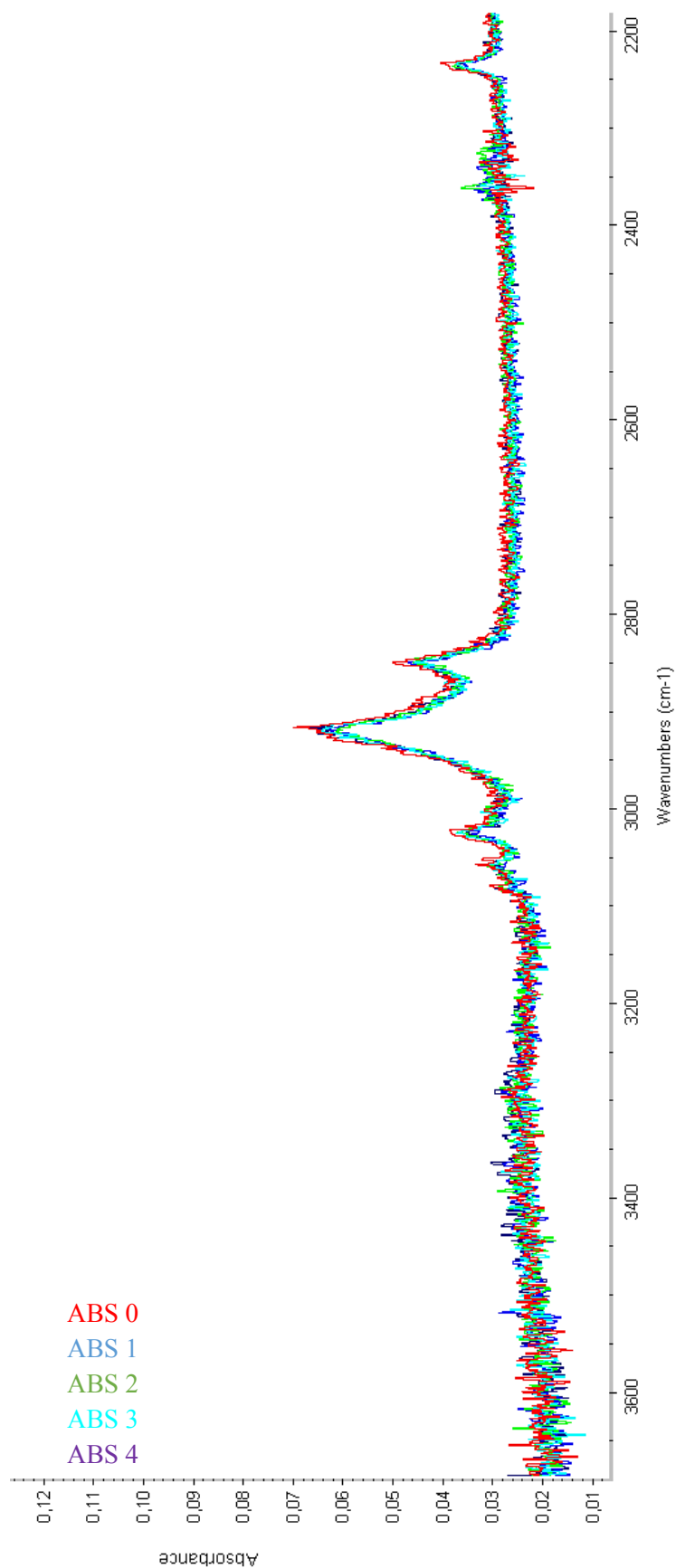


Obr. 101. FTIR část spektra 3700 ÷ 2200 cm<sup>-1</sup> materiálu ABS HOT.

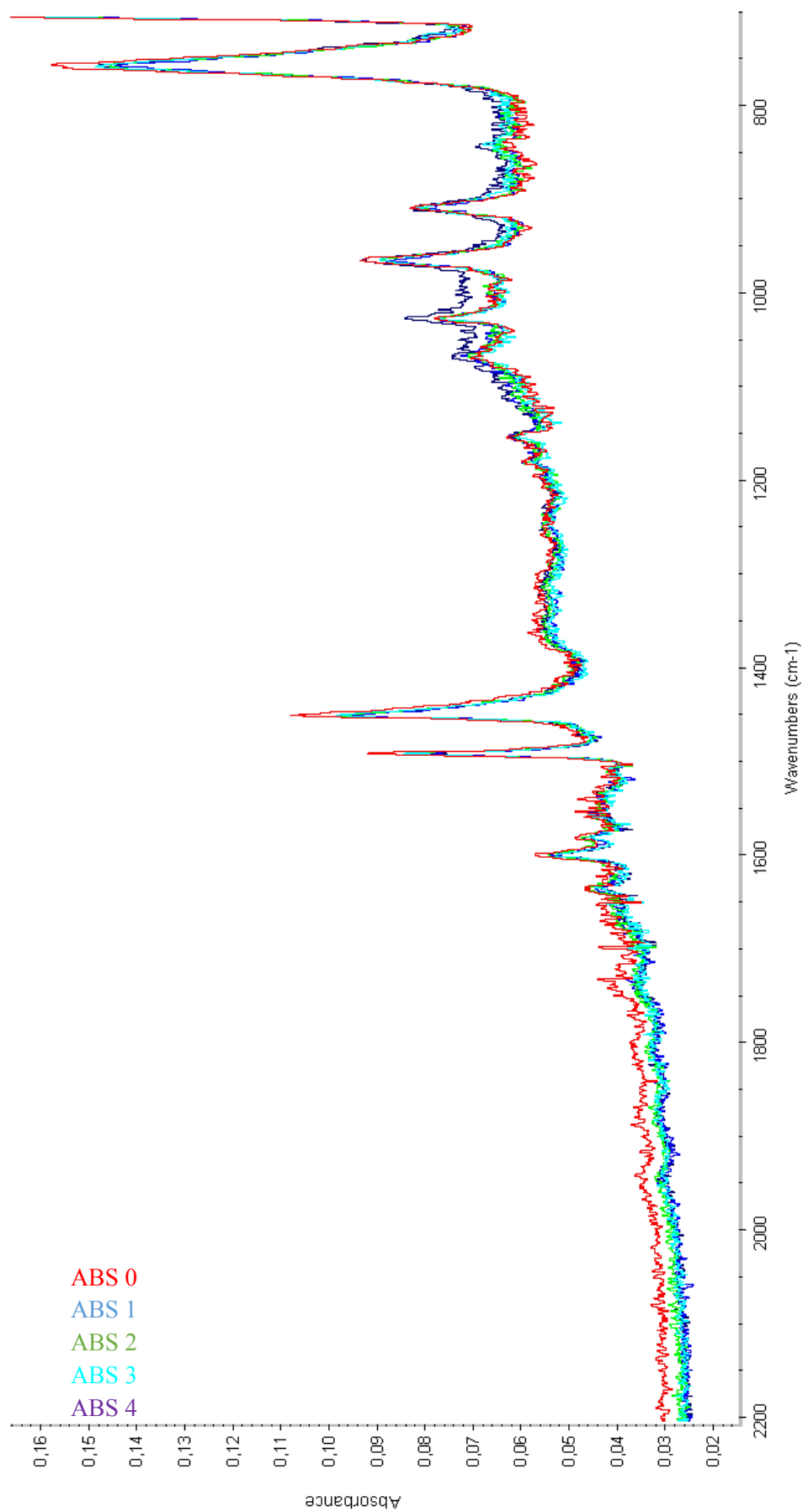


Obr. 102. FTIR část spektra  $2200 \div 700 \text{ cm}^{-1}$  materiálu ABS HOT.

## 14.12 FTIR spektroskopie – ABS COLD



Obr. 103. FTIR část spektra  $3700 \div 2200 \text{ cm}^{-1}$  materiálu ABS COLD.



Obr. 104. FTIR část spektra 2200 ÷ 700 cm<sup>-1</sup> materiálu ABS HOT.

## DISKUZE VÝSLEDKŮ

Každé zkušební těleso obou materiálů bylo po vyjmutí z klimakomory vizuálně zkontrolováno. U těles po celou dobu stárnutí nedošlo k jejich deformaci, ke zjevným změnám povrchu či migraci látek. U HOT těles bylo rozeznatelné žloutnutí materiálu v porovnání s originálním materiálem. U COLD těles změna barevného odstínu nebyla ani po čtyř týdnech stárnutí okem rozeznatelná.

### HIPS HOT

U materiálu HIPS „HOT“ došlo k poklesu E modulu o  $9,4 \div 22,6$  % bez zjevného trendu. Při rychlostech tahové deformace 50 a 200 mm.min<sup>-1</sup> došlo u všech klimatizovaných těles k nárůstu pevnosti v tahu o  $1,8 \div 8,2$  %, jen při rychlosti 600 mm.min<sup>-1</sup> nastal u všech klimatizovaných těles pokles pevnosti, a to o 3,7 %. Tažnost při všech rychlostech deformace poklesla o  $30,7 \div 43,5$  %. Naměřené hodnoty nevykazovaly zjevný trend vývoje vlastností v průběhu stárnutí. Výrazný pokles tažnosti a současné zvýšení pevnosti v tahu pravděpodobně zapříčinilo síťování kaučukové složky. K poklesu tažnosti a počátečnímu snížení modulu pružnosti bez dalšího vývoje mohla přispět relaxace napětí vlivem vystavení těles zvýšené teplotě v době do jednoho týdne po umístění vzorků do klimakomory. Zvýšená teplota orientované a předpjaté molekuly uvede do stavu rovnováhy a může tím snížit pevnost materiálu.

Rázová houževnatost v tahu poklesla shodně při všech energiích rázu, nejvíce o 61,5 % při rázu 25 J, nejméně o 42,6 % při rázu 50 J. Naměřené hodnoty nevykazovaly trend vývoje vlastností v průběhu stárnutí. Rázová houževnatost metodou Charpy se u klimatizovaných těles snížila o 43,7 %. Stárnutí nemělo na vývoj houževnatosti vliv, pouze vystavení těles zvýšené teplotě v čase do 1 týdne. Vrubová houževnatost metodou Charpy se úměrně snižovala s délkou stárnutí až na hodnotu o 28,0 % nižší. Vrubové číslo se ponížilo o  $19,0 \div 43,8$  % bez zjevného trendu během stárnutí. Vystavení materiálu zvýšené teplotě zvyšuje jeho náchylnost k oslabení vrubem při rázovém zatěžování ohybem až o 44 %.

Pokles houževnatosti, tažnosti i pevnosti v tahu při vysokých rychlostech deformace možno vysvětlit teorií síťování kaučukové složky [9] [12] spolu s odštěpováním roubovaných řetězců polystyrenu z PB řetězců na rozhraní fází. Elastomerní částice takto ztratí soudržnost s maticí, čímž deformační energie působí převážně na křehčí matici. Svůj podíl může mít i relaxace napětí.

Tvrдость materiálu se u klimatizovaných těles výrazně nezměnila a zůstala na hodnotě originálu. Mikrotvrдость povrchu materiálu se také významně nezměnila. I přes uvažované síťování kaučukových částic je jejich obsah v materiálu velmi malý, aniž by výrazně ovlivnila tvrdost materiálu. Indentor mikrotvrdoměru je v porovnání s velikostí těchto částic velký a není schopen změřit jejich tvrdost. Proto se ani tvrdost povrchové vrstvy nemění.

Úměrně s dobou stárnutí za zvýšené teploty materiál dle předpokladů více žloutnul. Hodnota žluté se v posledním týdnu lišila oproti originálu o hodnotu  $db^*$  9,53. Žloutnutí je způsobeno oxidací, kterou zvýšená teplota jen urychluje. [7] [16]

Teplota skelného přechodu se snižovala úměrně s dobou stárnutí, rozdíl v  $T_g$  ve čtvrtém týdnu stárnutí byl 1,59 °C. Pokles teploty  $T_g$  pravděpodobně značí krácení makromolekul materiálu, což by potvrzovalo teorii o odštěpování roubovaných řetězců polystyrenu z PB makromolekul mající za následek významné snížení houževnatosti a tažnosti.

Skutečnost, že změna mechanických vlastností neměla výrazný a jasný trend nahrává teorii, že k síťování kaučukové složky došlo převážně v období do 1. týdne umístění těles do klimakomory či v tomto období proběhla relaxace napětí materiálu.

### **HIPS COLD**

U materiálu HIPS „COLD“ došlo k poklesu E modulu o  $8,2 \div 17,5$  %. Trend vývoje byl rostoucí s délkou stárnutí v chladu. Při rychlostech deformace 50 a 200  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  došlo u všech klimatizovaných těles k nárůstu pevnosti o  $2,2 \div 2,9$  %, jen při rychlosti 600  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  nastal u všech klimatizovaných těles pokles pevnosti, a to maximálně o 3,1 %. Tažnost se výrazně nezměnila, až na případ rychlosti deformace 50  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , kdy byl její pokles o  $4,1 \div 16,2$  %. Naměřené hodnoty nevykazovaly jasný trend vývoje vlastností v průběhu stárnutí. Naměřené hodnoty při tahové zkoušce se liší maximálně o jednotky procent. Nelze tyto změny hodnot přisuzovat stárnutí za nízké teploty, nýbrž pravděpodobně odchylkám v měření.

Rázová houževnatost v tahu poklesla shodně při všech energiích rázu, nejvíce o 41,5 % při rázu 15 J, nejméně o 9,0 % při rázu 50 J. Naměřené hodnoty nevykazovaly trend vývoje vlastností v průběhu stárnutí. Rázová houževnatost metodou Charpy se u klimatizovaných těles oproti originálu výrazně nezměnila. Vrubová houževnatost metodou Charpy se výrazně neměnila, fluktovala v mezi hodnotami -5,6 % až +0,5 % původní hodnoty. Vrubové číslo se ponížilo o 18,9 %, došlo i k jeho zvýšení oproti původní hodnotě o 1,2 % bez

zvláštního trendu během stárnutí. Vystavení materiálu snížené teplotě zvyšuje jeho náchylnost k oslabení vrubem při rázovém zatěžování ohybem až o 19 %. Naměřené hodnoty se opět liší maximálně o jednotky procent, což pravděpodobně nelze přisuzovat stárnutí za nízké teploty, nýbrž se může jednat o odchylky měření.

Hodnoty tvrdosti materiálu u klimatizovaných těles mírně poklesly o  $0,3 \div 1,0$  %. Hodnoty mikrotvrdosti fluktovaly mezi  $-6,5$  % a  $+4,5$  % původní hodnoty. Opět se hodnoty liší jen v jednotkách procent a nevykazují jasný trend. Z toho důvodu se může jednat jen o odchylku měření.

Barevnost  $db^*$  poklesla nejvýše o 0,59 oproti originálu, přičemž změna celkové barevnosti byla 0,96, čímž se barevná změna dá považovat za zanedbatelnou oproti originálu.

Teplota skelného přechodu fluktovala v rozmezí  $91,97$  °C a  $92,27$  °C bez trendu. Rozdíly lze spíše přisuzovat nepřesnosti určení inflexního bodu  $T_g$  než vlivům stárnutí za nízké teploty.

### **ABS HOT**

U materiálu ABS „HOT“ došlo k jednorázovému poklesu E modulu o 2,3 %. Při všech rychlostech tahové deformace klesla pevnost v tahu o  $0,9 \div 4,1$  % úměrně se stárnutím. Výše uvedené hodnoty se liší jen velmi málo od hodnot originálu a spíše než stárnutí lze tyto změny přisoudit odchylkám při měření. Ovšem pevnost v tahu klesala úměrně s dobou stárnutí a není vyloučeno, že by tento trend pokračoval i při delším stárnutí nad 4 týdny, což by mohlo být připsáno krácení makromolekul matrice. Hodnoty E modulu byly zatíženy velkými rozptyly hodnot, které se z velké části vzájemně překrývaly, a i změny hodnot bez trendu v několika málo jednotkách procent nasvědčují spíše chybě měření. Tažnost při všech rychlostech deformace poklesla o  $25,5 \div 54,9$  % bez zjevného trendu vývoje v průběhu stárnutí. Na tažnost měla pravděpodobně vliv relaxace napětí vlivem vystavení těles zvýšené teplotě a část poklesu mohlo způsobit i štěpení makromolekul matrice, na něž značí pokles pevnosti v tahu.

Rázová houževnatost v tahu nevykazovala statisticky významné změny u energií rázu 15 a 50 J. U rázu 25 J změny fluktovaly mezi  $-10,5$  a  $25,8$  %. Naměřené hodnoty nevykazovaly trend v průběhu stárnutí. Rázová houževnatost Charpy se u klimatizovaných těles zvýšila o  $1,5 \div 26,0$  %. Vrubová houževnatost metodou Charpy se mírně zvýšila o  $1,5 \div 4,3$  % bez trendu vývoje. Vrubové číslo kolísalo mezi  $-2,7$  a  $24,1$  % bez zjevného trendu během stárnutí. Vystavení materiálu zvýšené teplotě tedy snižuje jeho náchylnost k oslabení vrubem



při rázovém zatěžování ohybem až o 24 %. Jelikož houževnatost se u 15 J a 50 J rázů statisticky významně nezměnila, může být výkyv houževnatosti u 25 J rázu spíše chybou měření, zvláště pak když se hodnoty vychýlily na obě strany od hodnoty originálu. Zvýšení houževnatosti spolu v kombinaci se snížením pevnosti v tahu by mohlo být vysvětleno faktem, že nedošlo k síťování kaučukové složky, pouze došlo ke krácení řetězců, což ovšem není dokázáno snížením  $T_g$  metodou DSC. V úvahu také připadá nahodilost v měření, jelikož byl uskutečněn malý počet měření a rozptýly dat se z velké části vzájemně překrývají, čemuž nasvědčuje i zvýšení houževnatosti u ABS „COLD“ těles, u nichž je krácení řetězců či relaxace napětí velmi nepravděpodobné.

Tvrдость materiálu u klimatizovaných těles poklesla jen mírně o  $3,4 \div 5,2$  % bez zjevného vývoje. Mikrotvrдость povrchu se naopak zvýšila o  $2,9 \div 15,6$  %. Tvrдость masы materiálu se snížila, pravděpodobně v důsledku štěpení řetězců, na které poukazují zkoušky výše, ovšem tvrдость povrchu se zvýšila. Tento rozdíl naznačuje vliv oxidace povrchu za zvýšené teploty na tvrдость povrchu ABS.

Úměrně s dobou stárnutí za zvýšené teploty materiál dle předpokladů více žloutnul. Hodnota žluté se v posledním týdnu lišila oproti originálu o hodnotu  $db^* 3,39$ . Žloutnutí je způsobeno oxidací, kterou zvýšená teplota jen urychluje. [7] [16]

Teplota skelného přechodu fluktovala v rozmezí  $102,31$  °C a  $102,74$  °C bez trendu. Rozdíly lze spíše přisuzovat nepřesnosti určení inflexního bodu  $T_g$  než vlivům stárnutí za zvýšené teploty.

### **ABS COLD**

U materiálu ABS „COLD“ došlo k jednorázovému poklesu E modulu o 1,9 %. Při všech rychlostech tahové deformace se pevnost v tahu významně nezměnila či fluktovala v rozmezí  $-0,2 \div 1,7$  %. Stejný trend se týkal i tažnosti, kdy se výrazně neměnila či kolísala mezi  $-12,5 \div 38,8$  %. Naměřené hodnoty nevykazovaly jasný trend vývoje vlastností v průběhu stárnutí. Jelikož naměřené hodnoty kolísají na obě strany od hodnoty originálu, vzhledem k jejich velkým rozptylům a vzhledem ke skutečnosti, že u totožných veličin lze najít soubory, které se vzájemně statisticky významně neliší, lze tyto změny veličin spíše vysvětlit chybami měření než vlivem stárnutí za nízké teploty.

Rázová houževnatost v tahu při žádné z energií rázu 15, 25 či 50 J nevykazovala statisticky významné změny. Lze tedy říci, že rázová houževnatost se výrazně nemění v průběhu stár-

nutí do 4 týdnů ani ve zvýšené, ani v nízké teplotě. Rázová houževnatost Charpy se u klimatizovaných těles zvýšila jednorázově o 30,0 % bez jakéhokoliv vývoje. Stárnutí nemělo na vývoj houževnatosti vliv, pouze vystavení těles zvýšené teplotě v čase do 1 týdne. Vrubová houževnatost metodou Charpy fluktovala mezi -0,2 a 3,0 % bez zjevného trendu během stárnutí. Vrubové číslo se zvýšilo o 10,4 až 29,9 %. Vystavení materiálu snížené teplotě tedy snižuje jeho náchylnost k oslabení vrubem při rázovém zatěžování ohybem až o 30 %. Jelikož se jedná o stárnutí za nízké teploty, je zde relaxace napětí, která by měla za následek zvýšení houževnatosti materiálu, velmi málo pravděpodobná. V úvahu spíše připadá nahodilost v měření, jelikož byl uskutečněn malý počet měření a rozptyly dat se z velké části vzájemně překrývají.

Tvrdość materiálu u klimatizovaných těles poklesla jen mírně o 3,4 ÷ 5,2 % bez zjevného vývoje. Mikrotvrdość povrchu se snížila o 2,7 ÷ 7,8 %. Jelikož se rozptyly hodnot z velké části překrývají, změny hodnot se pohybují v řádu jednotek procent a jsou zde nepravděpodobné změny ve struktuře materiálu, možno považovat změny za nevýznamné.

Vývoj barevnosti se dá vysvětlit pouze teorií, že umístění materiálu do nízkých teplot může zpomalovat jeho následné žloutnutí při běžných teplotách. Tento jev je ovšem při znalosti kinematiky oxidace ABS nesmyslný a bylo by třeba vývoj žloutnutí ABS dále prozkoumat.

Teplota skelného přechodu fluktovala v rozmezí 102,32 °C a 102,84 °C bez trendu. Rozdíly lze spíše přisuzovat nepřesnosti určení inflexního bodu  $T_g$  než vlivům stárnutí za nízké teploty.

## **OBECNĚ**

Všechna tělesa roztržená při tahové zkoušce, zkoušce rázové houževnatosti v tahu, zkoušce rázové a vrubové houževnatosti Charpy vykazovala křehký lom materiálu a „stress whitening“ deformovaných částí tělesa dle předpokladů. [3]

U všech souborů vzorků obou materiálů bylo provedeno měření IR spekter. Nebyly však zjištěny výraznější změny absorpance v žádném z uvažovaných intervalů vlnočtu, na nichž mělo ke změnám docházet. [3] [9] Jedná se zejména o vlnočty hydroxylových a karbonylových skupin a dvojných vazeb. Změny v těchto intervalech by potvrdzovaly oxidaci, krácení řetězců, síťování kaučukových částic a dalších změn zapříčiňujících makroskopické změny. Nic z toho se však nepotvrdilo, pravděpodobně z důvodu, že změny byly v příliš malých koncentracích, které se v přítomnosti okolního nezměněného materiálu nepodařilo

detekovat. Také šum spekter byl relativně vysoký, což by mohlo být napraveno opakovaným měřením spektra téhož materiálu s vyšším rozlišením a následnou interpolací výsledné křivky. Pro zvýšení detekovatelnosti změn by bylo třeba vzájemně odseparovat složky plastů (kaučuk a matrici) a tyto následně zkoumat IR spektroskopií odděleně. Zvýšit detekovatelnost změn by bylo pravděpodobně možné také metodou měření IR spekter ultratenkých řezů z povrchu zkušebních těles, kde změny byly nejintenzivnější.

## ZÁVĚR

Vystavení materiálu HIPS Edistir SR 550 zvýšené teplotě 80 °C spolu s relativní vlhkostí 60 % po dobu maximálně 28 dní zapříčinilo oproti neklimatizovanému materiálu pokles E modulu o 23 %, tažnosti o 44 %, rázové houževnatosti v tahu o 62 % a houževnatosti metodou Charpy o 44 %. Všechny tyto změny mechanických vlastností nejsou výrazně odvislé od energie deformace a nevykazují výrazný trend v průběhu stárnutí. Vystavení materiálu zvýšené teplotě také zvyšuje jeho náchylnost k oslabení vrubem až o 44 %. Lze sledovat i mírný nárůst pevnosti v tahu o 8 %. Zvýšená teplota také značně urychluje oxidaci povrchu, která se navenek projeví žloutnutím polymeru.

Snížená teplota -20 °C po dobu maximálně 28 dní zapříčinila pouze pokles E modulu o 17 % a snížení rázové houževnatosti v tahu o 42 %.

Vystavení materiálu ABS Starex HF-0660I zvýšené teplotě 80 °C spolu s relativní vlhkostí 60 % po dobu maximálně 28 dní zapříčinilo oproti neklimatizovanému materiálu pokles tažnosti o 55 %. Byl zjištěn nárůst houževnatosti metodou Charpy o 26 % a nárůst tvrdosti povrchu o 15 %. Všechny tyto změny mechanických vlastností nejsou výrazně odvislé od energie deformace a nevykazují výrazný trend v průběhu stárnutí. Byl ovšem vysledován počátek snižování pevnosti v tahu úměrný době stárnutí. Vystavení materiálu zvýšené teplotě může zvyšovat jeho náchylnost k oslabení vrubem až o 24 %. Zvýšená teplota také urychluje oxidaci povrchu, která se navenek projeví mírným žloutnutím polymeru.

Snížená teplota -20 °C po dobu maximálně 28 dní zapříčinila zvýšení rázové houževnatosti metodou Charpy o 30 % a mírné snížení tvrdosti povrchu o 8 %.

Zmíněné změny mechanických veličin nelze vysvětlit změnami strukturními, neboť se je nepodařilo metodami FTIR spektroskopie a DSC jednoznačně prokázat.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1995. ISBN 80-708-0241-3.
- [2] RYBNÍKÁŘ, František. *Makromolekulární chemie*. 1. vyd. Zlín: FT VUT, 2000, 105 s. ISBN 8021415568.
- [3] ŠVEC, Petr. *Polystyren a jeho modifikace*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985, 366 s.
- [4] *Methods for Production of High Impact Polystyrene*. 2006. USA. US20110201757A1. Zapsáno 21.06.2006.
- [5] TEM Analysis of Polymer Rubber Blend Using Cryo-Ultramicrotomy and Osmium Staining. *MVA Scientific Consultants* [online]. Duluth (Georgia): MVA Scientific Consultants, 2016 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <https://mvascientificconsultants.com/tem-analysis-of-polymer-rubber-blend>
- [6] HAGEN, Vladislav. *Únava a stárnutí materiálu*. 2. vyd. Brno: VUT, 1981, 76 s. Učební texty vysokých škol.
- [7] DOLEŽEL, Břetislav. *Odolnost plastů a pryží*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981, 710 s. Makromolekulární látky.
- [8] RYBNÍKÁŘ, František, Zdeněk DITRYCH, Zdeněk KLÁCEL a Oldřich ORDELT. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965, 418 s. Řada chemické literatury.
- [9] VILAPLANA, Francisco, Amparo RIBES-GREUS a Sigbritt KARLSSON. Degradation of recycled high-impact polystyrene. Simulation by reprocessing and thermo-oxidation. *Polymer Degradation and Stability* [online]. Elsevier Ltd, 2006, **91**(9), 2163-2170 [cit. 2018-05-01]. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2006.01.007. ISSN 01413910. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2006.01.007>
- [10] RAGAERT, K, L DELVA a K VAN GEEM. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management* [online]. Pergamon-elsevier Science Ltd,

- 2017, **69**, 24-58 [cit. 2018-05-01]. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.07.044. ISSN 0956053X. Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/publication/319189954\\_Mechanical\\_and\\_chemical\\_recycling\\_of\\_solid\\_plastic\\_waste](https://www.researchgate.net/publication/319189954_Mechanical_and_chemical_recycling_of_solid_plastic_waste)
- [11] COQUILLAT, M, J VERDU, X COLIN, L AUDOUIN a R NEVIÈRE. Thermal oxidation of polybutadiene. Part 2. *Polymer Degradation and Stability* [online]. Elsevier Ltd, 2007, **92**(7), 1334-1342 [cit. 2018-05-01]. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2007.03.019. ISSN 01413910. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.proxy.k.utb.cz/science/article/pii/S0141391007001048>
- [12] DUH, Yih-Shing, Ta-Cheng HO, Jenq-Renn CHEN a Chen-Shan KAO. Study on exothermic oxidation of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) resin powder with application to ABS processing safety. *Polymers* [online]. MDPI AG, 2010, **2**(3), 174-187 [cit. 2018-05-01]. DOI: 10.3390/polym2030174. ISSN 20734360.
- [13] ISRAELI, Y, J LACOSTE, J LEMAIRE, R.P SINGH a S SIVARAM. Photo- and thermoinitiated oxidation of high impact polystyrene. I. Characterization by FT-IR spectroscopy. *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry* [online]. 1994, **32**(3), 485-493 [cit. 2018-05-01]. DOI: 10.1002/pola.1994.080320310. ISSN 0887624X.
- [14] BĚHÁLEK, Luboš. *Navlhavost a sušení plastů* [online]. Liberec, 2010 [cit. 2018-03-02]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Suseni.pdf>. Výukový materiál. Technická univerzita v Liberci.
- [15] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007, 207 s. ISBN 978-80-7080-662-3. Dostupné také z: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_isbn-978-80-7080-662-3/pages-img/](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-978-80-7080-662-3/pages-img/)
- [16] ANTHONY DAVIS AND DAVID SIMS, . *Weathering of polymers*. Reprinted. London: Applied Science, 1983. ISBN 08-533-4226-1.
- [17] LAURENCE W. MCKEEN, . *The effect of UV light and weather on plastics and elastomers*. 3rd ed. Norwich, N.Y: William Andrew, 2013. ISBN 978-145-5730-056.

- [18] JARUŠEK, Jaroslav. *Metody zkoumání polymerů. 2.*, nezm. vyd. Pardubice: Vysoká škola chemicko-technologická, 1989. ISBN 80-851-1301-5.
- [19] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Část 1: Základní principy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [20] ČSN EN ISO 20753. *Plasty - Zkušební tělesa*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [21] ČSN EN ISO 294-1. *Plasty - Vstřikování zkušebních těles z termoplastů: Část 1: Obecné principy a vstřikování víceúčelových zkušebních těles a zkušebních těles tvaru pravouhlého hranolu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [22] ČSN EN ISO 291. *Plasty - Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [23] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Svitavy: Střední odborné učiliště Svitavy, 2014 [cit. 2018-02-23]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/11.html>
- [24] ČSN EN ISO 179-2. *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti Charpy: Část 2, Instrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [25] ČSN EN ISO 8256. *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti v tahu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [26] ČSN EN ISO 868. *Plasty a ebonit - Stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [27] ČSN EN ISO 14577. *Kovové materiály - Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [28] VONDRÁČEK, Petr. *Metody studia a charakterizace struktury polymerů*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 1988, 235 s.

- [29] PANÁK, Ondrej. Měření barevnosti: studijní materiál. In: *Katedra polygrafie a fotofyziky, Fakulta chemicko - technologická: Univerzita Pardubice* [online]. Pardubice: Univerzita Pardubice, b.r. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <https://fcht.upce.cz/sites/default/files/public/luva3059/merenibarevnosti.pdf>
- [30] OHTA, Noboru. a Alan ROBERTSON. *Colorimetry: fundamentals and applications*. Hoboken, NJ, USA: J. Wiley, 2005. ISBN 978-047-0094-723.
- [31] ČSN EN ISO 2897-2. *Plasty - Houževnatý polystyren (PS-I) pro tváření: Část 2: Příprava zkušebních těles a stanovení vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [32] ABS. *LOTTE Advanced materials* [online]. Jižní Korea, 2018 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: [http://www.lotteadms.com/jsp/eng/product\\_intro/sm\\_product\\_starex\\_abs.jsp](http://www.lotteadms.com/jsp/eng/product_intro/sm_product_starex_abs.jsp)
- [33] Samsung Cheil Industries Starex® HF-0660I ABS, Unreinforced. *OKW France* [online]. Francie, 2018 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: [www.okw.fr/fr/media/b2e6a000-0fdb-11e3-959e-0050568225d7](http://www.okw.fr/fr/media/b2e6a000-0fdb-11e3-959e-0050568225d7)
- [34] ČSN EN ISO 2580-2. *Plasty - Akrylonitril/butadien/styren (ABS) pro tváření: Část 2: Příprava zkušebních těles a stanovení vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [35] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Kompendium statistického zpracování dat*. Vyd. 3., V nakl. Karolinum 1. Praha: Karolinum, 2012, 982 s. ISBN 978-80-246-2196-8.
- [36] Box-Plot neboli Krabicový graf. *Kvalita jednoduše* [online]. Kvalita jednoduše, 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://kvalita-jednoduse.cz/box-plot/>
- [37] Testování hypotéz. *Veterinární a farmaceutická univerzita Brno* [online]. Brno: Veterinární a farmaceutická univerzita Brno, 2018 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/hypotezy.htm>



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$a_K$	Rázová houževnatost v ohybu [ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
$a_{KT}$	Rázová houževnatost v tahu [ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
$a_N$	Vrubová houževnatost v ohybu [ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
B	Propustnost pro kyslík [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$ ]
C	„COLD“ – označení těles klimatizovaných za snížené teploty
DSP	dílů na sto dílů kaučuku [1]
E	Youngův modul pružnosti [MPa]
F	Tahová síla [N]
FTIR	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
H	„HOT“ – označení těles klimatizovaných za zvýšené teploty
$H_A$	Hypotéza alternativní
$H_{IT}$	Vtisková tvrdost [MPa]
$H_S$	Tvrdost Shore D [Shore D]
$H_0$	Hypotéza nulová
HIPS	„High Impact Polystyrene“ – vysoce houževnatý polystyren
In	Inhibitor
In·	Radikál inhibitoru
IQR	Interkvartilové rozpětí
K	Součinitel úměrnosti [ $\text{MPa}^{-1}$ ]
$k_v$	Vrubové číslo [1]
M	Monomer
$max_x$	Maximum veličiny x
$min_x$	Minimum veličiny x

---

n	Počet měření
p	p-hodnota hypotézy
P	Polymerační stupeň [1]
PA	Polyamid
PB	Polybutadien
PC	Polykarbonát
PE	Polyethylen
PMMA	Polymethylmetakrylát
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PS-I	„Impact Polystyrene“ – houževnatý polystyren
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
Q <sub>1</sub>	První kvartil
Q <sub>3</sub>	Třetí kvartil
R	Polymerní substrát
R·	Polymerní radikál
s <sub>x</sub>	Směrodatná odchylka veličiny x
SAN	Styren-akrylonitril
TEM	Transmisní elektronová mikroskopie
T <sub>g</sub>	Teplota skelného přechodu [K]
T <sub>m</sub>	Teplota tání [K]
UV	Ultrafialové záření

---

$V_x$	Variační koeficient veličiny $x$
$\tilde{x}$	Medián veličiny $x$
$\alpha$	Hladina významnosti
$\varepsilon$	Poměrné prodloužení v tahu [%]
$\lambda$	Vlnová délka [nm]
$\mu$	Aritmetický průměr základního souboru
$\sigma^2$	Rozptyl hodnot základního souboru
$\sigma_T$	Napětí v tahu [MPa]

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. Druhy kopolymerů.....	13
Obr. 2. Závislost některých vlastností polymerů na polymeračním stupni P .....	14
Obr. 3. Strukturní vzorec houževnatého polystyrenu .....	16
Obr. 4. TEM snímek houževnatého polystyrenu .....	17
Obr. 5. Pukliny v houževnatém polystyrenu.....	18
Obr. 6. Schematické znázornění rozdílu mezi puklinou a trhlinou .....	18
Obr. 7. Oxidace homopolymeru styrenu.....	27
Obr. 8. Rozpad hydroperoxidů a štěpení makromolekuly .....	27
Obr. 9. Závislost mechanických vlastností na čase při termooxidaci HIPS 90 °C .....	28
Obr. 10. Mechanismy síťování PB složky .....	28
Obr. 11. Kopolymer butadienu a styrenu; oxidovatelná místa .....	29
Obr. 12. Schéma oxidace PB složky ABS .....	29
Obr. 13. Průběh termooxidace ABS při 70 °C.....	30
Obr. 14. Průběh termooxidace HIPS při 90 °C.....	30
Obr. 15. Víceúčelové zkušební těleso typu A.....	37
Obr. 16. Obecná tahová křivka .....	40
Obr. 17. Idealizovaná tahová křivka standardního a houževnatého PS.....	40
Obr. 18. Charakteristické tahové křivky různých typů materiálů.....	40
Obr. 19. Tvary tahové křivky dle rychlosti deformace u PP .....	40
Obr. 20. Schéma zařízení pro zkoušku rázové houževnatosti metodou Charpy.....	42
Obr. 21. Schéma zařízení pro zkoušku rázové houževnatosti v tahu .....	44
Obr. 22. Zkušební hrot tvrdoměru typu D .....	45
Obr. 23. Schematické znázornění zkušebního procesu měření mikrotvrdomosti.....	46
Obr. 24. Modelová DSC křivka polymeru.....	48
Obr. 25. Grafická extrapolace T <sub>g</sub> polymerů .....	49
Obr. 26. Remisní křivka modrého vzorku .....	50
Obr. 27. Obecné schéma spektrofotometru .....	50
Obr. 28. Barevný prostor CIELAB L*a*b.....	51
Obr. 29. Čtyři druhy geometrií měření barevnosti spektrofotometrem .....	52
Obr. 30. Ruční vrubovačka CEAST NotchVis.....	56
Obr. 31. Umístění zkušebních těles v klimakomáře .....	57
Obr. 32. Grafické znázornění teplotního cyklu DSC měření HIPS .....	62

Obr. 33. Grafické znázornění teplotního cyklu DSC měření ABS .....	62
Obr. 34. Obecný boxplotový graf .....	64
Obr. 35. Graf vývoje E modulu materiálu HIPS .....	67
Obr. 36. Graf vývoje napětí na mezi pevnosti v tahu HIPS při rychlosti deformace 50 mm.min <sup>-1</sup> .....	68
Obr. 37. Graf vývoje tažnosti HIPS při rychlosti deformace 50 mm.min <sup>-1</sup> .....	69
Obr. 38. Graf vývoje napětí na mezi pevnosti v tahu HIPS při rychlosti deformace 200 mm.min <sup>-1</sup> .....	71
Obr. 39. Graf vývoje tažnosti HIPS při rychlosti deformace 200 mm.min <sup>-1</sup> .....	72
Obr. 40. Graf vývoje napětí na mezi pevnosti v tahu HIPS při rychlosti deformace 600 mm.min <sup>-1</sup> .....	73
Obr. 41. Graf vývoje tažnosti HIPS při rychlosti deformace 600 mm.min <sup>-1</sup> .....	74
Obr. 42. Srovnání mediánů napětí na mezi pevnosti materiálu HIPS v čase podle rychlosti deformace .....	75
Obr. 43. Srovnání mediánů tažnosti materiálu HIPS v čase podle rychlosti deformace ...	76
Obr. 44. Zkušební těleso HIPS 0 po tahové zkoušce – křehký lom .....	76
Obr. 45. Zkušební těleso HIPS 4H po tahové zkoušce – křehký lom.....	76
Obr. 46. Graf vývoje rázové houževnatosti v tahu HIPS při energii rázu 15 J.....	77
Obr. 47. Graf vývoje rázové houževnatosti v tahu HIPS při energii rázu 25 J.....	78
Obr. 48. Graf vývoje rázové houževnatosti v tahu HIPS při energii rázu 50 J.....	79
Obr. 49. Srovnání mediánů rázové houževnatosti v tahu v čase podle energie rázu.....	80
Obr. 50. Zkušební těleso HIPS 0 po tahové zkoušce rázem – křehký lom.....	81
Obr. 51. Zkušební těleso HIPS 4H po tahové zkoušce rázem – křehký lom.....	81
Obr. 52. Graf vývoje rázové houževnatosti v ohybu HIPS .....	82
Obr. 53. Zkušební těleso HIPS 0 po zkoušce Charpy – křehký lom .....	83
Obr. 54. Zkušební těleso HIPS 4H po zkoušce Charpy – křehký lom .....	83
Obr. 55. Graf vývoje vrubové houževnatosti v ohybu materiálu HIPS .....	84
Obr. 56. Zkušební těleso HIPS 0 opatřené vrubem po zkoušce Charpy – křehký lom .....	84
Obr. 57. Zkušební těleso HIPS 4H s vrubem po zkoušce Charpy – křehký lom.....	84
Obr. 58. Graf vývoje vrubového čísla materiálu HIPS .....	85
Obr. 59. Graf vývoje tvrdosti materiálu HIPS .....	86
Obr. 60. Graf vývoje mikrotvrdosti materiálu HIPS .....	87
Obr. 61. Srovnání barvy klimatizovaného tělesa HIPS 4H a originálního HIPS .....	88

Obr. 62. Barevný kříž srovnání HIPS HOT těles oproti standardu .....	89
Obr. 63. Barevný kříž srovnání HIPS COLD těles oproti standardu.....	90
Obr. 64. Vývoj teploty skelného přechodu HIPS HOT .....	91
Obr. 65. Vývoj teploty skelného přechodu HIPS COLD .....	92
Obr. 66. FTIR část spektra $3700 \div 2200 \text{ cm}^{-1}$ materiálu HIPS HOT .....	93
Obr. 67. FTIR část spektra $2200 \div 700 \text{ cm}^{-1}$ materiálu HIPS HOT.....	94
Obr. 68. FTIR část spektra $3700 \div 2200 \text{ cm}^{-1}$ materiálu HIPS COLD.....	95
Obr. 69. FTIR část spektra $2200 \div 700 \text{ cm}^{-1}$ materiálu HIPS COLD.....	96
Obr. 70. Graf vývoje E modulu materiálu ABS .....	97
Obr. 71. Graf vývoje napětí na mezi pevnosti ABS při rychlosti tahové deformace 50 mm.min <sup>-1</sup> .....	98
Obr. 72. Graf vývoje tažnosti ABS při rychlosti deformace 50 mm.min <sup>-1</sup> .....	99
Obr. 73. Graf vývoje napětí na mezi pevnosti ABS při rychlosti tahové deformace 200 mm.min <sup>-1</sup> .....	101
Obr. 74. Graf vývoje tažnosti ABS při rychlosti tahové deformace 200 mm.min <sup>-1</sup> .....	102
Obr. 75. Graf vývoje napětí na mezi pevnosti v tahu ABS při rychlosti deformace 600 mm.min <sup>-1</sup> .....	103
Obr. 76. Graf vývoje tažnosti ABS při rychlosti deformace 600 mm.min <sup>-1</sup> .....	104
Obr. 77. Srovnání mediánů napětí na mezi pevnosti ABS v čase podle rychlosti deformace .....	105
Obr. 78. Srovnání mediánů tažnosti ABS v čase podle rychlosti deformace .....	106
Obr. 79. Zkušební těleso ABS 0 po tahové zkoušce – křehký lom .....	106
Obr. 80. Zkušební těleso ABS 4H po tahové zkoušce – křehký lom .....	106
Obr. 81. Graf vývoje rázové houževnatosti v tahu ABS při energii rázu 15 J .....	107
Obr. 82. Graf vývoje rázové houževnatosti v tahu ABS při energii rázu 25 J .....	108
Obr. 83. Graf vývoje rázové houževnatosti v tahu HIPS při energii rázu 50 J.....	109
Obr. 84. Srovnání mediánů rázové houževnatosti v tahu v čase podle energie rázu.....	110
Obr. 85. Zkušební těleso ABS 0 po tahové zkoušce rázem – křehký lom.....	111
Obr. 86. Zkušební těleso ABS 4H po tahové zkoušce rázem – křehký lom.....	111
Obr. 87. Graf vývoje rázové houževnatosti v ohybu ABS .....	112
Obr. 88. Zkušební těleso ABS 0 po zkoušce Charpy – křehký lom .....	112
Obr. 89. Zkušební těleso ABS 4H po zkoušce Charpy – křehký lom .....	112
Obr. 90. Graf vývoje vrubové houževnatosti v ohybu ABS.....	113

Obr. 91. Zkušební těleso ABS 0 opatřené vrubem po zkoušce Charpy – křehký lom ....	114
Obr. 92. Zkušební těleso ABS 4H opatřené vrubem po zkoušce Charpy – křehký lom .	114
Obr. 93. Graf vývoje vrubového čísla materiálu ABS v čase.....	115
Obr. 94. Graf vývoje tvrdosti ABS .....	116
Obr. 95. Graf vývoje mikrotvrdosti ABS .....	117
Obr. 96. Srovnání barevnosti klimatizovaného tělesa ABS 4H a originálního ABS.....	118
Obr. 97. Barevný kříž srovnání ABS HOT těles oproti standardu .....	119
Obr. 98. Barevný kříž srovnání ABS COLD těles oproti standardu.....	120
Obr. 99. Vývoj teploty skelného přechodu ABS HOT .....	121
Obr. 100. Vývoj teploty skelného přechodu ABS COLD .....	122
Obr. 101. FTIR část spektra $3700 \div 2200 \text{ cm}^{-1}$ materiálu ABS HOT .....	123
Obr. 102. FTIR část spektra $2200 \div 700 \text{ cm}^{-1}$ materiálu ABS HOT .....	124
Obr. 103. FTIR část spektra $3700 \div 2200 \text{ cm}^{-1}$ materiálu ABS COLD.....	125
Obr. 104. FTIR část spektra $2200 \div 700 \text{ cm}^{-1}$ materiálu ABS HOT .....	126

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Teplota skelného přechodu v závislosti na podílu styrenu v kopolymeru styren-butadien .....	15
Tab. 2. Srovnání vlastností PS, HIPS a ABS .....	19
Tab. 3. Odolnost nestabilizovaných polymerů dle působení vnějších vlivů .....	20
Tab. 4. Základní kritéria pro hodnocení stárnutí .....	21
Tab. 5. Propustnost polymerů pro kyslík při 30 °C .....	23
Tab. 6. Mezní teploty dlouhodobé použitelnosti polymerů .....	25
Tab. 7. Rozdělení polymerů dle navlhavosti .....	31
Tab. 8. Význam označení materiálu Edistir SR 550 dle ČSN EN ISO 19063. ....	55
Tab. 9. Technické parametry použitých vstřikovacích strojů .....	56
Tab. 10. Technické parametry klimakomor Angelantoni Discovery DM340C .....	57
Tab. 11. Testy rovnosti mediánů naměřených souborů dat .....	66
Tab. 12. Charakteristiky souborů měření E modulu materiálu HIPS .....	67
Tab. 13. Charakteristiky měření napětí na mezi pevnosti v tahu materiálu HIPS při rychlosti deformace 50 mm.min <sup>-1</sup> .....	68
Tab. 14. Charakteristiky souborů měření tažnosti materiálu HIPS při rychlosti deformace 50 mm.min <sup>-1</sup> .....	69
Tab. 15. Charakteristiky souborů měření napětí na mezi pevnosti v tahu materiálu HIPS při rychlosti deformace 200 mm.min <sup>-1</sup> .....	70
Tab. 16. Charakteristiky souborů měření tažnosti materiálu HIPS při rychlosti deformace 200 mm.min <sup>-1</sup> .....	71
Tab. 17. Charakteristiky souborů měření napětí na mezi pevnosti v tahu materiálu HIPS při rychlosti zatěžování 600 mm.min <sup>-1</sup> .....	73
Tab. 18. Charakteristiky souborů měření tažnosti materiálu HIPS při rychlosti zatěžování 600 mm.min <sup>-1</sup> .....	74
Tab. 19. Charakteristiky měření rázové houževnatosti v tahu materiálu HIPS při energii rázu 15 J .....	77
Tab. 20. Charakteristiky souborů měření rázové houževnatosti v tahu materiálu HIPS při energii rázu 25 J .....	78
Tab. 21. Charakteristiky souborů měření rázové houževnatosti v tahu materiálu HIPS při energii rázu 50 J .....	79
Tab. 22. Charakteristiky souborů měření rázové houževnatosti v ohybu materiálu HIPS 81	



Tab. 23. Charakteristiky souborů měření vrubové houževnatosti v ohybu materiálu HIPS .....	83
Tab. 24. Hodnoty vrubového čísla HIPS podle týdnů .....	85
Tab. 25. Charakteristiky souborů měření tvrdosti materiálu HIPS.....	86
Tab. 26. Charakteristiky souborů měření mikrotvrdosti materiálu HIPS .....	87
Tab. 27. Hodnoty barevnosti HIPS HOT těles .....	89
Tab. 28. Hodnoty barevnosti HIPS COLD těles.....	90
Tab. 29. Charakteristiky souborů měření E modulu materiálu ABS .....	97
Tab. 30. Charakteristiky měření napětí na mezi pevnosti v tahu materiálu ABS při rychlosti deformace 50 mm.min <sup>-1</sup> .....	98
Tab. 31. Charakteristiky souborů měření tažnosti materiálu ABS při rychlosti deformace 50 mm.min <sup>-1</sup> .....	99
Tab. 32. Charakteristiky souborů měření napětí na mezi pevnosti v tahu materiálu ABS při rychlosti deformace 200 mm.min <sup>-1</sup> .....	100
Tab. 33. Charakteristiky souborů měření tažnosti materiálu ABS při rychlosti deformace 200 mm.min <sup>-1</sup> .....	101
Tab. 34. Charakteristiky souborů měření napětí na mezi pevnosti v tahu materiálu ABS při rychlosti zatěžování 600 mm.min <sup>-1</sup> .....	103
Tab. 35. Charakteristiky souborů měření tažnosti materiálu ABS při rychlosti zatěžování 600 mm.min <sup>-1</sup> .....	104
Tab. 36. Charakteristiky měření rázové houževnatosti v tahu materiálu ABS při energii rázu 15 J.....	107
Tab. 37. Charakteristiky souborů měření rázové houževnatosti v tahu materiálu ABS při energii rázu 25 J.....	108
Tab. 38. Charakteristiky souborů měření rázové houževnatosti v tahu materiálu ABS při energii rázu 50 J.....	109
Tab. 39. Charakteristiky souborů měření rázové houževnatosti v ohybu materiálu ABS .....	111
Tab. 40. Charakteristiky souborů měření vrubové houževnatosti v ohybu materiálu ABS .....	113
Tab. 41. Hodnoty vrubového čísla ABS podle týdnů .....	114
Tab. 42. Charakteristiky souborů měření tvrdosti materiálu ABS .....	116
Tab. 43. Charakteristiky souborů měření mikrotvrdosti materiálu ABS .....	117

Tab. 44. Hodnoty barevnosti ABS HOT těles .....	119
Tab. 45. Hodnoty barevnosti ABS COLD těles.....	120

**SEZNAM PŘÍLOH**

- P I        Vstřikovací podmínky materiálu HIPS
- P II        Vstřikovací podmínky materiálu ABS
- P III       Materiálový list Edistir SR 550 (elektronická příloha)
- P IV        Materiálový list Starex HF-0660I (elektronická příloha)

## PŘÍLOHA P I: VSTŘIKOVACÍ PODMÍNKY MATERIÁLU HIPS

MATERIÁL	Edistir SR 550	
TYP ZKUŠEBNÍCH TĚLES	A1 + B1	
ŠARŽE MATERIÁLU	01 236211	
POČET VYROBENÝCH KUSŮ KAŽDÉHO DRUHU TĚLESA	cca 800	
MATERIÁL SUŠEN?	ne	
VSTŘIK. STROJ	Arburg Allrounder 470 H	
DATUM VYROBENÍ	13.11.2017	
PRŮMĚR ŠNEKU	[mm]	40
TEPLOTA TRYSKY	[°C]	230
TEPLOTY PÁSEM OD TRYSKY PO NÁSYPKU	[°C]	230, 220, 210, 200, 190
TEPLOTA NÁSYPKY	[°C]	40
TEPLOTA FORMY	[°C]	40
VSTŘIK. RYCHLOST	[mm/s]	40
VSTŘIK. TLAK	[bar]	600
DOTLAK TLAK	[bar]	400
DOTLAK ČAS	[s]	15
DRÁHA PŘEPNUTÍ	[mm]	10
VELIKOST DÁVKY	[mm]	25
DÉLKA CHLAZENÍ	[s]	25
ČAS PLNĚNÍ	[s]	4,5
ČAS CELÉHO CYKLU	[s]	52
POČET VYŘAZENÝCH ZKUŠEBNÍCH VÝSTŘIKŮ PŘED ZAPOČETÍM VSTŘIKOVÁNÍ	[1]	15

MATERIÁL	Edistir SR 550	
TYP ZKUŠEBNÍCH TĚLES	A12	
ŠARŽE MATERIÁLU	01 236211	
POČET VYROBENÝCH KUSŮ KAŽDÉHO DRUHU TĚLESA	cca 400	
MATERIÁL SUŠEN?	ne	
VSTŘIK. STROJ	Arburg Allrounder 170U	
DATUM VYROBENÍ	01.11.2017	
PRŮMĚR ŠNEKU	[mm]	22
TEPLOTA TRYSKY	[°C]	220
TEPLOTY PÁSEM OD TRYSKY PO NÁSYPKU	[°C]	215, 205, 185
TEPLOTA NÁSYPKY	[°C]	22
TEPLOTA FORMY	[°C]	30
VSTŘIK. RYCHLOST	[mm/s]	40
VSTŘIK. TLAK	[bar]	700
DOTLAK TLAK	[bar]	600
DOTLAK ČAS	[s]	15
DRÁHA PŘEPNUTÍ	[mm]	10
VELIKOST DÁVKY	[mm]	42
DÉLKA CHLAZENÍ	[s]	44
ČAS PLNĚNÍ	[s]	3,5
ČAS CELÉHO CYKLU	[s]	95
POČET VYŘAZENÝCH ZKUŠEBNÍCH VÝSTŘIKŮ PŘED ZAPOČETÍM VSTŘIKOVÁNÍ	[1]	15

## PŘÍLOHA P II: VSTŘIKOVACÍ PODMÍNKY MATERIÁLU ABS

MATERIÁL	STAREX ABS HF-0660I	
TYP ZKUŠEBNÍCH TĚLES	A1 + B1	
ŠARŽE MATERIÁLU	6418416	
POČET VYROBENÝCH KUSŮ KAŽDÉHO DRUHU TĚLESA	cca 800	
MATERIÁL SUŠEN?	ne	
VSTŘIK. STROJ	Arburg Allrounder 470 H	
DATUM VYROBENÍ	01.02.2018	
PRŮMĚR ŠNEKU	[mm]	40
TEPLOTA TRYSKY	[°C]	200
TEPLOTY PÁSEM OD TRYSKY PO NÁSYPKU	[°C]	200, 190, 180, 170, 160
TEPLOTA NÁSYPKY	[°C]	23
TEPLOTA FORMY	[°C]	45
VSTŘIK. RYCHLOST	[mm/s]	100
VSTŘIK. TLAK	[bar]	1100
DOTLAK TLAK	[bar]	160
DOTLAK ČAS	[s]	2
DRÁHA PŘEPNUTÍ	[mm]	14
VELIKOST DÁVKY	[mm]	30
DÉLKA CHLAZENÍ	[s]	10
ČAS PLNĚNÍ	[s]	1
ČAS CELÉHO CYKLU	[s]	22,5
POČET VYŘAZENÝCH ZKUŠEBNÍCH VÝSTŘIKŮ PŘED ZAPOČETÍM VSTŘIKOVÁNÍ	[1]	12

MATERIÁL	STAREX ABS HF-0660I	
TYP ZKUŠEBNÍCH TĚLES	A12	
ŠARŽE MATERIÁLU	6418416	
POČET VYROBENÝCH KUSŮ KAŽDÉHO DRUHU TĚLESA	cca 400	
MATERIÁL SUŠEN?	ne	
VSTŘIK. STROJ	Arburg Allrounder 170 U	
DATUM VYROBENÍ	31.01.2018	
PRŮMĚR ŠNEKU	[mm]	22
TEPLOTA TRYSKY	[°C]	210
TEPLOTY PÁSEM OD TRYSKY PO NÁSYPKU	[°C]	210, 195, 185
TEPLOTA NÁSYPKY	[°C]	30
TEPLOTA FORMY	[°C]	30
VSTŘIK. RYCHLOST	[mm/s]	40
VSTŘIK. TLAK	[bar]	1000
DOTLAK TLAK	[bar]	900
DOTLAK ČAS	[s]	15
DRÁHA PŘEPNUTÍ	[mm]	5
VELIKOST DÁVKY	[mm]	42
DÉLKA CHLAZENÍ	[s]	30
ČAS PLNĚNÍ	[s]	3,1
ČAS CELÉHO CYKLU	[s]	50,5
POČET VYŘAZENÝCH ZKUŠEBNÍCH VÝSTŘIKŮ PŘED ZAPOČETÍM VSTŘIKOVÁNÍ	[1]	16