

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

LIBEREC 2012

KAMILA KOFROŇOVÁ

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

**VLASTNOSTI POLYESTEROVÉHO
MULTIFILU**

**PROPERTIES OF POLYESTER
MULTIFILAMENT**

LIBEREC 2012

KAMILA KOFROŇOVÁ

Vlastnosti PL multifilu

1. Vypracujte rešerši na téma geometrické, tepelné a mechanicko-fyzikální vlastnosti PL vláken.
2. Proved'te měření vybraných vlastností PL multifilu (sráživost, akustický modul, pevnost a tažnost, počáteční modul) po působení různých teplot.
3. Zpracujte naměřená data a stanovte závěry o vlivu teploty na vybrané vlastnosti PL multifilu.

Literatura

- [1] Militký, J.: The chemistry, manufacture and tensile behaviour of polyester fibres in Handbook of tensile properties of textile and technical fibres. Pp. 223 – 314. Ed. A, Bunsell, Woodhead publ., Oxford, 2009.
- [2] Košátková, M.; Křemenáková, D.; Militký, J.: Tepelná sráživost délkových textilií, Interní norma, Výzkumné centrum Textil, Technická univerzita v Liberci, Liberec, 2009.
- [3] Militký, J.; Křemenáková, D.; Košátková-Hušková, M.: Polyester fibers structure and heat setting, Proc. 6 th Central European Conference, Bratislava , 13-14 September 2010.
- [4] Militký, J.; Křemenáková, D.; Košátková-Hušková, M.: Characterization of polyester monofilaments and fabrics shrinkage, Proc. XIIth International Izmir Textile and Apparel Symposium, Oct 28 – 30, 2010, 6 str.
- [5] Křemenáková, D.; Militký, J.; Pivoňková, D.: Fiber orientation in polypropylene staple yarns based on the acoustic and initial modulus, Proc. 17 th International Conference Strutex, November 2010, 8str.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Eva Moučková, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování mé vedoucí práce Ing. Evě Moučkové, Ph.D. a oběma konzultantkám doc. Dr. Ing. Daně Křemenákové a Ing. Martině Košátkové Huškové. Paní Moučkové za odborné vedení, její podporu a trpělivost. Paní Křemenákové za cenné připomínky k tématu práce a paní Košátkové Huškové za její pomoc při zpracování informací. Dále paní Janě Stránské za vedení během měření na laboratorních přístrojích a ochotnému personálu Středočeské vědecké knihovny a ostatním, kteří mi poskytli potřebné materiály. Na tomto místě bych také ráda poděkovala všem těm, kteří mě podporovali nejen při psaní této práce, ale v průběhu celého studia, a to své rodině a přátelům.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá sledováním vlivu tepelného namáhání na chování, strukturu a vybrané vlastnosti polyesterového multifilu, zejména na sráživost, pevnost, tažnost a počáteční modul. Pozornost byla také věnována problematice působení tepelného namáhání na rychlost zvuku procházejícího svazkem nekonečných polyesterových vláken a jeho vlivu na akustický dynamický modul. Rešeršní část je zaměřena na shrnutí geometrických, mechanicko-fyzikálních a tepelných vlastností polyesterového multifilu, kde jsou popsány také metody použité k měření těchto vlastností. V experimentální části již byly sledovány změny chování multifilu a jednotlivých vlastností, způsobené zvyšujícími se teplotami během tepelného namáhání. V závěru práce jsou pak uvedeny výsledky měření a jsou stanoveny závěry o vlivu teploty na vybrané vlastnosti PL multifilu.

KLÍČOVÁ SLOVA

polyester

vlastnosti multifilu

teplota

tepelná sráživost

tepelná srážecí síla

pevnost

tažnost

počáteční modul

rychlost zvuku

akustický dynamický modul

ANOTATION

The diploma thesis examines the impact of heat stress on the behavior, structure and selected properties of polyester multifilament, especially the shrinkage, strength, tensile strain and initial modulus. Furthermore, the attention is paid to the effects of heat stress on the sound velocity passing through the bundle of filament polyester fibers and its influence on the acoustic dynamic modulus. The theoretical part is focused on summarizing the geometric, physical-mechanical and thermal properties of polyester multifilament, which describes the methods used to measure the properties. The practical part observes the changes in behavior along with the individual properties of multifilament caused by rising temperatures during the heat stress. Finally, the results of measurements are provided and conclusions are presented on the influence of temperature on selected properties of the PL multifilament.

KEY WORDS

polyester
multifilament properties
temperature
thermal shrinkage
thermal shrinkage force
strength
tensile strain
initial modulus
sonic velocity through fiber
acoustic dynamic modulus

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

A	[mm ²]	celková plocha dutého vlákna
AD	[mm ²]	plocha dutiny ve vlákně
<i>atd.</i>		a tak dále
AV	[mm ²]	plocha dutého vlákna
C	[km/sec]	rychlost zvuku orientovaného vl.
c	[-]	cirkularita
c	[m/sec]	rychlost šíření zvuku
C_k	[-]	kružnicovost
C_n	[km/sec]	rychlost zvuku ve vlákně
C_p	[Jkg/K]	stálý tlak
č.		číslo
d	[mm]	průměr kruhového vlákna
d_e	[mm]	ekvivalentní průměr vlákna
E	[MPa, GPa]	počáteční modul
E	[Pa, N/m ²]	akustický dynamický modul
E_p	[Pa]	modul pružnosti
f	[Hz]	frekvence kmitání vlákna
F	[N]	síla potřebná k přetrhu vlákna
f_o	[-]	orientace ve vlákně
F_p	[-]	koeficient plnosti vlákna
F_r	[cN/tex]	poměrná pevnost vlákna
IS		interval spolehlivosti
k		citlivost maximální rychlosti srážení
l	[km, mm]	délka vlákna, multifilu
L	[m]	upínací délka kmitajícího vlákna
l_0	[mm]	upínací délka vlákna, multifilu
L_c	[mm]	kritická délka vlákna
m, M	[g, kg]	hmotnost vlákna
M_n	[-]	molekulová hmotnost polymeru

<i>např.</i>		například
O	[mm]	obvod průřezu vlákna
<i>obr.</i>		obrázek
OD	[mm]	obvod dutiny ve vlákne
O_e	[mm]	obvod ekvivalentního příčného řezu
O_v	[mm]	obvod reálného příčného řezu
P	[N]	předpětí
PA		polyamid
PL		polyester
<i>popř.</i>		popřípadě
PVC		polyvinylchlorid
Q	[Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	měrné teplo
q	[-]	faktor rozvinutosti tvaru
r	[mm]	poloměr vlákna
r_{xy}		korelační koeficient
S	[km]	dráha
s	[mm ²], [m ²]	plocha příčného řezu vlákna
S_e	[mm ²]	plocha př. řezu nekruhového vlákna
S_p	[m ² /kg]	měrný povrch vlákna
<i>str.</i>		strana
s_x		směrodatná odchylka
s_x^2		rozptyl
t	[sec]	čas
T	[tex]	jemnost
<i>tab.</i>		tabulka
T_{cc}	[°C]	teplota krystalizace
T_f	[°C]	teplota tečení
T_g	[°C]	teplota zesklenní
<i>tj.</i>		tj.
T_m	[°C]	teplota tání
<i>tzv.</i>		tak zvané
v	[mm/min]	rychlost čelistí dynamometru

v	[km/sec]	rychlost průchodu zvuku
V_s	[%/min]	maximální rychlost srážení
X	[mm, m]	tloušťka desky při průchodu tepla
Z	[-]	koeficient zralosti vlákna
Δ_0	[mm]	původní délka vlákna, multifilu
Δl	[mm]	délka vlákna po působení síly
$\varepsilon, \varepsilon_p$	[%]	tažnost
λ	[Wm/K]	tepelná vodivost
ρ	[kg/m ³]	hustota vláken
σ	[Pa]	napětí do přetrhu
τ	[Pa, N/m ²]	smykové napětí
\bar{x}		aritmetický průměr

OBSAH

1. ÚVOD.....	12
2. REŠERŠNÍ ČÁST	13
2.1 POLYESTER.....	13
2.1.1 PODSTATA POLYESTEROVÝCH VLÁKEN.....	13
2.1.2 VNITŘNÍ STRUKTURA POLYESTEROVÝCH VLÁKEN	14
2.2 VLASTNOSTI PL MULTIFILŮ A METODY JEJICH ZJIŠŤOVÁNÍ	14
2.2.1 JEMNOST A PRŮMĚR VLÁKNA.....	14
2.2.2 MĚRNÝ POVRCH A TVAR PŘÍČNÉHO ŘEZU VLÁKNA	16
2.2.3 DÉLKA VLÁKEN	19
2.2.4 TOPOGRAFIE POVRCHU	20
2.2.5 PEVNOST.....	20
2.2.6 TAŽNOST A TAHOVÁ KŘIVKA	20
2.2.7 POČÁTEČNÍ MODUL.....	23
2.2.8 AKUSTICKÝ DYNAMICKÝ MODUL A RYCHLOST ZVUKU.....	24
2.2.9 MĚRNÉ TEPLA A TEPELNÁ KAPACITA	27
2.2.10TEPELNÁ VODIVOST.....	27
2.2.11TEPLOTA TÁNÍ A ZESKELNĚNÍ	28
2.2.12ROZMĚROVÁ STÁLOST – SRÁŽIVOST A SRÁŽECÍ SÍLA.....	30
2.2.13SRÁŽIVÁ VLÁKNA	33
2.2.14METODY POUŽITÉ PRO STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ DAT	34
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	36
3.1 JEMNOST MULTIFILU.....	36
3.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ SRÁŽIVOSTI A SRÁŽECÍ SÍLY	37
ZPRACOVÁNÍ DAT SRÁŽIVOSTI.....	37
ZPRACOVÁNÍ DAT SRÁŽECÍ SÍLY	41
3.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ PEVNOSTI A TAŽNOSTI.....	44
ZPRACOVÁNÍ DAT PEVNOSTI A TAŽNOSTI.....	44
3.4 AKUSTICKÝ DYNAMICKÝ MODUL A RYCHLOST ZVUKU.....	50

ZPRACOVÁNÍ DAT RYCHLOSTI ZVUKU A AKUSTICKÉHO MODULU	51
4. ZÁVĚR	54
POUŽITÁ LITERATURA	56
5. PŘÍLOHY	59
5.1 PŘÍLOHA 1: GRAFY A HODNOTY Z MĚŘENÍ NA INSTRONU 4411	59
5.2 PŘÍLOHA 2: HODNOTY Z MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO MODULU A RYCHLOSTI ZVUKU.....	63

1. ÚVOD

Polyesterová vlákna (PL) původně začínající jako náhrada vlny nebo jako vhodná směšová komponenta, patří dnes ve světové produkci syntetických vláken a v textilním průmyslu vůbec mezi nejvíce rozšířená a nejčastěji používaná vlákna. Značná část připadá na modifikovaná PL vlákna, která mají lepší zpracovatelské a užitné vlastnosti oproti klasickým polyesterovým vláknům z polyethyltereftalátu. Protože lidé v dnešní době kladou nejen na oděvy stále vyšší požadavky, vznikají nejrůznější fyzikální i chemické modifikace. Jde zejména o přípravu vláken se sníženým sklonem ke žmolkování, špinivosti či tvorbě statického náboje. Dále lze modifikací zlepšit barvitelnost, zajistit nehořlavost či upravit sráživost. Je zřejmé, že modifikovaná polyesterová vlákna prošla v posledních desetiletích významným vývojem a dle toho se také mnohostranně rozšířilo jejich použití, které se rozhodně neomezuje jen na ošacení. Naopak polyesterová vlákna našla díky svým vlastnostem výborné uplatnění v technických a průmyslových textiliích, pronikla také do bytových textilií, sportovního ošacení atd., kde nahradila přírodní vlákna a stala se tak nejvšestrannějším syntetickým vláknem.

I když se mnohé vlastnosti dají modifikací zlepšit, stále v první řadě záleží na chemickém složení, povrchové a vnitřní struktuře, konstrukci a celkové geometrii vláken, kterou je třeba sledovat v souvislosti s mechanickými a termickými vlastnostmi. Na základě reakcí multifilu lze poté predikovat vliv modifikace na vlastnosti, kvalitu a strukturu uvnitř multifilu a jeho následnou aplikaci.

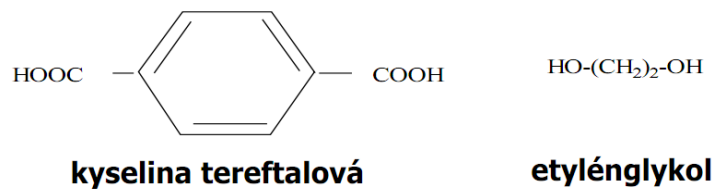
V této práci jsou v první části popsány základní geometrické, mechanicko-fyzikální a termické vlastnosti polyesterového multifilu, jakož i metody měření vybraných vlastností. V druhé části práce je popsán vliv teplotního namáhání na strukturu a na vybrané termické a mechanické vlastnosti polyesterového multifilu, tj. na sráživost, pevnost, tažnost, počáteční modul, rychlost průchodu zvuku svazkem vláken a akustický dynamický modul.

2. REŠERŠNÍ ČÁST

2.1 POLYESTER

2.1.1 PODSTATA POLYESTEROVÝCH VLÁKEN

Polyesterová vlákna jsou syntetická vlákna z dlouhých řetězců lineárních polymerů, které vznikají esterifikací, tedy reakcí alkoholu s kyselinou, a to zejména reakcí glykolu a aromatických dikarbonových kyselin. Za syntetická a tedy i polyesterová vlákna se tak považují pouze ta vlákna, k jejichž výrobě se nepoužívá přírodních makromolekulárních látek a za polyesterová se označují jen taková vlákna, která se skládají nejméně z 85% esterů obsahujících dvojmocný alkohol (glykol) a kyselinu tereftalovou, viz obr. 1. [21] [5]



Obr. 1 Chemický vzorec PL, [6]

Výroba syntetických vláken má tedy dvě základní fáze, a to přípravu vysokomolekulární látky a následné zvlákňování. Dalším stádiem výroby je tzv. dloužení, kdy se vlákna za tepla či za studena mechanicky protahují na několikanásobnou délku. Při této operaci dochází k vyšší orientaci vláken v důsledku zmenšení vzdáleností mezi krystalickými oblastmi, které se orientují do směru osy vlákna, a tím zvyšují hustotu vlákna. [5] Vlákno tím získává uzavřenější vnitřní strukturu, což se ve výsledku projeví na vlastnostech vlákna, a to vyšší pevností a nižší tažností. [2]

Způsob výroby polyesterových vláken umožňuje produkovat širokou škálu jemností, délek vláken rezných, lesklých i matovaných, barvených (ve hmotě) či jinak modifikovaných a rovněž, na rozdíl od vláken přírodních, umožňuje zajistit značnou stejnorodost jejich vlastností. [5]

Z hlediska dodávané formy vláken rozlišujeme dvě podoby, a to nekonečné vlákno - filament (kabílek) a stříž.

2.1.2 VNITŘNÍ STRUKTURA POLYESTEROVÝCH VLÁKEN

V rámci molekuly jsou atomy vázány kovalentní vazbou. Mezi molekulami působí Van der Waalsovy síly a vodíkové můstky, jejichž síla určuje mechanickou pevnost vlákna [4]. Polyesterové vlákno má kompaktní uzavřenou strukturu, která je značně hydrofobní a snižuje difúzi barviva dovnitř vlákna [3]. Navlhavost (0,4 %) a bobtnavost polyesteru (0,3÷0,4 %) je navíc velmi nízká, což je další příčinou obtížného přijímání barviva. I to je jedním z důvodů, proč se polyesterová vlákna různě modifikují. Polyesterové vlákno je svým chemickým složením k modifikaci velmi vhodné. Modifikací rozumíme úpravy příměsí chemických sloučenin či zušlechťování pomocí pneumatického nebo mechanického tvarování. Dalším popudem je snížení sklonu k žmolkování, zvýšení sráživosti či modifikace průřezu vláken, např. za účelem zlepšení tepelných vlastností. [5]

2.2 VLASTNOSTI PL MULTIFILŮ A METODY JEJICH ZJIŠŤOVÁNÍ

Vlastnosti nejen polyesterových vláken můžeme rozdělit do několika skupin. Jsou to zejména geometrické, mechanické a tepelné vlastnosti. Mezi geometrické vlastnosti vláken patří jemnost, plocha příčného řezu, průměr vlákna, měrný povrch, délka či topografie povrchu. Mechanické vlastnosti vyjadřují reakce vláken na působení síly a deformace. Do této skupiny vlastností patří tedy odolnost v tahu - pevnost, deformační odezva – tažnost, dále pak počáteční modul, akustický dynamický modul, tuhost a zotavení. Tepelné vlastnosti jsou podstatné pro volbu vhodných parametrů jak při zpracování tak použití vláken a jsou závislé na chemickém složení vláken. Mezi základní termické charakteristiky patří měrné teplo, teplota tání a zeskelnění, rozměrová stálost – sráživost a srážecí síla či vodivost.

2.2.1 JEMNOST A PRŮMĚR VLÁKNA

Jemnost přímo ovlivňuje kvalitu příze a výrobku. Při zpracování jemnějších vláken je větší nebezpečí vzniku nopků a sklonu ke žmolkování v hotových výrobcích. [5]

Vztah pro výpočet jemnosti T [tex]:

$$T = \frac{m}{l} \quad (1)$$

Kde m představuje hmotnost vlákna [g] a l délku vlákna [km]. Tex je nejčastěji používaná jednotka pro vyjádření délkové jemnosti. S jemností souvisí plocha příčného řezu s , a to v následující korelaci:

$$T = s \cdot \rho = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \rho \quad (2)$$

kde ρ je hustota vláken [kg/m^3] a d průměr kruhového vlákna [mm].

Ve většině případů průřez vlákna kruhový není, proto se používá ještě průměr ekvivalentní d_e ,

$$d_e = \sqrt{\frac{4T}{\pi\rho}} \quad (3)$$

který vyjadřuje průměr vlákna kruhového o stejném průřezu s , jako má vlákno nekruhové.

METODY ZJIŠŤOVÁNÍ JEMNOSTI

K měření jemnosti vláken lze použít gravimetrickou metodu zjišťování jemnosti dle normy ČSN EN ISO 2060 (Textilie. Nítě na návinech. Zjišťování jemnosti pásmovou metodou.). Kdy je pomocí vijáku odměřena požadovaná délka materiálu, která je poté zvážena na analytických vahách. Jemnost je poté vypočtena dle vzorce (1).

Dále lze jemnost zjistit pomocí přístroje Vibroskop, viz obr. 2.

Tato metoda stanovení jemnosti vláken patří mezi rezonanční metody, která pracuje na principu vynucených kmitů vláken. Je založena na stanovení frekvence, popř. vlnové délky kmitající pružné struny (nelze použít pro vlákna profilovaná a s dutinou). Vlnová délka je závislá na délce vlákna, hmotnosti vlákna a jeho předpětí. [10], [15]. Podle předpětí a frekvence vlastního kmitání vlákna f [Hz], je jemnost vlákna [dtex] stanovena automaticky. Platí, že:

$$f = \frac{1}{2L} \cdot \frac{P}{M} \quad (4)$$

Kde L je upínací délka kmitajícího vlákna [m], P předpětí [N] a M hmotnost vlákna [kg].



Obr. 2 Přístroje Vibroskop 400 a Vibrodyn 400. [16]

Totéž vlákno lze použít ještě pro zjištění pevnosti. Přístroj Vibroskop je spojen s dynamometrem Vibrodyn, který pracuje na principu dynamometru s konstantním přírůstkem deformace. Software přístroje umožňuje statistické vyhodnocení pevnosti, tažnosti a poměrné pevnosti F_r [cN/tex]. [16]

2.2.2 MĚRNÝ POVRCH A TVAR PŘÍČNÉHO ŘEZU VLÁKNA

Vyjadřuje plochu povrchu vlákna na jednotku hmotnosti. Čím je vlákno členitější, tím větší má měrný povrch a to včetně pórů ve vlákně. Vztahy pro výpočet měrného povrchu S_p [m²/kg] se pro vlákna kruhového a nekruhového průřezu liší. Pro vlákna s kruhovým průřezem platí:

$$S_p = 2 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{T \cdot \rho}} \quad (4)$$

U nekruhových vláken hraje vztah mezi plochou příčného řezu a obvodem velkou roli. Pro vlákna s nekruhovým průřezem platí tento vztah:

$$S_p = \frac{O}{S \cdot \rho} = \frac{4 \cdot \pi}{O \cdot c \cdot \rho} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (q+1)^2}{O \cdot \rho} \quad (5)$$

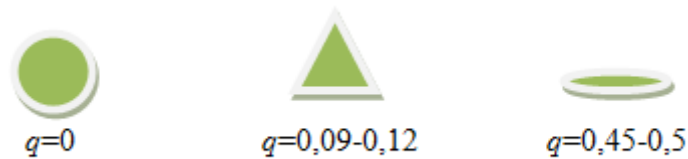
kde O je obvod průřezu vlákna, S plocha tohoto průřezu, c cirkularita (viz níže), ρ hustota vláken a q je faktor rozvinutosti tvaru podle Malinowské.

TVAROVÝ FAKTOR PRŮŘEZU DLE MALINOWSKÉ

Bezrozměrná veličina, která se využívá pro vyjádření tvaru průřezu vláken. Platí, že:

$$q = \sqrt{\frac{1}{c}} - 1 = \frac{p}{\pi d} - 1 \quad (6)$$

kde c je cirkularita a p obvod vlákna. Pokud tvar příčného řezu není kruhový, platí, že q [-] je větší než 1. Faktory pro jednotlivé typické tvary průřezů vláken jsou uvedeny na obr. 3.



Obr. 3 Faktory q

CIRKULARITA

Cirkularita c [-], neboli kruhovost, je definována jako plocha příčného řezu vlákna nekruhového S_e , která je ekvivalentní k ploše příčného řezu vlákna kruhového S .

Zde platí:

$$C = \frac{S}{S_e} \quad (7)$$

kde S_e je plocha řezu ekvivalentního vlákna se shodným obvodem.

$$C = \frac{4\pi S}{O^2} \quad (8)$$

Je patrné, že jak c , tak i q jsou pouze faktory úměrnosti s ohledem na kruhovost, ale necharakterizují obecně tvarové zvláštnosti. Není problém nalézt dva zcela odlišné tvary se stejnými c a q . Na druhé straně pro stejný tvar příčného řezu při samo-příbuzné transformaci resultují různé tvarové faktory [12].

KRUŽNICOVOST

Kružnicovost C_k [-] lze popsat jako poměr obvodů reálného příčného řezu O_v a obvodu ekvivalentního kruhového vlákna O_e o stejné ploše příčného řezu.

Tedy platí:

$$C_k = \frac{O_v}{O_e} = \frac{O}{2\sqrt{\pi S}} \quad (9)$$

Tedy ve vztahu s kruhovostí platí:

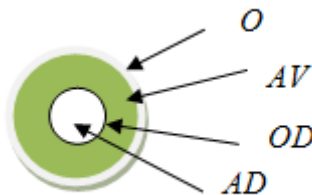
$$C = \frac{1}{C_k^2} \quad (10)$$

Z čehož vyplývá, že čím členitější tvar, tím menší bude C , a tím větší C_k . Pro kruhová vlákna se kruhovost a kružnicovost budou rovnat.

Pro vlákna dutá se dále definují charakteristiky související s dutinou ve vlákně. Pro jejich charakterizaci se používá koeficient plnosti vlákna F_p [-] (11) a koeficient zralosti vlákna Z [-] (12).

$$F_p = \frac{A-AD}{A} \quad (11)$$

Kde O představuje vnější obvod vlákna, AV plocha vlákna, OD obvod dutiny a AD plocha dutiny a A je plocha celková, rovna $AV + AD$, viz obr. 4.



Obr. 4 Koeficient plnosti vlákna F_p

$$Z = \frac{AV}{A} \quad (12)$$

Pro kruhová vlákna si koeficient plnosti vlákna a koeficient zralosti vlákna odpovídají [12].

PRINCIP ZJIŠŤOVÁNÍ TVARU PŘÍČNÉHO ŘEZU

Tvar příčného řezu se dá nejlépe stanovit dle IN 46-108-01/01 (Doporučený postup tvorby příčných řezů. Měkké a tvrdé řezy.) [18]. Při této zkoušce je vzorek zalit do pryskyřice nebo do směsi parafínu a včelího vosku. Ze vzniklého bločku se speciální technikou, například na mikrotomu oddělují mikrometrické řezy, ze kterých se pak obvyklým způsobem připraví mikroskopický preparát.

2.2.3 DÉLKA VLÁKEN

Délka vlákna souvisí s pevností a stejnoměrností příze a rovněž ovlivňuje jejich zpracovatelnost. Delší vlákna umožňují vyrobit dostatečně pevnou přízi s menším sklonem ke žmolkování. Při použití vláken v kompozitních strukturách se definuje tzv. kritická délka jako délka vlákna v matrici, kdy je v rovnováze síla potřebná k udržení vlákna v matrici se silou potřebnou k přetrhu vlákna. Při kritické délce vlákna je stejná pravděpodobnost přetrhu vlákna jako jeho vytažení z matrice. [5], [8] Platí, že:

$$L_c = \frac{r \cdot \sigma}{2 \cdot \tau} \quad (13)$$

Kde σ je napětí do přetrhu, r poloměr vlákna a τ je smykové napětí mezi vláknem a matricí. Pro vlákna delší než L_c dojde spíše k jejich přetrhu a je tedy optimálně využita jejich pevnost. Krátká vlákna budou spíše prokluzovat, což povede ke snížení pevnosti příze. S ohledem na spřadatelnou a využití pevnosti vláken je kritická délka kolem 10 mm [12].

PRINCIP STANOVENÍ DÉLKY VLÁKEN

U multifilů délka není zjišťována, ale při určení délky staplových vláken lze použít metody nepřímé, kdy je měřena délka souboru vláken, nebo metody přímé, kdy se měří délky jednotlivých vláken. Například vlákna narovnaná na barevné skleněné destičce nebo vlákenná vločka za pomoci kuličkového třídícího přístroje. Z těchto hodnot je pak pomocí statistických výpočtů stanovena součtová křivka, staplová křivka a histogram. [14]

2.2.4 TOPOGRAFIE POVRCHU

Vlákna se tvarem povrchu mohou výrazně lišit. Ne všechna vlákna musí mít tvar válce, ale mohou mít různé profily, ne vždy kruhové, obzvláště u vláken syntetických, kde je tvar dán tvarováním. Tvar povrchu vlákna ovlivňuje jeho následné zpracování, zejména pak mechanické procesy.

2.2.5 PEVNOST

Pevnost je definována jako síla potřebná k přetrhu F [N]. Pro lepší porovnatelnost se užívá relativní pevnost F_r [N/tex], která je definována jako absolutní síla F [N] potřebná k přetrhu, vztažená k jemnosti T [tex] nebo je definována jako napětí do přetrhu σ [Pa], vztažené k ploše průřezu S [m²]. Pro textilní účely se používá vztah (14). Platí tedy, že:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (14)$$

a

$$F_r = \frac{F}{T} \quad (15)$$

K přetrhu dochází vždy v nejméně pevném nebo nejslabším místě. Četnost těchto slabých míst se zvyšuje s délkou, z čehož plyne, že s rostoucí upínací délkou testovaného materiálu pevnost klesá a zvyšuje se její variabilita. Tento jev se v literatuře nazývá tvarový efekt. [12]

2.2.6 TAŽNOST A TAHOVÁ KŘIVKA

Tažnost ε [%] je definována jako poměrné prodloužení - deformace do přetrhu a je měřena zároveň s pevností na dynamometru (viz 2.3.3.1). Při jednoosém namáhání jde o celkovou změnu délky, značenou Δl , vztaženou k původní délce l_0 . Platí tedy:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (16)$$

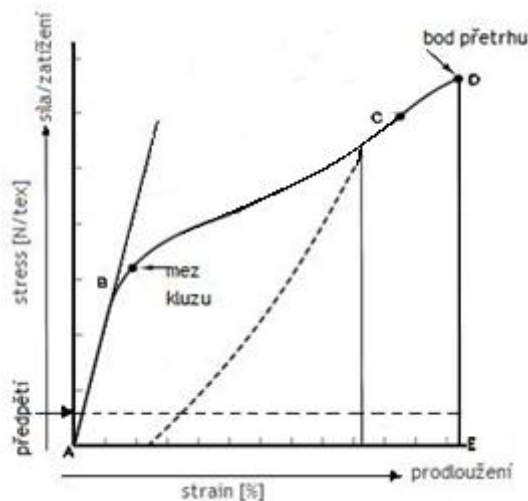
kde l_0 [mm] značí upínací délku, tedy délku mezi čelistmi dynamometru a l [mm] je délka vzorku v okamžiku přetrhu. Upínací délka má vliv i na tažnost vláken, protože při

tahovém namáhání nelze zabránit alespoň částečné deformaci uvnitř čelistí – tzv. svorkový efekt. [12]

K přesnějšímu stanovení deformace a vyrovnání vnitřních sil uvnitř testovaného délkového vláknenného útvaru, vzniklých například proklouznutím volných konců či natáhnutím zvlnění, se před měřením pevnosti na vlákno vkládá předběžná síla, tzv. předpětí, viz obr. 5. Velikost předpětí je dána normou.

Pevnost a tažnost nejsou dostatečnou charakteristikou změn, ke kterým během tahového namáhání dochází, a proto je sledován průběh celé deformační křivky, tedy závislost napětí (nebo síly) na protažení až do přetrhu vláknenného útvaru. Této křivce říkáme tahová nebo také pracovní křivka.

Informaci o tuhosti testovaného vzorku dává počáteční modul a spojnice mezi počátkem a koncem tahové křivky, viz následující obrázek.



Obr. 5 Tahová křivka délkové textilie.

Kde *A* je počátek, *B* mez pružnosti, kde tečna opouští tahovou křivku, nad bodem *B* je počátek kluzu, kde se již mění vnitřní struktura a začínají se projevovat plastické (nevratné) deformace. Směrnice *tečny* představuje počáteční modul, ten charakterizuje odolnost vůči deformaci. V rozmezí mezi *C* a *D* je již většina vazných řetězců napjata a nastává jejich tahová deformace. V bodě přetrhu *D* dochází vlivem praskání vazných řetězců k porušení krystalitů, což vede až k destrukci [22]. Bod *E* značí maximální

protažení při přetrhu. Na ose x je vyjádřena deformace (strain) respektive prodloužení, a na ose y síla respektive napětí (stress). Plocha pod křivkou je definována jako deformační práce.

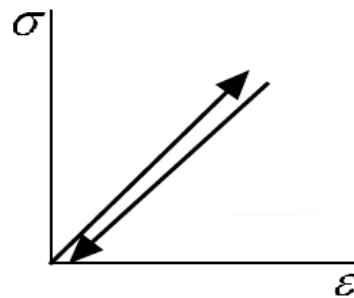
Jelikož patří polyesterová vlákna mezi viskoelastické materiály, vznikají působením síly tři typy deformací. A to deformace pružná neboli elastická, viskoelastická a plastická.

ELASTICKÁ DEFORMACE

V případě elastické deformace se jedná o deformaci vratnou, viz obr. 6. Tu lze ovšem očekávat jen za použití malých sil a deformací. Pro modul pružnosti E_p platí:

$$E_p = \frac{\sigma_p}{\varepsilon_p} \quad [Pa] \quad (17)$$

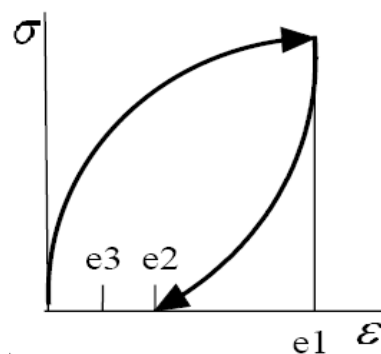
Kde σ_p je napětí do přetrhu [Pa] a ε_p představuje tažnost [%].



Obr. 6 Průběh elastické deformace [12]

VISKOELASTICKÁ DEFORMACE

Zde už dochází k porušování sekundárních mezimolekulárních vazeb a k jejich znovuvytvoření. Po odstranění vnějšího silového pole nastává vlivem tepelných fluktuací zpětná relaxace, deformace je částečně vratná, viz obr. 7.

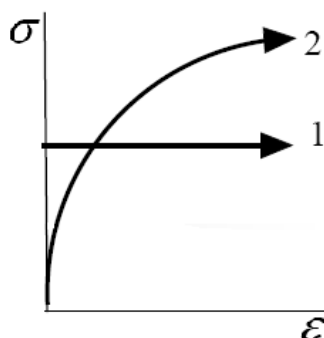


Obr. 7 Průběh viskoelastické deformace [12]

V praxi se součet elastické ($e1-e2$) a viskoelastické ($e2-e3$) deformace označuje jako celková elastická deformace, na obrázku $e1$. [22]

PLASTICKÁ DEFORMACE

Vzniká vlivem nevratných prokluzů jednotlivých segmentů v makromolekulách. Při zatěžování konstantní rychlostí deformace, je závislost mezi napětím a deformací konstanta (obr. 8, křivka 1). Při zatěžování konstantní rychlostí zatěžování platí křivka 2. [22] [12]



Obr. 8 Průběh plastické deformace [12]

2.2.7 POČÁTEČNÍ MODUL

Počáteční modul E je definován jako derivace pracovní tahové křivky v počátku. Jde o směrnici tečny danou grafem závislosti mezi tahovou silou a prodloužením. [9] [12] Počáteční modul se zvyšuje s růstem rychlosti deformace. Tu vyjadřuje následující podíl upínací délky l_0 a rychlosti čelistí v .

$$v_{\epsilon} = \frac{v}{l_0} \quad (18)$$

Zároveň s modulem se zvyšuje také pevnost vláken, zatímco tažnost se snižuje. Modul je krom rychlosti deformace dále závislý na materiálu, teplotě a čase. [22]

MĚŘENÍ PEVNOSTI A TAŽNOSTI

Měření pevnosti a tažnosti je realizováno na trhacích přístrojích, tzv. dynamometrech, kde je podstatou zkoušky působení síly na testovaný vzorek až do jeho přetrhu. Takovým přístrojem je i Vibrodyn již zmíněný v kapitole 2.2.1.2 nebo přístroj Instron,

viz obr. 9. Na přístroji Instron je možné měřit pevnost a tažnost délkových textilních útvarů pomocí jednoosého namáhání tlakem, tahem a ohybem. Jako například sílu a tažnost vzorků či simulaci pevnosti na různých upínacích délkách.

PODSTATA ZKOUŠKY NA INSTRONU

Samotné testování spočívá v upevnění vzorku mezi dvě hliníkové čelisti. Dolní čelist je napojena do přístroje, horní připevněna k pohyblivému příčnicku. Horní čelist se postupně odtahuje od spodní, čímž působí na testovaný vzorek stále vyšší silou a to až do změny tvaru či přetrhu testovaného vzorku.



Obr. 9 Instron 4411

Přístroj zaznamenává naměřené údaje - maximální protažení [mm], maximální sílu [N], energii potřebnou k přetrhu [mJ], modul pružnosti [N/mm^2] a čas [sec]. Z nich pak sestavuje charakteristickou tahovou křivku.

2.2.8 AKUSTICKÝ DYNAMICKÝ MODUL A RYCHLOST ZVUKU

V pružném prostředí (pevných látkách a tekutinách) existují částice, které jsou mezi sebou vázány nebo na sebe působí při vzájemných srážkách. Tyto vazby způsobují, že kmitání částic se v kontinuu přenáší a dochází k šíření mechanického vlnění, které je doprovázeno vznikem elastických vln. Pomocí akustických impulsů, které jsou tvořeny orientovaným pohybem vzduchu podél vlákna, je možno analyzovat a změřit napětí a

deformaci vlákna a zároveň rychlost šíření akustických vln – tedy rychlost zvuku. Z rychlosti zvuku lze také odvodit tzv. akustický dynamický modul.

$$E = \rho c^2 \quad (19)$$

kde c vyjadřuje rychlost šíření podélného vlnění [m/sec], E akustický dynamický modul [Pa=N/m²] a ρ hustotu materiálu [kg/m³]. Akustický dynamický modul je krom rychlosti zvuku a hustoty materiálu ovlivněn také počtem zákrutů uděleným přízi. Rostoucí počet zákrutů vede k poklesu akustického dynamického modulu. [28]

Rychlost zvuku procházejícího vzorkem je závislá na orientaci vnitřního strukturálního uspořádání ve vlákne a je určena jako směrnice přímky proložená body, které udávají závislost času potřebného k průchodu akustického signálu definovanou délkou testovaného vzorku.

Na základě rychlosti zvuku lze rovněž stanovit anizotropie uspořádání vláken. Kde se vzrůstající orientací roste i rychlost zvuku nebo molekulová orientace ve vláknech a orientace vláken v plošné textilií. [17] Průměrnou orientaci ve vláknech můžeme určit ze vztahu

$$f_o = 1 - \frac{Cn^2}{c^2} \quad (20)$$

kde Cn vyjadřuje rychlost zvuku zkoumaného vlákna a C je rychlost zvuku vlákna zcela orientovaného.

Intenzita akustického impulsu je přímo úměrná elastickému prodloužení a energii vlákna. [17]

MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO DYNAMICKÉHO MODULU

K měření je využíván přístroj DMT (Dynamic Modulus Tester), který lze změnou držáku testovaných vzorků nakonfigurovat na dva režimy; a to na režim pro testování přízi (uhlíkových, skleněných, PL, nylonových) a na režim pro testování plošných materiálů (netkané textilie, ale také papír či záznamové pásky). K měření přírodních a syntetických vláken se používá varianta LH-551 DMT s piezoelektrickými krystaly ve tvaru „V“, viz obr. 10.

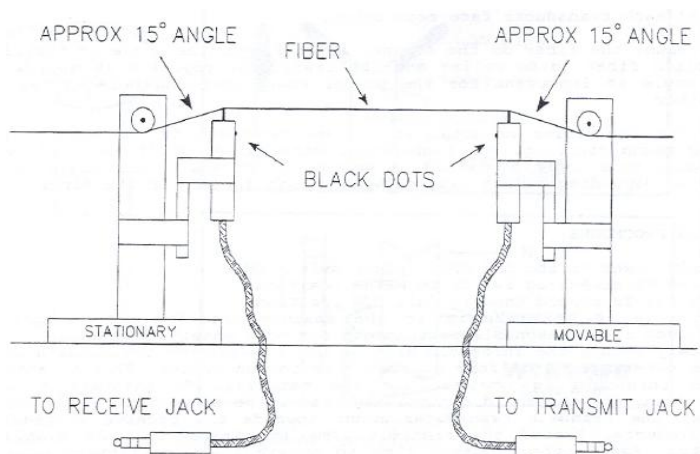


Obr. 10 DMT pro plošné materiály vzadu a pro příze vpředu [19]

PODSTATA ZKOUŠKY NA DMT

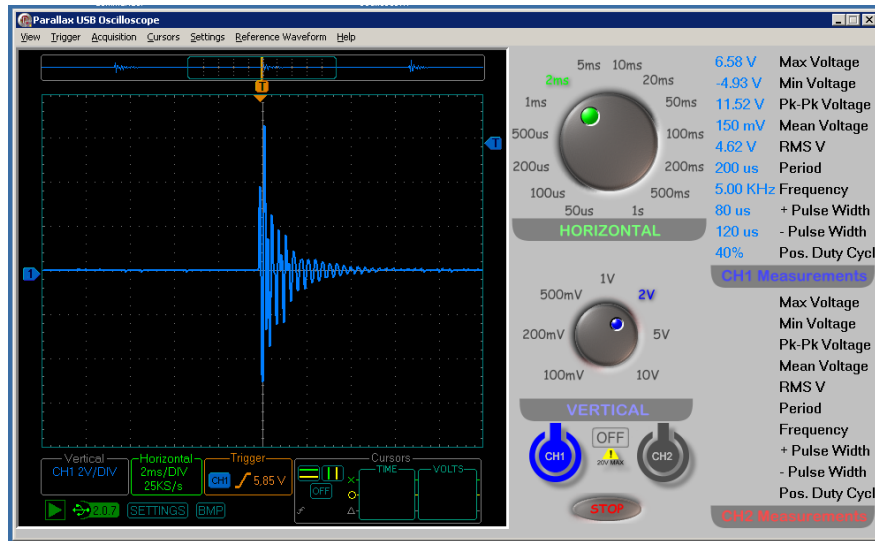
Vlákna jsou zachycena do svorek asi pod úhlem 15°. Tento úhel je důležitý pro správné zvukové propojení mezi krystalem a měřeným vzorkem, který je při měření v kontaktu se dvěma snímači – vysílačem a přijímačem, viz obr. 11. Po zavedení proudu do přístroje se dle materiálu nastaví práh frekvence (5 Hz-20 kHz) a maximální délka dráhy. Vhodná délka je pro většinu materiálů v rozmezí 15-20 cm. Nespornou výhodou přístroje DMT je rychlé a přesné měření času průchodu napětí mezi snímači, a to bez destruktivních následků. Je tedy možné na stejném vzorku opakovat měření pro různé upínací délky od 10 do 20 cm. Po změření se na displeji zobrazí čas [μsec]. Z tohoto času t [sec] a dráhy s [km] lze poté stanovit rychlost průchodu zvuku v [km/sec]. [18] [19]

$$v = \frac{s}{t} \quad (21)$$



Obr. 11 Schéma vedení vlákna přístrojem DMT. [19]

Tvar křivky typického akustického impulsu jedné multifilové příze je zobrazen na obrázku 12.



Obr. 12 Tvar typického akustického impulsu pro PL multifil. [vlastní]

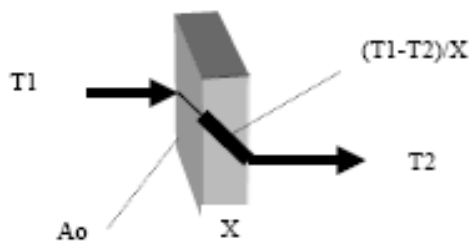
2.2.9 MĚRNÉ TEPLA A TEPELNÁ KAPACITA

Tepečná kapacita vláken se vyjadřuje měrným teplem, a to za stálého tlaku C_p [J/kg/K]. Měrné teplo je definováno jako teplo Q potřebné k ohřátí jednoho kilogramu látky o jeden stupeň Kelvina. [12] Platí vztah, kde je měrné teplo funkcí molekulární a nemolekulární struktury vláken, teploty i rychlosti ohřevu:

$$C_p = \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_p \quad (22)$$

2.2.10 TEPELNÁ VODIVOST

S měrným teplem souvisí tepelná vodivost. Ta představuje rychlost prostupu tepla v materiálu a je vyjádřena součinitelem tepelné vodivosti λ [Wm/K], která je v následujícím vztahu konstantou úměrnosti pro ustálený tepelný tok přes plochu o velikosti A_0 . Dále je rychlost toku tepla úměrná rozdílu teplot na vstupu T_1 a výstupu T_2 z desky a samotné tloušťce desky X , viz obr. 13.



Obr. 13 Ustálený tepelný tok. [12]

Platí zde vztah:

$$\frac{Q}{t} = -\lambda A_0 \frac{(T_1 - T_2)}{X} \quad (23)$$

Tepelná vodivost výrazně ovlivňuje tepelně izolační procesy, a to jak ohřev tak ochlazení. [12]

2.2.11 TEPLOTA TÁNÍ A ZESKELNĚNÍ

U nízkomolekulárních látek rozlišujeme tři základní skupenství: pevné, kapalné a plynné. U vysokomolekulárních látek, jako jsou polymery, je to podobné kromě skupenství plynného. To vlivem vysoké molekulové hmotnosti není možné. Jistým mezistupněm mezi těmito stavy jsou fázové přechody a to: teplota zeskelnění – T_g (z anglického glass – sklo) a teplota tání – T_m (z anglického melt – tavit), případně teplota tečení – T_f (z anglického flow – téci). Při každém tepelném a mechanickém namáhání dochází ke změnám krystalické struktury vláken.

Při teplotě tání [°C] dochází ke změně z pravidelného uspořádání krystalů na neuspořádanou formu taveniny. Při ještě vyšších teplotách, v tzv. skelném přechodu, dochází k přechodu ze skelného do kaučukovitého stavu. Střední hodnota tohoto intervalu je teplotou zeskelnění. [26] Platí, že:

$$T_g = T_{gz} - \frac{K}{M_n} \quad (24)$$

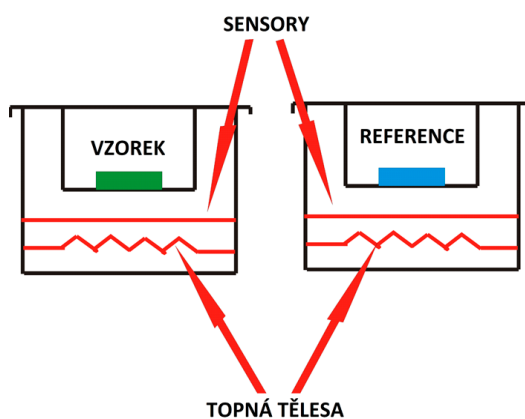
Kde M_n je molekulová hmotnost polymeru, K konstanta a T_{gz} představuje rovnovážnou teplotu zeskelnění. Vybrané hodnoty teplot zeskelnění a tání jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 Přehled teplot zesklennění a tání [1]

vlákno	T_g [°C]	T_m [°C]
polyetylén	-80	145
polypropylén	-18	170
PA 6.6	82	256
PA 6	65	220
PL	67	256
PVC	80	190

PRINCIP TERMICKÉ ANALÝZY

Sledovat a hodnotit změny fyzikálních a chemických vlastností ve vzorcích textilních materiálů a jejich odezvy na působení termických procesů umožňuje tzv. diferenciální skenovací termická analýza (DSC). Je to metoda založená na měření přísunu tepelné energie, a to tak, aby se vzorky (testovaný a referenční vzorek) ohřívaly na stejnou regulovanou teplotu konstantní rychlostí a tepelný tok byl měřen plynule, viz obr. 14. Množství tepla, potřebné k udržení těchto podmínek, je zaznamenáno v závislosti na čase nebo teplotě. [7]



Obr. 14 Schéma diferenciální skenovací analýzy [25]

Z DSC křivek ve fázi ohřevu lze stanovit teplotu zesklennění T_g [°C] a teplotu tání T_m [°C]. Z fáze chlazení lze pak určit teplotu krystalizace T_{cc} [°C]. [11]

2.2.12 ROZMĚROVÁ STÁLOST – SRÁŽIVOST A SRÁŽECÍ SÍLA

Účinkem mechanického namáhání při dloužení vzniká ve vláknech vnitřní pnutí, a vlákno tak není ve zcela stabilním stavu. Projevuje se to tím, že se za vhodných podmínek, např. v horké vodě nebo při žehlení, vlákno sráží, čímž vnitřní pnutí uvolňuje. Makromolekuly se pak uspořádají do nejvýhodnější vzájemné polohy. Těchto vlastností se využívá při tzv. fixaci - tepelném tvarování a stabilizaci výrobků ze syntetických vláken.

Při zpracování PL multifilů je třeba znát jejich tepelnou historii, aby mohla být posouzena zpracovatelnost i vlastnosti budoucího výrobku. Takovéto informace je možné získat při tepelné sráživosti multifilů. Teplo totiž může vyvolávat určité strukturální přeměny a ty mohou iniciovat změny v mechanických nebo chemických vlastnostech. [23]

Sráživost je tedy definována jako relativní zkrácení délky vlákenného útvaru vlivem působení dané teploty a délky trvání při konstantním napětí. Energie potřebná ke srážení je určena jako srážecí práce a napětí vyvinuté při srážení jako srážecí síla. [3] [22] Měření se provádí například na přístroji TST 2 (Lenzing), který umožňuje stanovit maximální, efektivní a zbytkovou sráživost a maximální, efektivní a zbytkovou srážecí sílu [11].

MAXIMÁLNÍ TEPELNÁ SRÁŽIVOST

Určuje nejvyšší hodnotu relativního zkrácení délky testovaného vzorku, odečtenou ze začátku zkoušky při konstantním napětí, které je zajištěno pomocí předpětových závaží.

EFEKTIVNÍ TEPELNÁ SRÁŽIVOST

Je hodnota relativního zkrácení délky vlivem působení definované teploty a doby působení, opět při konstantním napětí.

ZBYTKOVÁ TEPELNÁ SRÁŽIVOST

Zbytková, tzv. residuální tepelná sráživost udává relativní zkrácení délky po skončení působení teploty a napětí na vzorek. [20]

MAXIMÁLNÍ SRÁŽECÍ SÍLA

Určuje nejvyšší hodnotu, naměřenou krátce po zahřátí na danou teplotu během celého působení srážecí síly na testovaný délkový vlákenný útvar za konstantního napětí.

EFEKTIVNÍ SRÁŽECÍ SÍLA

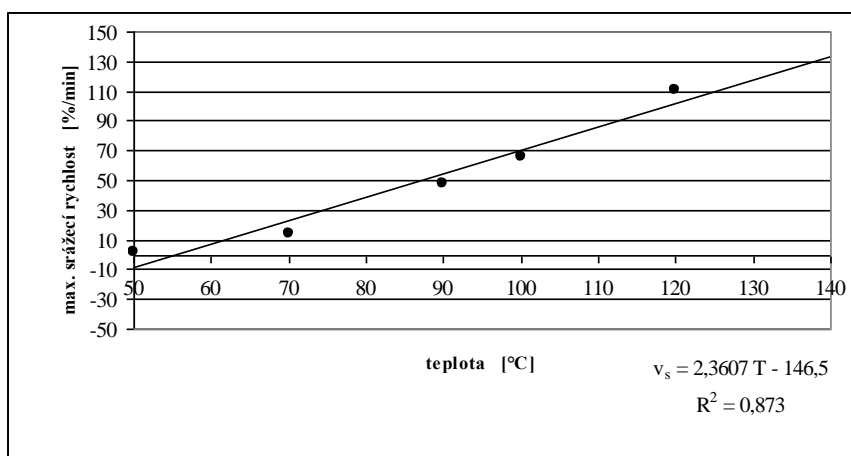
Udává relativní hodnotu naměřenou po jedné minutě působení tepelné srážecí síly na testovaný vzorek o konstantní délce.

ZBYTKOVÁ SRÁŽECÍ SÍLA

Zbytková, tzv. residuální srážecí síla určuje hodnotu odečtenou po ukončení působení srážecí síly na testovaný vlákenný vzorek o konstantní délce, kdy testovaný vzorek volně chladne. [20]

PRINCIP MĚŘENÍ SRÁŽIVOSTI A SRÁŽECÍ SÍLY

Cílem zkoušky je stanovit tepelnou srážecí sílu/sráživost vlákna či příze v závislosti na čase pro předem zvolené teploty. Výsledkem měření je kinetická křivka srážení (sráživost v závislosti na čase) při dané teplotě, nebo také srážecí síla v závislosti na čase při dané teplotě [11]. Citlivost maximální rychlosti srážení na teplotě je definována jako směrnice regresní přímky (metoda nejmenších čtverců) závislosti maximální rychlosti tepelného srážení odečtené z derivační křivky v závislosti na teplotě, jak je zobrazeno na obr. 15.



Obr. 15 Maximální srážecí rychlost PP monofilu. [20]

Platí zde vztah:

$$V_s = kT + q \quad (25)$$

Kde V_s představuje maximální rychlost srážení, T teplotu a k citlivost maximální rychlosti srážení [20].

PODSTATA ZKOUŠKY NA PŘÍSTROJI TST2

Samotné měření probíhá na přístroji TST2 (Thermal Shrinkage Tester), viz obr. 16, kde je tepelná sráživost testovaného vlákenného útvaru stanovena za pevného uchycení vzorku v levé čelisti přístroje, zatímco na pravé straně je vzorek zatížen předpětovým závažím a naveden do drážky rotačního senzoru přístroje. Nastaví se teplota, doba působení tepla na vzorek a délka měření po ukončení tepelného působení. V tepelné komoře, která eliminuje okolní vliv, poté na vzorek definovanou dobu působí požadovaná regulovaná teplota. Tepelná sráživost je stanovena z naměřené velikosti délky oblouku, o který se během zahřívání měřeného materiálu otočný mechanismus senzoru otočí. Změnu této délky registruje počítač. Tepelná sráživost vzorku se poté stanoví jako procento změny délky k původní délce vzorku [10].



Obr. 16 Přístroj TST2 [13]

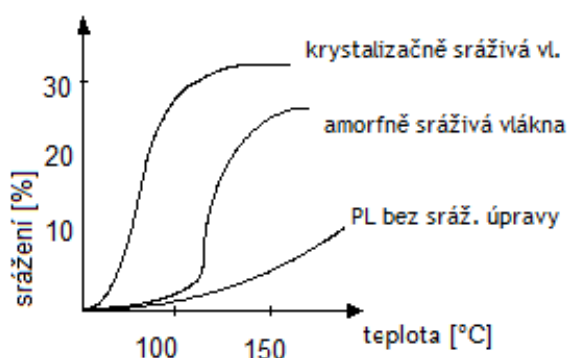
Kde 1, 3 jsou čelisti pro uchycení materiálu se zabudovanými senzory pro měření napětí, 2 je výhřevná komora, 4 rotační senzor a 5 tlačítko „start“.

Tepelná srážecí síla se stanovuje při uchycení měřeného vlákenného útvaru jak v levé, tak pravé čelisti přístroje. Po uchycení vzorku nejprve do levé čelisti, je na zatím volný konec testovaného vzorku zavěšeno předpětové závaží, a až poté je uzavřena i pravá čelist, čímž je zajištěna rovnost napětí všech měřených vzorků. Nastaví se požadovaná teplota a čas působení. Po vložení do tepelné komory počítač registruje změnu napětí v čase při konstantní délce vzorku. [10]

2.2.13 SRÁŽIVÁ VLÁKNA

Využívají se pro přípravu měkkých objemných vlákenných útvarů, vhodných pro použití ve směsi s vlnou, bavlnou atd. Podle mechanismu srážení lze tyto vlákna dělit na amorfně sráživá (za varu) a krystalizačně (diferenčně) sráživá. Při amorfním srážení probíhají dva konkurenční děje: desorientace řetězců, která způsobuje smršťování a krystalizace, která dalšímu smršťování brání. Aplikuje se na vlákna s nízkou krystalinitou, vyrobená dloužením při nízkých teplotách. Principem krystalizačního srážení je krystalizace a rekrystalizace, kdy se napjaté polymerní řetězce skládají do krystalitů, přičemž nastává částečná desorientace. Aplikuje se na vysoce orientovaná vlákna, která jsou fixovaná při vyšších teplotách, a proto mají při nižších teplotách nízkou sráživost. Zahřátím na 160–200°C se vysráží (až o 35%). Výhodou je, že při tomto mechanismu srážení nedochází k přílišným změnám orientace.

Porovnání je zobrazeno na obrázku 17.



Obr. 17 Sráživost PES vláken v závislosti na teplotě

2.2.14 METODY POUŽITÉ PRO STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ DAT

PRŮMĚR

Aritmetický průměr \bar{x} je definován jako součet hodnot znaku zjištěných u všech jednotek souboru, vydělený celkovým počtem jednotek souboru n . Pro jeho výpočet platí:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (26)$$

ROZPTYL

Rozptyl se definuje jako průměr druhých mocnin odchylek od aritmetického průměru.

Platí zde vztah:

$$s_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (27)$$

SMĚRODATNÁ ODCHYLKA

Je definována jako druhá odmocnina z rozptylu a platí pro ni vztah:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{s_x^2} \quad (28)$$

INTERVAL SPOLEHLIVOSTI (IS)

Představuje rozsah hodnot pro střední hodnotu základního souboru. Střední hodnota leží uprostřed tohoto rozsahu. IS se určuje z hladiny významnosti α a ze směrodatné odchylky. Nejčastěji koeficient nabývá hodnoty $\alpha=0,05$ a $\alpha=0,01$, tzn. 95% a 99% IS. 95% IS tedy znamená, že s 95% jistotou leží průměrná hodnota v tomto intervalu. Platí:

$$\mu = \bar{x} \pm t_{0,025}(n - 1) \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (29)$$

kde $t_{0,025}$ je tabulková hodnota studentova rozdělení.

KORELAČNÍ KOEFICIENT

Koeficient korelace udává míru statistické závislosti dvou znaků. Je to vždy číslo z intervalu $\langle -1, 1 \rangle$. Krajních hodnot nabývá tehdy, je-li mezi znaky přímá (nepřímá) úměra. Je definován vzorcem:

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{s_x \cdot s_y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \bar{x} \cdot \bar{y}}{s_x \cdot s_y} \quad (30)$$

KOEFICIENT DETERMINACE

Umožňuje srozumitelně objasnit souvislost mezi dvěma proměnnými. Lze jej vypočítat jako druhou mocninu korelačního koeficientu. Koeficient determinace je bezrozměrné číslo, pokud se vynásobí 100, je hodnota převedena na procenta a určuje, kolika procenty se sledovaný faktor podílí na výsledném efektu. Platí zde vztah:

$$d = r^2 = \frac{v_p}{v_c} \quad (31)$$

kde v_p je variabilita vysvětlená nezávislou proměnnou a v_c variabilita celková. [27]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cíl práce spočívá ve stanovení vlivu tepelného působení na vybrané mechanické vlastnosti polyesterového multifilu. Vybranými zkoumanými vlastnostmi jsou sráživost, pevnost, tažnost, počáteční modul a akustický dynamický modul. Experimentální měření bylo prováděno na polyesterovém multifilu, jehož jmenovitá jemnost je 75 dtex. Multifil obsahuje 36 filament a svazku je udělen ochranný zákrut, viz obr. 18.



Obr. 18 Pohled na testovaný PL multifil; příčný řez pořízený světelným mikroskopem Nikon Eclipse ME 600 při rozlišení 0,24 μ m/px a podélný pohled pořízený rastrovacím elektronovým mikroskopem VEGA při 50 a 500 násobném zvětšení. Podél příze lze sledovat slabá a silná místa.

3.1 JEMNOST MULTIFILU

Jemnost svazku byla stanovena pomocí gravimetrické metody, popsané v kapitole 2.2.1.1. Na vijáku bylo dle normy odměřeno 100 metrů multifilu a toto měření bylo opakováno 10 krát. Odvinutá příze byla poté zvážena na analytických vahách. Data byla testována na normalitu a homogenitu a poté byla dle vztahu (1) vypočtena jemnost multifilu. Průměrná hodnota jemnosti a 95% IS střední hodnoty jemnosti byl stanoveny dle vztahu (26, 29). Výsledky jsou uvedeny v tab. 2. Naměřená jemnost je statisticky významně vyšší než hodnota jmenovité jemnosti udávaná výrobcem.

Tabulka 2 Hodnota jemnosti a 95% IS střední hodnoty

multifil	Jemnost [tex]	95% IS
	8,34	<8,336-8,354>

3.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ SRÁŽIVOSTI A SRÁŽECÍ SÍLY

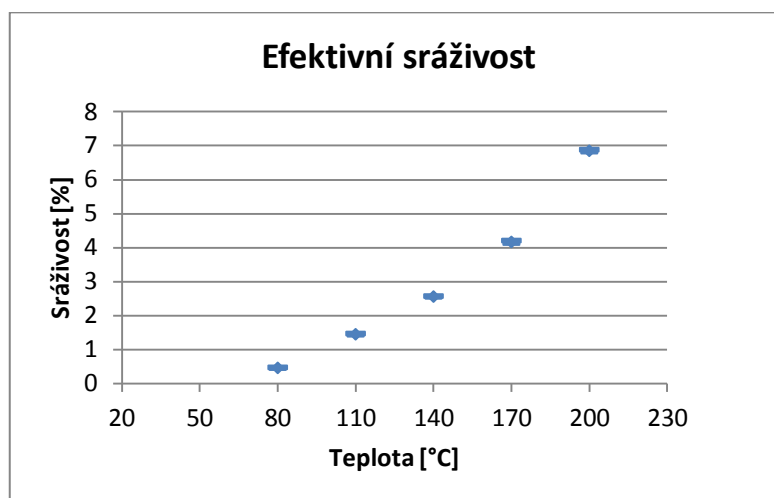
K měření tepelné sráživosti a tepelné srážecí síly byl použit přístroj TST2, viz kapitola 2.2.12.2, kde je rovněž popsán princip měření na tomto přístroji. Rozsah teplot působících na vzorek byl zvolen s ohledem na teplotu skelného přechodu PL 73°C a teplotu tání PL 250°C, tj. byly vybrány tyto teploty: 80, 110, 140, 170 a 200°C. Teplotní režim byl pro měření sráživosti a síly nastaven shodně na 3 minuty ohřevu a následně 0,5 minuty chlazení po vyjmutí z tepelné komory. Předpětí bylo stanoveno dle normy (0,02g/dtex) na 1,5 gramu. Bylo provedeno 20 měření pro každou z pěti zvolených teplot, a to jak pro sráživost, tak pro srážecí sílu.

ZPRACOVÁNÍ DAT SRÁŽIVOSTI

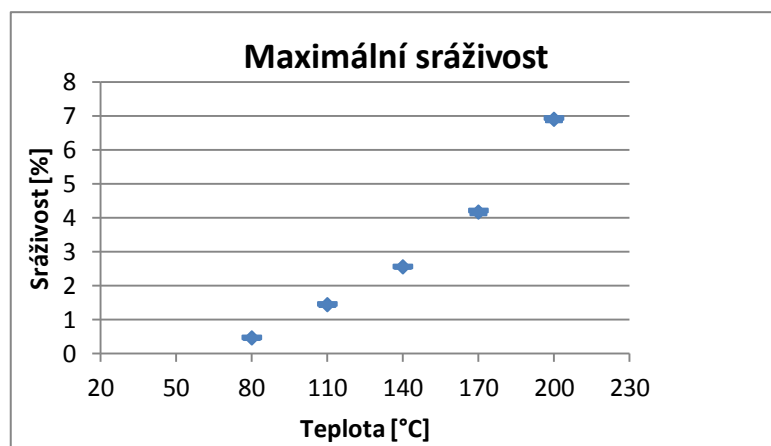
Naměřená data tepelné sráživosti pro každou teplotu byla postupně testována na normalitu a homogenitu pomocí programu na statistické zpracování dat (QC Expert). Metodou malých výběrů byla stanovena průměrná hodnota a 95% IS pro efektivní, maximální a zbytkovou sráživost, viz tab. 3. Poté byla jednotlivá data sráživosti vynesena do grafů v závislosti na zvolených teplotách, viz obr. 19, 20, 21 a vzájemně porovnána, viz obr. 22. Na obr. 23 jsou uvedeny jednotlivé kinetické křivky, znázorňující závislost sráživosti na čase a na obr. 24 je znázorněna rychlost srážení v závislosti na čase. Rovněž byla pro každou teplotu stanovena maximální srážecí rychlost v závislosti na teplotě, viz obr. 25.

Tabulka 3 Střední hodnoty a 95% IS sráživosti

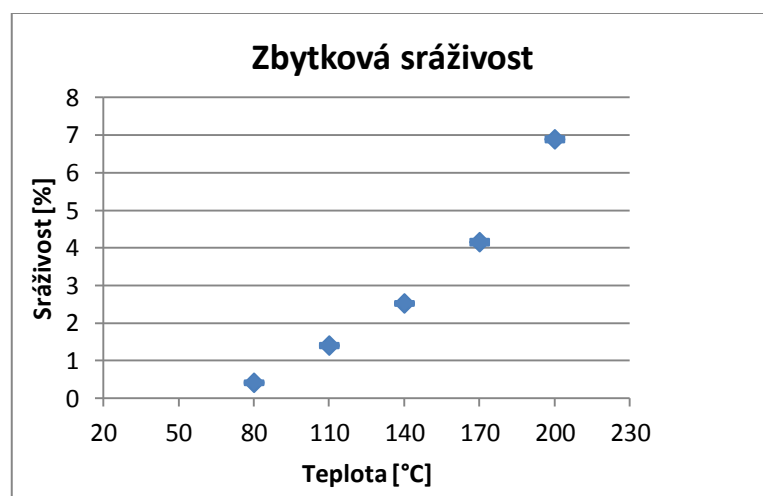
Teplota [°C]	Sráživost [%]								
	Efektivní			Maximální			Zbytková		
	Střední hodnota	95% IS		Střední hodnota	95% IS		Střední hodnota	95% IS	
		Spodní mez	Horní mez		Spodní mez	Horní mez		Spodní mez	Horní mez
80	0,45	0,44	0,46	0,46	0,45	0,47	0,41	0,39	0,43
110	1,44	1,42	1,46	1,44	1,42	1,46	1,4	1,38	1,42
140	2,55	2,54	2,56	2,55	2,54	2,56	2,52	2,51	2,54
170	4,16	4,12	4,21	4,17	4,12	4,22	4,15	4,11	4,19
200	6,85	6,81	6,87	6,91	6,86	6,95	6,88	6,85	6,92



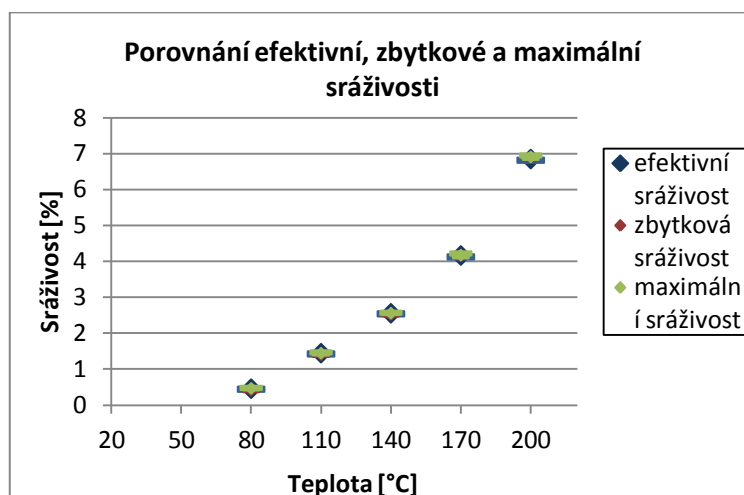
Obr. 19 Graf středních hodnot a 95% IS efektivní tepelné sráživosti



Obr. 20 Graf středních hodnot a 95% IS maximální tepelné sráživosti

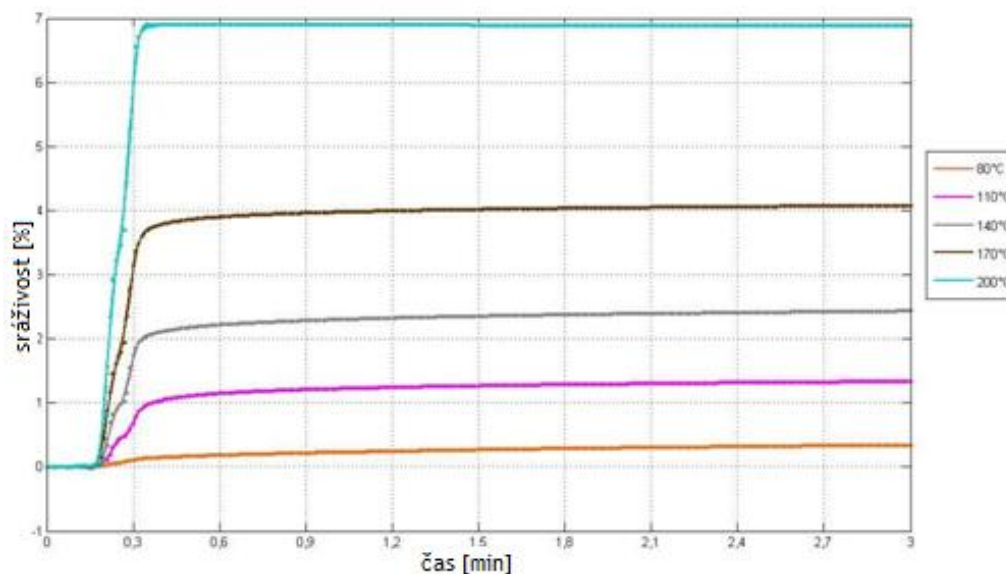


Obr. 21 Graf středních hodnot a 95% IS zbytkové tepelné sráživosti



Obr. 22 Porovnání efektivní, zbytkové a maximální tepelné sráživosti

Z grafu (22) je patrné, že závislost průběhu efektivní, maximální a zbytkové sráživosti na teplotě je shodná, intervaly spolehlivosti středních hodnot jednotlivých sráživostí se na dané teplotě vzájemně překrývají, rozdíly středních hodnot jsou tedy na dané teplotě statisticky nevýznamné.

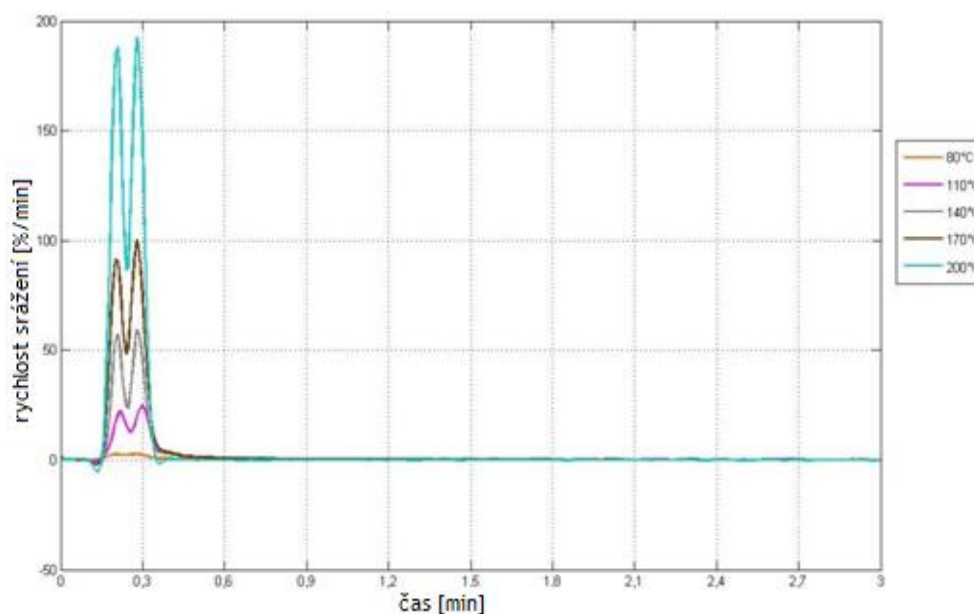


Obr. 23 Porovnání kinetických křivek sráživosti multifilu

Z průběhu kinetických křivek je zřejmé, že s rostoucí teplotou roste i sráživost. Zejména pak při teplotě nad 170°C, kdy se sráživost více než zdvojnásobila. Tento nárůst je

ovlivněn pohyblivostí amorfni fáze a její interakci s fází krystalickou, kdy se řetězce vlivem zahřívání přestavují do nejvýhodnější vzájemné polohy, což se projeví smrštěním.

Derivací kinetických křivek (obr. 23) vyhlazených pomocí spline, se získají hodnoty rychlosti srážení.



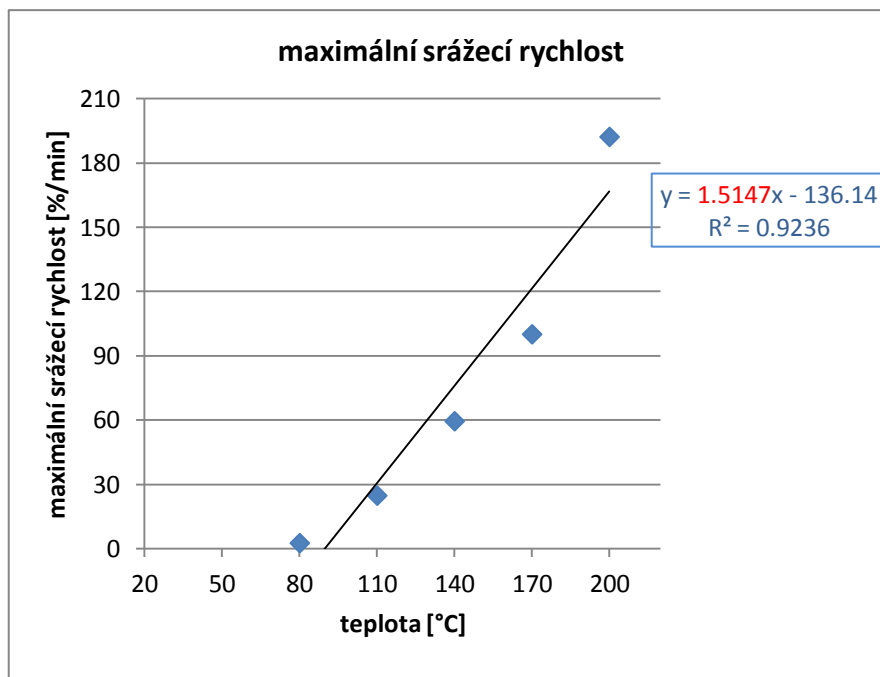
Obr. 24 Porovnání rychlosti srážení pro jednotlivé teploty

Z grafu (obr. 24) je patrné, že k největšímu srážení dochází již ve chvíli, kdy multifil dosáhne nastavené teploty. Další doba působení už na srážení nemá vliv.

Z maximální hodnoty derivace kinetické křivky srážení byla poté stanovena maximální srážecí rychlost v závislosti na teplotě, viz tab. 4 a obr. 25.

Tabulka 4 Hodnoty rychlosti srážení v závislosti na teplotě

Teplota [°C]	80	110	140	170	200
Maximální rychlost srážení [%/min]	2,72	24,86	59,58	100,16	192,27



Obr. 25 Maximální rychlost srážení

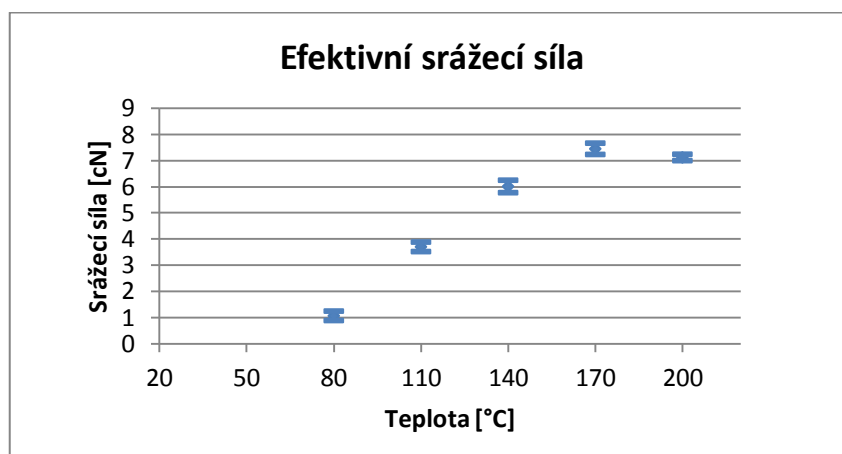
Závislost je od teplot skelného přechodu k vyšším teplotám PL multifilu lineární. Směrnicí regresní přímky odečtenou z derivační křivky a proloženou jednotlivými body metodou nejmenších čtverců lze označit jako citlivost maximální srážecí rychlosti na teplotě [%/min⁻¹ °C⁻¹].

ZPRACOVÁNÍ DAT SRÁŽECÍ SÍLY

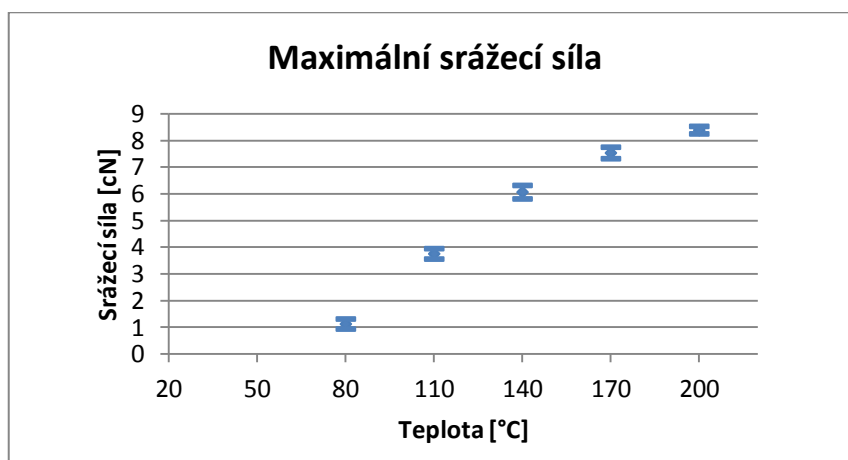
Naměřená data tepelné (efektivní, maximální a zbytkové) srážecí síly pro každou teplotu byla postupně testována na normalitu a homogenitu pomocí programu na statistické zpracování dat (QC Expert). Metodou malých výběrů byla stanovena průměrná hodnota a 95% IS pro efektivní, maximální a zbytkovou srážecí sílu, viz tab. 5. Poté byla jednotlivá data srážecí síly vynesena do grafů v závislosti na zvolených teplotách, viz obr. 26, 27, 28 a vzájemně porovnána, viz obr. 29.

Tabulka 5 Střední hodnoty a 95% IS srážecí síly

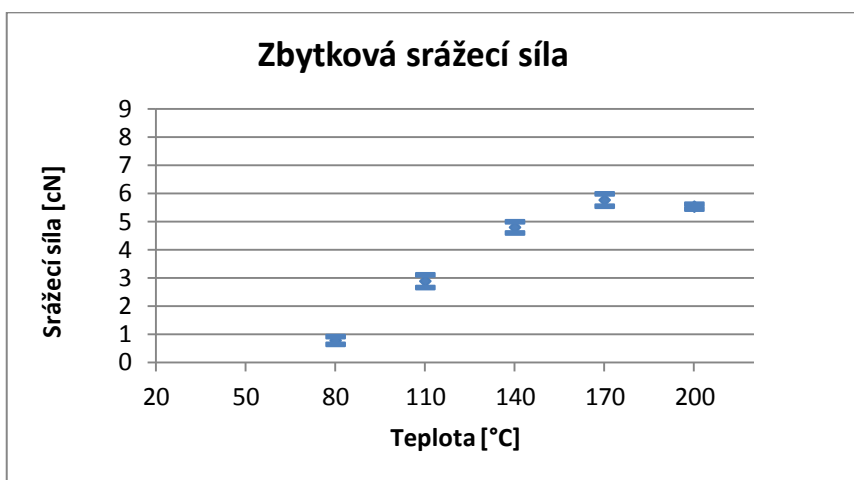
Teplota [°C]	Srážecí síla [cN]								
	Efektivní			Maximální			Zbytková		
	Střední hodnota	95% IS		Střední hodnota	95% IS		Střední hodnota	95% IS	
		Spodní mez	Horní mez		Spodní mez	Horní mez		Spodní mez	Horní mez
80	1,06	0,88	1,24	1,12	0,93	1,31	0,78	0,64	0,917
110	3,7	3,52	3,88	3,75	3,55	3,95	2,88	2,66	3,11
140	6,01	5,77	6,25	6,06	5,81	6,31	4,79	4,59	4,99
170	7,45	7,23	7,66	7,53	7,32	7,75	5,76	5,55	5,98
200	7,12	6,99	7,24	8,38	8,24	8,53	5,53	5,44	5,62



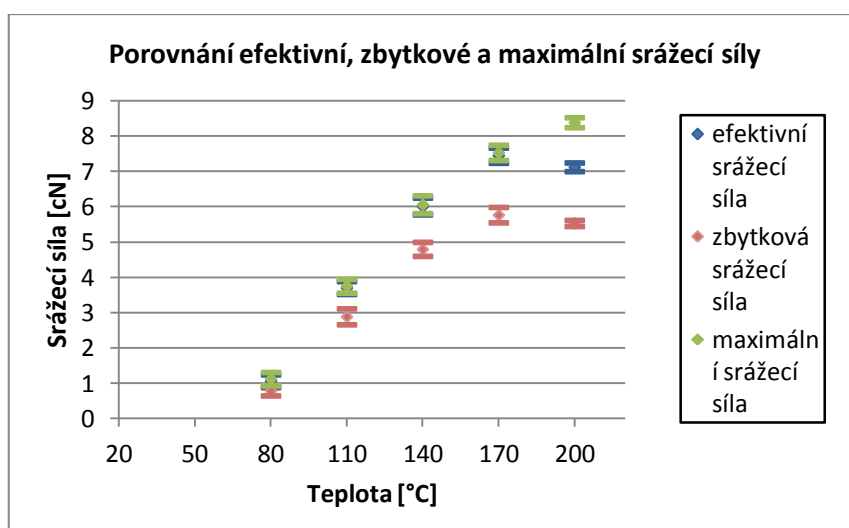
Obr. 26 Graf středních hodnot a 95% IS efektivní srážecí síly



Obr. 27 Graf středních hodnot a 95% IS maximální srážecí síly



Obr. 28 Graf středních hodnot a 95% IS zbytkové srážecí síly



Obr. 29 Porovnání efektivní, maximální a zbytkové srážecí síly

V grafu na obr. 29 je znázorněna efektivní, maximální a zbytková srážecí síla [cN] v závislosti na teplotě [°C]. Maximální srážecí síla, měřená ihned po dosažení zvolené teploty, roste úměrně s teplotou. Efektivní srážecí síla, měřená po jedné minutě tepelného namáhání, roste s teplotou až do 170°C, pak klesá. Stejně tak zbytková srážecí síla, měřená během relaxace. Při působení teploty 200°C již efektivní a zbytková srážecí síla klesá. Hodnoty na 200°C vykazují tendenci klesat, rozdíly středních hodnot dané sráživosti při teplotě 170 a 200°C jsou však statisticky nevýznamné.

3.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ PEVNOSTI A TAŽNOSTI

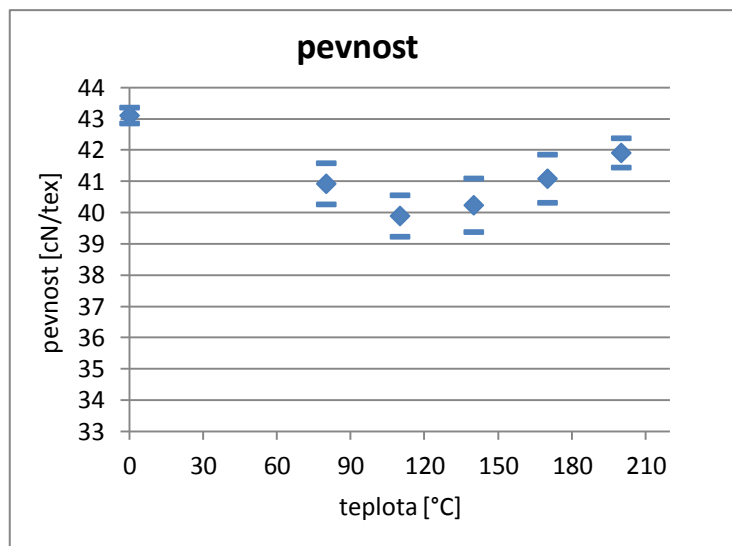
Po měření sráživosti při dané teplotě byly multifily ihned podrobeny měření pevnosti a tažnosti s cílem sledovat změny mechanických vlastností. K měření pevnosti a tažnosti byl použit dynamometr Instron 4411, viz kapitola 2.2.7.1 a 2.2.7.2., kde je popsán princip měření na tomto přístroji. Upínací délka testovaného multifilu byla zvolena 200 mm, a to s ohledem na upínací délku přístroje TST2, kde byly multifily před testováním na Instronu podrobeny působení teplot. Předpětí bylo stanoveno dle normy (5mN/tex) tj. 37,5mN. Rychlost přičníku byla nastavena na 160mm/min, aby doba do přetrhu byla přibližně 20 sec. Bylo provedeno 20 měření pro každou z pěti zvolených teplot. Rovněž bylo provedeno 20 měření pevnosti a tažnosti multifilu bez předchozího působení teploty.

ZPRACOVÁNÍ DAT PEVNOSTI A TAŽNOSTI

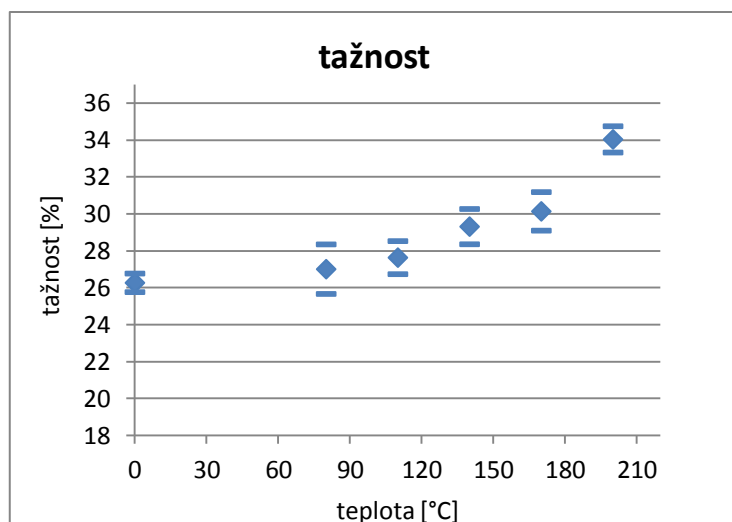
Naměřené hodnoty protažení a síly potřebné k přetrhu byly testovány na normalitu a homogenitu. Pro každou teplotu byly z dat stanoveny průměrné hodnoty tažnosti a poměrné pevnosti spolu s příslušnými 95% IS dle vztahů (26),(29), viz tab. 6. Grafické závislosti poměrné pevnosti a tažnosti na teplotě jsou uvedeny na obr. 30, 31, 34 a 35.

Tabulka 6 Průměrné hodnoty poměrné pevnosti a tažnosti, včetně 95% IS

Teplota [°C]	Pevnost [cN/tex]			Tažnost [%]		
	Střední hodnota	95% IS		Střední hodnota	95% IS	
		Spodní mez	Horní mez		Spodní mez	Horní mez
0	43,11	42,86	43,36	26,27	25,76	26,76
80	40,93	40,27	41,58	27,01	25,664	28,349
110	39,89	39,23	40,56	27,63	26,736	28,526
140	40,24	39,38	41,09	29,31	28,357	30,266
170	41,09	40,32	41,86	30,14	29,095	31,181
200	41,92	41,45	42,38	34,04	33,327	34,750



Obr. 30 Graf vlivu teploty na pevnost



Obr. 31 Graf vlivu teploty na tažnost

Mezi pevností tepelně nenamáhaného a tepelně namáhaného multifilu je znatelný statisticky významný rozdíl. Hodnoty pevnosti a tažnosti nezahřívaného multifilu jsou výrazně nižší oproti zahřívanému svazku, s rostoucí teplotou mají tedy tendenci růst. To je způsobeno vnitřní krystalinitou vlákna, kdy vlivem teploty roste podíl plastické deformace, čímž roste tažnost a klesá pevnost, avšak s rostoucí teplotou mají hodnoty poměrné pevnosti tendenci opět stoupat. Ze statistického hlediska není mezi těmito hodnotami statisticky významný rozdíl – s výjimkou rozdílu mezi střední hodnotou pevnosti po tepelném namáhání při 110 a 170°C v porovnání se střední hodnotou pevnosti po tepelném namáhání při 200°C.

Dále byla testována statistická významnost rozdílů středních hodnot poměrné pevnosti a statistická významnost rozdílů středních hodnot tažnosti, s cílem zjistit zda vždy dva porovnávané soubory dat mají shodné střední hodnoty a rozptyly. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 7 a 8.

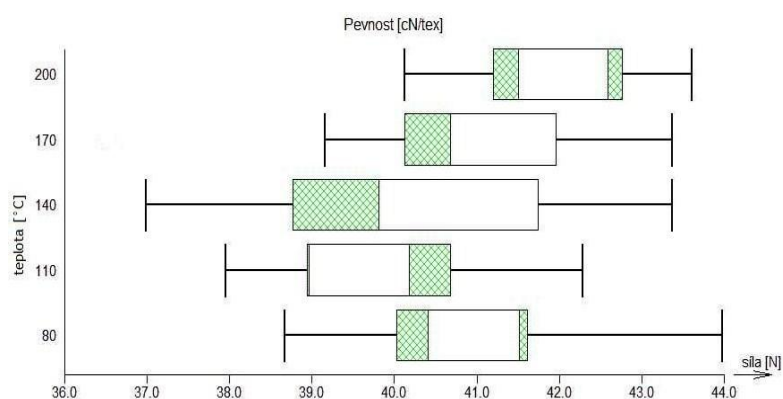
Tabulka 7 Párové porovnání dvojic pevnosti pro vybrané teploty

Párové porovnání dvojic úrovní – pevnost			
Srovnávaná dvojice [°C]	Rozdíl	Významnost	Pravděpodobnost
80-110	1,030120482	Nevýznamný	0,315663816
80-140	0,686746988	Nevýznamný	0,711302676
80-170	-0,162650602	Nevýznamný	0,9982444
80- 200	-0,9879518075	Nevýznamný	0,359087393
110-140	-0,34337349	Nevýznamný	0,969725438
110-170	-1,19277108	Nevýznamný	0,17814947
110-200	-2,01807229	Významný	0,001915043
140-170	-0,84939759	Nevýznamný	0,517830123
140-200	-1,6746988	Významný	0,017070153
170-200	-0,82530121	Nevýznamný	0,546914084

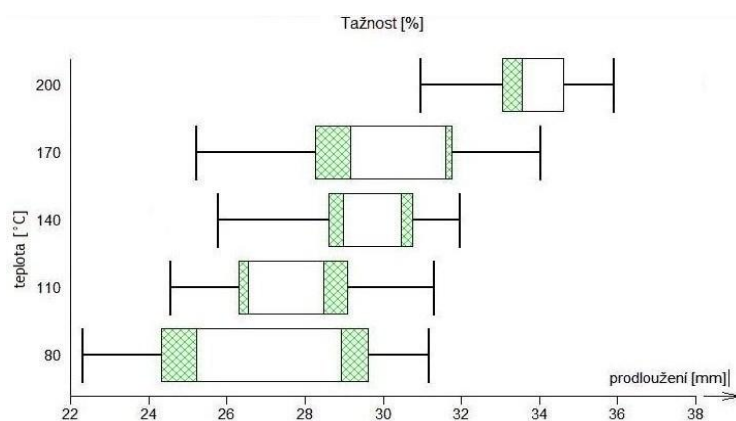
Tabulka 8 Párové porovnání dvojic tažnosti pro vybrané teploty

Párové porovnání dvojic úrovní – tažnost			
Srovnávaná dvojice [°C]	Rozdíl	Významnost	Pravděpodobnost
80-110	-0,62475	Nevýznamný	0,932783
80-140	-2,305	Významný	0,028105
80-170	3,13175	Významný	0,000723
80- 200	-7,032	Významný	9,07E-15
110-140	1,68025	Nevýznamný	0,204643
110-170	-2,507	Významný	0,012685
110-200	6,40725	Významný	7,14E-13
140-170	0,82675	Nevýznamný	0,832115
140-200	-4,727	Významný	6,42E-08
170-200	3,90025	Významný	1,08E-05

Párové porovnání dvojic hodnot pevnosti (viz tab. 7) dokazuje víceméně statisticky nevýznamné rozdíly u pevnosti. Hodnoty pevnosti vykazují statisticky významné rozdíly až při porovnání mezi teplotou 110 a 200°C a mezi teplotou 140 a 200°C. Oproti tomu párové porovnání dvojic hodnot tažnosti (viz tab. 8) dokazuje významné statistické rozdíly. Ty jsou zaznamenány vždy při nárůstu teploty o 60°C. Což potvrzují krabicové grafy, kde se u výše zmíněných teplot nepřekrývají jednotlivé intervaly spolehlivosti (v grafu označené bílým pruhem), viz obr. 32 a 33. V grafu je dále v jednotlivých obdélnících znázorněn medián a interkvartilové rozpětí. Meze obdélníků označují 5 a 95% percentily, neboli minimální a maximální hodnotu.

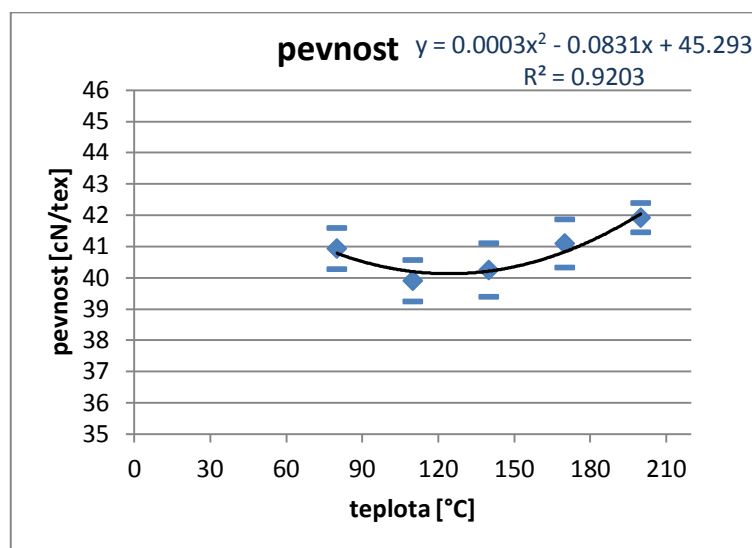


Obr. 32 Graf párového porovnání hodnot pevnosti

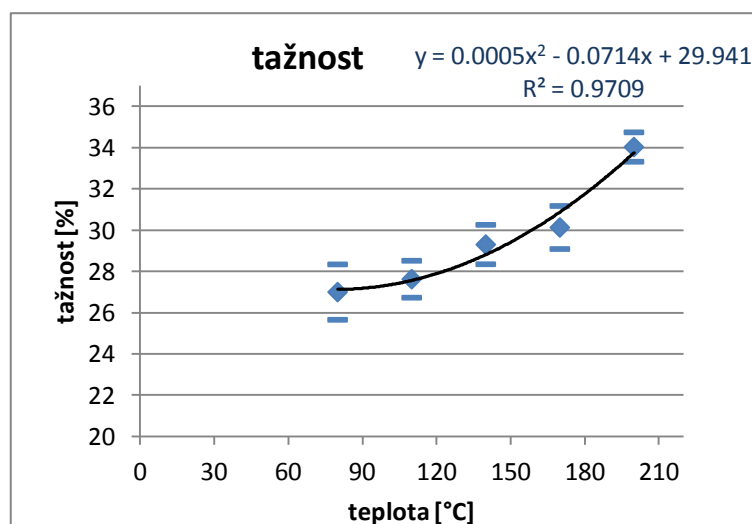


Obr. 33 Graf párového porovnání hodnot tažnosti

Pro hodnoty pevnosti a tažnosti byl hledán regresní model závislosti poměrné pevnosti a tažnosti na teplotě tepelného namáhání. Tento model je platný pouze pro hodnoty teplot od 80 do 200°C, viz obr. 34 a 35.



Obr. 34 Graf vlivu teploty (80-200°C) na pevnost

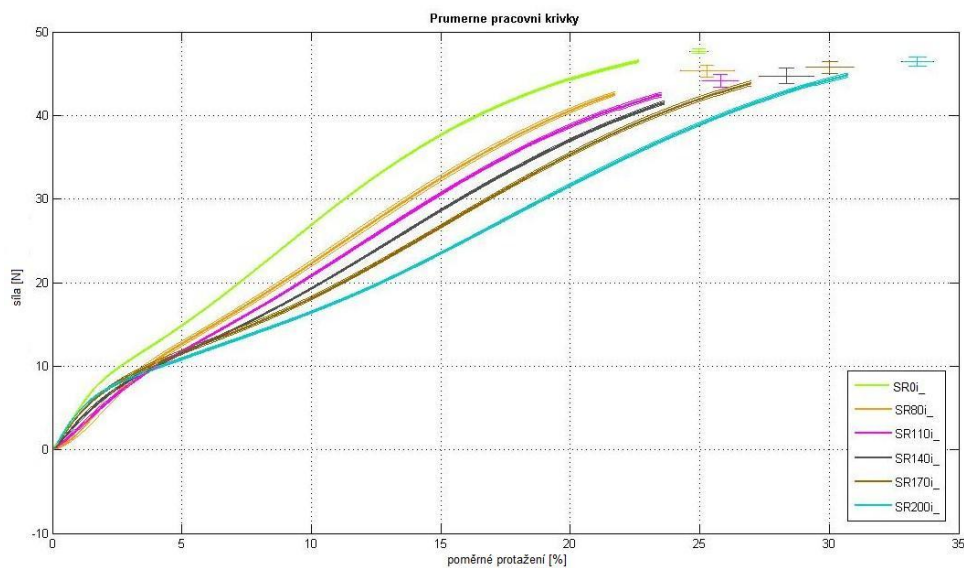


Obr. 35 Graf vlivu teploty (80-200°C) na tažnost

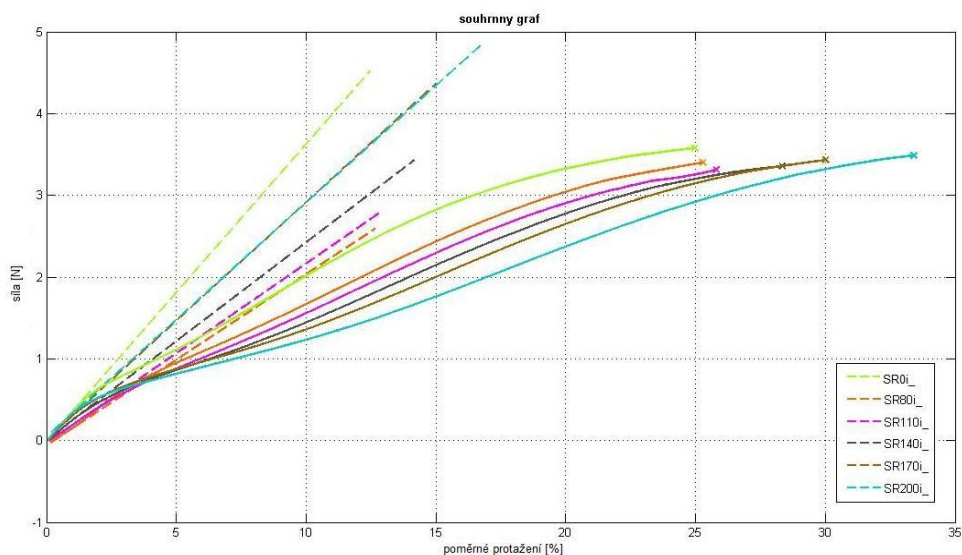
Z naměřených dat byly sestrojeny tahové křivky. Z jednotlivých tahových křivek byly s využitím speciálního softwaru vypočteny souřadnice průměrných tahových křivek. Postup výpočtu spočívá v „oříznutí“ tahových křivek v bodě přetrhu vlákna, které vykázalo nejnižší tažnost. Takto upravené tahové křivky se postupně zpracovávají tak, že při stejné tažnosti se vyjádří aritmetický průměr pevností ze všech křivek. Z uvedených důvodů je průměrná tahová křivka nakreslena pouze do bodu přetrhu

nejméně tažného multifilu. Poslední bod křivky je hodnocen zvláště, jeho souřadnice tvoří průměrná pevnost a průměrná tažnost multifilu.

U výsledných průměrných tahových křivek byly vypočteny 95% intervaly spolehlivosti středních hodnot. Průměrné tahové křivky jsou znázorněny na obr. 36. Byly stanoveny také počáteční moduly (na 0,5 % prodloužení a 1% prodloužení). Počáteční modul je vyjádřen jako tangenta úhlu, který tahová křivka svírá s osou deformace. Představuje derivaci pracovní křivky v počátku, vyjadřující odpor vůči deformaci. Počáteční moduly jsou znázorněny na obr. 37.

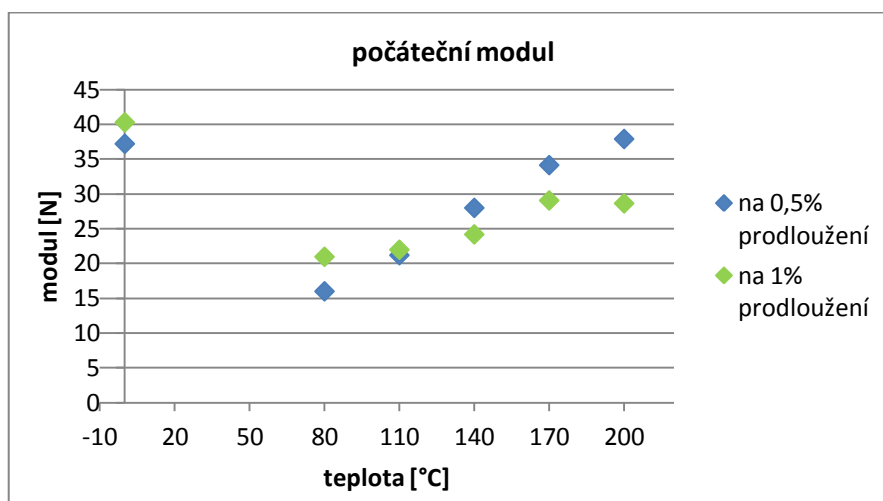


Obr. 36 Průměrné pracovní křivky nezahříváného a zahříváného multifilu



Obr. 37 Průměrné pracovní křivky nezahříváného a zahříváného multifilu včetně počátečních modulů na 1% prodloužení

Průměrné pracovní křivky potvrzují, že tepelně nenamáhaný multifil vykazuje vyšší pevnost. Tažnost je srovnatelná s tažnostmi multifilu tepelně namáhaného na 80 a 110°C. Vykazuje ale statisticky významně nižší tažnost ve srovnání se vzorky tepelně namáhanými při 140, 170 a 200°C.



Obr. 38 Průměrné hodnoty počátečního modulu v závislosti na teplotě

Z obr. 37 je zřejmé, že počáteční modul nezahřátého svazku ve srovnání s hodnotami tepelně namáhaného multifilu je statisticky významně vyšší. Počáteční modul je stejně jako pevnost a tažnost závislý na stupni krystalinity a tedy také vykazuje tendenci růst spolu s teplotou, a to téměř až na hodnotu nezahřátého svazku, viz obr. 38.

3.4 AKUSTICKÝ DYNAMICKÝ MODUL A RYCHLOST ZVUKU

Byl sledován také vliv tepelného namáhání multifilu na rychlost průchodu zvuku multifilem a akustický dynamický modul multifilu. Multifily byly 3 minuty zahřívány na vybrané teploty a následně 0,5 minuty chlazeny. Tepelné namáhání na přístroji TST2 probíhalo při stejných počátečních podmínkách a pro stejný rozsah teplot, jako při měření sráživosti. Ihned po sejmutí z přístroje TST2 byl multifil podroben měření na přístroji DMT, viz kapitola 2.2.8.1, 2.2.8.2, kde je rovněž popsán princip měření na tomto přístroji. Rozsah maximálního napětí byl pro každé měření nastaven na 6-9 [V].

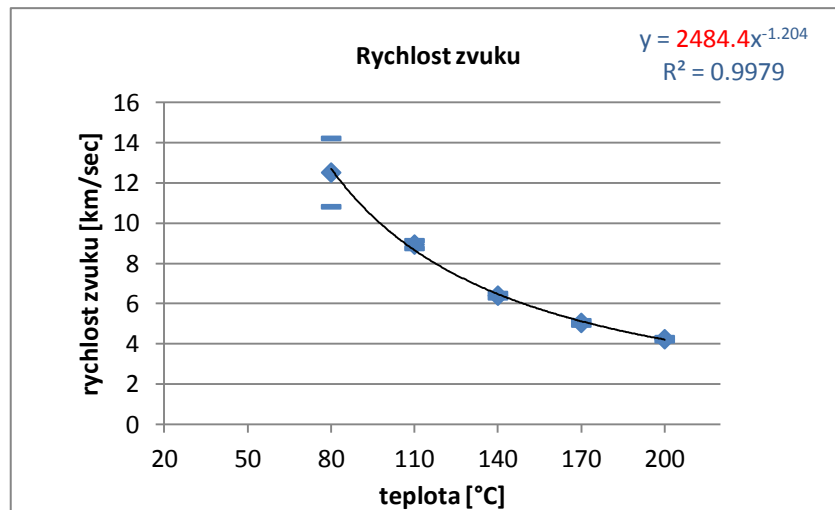
Předpětí bylo stanoveno dle normy na 10 gramů. Počáteční upínací délka testovaného multifilu (100 mm) byla postupně po každém měření o 10 mm zvyšována až do 200 mm. Maximální upínací délka byla opět zvolena s ohledem na upínací délku přístroje TST2, kde byly multifily před testováním na přístroji DMT ohřívány na vybrané teploty. Pro každou jednotlivou teplotu bylo provedeno 10 měření.

ZPRACOVÁNÍ DAT RYCHLOSTI ZVUKU A AKUSTICKÉHO MODULU

Výsledkem měření na přístroji DMT jsou hodnoty času, za který projde napětí testovaným multifilem. Ze získaných hodnot byla pomocí lineární regrese, metodou nejmenších čtverců, stanovena rychlost zvuku pro každou teplotu. Rovněž byly stanoveny průměrné hodnoty rychlosti zvuku a příslušné 95% IS, dle vztahu (26) a (29), viz tab. 9. Na obr. 39 je uvedena závislost rychlosti průchodu zvuku multifilem na teplotě zahřívání multifilu. Akustický modul byl poté vypočten jako funkce rychlosti zvuku a hustoty vláken dle vztahu (19), grafické vyjádření je zobrazeno na obr. 40.

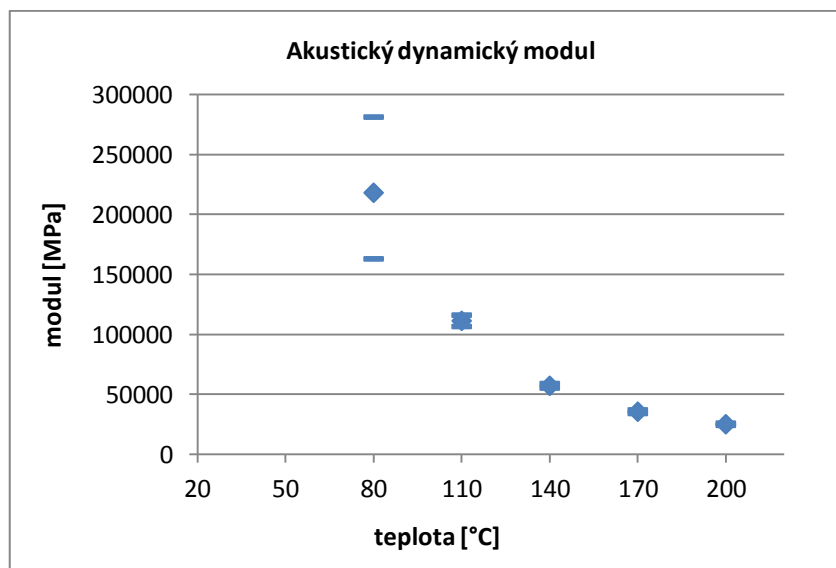
Tabulka 9 Střední hodnoty rychlosti zvuku a dynamického modulu s příslušnými 95% IS

Teplota [°C]	Rychlost zvuku [km/sec]			Akustický dynamický modul [MPa]		
	Střední hodnota	95% IS		Střední hodnota	95% IS	
		Spodní mez	Horní mez		Spodní mez	Horní mez
80	12,52	10,83	14,22	217977,9	162891,7	281073,6
110	8,95	8,75	9,14	111229,4	106538,6	116021,2
140	6,41	6,31	6,51	57096,3	55247,8	58975,2
170	5,05	4,95	5,16	35512,3	34057,7	36997,3
200	4,25	4,17	4,32	25053,2	24163,4	25959,1



Obr. 39 Graf rychlost zvuku

Pro hodnoty vynesené v grafu byl stanoven regresní model závislosti rychlosti průchodu zvuku na teplotě zahřívání. Výsledná rychlost zvuku je 2484 km/s. Uvedená regresní rovnice je platná pro teploty od 80 do 200°C.



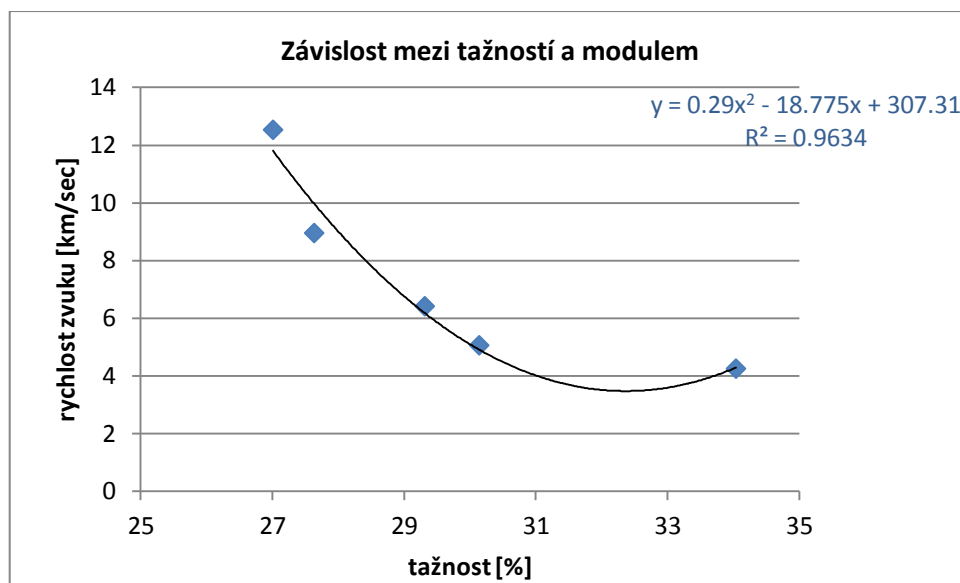
Obr. 40 Akustický dynamický modul

Jak je patrné z grafu na obr. 40, chování akustického dynamického modulu kopíruje chování rychlosti zvuku, což vyplývá ze závislosti akustického dynamického modulu na hustotě měřeného materiálu a druhé mocnině rychlosti zvuku, viz vztah (19). Jednotlivé IS se nepřekrývají, rozdíly středních hodnot jsou tedy statisticky významné a lze

konstatovat, že jak rychlosti zvuku, tak hodnoty akustického modulu klesají v závislosti na rostoucí teplotě.

Zde by jistě bylo zajímavé přidat i srovnání s hodnotami tepelně nenamáhaného multifilu. Bohužel ale toto měření nebylo možné z technických důvodů provést.

Dále byla sledována závislost rychlosti průchodu zvuku na tažnosti multifilu. Byl stanoven regresní model této závislosti. Regresní rovnice uvedená na obr. 41, je platná pro teploty od 80 do 200°C.



Obr. 41 Závislost rychlosti zvuku na tažnosti

4. ZÁVĚR

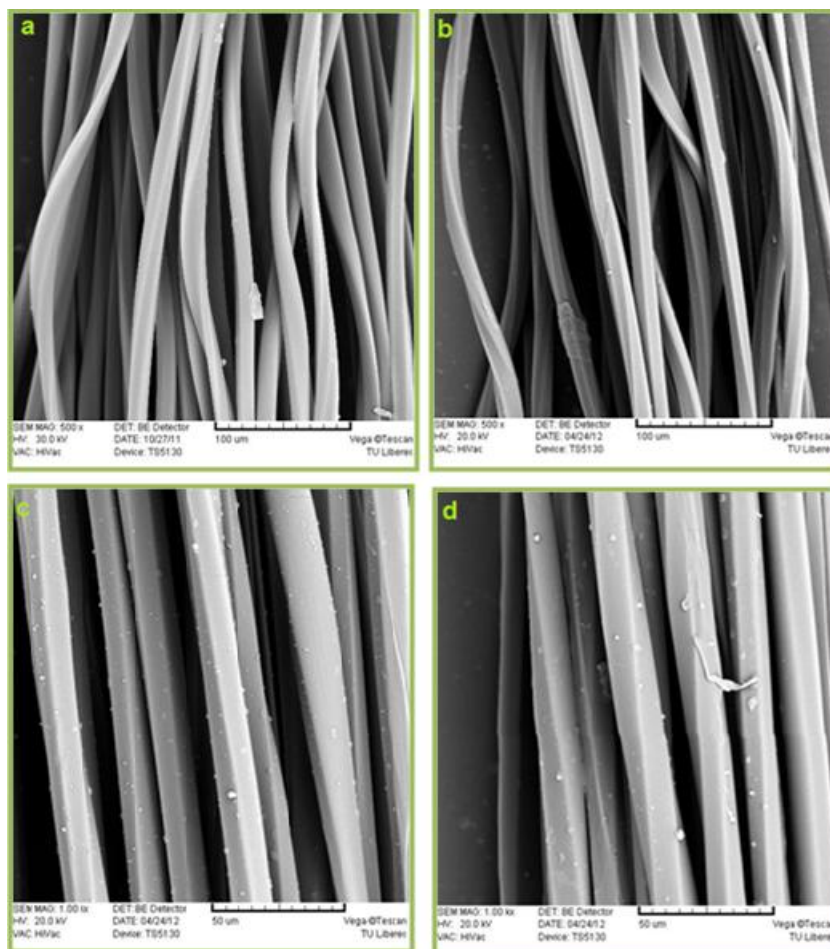
V práci byly sledovány vybrané vlastnosti polyesterového multifilu. Termické vlastnosti, tj. tepelná sráživost, srážecí síla a maximální srážecí rychlost. Poté byl sledován vliv tepelné sráživosti na mechanické vlastnosti sledovaného multifilu, a to zejména na pevnost, tažnost, počáteční modul, rychlost zvuku a akustický dynamický modul. V práci byly sledovány také geometrické vlastnosti polyesterového multifilu, které sloužily k bližšímu poznání multifilu, tj. určení jemnosti a mikroskopické určení tvaru příčného řezu vlákna, vzhledu a vnitřního uspořádání vláken v multifilu.

Na základě výsledků měření bylo potvrzeno, že vlivem tepelného zahřívání se vlastnosti multifilu mění. Měřením tepelné sráživosti bylo zjištěno, že sráživost i tepelná srážecí síla se s přibývajícím teplotou zvyšují. To je způsobeno změnami ve vnitřním uspořádání vlákna, vlivem teploty vyšší než teplota skelného přechodu, kdy se vlákno stává více orientovaným. Tomu odpovídá i průběh srážecí síly. Citlivost maximální srážecí rychlosti vykazuje od teploty skelného přechodu do teploty 200°C lineární průběh.

Orientovanější struktura vláken má za následek, že spolu s teplotou roste tažnost, což dobře koresponduje s průběhem sráživosti. V průběhu tažnosti byly zaznamenány významné statistické rozdíly, a to vždy při nárůstu teploty o 60°C. Zároveň s rostoucí tažností klesá pevnost, avšak s nárůstem teploty od 140°C vykazuje tendenci opět růst. Ze statistického hlediska není mezi těmito hodnotami významný rozdíl, s výjimkou hodnot pevnosti po tepelném namáhání při 110 a 170°C ve srovnání s hodnotou pevnosti po tepelném namáhání při 200°C. S průběhem pevnosti koresponduje také počáteční modul, který vykazuje růst až s vyššími teplotami.

Dále byla sledována rychlost zvuku a akustický dynamický modul. Výsledná rychlost zvuku byla stanovena z regresního modelu závislosti průchodu zvuku na teplotě zahřívání, a to na 2484 km/s. Oproti rostoucí tepelné sráživosti a tažnosti, rychlost zvuku a akustický dynamický modul vykazují klesající tendenci, rozdíly středních hodnot jsou statisticky významné. Obě hodnoty jsou rovněž přímo ovlivněny vnitřním uspořádáním ve vlákně. V tomto případě může být klesající tendence průběhu rychlosti,

resp. akustického dynamického modulu způsobena rovněž změnami na povrchu vlákna, vyvolanými vysokou teplotou. Může se jednat například o zbobtnalé zbytky aviváže, viz obr. 42. V budoucnu by bylo dobré sledovat vliv teploty na vnitřní uspořádání multifilu.



Obr. 42 Podélný pohled na testovaný PL multifil po působení různých teplot; pořízený rastrovacím elektronovým mikroskopem VEGA. Zvětšeno 500x a 1000x. a-0°C, b- 140°C, c-170°C, d-200°C.

Ukázalo se, že tepelné působení vyvolává určité strukturální změny, které ovlivňují důležité vlastnosti multifilu – pevnost, tažnost a strukturu multifilu, což může mít vliv například na afinitu barviva či absorpci vlhkosti. Polyesterová vlákna jsou orientovaná v semi-krytalické struktuře, ve které jsou makromolekuly vlákna zřídka v rovnovážném stavu. Nestabilita je dále přenášena do přízí a následně na konečné výrobky. Stanovené výsledky lze využít pro optimalizaci využití PL multifilu, kde je nezbytná znalost vlastností polyesterových vláken a predikce jejich chování.

POUŽITÁ LITERATURA

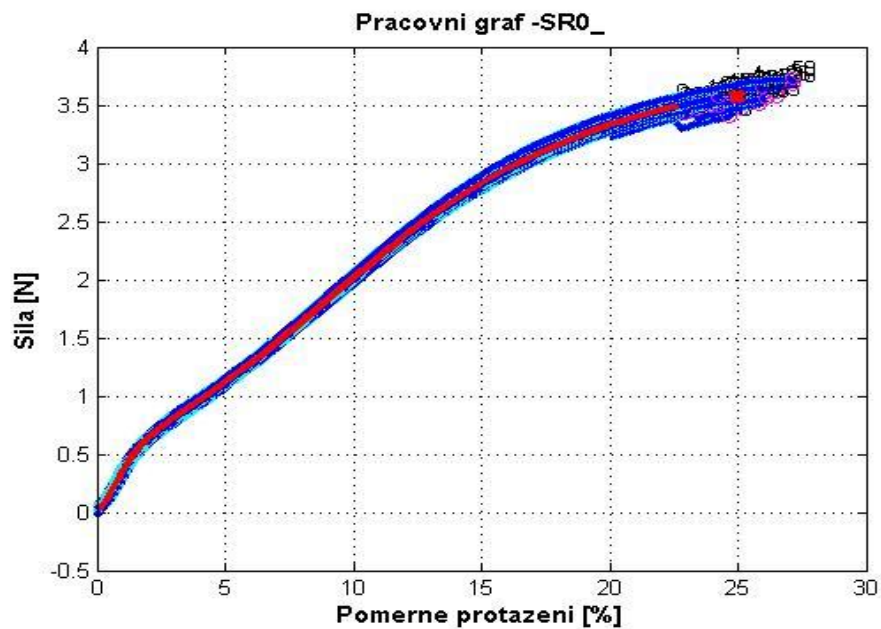
- [1] MILITKÝ, J.: *Textilní vlákna: Klasická a speciální*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2002. 238 s.
- [2] HLADÍK, V.: *Textilní vlákna*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1970. 299 s.
- [3] kolektiv autorů, Sdružení na odbyt dehtových barviv. *Příručka pro textilní barviče a tiskaře*. Praha: RAPID Praha, 1976. 884 s.
- [4] KRYŠTŮFEK, J., WIENER, J.: *Barvení textilií I*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008. 212 s.
- [5] PAJGRT, O., REICHSTÄDTER, B., ŠEVČÍK, F.: *Polyesterová vlákna, jejich vlastnosti, textilní zpracování a využití*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1973. 529 s.
- [6] *Syntetická vlákna*. Liberec: Technická univerzita. [online], Dostupné z http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20061005/9-synteticka_vlakna.pdf, citováno [20.4.2012]
- [7] CHANGFA X., YUFENG Z., SHIZEN W.: *Thermal behavior of polyarylate/Polyester blend fibers*, *Textile Research Journal*, May 2002, ProQues Science Journals, Tianjin Polytechnic University.
- [8] Interní norma č. 11-108-01/01 *Definice. Geometrické vlastnosti vláken* [online], http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/5Normy/IN%2011-108-01_01.pdf, citováno [20.12.2011].
- [9] KOLČAVOVÁ SIRKOVÁ, B.: *Dílčí projekt: Systém projektování textilních struktur*. Liberec, Technická univerzita, 2004.
- [10] Přednášky k předmětu *Zkoušení textilií*. Liberec: Technická univerzita. [online] Dostupné z http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20080514/ZKB_prednaska_7.pdf, citováno [19. 2. 2012]
- [11] MILITKÝ, J., KŘEMENÁKOVÁ, D., KOŠÁTKOVÁ-HUŠKOVÁ, M.: *Characterization of polyester monofilaments and fabrics shrinkage*, Proc. XIIth International Izmir Textile and Apparel Symposium, Oct 28 – 30, 2010.

- [12] MILITKÝ, J., VANÍČEK, J.: Přednášky k předmětu *Vlastnosti vláken*.
Liberec: Technická univerzita. [online] Dostupné z
<http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/VlastnostiVlaken-prednaska7.pdf>, citováno [25.6.2011]
- [13] Lenzing instruments. [online] Dostupné také z
<http://www.lenzing-instruments.com/products/tst-2>, citováno [25.6.2011]
- [14] *Zpracovatelské vlastnosti textilních vláken*. Liberec: Technická univerzita v
Liberci. [online] Dostupné z
http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/zvt_p_5.pdf
- [15] Výzkumné centrum TEXTIL II [online], Dostupné také z
http://vct.tul.cz/prac_fyz_vl4.php, citováno [25. 6. 2011]
- [16] Lenzing instruments [online], Dostupné z
www.lenzing-instruments.com/file_download/63/VP400.pdf,
citováno [25. 6. 2011]
- [17] Lawson-Hemphill [online], Dostupné také z
<http://www.lawsonhemphill.com/LH-551-dynamic-modulus-testers.html>
citováno [20. 4. 2012]
- [18] KŘEMENÁKOVÁ, D.: Interní norma 46-108-01/01 *Doporučený postup tvorby příčných řezů. Měkké a tvrdé řezy*. Liberec, 2002.
- [19] DMT Systém - *User manual*, Version 1.1, Lawson-Hemphill, smart quality control
- [20] KOŠÁTKOVÁ, M., KŘEMENÁKOVÁ, D. MILITKÝ, J.: *Tepelná sráživost délkových textilií*. Interní norma, Výzkumné centrum Textil, Technická univerzita v Liberci, Liberec, 2009.
- [21] PILLER, B., LEVINSKÝ, O.: *Malá encyklopedie textilních materiálů*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1982.
- [22] MILITKÝ, J., VANÍČEK, J., KRYŠTŮFEK, J., HARTYCH, V.:
Modifikovaná polyesterová vlákna. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984, 150 s.

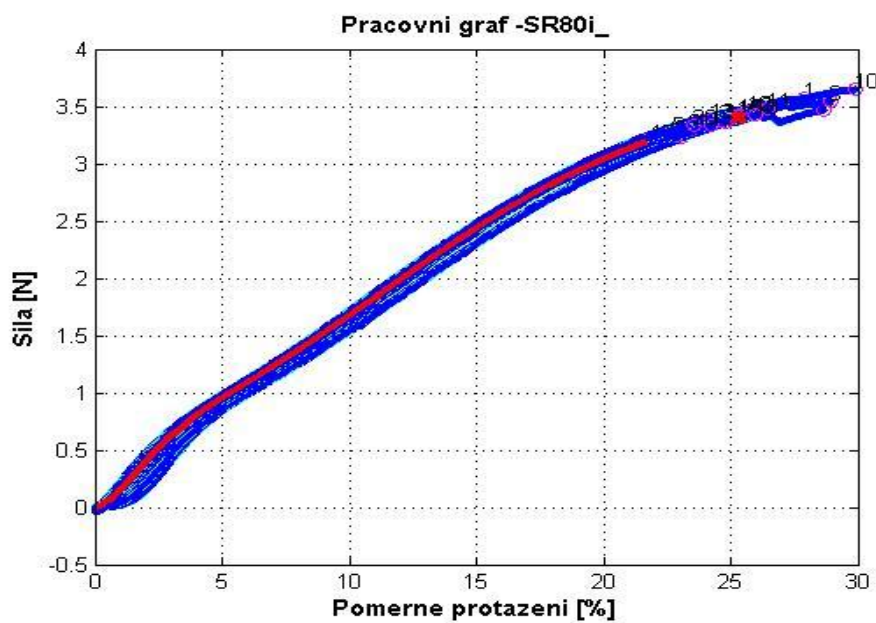
- [23] PAJGRT, O., REICHSTÄDTER, B.: *Processing of polyester fibres*.
Published in co-edition with SNTL – Publishers of Technical Literature,
Prague, 1979.
- [24] MILITKÝ, J.: Přednášky k předmětu *Textilní zkušebnictví*. Liberec:
Technická univerzita. [online] Dostupné z
http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20110511/zkt5_11.pdf, citováno
[20. 4. 2012]
- [25] KUČERÍK, J.: *Termická analýza – Diferenční kompenzační kalorimetrie*
(DSC). Brno: Vysoké učení technické. [online] Dostupné také z
<http://www.chempoint.cz/kucerik-2>, citováno [20. 4. 2012]
- [26] MARTINOVÁ, L.: *Průvodce studiem netkaných textilií*. Liberec: Technická
univerzita, 2003.
- [27] KOHOUT, V.: *Základní statistické pojmy*. Plzeň: Západočeská univerzita.
- [28] KŘEMENÁKOVÁ, D., MILITKÝ J., PIVOŇKOVÁ D.: *Fiber orientation in*
polypropylene staple yarn based on the acoustic and initial modulus. Proc. 17
th International Conference Strutex, November 2010.

5. PŘÍLOHY

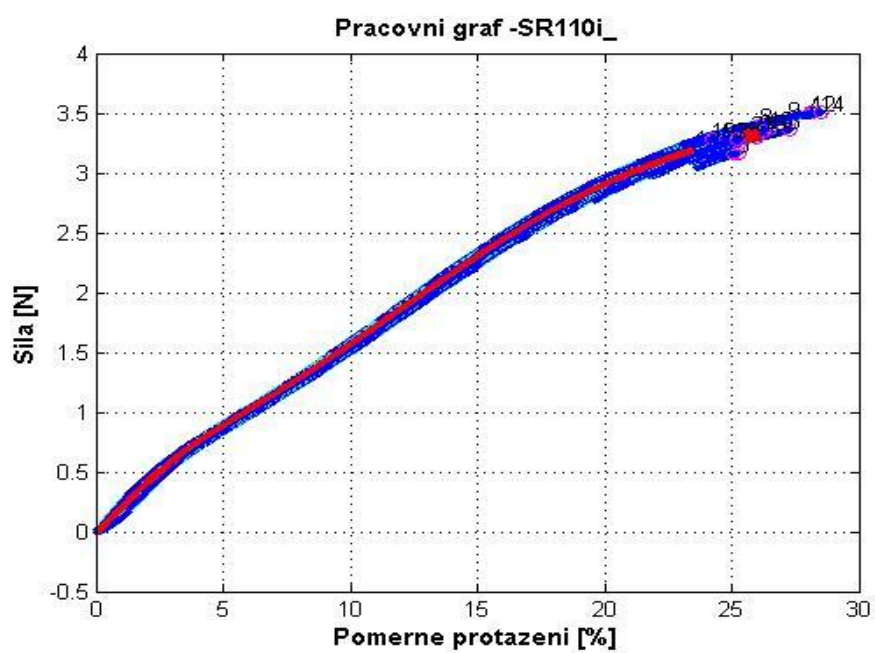
5.1 PŘÍLOHA 1: GRAFY A HODNOTY Z MĚŘENÍ NA INSTRONU 4411



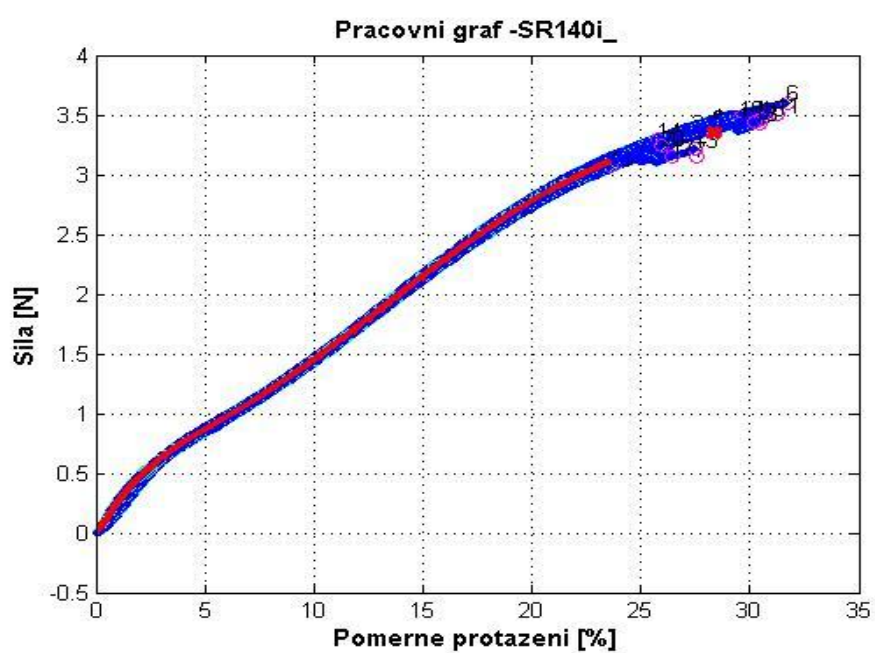
Obrázek 1 Tahová křivka pro nezahřátý multifil



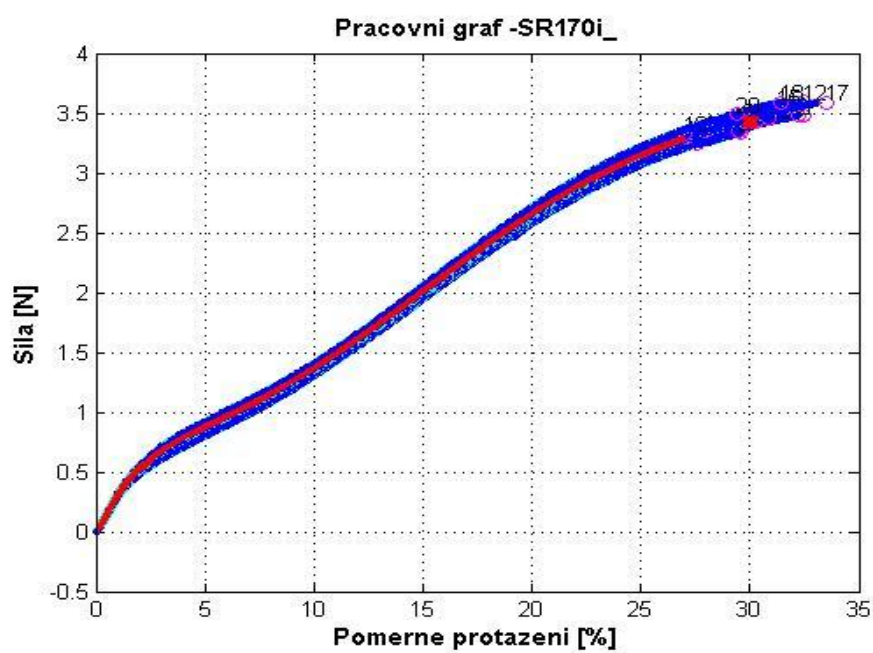
Obrázek 2 Tahová křivka pro multifil tepelně namáhaný při 80°C



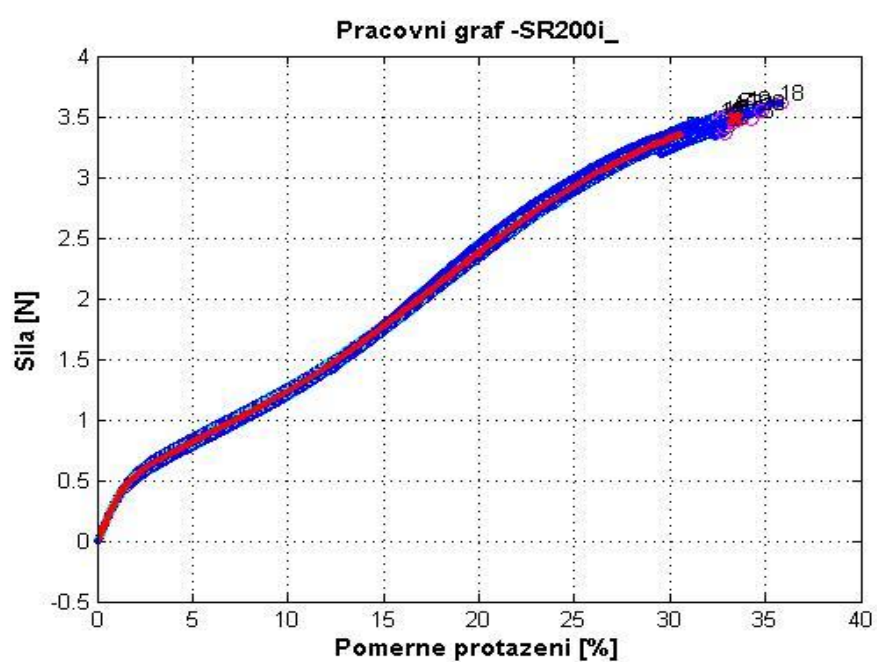
Obrázek 3 Tahová křivka pro multifil tepelně namáhaný při 110°C



Obrázek 4 Tahová křivka pro multifil tepelně namáhaný při 140°C



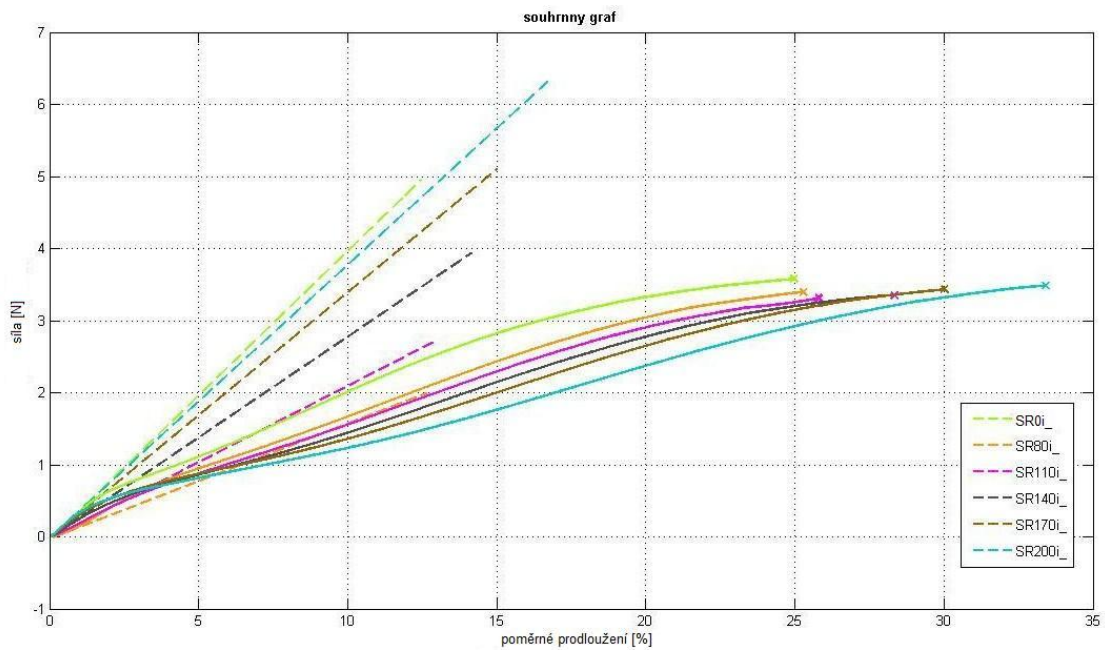
Obrázek 5 Tahová křivka pro multifil tepelně namáhaný při 170°C



Obrázek 6 Tahová křivka pro multifil tepelně namáhaný při 200°C

Tab. I Hodnoty počátečního modulu na 0,5% a 1% prodloužení

Teplota [°C]	Modul na 0,5% prodloužení [N/%]	Modul na 1% prodloužení [N/%]
0	0,3719	0,4027
80	0,1597	0,2094
110	0,2117	0,2195
140	0,2797	0,2416
170	0,3412	0,2904
200	0,3788	0,2862



Obrázek 7 Počáteční modul na 0,5% prodloužení

5.2 PŘÍLOHA 2: HODNOTY Z MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO MODULU A RYCHLOSTI ZVUKU

Tab. II Lineární regrese v závislosti na teplotě

n	80°C	110°C	140°C	170°C	200°C
1	8,936363636	8,6	6,245454545	5,127272727	4,2
2	8,818181818	8,94545455	6,481818182	4,981818182	4,172727273
3	24,39090909	8,793636364	6,336363636	4,954545455	4,281818182
4	12,31818182	9,58181818	6,509090909	8,209090909	4,127272727
5	12,30909091	8,64827273	6,581818182	5,109090909	4,172727273
6	13,31818182	9,65454545	6,772727273	5,154545455	4,327272727
7	10,9	9,290909091	6,5	4,927272727	4,072727273
8	15,60909091	8,93636364	6,309090909	5,3	4,318181818
9	11,99090909	7,74545455	5,972727273	5,036363636	4,245454545
10	14,14545455	9,247565545	6,345454545	4,945454545	4,4

Rychlost zvuku [km/sec]	80°C	110°C	140°C	170°C	200°C
Střední hodnota:	12,52	8,95	6,41	5,05	4,25
Spodní mez (5%):	10,83	8,75	6,31	4,95	4,17
Horní mez (95%):	14,22	9,14	6,51	4,17	4,32

Tab. III Výpočet akustického dynamického modulu

Akustický dynamický modul [MPa]	pro polyester je $\rho=1390\text{kg/m}^3$				
	80°C	110°C	140°C	170°C	200°C
$\rho * C^2$					
Střední hodnota:	217978	111229,41	57096,2603	35512,317	25053,2
Spodní mez (5%):	162891,7	106538,67	55247,7818	34057,724	24163,41
Horní mez (95%):	281073,6	116021,2	58975,1553	36997,327	25959,08