

## **Vliv zákrutu na mechanicko - fyzikální vlastnosti multifilu**

### **Twist influence on the mechanical and physical properties of the multifilament**

#### **Bakalářská práce**

*Studijní program:* B3107 – Textil

*Studijní obor:* 3106R016 – Textilní technologie, materiály a nanomateriály

*Autor práce:* **David Kajanovič**

*Vedoucí práce:* Ing. Eva Moučková, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David Kajanovič**

Osobní číslo: **T13000319**

Studijní program: **B3107 Textil**

Studijní obor: **Textilní technologie, materiály a nanomateriály**

Název tématu: **Vliv zákrutu na mechanicko - fyzikální vlastnosti multifilu**

Zadávající katedra: **Katedra textilních technologií**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte vliv zákrutu na mechanicko-fyzikální vlastnosti multifilů. Zaměřte se rovněž na šroubicový model příze.
2. Proveďte experimentální měření mechanicko-fyzikálních vlastností multifilů s různým počtem zákrutů.
3. Pomocí obrazové analýzy se pokuste stanovit úhel sklonu vláken v zakrouceném multifilu.
4. Získaná data statisticky zpracujte a zhodnoťte vliv počtu zákrutů na jeho mechanicko - fyzikální vlastnosti a úhel sklonu vláken.





Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] MORTON. W. E., HEARLE, J.W.S.: Physical Properties of Textile Fibres. Fourth edition. Cambridge: Woodhead Publishing. 2008. ISBN 1 870812 41 7.
- [2] NECKÁŘ. B: Příze - tvorba, struktura, vlastnosti. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-03-00213-3.
- [3] ČSN EN ISO 2061. Textilie - Zjišťování zákrutů nití - Metoda přímého počítání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, únor 2011.
- [4] ČSN EN ISO 2062. Textilie - Nitě na návinech - Zjišťování pevnosti a tažnosti jednotlivých nití při přetrhu pomocí přístroje s konstantní rychlostí prodloužení (CRE). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, červenec 2010.

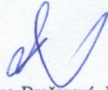
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Eva Moučková, Ph.D.**  
Katedra textilních technologií

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Iva Mertová**  
Katedra textilních technologií

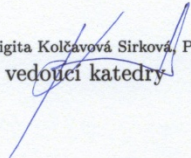
Ostatní konzultanti: **Ing. Monika Vyšanská, Ph.D.**  
Katedra textilních technologií

Datum zadání bakalářské práce: **19. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2016**

  
Ing. Jana Drašarová, Ph.D.  
děkanka



  
Ing. Brigita Kolčárová Sirková, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 10. listopadu 2015



## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou 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.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 12.5.2016

Podpis: *Dajinović*

## Poděkování

Poděkování bych směřoval celé katedře textilních technologií. Především laborantce paní Ing. Řezníčkové za rady ohledně veškerých přístrojů v laboratoři. Dále bych chtěl poděkovat paní Ing. Mertové a Bc. Ing. Vyšanské Ph.D. za pomoc při vyhledávání řešení ohledně měření na přístrojích. A především bych chtěl poděkovat mé vedoucí práce paní Ing. Moučkové Ph.D. za neskutečnou trpělivost a za cenné rady pro vypracování bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Tato práce je zaměřena na ověřování vlastností multifilamentu v závislosti na zákrutu. U multifilamentu se vlivem zákrutu mění velké množství vlastností, které jsou popsány v rešeršní části. V experimentální části jsou tato tvrzení ověřena.

V rešeršní části jsou definovány textilní pojmy, s kterými se setkáváme v této práci (multifilament, jemnost, zákrut, seskání, tahové křivky). Také jsou zde definovány nejdůležitější testované vlastnosti, jako jsou poměrná pevnost a tažnost. Dále se zde můžeme setkat s popisem vlastností použitých textilních vláken. Určitě v této části najdeme jednoduché modely související se zákrutem a úhlem sklonu fibril např. šroubovicový model. Pak jsou zde popsány metodiky měření jednotlivých vlastností. Finální část je zaměřena na chování multifilamentu při zakrucování a změnu nejdůležitějších vlastností vlivem zvyšování zákrutu.

V experimentální části jsou testovány vlastnosti v závislosti na zákrutu, které jsou popisovány v teoretické části. Nejdůležitějšími zjištěnými vlastnostmi ovlivněné počtem zákrutů multifilamentu jsou jemnost, poměrná pevnost, tažnost, sklon povrchových vláken a uspořádání fibril v příčném řezu. Měření těchto vlastností je statisticky vyhodnoceno a porovnáno s předpoklady. Při neshodě s předpoklady jsou zmíněny možné příčiny, které způsobovaly tyto nesrovnalosti.

## **Abstract**

This work is focused on verification of properties of multifilament according to the twist. With the influence of twist, a great number of multifilament properties change. The properties are described in research part of the thesis. In the experimental part, the statements are verified.

The textile terms we encounter in the thesis (multifilament, softness, twist, twist take-up, tensile curve) are defined in the research part. Also, there are defined the most important test qualities such as relative strength and ductility. Furthermore, we can find in this section the description of properties of textile fibers. In this section,

we can find simple models relating to twist and angle of fibrils eg. helical model. Methods of measuring each property are described in this part. The final section is focused on the behavior of twisting of the multifilament and a change of major properties due to increasing twist.

In the experimental part, properties depending on the twist, are tested. The most important properties affected by the number of twists of the multifilament are softness, relative strength, ductility, slope surface fibers and fibril arrangement in cross section. Measurement of these characteristics is statistically evaluated and compared with expectations. In disagreements with the expectations, possible causes of errors are mentioned.

## **Klíčová slova**

Multifilament, zákrut , pevnost, tažnost, sklon povrchových fibril, příčné řezy

## **Key words**

Multifilament, twist, strength, ductility, slope surface fibrils, cross sections

## Obsah

Úvod .....	11
Rešeršní část .....	13
Definice multifilamentu .....	13
Vlastnosti PES .....	13
Vlastnosti POP .....	15
Jemnost .....	16
Zákrut .....	18
Měření zákrutu .....	18
Seskání .....	20
Šroubovicový model .....	20
Koechlinova hypotéza .....	21
Maximální zákrut .....	22
Vliv zákrutu multifilamentu na jeho vlastnosti .....	23
Pevnost .....	24
Tažnost .....	25
Měření pevnosti a tažnosti .....	26
Tahové křivky .....	27
Vliv zákrutu na pevnost a tažnost multifilamentu .....	29
Prodloužení vlákna .....	30
Přetrh multifilamentu .....	31
Vztahy použité pro statistické zpracování dat .....	34
Experimentální část .....	36
Materiál .....	37
Ověřování jemnosti .....	38
Pevnost a tažnost multifilamentu .....	43
Zjišťování úhlu sklonu povrchových vláken .....	49
Uspořádání fibril v příčném řezu .....	52
Závěr .....	55
Zdroje .....	57



## Seznam použitých symbolů a zkratek

D [mm].....	Průměr DVÚ
DVÚ.....	Délkový vláknenný útvar
F [N].....	Pevnost
l [km].....	Délka
l <sub>j</sub> [m].....	Délka jednoduchého DVÚ
l <sub>s</sub> [m].....	Délka DVÚ po seskání
m [g].....	Hmotnost
N [ot.s <sup>-1</sup> ].....	Otáčky krutného orgánu
PA.....	Polyamid
PES.....	Polyester
POP.....	Polypropylén
S [mm <sup>2</sup> ].....	Substanční průřez DVÚ
t.....	Tabulky studentova rozdělení
T [tex].....	Jemnost
T <sub>s</sub> [tex].....	Jemnost DVÚ po seskání
v [m.s <sup>-1</sup> ].....	Odváděcí rychlost
V [m <sup>3</sup> ].....	Objem vláken
V <sub>c</sub> [m <sup>3</sup> ].....	Celkový objem DVÚ
Z [m <sup>-1</sup> ].....	Zákrut na metr
α [m <sup>-1</sup> .ktex <sup>1/2</sup> ].....	Koechlinův zákrutový koeficient
1-α .....	Koeficient spolehlivosti
β,β <sub>D</sub> [°].....	Úhel sklonu vláken
δ[%].....	Seskání

$\varepsilon$ [%].....	Tažnost
$\varepsilon_a$ [%]..... svazku	Poměrné prodloužení
$\varepsilon_l$ [%]..... vlákna	Poměrné prodloužení
$\mu$ [-].....	Zaplnění
$\pi$ [-].....	Ludolfovo číslo
$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ].....	Měrná hmotnost
$\sigma$ [N.m <sup>-2</sup> ].....	Napětí

## Úvod

Multifilament se odlišuje od přízí v mnoha ohledech. První odlišností je materiál, pro příze se jedná o materiál z vláken staplové délky, zatímco pro multifilament nemůže být použit materiál přírodní, jelikož se multifilament skládá z fibril (vlákna nekonečné délky). Úplně odlišný je také průběh výroby, v případě přízí se jedná o operace (rozvolňování, mísení, mykání, protahování, předpřádání, dopřádání atd.). U multiflamentů se nesetkáme s žádnou shodnou operací při výrobě, jelikož syntetický materiál je nejprve zvlákňován, a poté se jednotlivé fibrily ve většině případů pouze druzí popř. proviřují. Co se týče vlastností v závislosti na zákrutu, tak už z hledisek výroby a materiálu se budou v určitých směrech výrazně odlišovat. Poměrná pevnost a tažnost v závislosti na zákrutu jsou jedny z nejodlišnějších vlastností, které tyto dva délkové vláknenné útvary mají. U příze se při zvyšování zákrutu zvyšuje také pevnost až do kritického zákrutu, zatímco u multiflamentů je pevnost bez zákrutu skoro nejvyšší, jelikož se jedná o vlákna nekonečné délky ležících rovnoběžně vedle sebe. U multiflamentů můžeme očekávat výrazně menší variabilitu při měření pevnosti, jelikož je stejnoměrnější a tím pádem je menší pravděpodobnost výskytu slabého místa než u příze. Tažnost můžeme v závislosti na zákrutu u multiflamentu očekávat s mnohem větším navýšením než u přízí. Multifilament nemá zpravidla žádnou chlupatost, jelikož materiál nemá žádná odstávající vlákna, zatímco u příze je dána chlupatost použitou technologií, jemností příze, typem vláken, variabilitou délky vláken. U některých vlastností je naopak trend podobný např. s rostoucím zákrutem se zvyšuje hodnota jemnosti a s rostoucím zákrutem se zvyšuje úhel sklonu povrchových fibril k ose multiflamentu. Ovšem i tyto vlastnosti se mohou u těchto DVÚ výrazně odlišovat, což může být zapříčiněno použitým materiálem, použitou technologií při výrobě příze atp.

Cílem této práce je tedy ověřit vliv počtu zákrutů na výsledné mechanicko-fyzikální vlastnosti multiflamentu. Jedním z cílů je ověření vlivu počtu zákrutů multiflamentu na jeho výslednou jemnost. Dále se práce zaměřuje na ověření poměrné pevnosti a tažnosti multiflamentu v závislosti na zákrutu. Úhel sklonu povrchových fibril v závislosti na zákrutu je jedním z dalších ověřovaných parametrů.

Na závěr je zjištěno jaký vliv má počet zákrutů na výsledný tvar multifilamentu a uspořádání fibril v multifilamentu v příčném řezu.



## Rešeršní část

### Definice multifilamentu

Jedná se o délkový vláknový útvar, který lze definovat jako svazek jednotlivých vláken nekonečně délky (fibril) ležících paralelně vedle sebe viz. obr. 1. Soudržnost těchto monofilů je zajištěna nejčastěji provířením popřípadě ochranným zákrutem. Ve většině případů se jedná o vlákna syntetická, která jsou vyráběna vytlačováním roztaveného polymeru skrz zvláknovací trysky a následném dlužení v dlužících šachtách [1].

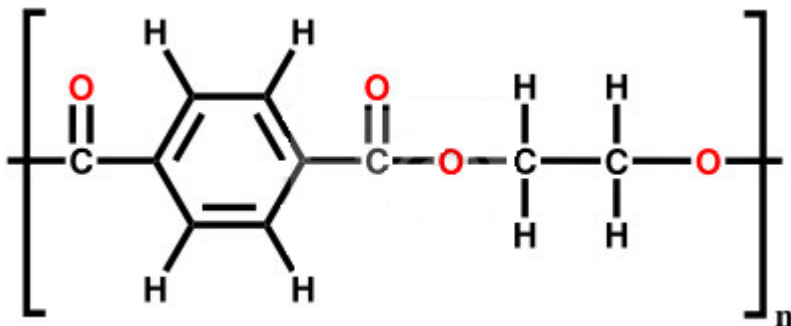


continuous monofilament yarn - monofil, continuous multifilament yarn- multiflament,  
spinneret- zvláknovací trysky, polymer- polymer

Obr. 1. Postup výroby multifilament a monofilament dle [1]

### Vlastnosti PES

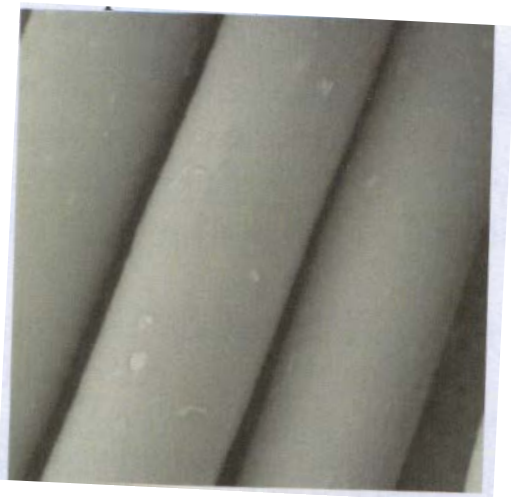
Polyesterová vlákna se vyrábějí z taveniny, která je protlačována zvláknovacími tryskami a následně dlužena v dlužící šachtě. Hlavním procesem výroby taveniny je polykondenzace dvou základních komponent, kterými jsou kyselina tereftalová a etylénglykol. Měrná hmotnost PES vláken je  $1335 \text{ kg/m}^3$  [2]. Strukturální vzorec polyesteru můžeme vidět na obrázku 2.



Obr.2. Strukturální vzorec polyesteru dle [3]

Teplota měknutí PES vláken je 230°C. Tepelná vodivost je nízká. K tání PES vláken dochází při teplotě okolo 258°C. Pevnost PES vláken se nemění do teploty 120-130°C. Vlivem tepla a vlhka dochází k částečné hydrolýze. Vlákna při vystavení UV záření degradují. Mechanické vlastnosti PES vláken jsou velmi dobré. Pevnost dosahuje hodnot 3.8-7.2 cN/tex a tažnost 50-70%. Vlákna mají velmi dobré zotavovací vlastnosti. Poměrně dobrá odolnost vůči zředěným kyselinám. Při vystavení alkáliím dochází k hydrolýze. Velice nízká navlhavost pouze 0.3-0.4% [2].

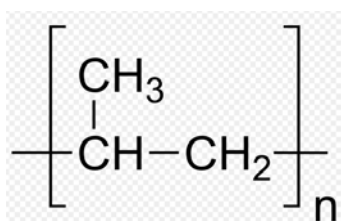
Polyesterová vlákna mají hladký povrch s drobnými částicemi oligomerů na povrchu viz. obr. 3.



Obr. 3. Podélný pohled PES vláken dle [2]

## Vlastnosti POP

Polypropylenová vlákna se produkují protlačováním taveniny skrz zvlákňovací trysky do dlouhíci šachty. Tavenina se vytváří roztavením granulátu, který je vyroben polymerací propylénu. Měrná hmotnost polypropylénu je 910 kg/m<sup>3</sup> a patří mezi nejnižší ze všech textilních vláken [2]. Na obrázku 4 je znázorněn strukturální vzorec polypropylénu.



Obr. 4. Strukturální vzorec polypropylénu dle [4]

Teplota měknutí POP vláken je velmi nízká 149-154°C a následná teplota tání 165-170°C. Elektroizolační vlastnosti POP vláken jsou dobré. V horké vodě dochází ke srážení 0-5%. Rozsah možné tažnosti může být velký 15-60%. Pevnost POP vláken je nízká 1.5-6 cN/tex u vysoce pevných až 10 cN/tex. Velice málo odolné proti vlivům světla, ale naopak výborná odolnost proti chemikáliím kromě koncentrované HNO<sub>3</sub> a horkým koncentrovaným alkáliím [2].

POP vlákna mají voskový omak a vysoký koeficient tření 0.24. Příčný a podélný pohled můžeme vidět na obrázku 5.



Obr. 5. Podélný a příčný pohled POP vláken dle [2]

### Jemnost

Pro vyjádření jemnosti neboli délkové hmotnosti je zavedena soustava tex. Využívá se u délkových útvarů v textilním průmyslu např. přízí, multifilamentů, pramenů atp. Nejpoužívanější jednotkou je tex [5].

$$1 \text{ tex} = \frac{1g}{1km} \quad (1)$$

Vztah pro jemnost v jednotkách tex je tedy:

$$T = \frac{m}{l} * 1000 \quad (2)$$

m ... hmotnost [g]

l ... délka [m]

Jelikož se jedná o celou soustavu, tak má jednotka tex i své násobky a podíly: 1kilotex [ktex], 1 decitex [dtex], 1 militex [mtex] atd [5].

Soustava tex není jediná známá soustava pro vyjádření jemnosti. Dále se můžeme také setkat s číslem metrickým, titr denierem, Micronaire (pro bavlnu) aj.[5].

Jemnost lze také vyjádřit pomocí substančního průřezu a hustoty vláken. Substanční průřez DVÚ  $S$  je součet všech řezných ploch jednotlivých vláken v příčném průřezu viz. obr. 6. [6].

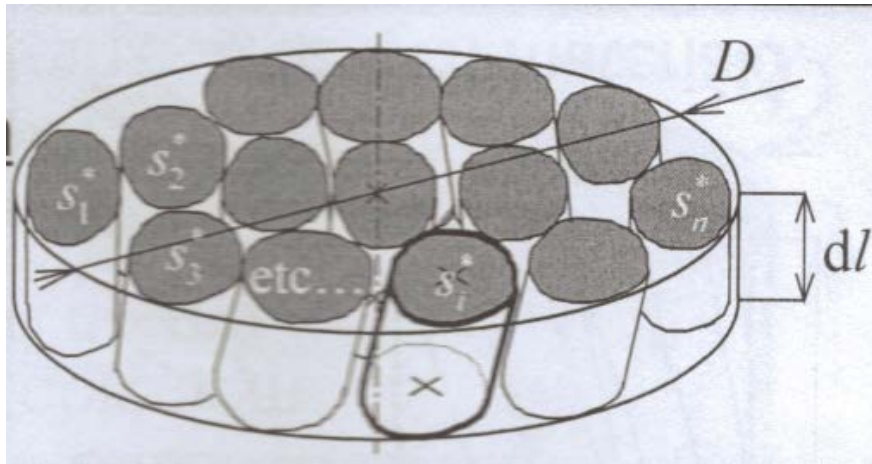
$$T = S * \rho \quad (3)$$

T ... jemnost [tex]

S ... substanční průřez DVÚ [mm<sup>2</sup>]

$\rho$  ... hustota [kg/m<sup>3</sup>]





Obr. 6. Schéma průřezu DVÚ dle [6]

Pro odvození jemnosti lze také ještě uplatnit zaplnění délkového vlákenného útvaru. Zaplnění je obecně vyjádřeno vzorcem jako poměr mezi objemem vláken v DVÚ ku celkovému objemu DVÚ [6].

$$\mu = V/V_c \quad (4)$$

$\mu$  ... zaplnění [-]

$V$  ... objem vláken [ $m^3$ ]

$V_c$  ... celkový objem DVÚ [ $m^3$ ]

Objem vláken  $V$  můžeme již z předchozího vztahu vyjádřit  $V = Tl/\rho$ . Celkový objem  $V_c$  lze je určen vzorcem  $(\pi D^2 l)/4$  viz. obr. 7. Po nahrazení a upravení rovnice vzniká výraz vyjadřující jemnost [6].

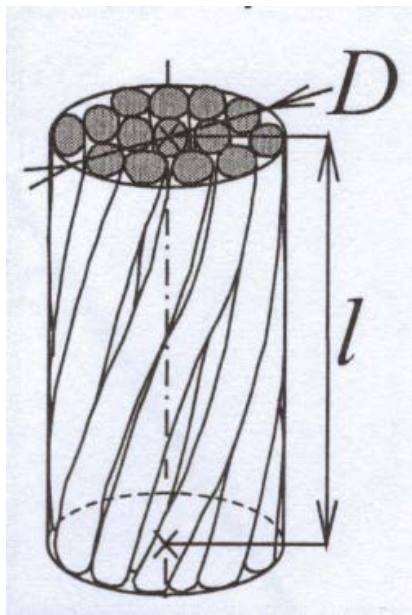
$$T = \frac{\mu * \pi * D^2 * \rho}{4} \quad (5)$$

$T$  ... jemnost [tex]

$\mu$  ... zaplnění [-]

$D$  ... průměr DVÚ [mm]

$\rho$  ... hustota [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]



Obr. 7. Schéma podélného pohledu DVÚ dle [6]

### Zákrut

Jedná se o veličinu, která patří do monotónně kroucených přízí. Do vláknenného útvaru (příze, multifilament) se vkládají otáčky  $N$  krutného ústrojí, kterými jsou rotor nebo vřeteno (u multifilamentu pouze vřeteno), za jednotku času. Zároveň je příze odtahována rychlostí  $v$  [7]. "Zákrut  $Z$  je počet otáček vložených do jednotkové délky." [7, str. 39.]

$$Z = N/v \quad (6)$$

$Z$  ... zákrut [ $\text{m}^{-1}$ ]

$N$  ... otáčky krutného orgánu [ot/s]

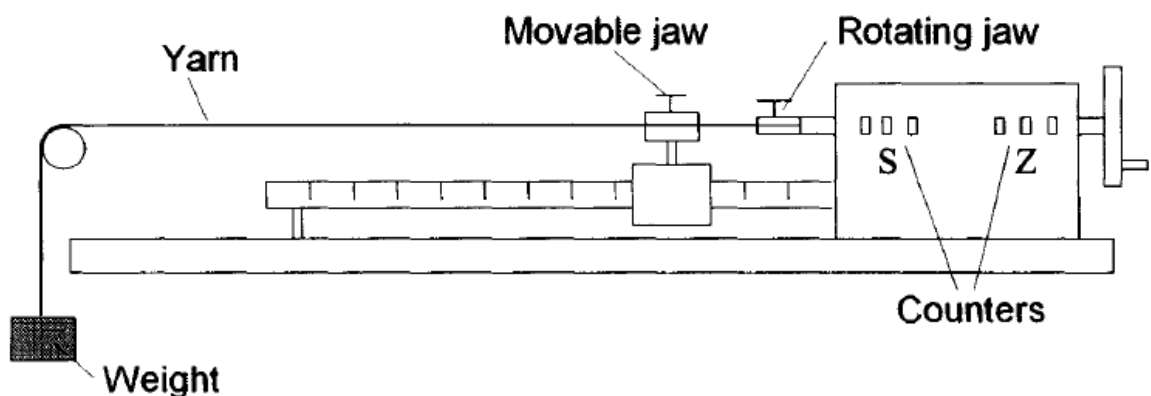
$v$  ... odváděcí rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

### Měření zákrutu

Pro měření zákrutu používáme přístroj zákrutoměr viz. obr.8. Tento přístroj má dvě čelisti jednu pohyblivou a druhou rotační. Dalším prvkem tohoto přístroje je

počítadlo, který počítá počet otáček rotační čelisti. Posledním doplňkem zákrutoměru je závaží o hmotnosti, kterou zjistíme z předpětí [8] .

Ověřování zákrutu je prováděno podle normy [15]. Prvním krokem při měření zákrutu je zjištění zda se jedná o zákrut levý (S) nebo pravý (Z). Směr zákrutu se dá zjistit jednoduchým způsobem na zákrutoměru přidáváním zákrutu S nebo Z a následným zkracování či prodlužování vlákenného útvaru. Zda-li se vlákenný útvar zkracuje jedná se o zákrut shodný se zákrutem nastaveným, a když se prodlužuje jedná se o zákrut opačný, než který je nastavený. Dalším krokem je nastavení předpětí na zákrutoměru [8]. Velikost předpětí se vztahuje k jemnosti daného materiálu 0,5 cN/tex podle normy [9]. Následně by měla být nastavena vzdálenost mezi čelistmi na 0,5m. Do čelistí se upevní materiál. Posledním krokem je spuštění zákrutoměru ve směru proti zákrutu, který je na délkovém vlákenném útvaru, materiál se začne rozkrucovat a ve chvíli, kdy jsou příze(multifilamenty) rovnoběžně vedle sebe přestaneme rozkrucovat. Na ukazateli vidíme hodnotu počtu zákrutů na 0,5m, jako je upínací délka. Tuto hodnotu je potřeba vynásobit dvěma, aby jsme dostali finální počet zákrutů na jeden metr [8].



weight - závaží, yarn - příze, moveble jaw - pohyblivá čelist, rotating jaw - rotační čelist,  
counters - počítadla

Obr. 8. Schéma zákrutoměru dle [8]

Počet testů staplové příze by měl být minimálně 50 měření a u multifilamentů by neměl být pod hranicí 20 měření [8].

### Seskání

Seskání je definováno jako zkrácení délkového vlákenného útvaru vlivem zákrutu. Tento parametr ovlivňuje jemnost délkového vlákenného útvaru. Seskání se dá použít pro skané příze, ale také pro jednoduché délkové vlákenné útvary (jednoduché příze, multifilamenty, monofilamenty). Čili seskání je definováno tímto vzorcem [10].

$$\delta = \frac{(l-l_s)}{l_j} * 100 \quad (7)$$

$\delta$  ... seskání [%]

$l_j$  ... délka jednoduchého DVÚ [m]

$l_s$  ... délka DVÚ po seskání [m]

Jak již bylo uvedeno výše seskání ovlivňuje jemnost délkového vlákenného útvaru. Vzorec pro vyjádření jemnosti jednoduchého DVÚ ze seskání vypadá tedy takto [10].

$$T_s = T * \frac{100}{(100-\delta)} \quad (8)$$

$T_s$  ... jemnost DVÚ po seskání [tex]

$T$  ... jemnost DVÚ bez zákrutu [tex]

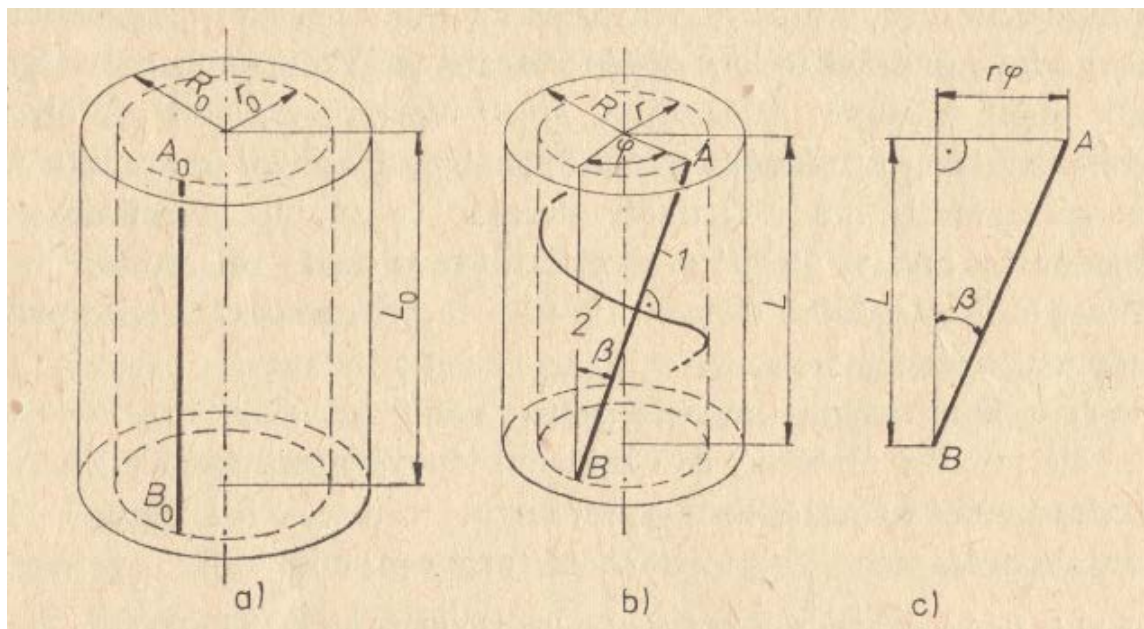
$\delta$  ... seskání [%]

### Šroubovicový model

Jedná se o nejjednodušší model zakrucování spojitého válcového tělesa. Na obrázku 9a) vidíme nezakroucené stav jednoho vlákna ve vlákenném útvaru, který vyjadřuje úsečka  $A_0, B_0$ . Vlákenný útvar má svůj poloměr  $R_0$  a zkratkou  $r_0$  je vyjádřena vzdálenost úsečky  $A_0, B_0$  od středu válcového tělesa. Vzdálenost  $L_0$  je výška válcového tělesa. Při zakroucení tohoto válcového modelu viz. obr. 9b) dochází k vytvoření šroubovice A,B na nový menší poloměr  $r$  a poloměr celého válcového tělesa se také mění v důsledku stlačování na poloměr  $R$ . Díky seskání se zkrátí také vzdálenost  $L_0$  na  $L$



neboli výška jednoho ovinu. Z toho vyplývá, že jeden zákrut je  $1/L$ . Úhlem  $\varphi$  je vyjádřeno pootočení průřezů, které jsou vzdáleny o délku  $L$ . Na obrázku 9c) je znázorněn trojúhelník, který je rozvinut z válcového tělesa. Úhlem  $\beta$  je vyjádřen zkos úsečky A,B k ose válcového tělesa [7].



Obr. 9. Schéma šroubovicového modelu dle [7]

### Koechlinova hypotéza

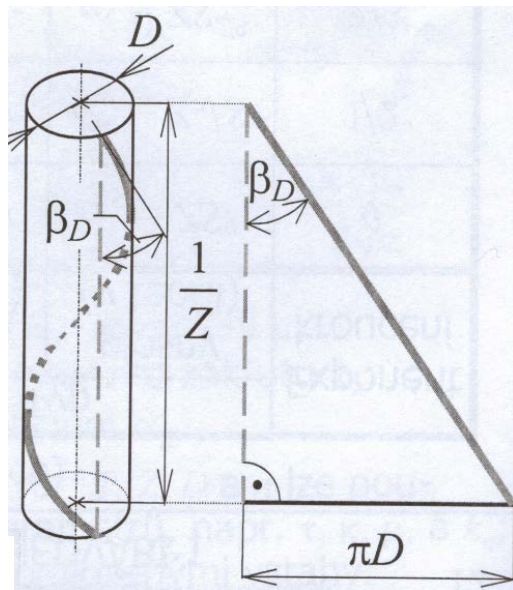
Jedná se o vztah mezi zákrutem, jemností a průměrem příze. Dle Koechlinovi hypotézy platí:  $\text{tg}\beta_D = \pi dZ$  viz. obr. 10. Tedy úhel sklonu vláken je přímo úměrný velikosti průměru příze a počtu zákrutů [6].

$$\alpha = \frac{Z\sqrt{T}}{31,623} \quad (9)$$

$\alpha$ ...Koechlinův zákrutový koeficient [ $\text{m}^{-1} \cdot \text{ktex}^{1/2}$ ]

Z...zákrut [ $\text{m}^{-1}$ ]

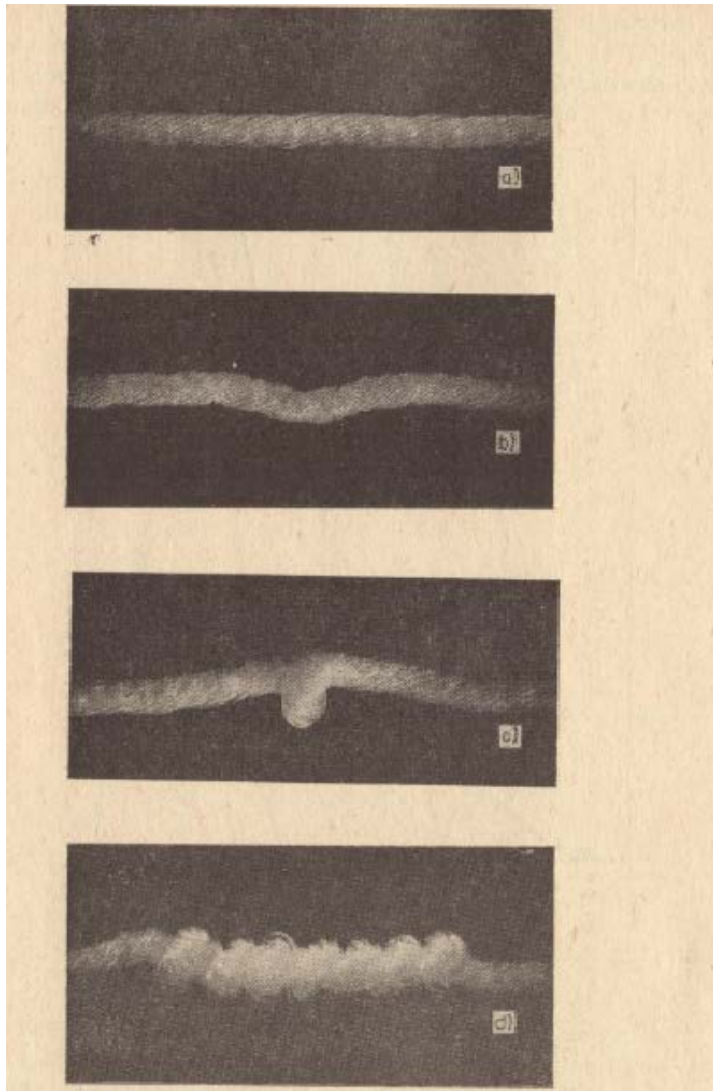
T...jemnost [tex]



Obr. 10. Schéma trojúhelníku vzniklého ze zakrouceného DVÚ dle [6]

#### Maximální zákrut

Svazek vláken nelze zakrucovat až k maximální teoretické hodnotě, jelikož se začne vyskytovat zákrut druhého řádu. Charakter tohoto zákrutu je znázorněn na obr. 11. Pravděpodobným důvodem vzniku zákrutu druhého řádu je vzpěrné namáhání vnitřních vrstev vlákna z větších poloměrů. Vznik zákrutu druhého řádu je ovlivněn zejména nastavením předpětí při zakrucování [7].



Obr. 11. Vznik zákrutu druhého řádu dle [7]

### Vliv zákrutu multiflamentu na jeho vlastnosti

Zákrut multiflamentu ovlivňuje především jeho pevnost a tažnost [11], což je popsáno níže. Další vlastností, která je ovlivňována zákrutem je seskání. S rostoucím úhlem sklonu vláken roste také seskání. Seskání multiflamentu v závislosti na úhlu sklonu vláken je vyjádřeno ze vzorce dle Brashlera [12].

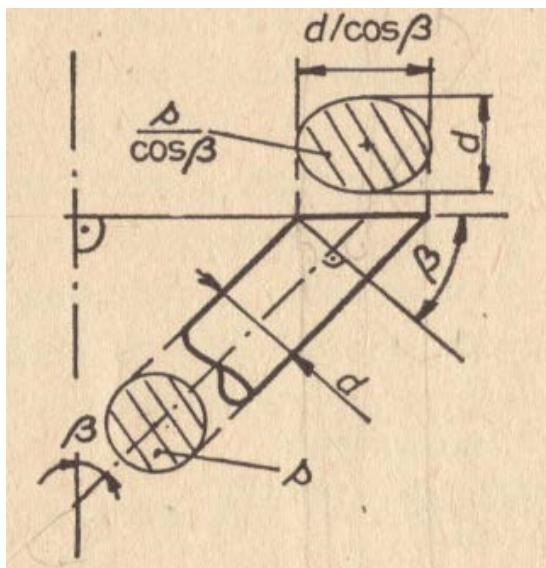
$$\delta = \frac{tg^2 \beta_D}{2} \quad (10)$$

$\delta$  ...seskání[%]

$\beta_D$  ...úhel sklonu vláken [°]

V neposlední řadě zákrut multifilamentu ovlivňuje jeho zaplnění. S rostoucím zákrutem se zvyšuje zaplnění, jelikož zákrutem dochází ke snižování průměru délkového vláknenného útvaru stlačováním [11].

Při zvyšování zákrutů se zvyšuje úhel  $\beta$  sklonu k ose multifilamentu tím pádem se mění velikost obsahu  $s$  na  $s/\cos\beta$ , jak můžeme vidět na obrázku 17 [7].

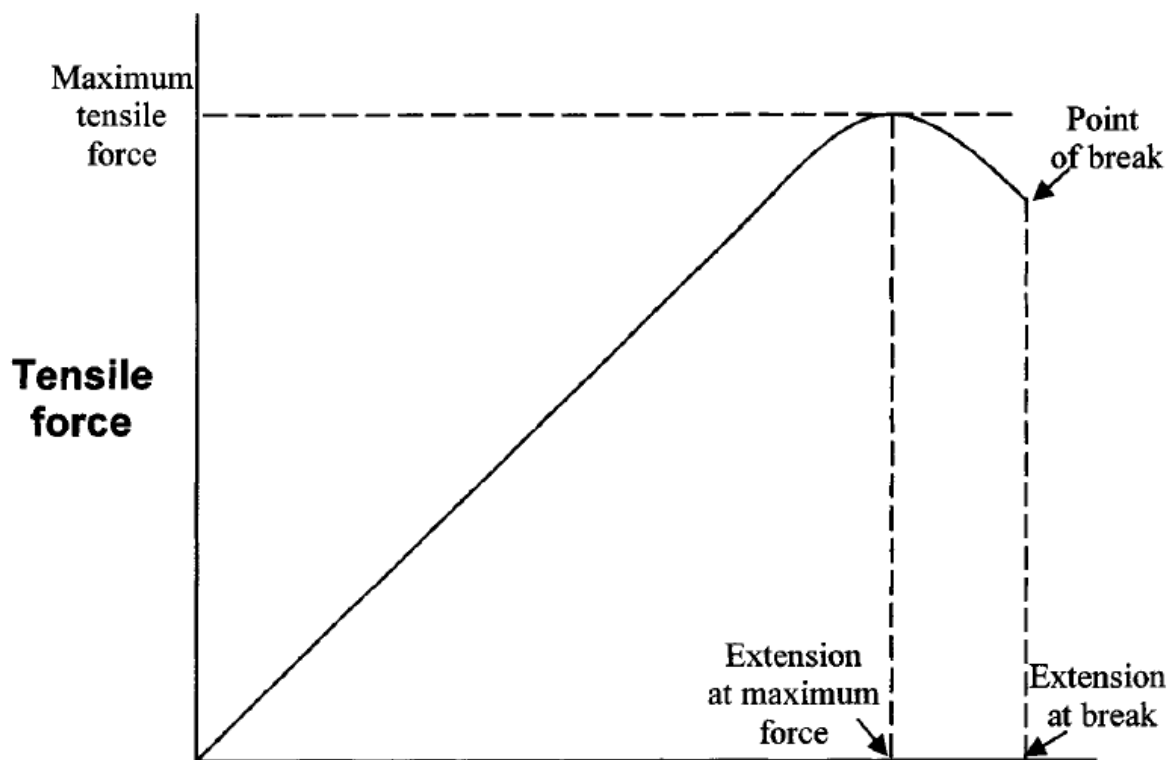


Obr. 17. Schéma změny obsahu vlákna v příčném řezu v zakrouceném DVÚ dle [7]

## Pevnost

Pevnost většinou vyjadřuje velikost síly v době přetrhu, neboli maximální síla při maximálním prodloužení. Může také nastat případ, kdy materiál dosáhne své maximální síly, a poté klesá až k přetrhu. V tomto případě je síla v moment přetrhu menší než maximální síla, což je znázorněno na obrázku 12. Jednotkou pevnosti je N. Pokud tuto sílu vztáhneme k ploše, dostáváme napětí, které má jednotky  $N \cdot m^{-2}$  [8].

Častěji používaným parametrem v textilním průmyslu je poměrná pevnost. Jedná se o pevnost podělenou jemností materiálu. Jednotkou této veličiny je  $N.tex^{-1}$  [8].



tensile force - síla, maximum tensile force - maximální síla, point of break - přetrh, extension at maximum force - protažení při maximální síle, extension at break - protažení při přetrhu.

Obr. 12. Schéma tahové křivky síly v závislosti na protažení dle [8]

### Tažnost

Tažnost je vyjádřena poměrem mezi prodloužením do přetrhu a upínací délkou. Upínací délka je vzdálenost mezi upínacími čelistmi a bývá ve většině případů

0,5m. Prodloužením je myšlena vzdálenost, o kterou se materiál protáhne od původní upínací délky. Tažnost také může být vyjádřena v procentech [8].

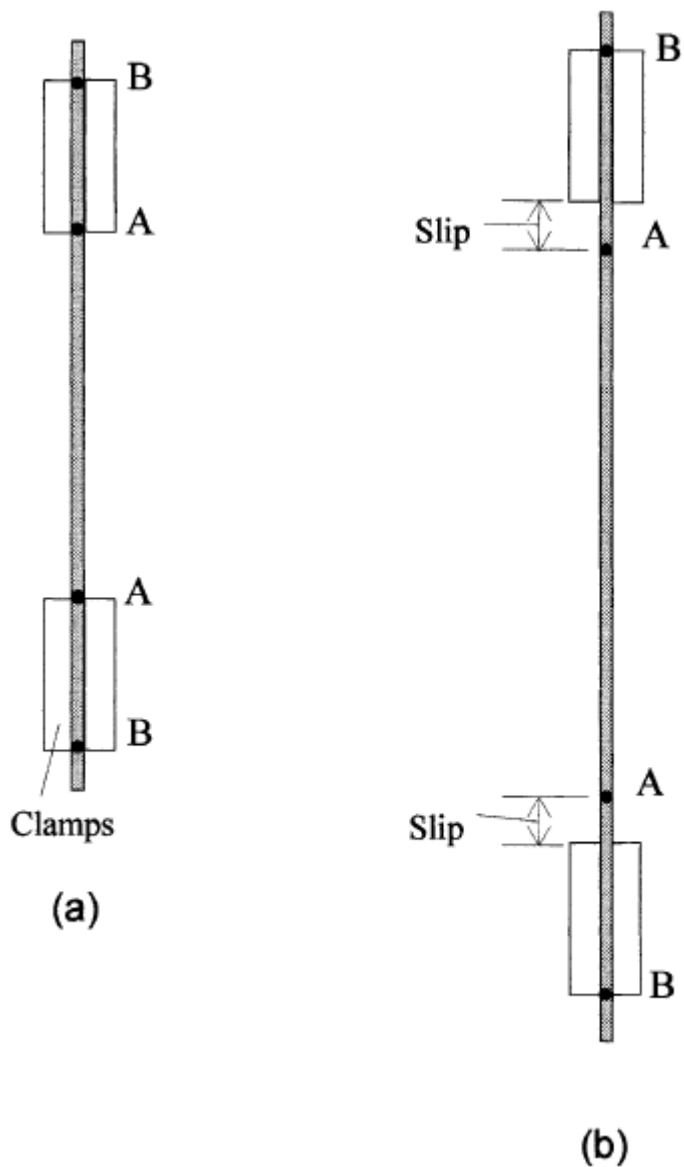
$$\varepsilon = \frac{\text{prodloužení}}{\text{up. délka}} * 100 [\%] \quad (11)$$

### Měření pevnosti a tažnosti

Testování pevnosti a tažnosti je prováděno podle normy [13]. Měření je nejčastěji prováděno při konstantní rychlosti příčnicku. Nejrozšířenější přístroj pro měření pevnosti a tažnosti je Instron. Přístroj má kleštiny proti sobě v horizontální poloze, mezi kterými je napnutý materiál. Materiál je napnut mezi čelistmi při předepsaném předpětí, které je vztaženo k jeho jemnosti 0.5 cN/tex [13]. Při spuštění testu se vrchní čelist pohybuje směrem od spodní čelisti. Přístroj průběžně zaznamenává naměřené hodnoty síly (N), protažení (mm) atd. v určitém čase. Přístroj při přetrhu materiálu vrátí kleštiny zpět do počáteční polohy. Minimální počet měření je pro multifil 20 měření, pro staplové příze 50 měření a pro skané příze a kabely 20 měření [8].

Přístroj má 2 vyměnitelné hlavy. První hlava je schopna měřit s vysokou přesností +- 0,2% zjištěného údaje, ale pouze materiály s menší silou do přetrhu než je 500N. Druhou hlavu lze použít pro materiály se silou do přetrhu až 5000N, ale s přesností +-1% zjištěného údaje. Rychlost se nastavuje v rozmezí 0,5 - 500 mm/min výjimečně až 1000 mm/min. Upínací délka bývá 0,5m, čím větší je upínací délka tím větší je pravděpodobnost výskytu slabého místa na materiálu a dochází k dřívějšímu přetrhu, což výrazně zkresluje výsledky [8].

Správné uchycení do kleštin je znázorněno na obrázku 13a). Při měření pevnosti a tažnosti jemnějších a hladších materiálů může docházet k prokluzům, které můžeme vidět na obrázku 13b) Jedná se o nežádáný efekt, ke kterému dochází po spuštění testu. Jako opatření proti prokluzům musí být zajištěno buď zdrsnění povrchu upínacích kleštin a nebo nahrazení kleštin kleštinami s lepším způsobem uchycení materiálu např. kleštinami ovíjecími [8].



clamps - upínací čelist, slip - prokluz

Obr. 13. Schéma prokluzu v upínacích čelistech dle [8]

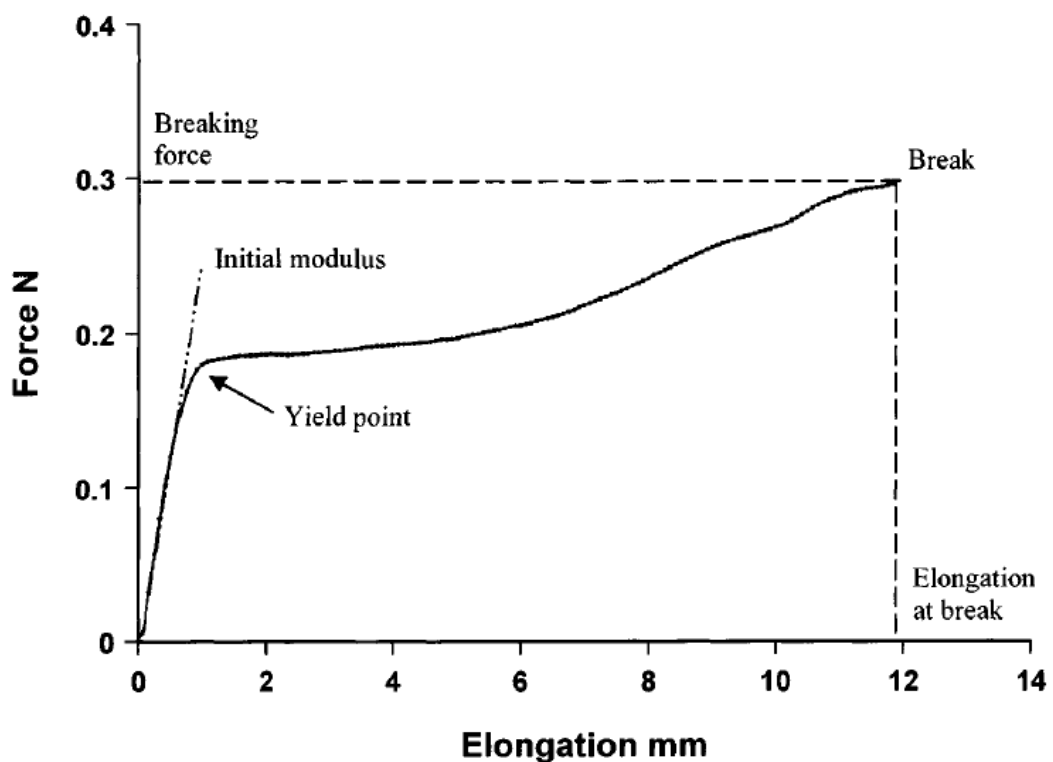
### Tahové křivky

Na obrázku 14 je zobrazena křivka, která je jedním možným výstupem z přístroje Instron. V grafu je znázorněna prodloužení materiálu (osa x) v závislosti na síle (osa y). Materiál je protahován až do chvíle, kdy nastane přetrh (break) [8].



Mez kluzu je závislá na testovaném materiálu. Na obr. 14 v části křivky před tímto bodem se očekává od materiálu pružné (elastické) chování, což znamená, že po odlehčení se materiál vrátí zpět do svého původního tvaru. Není to pevná hranice mezi elastickou a neelastickou částí, ale jedná se pouze o zjednodušený model. Materiál za touto mezí se prodlužuje i bez zvyšování zatížení. U materiálu za touto mezí může docházet i k vnitřním změnám materiálu, což se nejčastěji vyskytuje u syntetických materiálů [8].

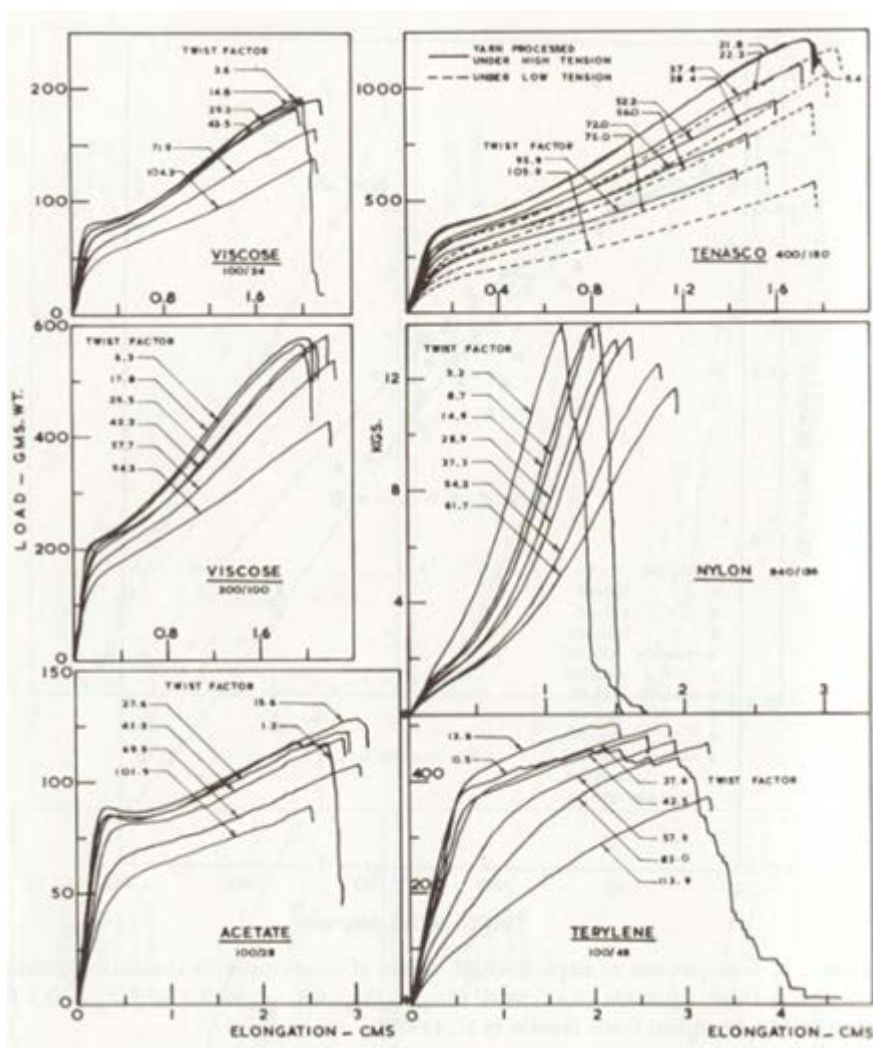
Posledním důležitým parametrem tahové křivky je yongův modul pružnosti (počáteční modul). Tímto modulem se vystihuje sklon křivky v počáteční oblasti. Sklon je vyjádřen metodou nejmenších čtverců v nejstrmější oblasti křivky od počátku. Yongův modul pružnosti slouží k zjištění tuhosti materiálu, čím nižší je modul materiálu, tím více je materiál protažitelný při dané síle [8].



elongation - prodloužení, force - síla, elongation at break - prodloužení do přetrhu, yield point - mez kluzu, initial modulus - modul, break - přetrh, breaking force - síla při přetrhu

Obr. 14. Tahová křivka síly v závislosti na protažení dle [8]

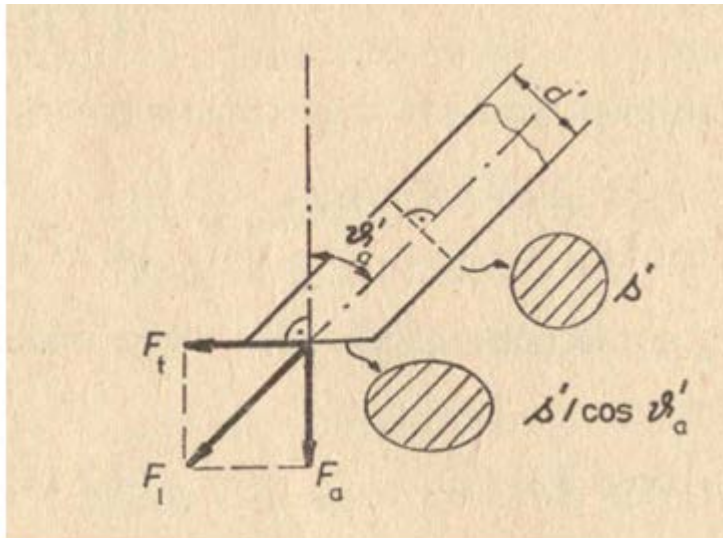
Různé typy materiálu mají různé vývoje tahových křivek viz. obr. 15.



Obr. 15. Tahové křivky (viscose, tenasco, viscose, nylon, acetate, terylene) dle [11]

### Vliv zákrutu na pevnost a tažnost multifilamentu

Vlivem zvyšování zákrutu v multifilamentu dochází nejprve k zvyšování pevnosti díky vzniku koherentních sil [11] a tím pádem vyrovnání slabých míst mezi jednotlivými fibrilami a následně k postupnému vyosení jednotlivých fibril, čímž dochází k zvyšování úhlu mezi osou multifilamentu a jednotlivými fibrilami, což má za následek menší využití tahové síly jednotlivých fibril v zakrouceném svazku viz. obr. 16 a tedy snížení pevnosti [11].



Obr. 16. Schéma tahové síly ve vlákne dle [7]

Závislost mezi tažností svazku vláken a jednotlivých vláken vzhledem k úhlu sklonu vláken ve svazku byla vyjádřena matematickým modelem dle Gegauffa [14].

$$\varepsilon_l = \varepsilon_a \cos^2 \beta \quad (12)$$

$\varepsilon_l$  ... poměrné prodloužení vlákna [%]

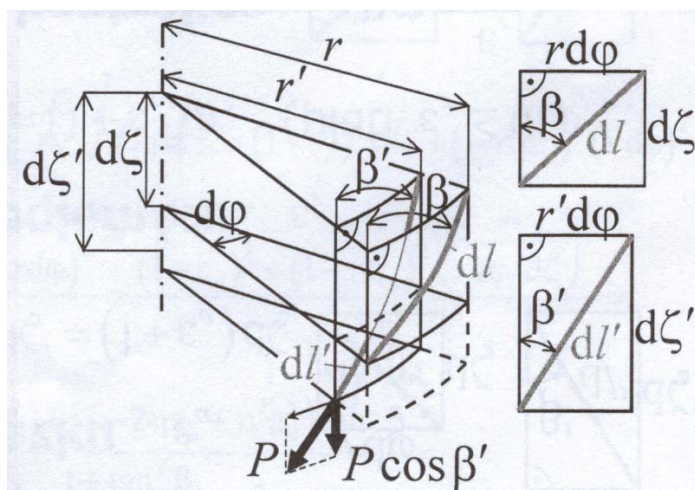
$\varepsilon_a$ ... poměrné prodloužení svazku [%]

$\beta$ ... úhel sklonu šroubovice [°]

Tažnost se naopak vlivem zákrutu u multifilu zvyšuje, jelikož se zvyšuje délka jednotlivých fibril v multifilamentu díky seskání [10].

### Prodloužení vlákna

Element šroubovicového vlákna je znázorněn na válcové ploše o poloměru  $r$  a vytyčuje elementární obdélník s rozměry  $rd\phi$ ,  $d\zeta$ . Prodloužením svazku se změní rozměr elementárního obdélníku na  $r'd\phi$ ,  $d\zeta$ . Na obr. 18 jsou vyjádřeny tyto dva obdélníky před prodloužením a po prodloužení. Z obdélníků můžeme vidět, že element vlákna změnil délku na  $d'$  a úhel na  $\beta'$  [6].

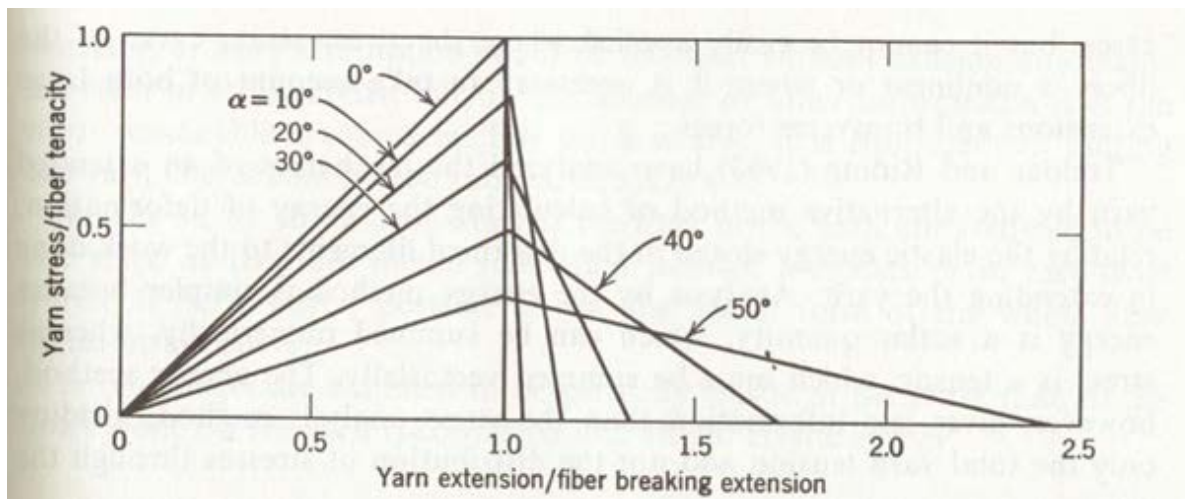


Obr. 18. Schéma poměrů zatíženého a nezatíženého DVÚ dle [6]

### Přetrh multiflamentu

Přetrh multiflamentu je především určen počtem zákrutů. Při minimálním počtu zákrutů není schopen multifil držet jako celek a dochází k postupnému přetrhu jednotlivých fibril, což má za příčinu neostrý přetrh. S rostoucím zákrutem se také zvyšují koherentní síly mezi vlákny a multifil se chová jako celek, tím pádem dochází k ostrému přetrhu. Mez kluzu se snižuje s rostoucím zákrutem, což je zapříčiněno tím, že centrální filament je daleko více namáhán než filameny vnější [11].

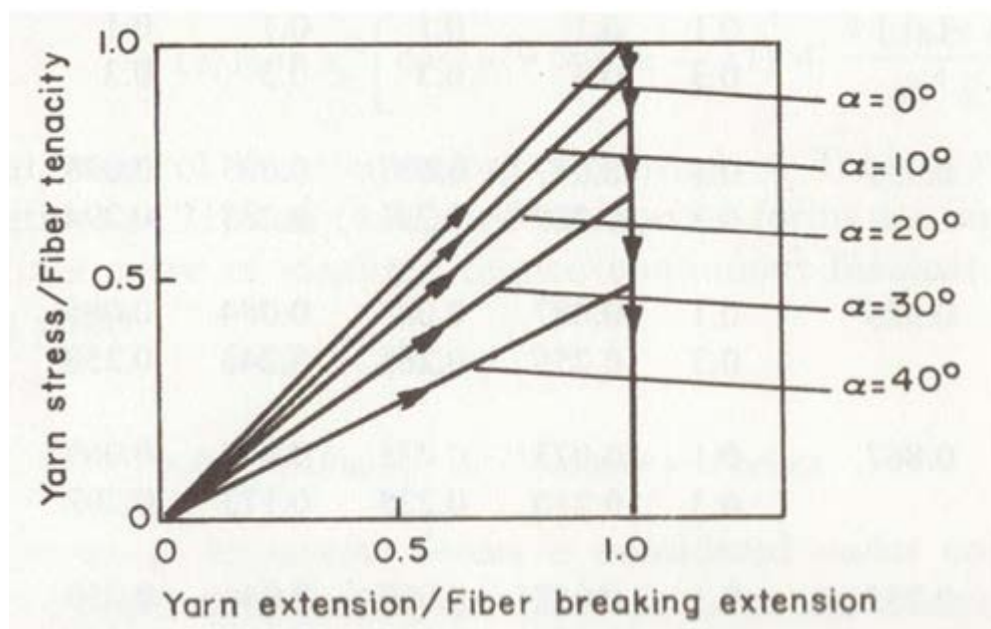
Teoreticky by fibrily při neostrém přetrhu a zvyšujícím se zákrutu praskaly postupně, jak můžeme vidět na obrázku 19, jelikož se zvyšuje rozdíl velikosti uhlů k ose vlákna od vnějších fibril směrem k ose multifilu [11].



Yarn extension - protažení příze, fiber breaking extension- protažení do přetrhu, Yarn stress- namáhání příze, fiber tenacity - pevnost vlákna

Obr. 19. Teoretický přetrh multifilamentu v závislosti na úhle sklonu fibril dle [11]

Při ostrém přetrhu by se teoreticky snižovala pouze pevnost s rostoucím zákrutem, což je znázorněno na obrázku 20 [11].

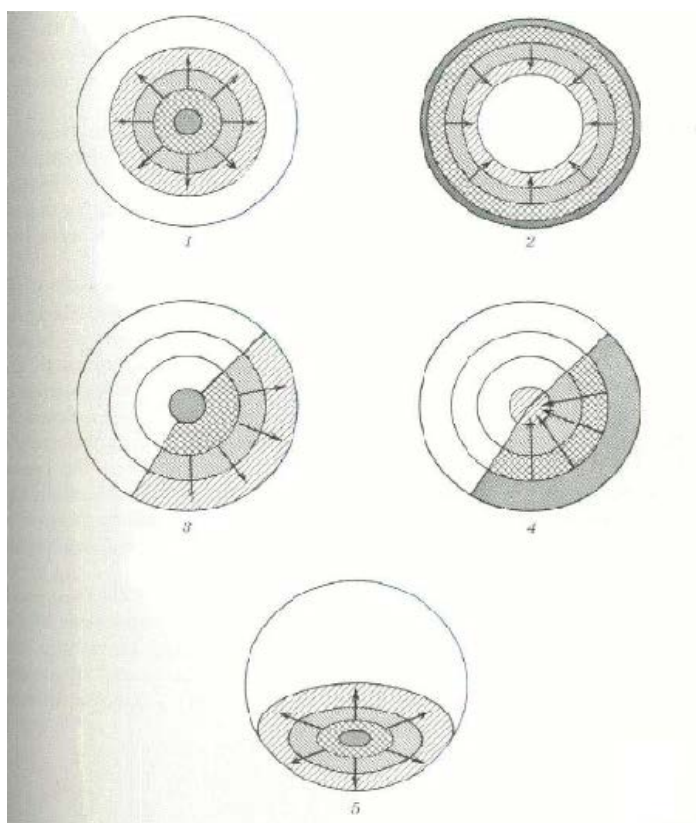


Yarn extension - protažení příze, fiber breaking extension- protažení do přetrhu, Yarn stress- namáhání příze, fiber tenacity - pevnost vlákna

Obr. 20. Teoretická síla do přetrhu v závislosti na sklonu fibril dle [11]

Teoretický začátek preruhu může nastat různými způsoby:

- 1) Porušení se šíří ze středu multifilu a zastaví se v půli cesty. viz. obr. 21,1
- 2) Porušení se šíří z vnějších vrstev multifilu a opět se zastaví v půli cesty. viz. obr. 21,2
- 3) Porušení začíná ve středu multifilu a šíří se směrem k jedné straně. viz. obr. 21,3
- 4) Porušení se šíří z jednoho okraje multifilu a šíří se směrem k ose. viz. obr. 21,4
- 5) Porušení začíná v jedné polovině svazku a šíří se v této polovině. viz. obr. 21,5 (nejvíce pravděpodobný)



Obr. 21. Teoretické počátky preruhu multiflamentu dle [11]

V předchozích pracích byl popisovány mechanicko-fyzikální vlastnosti skaného multiflamentu v závislosti na zákrutu. Testování probíhalo u PA multifilů a PES multifilů, které byly dvojmoskanné a trojmoskanné. Při skaní multifilů docházelo k

zvyšování hodnot jemností vlivem seskání. Poměrná pevnost se mírně zvyšovala popřípadě byla konstantní při nízkých hodnotách Koechlinova zákrutového koeficientu, což bylo zapříčiněno různým zvlněním fibril v multidilamentu. S vyššími hodnotami Koechlinova zákrutového koeficientu docházelo k poklesu pevnosti vlivem vyosení fibril vůči ose multifilu. Tažnost se zvyšovala s rostoucím zákrutem u obou materiálů, ale u PA byl nárůst ztelnější [15].

### Vztahy použité pro statistické zpracování dat

#### Aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [16] \quad (13)$$

#### Směrodatná odchylka

$$s_x^2 = \sqrt{s_x^2} \quad [17] \quad (14)$$

#### Variační koeficient

$$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}} \cdot 100 [\%] \quad [17] \quad (15)$$

#### 95% interval spolehlivosti pro malý výběr

$$95\%IS = \bar{x} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-1) * s/\sqrt{n} \quad [18] \quad (16)$$

t ...Tabulky studentova rozdělení

1-α... Koeficient spolehlivosti

#### 95% interval spolehlivosti pro velký výběr

$$95\%IS = \bar{x} \pm 1,96 * s/\sqrt{n} \quad [18] \quad (17)$$

#### Normalita a homogenita

Data musí splňovat normalitu i homogenitu, jinak musí být vybočující data odstraněna a statistické vyhodnocení znovu vypočítáno. Normalitou je myšleno, že



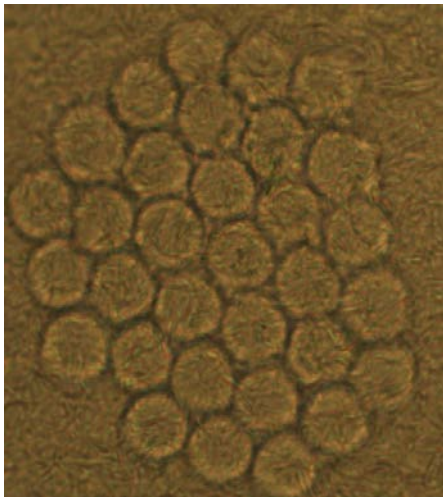
data musí pocházet z normálního (Gaussova) rozdělení. Zda-li je splněn předpoklad, že v datech nejsou vybočující měření, je předpoklad homogenity přijat [19].

## **Experimentální část**

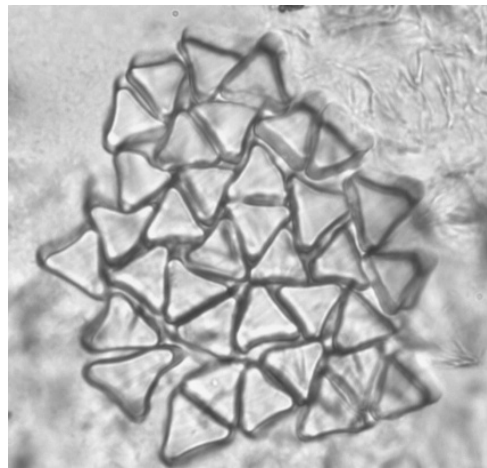
V experimentální části budou popsány veškeré postupy vypracování experimentů a jejich následné vyhodnocení. Jedním z cílů práce je ověřit vliv počtu zákrutů na poměrnou pevnost a tažnost multifilamentu. Dále stanovit úhel sklonu povrchových fibril v multifilamentu při určitém počtu zákrutů a zjistit uspořádání jednotlivých fibril v multifilamentu pomocí měkkých příčných řezů. Všechny zjištěné výsledky budou porovnány s předpoklady.

## Materiál

Pro experimentální část byly použity 2 typy materiálů. První materiál byl 100% POP hladký multifilament s 32 fibrilami o jmenovité jemnosti 16,5 tex a kruhovým průřezem fibril viz. obr. 22. Druhým materiálem byl 100% PES hladký multifilament s 36 fibrilami o jmenovité jemnosti 10 tex a trojúhelníkovitým průřezem fibril viz. obr.23. Oba multifilamenty byly bez zákrutu navinuty na cívkách a uskladněny v klimatizované komoře podle normy ČSN EN 20 139 80 0056.



Obr. 22. Příčný řez POP multifilamentu



Obr. 23. Příčný řez PES multifilamentu

Nezakroucený materiál byl zakrucován na zákrutoměru na určité stupně zákrutů viz. tab. 1. Pro PES multifilament byly určeny úrovně zákrutů. Pro jednotlivé stupně zákrutů byly vypočítány Koechlinovi zákrutové koeficienty  $\alpha$  z jmenovité jemnosti PES multifilamentů 10 tex. Pro POP multifilamenty byl použit stejný Koechlinův zákrutový koeficient, který byl vypočítán pro PES multifilamenty, ale s dosazením jmenovité jemnosti POP multifilamentů 17.5 tex viz. tab. 1.

Tab.1 Rozsah zákrutů použitých pro experiment a odpovídající jmenovitá hodnota zákrutového koeficientu

Zákrut PES [ $m^{-1}$ ]	$\alpha$ [ $m^{-1} \cdot ktex^{1/2}$ ]	Zákrut POP [ $m^{-1}$ ]
100	10,69	82
200	21,39	163
300	32,08	245
400	42,77	326
500	53,47	408
600	64,16	490
700	74,86	571
800	85,55	653
900	96,25	735
1000	106,94	816
1500	160,41	1224
2000	213,88	1633

### Ověřování jemnosti

Jemnost multifilamentů byla ověřována z půl metrových nezakroucených úseků multifilamentů, jejich následném zvážení, výpočtem průměrné hmotnosti a přepočítání na jemnost dle vztahu (2) viz. tabulka 1. Jednotlivé hodnoty hmotností nezakroucených úseků jsou uvedeny v příloze 1. Pro ověřování jemnosti se v praxi odměřuje příslušná délka pomocí vijáku. V tomto případě nemohl být použit, jelikož docházelo pravděpodobně k prokluzům a výsledná vypočítaná jemnost neodpovídala předpokladům.

Pro zjištění jemnosti po zakroucení multifilamentu na daný stupeň zákrutu byl využit zákrutoměr, kde bylo nejprve nastaveno předpětí v závislosti na předepsané jemnosti nezakrouceného multifilamentu viz. tab.1 a poté upínací délka 0,5m. Každý stupeň zákrutu byl nejprve prakticky vyzkoušen, aby po zkrácení seskáním opravdu byl v multifilamentu stanovený počet zákrutů na metr viz. tab. 3 a tab. 4. Vzhledem k upínací délce 0,5m je pro dosažení předepsaného počtu zákrutu na 1 m třeba použít cca poloviční počet otáček rotační čelisti zákrutoměru až do úrovně  $Z=600m^{-1}$  (v případě PES multifilamentů), pak se díky nárůstu seskání musí použít nižší otáčky než poloviční (viz. tab. 3 a 4). V tab. 3 a 4. také můžeme najít velikost seskání [%] stanoveného na základě zkrácení multifilu dle vztahu (7), pro danou úroveň zákrutu byla na základě znalosti zkrácení vlivem zákrutu vypočtena skutečná jemnost

zakrouceného multifilu dle vztahu (8). Pro každý zákrut bylo provedeno 20 měření, z kterých byl vypočítán průměr a 95% IS viz. graf 1. Konkrétní naměřené hodnoty zkrácení multifilamentu vlivem zákrutu jsou uvedeny v příloze 1.

Tab. 2 Použité předpětí pro zákrutoměr a Instron

materiál	Jemnost [tex]	Předpětí [cN]
PES	10	5
POP	17,5	8,75

Tab.3 jemnosti nezakroucených multifilamentů

materiál	Délka [km]	Průměrná hmotnost [g]	Jemnost [tex]
PES	0,0005	0,005718	11,436
POP	0,0005	0,008582	17,163

Tab.4 Seskání a jemnost pro PES

Zákrut [m <sup>-1</sup> ]	Počet otáček čelisti [1/0,5m upínací délky]	Délka po zakroucení [m]	Seskání [%]	Jemnost [tex]
100	50	0,500	0	11,44
200	99,80	0,499	0,2	11,46
300	149	0,498	0,4	11,48
400	199	0,497	0,7	11,51
500	248	0,495	1	11,55
600	296	0,493	1,4	11,60
700	343	0,490	2	11,67
800	390	0,487	2,5	11,73
900	437	0,485	2,9	11,78
1000	481	0,481	3,9	11,89
1500	690	0,460	8,1	12,45
2000	870	0,434	13,1	13,17

Tab.5 Seskání a jemnost pro POP

Zákrut [m <sup>-1</sup> ]	Počet otáček čelisti [1/0,5m upínací délky]	Délka po zakroucení [m]	Seskání [%]	Jemnost [tex]
82	41	0,500	0	17,16
163	81	0,499	0,3	17,21
245	122	0,497	0,6	17,26
326	161	0,495	1	17,34
408	201	0,493	1,5	17,42
490	240	0,490	2	17,52
571	278	0,487	2,7	17,64
653	315	0,482	3,6	17,79
735	351	0,478	4,5	17,97
816	386	0,473	5,5	18,16
1224	540	0,440	12	19,49
1633	657	0,402	19,6	21,34

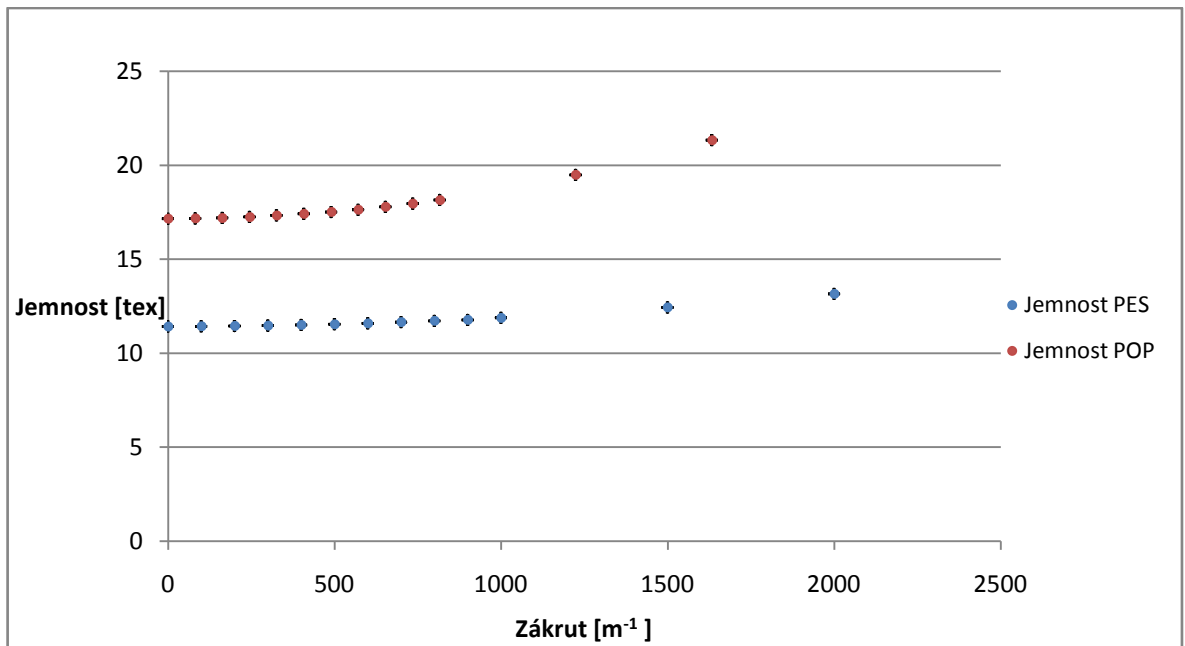
Dále byla vypočítaný skutečný Koechlinův zákrutový koeficient u obou materiálů v závislosti na skutečné jemnosti viz. tab.6.

Tab.6 reálná  $\alpha$  v závislosti na reálné jemnosti

Reálná jemnost PES [tex]	Reálná $\alpha$ PES [ m <sup>-1</sup> .ktex <sup>1/2</sup> ]	Reálná jemnost POP [tex]	Reálná $\alpha$ POP [ m <sup>-1</sup> .ktex <sup>1/2</sup> ]
11,44	10,70	17,16	10,75
11,46	21,41	17,21	21,38
11,48	32,15	17,26	32,19
11,51	42,92	17,34	42,93
11,55	53,74	17,42	53,86
11,60	64,62	17,52	64,86
11,67	75,61	17,64	75,83
11,73	86,64	17,79	87,11
11,78	97,68	17,97	98,52
11,89	109,26	18,16	109,96
12,45	167,33	19,49	170,89
13,17	229,48	21,34	238,57

S rostoucím zákrutem se zvyšují hodnoty jemnosti (délkové hmotnosti) multifilamentu díky seskání. Především u POP multifilamentů je z obr. 24 vidět exponenciální stoupání jemnosti v závislosti na zákrutu, což je pravděpodobně zapříčiněno postupným vznikem zákrutu druhého řádu viz. obr. 25. Dále můžeme pozorovat rychlejší stoupání u POP multifilamentů zřejmě kvůli vícero faktorům ovlivňující zákrut, než-li pouze jemnost. Důvodem může být jiná hustota materiálu a jiné zaplnění, které může být ovlivněno: jemností fibril, počtem fibril a průřezem fibril.





Obr. 24 Jemnost v závislosti na zákrutu a 95% IS

Zákrut druhého  
řádu při  $1500 m^{-1}$



Zákrut druhého řádu při  
 $2000 m^{-1}$



Obr. 25. Zákrut druhého řádu POP multifilamentu

## Pevnost a tažnost multifilamentu

Nezakroucené multifilamenty byly zakrucovány na laboratorním zákrutoměru. Kleštiny, které slouží jako fixace zákrutu při přesunu zakrouceného multifilamentu mají rozsah 50cm, a proto na zákrutoměru byla nastavena upínací délka, tak aby výsledná délka zakrouceného multifilamentu byla 60cm. Při nastavování upínací délky se vycházelo ze znalosti seskání při dané úrovni zákrutu. Počet otáček čelistí zákrutoměru byl nastavován tak, aby ve výsledném zakrouceném multifilamentu byl dosažen požadovaný počet zákrutů na metr viz. tab. 7 pro PES multifilamenty a pro POP multifilamenty tab. 8.

Tab. 7 Počet zákrutů a upínací délka pro PES

Zákrut [ $m^{-1}$ ]	Upínací délka[m]	Počet otáček čelistí zákrutoměru
100	0,600	60
200	0,601	120
300	0,602	180
400	0,604	240
500	0,606	300
600	0,609	360
700	0,612	420
800	0,615	480
900	0,618	540
1000	0,623	600
1500	0,649	900
2000	0,679	1200

Tab. 8 Počet zákrutů a upínací délka pro POP

Zákrut [ $m^{-1}$ ]	Upínací délka [m]	Počet otáček čelisti zákrutoměru
82	0,600	49
163	0,602	98
245	0,603	146
326	0,606	196
408	0,609	245
490	0,612	294
571	0,616	343
653	0,621	392
735	0,627	449
816	0,633	490
1224	0,672	734
1633	0,718	979

Zakroucené multifilamenty ze zákrutoměru byly pomocí kleštin umístěny do ovíjecích čelistí přístroje Instron, kde bylo nastaveno předpětí stejné jako pro zákrutoměr viz. tab. 1. Dále byla nastavena vzdálenost čelistí na 0,4m, jelikož se jednalo o ovíjecí čelisti a rozsah kleštin byl pouze 0,5m. Posledním nastavovaným parametrem byla rychlost příčnicku, která byla nastavena v závislosti na době přetrhu nezakrouceného PES multiflamentu, aby byla v časovém intervalu 17-23sec podle normy (13). Výsledná nastavená rychlost příčnicku byla 280 mm/min. Toto nastavení bylo používáno pro všechny stupně zákrutu a oba typy multiflamentů, aby bylo možné je porovnávat. Po nastavení přístroje mohlo dojít k samotnému měření. Instron měřil pevnost [N] a protažení [mm]. Pro každý stupeň zákrutu bylo prováděno 50 měření od obou typů multiflamentů. Výsledné veličiny byly přepočítány na poměrnou pevnost a tažnost. Následně byla odstraněna vybočující data, aby byl splněn předpoklad normality a homogenity dat a ze zbývajících hodnot vypočítán aritmetický průměr, směr. odch., var. koef. a 95% IS viz tab. 9 a 10 pro poměrnou pevnost a tab. 11 a 12 pro tažnost. Pro porovnání obou typů multiflamentů byl zkonstruován graf viz. obr. 26 pro poměrnou pevnost a graf viz. obr. 27 pro tažnost.

Tab. 9 Poměrná pevnost PES

Zákrut [m <sup>-1</sup> ]	Průměr [N/tex]	95% IS [N/tex]		Směrodatná odchylka [N/tex]	Variační koeficient [%]
		Spod. mez	Hor. mez		
0	0,325	0,322	0,328	0,009	2,769
100	0,333	0,329	0,336	0,012	3,604
200	0,337	0,334	0,341	0,013	3,858
300	0,351	0,348	0,353	0,010	2,849
400	0,349	0,345	0,353	0,015	4,298
500	0,358	0,355	0,361	0,012	3,351
600	0,353	0,349	0,356	0,012	3,399
700	0,355	0,352	0,358	0,011	3,099
800	0,354	0,351	0,357	0,011	3,107
900	0,349	0,346	0,352	0,011	3,152
1000	0,345	0,343	0,348	0,008	2,319
1500	0,299	0,296	0,302	0,011	3,679
2000	0,261	0,258	0,264	0,014	5,364

Tab. 10 Poměrná pevnost POP

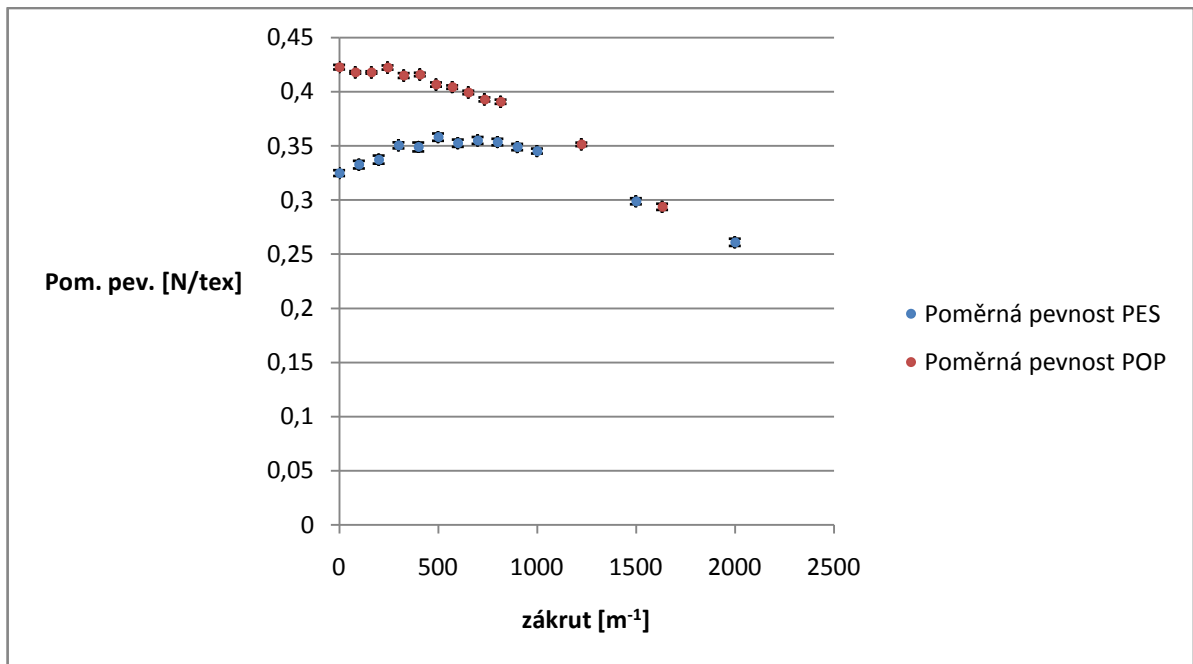
Zákrut [m <sup>-1</sup> ]	Průměr [N/tex]	95% IS [N/tex]		Směrodatná odchylka [N/tex]	Variační koeficient [%]
		Spod. mez	Hor. mez		
0	0,423	0,421	0,425	0,007	1,655
82	0,418	0,417	0,419	0,004	0,971
163	0,418	0,417	0,419	0,004	0,971
245	0,422	0,421	0,424	0,007	1,658
326	0,415	0,413	0,417	0,008	1,928
408	0,416	0,414	0,418	0,006	1,442
490	0,407	0,405	0,409	0,007	1,720
571	0,404	0,403	0,406	0,006	1,485
653	0,399	0,398	0,401	0,006	1,504
735	0,393	0,391	0,395	0,006	1,527
816	0,391	0,389	0,393	0,007	1,790
1224	0,351	0,350	0,353	0,006	1,709
1633	0,294	0,291	0,297	0,010	3,401

Tab. 11 Tažnost PES

Zákrut [m <sup>-1</sup> ]	Průměr [%]	95% IS [%]		Směrodatná odchylka [%]	Variační koeficient [%]
		Spod. mez	Hor. mez		
0	25,973	25,418	26,528	1,954	7,523
100	27,471	26,621	28,321	2,991	10,889
200	28,473	27,450	29,495	3,599	12,639
300	31,228	30,525	31,931	2,472	7,917
400	32,058	31,012	33,103	3,680	11,479
500	34,749	33,829	35,670	3,238	9,318
600	34,947	34,050	35,845	3,158	9,037
700	36,008	35,074	36,943	3,287	9,128
800	36,717	35,833	37,601	3,111	8,472
900	38,043	37,158	38,927	3,112	8,179
1000	37,848	37,053	38,642	2,794	7,383
1500	38,393	37,674	39,112	2,529	6,588
2000	40,008	38,976	41,041	3,633	9,080

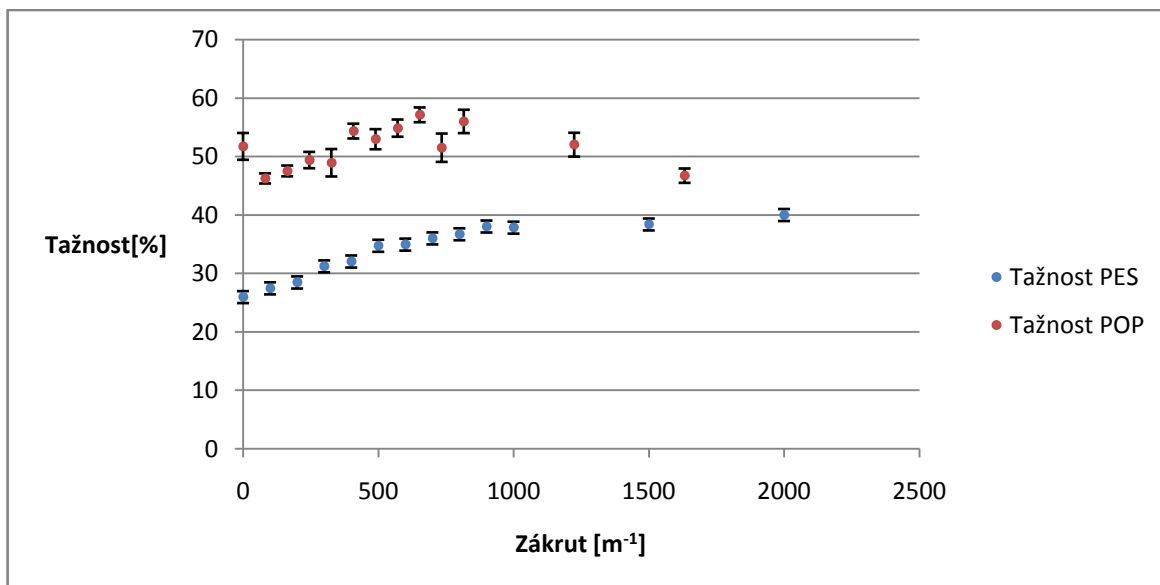
Tab. 12 Tažnost POP

Zákrut [m <sup>-1</sup> ]	Průměr [%]	95% IS [%]		Směrodatná odchylka [%]	Variační koeficient [%]
		Spod. mez	Hor. mez		
0	51,746	49,452	54,039	8,069	15,593
82	46,263	45,403	47,123	2,963	6,404
163	47,545	46,623	48,466	2,958	6,221
245	49,407	48,012	50,802	4,643	9,398
326	48,944	46,599	51,288	8,250	16,857
408	54,362	53,096	55,628	4,312	7,932
490	52,973	51,256	54,689	5,976	11,281
571	54,868	53,399	56,337	5,115	9,323
653	57,144	55,883	58,405	4,098	7,171
735	51,516	49,092	53,939	8,527	16,553
816	56,012	54,015	58,009	7,027	12,545
1224	52,035	49,995	54,074	7,175	13,789
1633	46,736	45,508	47,965	4,322	9,247



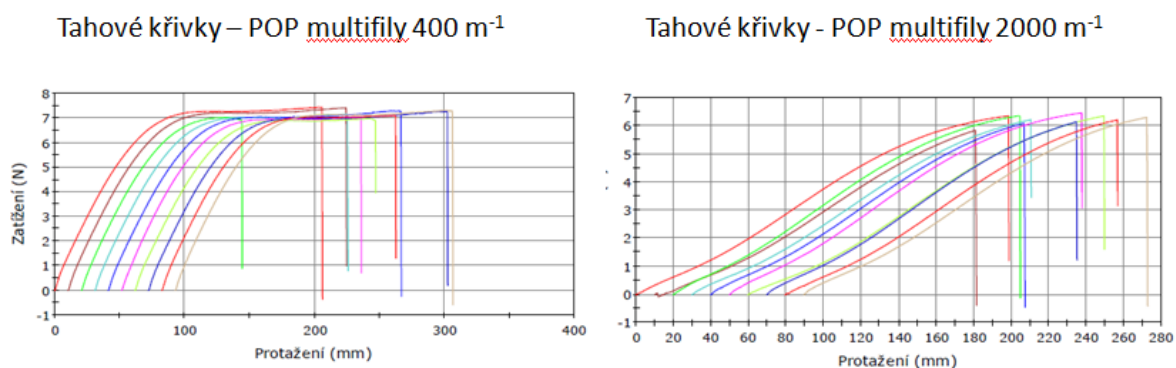
Obr. 26 Poměrná pevnost POP a PES s 95% IS

U PES multifilamentů se poměrná pevnost nejprve mírně zvyšuje do  $Z=600m^{-1}$  s odpovídajícím Koechlinovým zákrutovým koeficientem  $\alpha=64,16$  a poté dochází k poklesu viz. obr. 26. Dle předpokladů se nejprve s malým počtem zákrutů v multifilamentu zvyšuje pevnost díky koherentním silám mezi vlákny a s narůstajícím zákrutem dochází k vyosení fibril vůči ose multifilamentu, což má za následek menší využití tahové síly jednotlivých fibril ve svazku. POP multifilamenty tento charakter nemají a již od počátku dochází k poklesu pevnosti. Tvar křivky je pravděpodobně ovlivněn jiným materiálem, jiným průřezem fibril a jinou jemností fibril. V příloze 2 jsou k dispozici průměrné tahové křivky všech úrovní zákrutu, které jsou vyjádřeny, jak v závislosti síly na prodloužení, tak poměrné pevnosti na prodloužení.



Obr. 27 Tažnost POP a PES s 95% IS

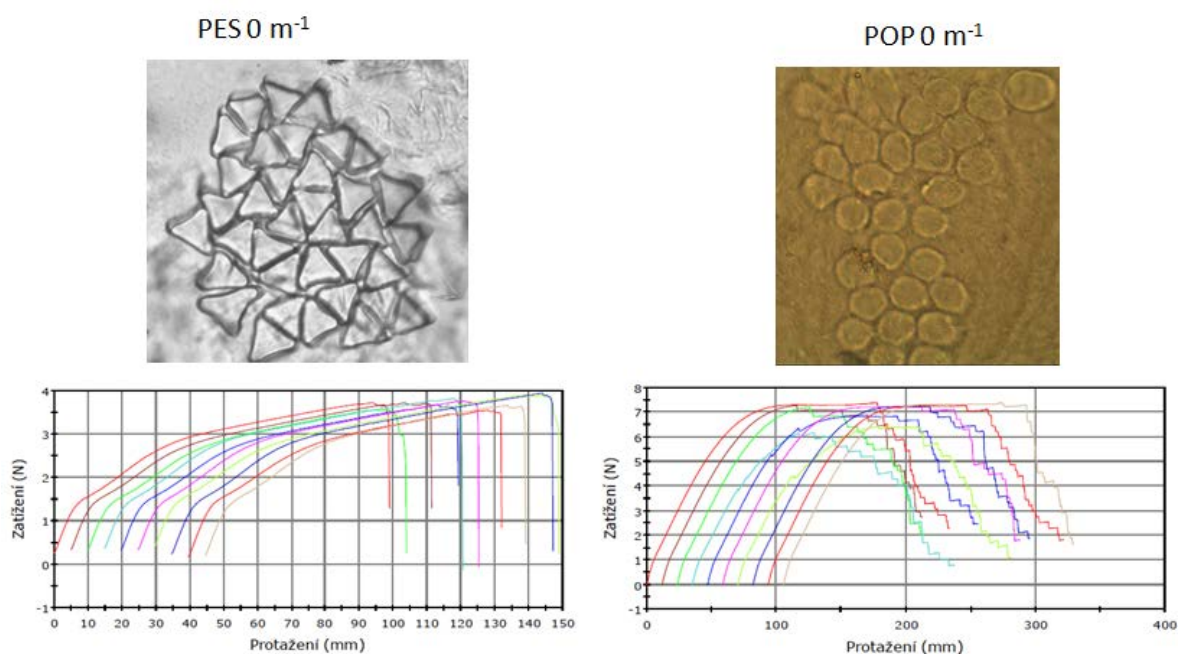
Na obr. 27 vidíme, že PES multifilamenty mají rostoucí trend křivky pro tažnost a tím pádem odpovídají předpokladům, které tvrdí, že je to způsobeno nárůstem seskání a tím pádem větší zásobou materiálu pro prodlužování. U POP multifilamentů můžeme vidět vyšší variabilitu a jiný trend tahové křivky než mají PES multifilamenty. Důvodem je pravděpodobně dodlužování POP multifilamentů při vyšších zákrutech již na zákrutoměru a ne až na Instronu nebo při vyšších zákrutech k dodlužování vůbec nedochází, jak můžeme vidět z obr. 27. Vysoká variabilita bude pravděpodobně způsobena obecně vysokou variabilitou tažnosti POP multifilamentu 15-60%.



Obr. 27 Tahové křivky POP multifilamentů s  $400 m^{-1}$  a  $2000 m^{-1}$  z Instronu



U nezakroucených multifilamentů můžeme vidět také odlišnosti v přetrhu viz. obr. 28. U PES multifilamentů dochází téměř k ostrému přetrhu naopak u POP multifilamentů se trhají fibrily postupně, je to pravděpodobně zapříčiněno obecně vysokou variabilitou tažnosti polypropylénu a tím pádem se fibrila s nižší tažností přetrhne dříve než fibrila s vyšší tažností. Za to u PES multifilamentů dochází k vyššímu tření díky trojúhelníkovému tvaru fibril, které zajišťují větší třecí plochy mezi fibrilami, což napomáhá multifilamentu působit jako celek.

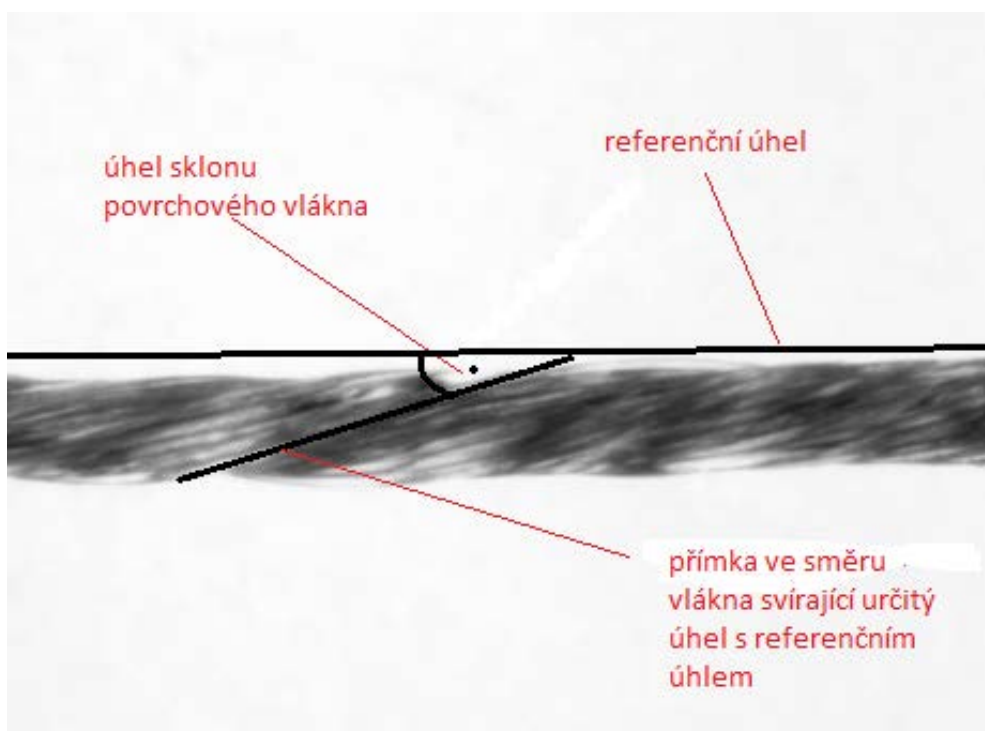


Obr. 28 Tahové křivky POP a PES multifilamentů bez zákrutu z Instronu a jejich příčné řezy

### Zjišťování úhlu sklonu povrchových vláken

Na zákrutoměru bylo nastaveno předpětí spolu s upínací délkou 60 cm a následně byl zakroucen materiál na určitý stupeň zákrutu. Pomocí kleštin byl umístěn na pohyblivou podložku pod mikroskop, kde byl uchycen lepící páskou, aby se nerozkroutil. Poté byl zaostřen a nasnímán. Díky pohyblivé podložce se na jednom vzorku dalo nasnímat více snímků. Ze snímků podélného pohledu se následně s pomocí obrazové analýzy měřil sklon fibril k nastavenému referenčnímu úhlu, který

představoval osu multifilamentu viz. obr. 29. Pro každý stupeň zákrutu bylo provedeno 50 měření u obou multifilamentů. Z výsledných měření byla nejprve odstraněna vybočující data, aby byl splněn předpoklad normality a homogenity následně byl vypočítán aritmetický průměr, směr. odch., var. koef. a 95% IS viz. tab. 13 pro PES multifilamenty a tab. 14 pro POP multifilamenty. Sklon povrchových vláken obou typů multifilamentů můžeme vidět na obr. 30. Ukázky dalších podélných pohledů jsou k vidění v příloze 3.



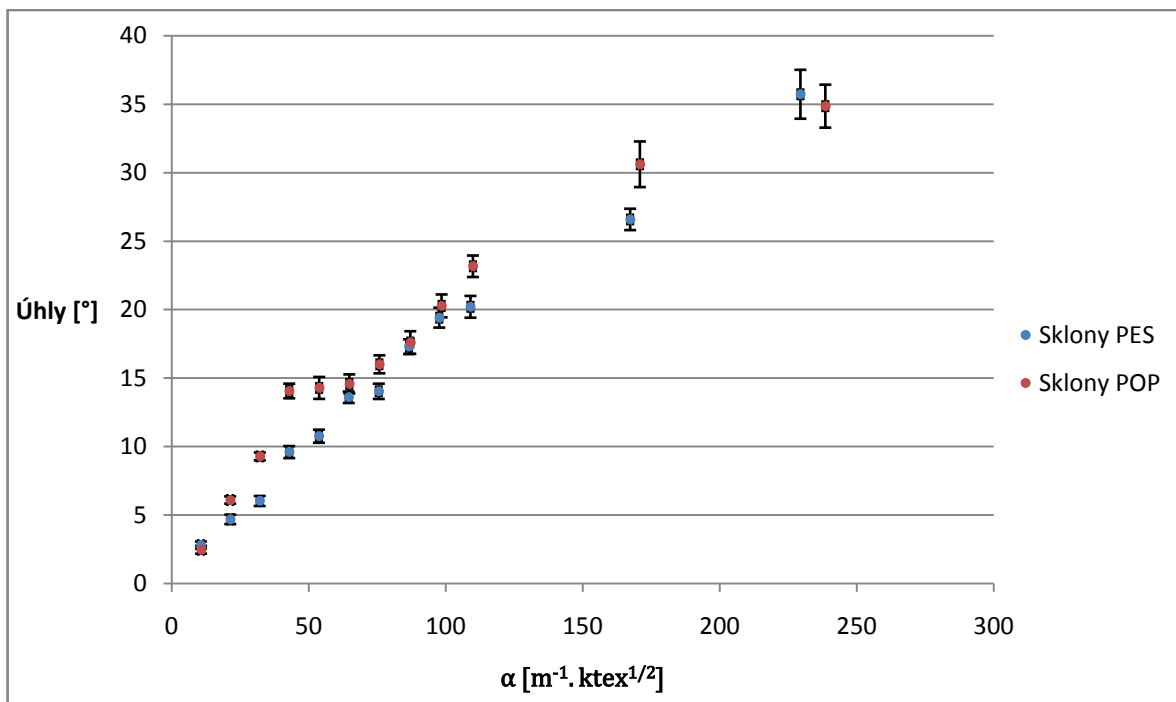
Obr. 29 Měření úhlu sklonu fibril v multifilamentu

Tab. 13 Úhel sklon povrchových vláken PES multifilament

Zákrut [m <sup>-1</sup> ]	Reálná $\alpha$ PES [m <sup>-1</sup> .ktex <sup>1/2</sup> ]	Průměr [°]	95% IS [°]		Směrodatná odchylka [°]	Variační koeficient [%]
			Spod. mez	Hor. mez		
100	10,70	2,81	2,55	3,08	0,95	33,76
200	21,41	4,69	4,35	5,03	1,24	26,52
300	32,15	6,03	5,67	6,40	1,33	22,05
400	42,92	9,60	9,17	10,04	1,59	16,60
500	53,74	10,76	10,28	11,24	1,73	16,10
600	64,62	13,61	13,19	14,03	1,51	11,07
700	75,61	14,04	13,48	14,60	2,03	14,42
800	86,64	17,30	16,76	17,84	1,89	10,94
900	97,68	19,42	18,69	20,15	2,64	13,58
1000	109,26	20,21	19,42	21,01	2,86	14,14
1500	167,33	26,59	25,81	27,37	2,80	10,53
2000	229,48	35,73	33,94	37,52	6,54	18,31

Tab. 14 Úhel sklonu povrchových vláken POP multifilament

Zákrut [m <sup>-1</sup> ]	Reálná $\alpha$ POP [m <sup>-1</sup> .ktex <sup>1/2</sup> ]	Průměr [°]	95% IS [°]		Směrodatná odchylka [°]	Variační koeficient [%]
			Spod. mez	Hor. mez		
82	10,75	2,48	2,19	2,76	1,02	41,25
163	21,38	6,10	5,84	6,37	0,93	15,26
245	32,19	9,29	9,00	9,58	1,02	11,01
326	42,93	14,07	13,53	14,60	1,96	13,90
408	53,86	14,29	13,49	15,10	2,88	20,13
490	64,86	14,58	13,88	15,28	2,53	17,35
571	75,83	16,01	15,36	16,67	2,36	14,73
653	87,11	17,61	16,78	18,43	2,93	16,63
735	98,52	20,28	19,44	21,11	3,06	15,11
816	109,96	23,17	22,39	23,96	2,79	12,05
1224	170,89	30,62	28,95	32,29	6,11	19,95
1633	238,57	34,86	33,29	36,43	5,75	16,49



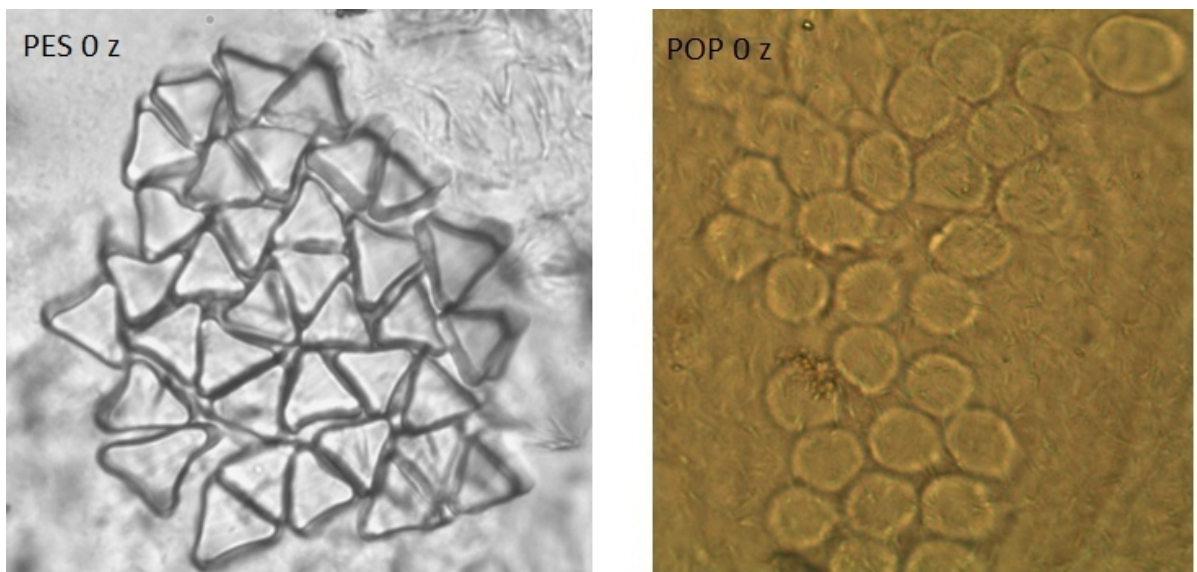
obr. 30 Úhel sklonu povrchových vláken PES a POP a 95% IS

Z obr. 30 můžeme vidět velmi podobný trend křivek POP a PES multifilamentů v závislosti na skutečné hodnotě  $\alpha$  viz. tab. 6. Drobné odchylky jsou pravděpodobně způsobeny jiným materiálem, jinou jemností fibril, jiným počtem fibril, jiným průřezem fibril a s ním spojeným zaplněním. Dalším důvodem drobných odchylek mohou být nepřesnosti měření.

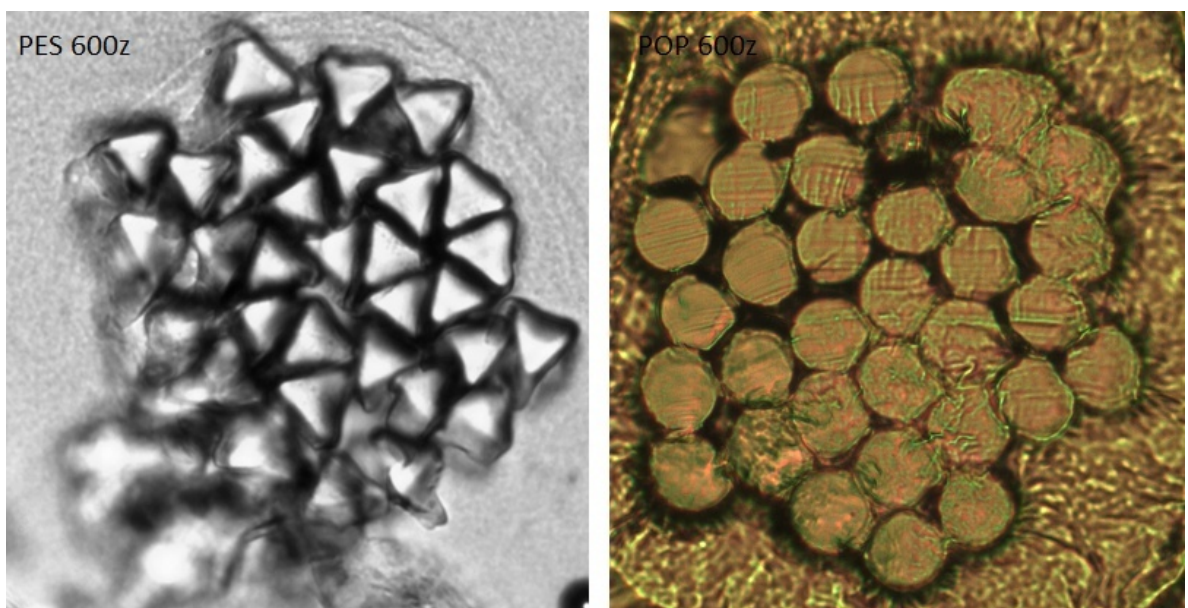
### Uspořádání fibril v příčném řezu

Příčné řezy byly prováděny podle normy pro měkké řezy a tvrdé řezy IN 46-108-01/01. Nezakroucené multifilamenty byly napuštěny zředěným lepidlem na zákrutoměru, poté byly zakrouceny na určitý stupeň zákrutu. Ze zákrutoměru byly multifilamenty umístěny do papírových krabiček, které byly po stranách nastříhány, a na krajích byly přilepeny lepící páskou, aby se nerozkroutily. Následující den byly multifilamenty napouštěny lepidlem o větší koncentraci lepidla a naposled třetí den koncentrovaným lepidlem. Čtvrtý den došlo k uvázání vzorků do vaniček a zalití teplým

voskem s parafínem. Po jeho zaschnutí byly tyto vaničky umístěny do mrazničky. Takto zafixovaný materiál byl umístěn do mikrotomu a byly z něj seřezávány 15  $\mu\text{m}$  tenké plátky. Tyto plátky byly umístěny v řadě na podložné sklíčko, na kterém byl roztok xylenu, aby se vosk s parafínem rozpustily. Podložné sklíčko bylo následně umístěna pod mikroskop. Na podložném sklíčku byly hledány příčné řezy multiflamentů pomocí mikroskopu. Měkké řezy byly prováděny pro nezakroucené multifilamenty, a multifilamenty se zákrutem  $600\text{ m}^{-1}$  a  $2000\text{ m}^{-1}$  viz. obr. 31, 32 a 33.

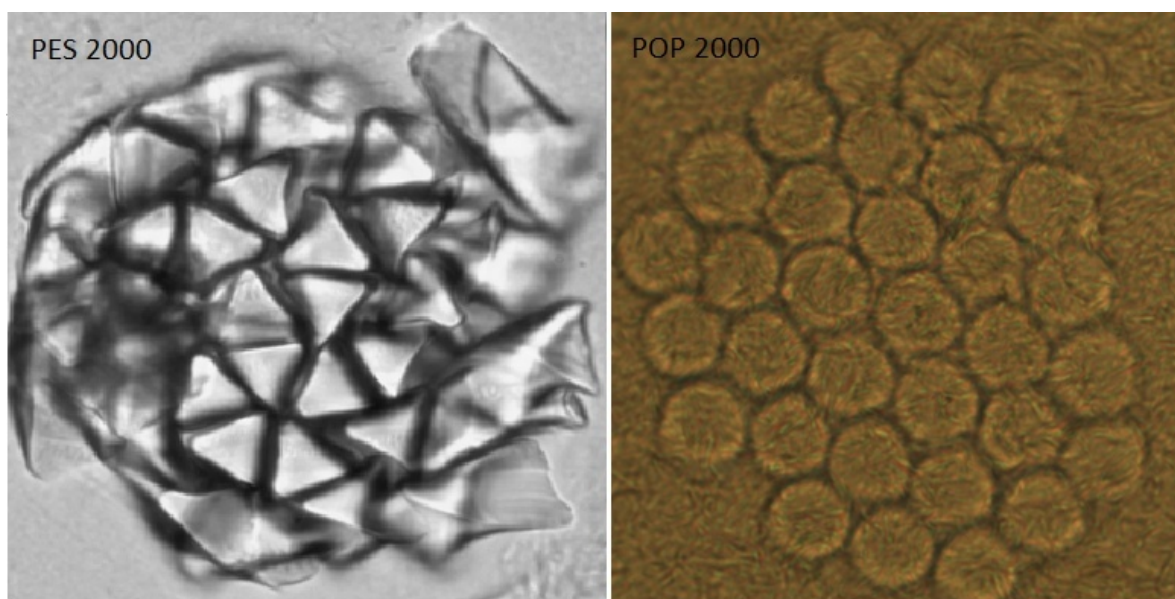


Obr. 31 POP a PES multifilament bez zákrutu

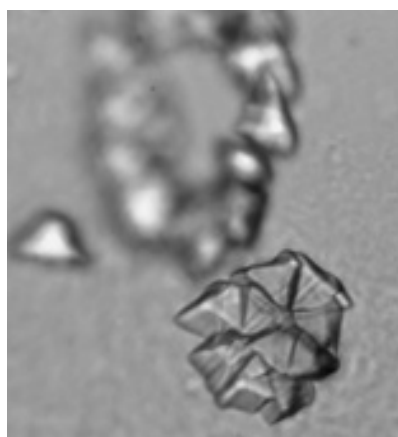


Obr. 32 POP a PES multifilament  $Z = 600\text{ m}^{-1}$





Obr. 33 PES a POP multifilament  $Z = 2000 \text{ m}^{-1}$



Obr. 34 Vypadlí střed z PES multifilamentu

Na příčných řezech viz. obr. 31,32 a 33 (dále také v příloze 4) můžeme vidět, že s rostoucím zákrutem roste zaplnění, což potvrzuje předpoklad, který říká, že vlivem zákrutu dochází snižování průměru délkového vlákného útvaru stlačováním, což má za následek zvyšování zaplnění. V mnoha případech u PES multifilamentů vypadával střed z multifilamentu viz. obr. 34, což bylo zapříčiněno pravděpodobně neproniknutím lepidla do středu multifilamentu a nedošlo k jeho zafixování vlivem sevřené struktury.

## Závěr

Cílem této práce bylo ověření vlivu počtu zákrutů na poměrnou pevnost a tažnost multifilamentu. Dále stanovení úhlu sklonu povrchových fibril k ose multifilamentu při určitém počtu zákrutů. Posledním cílem bylo zjištění uspořádání jednotlivých fibril v multifilamentu pomocí příčných řezů.

Jemnost zakrouceného multifilamentu byla vypočtena na základě znalosti jemnosti jednoduchého multifilamentu a seskání multifilamentu. Měření pevnosti a tažnosti bylo prováděno na přístroji Instron, do kterého byly upínány zakroucené multifilamenty ze zákrutoměru. Pro stanovení úhlu sklonu fibril v multifilamentu byl použit mikroskop a následně z nasnímaných snímků pomocí obrazové analýzy byl měřen úhel sklonu fibril k ose multifilamentu. Uspořádání jednotlivých fibril v multifilamentu bylo zjišťováno metodou měkkých řezů.

Bylo zjištěno, že s rostoucím zákrutem rostou také hodnoty jemnosti u obou typů multifilamentů, jelikož dochází k seskání multifilamentu, což je předpokládáno. Především u POP multifilamentů docházelo k exponenciálnímu nárůstu jemnosti pravděpodobným důvodem je vznik zákrutů druhého řádu při vyšším stupni zákrutu.

Menší navýšení zákrutu, do hodnoty  $Z=600\text{m}^{-1}$  s odpovídajícím Koechlinovým zákrutovým koeficientem  $\alpha=64,16$ , způsobovalo navýšení pevnosti pouze u PES multifilamentů. Následně dochází k poklesu pevnosti PES multifilamentů až k nejvyššímu měřenému zákrutu  $Z=2000\text{m}^{-1}$ . Důvodem prvotního navýšení pevnosti je zvýšení koherentních sil mezi fibrilami díky zákrutu, jelikož fibrily v multifilamentu při nulovém zákrutu nepůsobí jako celek. Následné snižování pevnosti je způsobeno zvyšováním úhlu sklonu fibril k ose multifilamentu, což zapříčiňuje snížení využití tahové síly jednotlivých fibril v multifilamentu. U POP multifilamentů k navýšení pevnosti nedocházelo pravděpodobně z důvodů jiného materiálu, jiného průřezu fibril a jiné jemnosti fibril. Při vyšším zákrutu docházelo k snížení pevnosti, což se shoduje s předpoklady.

S rostoucím zákrutem se zvyšovala tažnost u PES multifilamentů. Tento fakt odpovídá předpokladům, které říkají, že s rostoucím zákrutem se zvyšuje seskání a tím pádem je větší zásoba materiálu v multifilamentu na prodlužování. POP multifilamenty mely vysokou variabilitu tažnosti a neodpovídali předpokladům. Příčinou je pravděpodobně obecně vysoká variabilita tažnosti POP materiálu 15-60%. Odlišný trend je nejspíše způsoben dodlužování multifilamentu již na zákrutoměru při vyšších zákrutech nebo k dodlužování vůbec nedochází.

Úhel sklonu vláken v závislosti na  $\alpha$  se téměř shodoval s předpoklady u obou materiálů. Předpoklady tvrdí, že s rostoucím zákrutem roste úhel sklonu vláken v závislosti na seskání (12). Drobné odchylky byly způsobeny nejspíše jiným materiálem, jinou jemností fibril, jiným průřezem fibril a s ním spojeným zaplněním.

U příčných řezů docházelo vlivem zákrutu k zvyšování zaplnění a s rostoucím zákrutem se průřez multifilamentu přibližoval tvaru kruhu u obou typů multifilamentů. Dle předpokladů se zvyšuje zaplnění díky svírání struktury vlivem zvyšování zákrutu.

Na závěr bych rád zmínil určité úskalí této práce. Vzhledem k jemnosti PES multifilamentů byl složitý výběr čelistí pro měření na Instronu. Nakonec byly zvoleny čelisti ovíjecí. Upínání multifilamentů do čelistí ovíjecích je složitější a prodlouží se tím doba měření, ale k prokluzům nedochází. Dále jak je v práci uvedeno, nemohl být použit viják pro měření jemnosti, jelikož také docházelo k prokluzům multifilamentů a hodnoty jemnosti se naopak s rostoucím zákrutem snižovaly, proto doporučuji měření jemnosti z kratších délek, ale větší počet měření. Dále bych zde zmínil, že při vysokých zákrutech byl problém s nedostatečnou fixací multifilamentů pro příčné řezy vlivem sevřené struktury, proto bych doporučil zvolit metodu tvrdých řezů.



## Zdroje

- 1) Schwarz, P. (editor). *Structure and mechanics of textile fibre assemblies*. USA, 2008. ISBN 9781845691356
- 2) Militký, J. *TEXTILNÍ VLÁKNA Klasická a speciální*, Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-844-1
- 3) Fototapety [online]. Pixers™ [vid. 25.4.2016]. Dostupné z: <http://pixers.cz/fototapety/polyethylentereftalatovy-polyester-strukturni-vzorec-38605773>
- 4) Polypropylén [online]. Wikipedia [vid. 20.4.2016]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polypropylen#/media/File:Polypropylene.svg>
- 5) Ursíny, P. *Spřádání bavlnářským způsobem II.*, Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1991. ISBN 80-7083-053-0
- 6) Neckář, Bohumil. *Příze a hedvábí 1 [přednáška]*. Technická univerzita Liberec, 2015
- 7) NECKÁŘ, B. *Příze – tvorba, struktura, vlastnosti*. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-03-00213-3.
- 8) Saville, B. P. *Physical testing of textiles*. England, 1999. ISBN 9781855733671
- 9) ČSN EN ISO 2061. *Textilie - Zjišťování zákrutů nití - Metoda přímého počítání*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, únor 2011.
- 10) Ursíny, P. *Teorie předení I.*, Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1992. ISBN 80-7083-102-2
- 11) Hearle, J. W. S., Grosberg, P., Backer, S. *Structural mechanics of fibers, yarn and fabrics*. USA, 1969. ISBN 9780471366690
- 12) Neckář, Bohumil. *Příze a hedvábí 2 [přednáška]*. Technická univerzita Liberec, 2015
- 13) ČSN EN ISO 2062. *Textil - nitě v návinech - Textilie – Nitě na návinech – Zjišťování pevnosti a tažnosti jednotlivých nití při přetrhu pomocí přístroje s konstantní rychlostí prodloužení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii, a státní zkušebnictví, červenec 2010
- 14) Neckář, Bohumil. *Příze a hedvábí 3 [přednáška]*. Technická univerzita Liberec, 2015
- 15) Hájská, Šárka. *Mechanicko-fyzikální vlastnosti skaného multifilového hedvábí*, Liberec: TUL 2014. Bakalářská práce, TUL, Fakulta textilní, Katedra textilních technologií

- 16) Aritmetický průměr [online]. Wikipedia [vid. 8.5.2016]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Aritmetický\\_průměr](https://cs.wikipedia.org/wiki/Aritmetický_průměr)
- 17) Směrodatná odchylka [online]. Wikipedia [vid. 8.5.2016]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Směrodatná\\_odchylka](https://cs.wikipedia.org/wiki/Směrodatná_odchylka)
- 18) Intervalové odhady [online]. Západočeská univerzita [vid. 8.5.2016]. Dostupné z : <http://home.zcu.cz/~sediva/stav/kap06.pdf>
- 19) Modul základní statistika [online]. TriloByte Statistical Academy. [vid. 10.5.2016]. Dostupné z: [http://www.trilobyte.cz/downloadfree/qcemanual/basic\\_statistics.pdf](http://www.trilobyte.cz/downloadfree/qcemanual/basic_statistics.pdf)

### **Seznam obrázků**

- Obr. 1. Postup výroby multifilament a monofilament dle [1]
- Obr. 2. Strukturální vzorec polyesteru dle [3]
- Obr. 3. Podélný pohled PES vláken dle [2]
- Obr. 4. Strukturální vzorec polypropylénu dle [4]
- Obr. 5. Podélný a příčný pohled POP vláken dle [2]
- Obr. 6. Schéma průřezu DVÚ dle [6]
- Obr. 7. Schéma podélného pohledu DVÚ dle [6]
- Obr. 8. Schéma zákrutoměru dle [8]
- Obr. 9. Schéma šroubovicového modelu dle [7]
- Obr. 10. Schéma trojúhelníku vzniklého ze zakrouceného DVÚ dle [6]
- Obr. 11. Vznik zákrutu druhého řádu dle [7]
- Obr. 12. Schéma tahové křivky síly v závislosti na protažení dle [8]
- Obr. 13. Schéma prokluzu v upínacích čelistech dle [8]
- Obr. 14. Tahová křivka síly v závislosti na protažení dle [8]
- Obr. 15. Tahové křivky (viscose, tenasco, viscose, nylon, acetate, terylene) dle [11]
- Obr. 16. Schéma tahové síly ve vlákně dle [7]
- Obr. 17. Schéma změny obsahu vlákna v příčném řezu v zakrouceném DVÚ dle [7]

- Obr. 18. Schéma poměrů zatíženého a nezatíženého DVÚ dle [6]
- Obr. 19. Teoretický přetrh multifilamentu v závislosti na úhlu sklonu fibril dle [11]
- Obr. 20. Teoretická síla do přetrhu v závislosti na sklonu fibril dle [11]
- Obr. 21. Teoretické počátky přetrhu multifilamentu dle [11]
- Obr. 22. Příčný řez POP multifilamentu
- Obr. 23. Příčný řez PES multifilamentu
- Obr. 24. Jemnost v závislosti na zákrutu a 95% IS
- Obr. 25. Zákrut druhého řádu POP multifilamentu
- Obr. 26. Poměrná pevnost POP a PES s 95% IS
- Obr. 27. Tažnost POP a PES s 95% IS
- Obr. 28. Tahové křivky POP a PES multifilamentů bez zákrutu z Instronu a jejich příčné řezy
- Obr. 29. Měření úhlu sklonu fibril v multifilamentu
- obr. 30. Úhel sklonu povrchových vláken PES a POP a 95% IS
- Obr. 31. POP a PES multifilament bez zákrutu
- Obr. 32. POP a PES multifilament  $Z = 600 \text{ m}^{-1}$
- Obr. 33. PES a POP multifilament  $Z = 2000 \text{ m}^{-1}$
- Obr. 34. Vypadlí střed z PES multifilamentu

### **Seznam tabulek**

- Tab. 1. Rozsah zákrutů použitých pro experiment a odpovídající jmenovitá hodnota zákrutového koeficientu
- Tab. 2. Použité předpětí pro zákrutoměr a Instron
- Tab. 3. Jemnosti nezakroucených multifilamentů
- Tab. 4. Seskání a jemnost pro PES
- Tab. 5. Seskání a jemnost pro POP
- Tab. 6. reálná  $\alpha$  v závislosti na reálné jemnosti
- Tab. 7. Počet zákrutů a upínací délka pro PES
- Tab. 8. Počet zákrutů a upínací délka pro POP
- Tab. 9. Poměrná pevnost PES

Tab. 10 Poměrná pevnost POP

Tab. 11 Tažnost PES

Tab. 12 Tažnost POP

Tab. 13 Úhel sklon povrchových vláken PES multifilament

Tab. 14 Úhel sklonu povrchových vláken POP multifilament

## **Seznam Příloh**

Příloha 1 Jemnost

Příloha 2 Pevnost a tažnost

Příloha 3 Úhel sklonu povrchových vláken

Příloha 4 Uspořádání fibril v příčném řezu

P1. Tab.1 Dílčí hmotnosti pro výpočet jemnosti nezakrouceného multifilamentu

PES nezakroucený multifilament hmotnost 0,5m [g]	POP nezakroucený multifilament hmotnost 0,5m [g]
0,00577	0,00858
0,0056	0,00851
0,00568	0,00847
0,0057	0,00856
0,00567	0,00862
0,00572	0,00847
0,0057	0,00848
0,0057	0,00864
0,00573	0,00857
0,00573	0,0086
0,00574	0,00865
0,00571	0,00859
0,00569	0,00859
0,00578	0,00867
0,00579	0,00857
0,00573	0,00868
0,00575	0,00859
0,00577	0,00858
0,00572	0,00851
0,00568	0,0087

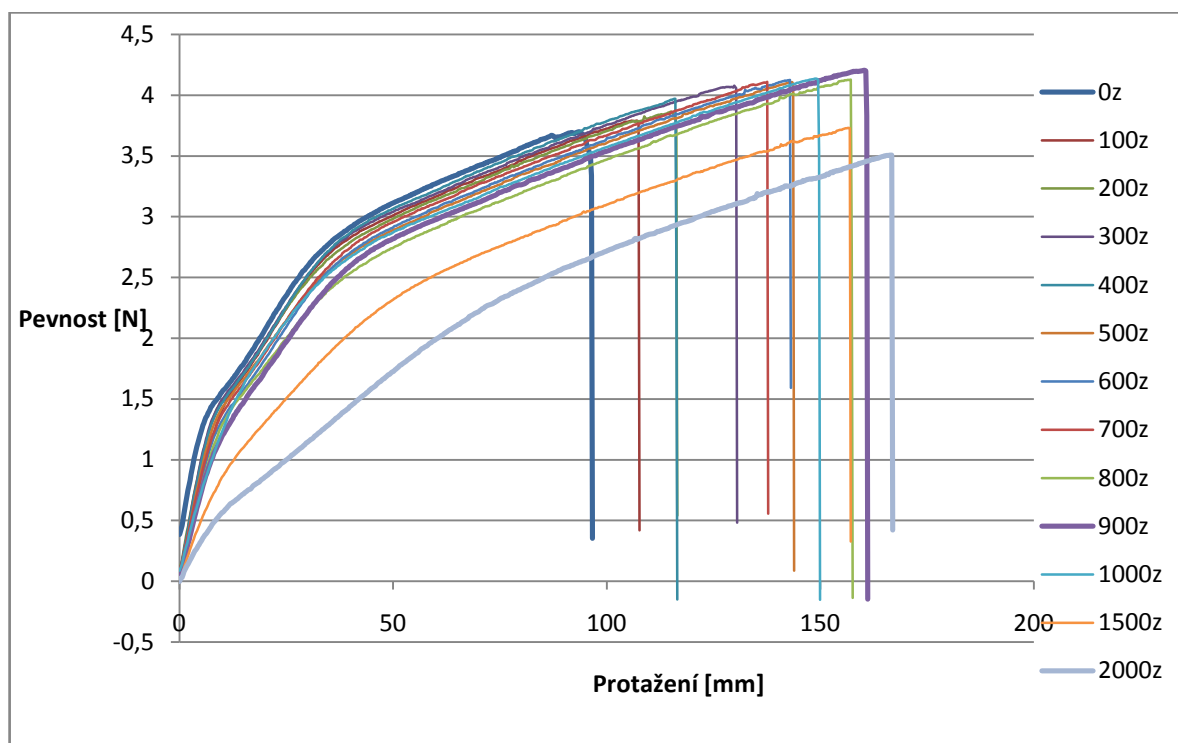
P1. Tab. 2 dílčí hodnoty zkrácení 0,5m při zakroucení na určitý počet zákrutů pro výpočet jemnosti zakroucených PES multifilamentů

100 m <sup>-1</sup>	200 m <sup>-1</sup>	300 m <sup>-1</sup>	400 m <sup>-1</sup>	500 m <sup>-1</sup>	600 m <sup>-1</sup>	700 m <sup>-1</sup>	800 m <sup>-1</sup>	900 m <sup>-1</sup>	1000 m <sup>-1</sup>	1500 m <sup>-1</sup>	2000 m <sup>-1</sup>
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0,25	1	2	3,25	5	7,1	9,9	12,7	14,6	20	41,1	65,8
0,25	1	2	3,5	5	7,2	9,8	12,2	14,7	19,2	41,2	66,2
0,25	1	2	3,75	5,1	7,4	9,9	12,8	14,9	18,9	40,8	65,8
0,25	1	2	3,75	5,2	7	9,8	12,8	14,9	18,9	40,1	65,8
0,25	1	2	3,5	5,1	7,4	9,8	12,2	14,2	19	40,2	65,9
0,25	1	2	3,25	5	7	10	12,3	14,9	19	40,5	65,6
0,25	1	2	3,5	5	7,1	9,8	12,3	14,9	19,5	40,2	65,1
0,25	1	2	3	5,1	7	9,9	12,4	14,9	19	41	65,9
0,25	1	2	3,5	5,2	7,2	9,9	12,1	14,2	18,8	40,2	65,2
0,25	1	2	3,5	5,1	7	9,8	12,2	14,6	18,9	40,6	65
0,25	1	2	3,25	5,3	7	9,6	12,2	14,5	19,1	41,5	64,9
0,25	1	2	3,25	5,2	6,9	9,8	12,7	14,4	19,2	39,8	65,8
0,25	1	2	3,25	5	7,1	10	12,4	14,4	19,2	41,9	65,9
0,25	1	2	3,75	5,1	7,3	9,8	12,9	14,3	19,1	40	65,2
0,25	1	2	3,25	5,2	7,2	9,9	12,3	14,9	19,9	39,8	65,9
0,25	1	2	3,25	5,1	7	9,8	12,6	14,8	19,2	40	65,8
0,25	1	2	3,25	5,1	7	10	12,8	14,4	19,3	40,5	65,9
0,25	1	2	3	5,3	7	10,1	12,9	14,9	19,1	39,9	65,8
0,25	1	2	3,5	5	7,1	10	13	14,3	19,8	40,9	66,2
0,25	1	2	3,75	5,1	7,2	9,9	12,4	14,3	19,9	40,6	65,8

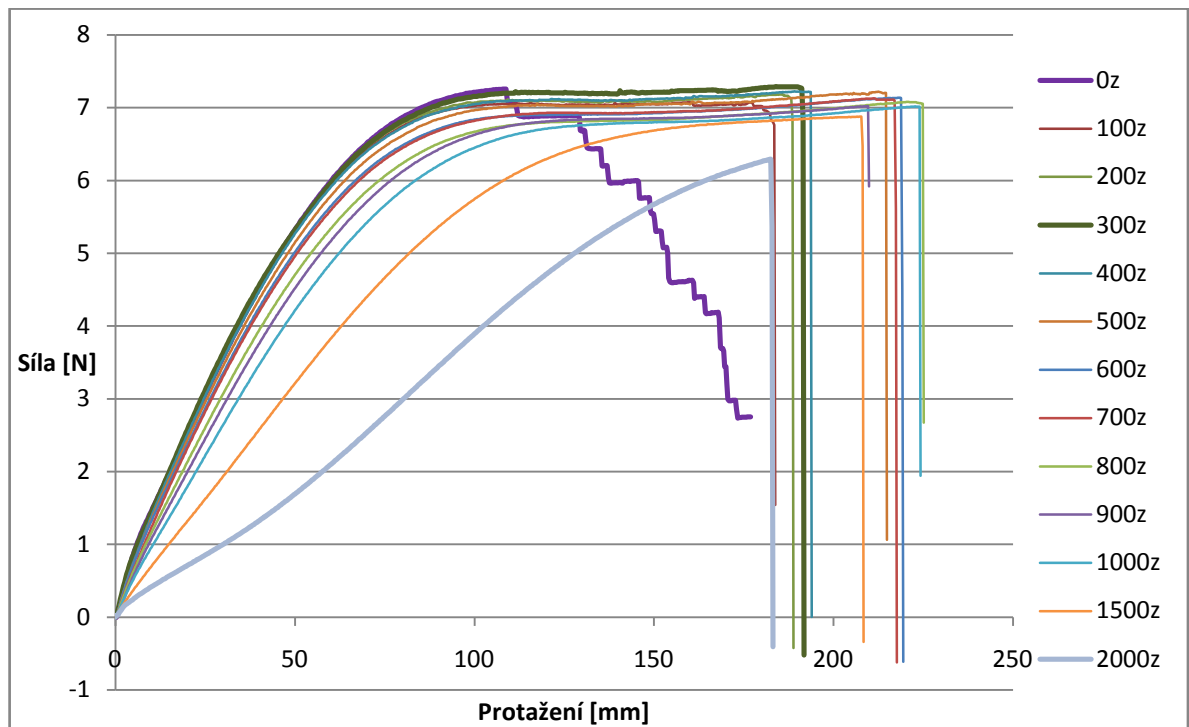
P1. Tab.3 dílčí hodnoty zkrácení 0,5m při zakroucení na určitý počet zákrutů pro výpočet jemnosti zakroucených POP multiflamentů

82 m <sup>-1</sup> [mm]	163 m <sup>-1</sup> [mm]	245 m <sup>-1</sup> [mm]	326 m <sup>-1</sup> [mm]	408 m <sup>-1</sup> [mm]	490 m <sup>-1</sup> [mm]	571 m <sup>-1</sup> [mm]	653 m <sup>-1</sup> [mm]	735 m <sup>-1</sup> [mm]	816 m <sup>-1</sup> [mm]	1224 m <sup>-1</sup> [mm]	1633 m <sup>-1</sup> [mm]
0,5	1,2	2,8	5	7,6	10,2	13,8	17,9	22,1	27	60,2	96,8
0,4	1,4	3	5	7,5	10	13,3	17,8	22,1	27	59,5	97,8
0,4	1,3	2,8	5,1	7,5	10,1	13,2	17,9	22,2	27,9	60,2	98
0,4	1,2	2,9	5,2	7,7	10,3	13,8	18,5	22,1	27,9	59,8	98,2
0,5	1,2	2,8	5,1	7,3	10,2	13,5	17,5	22,5	27,8	59,9	97
0,5	1,3	2,8	5	7,6	10,2	12,8	17,9	22,5	27	59,9	97,9
0,5	1,2	2,9	5	7,3	10,1	13,4	17,8	22,8	27,6	59,5	98
0,4	1,3	2,6	5,1	7,6	10,1	13,1	17,8	22,3	26,9	60,2	98,1
0,4	1,2	2,8	5,2	7,7	10,2	13,1	17,8	22,6	27	59,6	98,6
0,5	1,2	2,8	5,1	7,3	10,3	13,2	18	23	27,6	59,6	99
0,4	1,3	2,9	5,3	7,3	10,2	13,8	17,8	22,8	27,2	59,9	98
0,5	1,2	2,8	5,2	7,5	10,3	13,5	17,6	22,7	27,7	59,3	98,5
0,4	1,4	2,8	5	7,4	10,2	13,2	17,8	22,2	27,8	59,9	97,8
0,5	1,3	2,9	5,1	7,1	10,1	13,7	17,8	22,5	27	59,5	97,6
0,5	1,2	2,9	5,2	7,5	10,3	13,8	17,5	22	27,8	58,9	98
0,5	1,3	2,8	5,1	7,2	10,1	13,8	17,3	22,3	27,5	59,8	97,1
0,5	1,4	2,8	5,1	7,8	10,3	13,2	17,9	22	27,2	60,2	97,9
0,4	1,2	2,9	5,3	7,5	10,3	13,6	17,2	22,8	27,8	60,2	98,8
0,5	1,2	2,9	5	7,8	10,1	13,5	17,2	22	27,8	60	98,5
0,4	1,1	2,8	5,1	7,4	9,8	13,5	17,9	22,2	27,7	59,2	97,2

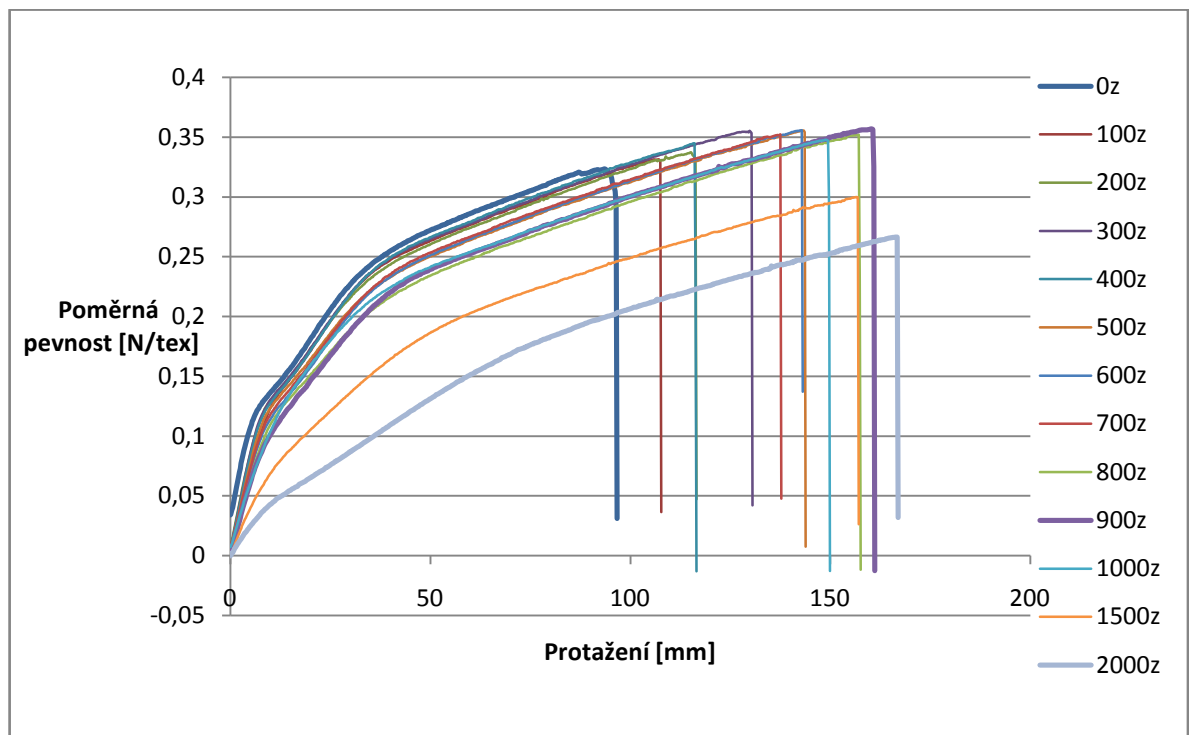
P2. graf 1 Průměrné tahové křivky síly v závislosti na protažení při daném stupni zákrutu pro PES multifilamenty



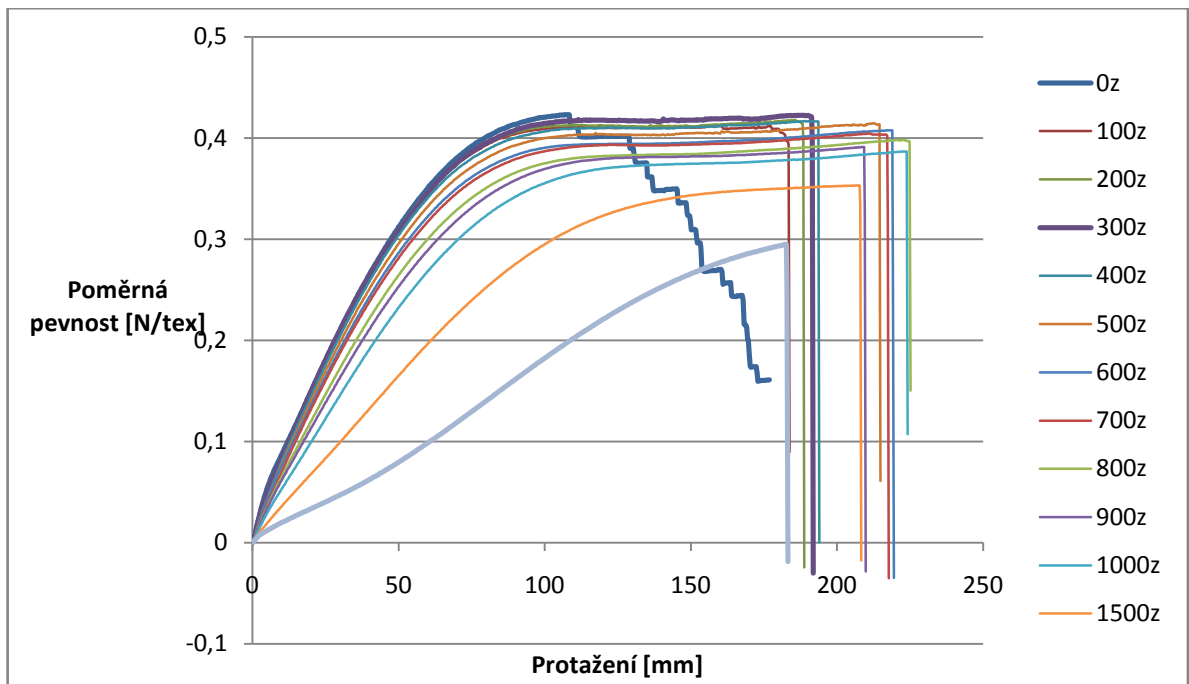
P2. graf 2 Průměrné tahové křivky síly v závislosti na protažení při daném stupni zákrutu pro POP multifilamenty



P2. graf 3 Průměrné tahové křivky poměrné pevnosti v závislosti na protažení při daném stupni zákrutu pro PES multifilamenty



P2. graf 4 Průměrné tahové křivky poměrné pevnosti v závislosti na protažení při daném stupni zákrutu pro POP multifilamenty



P3. obr. 1 podélné pohledy PES multifilamentů  $Z=100m^{-1}$





P3. obr. 2 podélné pohledy PES multiflamentů  $Z=600\text{m}^{-1}$



P3. obr. 3 podélné pohledy PES multiflamentů  $Z=2000\text{m}^{-1}$



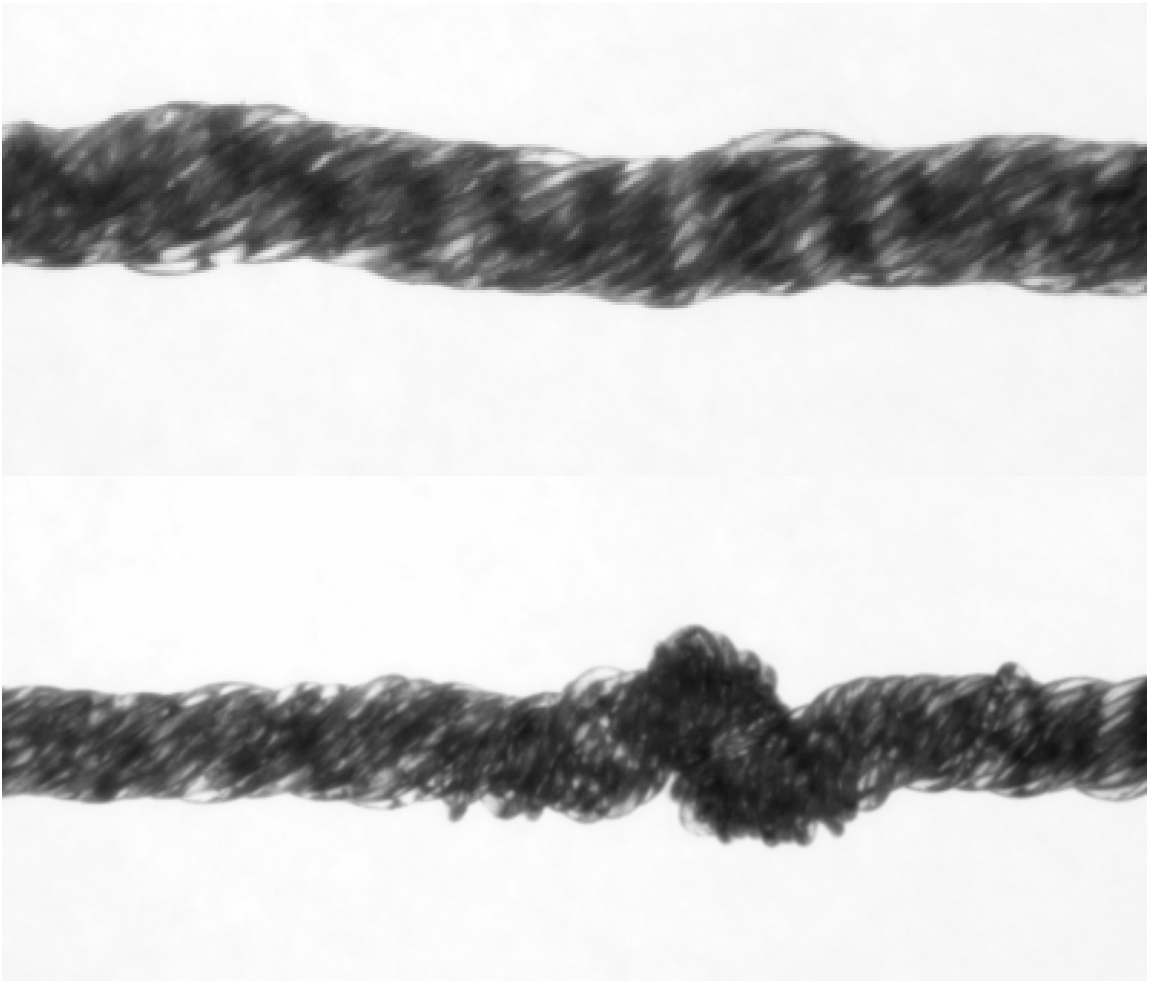
P3. obr. 4 podélné pohledy POP multifilamentů  $Z=100\text{m}^{-1}$



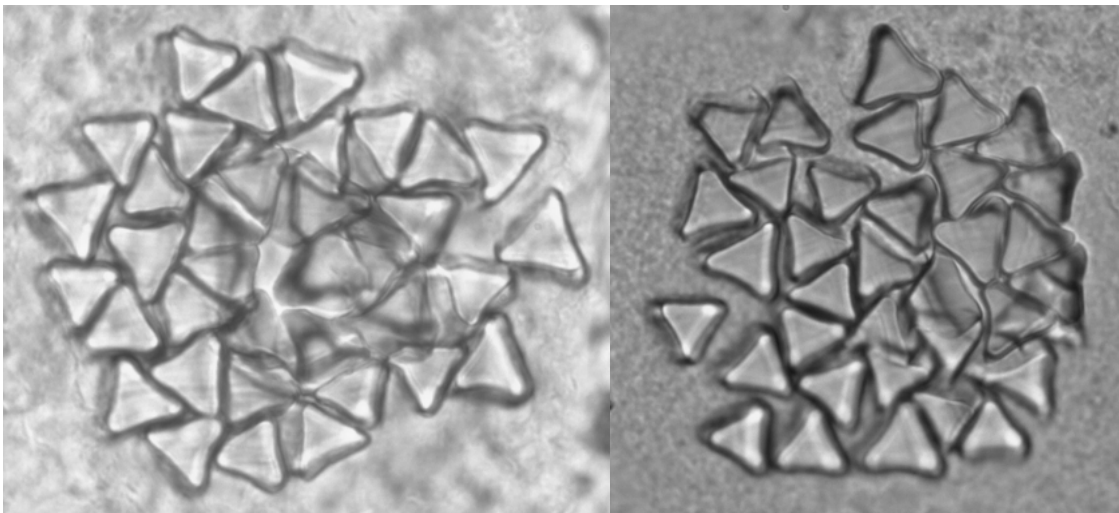
P3. obr. 5 podélné pohledy POP multifilamentů  $Z=600\text{m}^{-1}$



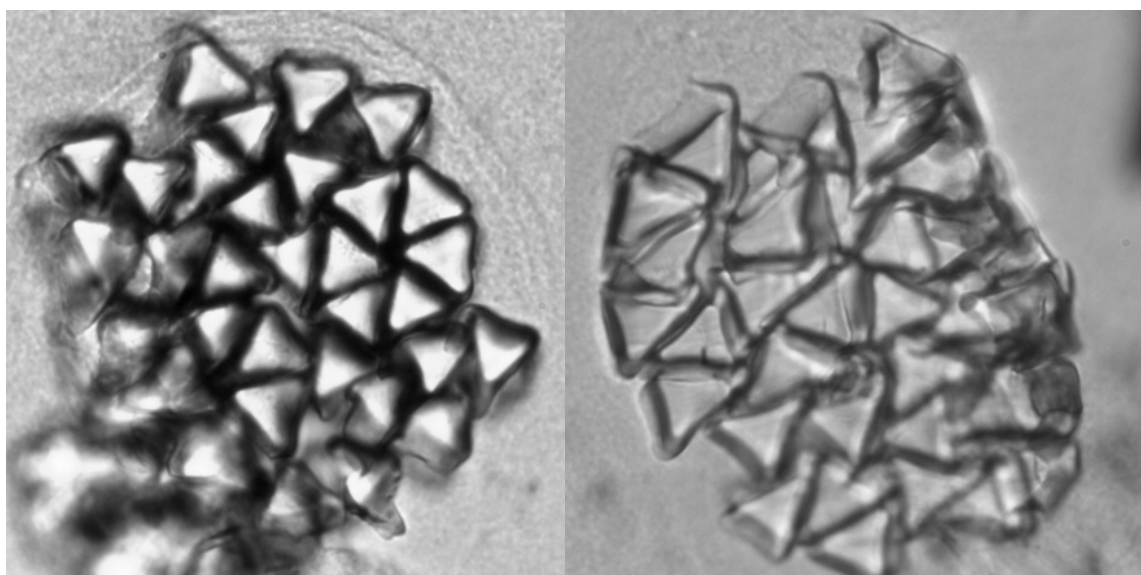
P3. obr. 6 podélné pohledy POP multifilamentů  $Z=200m^{-1}$



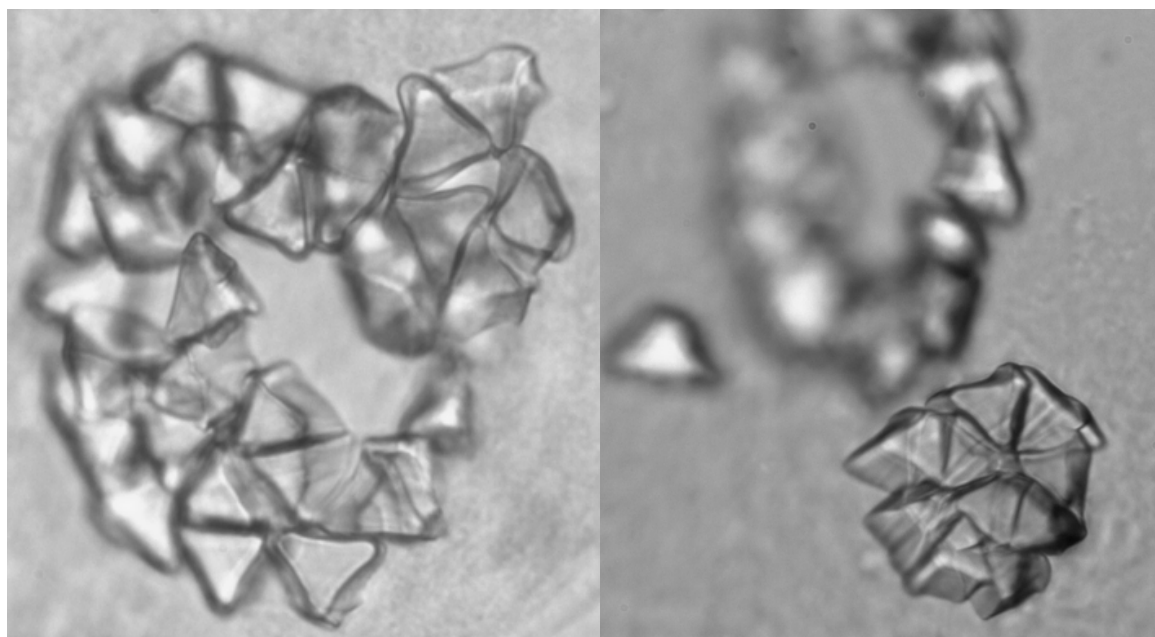
P4. obr.1 Příčné řezy PES multifilamentů bez zákrutu



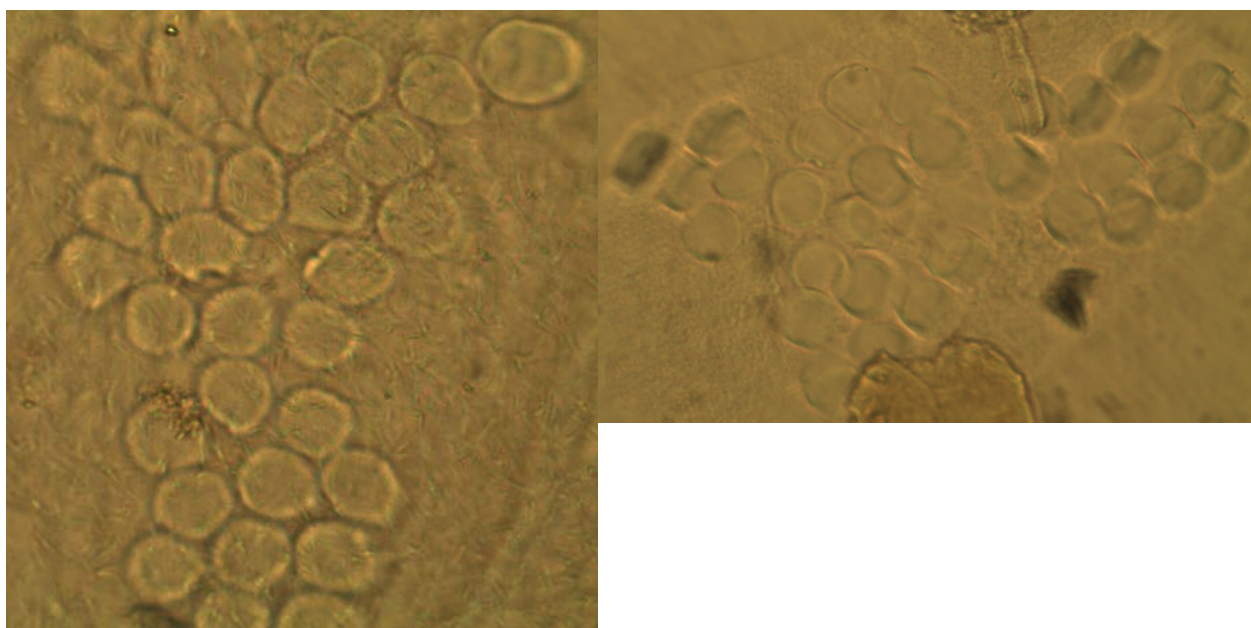
P4. obr. 2 příčné řezy PES multifilamentů  $Z=600\text{m}^{-1}$



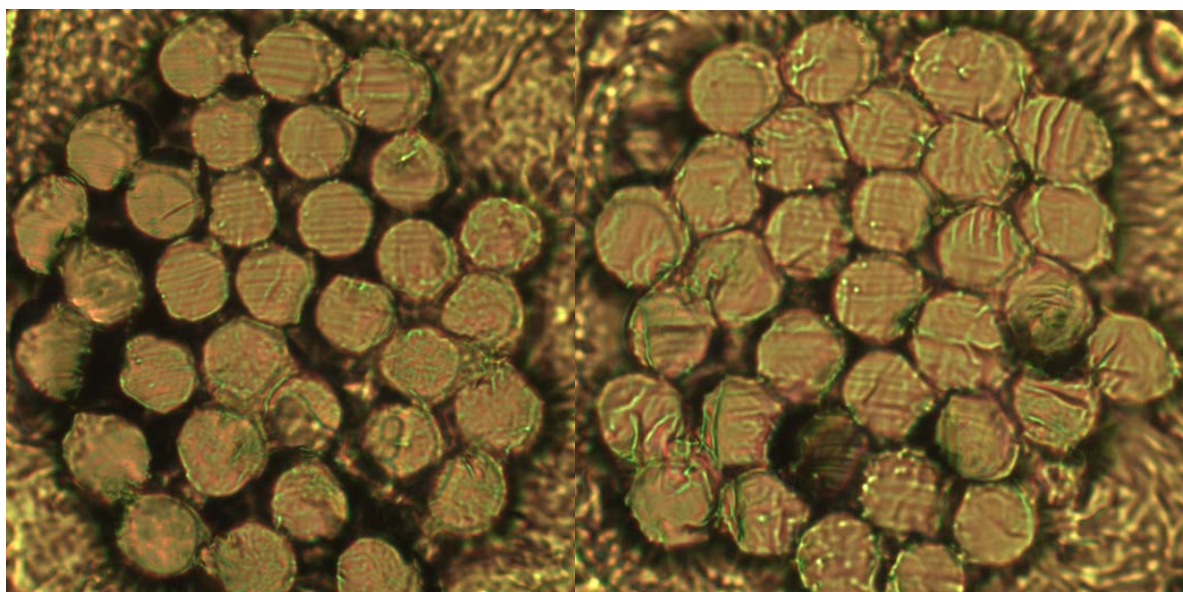
P4. obr. 3 příčné řezy PES multifilamentů  $Z=2000\text{m}^{-1}$



P4. obr. 4 příčné řezy POP multifilamentů bez zákrutu



P4. obr. 5 příčné řezy POP multifilamentů  $Z=600\text{ m}^{-1}$





P4. obr. 6 příčné řezy POP multifilamentů  $Z=2000\text{ m}^{-1}$

