

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Katedra textilních struktur



Disertační práce

Analýza příčných řezů tkaniny

Analysis of Fabric Cross-sections

Vypracovala: Ing. Jana Drašarová
Školitel: Prof. Ing. Bohuslav Neckář, Dr.Sc.

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146115283

Počet stran: 77

Počet příloh: 3

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Univerzitní knihovna
Voroněžská 1529, Liberec
PSČ 461 17

U 595 T

77, [17] 1. vyd.
ob. 1. vyd.

Poděkování

Bohoušovi za to, že mě naučil plavat. Profesoru Militkému za to, že mě hodil do vody. Oběma za to, že mi poskytovali cenné rady – ze břehu. Svým přátelům a kolegům za to, jak mi fandili a rodině za poskytnutí první pomoci...

Děkuji.

Prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracovala samostatně s využitím uvedené literatury.

Jana Drašarová

Anotace

V práci jsou formulovány zákonitosti deformace příčného řezu příze a multifilu ve vazném bodě tkaniny. Pro zhodnocení zákonitostí deformace příčného řezu niti je použit model kontinua. Pro formulaci geometrických modelů tkaniny je použita teorie textilních vláknenných útvarů a přízí.

Experimenty jsou zaměřeny na hodnocení geometrických parametrů bavlnářských tkanin. Pro stanovení základních trendů chování multifilu jsou zařazeny i experimenty prováděné na tkaninách vyrobených z multifilu. Pro hodnocení deformace niti ve vazném bodě jsou použity metody analýzy řezů tkaniny. K problematice deformability délkových textilií ve vazném bodě jsou provedeny jako doplňkové experimenty simulace vazného bodu křížením nití a stlačování niti mezi dvěma rovnoběžnými deskami.

Pro bavlnářské tkaniny jsou stanoveny parametry vazné vlny příze ve tkanině. Pro tyto tkaniny jsou navrženy charakteristické hodnoty, které slouží k modelování geometrie vazné vlny. Dále jsou sledovány souvislosti deformace příze ve vazném bodě tkaniny s dalšími parametry struktury tkanin a charakteristikami porózity bavlnářských tkanin.

Annotation

The thesis introduces a new approach for description and evaluation of fabric geometry. The law fullness of staple and multifilament yarn cross-sections deformation in fabrics binding point are formulated. The rules of yarns cross-section deformation are estimated by model of continuum. The theories of textile yarn formation are used for fabrics geometric models formulation.

A set of experiments is focused on the evaluation of geometrical parameters of cotton fabrics. Another set of experiments was carried out on fabrics made from multifilament yarn to determine the behavior of multifilament yarn in binding point. New methods for investigation of fabric geometrical structure by means of fabric cross-sections were developed and verified. Additional experiments for simulation of binding point and experiments of yarn compression between two parallel plates are provided.

The yarn binding-wave parameters of cotton fabrics in warp and weft directions are measured. The characteristic values for designing of binding-wave parameters are calculated. The relations between yarn deformation in binding point and other parameters of fabric structure and also porosity of cotton fabrics are monitored.

Annotation

In dieser Arbeit sind die Deformationsprinzipien des Garns und Multiphilament-Querschnitten in Abbindepunkt des Gewebes formuliert. Kontinuum mechanischen Modellen ist angewendet für die Beschreibung von Deformationsprinzipien des Garns. Für die Formulierung von geometrischen Modellen, die Theorie des Textilfaserngebildes und Garns angewendet war.

Experimente sind ausgeführt für Auswertung die geometrischen Parameter des Baumwollgewebes. Für Feststellung die Hauptverhalten der Multiphilamenten sind die Experimente an den Multiphilamentgewebe angewendet. Für die Auswertung von Garndeformation in Abbindepunkt des Gewebes sind die Methoden der Garnschnittanalyse angewendet. Zur Problematik der Längentextiliendeformationen im Abbindepunkt sind Nachsatzexperimente für die Simulation des Abbindepunkts vermittelt der Zwirnkreuzung und Zwirnverdichtung zwischen zwei Parallelplatten verübt.

Die Abbindewellenparametern des Garns im Gewebe sind eingestellt. Die charakteristischen Werte zur Modellierung der Abbindewellegeometrie waren konzipiert. Die Garndeformationbeziehungen im Gewebeabbindepunkt mit anderen Strukturparametern des Gewebes und die Porositätscharakteristiken des Baumwollgewebes waren observiert.

Seznam symbolů a zkratk

a	[m]...	šířka příčného řezu niti
am	[ktex ^{2/3} m ⁻¹]...	Phrixův zákrutový koeficient
A_o	[m]...	rozteč osnovních nití
A_u	[m]...	rozteč útkových nití
A_p	[m ²]...	efektivní otevřená plocha póru
b	[m]...	výška příčného řezu niti
c_{ij}	[Pa]...	složky tenzoru poměrných sil
d	[m]...	průměr niti
d_e	[m]...	průměr vláken
d_o	[m]...	průměr osnovní niti
d_p	[m]...	efektivní průměr póru
d_s	[m]...	substanční průměr niti
d_u	[m]...	průměr útkové niti
D_o	[m ⁻¹]...	dostava osnovy
D_u	[m ⁻¹]...	dostava útku
E_{ij}	[Pa]...	tenzor modulů pružnosti
$\bar{E}_{ij}$	[Pa]...	složky tenzoru modulů pružnosti
F	[1]...	materiálový deformační gradient
F	[N]...	tahová síla ve střednici niti
F_o	[N]...	tahová síla ve střednici osnovní niti
F_u	[N]...	tahová síla ve střednici útkové niti
G	[kgm ⁻²]...	plošná hmotnost tkaniny
h_o	[m]...	výška zvlnění osnovy
h_u	[m]...	výška zvlnění útku
H	[m]...	rozteč os nití ve vazném bodě
I	[1]...	jednotková matice
J	[1] ...	jakobián materiálového deformačního gradientu
K	[m]...	modifikovaná intenzita zákrutu příze
l_o	[m]...	délka niti v úseku tkaniny l_{to}
l_u	[m]...	délka niti v úseku tkaniny l_{tu}
l_{to}	[m]...	délka tkaniny ve směru osnovy
l_{tu}	[m]...	délka tkaniny ve směru útku
L_i	[m]...	obvod příčného řezu niti
M	[m]...	souhrnná materiálová konstanta výpočtu zaplnění příze
M_o	[Nm]...	ohybový moment osnovní niti
M_u	[Nm]...	ohybový moment útkové niti

N, N_o, N_u	[N] ...	normálová síla mezi osnovní a útkovou niti
p	[Pa]...	tlak
Δp	[Pa]...	tlaková difference
R	[1] ...	tenzor rotace
r	[m]...	velikost podstavy měřicího přípravku simulace vazného bodu křížením nití
s	[m]...	výška měřicího přípravku simulace vazného bodu křížením nití
s_o	[1]...	setkání osnovní niti
s_u	[1]...	setkání útkové niti
S_B	[Pa]...	Biotův tenzor napětí
S	[m ²]...	substanční plocha průřezu niti
S_c	[m ²]...	celková plocha řezu útvarem
S_i	[m ²]...	plocha příčného řezu niti
t_f	[tex]...	jemnost vláken
t	[m]...	tloušťka tkaniny
T	[tex]...	jemnost příze
T_o	[N]...	složka tahové síly ve střednici osnovní niti do tkací roviny
T_u	[N]...	složka tahové síly ve střednici útkové niti do tkací roviny
V	[m ³]...	objem vláken
V_p	[m ³]...	objem pórů
V_c	[m ³]...	celkový objem útvaru,
v_T	[m]...	výška těžiště v průřezu niti
W_p	[m]...	smáčený obvod otvorů mezi nitěmi ve tkanině
Z_C	[1]...	součinitel plošného zakrytí tkaniny
Z_o	[1]...	součinitel plošného zakrytí osnovními nitěmi
Z_u	[1]...	součinitel plošného zakrytí útkovými nitěmi
Z	[m ⁻¹]...	zákrut niti
Z_p	[1]...	zploštění niti
Z_h	[1]...	zhuštění niti

α	[1]...	poměrná šířka příčného řezu niti
α_{ef}	[1]...	podíl efektivní otevřené plochy pórů
β	[1]...	poměrná výška příčného řezu niti
β_{red}	[°]...	sklon vlákna na redukovaném poloměru příze
δ	[°]...	relativní odchylka
Δ_i^j	[m]...	deformace vzorku ve směru j při namáhání ve směru i
ε_1	[1]...	relativní stlačení příčného řezu niti
ε_2	[1]...	relativní rozšíření příčného řezu niti
ε_{ij}^p	[1]...	tenzor protažení
ε_{ij}	[1]...	složky tenzoru deformace
$\gamma, \gamma_o, \gamma_u$	[°]...	úhel vazné vlny niti ve tkanině, osnovy, útku
γ_1, γ_2	[°]...	označení úhlů při aproximaci vazné vlny niti ve tkanině
λ	[1]...	poměrné stlačení tkaniny
μ	[1]...	zaplnění textilního vlákenného útvaru
μ_m	[1]...	mezní tj. limitní zaplnění příze
μ_d	[1]...	zaplnění na průměru příze
ν	[1]...	zobecněné Poissonovo číslo
π	...	Ludolfovo číslo
ρ	[kgm ⁻³]...	měrná hmotnost vláken
Σ	[Pa]...	Cauchyho tenzor napětí
ξ_o	[1]...	relativní výška zvlnění osnovní niti
ξ_u	[1]...	relativní výška zvlnění útkové niti
ψ	[1]...	poróza
ψ_{1a}, ψ_{1b}	[1]...	objemová definice porózy z plošné hmotnosti, ze zaplnění přízí
ψ_2	[1]...	plošná definice porózy
ψ_3	[1]...	modifikovaná plošná definice porózy

Obsah

Anotace	3
Seznam symbolů a zkratk	5
Obsah	8
1. Úvod	10
1.1 Cíle práce	11
2. Základní charakteristiky niti	12
2.1 Zaplnění příze	13
2.2 Zaplnění multifilu	14
3. Základní charakteristiky tkaniny	15
4. Geometrické modely tkaniny	16
4.1 Popis vazné buňky	16
4.2 Deformace příčného řezu niti ve vazném bodě	17
4.2.1 Geometrické hypotézy	18
4.3 Náhrada vazné vlny	21
4.3.1 Náhrada vazné vlny kombinací oblouků a přímek (Peirceův model)	21
4.3.2 Náhrada vazné vlny harmonickou funkcí	22
4.4 Výpočet parametrů vazné vlny	23
5. Základní pojmy modelování mechanického namáhání textilních vláknenných útvarů	24
5.1 Síly ve vazném bodě	25
5.2 Model kontinua	27
5.3 Strukturní model	28
6. Poróznost tkaniny	30
6.1 Objemová poróznost	30
6.2 Plošná poróznost	31
6.3 Modifikovaná plošná poróznost	31
7. Experimentální část	33
7.1 Popis vzorků	33
7.2 Geometrické parametry struktury tkaniny	38
7.2.1 Tvorba řezů tkaniny	38
7.2.1.1 Analýza řezů vaznou vlnou tkaniny	39
7.2.1.2 Analýza řezů vazným bodem tkaniny	40
7.2.2 Metody zkoumání charakteru zplošťování nití ve vazném bodě tkaniny	42
7.2.2.1 Simulace vazného bodu křížením nití	42
7.2.2.2 Stlačování niti mezi rovnoběžnými deskami	43
7.3 Měření dalších charakteristik struktury tkaniny	44
7.3.1 Metody hodnocení poróznosti tkaniny	45

8. Výsledky	47
8.1 Parametry průřezu příze ve vazném bodě tkaniny	48
8.1.1 Velikost deformace průřezu příze ve vazném bodě tkaniny	48
8.1.2 Charakter deformace průřezu příze ve vazném bodě tkaniny	51
8.1.3 Analýza deformace průřezu příze při působení normálové síly	53
8.2 Parametry průřezu multifilu ve vazném bodě tkaniny	56
8.2.1 Velikost deformace průřezu multifilu ve vazném bodě tkaniny	56
8.2.2 Analýza deformace průřezu multifilu při různých typech namáhání	57
8.3 Hodnocení průběhu deformace příčného řezu niti	60
8.3.1 Model kontinua průřezu niti ve vazném bodě tkaniny	60
8.3.2 Strukturní model deformace průřezu příze ve vazném bodě tkaniny	65
8.4 Parametry vazné vlny příze ve tkanině	67
8.5 Charakteristiky struktury tkaniny	69
9. Závěr	73
Literatura	75
Příloha 1 Geometrické parametry struktury tkanin	I
Příloha 2 Charakter stlačení příze ve vazném bodě tkaniny	IX
Příloha 3 Další charakteristiky struktury tkaniny	XII

1. Úvod

Podle současných znalostí fyziky o způsobu vnitřního uspořádání (strukturu) hmoty lze textilie zařadit do následujícího řetězce: *atom* → *molekula* → *makromolekulární řetězec* → *fibrila* → *textilní vlákno* → *délková textilie* (*pramen, přást, příze, multifil, ...*) → *plošná textilie* (*tkanina, pletenina, netkaná textilie, ...*) → *prostorová textilie* → *prostředí* [1]. Textilní obor se zabývá oblastí: *textilní vlákno, délková textilie, plošná textilie, prostorová textilie*. Jmenované útvary jsou zahrnovány do obecného pojmu „textilie“. Při tomto pohledu je za základní textilní útvar považováno vlákno. Specifickým seskupením vláken vzniká textilní útvar označovaný jako nit (souhrnný název dále používaný pro dvě skupiny délkových textilií, příze a multifily). Nit má zcela určité geometrické i fyzikální vlastnosti, které způsobují, že je vnímána jako samostatný textilní útvar. Určitým vzájemným provázáním nití vzniká plošná textilie. Biaxiální tkanina, která je v této práci hlavním předmětem popisu a zkoumání, vzniká vzájemným provázáním dvou kolmých soustav nití, osnovy a útku.

Vlastnosti daného textilního útvaru jsou rozhodující měrou určeny vlastnostmi nejbližšího nižšího útvaru. Z pozice výzkumu vlastností tkanin je často klasifikována jako jednoduchý (základní) textilní útvar nit [2]. Vlastnosti tkanin jsou ovlivněny nejen vlastnostmi nití z nichž jsou vyrobeny, ale podstatnou měrou také jejich interakcemi, které jsou dány způsobem jejich vzájemného provázání. Pro úspěšné projektování tkanin je nutnou podmínkou znalost souvislostí mezi vnitřní strukturou a vlastnostmi. Základní modely umožňují obecně charakterizovat strukturu provázání tkanin a vycházejí z popisu geometrických poměrů ve tkanině.

Vzhledem k množství stavebních prvků, variantnosti materiálového složení a konstrukce, je popis struktury tkaniny dosti komplikovaný. Musí docházet ke zjednodušením. Platí základní pravidlo, že jediným ověřením modelu je logická konzistence a experiment.

V současné době, kdy se pracuje na uceleném systému modelování textilií v linii vlákno – nit – tkanina, již existuje celá řada prací [2], [3], [4], které se zabývají strukturou nití ať již z hlediska geometrického nebo z hlediska vnitřní mechaniky. Při výrobě tkaniny je nit vystavena namáhání, které vede ke změně její struktury. Charakteristikami těchto změn se zabývá řada prací, ale podrobnější popis některých souvislostí dosud chybí.

Tato práce zkoumá chování délkové textilie ve vazném bodě tkaniny s ohledem na základní závislosti pro přízi a pro multifil. Je provedeno propojení na další vlastnosti tkanin popsané známými modely. Práce se zabývá také propojením teorií textilních vlákenných útvarů, přízi a tkanin tak, jak dosud nebylo souhrnně publikováno a korekcí teoretických modelů. Práce je doplněna měřeními vybraných vlastností bavlnářských tkanin, u kterých je kromě hodnocení geometrických parametrů sledován vliv technologických parametrů výroby příze.

1.1 Cíle práce

Cílem této disertační práce je:

- formulace zákonitostí deformace příčného řezu příze ve vazném bodě tkaniny (stanovení velikosti deformace, popis charakteru deformace příze ve vazném bodě tkaniny, analýza deformace průřezu příze při působení normálové síly);
- formulace zákonitostí deformace příčného řezu multifilu ve vazném bodě tkaniny (stanovení velikosti deformace; analýza deformace průřezu multifilu při různých typech namáhání);
- použití modelu kontinua pro zhodnocení zákonitostí deformace příčného řezu nití;
- použití teorie textilních vláknenných útvarů a přízí pro formulaci geometrických modelů tkaniny;
- výběr experimentálních metod vhodných pro zkoumání vnitřní struktury tkanin;
- stanovení parametrů vazné vlny příze, souvislosti deformace příze ve vazném bodě tkaniny s dalšími parametry struktury tkanin a charakteristikami porózy bavlnářských tkanin;
- sledování vlivu technologických parametrů výroby příze na vybrané vlastnosti bavlnářských tkanin.

2. Základní charakteristiky nití

Příze a multifil (obecně niti) jsou specifickými typy textilních vláknenných útvarů, které jsou díky osobitým zvláštěnostem struktury a z ní plynoucích vlastností nejčastěji používány pro výrobu tkanin, pletenin i dalších textilních výrobků.

Při popisu tkaniny je považována za základní stavení jednotku nit. Přestože existuje množství prací definujících její základní parametry [2], [4], [9], nejsou tyto poznatky vždy uplatňovány i při modelování tkanin. Proto je tato kapitola věnována shrnutí pojmů popisujících základní parametry nití, které jsou důležité pro popis geometrie tkaniny.

Jemnost T je v systému SI definována jako poměr hmotnosti niti připadající na určitou délku. Lze ji také vyjádřit na základě substanční plochy průřezu niti (součet ploch průřezů všech vláken) a měrné hmotnosti vláknenného materiálu [2].

Zákrut Z je charakteristika, která je vázána na skupinu kroucených délkových textilií. Z hlediska struktury je definován jako počet ovinů délkové textilie na určitou délku. Pro technologické účely je zákrut definován jako počet otáček krutného ústrojí ku rychlosti odváděcích válců a poměr těchto hodnot je pro staplové příze nastavován tak, aby pro příze dané technologie a účelu poskytoval požadovanou hodnotu zákrutu. Běžné výpočty jsou pro příze prováděny na základě teorií Koechlina a Phrixe [2].

Příčný rozměr niti je velmi důležitou geometrickou charakteristikou. Jednoduše si lze nit představit jako homogenní válec a příčný rozměr označit jako průměr. Jako limitní je definován **substanční průměr** d_s (vlákna jsou stlačena do homogenního válce bez vzduchových mezer) výrazem

$$d_s = \sqrt{4S/\pi} = \sqrt{4T/\pi\rho}, \quad (1)$$

kde S je substanční plocha průřezu niti, ρ měrná hmotnost vláken. Takto vypočtená hodnota je limitní. Nit ve skutečnosti není stejnorodým válcem. Mezi vlákny jsou mezery, hustota stěsnání vláken není rovnoměrná a příze směrem k povrchu přechází spojitě do oblasti chlupatosti. Řez niti nemusí být osově symetrický. Z tohoto důvodu neexistuje jednoznačná definice průměru niti. Většinou se vychází z průměru nejmenšího myšleného válce, v němž je obsažena veškerá hmota niti, nebo alespoň její podstatná část. Proto je nutné používat pojem „průměr“ jen jako modelovou představu, teoreticky daný průměr nebo v kontextu s metodou jeho experimentálního stanovení.

Stěsnání vláken lze vyjádřit pomocí **zaplnění** μ . Zaplnění je veličina vyjadřující podíl z celkového prostoru útvaru, který je vyplněn vlákny. Takto lze definovat zaplnění objemové či plošné

$$\mu = \frac{V}{V_c} = \frac{S}{S_c}, \quad (2)$$

kde V označuje objem vláken, V_c celkový objem útvaru, S substanční plocha průřezu, S_c celková plocha řezu útwarem. Zaplnění je bezrozměrná veličina ležící v intervalu $\langle 0;1 \rangle$. Pro délkovou textilií může být zaplnění vyjádřeno jako

$$\mu = d_s^2 / d^2 = 4S / (\pi d^2) = 4T / (\pi d^2 \rho). \quad (3)$$

Výraz (3) je často používán pro výpočet **průměru nití** d ve tvaru

$$d = \sqrt{4T / \pi \mu \rho}. \quad (4)$$

Znalost hodnoty zaplnění je zásadní pro vyjádření průměru nití. K predikci zaplnění vedou v současné době dvě možnosti, jednak použití dosud známých empirických materiálových konstant nebo výpočet zaplnění z dosažitelných modelů.

2.1 Zaplnění příze

Pro ideální případ svazku paralelních válcových vláken existuje řada typů uspořádání. Hraniční hodnoty lze stanovit na základě standardně používaných typů ideálního uspořádání vláken – struktury plástové a válcové [2], [10], [11].

Opakující se strukturní jednotkou nejtěsnějšího možného uspořádání, tzv. *plástové struktury* je rovnostranný trojúhelník. Podle [2] je možno charakterizovat strukturu limitní, kompaktní, přechodovou a volnou. Empiricky byly stanoveny smluvní veličiny pro reálné staplové příze:

$$\text{limitní zaplnění příze} \quad \mu_m = 0,8,$$

$$\text{zaplnění na průměru příze} \quad \mu_d = 0,15.$$

Způsob výpočtu zaplnění příze použitý v této práci je založen na *komprimační hypotéze* [2], [12]. Tato hypotéza řeší vztah mezi jemností, zákrutem a průměrem příze nejen na základě geometrických předpokladů (idea geometrické podobnosti — příze stejného materiálu, technologie a určení mají stejný sklon povrchového vlákna) ale i na vnitřní mechanice příze. Teorie vychází z těchto předpokladů:

- uspořádání vláken v přízi lze popsat šroubovicovým modelem;
- vlákna jsou v přízi stlačována jako důsledek zákrutu;
- stlačování vyvoluje pouze vnější vrstva vláken, tloušťka stlačovací vrstvy je pro příze stejného materiálu, technologie a účelu použití konstantní;
- pro příze stejného materiálu, technologie a účelu je napětí vyvozené touto vrstvou konstantní;
- napětí lze vyjádřit na základě závislosti tlaku a zaplnění (zobecněná teorie van Wyka [10]).

Na základě této teorie byly odvozeny následující rovnice:

$$\frac{\left(\frac{\mu}{\mu_m}\right)^{3/2}}{\left[1 - \left(\frac{\mu}{\mu_m}\right)^3\right]^3} = \frac{K}{8 \cdot \sqrt{\frac{\pi \mu_m^3}{\rho}} \cdot \sqrt{T} \left(1 - \sqrt{\frac{t_f}{T}}\right)^2} \quad (5a)$$

$$\frac{\left(\frac{\mu}{\mu_m}\right)^{5/2}}{\left[1 - \left(\frac{\mu}{\mu_m}\right)^3\right]^3} = \frac{M\sqrt{\pi}}{2000\mu_m^{5/2}\sqrt{\rho}} \cdot (ZT^{1/4})^2 \quad (5b)$$

kde μ je zaplnění, μ_m limitní zaplnění, t jemnost vláken, ρ měrná hmotnost vlákenného materiálu, Z zákrut, T jemnost příze, M souhrnná materiálová konstanta (shrnuje velikost a charakter tloušťky povrchové stlačující vrstvy). Modifikovaná intenzita zákrutu $K = Mtg^2\beta_{red}$ pak závisí pouze na materiálu případně na technologii, (β_{red} je sklon vlákna na poloměru příze redukovaném o velikost poloměru vlákna). Rovnice (5a) může být použita pro výpočet zaplnění pokud jsou známy základní charakteristiky příze a vláken. Pak lze z rovnice (5b) predikovat hodnotu zákrutu. Někdy je problém znalost materiálových charakteristik, nebo přesné určení parametrů příze. Hodnoty K , M uvedené například v [2], [10] jsou navrženy na základě vyhodnocení experimentů řezů přízí.

Hodnoty zaplnění přízí doporučené v [7] jsou odvozené z experimentu stlačování přízí v dokonale tuhé krabici (boxu). Aplikace těchto konstant je diskutabilní, hodnoty jsou známy pouze pro některé typy materiálů.

2.2 Zaplnění multifilu

Bylo ukázáno [11], že uspořádání vláken v průřezu multifilu velice dobře vystihuje představa *válcové struktury*. Vlákná tvoří kruhové vrstvy, lze předpokládat, že v každé z nich je obsažen maximálně umístitelný počet vláken. Tvoří-li první vrstva jediné vlákno (osa svazku je totožná s osou středového vlákna), hovoříme o kruhové radiální struktuře se středovým vláknem. Jsou-li kruhové vrstvy uspořádány s osou v ose svazku a hovoříme o kruhové radiální struktuře bez středového vlákna, pak se konfigurace vláken blíží čtvercovému uspořádání. Tato struktura má ve středu nejvíce vzduchových mezer. Charakteristické hodnoty jsou uvedeny v [2], [11].

Protože bylo ukázáno [11], že multifil má již při minimálních dostředných silách tendenci zaujímat maximálně uspořádanou strukturu, je doporučeno pro výpočet průměru multifilu použít hodnotu zaplnění odvozenou z limitního zaplnění válcové struktury $\mu_m = 0,7$.

3. Základní charakteristiky tkaniny

Biaxiální tkanina, zkoumáním jejíchž základních parametrů se tato práce zabývá, je plošná textilie vyrobená ze soustavy podélných (osnovních) a příčných (útkových) nití, provázaných v kolmém směru (veličiny budou označeny indexem o resp. u).

Při modelování tkanin se můžeme setkat s různými prakticky využívanými, většinou empirickými, systémy projektování. Systém používaný k projektování vlnařských tkanin [13] vychází z předpokladu existence mezní dostavy tkaniny, za jejíž hranici nelze tkaninu dále setkat. Byl zkonstruován na základě průzkumu velikosti tkacího odporu u vlnařských tkanin různých kombinací dostav v osnově a útku. Pro konstrukci multifilových tkanin je navržen empirický systém [14], který reflektuje skutečnost, že se multifil chová ve tkaninách podstatně jinak než příze.

Každou tkaninu lze popsat souborem mnoha různých vlastností a charakteristik. Soubor vlastností, které jsou pro nás v daném okamžiku důležité, závisí na tom, zda jsme v pozici projektanta, výrobce či uživatele. V této kapitole je uveden přehled definic základních parametrů tkanin [15].

Vazba tkaniny je nazýván způsob provázání osnovy a útku. Základními vazbami tkanin jsou vazba plátňová, keprová a atlasová. Plátno je tvořeno tak, že se na každé niti střídá osnovní a útkový vazný bod. Vytváří nejhustší a nejpravidelnější provázání, každou tkaninu jiné vazby k němu lze vztáhnout. Proto bývá tato vazba nejlepším východiskem k popisu a tvorbě modelů tkanin. Kepr je charakteristický silným úhlopříčným řádkováním. Atlas je tkanina s hladkým povrchem a nevýrazným šikmým řádkováním různého sklonu. Vazné body jsou pravidelně rozloženy a nesmějí se vzájemně dotýkat. Existuje množství vazeb a vzorů, které jsou z těchto základních odvozené, nebo z nich složené. Opakování vzoru, nejmenší část vazby, která se pravidelně opakuje po celé ploše tkaniny se nazývá **střída vazby**.

Dostava je počet nití v jednotce délky (označení D_o ve směru osnovy, D_u ve směru útku). Pokud je dostava osnovy a útku stejná, hovoříme o čtvercové dostavě. Maximální možná dostava je pro každý typ tkaniny definována jako dostava mezní.

Setkání označuje velikost zkrácení nití zatkaním. Je definováno setkání

$$\text{osnovy} \quad s_o = (l_o - l_{to}) / l_{to}, \quad (6a)$$

$$\text{útku} \quad s_u = (l_u - l_{tu}) / l_{tu}, \quad (6b)$$

kde l_o (l_u) je délka nití v úseku tkaniny a l_{to} (l_{tu}) délka úseku tkaniny. Je uváděno jako bezrozměrná veličina nebo v procentech. Možnosti zjištění setkání jsou modelovým výpočtem nebo experimentálními metodami.

Plošná hmotnost je hmotnost tkaniny vztažená na určitou plochu. Lze ji zjistit vážením, nebo výpočtem dle vzorce

$$G = D_o T_o (1 + s_o) + D_u T_u (1 + s_u). \quad (7)$$

4. Geometrické modely tkaniny

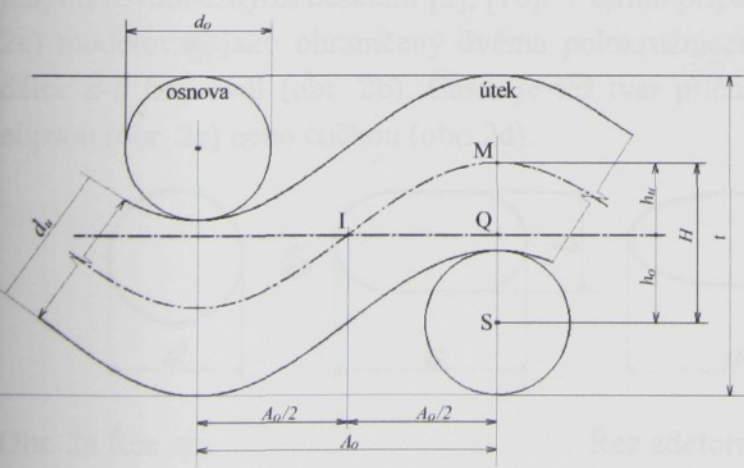
Cílem každého modelu tkaniny je takový popis, který by co nejlépe odpovídal skutečnosti, současně byl dostatečně obecný a umožňoval matematické modelování dalších vlastností tkanin. Cestou, která do jisté míry vede k požadovanému cíli, je zpracování geometrie tvaru a uspořádání niti ve tkanině ryze geometrickým modelem.

4.1 Popis vazné buňky

Okolí jednoho zakřížení osnovy a útku je označováno jako *vazná buňka*, *vazný bod* nebo též *vazný prvek*. Model vazné buňky může být sledován na čele tkaniny ve stavu zrodu, nebo až v hotové tkanině ve stavu ustáleném (relaxovaném). Při popisu geometrie vazného bodu tkaniny bývají zaváděny nejčastěji tyto zjednodušující předpoklady (idealizace) [6]:

- nit je kompaktní těleso s kruhovým průřezem; v místech vazných bodů nedochází k deformaci průřezů ani ke zhuštění vláken;
- model vazné buňky je sledován v hotové tkanině ve stavu ustáleném (relaxovaném);
- tkanina je vyrovnaná (tloušťka tkaniny je dána součtem průměrů nití);
- těžiště jednotlivých kolmých průřezů se nachází vždy ve středu niti a je možno definovat neutrální osu niti jako křivku spojující těžiště všech kolmých řezů niti; takto myšlená neutrální osa niti je totožná s průběhem vazné vlny osnovní či útkové niti v tkanině;
- inflexní body neutrálních os všech osnovních i útkových nití leží v jedné rovině, zvané střední rovina tkaniny.

Veličiny popisující vaznou buňku v relaxované tkanině plátnové vazby jsou za těchto předpokladů definovány podle obr.1, na kterém je znázorněn příčný řez tkaniny (kolmo k osnovním nitím). Znázornění podélného řezu tkaninou (kolmo k útku) by bylo provedeno stejným způsobem s odpovídajícím značením.



Obr.1 Příčný řez tkaniny

- A_o . . . rozteč osnovních nití
- A_u . . . rozteč útkových nití
- d_o . . . průměr osnovní niti
- d_u . . . průměr útkové niti
- t . . . tloušťka tkaniny
- H . . . rozteč os nití ve vazném bodě
- h_o . . . výška zvlnění osnovy
- h_u . . . výška zvlnění útku
- S osa osnovní niti
- I inflexní bod vazné vlny útku
- M nejvyšší bod vazné vlny

Pro rozteč nití platí:

$$\text{osnovy} \quad A_o = 1/D_o, \quad (8a)$$

$$\text{útku} \quad A_u = 1/D_u. \quad (8b)$$

Lze definovat poměrnou veličinu **relativní výška zvlnění**:

$$\text{osnovy} \quad \xi_o = h_o/H, \quad (9a)$$

$$\text{útku} \quad \xi_u = h_u/H. \quad (9b)$$

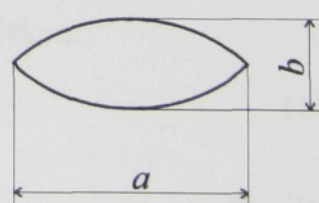
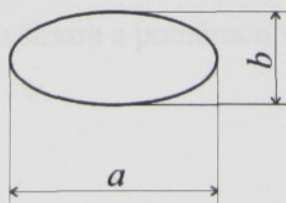
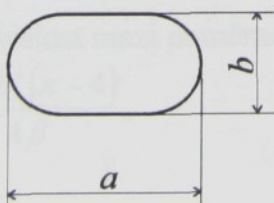
Podle Novikova [7] lze podle míry zvlnění obou soustav nití zařadit tkaninu do jedné z devíti „fází“ provázání tkaniny. Velikost a charakter zvlnění jsou ovlivněny jak vlastnostmi materiálu (ohybová tuhost ap.[8]), tak také technologickými parametry tkacího stroje (použitý přírazový systém, napětí osnovy a útku ap.), důležité je, v jakém stavu (režná, upravená, relaxovaná,...) tkaninu hodnotíme.

Při výrobě plošné textilie je nit vystavena namáhání, které vede k její *deformaci*. V reálných případech jde většinou o kombinaci různých druhů namáhání — ohybového, torzního, tlakového a tahového. Významný podíl v těchto dějích má právě mechanismus stlačování, kdy je nit deformována tlaky kolmými k ose. Dochází k stlačení, rozšíření a zhuštění niti a tím i ke změně její vnitřní struktury. Tento typ deformace převažuje v místech kontaktu dvou nití — vazných bodech tkaniny [2], [7]. Deformaci lze pozorovat a hodnotit odděleně jako deformaci v příčném řezu niti (stlačení a zploštění, které mají návaznost na průměr niti a zakrytí tkaniny) a v podélném pohledu na nit (tzv. vazná vlna niti).

4.2 Deformace příčného řezu niti ve vazném bodě

Pro výpočty rozměrů příčného řezu niti ve tkanině se většinou vychází z představ niti jako válcového tělesa a průměr je určován na základě těchto představ.

Pro popis deformace průřezu je definována **šířka** niti a , **výška** niti b a **výška těžiště** v_T . Jeden z modelů deformace příčného řezu niti vychází ze stlačování niti mezi dvěma tuhými rovnoběžnými deskami [2], [16]. V tomto případě je původně kruhový příčný řez (obr. 2a) modelován jako ohraničený dvěma polokružnicemi o průměru b a dvěma úsečkami o délce $a-b$ tzv. ovál (obr. 2b). Často je též tvar příčného řezu niti ve tkanině aproximován elipsou (obr. 2c) nebo čočkou (obr. 2d).



Obr. 2a Řez niti

Řez zdeformované niti

Obr.2b Ovál

Obr. 2c Elipsa

Obr. 2d Čočka

Lze definovat následující veličiny:

$$\text{poměrná šířka} \quad \alpha = a/d, \quad (10)$$

$$\text{poměrná výška} \quad \beta = b/d, \quad (11)$$

$$\text{relativní stlačení} \quad \varepsilon_1 = (b-d)/d = \beta - 1, \quad (12)$$

$$\text{relativní rozšíření} \quad \varepsilon_2 = (a-d)/d = \alpha - 1, \quad (13)$$

$$\text{zploštění niti} \quad Z_p = b/a = (\varepsilon_1 + 1)/(\varepsilon_2 + 1), \quad (14)$$

$$\text{zhuštění niti} \quad Z_h = 2v_T/b. \quad (15)$$

Při konstrukci modelů tkaniny bývá většinou zhuštění vláken v niti v místech kontaktů nití zanedbáváno.

Zdeformovaný řez má pak plochu:

$$S_{\text{ovál}} = \pi b^2/4 + (a-b)b, \quad (16a)$$

$$S_{\text{elipsa}} = \pi ab/4, \quad (16b)$$

$$S_{\text{čočka}} = \sqrt{a^2 + 4/3 b^2} (a^2 + b^2)/4b - a(a^2 - b^2)/4b, \quad (16c)$$

a obvod

$$L_{\text{ovál}} = \pi b + 2(a-b), \quad (17a)$$

$$L_{\text{elipsa}} \approx 2\pi \sqrt{(a^2 + b^2)/2}, \quad (17b)$$

$$L_{\text{čočka}} = 2\sqrt{a^2 + 4/3 b^2}. \quad (17c)$$

4.2.1 Geometrické hypotézy

Pro vyjádření vztahu mezi parametry příčného řezu před a po deformaci bývají navrhovány dvě alternativní hypotézy, které vycházejí z ryze geometrických představ.

1) Hypotéza o zachování plochy, kdy předpokládáme, že se plocha příčného řezu původní nestlačené niti s deformací nemění. Pak platí:

$$S = \frac{\pi d}{4} = S_{\text{deformovanéprize}}. \quad (18)$$

Po dosazení získáme závislost mezi poměrnou šířkou a poměrnou výškou:

$$\text{ovál} \quad \alpha = \frac{\pi - \beta^2(\pi - 4)}{4\beta}, \quad (19a)$$

$$\text{elipsa} \quad \alpha = \frac{1}{\beta}, \quad (19b)$$

$$\text{čočka} \quad \sqrt{\alpha^2 + \frac{4}{3}\beta^2}(\alpha^2 + \beta^2) - \alpha(\alpha^2 - \beta^2) - \pi\beta = 0, \quad (19c)$$

respektive mezi relativním rozšířením a relativním stlačením:

ovál $\varepsilon_2 = \left(\varepsilon_1^2 (1 - \pi/4) + \varepsilon_1 (1 - \pi/2) \right) / (\varepsilon_1 + 1),$ (20a)

elipsa $\varepsilon_2 = -\varepsilon_1 / (\varepsilon_1 + 1).$ (20b)

Pro čočku nelze relativní rozšíření ze vztahu (19c) explicitně vyjádřit, rovnice byla řešena numericky a body interpolovány funkcí v intervalu relativního stlačení $\langle -0,7;0 \rangle$:

čočka $\varepsilon_2 = 1,11 / (\varepsilon_1 + 1)^{1,06} - 1.$ (20c)

2) Hypotéza o zachování obvodu, kdy předpokládáme, že se obvod příčného řezu původní nestlačené příze s deformací nemění. Pak platí:

$$L = \pi d = L_{\text{deformované příze}}.$$
 (21)

Po dosazení získáme závislost mezi poměrnou šířkou a poměrnou výškou:

ovál $\alpha = \frac{\pi - \beta (\pi - 2)}{2},$ (22a)

elipsa $\alpha = \sqrt{2 - \beta^2},$ (22b)

čočka $\alpha = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \frac{4}{3}\beta^2},$ (22c)

respektive mezi relativním rozšířením a relativním stlačením:

ovál $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 (1 - \pi/2),$ (23a)

elipsa $\varepsilon_2 = \sqrt{2 - (\varepsilon_1 + 1)^2} - 1,$ (23b)

čočka $\varepsilon_2 = \sqrt{(\pi/2)^2 - 4/3(\varepsilon_1 + 1)^2} - 1.$ (23c)

Lomov [17] doporučuje vztah mezi relativním rozšířením a relativním stlačením:

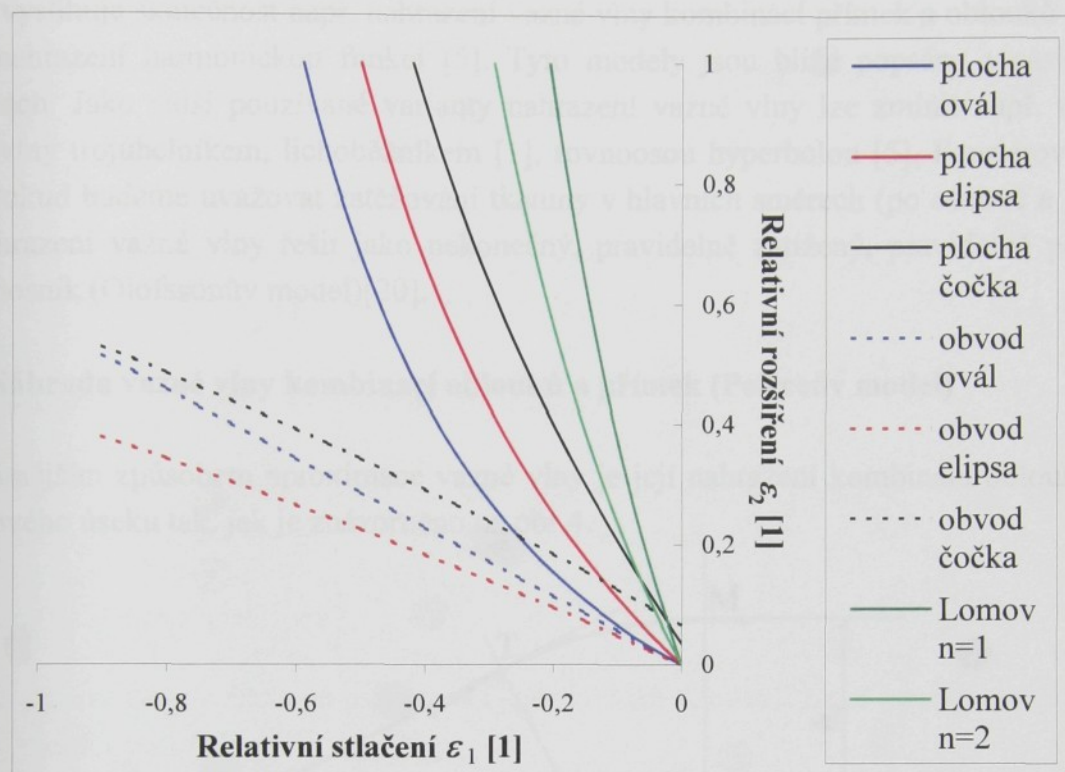
$$\varepsilon_2 = 1 / (\varepsilon_1 + 1)^n - 1.$$
 (24)

Je doporučeno $n = 1..2$ a hodnoty dle tabulky 1.

Tabulka 1 Doporučené hodnoty relativního rozšíření dle [17]

Délková textilie	Zákrut $Z[m^{-1}]$	Relativní rozšíření $\beta [1]$
Multifil	$\langle 0;300 \rangle$	0,4 – 0,6
	$\langle 300;500 \rangle$	0,6 – 0,8
Příze	–	0,7 – 0,9

Vztahy mezi relativním rozšířením a relativním stlačením (20a,b,c) (23a,b,c) a (24) jsou znázorněny na obr.3. Při malých deformacích je průběh obou křivek téměř shodný, při větších deformacích se objevují značné rozdíly.



Obr.3 Geometrické hypotézy o deformaci příčného řezu nití

Zhodnocení obou alternativních hypotéz vzhledem ke strukturním závislostem nití vychází z předpokladu, že příčný řez volné (nezatkané) nití je kruhový. Kruh je rovinný útvar, který má za shodného obsahu s jinými útvary nejmenší obvod a při shodném obvodu největší plochu.

Jestliže přijmeme první hypotézu o neměnění se ploše příčného řezu, pak musí růst obvod deformovaného řezu, minimálně jen proto, že se původně kruhový řez změnil v jiný prostorový útvar. Také lze předpokládat, že změny v obvodu příčných řezů nejsou zapříčiněny jen změnou průřezu, ale i uvolněním dostředných sil, které jsou vyvozovány přibližně šroubovicovou strukturou uspořádání vláken. Tato hypotéza dále naznačuje, že se při deformaci příze nemění objem mezivláknenných pórů, tím neroste ani zaplnění.

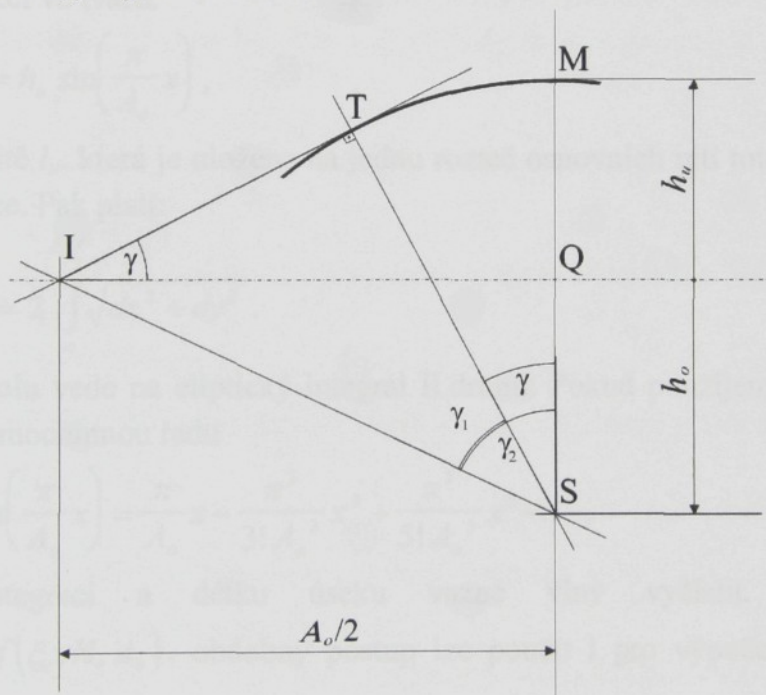
V případě druhé hypotézy o neměnění se obvodu příčného řezu příze musí u zdeformovaného řezu plocha klesat. Odtud plyne, že musí růst zaplnění, tj. dochází ke zmenšení mezivláknenných pórů a zvětšení počtu kontaktů mezi vlákny. Tím dojde k destrukci celé původní struktury příze.

4.3 Náhrada vazné vlny

Existuje mnoho modelů, které se vztahují k vazné buňce tkaniny plátňové vazby v relaxovaném stavu a v kterých jsou použity různé způsoby nahrazení průběhu vazné vlny. Dobře vystihuje skutečnost např. nahrazení vazné vlny kombinací přímek a oblouků [18], [4], [5] a nahrazení harmonickou funkcí [5]. Tyto modely jsou blíže popsány v následujících kapitolách. Jako další používané varianty nahrazení vazné vlny lze zmínit např. nahrazení vazné vlny trojúhelníkem, lichoběžníkem [1], rovnoosou hyperbolou [5], Fourierovou řadou [19]. Pokud budeme uvažovat zatěžování tkaniny v hlavních směrech (po osnově a po útku), lze nahrazení vazné vlny řešit jako nekonečný, pravidelně zatížený, pravidelně podepřený štíhlý nosník (Olofssonův model)[20].

4.3.1 Náhrada vazné vlny kombinací oblouků a přímek (Peirceův model)

Nejznámějším způsobem aproximace vazné vlny je její nahrazení kombinací obloukového a přímkového úseku tak, jak je znázorněno na obr.4.



Obr. 4 Schéma nahrazení vazné vlny kombinací oblouků a přímek (volně dle [21])

Schéma vychází z předpokladu, že oblouk $\widehat{TM}$ je částí kružnice se středem S a poloměrem $H = h_o + h_u$ a úsek $\overline{IT}$ je uvažován jako úsečka — část tečny ke kružnici. Z tohoto uspořádání lze pomocí goniometrických funkcí a rovinné trigonometrie odvodit vztah pro délku útkové nitě l_u , která je uložena na jednu rozteč osnovních nití

$$l_u = 2(\overline{IT} + \widehat{TM}). \quad (25)$$

Z trojúhelníku IQS vyplývá

$$\overline{IS}^2 = \overline{IQ}^2 + \overline{QS}^2 = (A_o/2)^2 + h_o^2, \quad (26)$$

z trojúhelníku ITS plyne

$$\overline{IT}^2 = \overline{IS}^2 - \overline{TS}^2 = \overline{IS}^2 - H^2. \quad (27)$$

Pro znázorněné úhly platí $\cos \gamma_2 = h_o / \overline{IS}$, $\cos \gamma_1 = H / \overline{IS}$. Protože je $\gamma = \gamma_2 - \gamma_1$ platí, že délka vazné vlny mezi body T a M je

$$\widehat{TM} = H \cdot \gamma. \quad (28)$$

Výsledkem je soubor vztahů, ve kterém je $l_u = f(h_o, h_u, A_o) = f(\xi_u, H, A_o)$. Obdobně je možno odvodit vztahy i pro délku vazné vlny osnovní nitě.

4.3.2 Náhrada vazné vlny harmonickou funkcí

Za předpokladu, že průběh neutrální osy přize ve tkanině plátnové vazby lze vyjádřit harmonickou funkcí ve tvaru:

$$y = h_u \sin\left(\frac{\pi}{A_o} x\right), \quad (29)$$

je délka útkové nitě l_u , která je uložena na jednu rozteč osnovních nití totožná s délkou jedné periody této funkce. Pak platí:

$$l_u = 2 \int_0^{A_o/2} \sqrt{dx^2 + dy^2}. \quad (30)$$

Řešení tohoto úkolu vede na eliptický integrál II.druhu. Pokud použijeme nahrazení funkce sinus rozvojem v mocninnou řadu

$$\sin\left(\frac{\pi}{A_o} x\right) = \frac{\pi}{A_o} x - \frac{\pi^3}{3! A_o^3} x^3 + \frac{\pi^5}{5! A_o^5} x^5 - \dots, \quad (31)$$

lze provést integraci a délku úseku vazné vlny vyčíslit. Opět platí, že $l_u = f(h_u, A_o) = f(\xi_u, H, A_o)$, obdobný postup lze použít i pro výpočet délky vazné vlny osnovní nitě.

4.4 Výpočet parametrů vazné vlny

Pro jednoznačný popis geometrie vazné vlny tkaniny je postačující znát čtyři nezávislé parametry: rozteč os přízí ve vazném bodě, relativní výšku zvlnění osnovy nebo útku a dostavu osnovy a útku. Lze je určit na základě modelových představ pro vyrovnanou nebo pro obecnou tkaninu.

a) Vyrovnaná tkanina

Pro vyrovnanou tkaninu je tloušťka $t = d_o + d_u$, platí:

$$H = (d_o + d_u)/2, \quad (32)$$

$$h_o = (t - d_o)/2 = d_u/2, \quad h_u = (t - d_u)/2 = d_o/2, \quad (33)$$

$$\xi_o = d_u/(d_o + d_u), \quad \xi_u = d_o/(d_o + d_u). \quad (34)$$

b) Obecná tkanina

V [21] je popsáno následující stanovení hodnot zvlnění pro obecnou bavlnářskou tkaninu plátnové vazby. Průměry nití jsou vypočteny dle (4). Je definována veličina **poměrné stlačení tkaniny**:

$$\lambda = \frac{H}{\frac{1}{2}(d_1 + d_2)} = \frac{H_{real}}{H_{ideal}}. \quad (35)$$

Je doporučeno $\lambda = 0,75$. Tuto empirickou konstantu je třeba ověřit, aby bylo možno určit

$$H = \frac{\lambda}{2}(d_o + d_u). \quad (36)$$

Dle [21] lze o poměrném stlačení předpokládat, že se proměňuje podle míry stlačení nití ve vazném bodě tak, že:

- $\lambda = 1$ při $D_o \rightarrow 0$, $D_u \rightarrow 0$;
- λ se zmenšuje při větším počtu vazných bodů v plošné jednotce;
- λ se zmenšuje s rostoucími průměry přízí;
- pokud by vliv osnovy na útek byl analogický vlivu útku na osnovu, λ se nezmění záměnou indexů $_o$ a $_u$.

Je navržen empirický vztah:

$$\lambda = \frac{1}{k_\lambda \cdot Z_o^{q_o} \cdot Z_u^{q_u} + 1}, \quad (37)$$

kde jsou definovány **součinitele plošného zakrytí**

$$\text{osnovy} \quad Z_o = d_o D_o, \quad (38a)$$

$$\text{útku} \quad Z_u = d_u D_u, \quad (38b)$$

$$\text{celkový} \quad Z_C = Z_o + Z_u - Z_o Z_u, \quad (38c)$$

a k_λ, q_o, q_u jsou empirické konstanty.

Empirický vztah pro výpočet relativní výšky zvlnění vychází z předpokladů:

- je-li hodnota plošného zakrytí v jedné soustavě nula, pak je i zvlnění nulové;
- hodnota relativního zvlnění závisí na podílu průměrů přízí a dostav.

Tyto předpoklady splňuje empirický vztah:

$$\xi_o = \frac{1}{C \cdot \frac{d_o^{k_1}}{d_u^{k_2}} \cdot \frac{Z_u^{k_3}}{Z_o^{k_4}} + 1}, \tag{39}$$

analogicky $\xi_u = 1 - \xi_o$, kde C, k_1, k_2, k_3, k_4 jsou empirické konstanty.

5. Základní pojmy modelování mechanického namáhání textilních vláknenných útvarů

Mechanické modely tkaniny popisují silové působení (vztahy) mezi geometrickými elementy. Vzhledem ke komplikovanosti struktury tkaniny musí docházet ke zjednodušením. Při formulaci mechanických modelů jsou nejčastěji citované přístupy shrnuty v tabulce 2.

Tabulka 2: Alternativní fyzikální přístupy zkoumání mechanických vlastností tkanin dle [1]

1)	kontinuum	–	diskontinuum
2)	linearita	–	nelinearita
3)	malé deformace	–	velké deformace
4)	„nereologie“	–	reologie
5)	heuristický	–	strukturní
6)	silový	–	energetický

Vhodnost popsanych přístupů lze hodnotit na základě následujících poznámek:

- ad 1. Pohled na hmotu pevné fáze jako na kontinuum (spojité prostředí) je sice v nesouladu s veškerými dosavadními poznatky o stavbě hmoty, avšak praxe ukazuje, že při studiu vnějšího silového působení na pevnou fázi a deformací vzniklých v důsledku tohoto namáhání lze vycházet z hypotézy o spojitém rozložení hmoty v namáhaném objektu. Musí být splněn předpoklad, že studovaný objekt je řádově větší v porovnání s rozměry částic hmoty a obsahuje vysoký počet těchto částic. Opakem kontinua je rozložení hmoty v reálných objektech, které obsahují soustavu hmotných diskrétních bodů. Pokud vlivem působení vnějších sil nedochází k podstatným změnám tvaru těchto reálných objektů, lze dospět abstrakcí k pojmu tuhého tělesa, u něhož jsou vzájemné vzdálenosti hmotných bodů neproměnné.
- ad 2. Obecně je mechanické chování reálných objektů nelineární. V oblasti nízkých deformací lze pracovat s lineárními vztahy mezi zkoumanými veličinami.

- ad 3. Většinou lze u reálných objektů při malých deformacích uvažovat lineární vztahy mezi napětím a deformací (platnost Hookova zákona), kdy každá složka tenzoru napětí je lineární funkcí všech složek deformace. Při velkých deformacích jsou však tyto vztahy již nelineární.
- ad 4. Vlastnosti hmoty jsou funkcí času; mechanické vlastnosti pevné fáze se časem mění a má na ně vliv též celá deformační historie uvažovaného hmotného objektu. Pojem reologie označuje takový přístup, kdy jsou všechny relace zkoumány též v časových souvislostech. Nereologický přístup je takový, kdy jsou vztahy mezi napětím a deformacemi hmot pevné fáze zkoumány v konstantních časových, teplotních (případně dalších) definovaných podmínkách.
- ad 5. Heuristický přístup lze označit jako takový, kde jsou hledány souvislosti modelu bez ohledu na detaily vnitřního uspořádání. Strukturní modely stanovují souvislosti mezi vnitřním uspořádáním a chováním celku.
- ad 6. Z hlediska techniky řešení, kterou fyzika v daném případě použije, lze hovořit o silovém a energetickém přístupu. Oba přístupy jsou rovnocenné, rozdíl spočívá v tom, které veličiny jsou použity k formulování předpokladů modelu: silový přístup vychází z podmínek rovnováhy sil, energetický stanoví předpoklady o energii systému. Oběma postupy lze v principu dospět ke stejným výsledkům.

5.1 Síly ve vazném bodě

Pro posouzení změn v geometrii příčného řezu niti ve vazném bodě tkaniny je třeba znát velikost působících sil, které je vyvozují. Lze předpokládat, že deformace niti (zploštění, zhuštění, stlačení) je způsobena kombinací namáhání trojího typu. Axiální (působící v ose niti) a normálová síla (kolmá k ose niti) způsobují zploštění a stlačení příze a síla vyvozená zákrutem brání „rozsypání“ vláken.

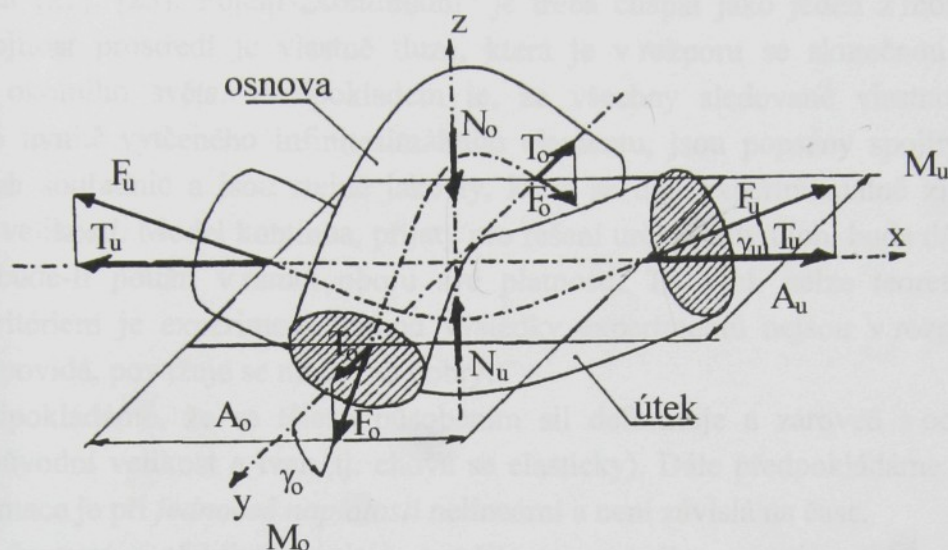
Jako základ k dalším úvahám lze vzít dvouosé tahové namáhání, tj. zatížení tkaniny silami ve směrech soustav nití, které tkaninu tvoří. V důsledku silového působení dochází k postupnému napřimování obou soustav nití. Konečný stav závisí na vzájemných geometrických poměrech ve výchozím stavu a na mechanických vlastnostech (tuhost, ...) jednotlivých nití.

Síly ve vazné buňce v tkanině plátnové vazby lze popsat (dle obr.5) za následujících předpokladů, které zjednodušují vnitřní strukturu a fyzikální zákonitosti v tkaninách:

- nitě jsou brány jako jednoduchý útvar textilní hmoty s jistými deformačními vlastnostmi v tahu, tlaku a ohybu;
- silové působení mezi nitěmi obou soustav je v každém vazném bodě tkaniny rozloženo po celé ploše vzájemného kontaktu;
- vzhledem k malým rozměrům plochy vzájemného kontaktu nití obou soustav lze za předpokladu že mezi osnovními a útkovými nitěmi ve tkanině nepůsobí smykové ani jiné třecí síly vyjádřit silové působení mezi nitěmi prostřednictvím jediné síly. Pak si lze

představit element nitě v okolí vazného bodu jako kladku mající zanedbatelně malý poloměr a pohybující se bez tření [1];

- s rostoucí normálovou silou působící na ploše vzájemného kontaktu nití bude větší i zploštění přízí. Byl stanoven předpoklad, že vzdálenost neutrálních os osnovní a útkové nitě ve vazném bodě tkaniny závisí pouze na výsledné normálové síle působící na nit [1].



Obr. 5 Síly ve vazném bodě tkaniny (dle [5])

Je definován vektor silových parametrů (dle [5], [8]):

$$V_s = \begin{pmatrix} F_o & F_u \\ T_o & T_u \\ M_o & M_u \\ N_o & N_u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{tahová síla ve střednici osnovní, útkové nitě} \\ \text{složka tahové síly do tkací roviny (rozpínky, regulátor)} \\ \text{ohybový moment osnovní, útkové niti} \\ \text{normálová síla mezi osnovou a útkem} \end{pmatrix}$$

Na rozhraní sousedních prvků působí axiální tahová síla F . Složka této síly do roviny tkaniny je označena T (tečná složka). V niti také působí ohybový moment M , který na rozhraní sousedních prvků bude mít nulovou hodnotu. V místě kontaktu obou provazujících nití působí normálová síla N , která je pro osnovu i útek stejná. Je zavedena znaménková konvence, kde je tahová síla F kladná a normálová síla N , která působí stlačení je záporná. V případě uvolnění vnějších sil působí ohybový moment.

Silovou rovnováhu za předpokladu, že má vazná vlna niti tvar kombinovaný z přímkových a obloukových úseků řešil Peirce [5], [7]. Závislost mezi složkou tahové síly do tkací roviny a normálovou silou mezi osnovou a útkem je popsána rovnicí:

$$N_o = N_u = N = 2F_o \sin \gamma_o. \quad (40)$$

V důsledku působení těchto sil dochází k deformaci příčného řezu osnovních i útkových nití, kterou dosavadní modely tahového namáhání zanedbávají.

5.2 Model kontinua

Výzkum chování textilií, jako geometricky i fyzikálně nelineárního, směrově orientovaného útvaru, vyžaduje stanovení jeho mechanických charakteristik. Jednou z rozšířených metod řešení problémů mechaniky textilií je náhrada textilního útvaru spojitým prostředím – kontinuem se stejnými mechanickými vlastnostmi jako zkoumaná textilie, ale i některými zvláštnostmi [22], [23]. Pojem „kontinuum“ je třeba chápat jako jeden z možných modelů hmoty, spojitost prostředí je vlastně iluze, která je v rozporu se skutečnou korpuskulární strukturou okolního světa. Předpokladem je, že všechny sledované vlastnosti materiálu, obsaženého uvnitř vytčeného infinitesimálního elementu, jsou popsány spojitými funkcemi prostorových souřadnic a jsou stejné jako ty, které se dají experimentálně zjistit u vzorků konečných velikostí. Model kontinua, přijatý pro řešení určité třídy úloh, bude dávat „správné“ výsledky, bude-li použit v rámci oboru své platnosti. To však nelze teoreticky dokázat. Jediným kritériem je experiment. Pokud výsledky experimentu nejsou v rozporu s tím, co model předpovídá, považuje se model za dobrý.

Předpokládáme, že se těleso působením sil deformuje a zároveň s odlehčením se obnovuje původní velikost a tvar (tj. chová se elasticky). Dále předpokládáme, že závislost síly a deformace je při *jednoosé napjatosti* nelineární a není závislá na čase.

Pro úsporný a efektivní zápis je použito tenzorového a maticového zápisu. V tělese (textilním vlákenném útvaru) jsou definovány materiálové (Lagrangeovy) a prostorové (Eulerovy) souřadnice. Parciální derivace Eulerových souřadnic podle Lagrangeových na třech jejich složkách určují tzv. materiálový deformační gradient $\mathbf{F}$. Pak lze jako míru deformace navrhnout například **tenzor protažení** [22]

$$\varepsilon_{ij}^p = \left((\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{\frac{1}{2}} - \mathbf{I} \right), \quad (41)$$

kde $\mathbf{I}$ je jednotková matice. Jako energeticky konjugovaná míra napětí se stanovuje **Biotův tenzor napětí**

$$\mathbf{S}_B = \frac{1}{2} \left(\mathbf{F}^{-1} \mathbf{J} \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{R} + \mathbf{R}^T \mathbf{J} \boldsymbol{\Sigma} (\mathbf{F}^{-1})^T \right), \quad (42)$$

kde $\boldsymbol{\Sigma}$ je Cauchyho tenzor napětí, $\mathbf{J}$ jakobián materiálového deformačního gradientu, $\mathbf{R}$ tenzor rotace. Tenzor protažení a Biotův tenzor napětí jsou konjugovanou dvojicí, protože splňují definici: skalární součin obou tenzorů dává mechanickou práci nebo výkon.

Rovnice musí být doplněny vztahy, které popisují odezvu materiálu na řešenou situaci. To jsou „konstitutivní“ vztahy. Je-li obecně $\mathbf{E}_{ij}$ tenzor modulů pružnosti lze Hookeův zákon zapsat

$$\mathbf{S}_B = \mathbf{E}_{ij} \varepsilon_{ij}^p. \quad (43)$$

Pro případ rovinné deformace (v případě, že směr zatěžování je totožný s hlavní osou anizotropie) lze určit:

$$\mathbf{S}_B = \begin{pmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (44)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (45)$$

$$\bar{\mathbf{E}}_{ij} = \begin{pmatrix} \bar{E}_{11} & \bar{E}_{12} & 0 \\ \bar{E}_{12} & \bar{E}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{E}_4 \end{pmatrix}. \quad (46)$$

Ze soustavy (43) lze určit pouze dva moduly pružnosti. Volíme jako nezávislé $\bar{E}_{11}, \bar{E}_{22}$

$$\bar{E}_{11} = \bar{E}_{22} \frac{\varepsilon_{22}^2}{\varepsilon_{11}^2} \frac{1}{\nu^2}, \quad (47)$$

$$\bar{E}_{22} = c_{11} \frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{22}^2} \frac{\nu^2}{(1-\nu^2)}, \quad (48)$$

zbývá stanovit:

$$\bar{E}_{12} = \pm \sqrt{\bar{E}_{11} \bar{E}_{22}} \nu, \quad (49)$$

$$\bar{E}_4 = \left(\bar{E}_{11} \bar{E}_{22} - \bar{E}_{12}^2 \right) / \left(\bar{E}_{11} + \bar{E}_{22} + 2\bar{E}_{12} \right), \quad (50)$$

kde zobecněné Poissonovo číslo:

$$\nu = \sqrt{\frac{\Delta_1^2}{\Delta_2^2} \frac{\Delta_1^1}{\Delta_1^1}}, \quad (51)$$

kde Δ_1^2 je zúžení vzorku ve směru 1 při roztážení Δ_2^2 ve směru 2 a Δ_2^1 je zúžení vzorku ve směru 2 při roztážení Δ_1^1 ve směru 1. Tento postup lze aplikovat i pro modelování stlačitelnosti příčného řezu niti ve tkanině.

5.3 Strukturní model

Modely stlačování textilního vláknenného útvaru obvykle zanedbávají probíhající reologické děje, smykové síly a disipaci energie. V této kapitole jsou uvedeny základní myšlenky modelu zobecněné závislosti tlaku na zaplnění dle [2] a [10]. Je uvažována změna počtu kontaktů v závislosti na působící síle. S modely založenými na obdobné představě pracuje i [17] a [24].

Počet, hustota a vzdálenost kontaktů jsou odvozeny na základě předpokladů:

- imaginární vlákna jsou nehmotné válce, stejné délky a průměru, navzájem si nepřekáží;
- orientace vláken v textilním vlákenném útvaru je popsána hustotou pravděpodobnosti.

Základní představa je:

- pravděpodobnost, že reálná vlákna jsou v kontaktu je rovna pravděpodobnosti, že imaginární vlákna mají společný průnik;
- pravděpodobnost průniku dvou vláken je dána podílem objemu kosého hranolu v němž se dvě vlákna nacházejí a celkového objemu textilní vlákenného útvaru.

Výchozí předpoklady, za kterých byl model závislosti tlaku na zaplnění (dle van Wyka) při „jednodimenzionálním“ stlačování (tj. je sledována odezva materiálu na tlak pouze v jednom směru) textilního vlákenného útvaru tvořen, jsou:

- je modelováno stlačování paralelních vláken v dokonale tuhé krabici (boxu), která je naplněna nestlačeným vlákenným materiálem s výchozím zaplněním μ_0 . Ve směru jedné osy působí **tlak** p , kterým je vlákenný útvar stlačován;
- textilní vlákenný útvar lze považovat za transversálně izotropní;
- odezva materiálu na stlačování se promítá pouze v protisměru namáhání; tlak v ostatních směrech není uvažován;
- odpor vůči stlačování způsobuje ohybová deformace
- vlákno lze považovat za nekonečný, pravidelně zatížený, pravidelně podepřený, štíhlý nosník;
- probíhá prostý rovinný ohyb, platí Hookův zákon, deformace jsou malé;
- smykové a třecí síly jsou zanedbány;
- délka ohybové čáry je shodná se střední délkou vláken mezi sousedními kontakty;
- stlačováním vlákenného materiálu se hustota pravděpodobnosti směrového uspořádání vláken nemění;
- objem a délka vláken se při stlačování nemění;
- systém je konzervativní, tj. přírůstek deformační energie je úměrný vykonané práci.

Na základě těchto předpokladů byl odvozen vztah

$$p = k_p \mu^3, \quad (52)$$

kde symbol k_p shrnuje vliv geometrie a směrového rozložení vláken a je považován za materiálovou konstantu, doporučené hodnoty jsou uvedeny v [2].

Protože i při nulovém tlaku existuje jisté zaplnění μ_0 , byla zavedena jednoduchá empirická korekce

$$p = k_p (\mu^3 - \mu_0^3). \quad (53)$$

Výpočet dle (53) připouští růst zaplnění nad hodnotu 1. Je proto zavedena další korekce, kdy se do výpočtu zahrnuje existence nestlačitelných oblastí tzv. *granulí*.

Předpokladem je, že se deformabilní objem zmenšuje (v místě jednoho kontaktu nemůže vzniknout další, není možný prostup vláken, nelze vytlačit všechen vzduch...). Korekce je založena na předpokladech:

- předchozí odvození neplatí na celé objemy, ale pouze na jejich deformabilní oblasti;
- počet granulí je roven počtu kontaktů;
- objem granulí je úměrný zaplnění;
- v mezním stavu při maximálním stlačení granule zaplní celý objem textilního vláknenného útvaru;
- granule má mezní zaplnění a to nejen při maximálním stlačení, ale i v libovolném stavu.

Byl odvozen vztah [10]

$$p = f(\mu) = k_p \frac{\mu^3}{\left[1 - \left(\frac{\mu}{\mu_m}\right)^3\right]^3} - k_p \frac{\mu_0^3}{\left[1 - \left(\frac{\mu_0}{\mu_m}\right)^3\right]^3}, \quad (54)$$

kde je doporučeno $\mu_m = 1$ pro textilní vláknenný útvar a $\mu_m = 0,8$ pro příze, hodnota $\mu_0 = 0,01 - 0,03$.

Z tohoto základního modelu jsou odvozovány modely pro „dvoudimenzionální stlačování“ [10] (tj. je sledována odezva materiálu na tlak ve 2 směrech), nebo pro zaplnění v přízi (komprimační teorie) [2].

6. Porózita tkaniny

Porózita, nebo též pórovitost, je důležitá vlastnost, která zásadně ovlivňuje propustnost i prodyšnost textilií. Lze ji definovat jako objem pórů V_p (vzduchu) v celkovém objemu textilie. Platí, že

$$\psi = V_p / V_c = 1 - \mu = 1 - V / V_c = 1 - S / S_c. \quad (55)$$

Pro chování textilie je důležitá i velikost, distribuce a tvar pórů. Prostor mezi vlákny může být soustředěn v několika málo velkých objemech, nebo ve velkém množství nejrozličnějších skulin, štěrbin, kanálků. Porózu tkaniny lze kvantifikovat různým způsobem [26], [29]. Zde je uvedeno členění s ohledem na geometrickou strukturu tkanin.

6.1 Objemová porózita

Objemová definice porózy vede na výpočet v následujících variantách:

a) z plošné hmotnosti

$$\psi_{1a} = V_p / V_c = 1 - G / \rho t, \quad (56)$$

b) ze zaplnění přízí

$$\psi_{1b} = V_P/V_C = 1 - \left(D_o T_o (1 + s_o) / \mu_o + D_u T_u (1 + s_u) / \mu_u \right) / \rho t. \quad (57)$$

Tento model zahrnuje mikroporózu mezi vlákny, ale nepostihuje distribuci a tvar vzduchových prostorů. Poróza nití může být vyjádřena pomocí ekvivalentního průměru póru [10], [26].

6.2 Plošná poróza

V literatuře [25] je uváděn podíl mezi inter- a intra- přízovou propustností cca 200 — 2000. Je formulován předpoklad, že porózu nití ve tkanině (a tím i tok skrz nit) je možno zanedbat vzhledem k velikosti pórů mezi nitmi.

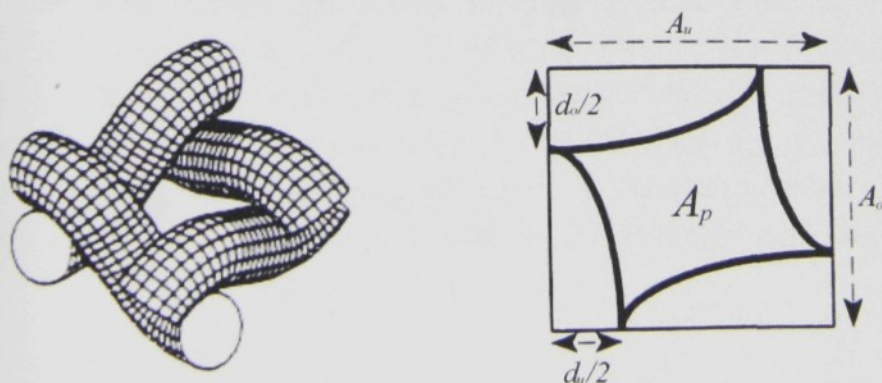
Plošná poróza definuje makroporózu tkaniny jako veličinu popisující velikost pórů mezi nitmi na základě znalosti plošného zakrytí

$$\psi_2 = S_p/S_C = 1 - Z_C = 1 - d_o D_o + d_u D_u - d_o D_o d_u D_u. \quad (58)$$

Výpočet součinitele plošného zakrytí vychází ze znalosti dostav a průměrů nití. Ve vztazích je uveden průměr volné niti, správně by měl být použit skutečný (kryjící) rozšířený rozměr niti. Takto definované zakrytí je nazýváno dle [7] efektivní. V povrchových oblastech příze, jedná se o oblasti vnitřní chlupatosti [2], [9], [27], se vyskytují volná izolovaná vlákna, která navíc mohou zvyšovat hodnoty zakrytí. Tento model vychází z kolmého průmětu tkaniny, zanedbává 3-dimenzionální strukturu póru tkaniny a vliv vazby. Nepostihuje prostorovou strukturu tkaniny. Není použitelný pro hustě dostavené tkaniny.

6.3 Modifikovaná plošná poróza

Tato představa stejně jako v kapitole 6.2 zanedbává mikroporózu uvnitř niti, ale rozšiřuje 2-dimenzionální strukturu makropóru mezi nitěmi na 3-dimenzionální. Předpokládají se čtyři základní typy pórů [8], [28], které mají stejný příspěvek k propustnosti tkanin. Jsou uvažovány kruhové průřezy nití a prostorová geometrie póru se modeluje na základě elips.



Obr.6 Typ póru pro plátňovou vazbu - kolmý průmět pórů (dle [8])

Pro plátňovou vazbu je vypočtena otevřená plocha póru A_p (dle obr. 6) rovna

$$A_p = A_o A_u - \frac{\pi}{4} d_u \left(A_o - \frac{d_o}{2} \right) - \frac{\pi}{4} d_o \left(A_u - \frac{d_u}{2} \right) \quad (59)$$

Pro výpočet poróznosti tkaniny je nutné určit podíl součtu ploch póru v celé střídě vazby ku celkové ploše střídě vazby [10]. Pro plátnovou vazbu pak vyjde:

$$\psi_3 = \frac{A_p}{A_0 A_y} \quad (60)$$

7. Experimentální část

Experimenty popsané v této kapitole jsou zaměřeny především na hodnocení geometrických parametrů bavlnářských tkanin a hledání jejich návazností na další vybrané vlastnosti. Jsou zařazeny i experimenty prováděné na tkaninách vyrobených z multifilu. K problematice deformability vazného bodu tkanin jsou provedeny jako doplňkové experimenty simulace vazného bodu.

Detailně jsou popsány především původní metody, které byly vyvinuty v souvislosti s řešením této práce, nebo prací souvisejících.

7.1 Popis vzorků

Základní charakteristiky vyhodnocovaných tkanin jsou uvedeny v tabulce 3. Vzorky tkanin lze rozdělit do tří skupin.

1. skupina

Pro výrobu tkanin byly použity příze vyrobené ze 100% bavlny za srovnatelných technologických parametrů. Příze bavlněné předené klasickou prstencovou technologií jsou označeny dále jako typ P, příze předené rotorovou technologií typ R a experimentální příze typ E. Příze byly vypřádány ve třech jemnostech: 10, 20 a 29,5 tex. Příze jemnosti 10 tex (typ P10 a E10) jsou předené pouze klasickou česanou bavlnářskou technologií (rotorovou přízi typ R nelze v této jemnosti vyrobit). Příze v jemnosti 20 a 29,5 tex (typ P20, R20, E20 a P29,5, R29,5, E29,5) jsou předené mykanou bavlnářskou technologií. U přízí byly z hlediska vlivu technologie na strukturu konstatovány tyto odlišnosti [30], [31], [32]:

- U přízí se s rostoucí hodnotou jemností projevují známé trendy, tj. roste počet vláken v průřezu, roste průměr příze, zvyšuje se chlupatost a index nestejnoměrnosti, klesá pevnost a roste tažnost.
- Významný rozdíl je mezi přízí typu R a přízemi typu P a E. Příze typu R má charakteristickou uzavřenou strukturu rotorové příze s příčně omotanými vlákny v povrchových vrstvách, tzv. ovinky. Příze typu P má strukturu klasické příze s převážně šroubovicově zakroucenými vlákny, podobnou strukturu má i příze typu E.
- Příze typu R má nižší chlupatost (měřeno USTER tester) než příze typu P (o cca 27%). Příze typu P a E mají řadu společných rysů, liší se však výrazně v chlupatosti. Příze typu E má ve všech případech vyšší hodnoty chlupatosti (o cca 23%) než příze typu P.

Jednotlivé příze byly dle potřeby přesoukány, osnovní příze byly šlichtovány a zpracovány standardním způsobem do tkanin plátňové vazby. Vzorky tkanin byly dodány v režném stavu (k označení tkaniny přidáno R) a upravené (operace praní a barvení, k označení tkaniny přidáno U). Výroba přízí a tkanin a celá řada měření byla pořízena ve spolupráci TUL s VUB a.s. a Spolsin s.r.o.

V této skupině tkanin byly měřeny jednak geometrické charakteristiky vazného bodu, geometrické charakteristiky vazné vlny a dále všeobecné charakteristiky struktury tkanin (dostava, plošná hmotnost, tloušťka, setkání, porózita, drsnost, aj.) jak je pro přehlednost uvedeno v tabulce 4. Je sledován vliv technologie výroby příze, resp. její chlupatosti na užité vlastnosti, strukturu a charakter tkanin.

Na základě vyhodnocení jednotlivých faktorů a závěrů stanovených uvnitř skupiny 1 jsou přidány další tkaniny a sledováno především chování deformace průřezu příze ve vazném bodě.

2. skupina

Tkaniny 1 – 8 jsou vyrobeny ze 100% bavlny v různých kombinacích jemností přízí a dostav. V této skupině tkanin byly měřeny geometrické charakteristiky vazného bodu a geometrické charakteristiky vazné vlny (viz tabulka 4).

3. skupina

Pro prozkoumání rozdílů chování přízí a multifilu ve vazném bodě tkaniny je do celkového experimentu zařazena také skupina multifilových polyesterových tkanin (v tabulce 3 označené 9 – 11).

Tabulka 3: Popis vzorků tkanin, jmenovité hodnoty

Vazba	Materiál	Skupina	Označení tkaniny	Technologie	Úprava	Jemnost osnovy [tex]	Jemnost útku [tex]	Dostava osnovy [0,1m ⁻¹]	Dostava útku [0,1m ⁻¹]	Zákrut osnovy [m ⁻¹]/ Zákrutový koeficient [m ⁻¹ ktex ^{2/3}]	Zákrut útku [m ⁻¹]/ Zákrutový koeficient [m ⁻¹ ktex ^{2/3}]
plátno	100%CO	1	P10R	prstencová	režná	10	485	310		1189/ 60	
			P10U		upravená						
			E10R	experiment.	režná					1232 / 60	
			E10U		upravená						
			P20R	prstencová	režná	20	250	240		889 / 65	
			P20U		upravená						
			R20R	BD	režná					888 / 65	
			R20U		upravená						
			E20R	experiment.	režná					802 / 65	
			E20U		upravená						
			P29,5R	prstencová	režná	29,5	240	200		658 / 65	
			P29,5U		upravená						
			R29,5R	BD	režná					681 / 65	
			R29,5U		upravená						
			E29,5R	experiment.	režná					652 / 65	
			E29,5U		upravená						
		2	1	BD	režná	20	25	290		909/65	701/50
			2		režná						
			3		režná						784/65
			4		režná						
			5		režná	29,5					701/65
			6		režná						
			7	prstencová	režná	25	29,5	260	230	784/65	701/65
			8	prstencová	režná	16,5	16,5	440	255	1223/80	1223/80
	100%PE	3	9	multifil	-	10	10	498	314	400	100
kepr 2/1			10		-		11	639	326		
atlas 4/1			11		-		10	836	295		

Tabulka 4: Experimenty provedené pro tkaniny (provedené experimenty jsou označeny barevně)

Skupina	Označení tkaniny	Geometrické charakteristiky nití ve vazném bodě		Geometrické charakteristiky vazné vlny		Charakteristiky struktury tkanin				
		Šířka, výška ¹⁾	Četnost vláken ²⁾			Dostava	Plošná hmotnost	Tloušťka	Setkání	Poróznost
1	P10R									
	P10U									
	E10R									
	E10U									
	P20R									
	P20U									
	R20R									
	R20U									
	E20R									
	E20U									
	P29,5R									
	P29,5U									
	R29,5R									
	R29,5U									
	E29,5R									
	E29,5U									
2	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
	7									
	8									
3	9									
	10									
	11									

¹⁾ Charakteristiky deformace příčného řezu nití ve vazném bodě tkaniny jsou specifikovány v kap. 4.2, metoda měření je popsána v 7.2.1

²⁾ Metoda vyhodnocení rozložení vláken v příčném řezu nití je popsána v kapitole 7.2.1.2.

Pokud jsou některé charakteristiky měřeny jak ve směru osnovy, tak ve směru útku, pak je k celkovému označení tkaniny ještě dodán index o respektive u . Vlastnosti, které se projevují jinak ve směru osnovy a jinak ve směru útku budou hodnoceny jako rozdílné charakteristiky.

Jako doplněk k prozkoumání chování nití (přízí a multifilu) ve vazném bodě tkaniny byly provedeny experimenty, které napodobují podmínky, jež vedou k deformaci průřezu nití ve vazném bodě. Charakteristiky nití použitých k těmto experimentům jsou popsány v tabulce 5. Jsou zde i stručně nazvány použité metodiky, které jsou blíže popsány v kapitole 7.2.2. V posledním sloupci je označena tkanina, ve které je daná nit použita.

Tabulka 5: Experimenty provedené pro příze a multifil (provedené experimenty jsou označeny barevně)

Materiál	Technologie	Jemnost [tex]	Zákrut [m^{-1}] / Zákrutový koeficient [$m^{-1}ktex^{2/3}$]	Použitá metoda		Tkanina (ve které je nit použita)
				Křížení (kap.7.2.2.1)	Stlačování (kap.7.2.2.2)	
100%CO	BD	20	1090/80			—
			980/72			—
			880/65			—
		29,5	840/80			—
			750/72			—
			680/65			—
	prstencová	20	889 / 65			P20R
		29,5	658 / 65			P29,5R
100%PL	multifil	10	0			9, 10, 11
			200			
			400			

7.2 Geometrické parametry struktury tkaniny

Ke zjišťování geometrických parametrů struktury tkaniny byly kromě standardních normovaných metod použity metody zkoumání struktury tkaniny pomocí analýzy řezů tkaniny.

7.2.1 Tvorba řezů tkaniny

Postup tvorby mikroskopických řezů tkaniny navazuje na postupy dosud používané při zhotovování příčných řezů příze. Příčné řezy příze se obvykle tvoří metodou tzv. „měkkých“ nebo „tvrdých“ řezů, viz [2], [3], [33].

Při tvorbě řezů tkaniny byly obě metodiky vyzkoušeny. Lépe se osvědčila metoda „měkkých“ řezů, kdy je jako nosné médium použita směs včelího vosku a parafinu. Některé technické detaily postupu bylo nutno upravit, vzhledem k odlišnostem zkoumaného materiálu. Řezacímu noži je v tomto případě předkládán větší objem vláken a proto je problematické vyhotovit dostatečně tenký řez vhodný k mikroskopickému pozorování a dalšímu zpracování. Celý postup je možno shrnout do následujících fází:

- odběr vzorků (vzorky velikosti 6x6 cm se vystřihují po diagonále tkaniny tak, aby v každém vzorku byla jiná skupina osnovních a útkových nití);
- fixace polohy vláken (dvojitá impregnace tkaniny lepidlem);
- příprava k řezání;

Proužek tkaniny obsahující v podélném směru:

— 5 až 6 nití pro hodnocení deformace nití ve tkanině,

— 3 až 4 nitě pro hodnocení zhuštění vláken v kolmém řezu nití ve vazném bodě,

je vlepen do speciální vaničky a zalit směsí parafinu a vosku; bloček i řezací ocelový nůž je nutno mrazit;

- řezání;

Bloček se vzorkem je upnut do čelistí ručního mikrotomu a řezán ocelovými noži.

Minimální tloušťka řezu je:

— 15 až 20 μm pro hodnocení zhuštění vláken v kolmém řezu nití ve vazném bodě,

— 40 až 50 μm pro hodnocení deformace nití ve tkanině;

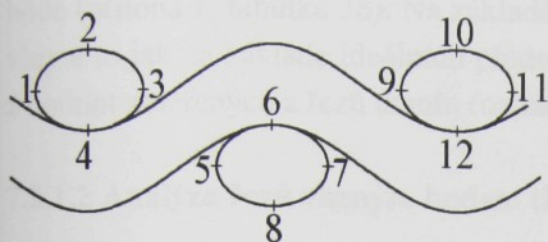
- příprava preparátu (řez je položen na podložní sklíčko a zakápnut paraxylem);

Na základě zkušeností lze konstatovat, že metoda „měkkých“ řezů je pro účely tvorby řezů vazným bodem tkaniny vyhovující. Vytvoření celého souboru řezů je sice dosti pracné, ale při získání jistých zkušeností poměrně dobře proveditelné.

Z příčných řezů tkaniny lze hodnotit zvlášť parametry stlačení a zploštění příze ve vazném bodě a deformaci příze v podélném pohledu tzv. vaznou vlnu. Postup přípravy preparátů pro tyto varianty se liší jen mírně, ale metody vyhodnocení jsou zcela odlišné. Používané postupy jsou popsány v dalších kapitolách.

7.2.1.1 Analýza řezů vaznou vlnou tkaniny

Pro analýzu jednotlivých parametrů vnitřní struktury tkaniny je provedena orientace preparátu (dle obr. 7a).



Obr. 7a Schéma řezu tkaninou



Obr. 7b Příčný řez vaznou vlnou příze 100% VI

Prostřednictvím obrazové analýzy [34] jsou snímány charakteristické body. Body 1 až 4, 5 až 8 a 9 až 12 jsou „krajními“ body příčných řezů přízí. Protože příčné řezy příze mají tvar podobný elipse, lze body 1,3,5,7,9,11 definovat přesněji jako průsečíky příslušné elipsy s jejími hlavními poloosami a body 2,4,6,8,10,12 jako průsečíky elipsy s jejími vedlejšími poloosami. Stanovení polohy bodů 1 až 12 se zdá být na zvětšeném obraze reálného řezu nepřesné, ale porovnání geometrických poměrů zjištěných na základě těchto bodů s hodnotami uváděnými v literatuře [1], [2] ukazuje na dobrý souhlas. Z dat získaných tímto postupem lze vyhodnocovat parametry popisující tkaninu:

- šířku a výšku příze ve vazném bodě;
- parametry vazné vlny.

Na základě těchto hodnot lze k vyhodnocení délky vazné vlny a setkání použít modely uvedené v kapitolách 4.3. Tím lze idealizované geometrické představy (viz kapitola 4.1) přiblížit k realitě změnou předpokladů:

- v místech vazných bodů dochází k deformaci niti;
- tkanina není vyrovnaná.

Pro tkaniny ze *staplových* přízí skupin 1 a 2 byly zhotoveny sady 30 – 50 řezů v osnovním i útkovém směru. Jako parametr průřezu příze ve vazném bodě tkaniny bylo vyhodnoceno relativní stlačení a relativní rozšíření dle vzorců (12) a (13), průměr příze je vypočten dle (4) se zaplněním podle komprimační hypotézy. Střední hodnoty spolu s 95% intervalem spolehlivosti jsou uvedeny v příloze 1, tabulce 1.

Pro tkaniny z *multifilu* byly zhotoveny sady 30 řezů v osnovním i útkovém směru. Jako parametr průřezu multifilu ve vazném bodě tkaniny bylo vyhodnoceno relativní stlačení a relativní rozšíření dle vzorců (12) a (13), průměr multifilu je vypočten dle (4) se zaplněním 0,7. Střední hodnoty spolu s 95% intervalem spolehlivosti jsou uvedeny v příloze 1, tabulce 2.

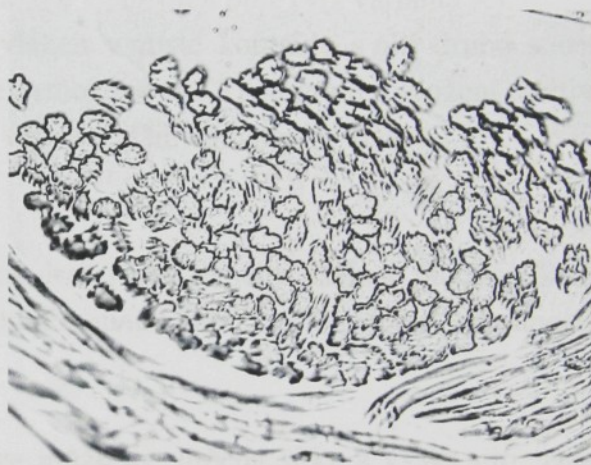
Pro tkaniny ze *staplových* přízí skupin 1 a 2 byly také hodnoceny parametry *vazné vlny příze* ve tkanině. Parametry byly určeny jednak na základě ideálních představ uvedených

v kapitole 4.1 (označené „ideal“). Tytéž parametry byly vyhodnoceny z charakteristických bodů změřených z řezů tkanin metodikou popsanou v kapitole 7.2.1.1 (označené „experiment“). Takto byly hodnoceny parametry: rozteč os přízí ve vazném bodě, relativní výšky zvlnění, poměrné stlačení tkaniny (příloha 1, tabulka 3a), úhly vazné vlny v inflexním bodě (příloha 1, tabulka 3b). Na základě parametrů zvlnění byl proveden výpočet délek vazné vlny a to jak na základě ideálních představ uvedených v kapitole 4.1 (označené „ideal“), tak i z hodnot změřených z řezů tkanin (označené „experiment“) (příloha 1, tabulka 4).

7.2.1.2 Analýza řezů vazným bodem tkaniny

Standardní hodnocení příčných řezů příze vychází z předpokladu osově symetrie nití, což umožňuje vytvoření soustavy mezikruží se středem v těžišti. Jednotlivá vlákna jsou do mezikruží začleňována dle své polohy, což umožňuje stanovení radiálního průběhu zaplnění [2], [3].

U deformované příze princip osově symetrie nelze použít (obr.8). Proto je soustava mezikruží nahrazena čtvercovou sítí. Jednotlivé buňky sítě jsou vlastně třídními intervaly a lze v nich stanovit relativní četnosti výskytu vláken. Matematicky je čtvercová síť vyjádřena prvky pole. Je však nutné určit pravidlo, jakým způsobem řezy vhodně přikládat a sčítat. Principiálně jsou možné tři varianty.



Obr.8 Příčný řez vazným bodem příze 100% VI

Varianta A: Výpočet četnosti výskytu vláken ve standardních souřadnicích:

- *orientace preparátu* (tak, aby směr zploštění byl vodorovný a příze druhé soustavy obtáčela řez sledované niti zespodu);
- *snímání souřadnic těžišť vláken* (z mikroskopu je obraz řezu přenášen kamerou do počítače, snímání souřadnic probíhá pomocí obrazové analýzy);
- *výpočet souřadnic těžiště příze*;
- *umístění řezu do čtvercové sítě* (těžiště řezu je umístěno do středu sítě);
- *sumace vláken do buněk pole* (šířka buňky pole je rovna velikosti oka sítě; je úměrná průměru vlákna; vlákna jsou umisťována do buněk pole podle souřadnic těžišť);
- *výpočet relativních četností výskytu vláken v buňkách*.

Výsledkem je pole relativních četností výskytu vláken ve čtvercové sítí (histogram). Buňky pole se stejnou hodnotou relativní četnosti je možno spojit. Vzniklá soustava isolinií stejné četnosti popisuje rozložení vláken v příčném řezu příze. Výhodou je možnost vzájemného porovnání příčného řezu „volné“ (tj. nezatkané) niti a niti deformované ve vazném bodě.

V důsledku nestejnoměrnosti niti se ztrácí možnost sledovat u deformované niti rozložení vláken v místě kontaktu s nití druhé soustavy.

Varianta B: Výpočet četnosti výskytu vláken v modifikovaných souřadnicích:

- *orientace preparátu* (viz varianta A);
- *snímání souřadnic těžišť vláken* (viz varianta A);
- *určení souřadnic těžiště příze* (viz varianta A);
- *výpočet výšky těžiště* (je určen rozdíl mezi těžištěm niti a těžištěm nejnižšího položeného vlákna, to jest vlákna v místě kontaktu);
- *modifikace souřadnic* (dělení souřadnic těžišť jednotlivých vláken výškou těžiště niti, výška těžiště u každého takto modifikovaného řezu je nyní rovna jedné);
- *sumace vláken do buněk pole* (velikost buňky pole je volena tak, aby byla výška těžiště rozdělena do pěti úrovní);
- *výpočet relativních četností výskytu vláken v buňkách pole* (viz varianta A).

Tato varianta umožňuje sledovat rozložení vláken v místě kontaktu s nití druhé soustavy. Není možné vzájemné porovnání „volné“ a deformované niti. Histogram rozložení relativních četností vláken „volné“ niti se jeví paradoxně větší s vyšším zhuštěním vláken [35].

Varianta C: Výpočet zaplnění

Princip této metody spočívá v nahrazení skutečné řezné plochy vlákna plochou kruhu o ekvivalentním průměru a rozčlenění této plochy do buněk pole. Tento princip vyhodnocení je popsán v [2].

Ze souřadnic těžišť jednotlivých vláken v řezu může být určena šířka a výška niti, zhuštění vláken niti ve vazném bodě a počet vláken v niti.

Byly připraveny řezy osnovní přízí ve vazném bodě tkaniny, řezy útkovou přízí ve vazném bodě tkaniny a řezy odpovídající „volné“ osnovní a „volné“ útkové příze pro bavlněné tkaniny 4, 8, R20R a R20U. Každý soubor obsahoval 50 řezů. Analýza řezů vazným bodem tkaniny byla provedena variantou B. Výsledkem jsou pole relativních četností výskytu vláken ve čtvercové síti (histogramy) a vrstevnicové grafy (soustavy isokřivek). Grafy jsou uvedeny v příloze 2 a diskutovány v kapitole 8.1.2.

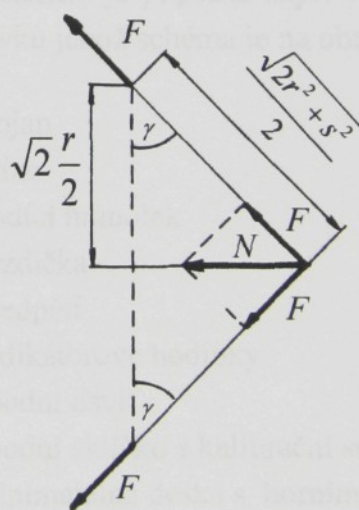
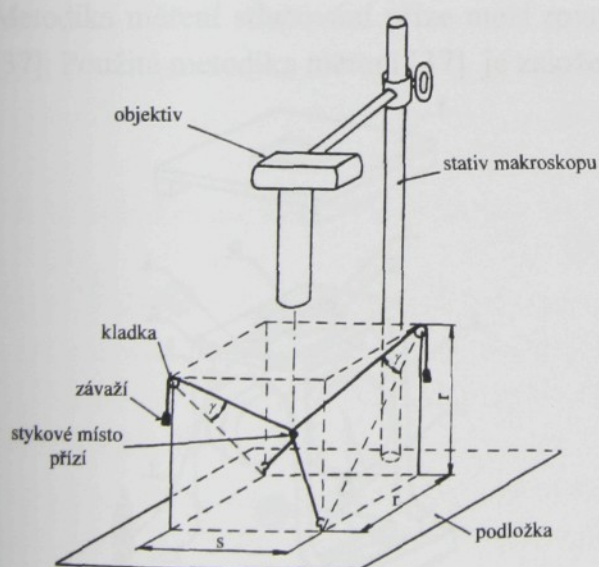
7.2.2 Metody zkoumání charakteru zplošťování nití ve vazném bodě tkaniny

Tyto metody umožňují popis deformace nití ve vazném bodu tak, aby byly zachyceny zásadní jevy, které je nutno brát v úvahu při tvorbě modelů tkaniny.

Byly provedeny dva druhy experimentů. První se zabývá deformačními závislostmi příčného řezu přízí, druhý je zaměřen na chování multifilu. Důvodem je, že z hlediska vnitřního uspořádání a tedy i deformačních vlastností se jedná o zcela odlišné struktury. V experimentech nebyla uvažována reologie. Je předpokládána ustálená deformace a konstantní klimatické podmínky (teplota, vlhkost vzduchu atd.).

7.2.2.1 Simulace vazného bodu křížením nití

Metodika zjišťování deformace nitě ve vazném bodě tkaniny byla navržena na základě [1]. Simulace zploštění nití ve vazném bodě je prováděna pomocí přípravku schematicky znázorněného na obr.9a. Na podložce makroskopu je umístěno duté těleso tvaru pravoúhlého hranolu o rozměrech stran s , r , r , které má ve dvou protilehlých rozích na horní základně umístěny malé kladky (zanedbatelně malé hmotnosti), které se pohybují se zanedbatelným třením. Ve dvou protilehlých rozích na dolní základně hranolu jsou upevněny nitě a vedeny přes kladky způsobem zřejmým z obr.9a. Na jejich konce jsou zavěšena stejná závaží. Je zřejmé, že se nitě překříží v geometrickém středu hranolu. Zanedbáme-li tloušťku nití, pak jejich neutrální osy mají směr tělesových úhlopříček hranolu. Obě nitě leží v navzájem kolmých rovinách.



Obr. 9a Experimentálního uspořádání dle [1] Obr. 9b Silové a geometrické poměry v místě kontaktu (dle [1])

Síly způsobené vahou závaží se přenášejí přes kladky a za předpokladu, že smykové tření působící mezi nitěmi v místě jejich vzájemného překřížení jsou zanedbatelně malé, se přenesou prakticky beze změny i do částí nití pod místem překřížení. Silové a geometrické poměry u obou nití budou stejné. Tyto poměry jsou pro jednu nit znázorněny na obr. 9b.

Pro tahovou sílu F ve střednici nití v místě překřížení platí lze určit normálovou sílu

$$N = \frac{2F \cdot s}{\sqrt{2r^2 + s^2}}. \quad (61)$$

Pro úhel překřížení nití platí

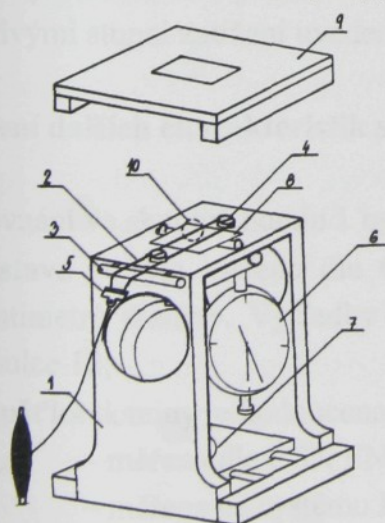
$$\gamma = \arccos \frac{\sqrt{2} \cdot r}{\sqrt{2r^2 + s^2}}. \quad (62)$$

Normálová síla způsobuje deformaci nití. Rozměry přípravku byly $s=13\text{cm}$, $r=16\text{cm}$. Úhel překřížení je dle vztahu (62) roven $\alpha=30^\circ$, což odpovídá hodnotám překřížení nití ve tkanině (viz příloha 1, tabulka 3b).

K simulaci vazného bodu křížením příze bylo použito šesti bavlněných přízí zhotovených rotorovou technologií, o jemnosti 20tex a 29,5tex a zákrutových koeficientech $a_m = 65,72,80\text{m}^{-1}\text{ktex}^{2/3}$ (viz. tabulka 5) [36]. Na volné konce příze bylo pomocí svorek zavěšováno závaží o hmotnostech 1g, 11g, 61g a 111g. Při použití závaží vyšší hmotnosti již docházelo k přetrhům příze. Velikosti tahové síly ve střednici nití, normálová síla a napětí přepočtené substanční plochou (dle(4)) jsou uvedeny v příloze 1 v tabulce 5. Překřížení nití bylo snímáno objektivem makroskopu. Z naměřených hodnot charakteristického rozměru $2d$ byla vypočítána hodnota d . Výsledky relativního stlačení zjištěné z jednotlivých snímků byly statisticky zpracovány a jsou uvedeny v příloze 1, tabulce 6.

7.2.2.2 Stlačování nití mezi rovnoběžnými deskami

Metodika měření stlačování příze mezi rovnoběžnými deskami je popsána např. v [2], [16], [37]. Použitá metodika měření [37] je založena na přípravku jehož schéma je na obr. 10.



1. stojan
2. příze
3. vodící hranolek
4. brzdíčka
5. předpětí
6. indikátorové hodinky
7. spodní osvit
8. spodní sklíčko s kalibrační stupnicí
9. odnímatelná deska s horním sklíčkem
10. měřicí zóna

Obr.10 Přípravek pro stlačování nití mezi rovnoběžnými deskami (dle [37])

V zorném poli jsou vedeny dva úseky příze, měření probíhá v zóně 10. Horní desku přípravku lze kombinovat s dalšími segmenty různé hmotnosti, a tak nastavovat potřebné zatížení. Šířka nití a je odečítána na spodním sklíčku s kalibrační stupnicí 8. Na

indikátorových hodinkách 6 je odečítána výška niti b . Nestejnoměrnost niti způsobí mírnou nerovnoběžnost desek, která vede k různým hodnotám na stupnicích hodinek. Prozatím je tato nepřesnost zanedbána a šířka niti je odečítána jako průměrná hodnota z hodnot odečtených na stupnici obou indikátorových hodinek.

K simulaci vazného bodu stlačováním přízí mezi dvěma rovnoběžnými deskami bylo použito bavlněných přízí dvou jemností zhotovených klasickou technologií (viz. tabulka 5) [36]. Hmotnost zatěžovacích segmentů, vyvozená normálová síla a napětí (přepočtené na substanční plochu příčného řezu) jsou uvedeny v příloze 1, tabulce 7. Výsledky relativního stlačení a relativního rozšíření příze byly statisticky zpracovány a jsou uvedeny v příloze 1, tabulce 8.

K simulaci vazného bodu stlačováním multifilu bylo použito polyesterové hedvábí (multifil) o jemnosti 10tex (viz. tab. 5). Pro ověření předpokladu, že průměr multifilu podstatně ovlivňuje axiální tahová síla [11], byl nejprve multifil udělen na laboratorním zákrutoměru zákrut v rozsahu 0, 200 a 400m⁻¹. Předpětí bylo dosaženo pomocí závaží o hmotnosti 0, 50, 80g zavěšeného na konci zakrucovaného multifilu. Zakroucený multifil byl přenesen pod mikroskop při zachování předpětí. Systémem obrazové analýzy byl změřen příčný rozměr svazku a označen jako průměr d , který byl přepočten na hodnotu relativního stlačení hodnotou průměru vypočtenou podle vzorce (4) se zaplněním 0,7 (podle kapitoly 2.2.). Výsledky byly statisticky zpracovány a jsou spolu s jednotlivými kombinacemi zatížení uvedeny v příloze 1, tabulce 9). Dále bylo zjišťováno zploštění způsobené normálovým zatížením při konstantní axiální tahové síle vyvozené závažím o hmotnosti 50g (tj. 0,25N). Normálové zatížení bylo vyvozeno deskami pokládanými na multifil. Tyto desky byly o hmotnosti 0,5, 1 a 2kg. Byly měřeny charakteristické příčné rozměry multifilu, výsledky zjištěné vyhodnocením jednotlivých měření byly statisticky zpracovány a jsou spolu s jednotlivými stupni zatížení uvedeny v příloze 1, tabulce 10) [38].

7.3 Měření dalších charakteristik struktury tkaniny

Pro porovnání ve skupině tkanin 1 byly měřeny následující charakteristiky:

- **dostava** – byla měřena dle ČSN EN ISO 1049-2 tj. byl spočten počet nití na 10 centimetrů tkaniny. Výsledky byly statisticky zpracovány a jsou uvedeny v příloze 3, tabulce 12;
- **tloušťka** tkaniny je hodnocena několika způsoby s následujícím značením:
 - t_{CSN} – měřena dle ČSN EN ISO 50084 (přítlak 0,5Ncm⁻²);
 - t_0 – měřena na systému KES (přítlak 0,0049Ncm⁻²);
 - t_m – měřena na systému KES (přítlak 0,49Ncm⁻²);
 - t_{vyrov} – vypočtena podle modelu vyrovnané tkaniny;
 - t_{obec} – hodnocena z řezů tkaniny (tj. pro obecnou tkaninu);

Zjištěné výsledky jsou uvedeny v příloze 3, tabulce 13. Byly vypočteny korelační koeficienty a relativní odchylky od změřených hodnot t_{CSN} . Tyto hodnoty jsou uvedeny v příloze 3, tabulce 14, grafické hodnocení je provedeno v příloze 3, obr 5.

- **setkání** je hodnoceno několika způsoby:

- S_{exp} – měřeno napínáním niti vypárané ze tkaniny, napínání je prováděno na zákrutoměru s napínací silou $5mN\text{tex}^{-1}$;
- $S_{PeirceV}$, S_{sinV} – vypočteno podle modelů vazné vlny v kapitole 4.3 pro vyrovnanou tkaninu;
- $S_{PeirceO}$, S_{sinO} – vypočteno podle modelů vazné vlny v kapitole 4.3 pro obecnou tkaninu;

Výsledky jsou uvedeny v příloze 3, tabulce 15. Byly vypočteny korelační koeficienty a relativní odchylky od změřených hodnot s_{exp} . Tyto hodnoty jsou uvedeny v příloze 3, tabulce 16, grafické hodnocení je provedeno v příloze 3, obr 6.

- **plošná hmotnost** byla zjištěna:

- G_{exp} – vážením dle ČSN EN ISO 12127;
- výpočtem dle vzorce (7) se třemi různými možnostmi setkání:
 - G_{vyp1} – setkání změřené;
 - G_{vyp2} – setkání vypočtené dle modelu vyrovnané tkaniny;
 - G_{vyp3} – setkání vypočtené dle modelu obecné tkaniny;

Výsledky jsou uvedeny v příloze 3, tabulce 17. Byly vypočteny korelační koeficienty a relativní odchylky od hodnot změřených. Tyto hodnoty jsou uvedeny v příloze 3, tabulce 18, grafické hodnocení je provedeno v příloze 3, obr 7.

7.3.1 Metody hodnocení porózy tkaniny

Měření porózy tkanin bylo prováděno na mikroskopu v procházejícím světle. Obraz je zpracován prostřednictvím obrazové analýzy [33]. Obdobná metoda je používána při zjišťování průměrů přízí [9]. Také při experimentu s tkaninami je nutno řešit stejný problém – nastavení intenzity osvětlení tak, aby sejmutý obraz co nejlépe odpovídal realitě a byl „opakovatelný“. Kontrastního zobrazení lze dosáhnout kombinací intenzity spodního osvětlení a prahování obrazu. Obraz je zaostřen na okraj přízí (obr.11a), je převeden do binární podoby, která má pouze dvě hodnoty: 0 pro pozadí a 1 pro objekty.



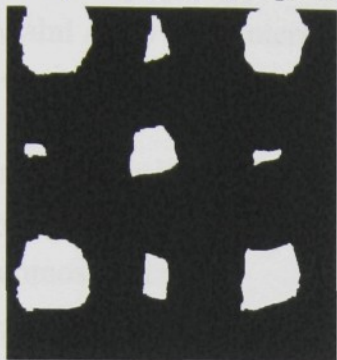
Obr. 11a Obraz tkaniny

Pozadím je v tomto případě plocha zakrytá přízemí a měřeným objektem prosvícená plocha.

Nastavení prahu bylo prováděno dvěma způsoby, které zároveň odpovídají i dvojímu možnému pojetí příze ve tkanině:

- a) minimální práh – příze je chápána jako kompaktní těleso a vlákna, která jsou od jedné vrstvy oddělena mezerou (tzv. vnější chlupatost) jsou zanedbána (obr.11b);
- b) maximální práh – do celkově zakryté plochy jsou započtena všechna vlákna, tj. i vlákna tvořící vnější chlupatost (obr.11c).

Na základě výsledků práce [39] byla použita varianta stanovení minimálního prahu.



Obr. 11b Minimální práh



Obr. 11c Maximální práh

Prahování obrazu tkaniny při měření poróznosti

Byly vyčísleny všechny koeficienty doporučené k vyjádření poróznosti dle kapitoly 6.1. a označeny:

- ψ_{2a} – plošná definice dle (58), průměr příze dle (4);
- ψ_{2b} – plošná definice dle (58), místo šířka příze změřená z řezů tkaninou;
- ψ_{2c} – změřená poróznost dle kapitoly 7.3.1;
- ψ_{1a1} – objemová definice dle (56), za tloušťku dosazena hodnota t_{model} ;
- ψ_{1a2} – objemová definice dle (56), za tloušťku dosazena hodnota $t_{\text{řezy}}$;
- ψ_{1b1} – objemová definice dle (57), za tloušťku dosazena hodnota t_{model} ;
- ψ_{1b2} – objemová definice dle (57), za tloušťku dosazena hodnota $t_{\text{řezy}}$;
- ψ_{3a} – modifikovaná plošná definice dle (59) a (60), průměr příze dle (4);
- ψ_{3b} – modifikovaná plošná definice dle (59) a (60), místo průměru šířka příze změřená z řezů tkaninou.

Vyhodnocení koeficientů poróznosti je uvedeno v příloze 2, tabulce 19. Byly vypočteny korelační koeficienty, které jsou uvedeny v příloze 2, tabulce 20, grafické hodnocení je provedeno v příloze 3, obr 8.

8. Výsledky

Vzhledem k variantnosti zkoumaného souboru tkanin a celkové variabilitě textilního materiálu bylo nutno nejprve posoudit vliv technologických parametrů a následně popsat chování jednotlivých charakteristik, případně vztahy mezi nimi. S ohledem na charakter dat a vzájemné vztahy mezi charakteristikami nití i tkanin byla použita regresní analýza. Byly tvořeny regresní modely pro:

1. posouzení vlivu vytipovaných technologických faktorů. Tento typ regresního modelu (neortogonální ANOVA s interakcemi) neslouží k predikci;
2. popsání souvislostí mezi charakteristikami tkaniny a jejich predikci.

ad 1. Pro posouzení vlivu jednotlivých technologických faktorů ve skupinách tkanin 1 a 2 byly zkoumány tyto faktory:

- faktor 1 jemnosti příze $f_1 \quad \langle T_i \rangle$;
- faktor 2 finální úpravy $f_2 \quad \langle 1;2 \rangle \approx \langle \text{režná; upravená} \rangle$;
- faktor 3 technologie dopřádání příze $f_3 \quad \langle 1;2;3 \rangle \approx \langle \text{prstencová; rotorová; experimentální} \rangle$;
- faktor 4 směru vyšetřování vlastnosti $f_4 \quad \langle 1;2 \rangle \approx \langle \text{osnova; útek} \rangle$.

Vlastnosti, které se projevují jinak ve směru osnovy a jinak ve směru útku (faktor 4) byly hodnoceny z hlediska faktorů 1 a 2 jako rozdílné charakteristiky. Obecně lze konstatovat, že faktor 1 (jemnost příze) logicky ovlivňuje konstrukci tkaniny a tedy i velikost dalších charakteristik. Pokud byly nalezeny statisticky významné odlišnosti ve vlastnostech režných a upravených tkanin (faktor 2) jsou popsány relativní odchylkou $\delta = (x_{\text{upravená}} - x_{\text{režná}}) / x_{\text{režná}} \cdot 100 [\%]$.

Pro skupinu 3 tj. tkaniny vyrobené z multifilu, byly zkoumány jiné vlivné faktory, tak jak odpovídá odlišnému charakteru této délkové textilie:

- faktor 1 dostava $f_1 \quad \langle D_i \rangle$;
- faktor 2 zákrut $f_2 \quad \langle Z_i \rangle$;
- faktor 3 provázání $f_3 \quad \langle 1;2 \rangle \approx \langle 1 \text{ vazný bod s překřížením; 2 flotující nit} \rangle$.

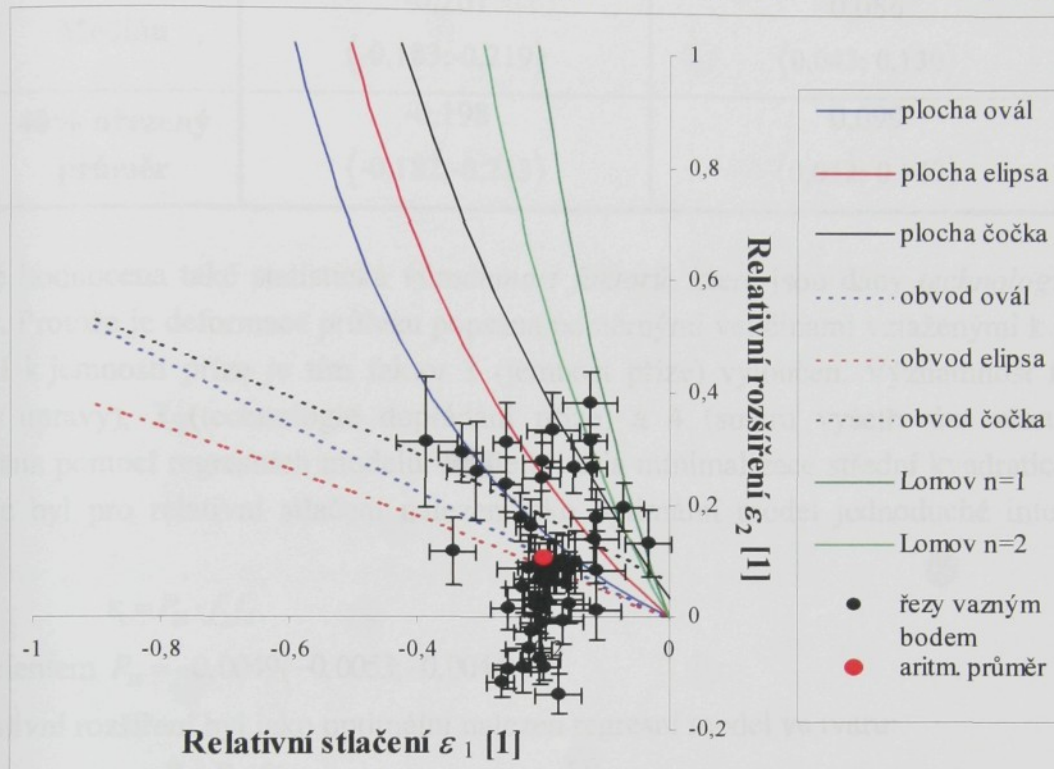
Pro každou zkoumanou vlastnost byly testovány regresní modely, které obsahovaly jak jednoduché členy, tak jejich interakce. Byly tvořeny modely kombinované z jednotlivých členů. Kriteriem pro výběr modelu byla minimalizace střední kvadratické chyby predikce. Vzhledem k variantnosti souboru tkanin bylo nutno modely hodnotit nejen z ryze statistického hlediska, ale volit spíše logicko – statistický přístup.

Analýza byla prováděna pomocí programů Qcexpert a ADSTAT.

8.1 Parametry průřezu příze ve vazném bodě tkaniny

8.1.1 Velikost deformace průřezu příze ve vazném bodě tkaniny

Výsledky měření relativního rozšíření a relativního stlačení příze ve vazném bodě tkaniny jsou, spolu s průběhy relativních deformací dle hypotéz z kapitoly 4.2, vyznačeny na obr. 12.



Obr.12 Závislost relativního rozšíření na relativním stlačení příze ve vazném bodě tkaniny (řezy vazným bodem tkaniny)

Je zřejmé, že hodnoty získané měřením tvoří mrak bodů v oblasti, kde křivky znázorňující hypotézy mají velmi podobný průběh. I bez vnějšího zatížení tkaniny mají příze v místech vazných bodů tkaniny zdeformovaný tvar. Hodnoty relativního rozšíření nabývají i záporných hodnot. Důvodem je nadhodnocení průměru příze vypočteného na základě komprimační hypotézy (kapitola 2).

Na základě porovnání 95% intervalů spolehlivosti a analýzy rozptylu hodnot relativního stlačení a relativního rozšíření byly vypočteny kromě aritmetického průměru i robustní odhady střední hodnoty, které jsou uvedeny v tabulce 5. Mezi robustními charakteristikami nejsou statisticky významné rozdíly.

Tabulka 5 Odhady středních hodnot relativního stlačení a relativního rozšíření

	Relativní stlačení $\varepsilon_1[1]$	Relativní rozšíření $\varepsilon_2[1]$
Aritmetický průměr	-0,199 $\langle -0,180;-0,218 \rangle$ *)	0,106 $\langle 0,069; 0,144 \rangle$
Medián	-0,201 $\langle -0,183;-0,219 \rangle$	0,086 $\langle 0,043; 0,130 \rangle$
40% uřezaný průměr	-0,198 $\langle -0,182;-0,213 \rangle$	0,099 $\langle 0,052; 0,147 \rangle$

Je hodnocena také statistická významnost faktorů, které jsou dány *technologií* výroby tkaniny. Protože je deformace průřezu popsána poměrnými veličinami vztaženými k průměru, a tedy i k jemnosti příze je tím faktor 1 (jemnost příze) vyloučen. Významnost faktorů 2 (finální úpravy), 3 (technologie dopřádání příze) a 4 (směru vyšetřování vlastnosti) je hodnocena pomocí regresních modelů. Podle kriteria minimalizace střední kvadratické chyby predikce byl pro relativní stlačení nalezen jako optimální model jednoduché interakce ve tvaru:

$$\varepsilon_1 = P_{24} \cdot f_2 f_4,$$

(63)

s koeficientem $P_{24} = -0,0049 \langle -0,0053; -0,0044 \rangle$.

Pro relativní rozšíření byl jako optimální nalezen regresní model ve tvaru:

$$\varepsilon_2 = P_0 + P_4 \cdot f_4,$$

(64)

s koeficienty $P_0 = -0,566 \langle -1,281; -0,149 \rangle$ a $P_4 = -0,071 \langle -0,004; -0,146 \rangle$

Z toho lze usoudit, že se hodnoty relativního stlačení a relativního rozšíření přízí různých jemností a různé technologie dopřádání v relaxované tkanině statisticky významně neliší. Statisticky významný rozdíl je u těchto hodnot v závislosti na faktoru 2 finálních úprav, u upravených tkanin je navíc zvýrazněn rozdíl mezi osnovou a útkem. Na základě těchto výsledků byly určeny charakteristické hodnoty, viz tabulka 6.

*) 95% interval spolehlivosti

Tabulka 6: Navržené hodnoty relativního rozšíření a relativního stlačení v režných a upravených (praní, barvení) bavlnářských tkaninách

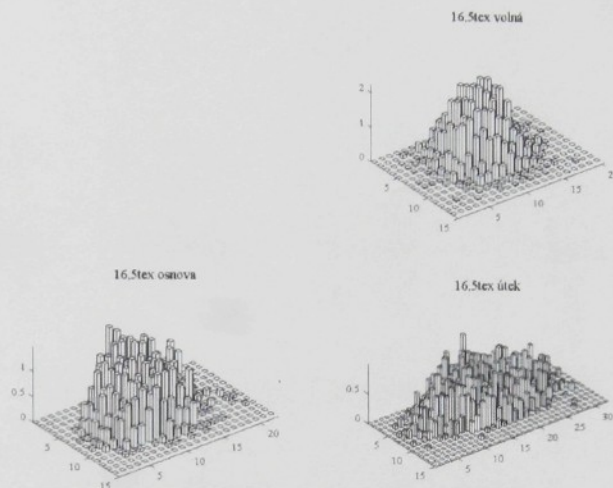
Označení tkaniny				
Skupiny 1 a 2 (režné tkaniny)	osnova + útek			
	Relativní stlačení $\varepsilon_l [1]$		Relativní rozšíření $\varepsilon_2 [1]$	
	-0,188		0,085	
	$\langle -0,214; -0,155 \rangle^*)$		$\langle 0,030; 0,153 \rangle$	
Skupina 2 (upravené tkaniny)	osnova		útek	
	Relativní stlačení	Relativní rozšíření	Relativní stlačení	Relativní rozšíření
	$\varepsilon_l [1]$	$\varepsilon_2 [1]$	$\varepsilon_l [1]$	$\varepsilon_2 [1]$
	-0,218	0,033	-0,272	0,200
	$\langle -0,256; -0,179 \rangle$	$\langle -0,104; 0,169 \rangle$	$\langle -0,327; -0,216 \rangle$	$\langle 0,096; 0,304 \rangle$

Všechny použité příze jsou vypředeny v oblasti běžně používaných zákrutů, závislost poměrného stlačení a poměrného zploštění na zákrutu příze není zřejmá.

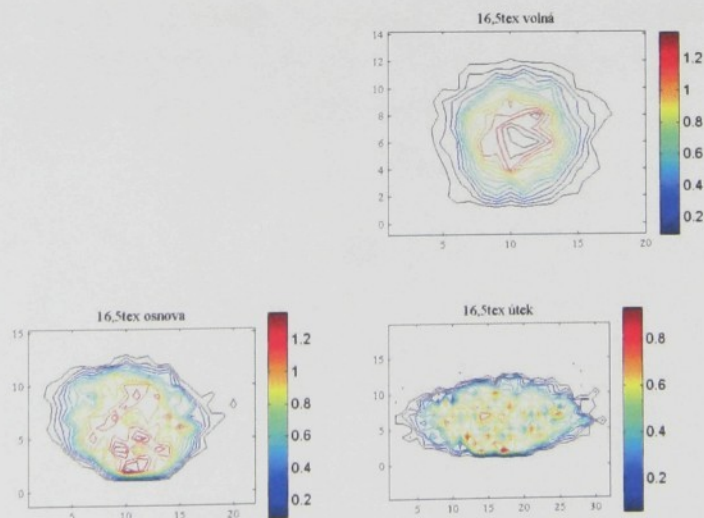
^{*)} 95% interval spolehlivosti

8.1.2 Charakter deformace průřezu příze ve vazném bodě tkaniny

Deformace průřezu příze ve vazném bodě tkaniny je zřejmá z rozložení vláken v příčném řezu ve vazném bodě. Byly připraveny řezy osnovní přízi ve vazném bodě tkaniny, řezy útkovou přízí ve vazném bodě tkaniny a řezy odpovídající „volné“ osnovní a „volné“ útkové příze pro tkaniny 4, 8, R20R a R20U, jak je popsáno v kapitole 7.2.1. Jsou vypočteny četnosti výskytu vláken v modifikovaných souřadnicích a zkonstruovány histogramy a vrstevnicové grafy příčných řezů. Pro ilustraci jsou na obr. 13 uvedeny grafy pro tkaninu 8. Ostatní grafy jsou uvedeny v příloze 2.

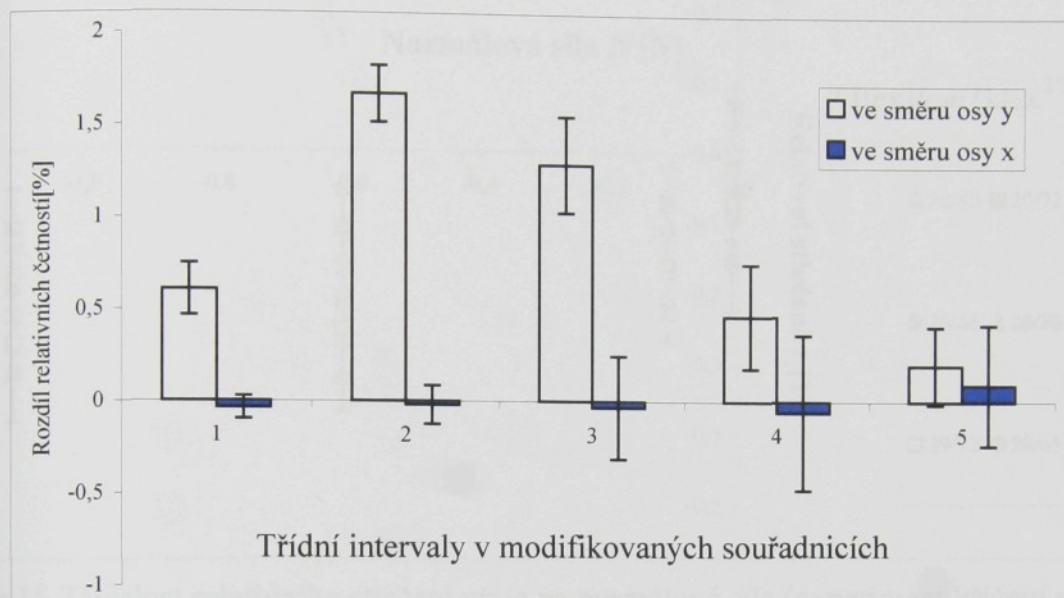


Obr 13a: Histogramy relativních četností vláken v příčném řezu přízi 16,5 tex (tkanina 8) (popis os: x,y - třídní intervaly v modifikovaných souřadnicích, z - relativní četnost [%])



Obr 13b: Vrstevnicové grafy relativních četností vláken v příčném řezu přízi 16,5 tex (tkanina 8) (popis os: x,y - třídní intervaly v modifikovaných souřadnicích)

Hodnocení zhuštění vláken v řezu příze ve vazném bodě vychází z předpokladu symetrie řezu příze ve směrech měření šířky a výšky příčného řezu. Je hodnocen průmět relativních četností do směru os x a y. Tím jsou získány dva histogramy relativních četností výskytu vláken. Je testována symetrie dat, pro oba histogramy jsou vypočteny rozdíly pro 5 koncových tříd. Rozdíly jsou zobrazeny na obrázku 14.

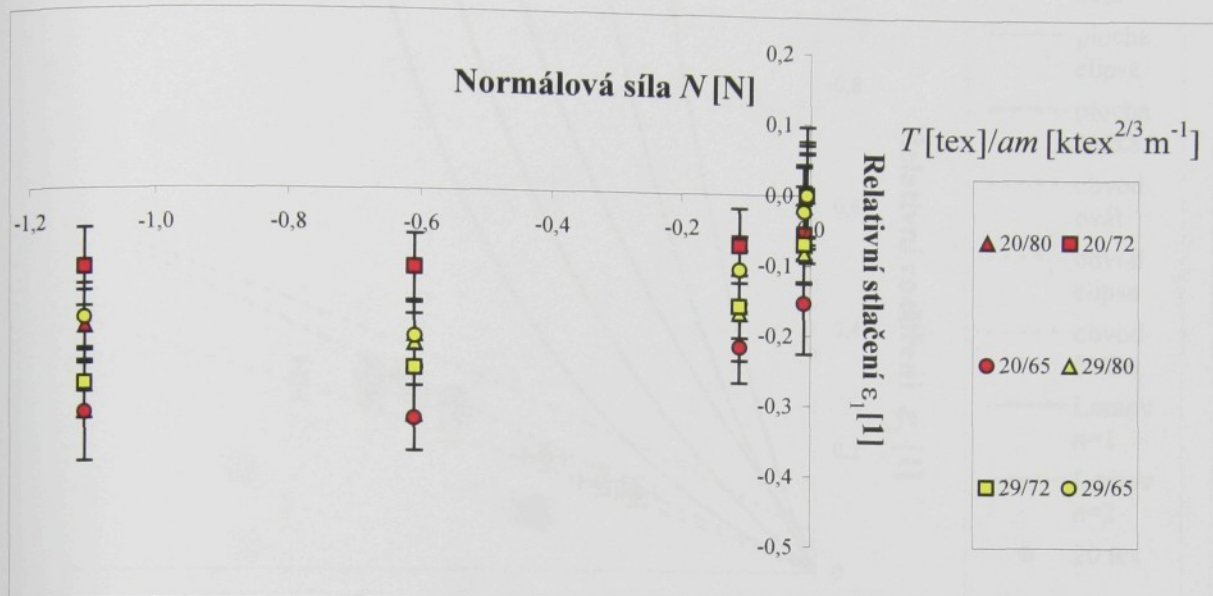


Obr.14 Rozdíly relativních četností

Ve směru x tj. ve směru šířky příze nejsou v relativních četnostech vláken obou konců histogramu významné rozdíly. Ve směru y tj. ve směru výšky příze jsou v relativních četnostech vláken obou konců histogramu významné rozdíly. Lze konstatovat, že ve vazném bodě relaxované tkaniny bavlnářského typu jde velikost deformace příčného řezu příze ve vazném bodě převážně na úkor stlačení povrchové vrstvy vláken.

8.1.3 Analýza deformace průřezu příze při působení normálové síly

Závislost relativního stlačení příze na normálové síle, ze *simulace vazného bodu křížením* přízí, jsou vyznačeny na obrázku 15. Byly měřeny příze dvou jemností, každá vyrobená se třemi různými zákrutovými mírami.



Obr.15 Závislost relativního stlačení příze na normálové síle (experiment křížení přízí)

Je zřejmé, že s rostoucí normálovou silou klesá měřený příčný rozměr příze pro obě jemnosti a všechny zákrutové koeficienty. Pokles hodnoty průměru je znatelný především při porovnání počátečního stavu a stavu s maximálním zatížením.

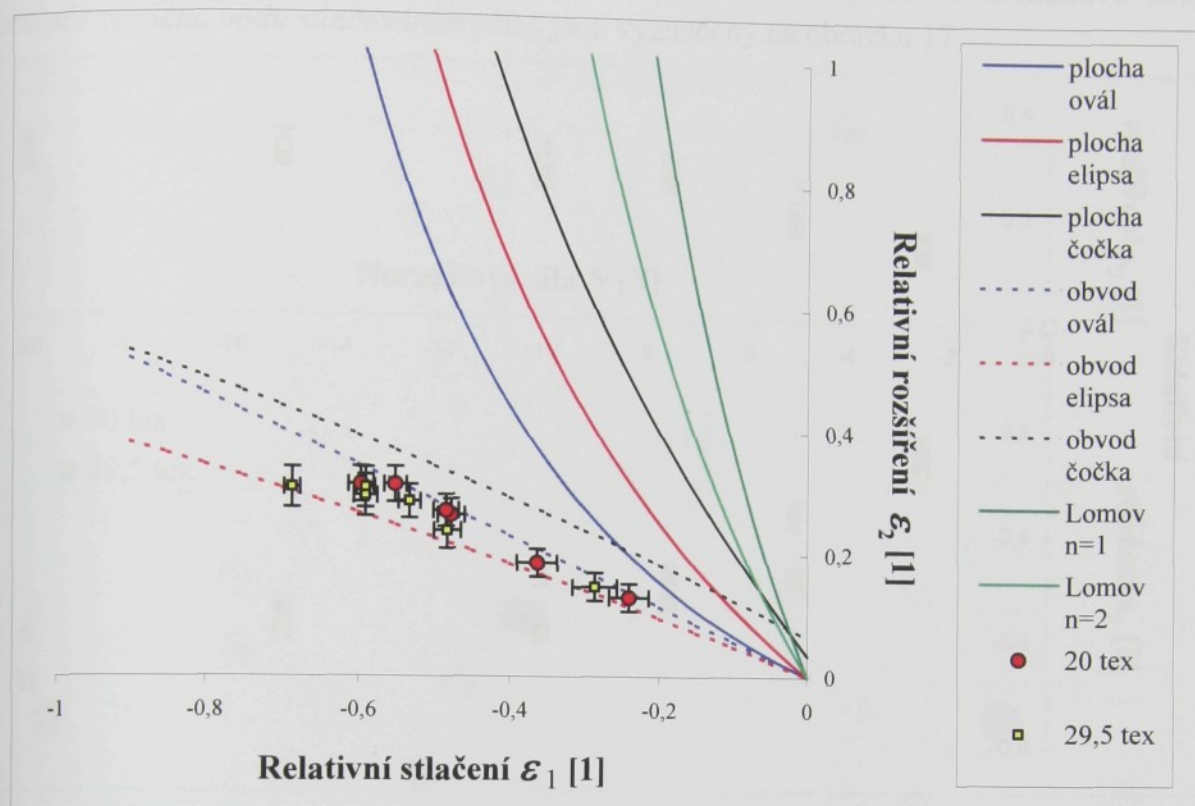
Pro *predikci* relativního stlačení byl jako optimální nalezen regresní model ve tvaru:

$$\varepsilon_1 = P_0 + P_1 \ln|N|, \quad (65)$$

s koeficienty $P_0 = -0,231 \langle -0,263; -0,2 \rangle$ a $P_1 = -0,04 \langle -0,05; -0,03 \rangle$ v intervalu normálové síly $\langle -0,005; -1,2 \rangle$ N. Lze konstatovat, že relativní stlačení příze závisí na normálovém zatížení, vliv zákrutů ani jemnosti není zřejmý. Nižší hodnoty v případě příze 20tex/am65 lze přisuzovat variabilitě materiálu. Je velmi pravděpodobné, že při velmi nízkých počtech zákrutů by tato veličina měla na poměrnou deformaci průřezu příze zásadní vliv, ale v oblasti běžně kroucených bavlnářských přízí je potvrzeno, že vliv zákrutu na poměrné deformace je zanedbatelný.

Pokles průměru příze vyvozený normálovou silou lze vysvětlit postupným přibližováním a změnou polohy vláken v silově namáhaném průřezu příze. Postupné ustalování tohoto poklesu při větších hodnotách přítláčné síly je zřejmě způsobeno vzrůstajícím počtem vzájemných kontaktů mezi vlákny a jejich těsnějším uspořádáním v přízi. Při simulaci vazného bodu křížením je interval působících sil omezen pevností příze, proto byla deformace příze zkoumána simulací vazného bodu stlačováním.

Závislost relativního rozšíření na relativním stlačení příze ze *simulace vazného bodu stlačováním* přízí, jsou spolu s průběhy relativních deformací dle hypotéz z kapitoly 4.2 vyznačeny na obrázku 16.



Obr. 16 Závislost relativního rozšíření na relativním stlačení příze (experiment stlačování přízí)

Bylo testováno, zda je lineární závislost mezi poměrným stlačením a poměrným rozšířením pro obě jemnosti stejná. K testování shody přímek bylo použito testační kritérium F_c . Byla stanovena hodnota reziduálního součtu čtverců RSC pro lineární regresní modely závislostí mezi poměrným stlačením a poměrným rozšířením pro příze jemnosti 20tex a 29,5tex zvlášť a pak pro obě sloučené skupiny. Testační kritérium bylo vypočteno:

$$F_c = \frac{(RSC_{20+29,5} - RSC_{29,5} - RSC_{20})(n - 2m)}{[(RSC_{29,5} + RSC_{20})m]}, \quad (66)$$

kde $m=2$ je počet souborů, n počet hodnot. Hodnoty RSC a testační kritéria jsou uvedeny v tabulce 7.

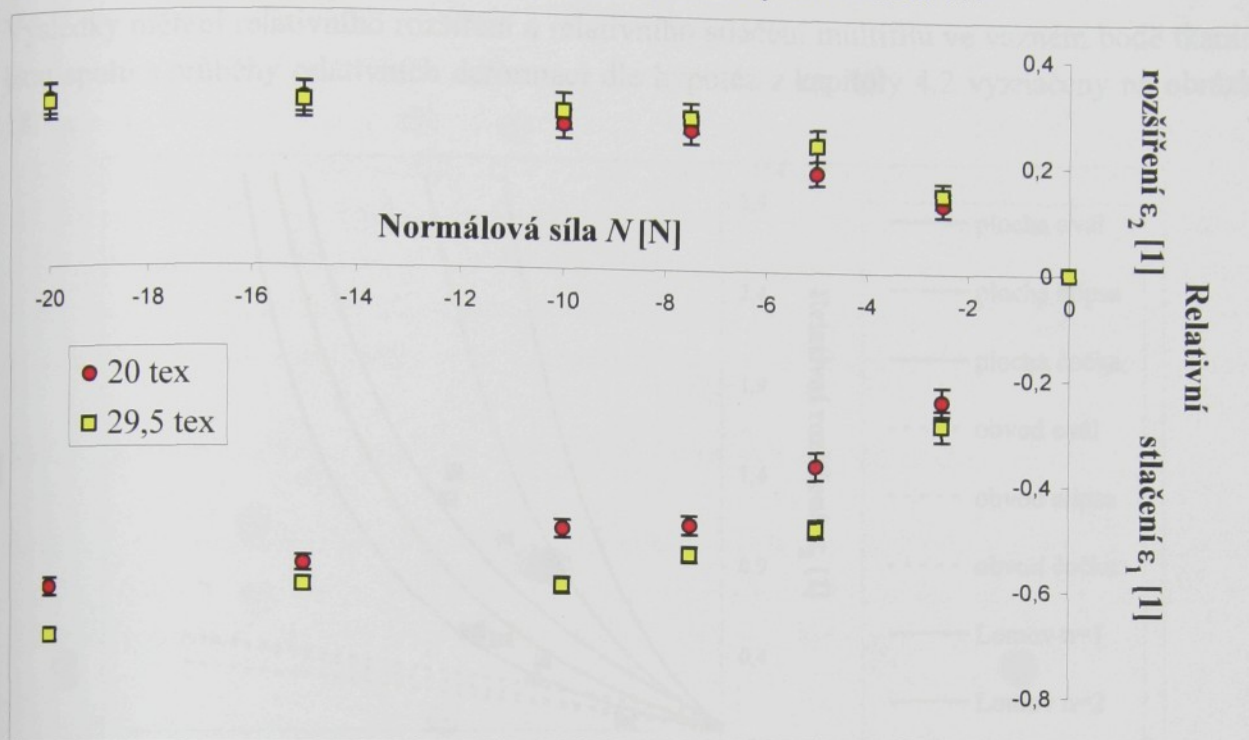
Tabulka 7 Hodnoty reziduálních součtů čtverců RSC pro lineární regresní modely závislostí mezi poměrným stlačením a poměrným rozšířením

Skupina dat	20 tex	29,5 tex	20+29,5 tex	F_c	$F_{0,95}$
RSC	0,00040	0,00149	0,00357	3,56	4,41

Protože je kvantil F-rozdělení $F_{0,95}$ vyšší než testovaná experimentální charakteristika F_c nelze zamítnout nulovou hypotézu o shodě obou přízí. Lze přijmout předpoklad, že se příčný

řez příze při stlačování radiálním zatížením (normálovou silou) deformuje podle hypotézy o zachování obvodu (např. ovál).

Závislost relativního rozšíření a relativního stlačení příze na normálové síle, ze simulace vazného bodu stlačováním přízí, jsou vyznačeny na obrázku 17.



Obr. 17 Závislost relativního rozšíření a relativního stlačení příze na normálové síle (experiment stlačování přízí)

Podle kritéria minimalizace střední kvadratické chyby predikce byl pro *predikci* relativního stlačení nalezen regresní model ve tvaru:

$$\varepsilon_1 = P_0 + P_1 T \cdot \ln|N|, \quad (67)$$

s koeficienty $P_0 = -0,188 \langle -0,27; -0,107 \rangle$ a $P_1 = -0,0059 \langle -0,0074; -0,0044 \rangle$, v intervalu normálové síly $\langle -2,5; -20 \rangle$ N.

Pro *predikci* relativního stlačení byl jako optimální nalezen regresní model ve tvaru:

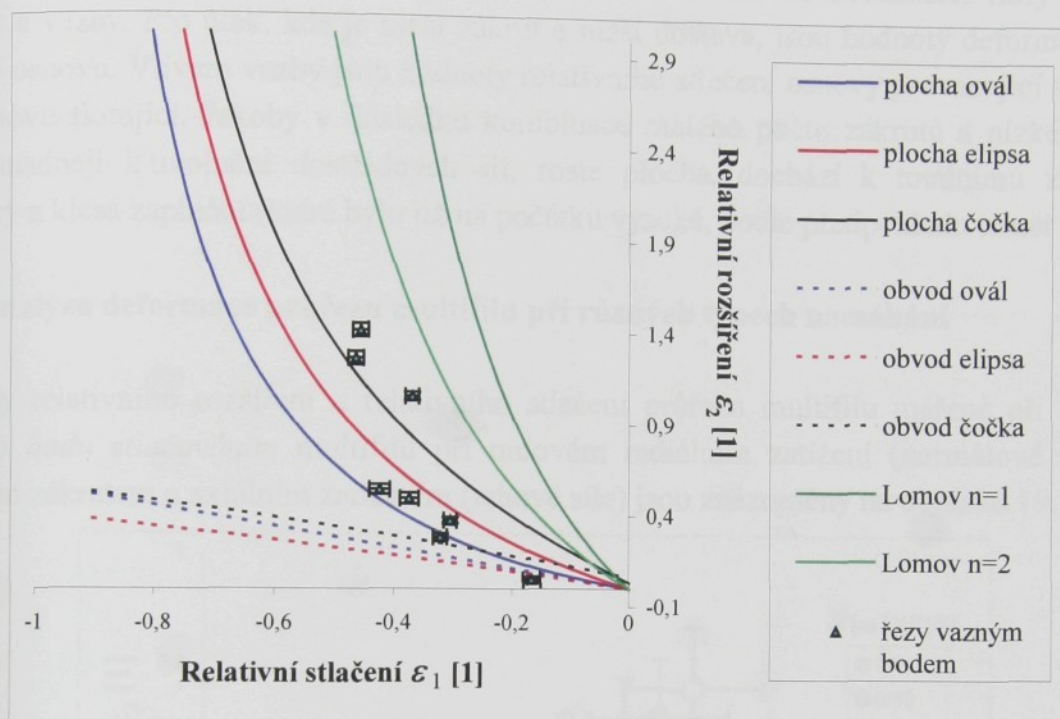
$$\varepsilon_2 = P_0 + P_1 \ln|N|, \quad (68)$$

s koeficienty $P_0 = 0,08 \langle 0,038; 0,123 \rangle$ a $P_1 = 0,084 \langle 0,064; 0,103 \rangle$, v intervalu normálové síly $\langle -2,5; -20 \rangle$ N. Lze konstatovat, že pro dané příze závisí relativní stlačení na velikosti normálové síly i na jemnosti přízí, kdežto relativní rozšíření závisí jen na síle stlačení. Lze předpokládat, že v důsledku působení normálové síly dochází ve směru působení síly k přibližování vláken a růstu počtu kontaktů ve smyslu dále nestlačitelného objemu. Zde se projeví rozdílná jemnost přízí, tj. rozdílný počet vláken. Odezva ve směru kolmém není tak velká, patrně v důsledku blízkých jemností dojde k „pohlčení“ deformace oblastí chlupatosti.

8.2 Parametry průřezu multifilu ve vazném bodě tkaniny

8.2.1 Velikost deformace průřezu multifilu ve vazném bodě tkaniny

Výsledky měření relativního rozšíření a relativního stlačení multifilu ve vazném bodě tkaniny jsou spolu s průběhy relativních deformací dle hypotéz z kapitoly 4.2 vyznačeny na obrázku 18.



Obr. 18 Závislost relativního rozšíření a relativního stlačení multifilu ve vazném bodě tkaniny (řezy vazným bodem tkaniny)

Lze konstatovat, že závislost mezi relativním rozšířením a relativním stlačením multifilu ve vazném bodě tkaniny se svým charakterem blíží hypotézám o konstantní ploše řezu. Hodnoty pro tkaniny z multifilu neodpovídají přesně žádnému ze zmiňovaných modelů. Pro přesnější vyjádření vztahu mezi relativním rozšířením a relativním stlačením (případně *predikci*) byl na základě minimalizace střední kvadratické chyby predikce nalezen regresní model ve tvaru:

$$\varepsilon_2 = P_0 / (\varepsilon_1 + 1)^{P_1} - 1, \quad (69)$$

s koeficienty $P_0 = 0,690 \langle 0,248; 1,133 \rangle$ a $P_1 = 1,885 \langle 0,667; 3,103 \rangle$.

Byla provedena podrobnější analýza. Je hodnocena statistická významnost faktorů, které jsou dány *technologií* výroby tkaniny z multifilu (faktor 1 dostava, faktor 2 zákrut, faktor 3 provázání). Podle kriteria minimalizace střední kvadratické chyby predikce byl pro relativní stlačení nalezen regresní model ve tvaru:

$$\varepsilon_1 = P_0 + P_{123} f_1 f_2 f_3, \quad (70)$$

s koeficienty $P_0 = -0,445 \langle -0,559; -0,331 \rangle$ a $P_{123} = 3 \cdot 10^{-8} \langle 4,6 \cdot 10^{-8}; 7,6 \cdot 10^{-10} \rangle$.

Pro relativní rozšíření byl nalezen lineární regresní model ve tvaru:

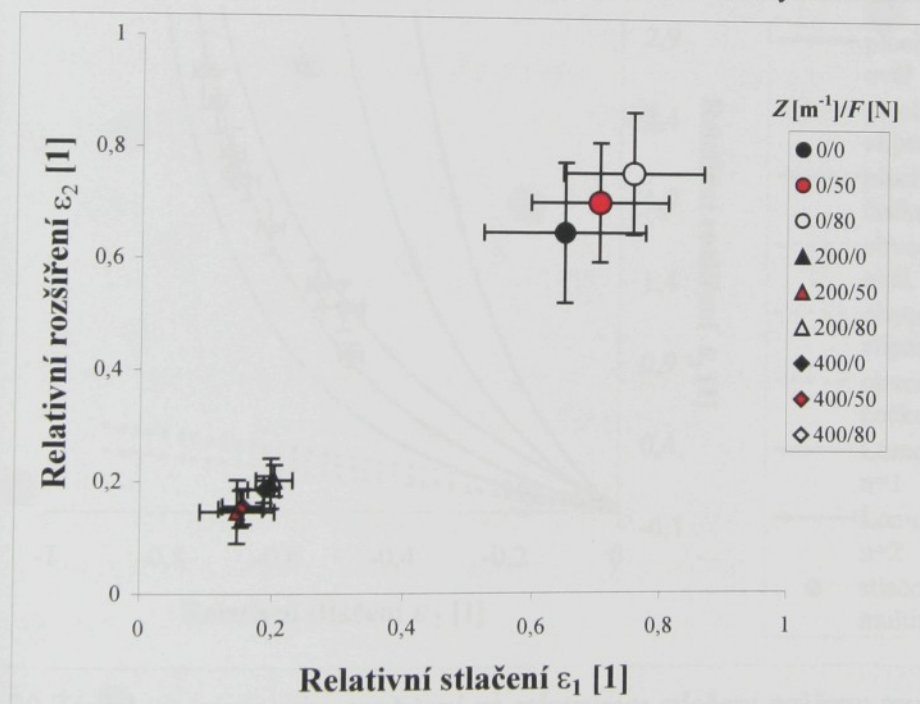
$$\varepsilon_2 = P_0 + P_2 f_2, \quad (71)$$

s koeficienty $P_0 = 1,54 \langle 1,17; 1,91 \rangle$ a $P_2 = -0,003 \langle -0,004; -0,002 \rangle$.

Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že relativní rozšíření multifilu je statisticky významně ovlivněno mírou zákrutu, relativní stlačení závisí na kombinaci míry zákrutu, dostavy a vazby. Pro útek, kde je nižší zákrut a nižší dostava, jsou hodnoty deformací vyšší než pro osnovu. Vlivem vazby jsou hodnoty relativního stlačení osnovy provazující vyšší než pro osnovu flotující. Jakoby v důsledku kombinace malého počtu zákrutů a nízké dostavy došlo snadněji k uvolnění dostředných sil, roste plocha, dochází k totálnímu zhroucení struktury a klesá zaplnění (které bylo již na počátku vysoké, podle předpokladu téměř limitní).

8.2.2 Analýza deformace průřezu multifilu při různých typech namáhání

Hodnoty relativního rozšíření a relativního stlačení průřezu multifilu měřené při *simulaci vazného bodu stlačováním* multifilu při nulovém radiálním zatížení (normálové síle) ale s různým zákrutem a axiálním zatížením (tahové síle) jsou znázorněny na obrázku 19.



Obr. 19 Závislost relativního rozšíření na relativním stlačení průřezu multifilu při nulové normálové síle (experiment stlačování multifilu)

Lze konstatovat, že:

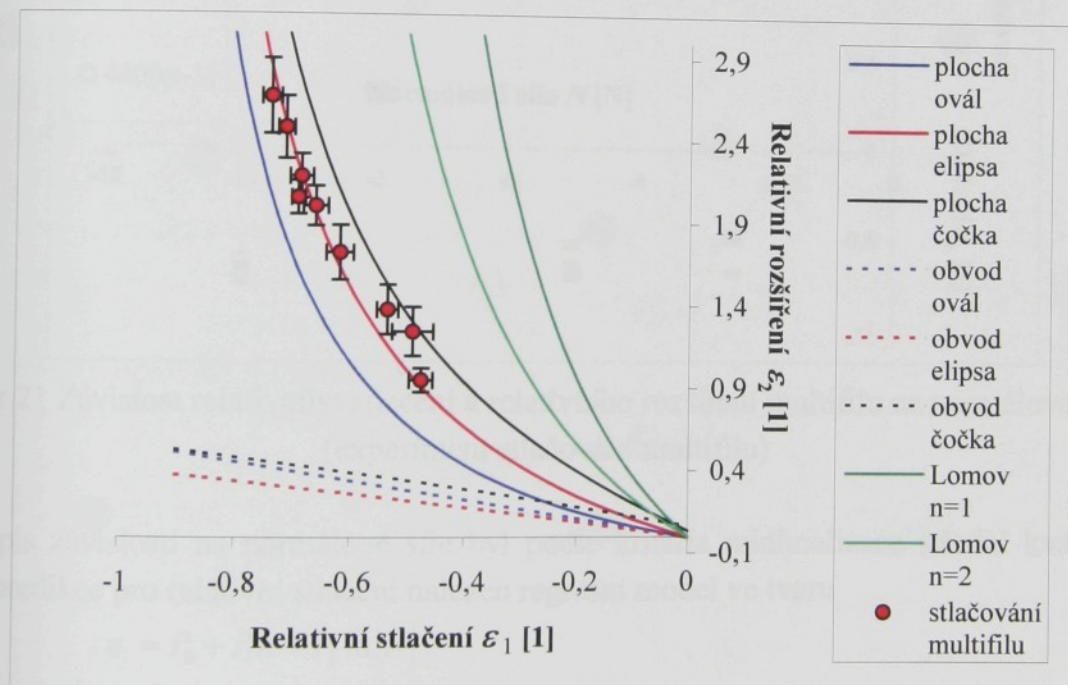
- hodnoty příčného rozměru multifilu při nulovém zákrutu nelze považovat za průměr;
- při dalších hladinách zákrutu se průměr statisticky významně nemění. Oproti původním předpokladům [11] se s rostoucí axiální tahovou silou průměr multifilu statisticky

významně nemění (ve zkoumaném rozsahu sil). To je potvrzení zkušenosti, že již od nízké míry zakrutu multifil zaujímá uspořádanou strukturu. Průměr multifilu byl také vypočten jako aritmetický průměr těchto hodnot. Je spolu s 95% intervalem spolehlivosti a zaplněním dopočteným dle (3) uveden v tabulce 8. Zde je uvedena i hodnota průměru vypočtená dle vzorce (4) s hodnotou zaplnění 0,7 a měrnou hmotností 1360kgm^{-3} a hodnota průměru substančního.

Tabulka 8: Průměr multifilu

Průměr multifilu $d\text{ [}\mu\text{m]}$	Měřená hodnota při zakrutu 0 $[\text{m}^{-1}]$	Měřená hodnota při zakrutu 200 a 400 $[\text{m}^{-1}]$	Vypočtená hodnota dle (3)	Substanční průměr
	196	134		
	$\langle 185;207 \rangle$	$\langle 130;138 \rangle$	155	96
Zaplnění μ [1]	0,24	0,51	0,7	1

Závislost relativního rozšíření na relativním stlačení multifilu, ze *simulace vazného bodu stlačování* multifilu, jsou spolu s průběhy relativních deformací dle hypotéz z kapitoly 4.2 vyznačeny na obrázku 20.



Obr. 20 Závislost relativního rozšíření na relativním stlačení průřezu multifilu (experiment stlačování multifilu)

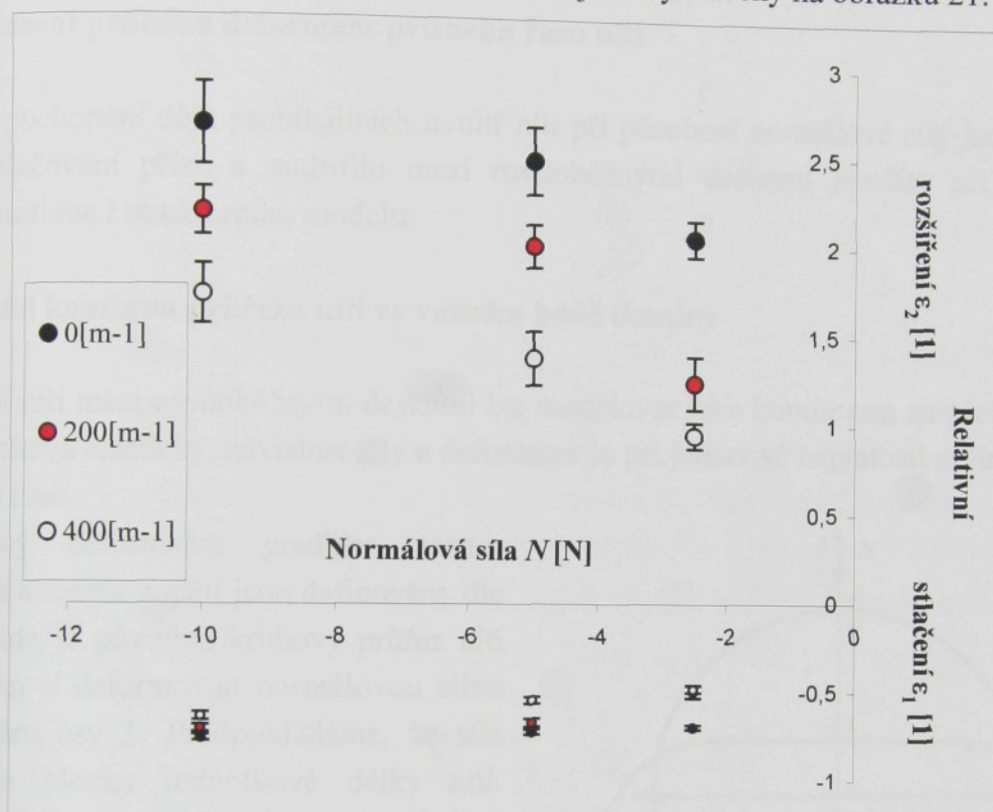
Z porovnání dat s hypotézami o zachování plochy a zachování obvodu lze konstatovat, že se multifil chováním při radiálním stlačení blíží hypotéze o zachování plochy (elipsy), což ukazuje na fakt, že zaplnění se příliš nemění (protože již při malém zakrutu zaujímají fibrily v průřezu vhodnou pozici). Pro přesnější vyjádření vztahu mezi relativním rozšířením a

relativním stlačením (a pro *predikci*) byl na základě minimalizace střední kvadratické chyby predikce nalezen regresní model ve tvaru:

$$\varepsilon_2 = P_0 / (\varepsilon_1 + 1)^{P_1} - 1, \quad (72)$$

s koeficienty $P_0 = 1,25 \langle 1,08; 1,41 \rangle$ a $P_1 = 0,802 \langle 0,680; 0,924 \rangle$.

Závislost relativního stlačení a relativního rozšíření multifilu na napětí vyvozeném normálovou silou, z experimentu stlačení multifilu, jsou vyznačeny na obrázku 21.



Obr.21 Závislost relativního stlačení a relativního rozšíření multifilu na normálové síle (experiment stlačování multifilu)

Pro popis závislosti na normálové síle byl podle kriteria minimalizace střední kvadratické chyby predikce pro relativní stlačení nalezen regresní model ve tvaru

$$\varepsilon_1 = P_0 + P_1 Z + P_2 \ln |N|, \quad (73)$$

s koef. $P_0 = -0,56 \langle -0,67; -0,45 \rangle$, $P_1 = 0,00043 \langle 0,00023; 0,00063 \rangle$ a $P_2 = -0,093 \langle -0,151; -0,034 \rangle$ v intervalu normálové síly $\langle -2,5; -10 \rangle$ N.

Pro relativní rozšíření byl nalezen regresní model ve tvaru

$$\varepsilon_2 = P_0 + P_1 Z + P_2 \ln |N|, \quad (74)$$

s koef. $P_0 = 1,78 \langle 1,13; 2,43 \rangle$, $P_1 = -0,0026 \langle -0,0033; -0,0013 \rangle$ a $P_2 = 0,56 \langle 0,37; 0,75 \rangle$ v intervalu normálové síly $\langle -2,5; -10 \rangle$ N.

Lze konstatovat, že vliv působení normálové síly a síly vyvozené zákrutem od sebe nelze jednoznačně oddělit. S rostoucím radiálním zatížením klesá hodnota poměrného stlačení a roste hodnota poměrného rozšíření. S rostoucí hodnotou zákrutu hodnota poměrného stlačení roste a hodnota poměrného rozšíření klesá. Síly působí proti sobě, výsledná deformace je od určité velikosti téměř konstantní. Lze konstatovat, že velikost radiální síly nemá na rozšíření, popř. zploštění od určité velikosti velký vliv, větší vliv má velikost zákrutu.

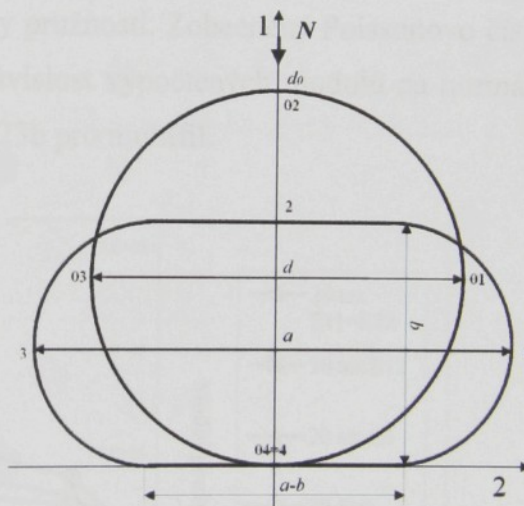
8.3 Hodnocení průběhu deformace příčného řezu niti

Pro lepší pochopení dějů probíhajících uvnitř niti při působení normálové síly jsou výsledky měření stlačování příze a multifilu mezi rovnoběžnými deskami použity při konstrukci modelů kontinua i strukturního modelu.

8.3.1 Model kontinua průřezu niti ve vazném bodě tkaniny

Stlačování niti mezi rovnoběžnými deskami lze modelovat jako kontinuum za předpokladu, že se těleso chová elasticky, závislost síly a deformace je při jednoosé napjatosti nelineární a není závislá na čase.

Materiálový deformační gradient, tenzor deformace a tenzor napětí jsou definovány dle obr. 22, kde je původně kruhový průřez niti s průměrem d deformován normálovou silou N ve směru osy 1. Předpokládáme, že síla působí na plochu jednotkové délky niti. Materiálové (Lagrangeovy) souřadnice 01, 02, 03, 04 mají na počátku působení sil význam geometrických souřadnic. Prostorové (Eulerovy) souřadnice 1, 2, 3, 4 popisují polohy krajních bodů průřezu niti v okamžitém stavu kontinua.



Obr. 22 Souřadnice krajních bodů průřezu niti v okamžitém stavu kontinua

Materiálový deformační gradient pak je

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} b/d & 0 & 0 \\ 0 & a/d & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 + 1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 + 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (75)$$

tenzor protažení

$$\varepsilon_{ij}^p = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (76)$$

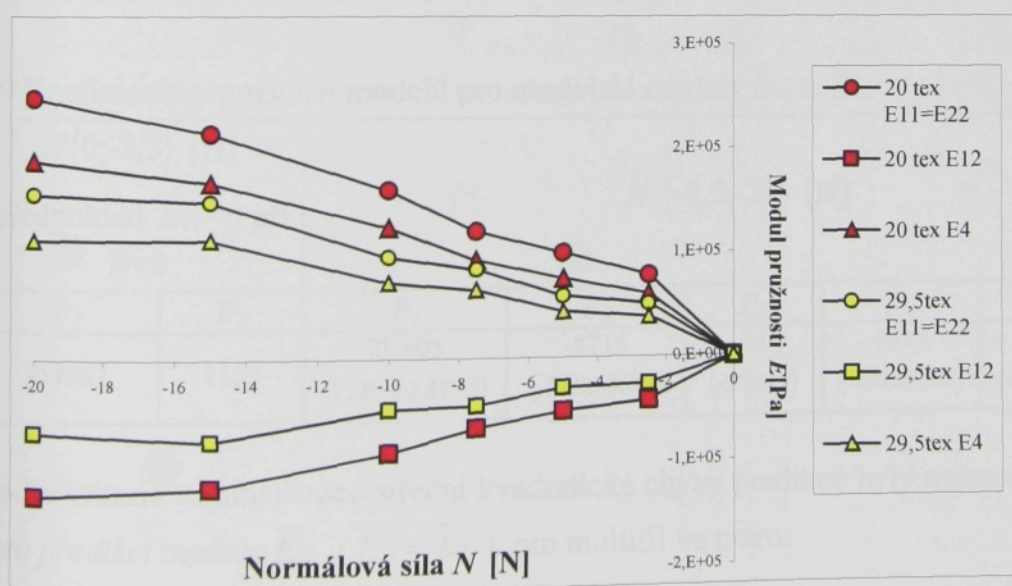
Cauchyho tenzor skutečných napětí

$$\Sigma = \begin{pmatrix} -\frac{N}{a-b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{N}{d(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (77)$$

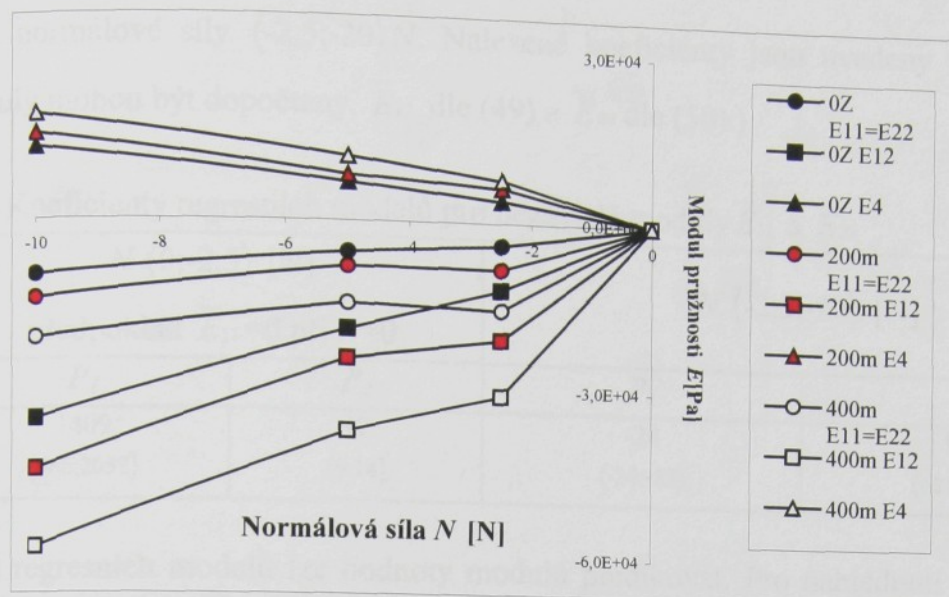
a Biotův tenzor napětí

$$S^B = -\frac{F}{d} \begin{pmatrix} \frac{\varepsilon_1 + 1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (78)$$

Pro konjugovanou dvojici, tenzor protažení - Biotův tenzor napětí, byly dle vztahů (47) až (50) na základě experimentálně zjištěných hodnot závislosti relativního rozšíření a relativního stlačení příze na normálové síle vypočteny moduly pružnosti. Zobecněné Poissonovo číslo je podle (51) $\nu = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$, dle (50) pak $\bar{E}_{11} = \bar{E}_{22}$. Závislost vypočtených modulů na normálové síle jsou znázorněny na obr. 23a pro příze, na obr. 23b pro multifil.



Obr. 23a Moduly pružnosti – příze



Obr. 23b Moduly pružnosti – multifil

Podle kriteria minimalizace střední kvadratické chyby predikce byly nalezeny regresní modely pro *predikci* modulu $\bar{E}_{11}$ ($\bar{E}_{11} = \bar{E}_{22}$) pro přízi ve tvaru:

$$E_{11} = P_1 N + P_2 T N, \quad (79)$$

v intervalu normálové síly $\langle 0; -2,5 \rangle$ N a

$$E_{11} = P_1 + P_2 T + P_3 N^3 + P_4 N^2 + P_5 N, \quad (80)$$

v intervalu normálové síly $\langle -2,5; -20 \rangle$ N. Nalezené koeficienty jsou uvedeny v tabulce 9. Další moduly mohou být dopočteny, $\bar{E}_{12}$ dle (49) a $\bar{E}_{44}$ dle (50).

Tabulka 9 Koeficienty regresních modelů pro nezávislé moduly $\bar{E}_{11}$ a $\bar{E}_{22}$

	$N \langle 0; -2,5 \rangle$ [N] předpoklad $\bar{E}_{11} = 0$ při $N = 0$		$N \langle -2,5; -20 \rangle$ [N]				
	P_1	P_2	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
$\bar{E}_{11}$	-54687	1165	$2E+05$ $\langle 1,3E+5; 2,8E+5 \rangle$	-5715 $\langle -7752; -3679 \rangle$	44 $\langle -27; 114 \rangle$	1335 $\langle -1022; 3693 \rangle$	2300 $\langle -20500; 25000 \rangle$

Podle kriteria minimalizace střední kvadratické chyby predikce byly nalezeny regresní modely pro *predikci* modulu $\bar{E}_{11}$ ($\bar{E}_{11} = \bar{E}_{22}$) pro multifil ve tvaru:

$$E_{11} = P_1 N + P_2 N Z, \quad (81)$$

v intervalu normálové síly $\langle 0; -2,5 \rangle$ N,

$$E_{11} = P_1 Z + P_2 N, \quad (82)$$

v intervalu normálové síly $\langle -2,5;-20 \rangle$ N. Nalezené koeficienty jsou uvedeny v tabulce 10. (Další moduly mohou být dopočteny, $\bar{E}_{12}$ dle (49) a $\bar{E}_{44}$ dle (50).)

Tabulka 10 Koeficienty regresních modelů pro nezávislé moduly $\bar{E}_{11}$ a $\bar{E}_{22}$

	$N \langle 0;-2,5 \rangle$ [N]		$N \langle -2,5;-20 \rangle$ [N]	
	předpoklad $\bar{E}_{11}=0$ při $N=0$			
	P_1	P_2	P_1	P_2
$\bar{E}_{11}$	1409 $\langle 766;2052 \rangle$	12 $\langle 9;14 \rangle$	-28 $\langle -34;-22 \rangle$	927 $\langle 685;1170 \rangle$

Na základě regresních modelů lze hodnoty modulů predikovat. Pro nahlédnutí do vnitřních změn v struktuře niti je lépe posuzovat průběhy tečných modulů. Pro konjugovanou dvojici, tenzor protažení – Biotův tenzor napětí, byly tečné moduly pružnosti vypočteny (na základě modifikovaných vztahů (47) až (50)) dle vztahů (83) až (86).

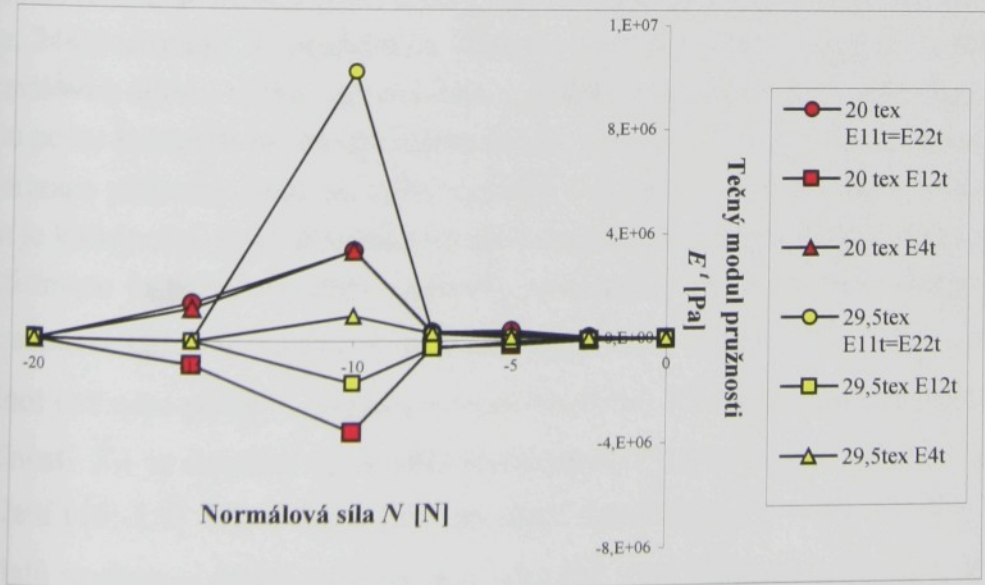
$$\bar{E}'_{11} = \bar{E}'_{22}, \tag{83}$$

$$\bar{E}'_{22} = \Delta c_{11} \frac{\Delta \varepsilon_{11}}{\Delta \varepsilon_{22}^2} \frac{\nu^2}{(1-\nu^2)}, \tag{84}$$

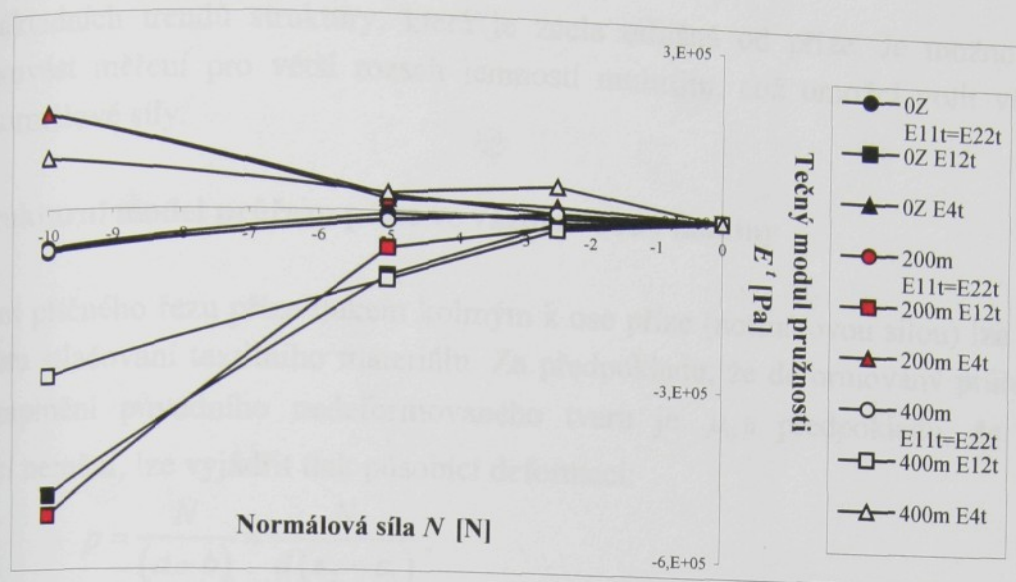
$$\bar{E}'_{12} = \pm \sqrt{\bar{E}'_{11} \bar{E}'_{22}} \nu, \tag{85}$$

$$\bar{E}'_4 = \left(\bar{E}'_{11} \bar{E}'_{22} - \bar{E}_{12}^2 \right) / \left(\bar{E}'_{11} + \bar{E}'_{22} + 2 \bar{E}'_{12} \right), \tag{86}$$

Výpočty jsou provedeny pro výpočet přírůstku deformace a (51) na základě experimentálně zjištěných hodnot závislosti relativního rozšíření a relativního stlačení na normálové síle. Závislosti vypočtených hodnot tečných modulů na normálové síle pro příze jsou znázorněny v na obr. 24a, výsledky pro multifil na obr. 24b.



Obr. 24a Tečné moduly pružnosti – příze



Obr. 24a Tečné moduly pružnosti – multifil

Na základě provedených experimentů a z průběhů závislosti počátečních a tečných modulů na normálové síle lze vyvodit následující trendy:

- při deformaci příčného řezu *příze* normálovou silou klesá plocha příčného řezu a tím i zaplnění v závislosti na velikosti normálové síly a na jemnosti. Poissonovo číslo je v intervalu $\langle -1;0 \rangle$, moduly $\bar{E}_{11}, \bar{E}_{22}, \bar{E}_4$ nabývají kladných, modul $\bar{E}_{12}$ záporných hodnot, což je v souladu s poznatky o chování kontinua. Pro vyjádření počátečního modulu pružnosti $\bar{E}_{11}$ je navržen vztah (79) pro počáteční interval z nulového po první stupeň zatížení ($\langle 0; -2,5 \rangle$ N), a vztah (80) pro další namáhání ($\langle -2,5; -20 \rangle$ N). Toto rozdělení koresponduje s faktem nehomogenity příze a nekonstantnosti zaplnění. V první fázi se deformuje povrchová vrstva příze s velmi nízkým zaplněním. V další fázi dochází ke změnám ve vnitřní struktuře. Průběh závislosti počátečních modulů na normálové síle je hladký (obr. 23ab), ale závislost tečných modulů na normálové síle (obr. 24ab) ukazuje, že dochází ke skokové změně (u obou jemností v oblasti zatížení normálovou silou -10 N). Jak dochází v důsledku působící síly k přibližování vláken a růstu počtu kontaktů lze předpokládat jakési „nasycení“ či „ztvrdnutí“ struktury.
- deformace příčného řezu *multifilu* probíhá odlišným mechanismem. Plocha příčného řezu je konstantní, nebo dokonce mírně vzrůstá, lze předpokládat konstantní zaplnění. (Deformace je přímo úměrná velikosti normálové síly a nepřímo úměrná zákrutu.). Poissonovo číslo se nalézá v intervalu $\langle -3,5; -2 \rangle$, $\bar{E}_{11}, \bar{E}_{22}, \bar{E}_{12}$ nabývají záporných hodnot což není příliš v souladu s teorií kontinua. Pro vyjádření počátečního modulu pružnosti $\bar{E}_{11}$ je navržen vztah (81) pro počáteční interval z nulového po první stupeň zatížení ($\langle 0; -2,5 \rangle$ N), a vztah (82) pro další namáhání ($\langle -2,5; -20 \rangle$ N). Průběh tečných modulů neukazuje žádné extrémy a je odrazem specifické struktury multifilu. Je třeba říci, že měření pro multifil byla zamýšlena pouze jako doplněk k podchycení

základních trendů struktury, která je zcela odlišná od příze. Je možno doporučit provést měření pro větší rozsah jemností multifilu, což umožní volit větší rozsah normálové síly.

8.3.2 Strukturní model průřezu příze ve vazném bodě tkaniny

Stlačování příčného řezu příze tlakem kolmým k ose příze (normálovou silou) lze považovat za variantu stlačování textilního materiálu. Za předpokladu, že deformovaný průřez má tvar elipsy, zaplnění původního nedeformovaného tvaru je μ_0 a předpokladu, že obvod se deformací nemění, lze vyjádřit tlak působící deformaci:

$$P = \frac{N}{(a-b)} = \frac{N}{d(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}, \quad (87)$$

zaplnění po deformaci

$$\mu = \mu_0 \frac{S_{\text{před-deformaci}}}{S_{\text{po-deformaci}}} = \frac{\mu_0}{(\varepsilon_1 + 1)(\varepsilon_2 + 1)}. \quad (88)$$

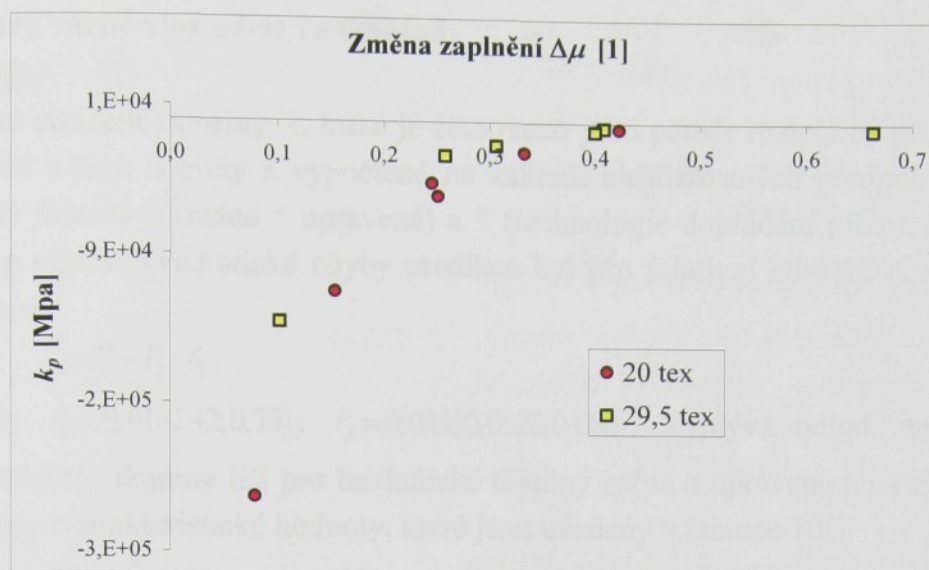
Po dosazení (96) a (97) do (54) lze dospět ke vztahu

$$k_p = \frac{N}{d(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \left/ \left(\frac{\mu^3}{\left[1 - \left(\frac{\mu}{\mu_m}\right)^3\right]^3} - \frac{\mu_0^3}{\left[1 - \left(\frac{\mu_0}{\mu_m}\right)^3\right]^3} \right) \right. \quad (89)$$

Na základě experimentálně zjištěných hodnot závislosti relativního rozšíření a relativního stlačení příze na normálové síle přízí jemnosti 20 a 29,5 tex byl dle (98) proveden výpočet konstanty k_p . Podle kriteria minimalizace střední kvadratické chyby predikce byl nalezen regresní model ve tvaru:

$$k_p = P_0 + P_1 N, \quad (90)$$

s koeficienty $P_0 = -1,4\text{E}+5 \langle -2,1\text{E}+5; -6,7\text{E}+4 \rangle$ a $P_1 = -8,5\text{E}+3 \langle -1,5\text{E}+4; -2,2\text{E}+3 \rangle$. Lze konstatovat, že konstanta k_p na jemnosti příze statisticky významně nezávisí. Závislost hodnoty konstanty k_p na změně zaplnění příze $\Delta\mu$ je pro obě jemnosti ukázána na obr 25.

Obr 25. Závislost konstanty k_p na změně zaplnění příze $\Delta\mu$

Závislost konstanty k_p na změně zaplnění příze $\Delta\mu$ je popsána regresním vztahem nalezeným podle kriteria minimalizace střední kvadratické chyby predikce

$$k_p = P_1 \Delta\mu^2, \quad (91)$$

s koeficienty $P_1 = -3,3E+3 \langle -6,2E+3; -4,5E+2 \rangle$ a $P_2 = -1,7 \langle -2,1; -1,3 \rangle$.

Z porovnání s klasickou teorií stlačování textilního vláknenného útvaru (viz. kapitola 5.3) lze konstatovat následující rozdíly:

- hodnoty konstanty k_p jsou oproti (54) záporné v souladu se zavedenou konvencí označení tlakové síly jako záporné;
- konstanta k_p nalezená jako charakteristika modelu stlačování struktury příze není konstantní, ale závisí na změně zaplnění příze. Je nutno vzít v úvahu, že model je tvořen za předpokladu (mimo jiných) konstantního zaplnění příze v celé ploše příčného řezu. Zaplnění příze je však v povrchových vrstvách nízké a směrem k ose roste.

Pro vyjádření charakteristik deformace příčného řezu multifilu není tato modifikace strukturního modelu vhodná, není zřejmý žádný trend protože v použitém rozsahu sil se plocha příčného řezu nemění.

8.4 Parametry vazné vlny příze ve tkanině

Pro **poměrné stlačení tkaniny** λ , které je stanoveno jako poměr roztečí os přízí ve vazném bodě změřené z řezů tkaniny a vypočtené na základě idealizovaných předpokladů (35) byl zkoumán *vliv faktorů* 2 (režná * upravená) a 3 (technologie dopřádání příze). Podle kriteria minimalizace střední kvadratické chyby predikce byl pro relativní stlačení nalezen regresní model ve tvaru

$$\lambda = P_0 + P_2 \cdot f_2,$$
 (92)

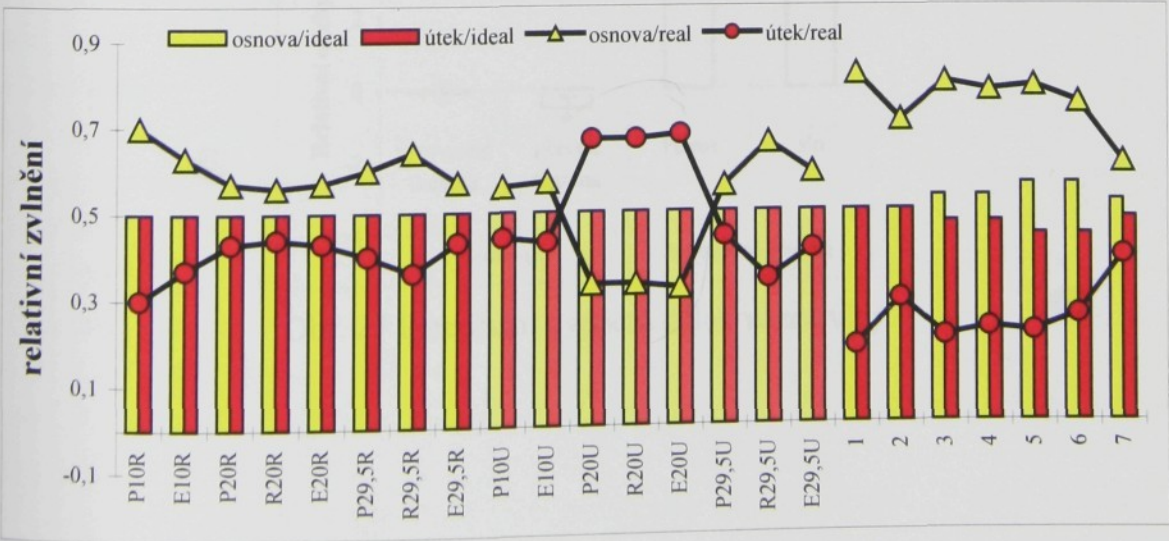
s koeficienty $P_0 = 0,61 \langle 0,42; 0,79 \rangle$, $P_2 = 0,045 \langle 0,0023; 0,088 \rangle$. Vyplývá odtud, že se hodnoty poměrného stlačení tkaniny liší pro bavlnářské tkaniny režné a upravené a na základě tohoto byly vypočteny charakteristické hodnoty, které jsou uvedeny v tabulce 10:

Tabulka 10 Poměrné stlačení pro bavlnářské tkaniny

Označení tkaniny	Poměrné stlačení tkaniny λ [1]
Skupiny 1 a 2 (režné tkaniny)	0,815 $\langle 0,796; 0,834 \rangle$
Skupina 2 (upravené tkaniny)	0,76 $\langle 0,716; 0,804 \rangle$

Na základě experimentu byly navrženy empirické hodnoty konstant pro režné bavlněné tkaniny do vztahu (37) $k_\lambda = 3,08 \cdot 10^{-4}$, $q_o = 0,478$, $q_u = 0,628$, a pro upravené tkaniny $k_\lambda = 2,38 \cdot 10^{-4}$, $q_o = -1,321$, $q_u = -0,952$. Vztah platí pro hodnoty zakrytí tkaniny v procentech.

Srovnání **relativní výšky zvlnění osnovy a útku** v idealizovaném modelu a hodnot změřených pro tkaniny skupin 1 a 2 je znázorněno na obrázku 26.



Obr. 26 Relativní výšky zvlnění osnovy a útku

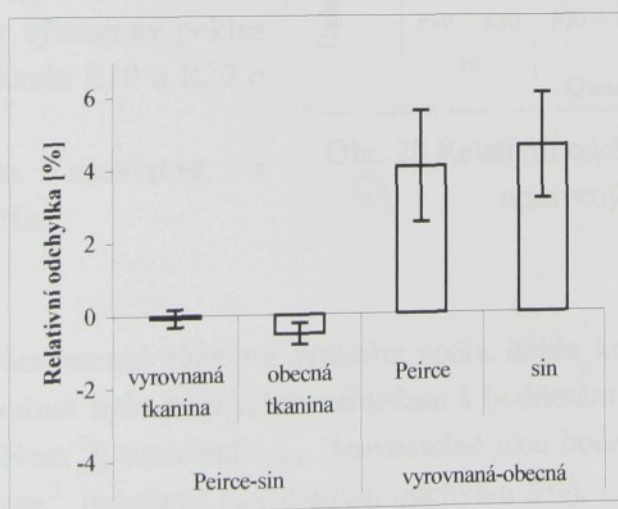
Protože finální úpravy byly prováděny pro tkaniny vyrobené z různých jemností v různém čase (tj. nelze zaručit konstantní podmínky procesu finálních úprav), byly hledány modely pouze pro režné tkaniny. Pro vytipování vlivných *technologických faktorů* byl pro relativní stlačení režné bavlnářské tkaniny nalezen regresní model ve tvaru

$$\xi = P_0 + P_4 \cdot f_4, \quad (93)$$

s koeficienty $P_0 = 3,8 \langle 3,1; 4,5 \rangle$ a $P_4 = -0,35 \langle -0,42; -0,28 \rangle$. Pro režné tkaniny lze identifikovat jediný významný vliv na chování relativního stlačení tkaniny a to je rozdíl mezi osnovou a útkem. Oproti idealizovanému modelu jsou dle změřených hodnot z příčných řezů tkaniny rozdíly zvlnění obou soustav vyšší, což je dáno výraznou nevyrovnaností tkanin. Relativní zvlnění osnovy je vyšší, tak jako je vyšší i dostava, zvlnění útku klesá s klesající dostavou útku.

Na základě experimentu byly navrženy empirické hodnoty konstant pro režné bavlněné tkaniny do vztahu (39) $C = 0,0205$, $k_1 = 2,557$, $k_2 = 2,986$, $k_3 = 2,059$, $k_4 = 1,276$. Vztah platí pro hodnoty zakrytí tkaniny v procentech a hodnoty průměrů přízí v milimetrech..

Na základě parametrů zvlnění byl proveden výpočet **délek vazné vlny** a to jak z hlediska použitého nahrazení, tak i z hlediska výchozích předpokladů. Rozdíly mezi takto zjištěnými hodnotami jsou vyjádřeny relativní odchylkou. Porovnání je provedeno na obr 27. Rozdíl mezi hodnotami vypočtenými pomocí nahrazení vazné vlny harmonickou funkcí a systémem oblouk — přímka činí méně než 1% kdežto difference mezi hodnotami vypočtenými z idealizovaného modelu a z naměřených hodnot je 4%. Lze tedy tvrdit, že pro výpočet délky vazné vlny záleží více na tom, zda počítáme ve výchozích předpokladech se zplošťováním přízí a nevyrovnaností tkaniny než jaký způsob nahrazení vazné vlny je použit.



Obr. 27 Porovnání výpočtů délek vazné vlny

8.5 Charakteristiky struktury tkaniny

V této kapitole jsou hodnoceny základní charakteristiky struktury tkanin tak, jak jsou popsány v kapitolách 3. a 7.3. Jsou hledány souvislosti s technologickými parametry. Pro znázornění vlivu finálních úprav jsou v konstruovány grafy relativních odchylek. Statisticky významné rozdíly jsou zvýrazněny červeně.

Dostava

Pro oddělení vlivu *technologických faktorů* byl podle kriteria minimalizace střední kvadratické chyby predikce nalezen regresní model ve tvaru:

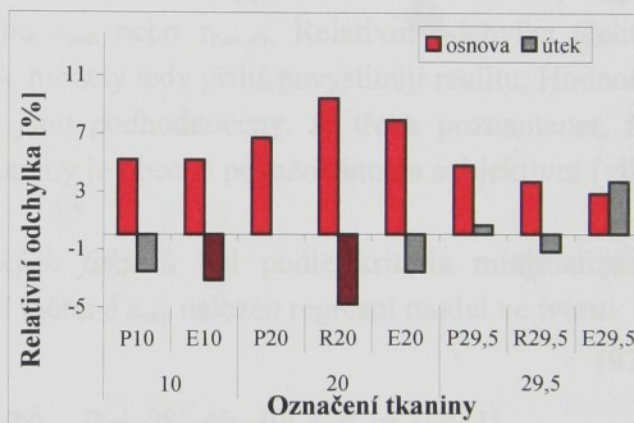
$$D = P_0 + P_1 f_1 + P_4 f_4 + P_{14} f_{14}, \quad (94)$$

s koeficienty $P_0 = 26230 \langle 18410; 34050 \rangle$, $P_1 = -784 \langle -1133; -435 \rangle$, $P_4 = -2470 \langle -3100; -1454 \rangle$ a $P_{14} = 73 \langle 37; 110 \rangle$. Navržený model (94) ukazuje souvislosti mezi dostavou a jemností příze (f_1).

Tkaniny z jemnější příze jsou vyrobeny s vyšší dostavou. Zároveň je jasné, že osnova má nižší dostavu než útek (f_4).

Je zřejmé (obr.28), že v důsledku zušlechťovacích operací je dostava v osnovním směru hustší z důvodu částečného vysrážení (průměrně o 5,7%). V útkovém směru nejsou rozdíly tak zřejmé (což je patrně důvod, proč se tento faktor neprojevil jako statisticky významný). Statisticky významný pokles dostavy útku je jen u tkanin E10 a R20 o 4%.

Nebyla zjištěna souvislost s technologií dopřádání příze.



Obr. 28 Relativní odchylky dostav režných a upravených tkanin

Tloušťka tkaniny

Hodnoty změřené a vyhodnocené různými způsoby spolu dobře korelují. Porovnání co do velikosti naměřených hodnot bylo prováděno vzhledem k hodnotám změřeným dle ČSN EN ISO 50084 (přítlak $0,5 \text{ Ncm}^{-2}$), označení t_{CSN} . Srovnatelné jsou hodnoty změřené na systému KES s přítlakem $0,49 \text{ Ncm}^{-2}$, označené t_m (relativní odchylka 8%), i hodnoty vyhodnocené z řezů tkaniny, označené t_{obec} (relativní odchylka 12%). Hodnoty vypočtené podle modelu vyrovnané tkaniny, označené t_{vyrov} se odlišují o 28%. Zcela odlišnou charakteristikou jsou hodnoty t_0 , změřené na systému KES s menším přítlakem $0,0049 \text{ Ncm}^{-2}$, které jsou téměř trojnásobné.

Z hlediska *faktorů technologie* jsou hodnoceny jak hodnoty t_{CSN} tak i t_0 , protože je každá získaná na jiném principu a lze očekávat, že každá charakteristika bude výsledkem

jiných dějů. Podle kriteria minimalizace střední kvadratické chyby predikce byl pro t_{CSN} nalezen regresní model ve tvaru:

$$t_{CSN} = P_0 + P_1 f_1 + P_3 f_3, \quad (95)$$

s koeficienty $P_0 = 163 \langle 119; 207 \rangle$, $P_1 = 8,4 \langle 7,8; 9,1 \rangle$ a $P_3 = -6,8 \langle -13; -0,57 \rangle$.

Pro t_0 byl nalezen regresní model ve tvaru:

$$t_0 = P_0 + P_{12} f_{12}, \quad (96)$$

s koeficienty $P_0 = 393 \langle 335; 451 \rangle$ a $P_{12} = 3,2 \langle 2,6; 3,8 \rangle$.

Je samozřejmé, že tloušťka je určena především jemností (faktor 1), hodnoty změřené s vyšším přitlakem t_{CSN} více reflektují způsob dopřádání příze (faktor 3), hodnoty změřené s nižším přitlakem t_0 jsou citlivější k vlivu finálních úprav (faktor 2).

Setkání

Metody hodnocení setkání jsou uvedeny v kapitole 7.3. Pro jejich porovnání byly vypočteny korelační koeficienty a relativní odchylky od změřených hodnot. Korelace není výrazná, nejlepší korelace (cca 61%) je mezi hodnotami změřenými vypáráním nití ze tkaniny s_{exp} a hodnotami vypočtenými pro obecnou tkaninu s_{sinO} nebo $s_{PeirceO}$. Relativní odchylka těchto hodnot je pro osnovu cca 30%, pro útek -16%, modely tedy příliš nevystihují realitu. Hodnoty pro osnovu jsou nadhodnoceny a pro útek jsou podhodnoceny. Je třeba poznamenat, že měření setkání napínáním nitě vypárané ze tkaniny je obecně považováno za subjektivní (vliv napínací síly apod).

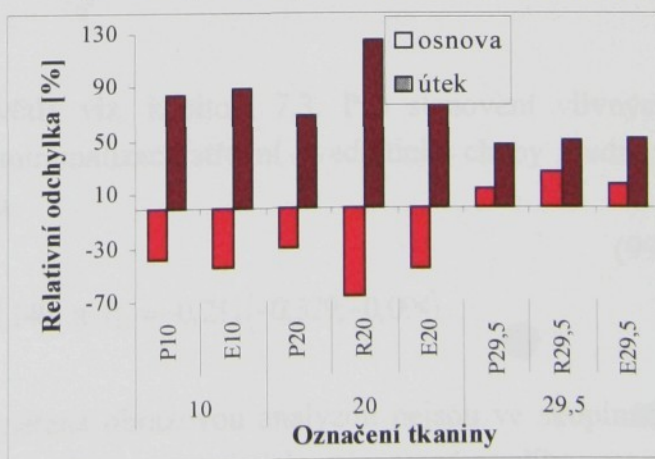
Pro stanovení vlivných *technologických faktorů* byl podle kriteria minimalizace střední kvadratické chyby predikce pro setkání měřené s_{exp} nalezen regresní model ve tvaru:

$$s_{exp} = P_0 + P_2 f_2 + P_4 f_4 + P_{24} f_{24}, \quad (97)$$

s koeficienty $P_0 = 264 \langle 90; 438 \rangle$, $P_2 = -67 \langle -106; -28 \rangle$, $P_4 = -28 \langle -46; -10 \rangle$ a $P_{24} = 7 \langle 3; 11 \rangle$.

Lze konstatovat, že faktory 1 jemnosti příze a 3 dopřádání příze nejsou statisticky významné.

Statisticky významné jsou faktory 2 finální úpravy v kombinaci s faktorem 4 (osnova*útek). Je zřejmé (obr.29), že vlivem úpravy tkanin dochází k nárůstu setkání ve směru útku. Setkání osnova klesá u tkanin vyrobených z přízí 10 a 20 tex ale roste u tkanin vyrobených z přízí 29,5 tex. Finální úpravy byly prováděny pro tkaniny z různých jemností v různém čase a záleží tedy na konkrétních mechanických poměrech při finálních úpravách.



Obr. 29 Relativní odchylky setkání rezných a upravených tkanin

Plošná hmotnost

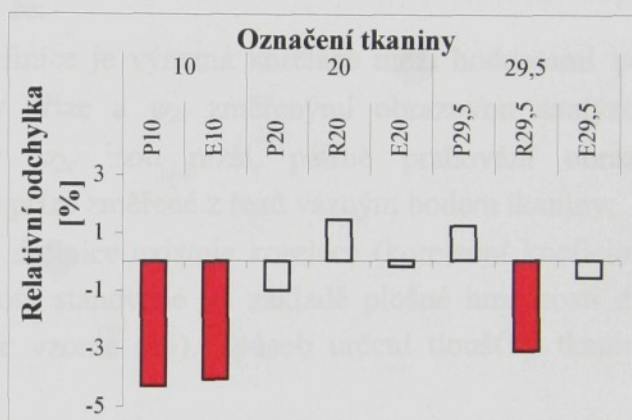
Hodnoty změřené a vyhodnocené různými způsoby spolu dobře korelují. Protože rozdíly mezi hodnotami setkání, které byly použity při výpočtu plošné hmotnosti jsou velké, je důležité zjistit, jak přesnost hodnoty setkání ovlivní predikci plošné hmotnosti. Relativní odchylky hodnot plošné hmotnosti vypočtené ze setkání změřeného, od hodnot plošné hmotnosti změřených jsou 3%. Na základě vzorce (10) lze predikovat hodnotu plošné hmotnosti (pokud provedeme odhad setkání pomocí harmonické funkce (viz. kapitola 4.3) pro obecnou tkaninu), s přesností 3%.

Pro stanovení vlivných *technologických faktorů* byl podle kriteria minimalizace střední kvadratické chyby predikce pro plošnou hmotnost měřenou G_{exp} nalezen lineární regresní model ve tvaru

$$G_{\text{exp}} = P_1 f_1, \quad (98)$$

s koeficientem $P_1 = 0,0513 \langle 0,0471; 0,0556 \rangle$. Ze sledovaných technologických parametrů je statisticky významný pouze faktor jemnosti (samozřejmě spolu s dostavou).

Pro faktor 2 finální úpravy platí, že dostava po osnově sice vzrostla, ale plošná hmotnost se nemění, nebo dokonce klesá. Signifikantní pokles je konstatován u tkanin P10, E10 a R29,5 (viz. relativní odchylky na obr.30). Kolísání plošné hmotnosti v důsledku úprav o 3 – 4 % je patrně v důsledku kombinace změny dostav (tj. zhuštění tkaniny) a vyprání šlichty z osnovy rezné tkaniny (tj. celkový pokles hmotnosti).



Obr. 30 Relativní odchylky plošné hmotnosti rezných a upravených tkanin

Poróznost

Poróznost byla měřena jako propustnost světla viz. kapitola 7.3. Pro stanovení vlivných *technologických faktorů* byl podle kriteria minimalizace střední kvadratické chyby predikce pro poróznost navržen regresní model ve tvaru

$$\psi_{2c} = P_0 + P_1 f_1 + P_{12} f_1 f_2, \quad (99)$$

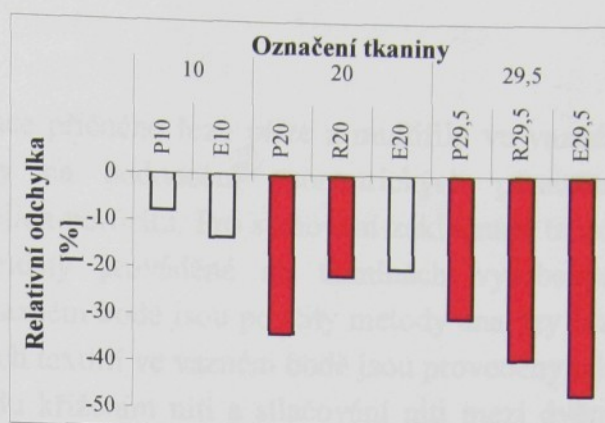
s koeficienty $P_0 = 24 \langle 20; 28 \rangle$, $P_1 = 0,577 \langle 0,006; 1,148 \rangle$ a $P_{12} = -0,211 \langle -0,329; -0,094 \rangle$.

Pro statisticky významné faktory platí, že:

- faktor 1 jemnosti příze – v poróznitě změřené obrazovou analýzou nejsou ve skupinách tkanin vyrobených z přízí stejné jemnosti (a dostavy) statisticky významné rozdíly.

- faktor 2 finální úpravy – v důsledku finálních úprav hodnoty porózy změřené obrazovou analýzou klesají statisticky významně jen u některých vzorků. Celkový pokles porózy byl vyčíslen na 27 (18;36) %.

Z hlediska faktoru 3 (technologie dopřádání příze) není zjevný žádný trend, resp. tato metoda měření porózy nepostihuje oblast chlupatosti přízí.



Obr. 31 Relativní odchylky porózy rezných a upravených tkanin

Bylo prováděno porovnání různých způsobů vyhodnocení koeficientů porózy tak, jak jsou uvedeny v kapitole 7.3.

Na základě analýzy výsledků lze konstatovat, že:

- pro hodnoty stanovené podle plošné definice je výrazná korelace mezi hodnotami ψ_{2b} vypočtenými dle (58) s využitím šířky příze a ψ_{2c} změřenými obrazovou analýzou (korelační koeficient 0,63). Hodnoty ψ_{2c} jsou nižší, patrně prahování obrazu podhodnocuje rozšíření příze oproti šířce příze změřené z řezů vazným bodem tkaniny;
- pro hodnoty stanovené podle objemové definice existuje korelace (korelační koeficient 0,9-0,97). Co do velikosti se liší hodnoty stanovené na základě plošné hmotnosti dle vzorce (63) a na základě zaplnění dle vzorce (64). Způsob určení tloušťky tkaniny výpočet příliš neovlivní;
- mezi hodnotami stanovenými podle modifikované plošné definice nejsou významné rozdíly co do velikosti, korelace je nízká (korelační koeficient 0,4).

Dále lze konstatovat, že spolu dobře korelují hodnoty ψ_{1b} a ψ_{3b} tj. hodnoty porózy vypočtené na základě plošné a modifikované plošné definice, kde jsou při výpočtech použity hodnoty šířky příze.

Souvislost propustnosti s technologickými parametry tkanin a s parametry struktury (prostřednictvím modelů porózy) je popsána v [40].

9. Závěr

V práci jsou formulovány zákonitosti deformace příčného řezu příze a multifilu ve vazném bodě tkaniny. Experimenty jsou zaměřeny na hodnocení geometrických parametrů bavlnářských tkanin a hledání návazností na jejich porózitu. Pro stanovení základních trendů chování multifilu jsou zařazeny i experimenty prováděné na tkaninách vyrobených z multifilu. Pro hodnocení deformace niti ve vazném bodě jsou použity metody analýzy řezů tkaniny. K problematice deformability délkových textilií ve vazném bodě jsou provedeny jako doplňkové experimenty simulace vazného bodu křížením nití a stlačování niti mezi dvěma rovnoběžnými deskami. Souvislosti technologických parametrů a jejich kombinací se sledovanými veličinami jsou popsány regresními modely.

Jsou stanoveny charakteristické hodnoty velikosti deformace *příčného řezu příze* ve vazném bodě tkaniny pro osnovu a útek běžných bavlnářských tkanin rezných a upravených (praní, barvení). Je ukázáno, že ve vazném bodě relaxované tkaniny jde velikost deformace příčného řezu příze převážně na úkor stlačení povrchové vrstvy vláken. Pro modelování změn průřezu příze při působení normálové síly je přijata hypotéza o zachování obvodu průřezu příze. Závislost relativního rozšíření a relativního stlačení na normálové síle a jemnosti příze je v zkoumaném intervalu zatěžovací síly popsána regresním modelem.

Na základě analýzy parametrů *příčného řezu multifilu* ve vazném bodě tkaniny lze konstatovat, že závislost mezi relativním rozšířením a relativním stlačením multifilu ve vazném bodě tkaniny se svým charakterem blíží hypotézám o konstantní ploše řezu. Pro přesnější vyjádření vztahu mezi relativním rozšířením a relativním stlačením byl navržen regresní model. Je provedena analýza deformace průřezu multifilu při kombinaci axiálního namáhání a různých zákrutů. Je ukázáno, že hodnoty příčného rozměru multifilu při nulovém zákrutu neodpovídají představě multifilu jako válcového útvaru. Při dalších hladinách zákrutu se průměr multifilu statisticky významně nemění (ve zkoumaném rozsahu sil). Je provedena také analýza závislosti relativního rozšíření na relativním stlačení průřezu multifilu při radiálním stlačení. Je ukázáno, že se multifil chováním blíží hypotéze o zachování plochy (elipsy).

Výsledky měření stlačování příze a multifilu mezi rovnoběžnými deskami jsou použity při konstrukci modelu kontinua. Pro konjugovanou dvojici, tenzor protažení – Biotův tenzor napětí, byly vypočteny počáteční moduly pružnosti a tečné moduly pružnosti pro příze i pro multifil. Pro popis závislosti modulů $\bar{E}_{11}$ a $\bar{E}_{22}$ na normálové síle a technologických parametrech niti jsou navrženy regresní modely. Je diskutováno rozdílné chování odlišných struktur příze a multifilu.

Na základě experimentu stlačování příze je vyjádřen tlak působící deformaci příčného řezu příze, zaplnění příze po deformaci. Za předpokladu, že stlačování příčného řezu příze tlakem kolmým k ose příze lze považovat za variantu stlačování textilního materiálu v dokonale tuhé krabici, je navržen vztah pro výpočet materiálové tlakové konstanty.

Pro bavlnářské tkaniny jsou stanoveny parametry vazné vlny příze ve tkanině. Jsou navrženy charakteristické hodnoty poměrného stlačení tkaniny a relativní výšky zvlnění osnovy a útku a parametry modelů, které slouží k modelování geometrie vazné vlny.

Při posuzování dalších charakteristik tkanin jsou pro soubor bavlnářských tkanin sledovány především souvislosti s deformací příze ve vazném bodě tkaniny, dále je sledován vliv technologických parametrů výroby příze na poróзитu.

- [1] Hsieh, J. W. S., Timoshenko, P., Barber, B.: Structural mechanics of fibrous, paper and fabric. Vol. I. New York: London, 3. ed., Toronto 1999.
- [2] Mack, S.: Textiltechnische Prozesse & Konstruktion. VEB Verlag Technik 1997/2001.
- [3] Drahovský, J.: Geometrické modely a metody řešení tkanin a metody řešení tkanin. Acta AUTEX, Pardubice: TPCPNTEN, Proc. Vol. I, p. 301-309, Porečské Vánoce, 2001.
- [4] Mack, S.: Statistická geometrie tkanin. VEB Verlag Technik 1978.
- [5] Křížek, R.: Statistická geometrie příčných textilií. TUL Liberec 1981.
- [6] Nečekal, B.: Číslovné údaje, čas. 1. Statistické údaje o výrobě a zpracování. AUTEX, TU Liberec 2000, str. 83-91.
- [7] Nečekal, B.: Statistická geometrie tkanin. VEB Verlag Technik 1978.
- [8] Křížek, R.: Statistická geometrie příčných textilií. TUL Liberec 1981.
- [9] Nečekal, B.: Číslovné údaje, čas. 1. Statistické údaje o výrobě a zpracování. AUTEX, TU Liberec 2000, str. 83-91.
- [10] Nečekal, B.: Statistická geometrie tkanin. VEB Verlag Technik 1978.
- [11] Křížek, R.: Statistická geometrie příčných textilií. TUL Liberec 1981.
- [12] Křížek, R.: Porézní model vlny struktury příze. Kandidátská práce, VEB Verlag Technik 1975.
- [13] Brierley, S.: Cloth Setting Reconsidered. The Textile Manufacturer, July 1992, p. 22-27.
- [14] Bohner, O.: Konstrukce bavlnářských tkanin. Textil 1973, str. 187-191.
- [15] Křížek, R.: Statistická geometrie tkanin. TUL Liberec 1981.
- [16] Křížek, R.: Porézní model vlny struktury příze. Diplomová práce, VEB Verlag Technik 1975.
- [17] Lurie, S.V., Poincaré, T.: Integrated textile engineering. Wiley, 1998.
- [18] Lurie, S.V., Poincaré, T.: Integrated textile engineering. Wiley, 1998.
- [19] Křížek, R.: Porézní model vlny struktury příze. Diplomová práce, VEB Verlag Technik 1975.
- [20] Křížek, R.: Porézní model vlny struktury příze. Diplomová práce, VEB Verlag Technik 1975.
- [21] Křížek, R.: Porézní model vlny struktury příze. Diplomová práce, VEB Verlag Technik 1975.
- [22] Křížek, R.: Porézní model vlny struktury příze. Diplomová práce, VEB Verlag Technik 1975.
- [23] Křížek, R.: Porézní model vlny struktury příze. Diplomová práce, VEB Verlag Technik 1975.
- [24] Křížek, R.: Porézní model vlny struktury příze. Diplomová práce, VEB Verlag Technik 1975.
- [25] Křížek, R.: Porézní model vlny struktury příze. Diplomová práce, VEB Verlag Technik 1975.

Použitá literatura

- [1] Kavan, P.: Modelování jednoosých tahově deformačních vlastností tkanin plátnové vazby počítačem. Kandidátská disertační práce, VŠST Liberec 1985.
- [2] Neckář, B.: Příze. Tvorba, struktura, vlastnosti. SNTL Praha 1990.
- [3] Křemenáková, D.: Struktura směsových bavlnářských přízí. Kandidátská práce, TU Liberec 1995.
- [4] Hearle, J. W. S., Grosberg, P., Backer, S.: Structural mechanics of fibers, yarns and fabrics. Vol.1. New York, London, Sydney, Toronto 1969.
- [5] Nosek, S.: Teorie tkacího procesu a formování tkaniny, VÚB Ústí nad Orlicí, 1997-8.
- [6] Drašarová, J.: Geometrical models of woven fabrics and methods of internal structure detection. 1 st AUTEX conference TECHNITEX, Proc. Vol.I, p. 301-309, Povoja de Varazim, June 2001.
- [7] Nosek, S.: Struktura a geometrie tkanin, VUB Ústí nad Orlicí 1976.
- [8] Kovář, R.: Struktura a vlastnosti plošných textilií, TU Liberec 2002.
- [9] Neckář, B.: Chlupatost příze, část 1: Teoretický model chlupatosti. 7. konference STRUTEX, TU Liberec 2000, str. 83-91.
- [10] Neckář, B.: Morfologie a strukturní mechanika obecných vláknenných útvarů. TUL 1998.
- [11] Marko, J.: Jádrová skaná nit. Kandidátská práce, TU Liberec 1990.
- [12] Neckář, B.: Fyzikální model vnitřní struktury příze. Kandidátská práce, VŠST, Liberec 1975.
- [13] Brierley, S.: Cloth Setting Reconsidered. The Textile Manufacturer, July, 1952, p.349-360.
- [14] Bohadlo, O.: Konstrukce hedvábných tkanin, Textil 1973, str. 287- 292.
- [15] kolektiv autorů: Příručka textilního odborníka, Praha 1981.
- [16] Kohel, J.: Příčná stlačitelnost přízí. Diplomová práce, TU Liberec 1993.
- [17] Lomov, S.V., Peeters, T.: Integrated textile preprocessor WiseTex. Version 2.3. Computational methods and algorithms. Leuven 2002
- [18] Peirce, A.: Text. Res. J., 17, 1947, s. 123.
- [19] Sirková, B.: Matematický model pro vyjádření provázání nití ve tkanině s využitím Fourierových řad. Disertační práce, TU Liberec 2002.
- [20] Olofsson, B.: General model of a fabric as a geometric-mechanical structure. Text. Res. J., 55, 1964, s. 541-557.
- [21] Bagry, F.CH.: Příspěvek ke stanovení srážlivosti bavlněných přízí a tkanin. Disertační práce 1988.
- [22] Stríž, B.: Mechanika textilií, část 1: Základy mechaniky kontinua. TU Liberec 2001.
- [23] Stríž, B.: Mechanika textilií, část 1: Aplikace mechaniky kontinua. TU Liberec 2003.
- [24] Toll, S.: Packing mechanics of fiber reinforcements, Polymer engineering and science, 1998, Vol. 38, No 8.
- [25] Goijer, H.: Flow resistance of textile materials. Thesis UT Enschede 1998, ISBN 90 36 511 240

- [26] Neckář, B., Ibrahim, S.: Theoretical approach for determining pore characteristics between fibers. *Textil Res. J.* 73(7), July 2003, p. 611-619.
- [27] Neckář, B.: Teoretický model chlupatosti příze, metodika jeho využití a výpočetní program „Chlupatost-1“. Interní výzkumná zpráva, TU Liberec 2000.
- [28] Havrdová, M.: Příspěvek k hodnocení prodyšnosti oděvních tkanin. Disertační práce, TU Liberec 2004.
- [29] Lukáš, D.: Teorie netkaných textilií. Liberec: TU Liberec, 1997.
- [30] Křemenáková, D., Drašarová, J.: Protokol č.2GA/98/05, Struktura vřetenové a prstencové příze, VUB Ústí n/O, 1999.
- [31] Křemenáková, D., Drašarová, J.: Analýza struktury prstencové a vřetenové příze, dílčí etapa řešení, 2000.
- [32] Drašarová, J. a kol.: Hodnocení struktury a vlastností délkových a plošných textilií v závislosti na způsobu dopřádání, průběžná studie, 2001.
- [33] kolektiv autorů: Interní normy VCT sekce B, 2001.
- [34] Laboratory Imaging: LUCIA verze 4.51. Uživatelská příručka.
- [35] Drašarová, J.: Deformace příčného řezu délkové textilie ve vazném bodě tkaniny. 7. národní konference STRUTEX, TU Liberec 2000, str.127-134.
- [36] Krulczuková, D., Radiální deformace příze ve vazném bodě. Diplomová práce, TU Liberec 2003.
- [37] Krupincová, G., Janáčková, H., Křemenáková, D.: Stlačování příze mezi rovnoběžnými deskami. 8. konference STRUTEX 2001, str. 79-87
- [38] Froňková, P.: Radiální deformace multifilu ve vazném bodě, Diplomová práce, TU Liberec 2003.
- [39] Drašarová, J., Havrdová, M.: Prediction of woven fabrics permeability on geometrical model of porosity. 9th int. Conf. STRUTEX, TU Liberec 2002, str. 101-109.
- [40] Drašarová, J.: Relationship between fabrics permeability and structure parameters. 11th int. Conf. STRUTEX, TU Liberec 2004

Publikované práce doktorandky

- [1] Kovář, R., Drašarová, J.: Influence of Yarn Deformation on Weaving Process. *Fibres and textiles* 5 (1998), p.152-154, Žilina, SROV.
- [2] Kovář, R., Drašarová, J., Roček, V.: Non-Elasticity of Elasticity Fabrics. *Textile Science*, Liberec 1998.
- [3] Drašarová, J.: Unstandard experimental methods of fabric geometrical structure detection. *Textile Science*, Liberec June 2000, Vol.I, p. 98-103.
- [4] Bajzík, V., Drašarová, J.: Influence of Spinning Conditions on some Properties of OE yarns. *Theoretical and Experimental Problems of Materials Ing.*, Púchov 2001.
- [5] Drašarová, J.: Application of Image Analysis for Investigation of Textile Structures part B — WEAVES. First Czech-Chinese textile seminar Quick response system for fabric formation, Shanghai, p.51-58.
- [6] Drašarová, J.: Tvorba a vyhodnocení řezů příze ve vazném bodě tkaniny. 5. pracovní seminář STRUTEX, Liberec 1998, str.224-231.
- [7] Křemenáková, D., Drašarová, J.: Laboratoř textilních struktur se představuje. 5. pracovní seminář STRUTEX, Liberec 1998, str.336-342.
- [8] Drašarová, J.: Geometrické modely tkaniny plátňové vazby — idealizace a realita. 6. národní konference STRUTEX, Liberec 1999, str.135-140.
- [9] Drašarová, J., Křemenáková, D.: Strukturní rozbor textilie. 7. národní konference STRUTEX, Liberec 2000, str.305-308.
- [10] Drašarová, J., Voborová, J., Bajzík, V.: Klasifikace ovinků bezvřetenové příze. 8. národní konference STRUTEX, Liberec 2001, str.177-186.
- [11] Drašarová, J.: Hodnocení podílu uhlíkových vláken ve struktuře tkaniny. 8. národní konference STRUTEX, Liberec 2001, str.199-202.
- [12] Drašarová, J.: Geometrical models of woven fabrics and methods of internal structure detection. 1 st AUTEX conference TECHNITEX, Proc. Vol.I, p. 301-309, Povia de Varazim, June 2001.
- [13] Křemenáková, D., Drašarová, J.: Analýza struktury prstencové a vřetenové příze, dílčí etapa řešení, 2000.
- [14] Drašarová, J.: a kol.: Hodnocení struktury a vlastností délkových a plošných textilií v závislosti na způsobu dopřádání, průběžná studie, 2001.
- [15] Drašarová, J., Havrdová, M.: Prediction of woven fabrics permeability on geometrical model of porosity. 9th int. Conf. STRUTEX, TU Liberec 2002, str. 101-109.
- [16] Drašarová, J.: Relationship between fabrics permeability and structure parameters. 11th int. Conf. STRUTEX, TU Liberec 2004

Tabulka 1: Relativní stlačení a relativní rozšíření přízí ve vazném bodě tkanin skupin 1 a 2

Skupina	Označení tkaniny	osnova		útek	
		Relativní stlačení $\varepsilon_1[1]$	Relativní rozšíření $\varepsilon_2[1]$	Relativní stlačení $\varepsilon_1[1]$	Relativní rozšíření $\varepsilon_2[1]$
1	P10R	-0,221 <-0,247; -0,195>	-0,026 <-0,055; 0,003>	-0,185 <-0,211; -0,158>	0,088 <0,041; 0,134>
	E10R	-0,214 <-0,234; -0,195>	0,019 <-0,008; 0,045>	-0,256 <-0,283; -0,229>	0,015 <-0,023; 0,052>
	P20R	-0,206 <-0,237; -0,175>	-0,072 <-0,117; -0,028>	-0,212 <-0,230; -0,194>	0,034 <0,003; 0,066>
	R20R	-0,223 <-0,261; -0,186>	-0,056 <-0,095; -0,017>	-0,171 <-0,205; -0,137>	-0,008 <-0,047; 0,031>
	E20R	-0,203 <-0,236; -0,170>	-0,011 <-0,060; 0,039>	-0,159 <-0,178; -0,141>	0,084 <0,052; 0,116>
	P29,5R	-0,074 <-0,107; -0,041>	0,196 <0,153; 0,238>	-0,117 <-0,156; -0,079>	0,176 <0,125; 0,227>
	R29,5R	-0,127 <-0,169; -0,085>	0,383 <0,327; 0,438>	-0,202 <-0,233; -0,172>	0,277 <0,225; 0,328>
	E29,5R	-0,203 <-0,233; -0,173>	0,248 <0,185; 0,311>	-0,155 <-0,191; -0,118>	0,268 <0,221; 0,314>
	P10U	-0,268 <-0,290; 0,247>	-0,113 <-0,141; -0,085>	-0,233 <-0,260; -0,206>	0,054 <0,009; 0,099>
	E10U	-0,199 <-0,221; -0,176>	-0,087 <-0,112; -0,062>	-0,212 <-0,240; -0,184>	0,089 <0,036; 0,142>
	P20U	-0,176 <-0,213; -0,139>	-0,135 <-0,170; -0,100>	-0,331 <-0,366; -0,296>	0,291 <0,238; 0,344>
	R20U	-0,232 <-0,257; -0,207>	-0,090 <-0,131; -0,049>	-0,343 <-0,379; -0,306>	0,116 <0,057; 0,176>
	E20U	-0,257 <-0,279; -0,235>	-0,093 <-0,127; -0,059>	-0,308 <-0,354; -0,261>	0,260 <0,173; 0,347>
	P29,5U	-0,159 <-0,189; -0,128>	0,025 <-0,011; 0,062>	-0,220 <-0,243; -0,196>	0,163 <0,115; 0,210>
	R29,5U	-0,259 <-0,284; -0,234>	0,235 <0,187; 0,283>	-0,185 <-0,227; -0,143>	0,333 <0,267; 0,400>
	E29,5U	-0,237 <-0,261; -0,213>	0,178 <0,136; 0,221>	-0,259 <-0,282; -0,237>	0,311 <0,240; 0,383>
2	1	-0,033 <-0,068; 0,003>	0,131 <0,072; 0,191>	-0,190 <-0,225; -0,156>	0,064 <-0,002; 0,130>
	2	-0,171 <-0,192; -0,151>	0,102 <0,056; 0,148>	-0,195 <-0,233; -0,156>	0,084 <0,027; 0,140>
	3	-0,116 <-0,161; -0,072>	0,084 <0,016; 0,153>	-0,121 <-0,161; -0,081>	0,138 <0,083; 0,193>
	4	-0,116 <-0,158; -0,075>	0,012 <-0,038; 0,062>	-0,200 <-0,237; -0,163>	0,063 <0,009; 0,116>
	5	-0,152 <-0,185; -0,118>	0,098 <0,041; 0,154>	-0,207 <-0,246; -0,167>	0,070 <0,009; 0,131>
	6	-0,180 <-0,217; -0,143>	0,098 <0,044; 0,152>	-0,225 <-0,274; -0,175>	0,085 <0,023; 0,148>
	7	-0,386 <-0,433; -0,338>	0,311 <0,194; 0,427>	-0,196 <-0,256; -0,136>	0,029 <-0,037; 0,096>
	8	-0,125 <-0,150; -0,099>	0,265 <0,210; 0,320>	-0,128 <-0,156; -0,100>	0,314 <0,285; 0,344>

Tabulka 2: Relativní stlačení a relativní rozšíření multifilu ve vazném bodě tkanin skupiny 3

Skupina	Označení tkaniny	osnova		útek	
		Relativní stlačení ε_1 [1]	Relativní rozšíření ε_2 [1]	Relativní stlačení ε_1 [1]	Relativní rozšíření ε_2 [1]
3	9 plátno	-0,304 <-0,315;-0,294>	0,374 <0,357;0,391>	-0,464 <-0,477;-0,451>	1,257 <1,221;1,293>
	10 ⁺ kepr2/1	-0,424 <-0,441;-0,407>	0,541 <0,514;0,567>	-0,369 <-0,380;-0,357>	1,050 <1,028;1,073>
	10 kepr2/1	-0,321 <-0,333;-0,310>	0,284 <0,267;0,301>		
	11 ⁺ atlas4/1	-0,374 <-0,389;0,358>	0,493 <0,464;0,522>	-0,456 <-0,469;-0,443>	1,410 <1,373;1,447>
	11 atlas4/1	-0,165 <-0,180;-0,151>	0,051 <0,036;0,067>		

⁺ vazný bod s překřížením

Tabulka 3a: Parametry vazné vlny

Skupina	Označení tkaniny	Rozteč os přízí ve vazném bodě $H[\mu\text{m}]$		Poměrné stlačení tkaniny λ [1]	Relativní výška zvlnění ξ [1]			
		ideal	experiment		ideal		experiment	
					osnova	útek	osnova	útek
1	P10R	128	102	0,8	0,5	0,5	0,7	0,3
	E10R	128	97	0,76	0,5	0,5	0,63	0,37
	P20R	185	146	0,79	0,5	0,5	0,57	0,43
	R20R	185	149	0,8	0,5	0,5	0,56	0,44
	E20R	185	151	0,82	0,5	0,5	0,57	0,43
	P29,5R	231	209	0,9	0,5	0,5	0,6	0,4
	R29,5R	231	193	0,84	0,5	0,5	0,64	0,36
	E29,5R	231	190	0,82	0,5	0,5	0,57	0,43
	P10U	128	96	0,75	0,5	0,5	0,56	0,44
	E10U	128	102	0,8	0,5	0,5	0,57	0,43
	P20U	185	138	0,75	0,5	0,5	0,33	0,67
	R20U	185	132	0,71	0,5	0,5	0,33	0,67
	E20U	185	133	0,72	0,5	0,5	0,32	0,68
	P29,5U	231	187	0,81	0,5	0,5	0,56	0,44
	R29,5U	231	180	0,78	0,5	0,5	0,66	0,34
E29,5U	231	174	0,75	0,5	0,5	0,59	0,41	
2	1	185	165	0,89	0,5	0,5	0,82	0,18
	2	185	151	0,82	0,5	0,5	0,71	0,29
	3	197,5	174	0,88	0,53	0,47	0,8	0,2
	4	197,5	166	0,84	0,53	0,47	0,78	0,22
	5	208,5	171	0,82	0,56	0,44	0,79	0,21
	6	208,5	166	0,8	0,56	0,44	0,75	0,25
	7	221	172	0,78	0,52	0,48	0,61	0,39

Tabulka 3b: Parametry vazné vlny

Skupina	Označení tkaniny	Úhel vazné vlny v inflexním bodě dle Peirce (kap.4.3.1) γ [°]			
		ideal		experiment	
		osnova	útek	osnova	útek
1	P10R	29	-	28	19
	E10R	26	-	24	24
	P20R	29	34	25	21
	R20R	21	30	26	20
	E20R	30	33	26	21
	P29,5R	36	44	37	28
	R29,5R	34	45	34	22
	E29,5R	31	47	27	27
	P10U	25	-	20	30
	E10U	25	-	22	33
	P20U	29	38	13	34
	R20U	29	38	12	31
	E20U	29	39	12	32
	P29,5U	36	53	30	28
	R29,5U	33	51	31	19
	E29,5U	32	54	26	23
2	1	17	43	24	11
	2	22	43	25	16
	3	20	47	27	13
	4	26	47	31	13
	5	23	-	26	13
	6	29	-	29	16
	7	41	49	32	23

Tabulka 4: Délka vazné vlny

Skupina	Označení tkaniny	Délka vazné vlny ve vazné buňce dle Peirce (kap.4.3.1) $l[\mu\text{m}]$				Délka vazné vlny ve vazné buňce dle sin (kap.4.3.2) $l[\mu\text{m}]$			
		ideal		experiment		ideal		experiment	
		osnova	útek	osnova	útek	osnova	útek	osnova	útek
1	P10R	351	-	358	216	354	250	362	217
	E10R	349	-	346	221	352	250	349	222
	P20R	473	437	464	409	476	439	468	412
	R20R	458	449	448	423	460	451	452	427
	E20R	467	440	460	413	470	441	464	416
	P29,5R	536	500	545	462	537	496	546	464
	R29,5R	548	498	554	448	550	494	558	450
	E29,5R	569	493	559	451	572	488	565	454
	P10U	359	-	351	216	362	241	354	217
	E10U	358	-	353	219	361	242	356	220
	P20U	473	417	439	414	476	417	441	418
	R20U	476	420	441	412	479	420	443	416
	E20U	477	416	443	410	481	416	444	413
	P29,5U	533	487	520	442	534	479	524	445
	R29,5U	553	488	554	427	555	481	559	430
	E29,5U	559	486	545	430	562	478	550	433
2	1	693	404	722	350	698	401	713	351
	2	561	404	572	357	566	401	578	359
	3	673	406	699	353	679	401	708	354
	4	571	406	593	353	576	401	560	354
	5	670	-	685	353	677	401	694	354
	6	582	-	588	356	587	401	594	357
	7	507	455	489	410	505	450	493	413

- Limitujícím faktorem pro výpočet délky vazné vlny ideálního modelu přímka — oblouk je průměr příze, kdy se hodnoty vypočtené dle kap. 4.3.1 jeví tak vysoké, jakoby konstrukce tkaniny přesahovala limitní strukturu. Rozdíly jsou dány patrně nadhodnocením průměru příze.

Tabulka 5: Hodnoty zatížení v experimentu simulace vazného bodu křížením nití

Hmotnost závaží m [g]		0,5*)	1	11	61	111
Tahová síla v nitě F [N]		0,005	0,01	0,11	0,61	1,11
Normálová síla N [N]		-0,005	-0,01	-0,11	-0,61	-1,11
20 tex	Substanční plocha S [mm ²]	0,0132				
	Substanční průměr d_s [μm]	130				
	Průměr d [μm]	189				
	Pevnost nitě [N]	3,24				
	Napětí σ [MPa]	-0,38	-0,76	-8,33	-46,21	-84,09
29,5 tex	Substanční plocha S [mm ²]	0,0194				
	Substanční průměr d_s [μm]	157				
	Průměr d [μm]	232				
	Pevnost nitě [N]	4,45				
	Napětí σ [MPa]	-0,26	-0,52	-5,67	-31,44	-57,22

*) jako nulové zatížení (předpětí) je předpokládáno zatížení svorkou (hmotnost svorky je 0,5g)

Tabulka 6: Relativní stlačení z experimentu simulace vazného bodu křížením nití

Jemnost příze [tex]/ Zákrutový koeficient am [m ⁻¹ ktex ^{2/3}]	Relativní stlačení ε_l [1]				
N [N]	-0,005	-0,01	-0,11	-0,61	-1,11
20/80	0,000 <-0,076;0,076>	-0,015 <-0,070;0,040>	-0,158 <-0,237;-0,080>	-0,204 <-0,249;-0,159>	-0,192 <-0,242;-0,143>
20/72	0,000 <-0,058;0,058>	-0,055 <-0,123;0,013>	-0,073 <-0,126;-0,020>	-0,110 <-0,156;-0,063>	-0,110 <-0,165;-0,055>
20/65	0,000 <-0,096;0,096>	-0,154 <-0,226;-0,081>	-0,217 <-0,268;-0,166>	-0,323 <-0,369;-0,277>	-0,315 <-0,383;-0,246>
N [N]	-0,005	-0,01	-0,11	-0,61	-1,11
29/80	0,000 <-0,066;0,066>	-0,083 <-0,135;-0,031>	-0,169 <-0,216;-0,122>	-0,217 <-0,263;-0,171>	-0,275 <-0,348;-0,202>
29/72	0,000 <-0,060;0,060>	-0,070 <-0,126;-0,014>	-0,160 <-0,204;-0,115>	-0,252 <-0,327;-0,176>	-0,274 <-0,324;-0,224>
29/65	0,000 <-0,071;0,071>	-0,024 <-0,091;0,043>	-0,107 <-0,155;-0,059>	-0,206 <-0,253;-0,160>	-0,181 <-0,228;-0,134>

Tabulka 7: Hodnoty zatížení v experimentu stlačování přízí mezi dvěma rovnoběžnými deskami

Hmotnost závaží m [kg]		0	0,5	1	1,5	2	3	4
Normálová síla N [N]		-0	-2,5	-5	-7,5	-10	-15	-20
20 tex	Substanční plocha S [mm ²]	0,0132						
	Substanční průměr d_s [μm]	130						
	Průměr d [μm]	189						
	Napětí σ [MPa]	-0	-189	-379	-568	-758	-1136	-1515
29,5 tex	Substanční plocha S [mm ²]	0,0194						
	Substanční průměr d_s [μm]	157						
	Průměr d [μm]	232						
	Napětí σ [MPa]	-0	-129	-258	-387	-515	-773	-1031

Tabulka 8: Relativní stlačení a relativní rozšíření příze z experimentu stlačování mezi dvěma rovnoběžnými deskami

20 tex	Normálová síla N [N]	0	-2,5	-5	-7,5	-10	-15	-20
	Relativní stlačení ϵ_1 [1]	0	-0,397 <-0,370;-0,424>	-0,397 <-0,370;-0,424>	-0,478 <-0,461;-0,496>	-0,485 <-0,469;-0,502>	-0,552 <-0,537;-0,567>	-0,597 <-0,581;-0,614>
	Relativní rozšíření ϵ_2 [1]	0	0,208 <0,231;0,185>	0,208 <0,231;0,185>	0,262 <0,288;0,236>	0,269 <0,295;0,243>	0,311 <0,340;0,282>	0,311 <0,340;0,282>
	Normálová síla N [N]	0	-2,5	-5	-7,5	-10	-15	-20
29,5 tex	Relativní stlačení ϵ_1 [1]	0	-0,287 <-0,257;-0,317>	-0,483 <-0,465;-0,501>	-0,533 <-0,519;-0,548>	-0,591 <-0,576;-0,606>	-0,591 <-0,579;-0,603>	-0,687 <-0,677;-0,697>
	Relativní rozšíření ϵ_2 [1]	0	0,146 <0,169;0,123>	0,237 <0,266;0,207>	0,284 <0,312;0,257>	0,293 <0,327;0,260>	0,306 <0,338;0,273>	0,306 <0,338;0,273>

Tabulka 9: Relativní stlačení a relativní rozšíření multifilu při nulovém radiálním zatížení

Normálová síla $N=0$ [N]						
Hmotnost závaží m [kg]	0		0,05		0,08	
Tahová síla v niti F [N]	0		0,25		0,4	
Zákrut [m^{-1}]	Relativní stlačení ε_1 [1]	Relativní rozšíření ε_2 [1]	Relativní stlačení ε_1 [1]	Relativní rozšíření ε_2 [1]	Relativní stlačení ε_1 [1]	Relativní rozšíření ε_2 [1]
0	0,649 <0,522;0,775>		0,703 <0,595;0,811>		0,756 <0,645;0,867>	
200	0,197 <0,152;0,242>		0,147 <0,090;0,203>		0,203 <0,175;0,230>	
400	0,186 <0,163;0,210>		0,156 <0,124;0,187>		0,152 <0,119;0,185>	

*) jako nulové zatížení (předpětí) je předpokládáno zatížení svorkou (hmotnost svorky je 0,5g)

Tabulka 10: Relativní stlačení a relativní rozšíření multifilu při konstantním axiálním zatížení

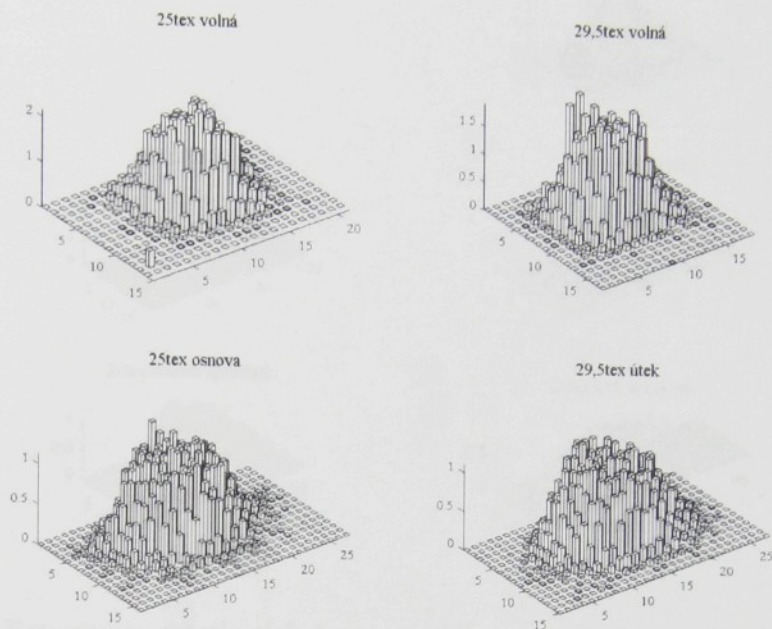
Tahová síla v niti $F=0,25$ [N]						
Hmotnost závaží m [kg]	0,5		1		2	
Normálová síla N [N]	-2,5		-5		-10	
Zákrut [m^{-1}]	Relativní stlačení ε_1 [1]	Relativní rozšíření ε_2 [1]	Relativní stlačení ε_1 [1]	Relativní rozšíření ε_2 [1]	Relativní stlačení ε_1 [1]	Relativní rozšíření ε_2 [1]
0	-0,692 <-0,704;-0,681>	2,05 <1,948;2,153>	-0,714 <-0,728;-0,700>	2,472 <2,284;2,661>	-0,739 <-0,756;-0,722>	2,662 <2,434;2,889>
200	-0,492 <-0,528;-0,456>	1,24 <1,092;1,388>	-0,662 <-0,684;-0,640>	1,997 <1,877;2,117>	-0,687 <-0,707;-0,667>	2,178 <2,045;2,311>
400	-0,477 <-0,497;-0,457>	0,946 <0,874;1,018>	-0,536 <-0,555;-0,518>	1,372 <1,222;1,523>	-0,62 <-0,643;-0,596>	1,717 <1,551;1,883>

Tabulka 11: Modelové parametry průřezu multifilu

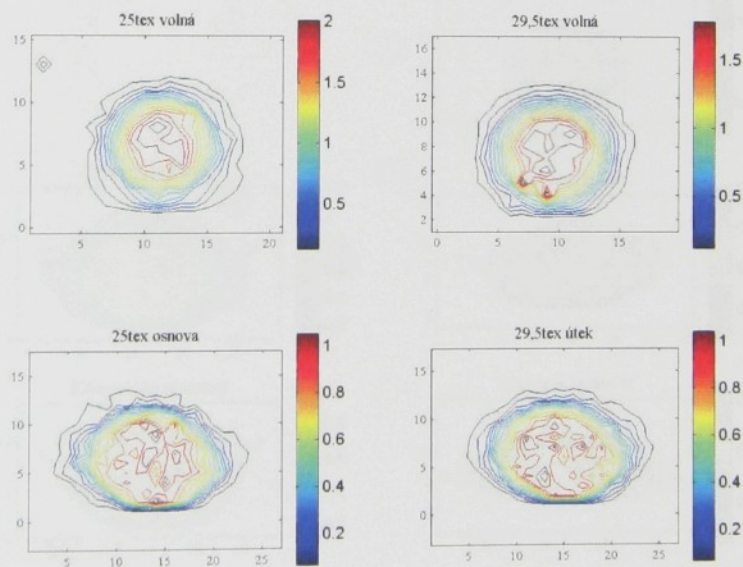
10 tex	Substanční plocha S [mm^{-2}]	0,00735
	Substanční průměr d_s [μm]	96,8
	Průměr d [μm]	115

Příloha 2

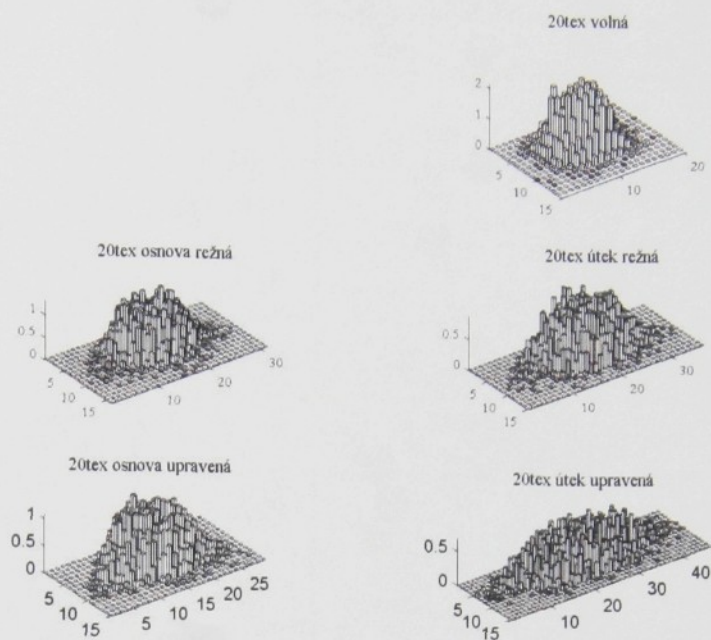
Charakter stlačení příze ve vazném bodě tkaniny



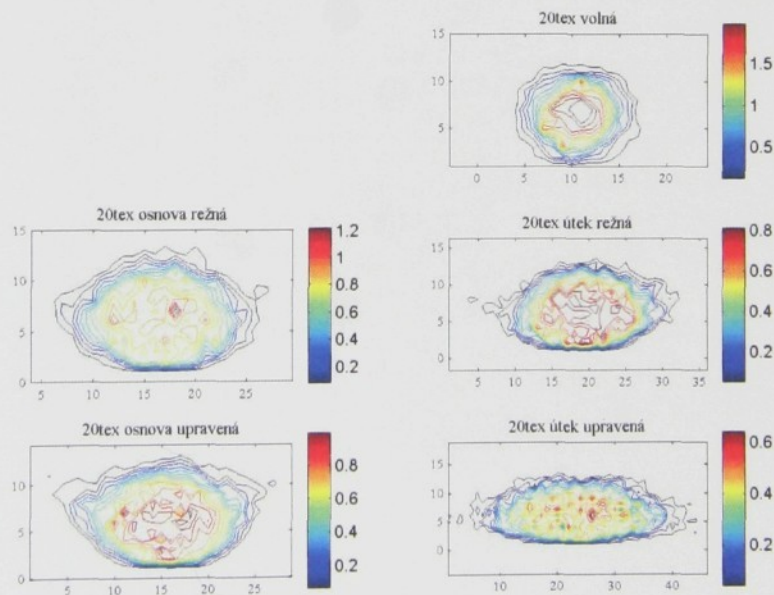
Obr 1: Histogramy relativních četností vláken v příčném řezu přízí 25 a 29,5 tex (tkanina 7)
(popis os: x,y - třídní intervaly v modifikovaných souřadnicích, z - relativní četnost [%])



Obr 2: Vrstevnicové grafy relativních četností vláken v příčném řezu přízí 25 a 29,5 tex
(tkanina 7)
(popis os: x,y - třídní intervaly v modifikovaných souřadnicích)



Obr 3: Histogramy relativních četností vláken v příčném řezu přízí 20 tex
(tkaniny P20R, P20U)
(popis os: x,y - třídní intervaly v modifikovaných souřadnicích, z - relativní četnost [%])



Obr 4: Vrstevnicové grafy relativních četností vláken v příčném řezu přízí 20 tex
(tkaniny P20R, P20U)
(popis os: x,y - třídní intervaly v modifikovaných souřadnicích)

Příloha 3

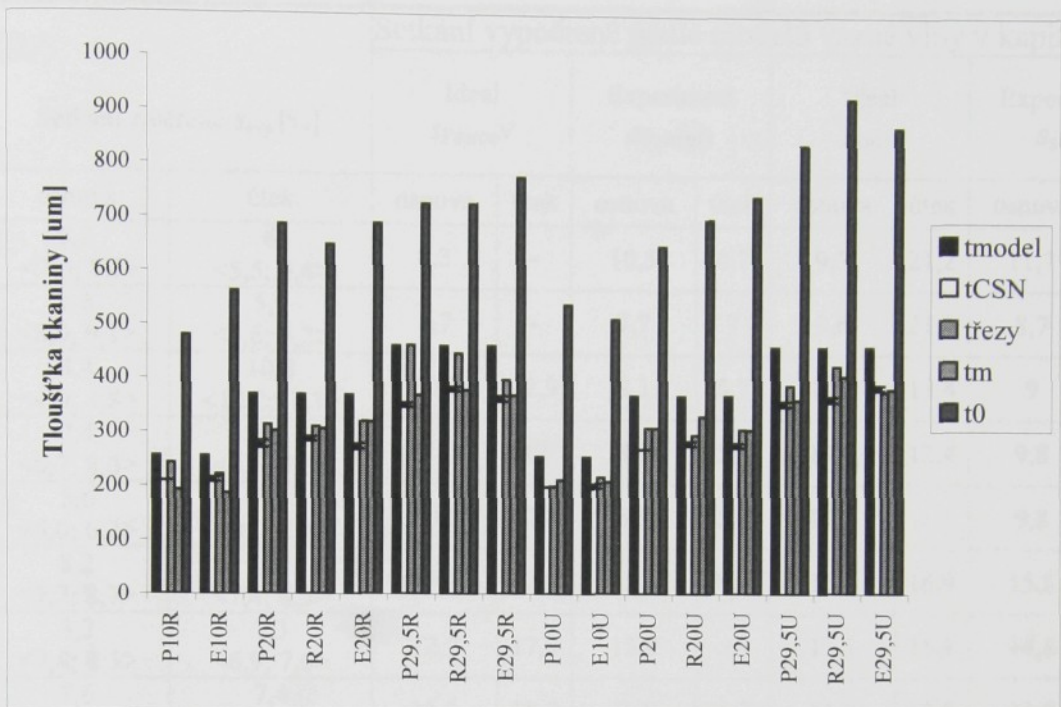
Další charakteristiky struktury tkaniny

Tabulka 12 Dostava

Označení vzorku	Dostava [0,1m ⁻¹]	
	<i>D_o</i>	<i>D_u</i>
P10R	485 <478; 492>	309 <303; 314>
E10R	484 <479; 489>	311 <308; 315>
P20R	258 <255;262>	233 <229;237>
R20R	249 <248;251>	243 <239; 247>
E20R	256 <252; 261>	237 <233; 241>
P29,5R	236 <233;238>	212 <211; 213>
R29,5R	237 <234;239>	206 <203; 208>
E29,5R	241 <238; 244>	196 <193;199>
P10U	510 <503; 516>	301 <298; 304>
E10U	509 <504; 514>	302 <298; 305>
P20U	276 <274; 277>	233 <229; 237>
R20U	273 <271; 275>	231 <230; 233>
E20U	277 <275; 279>	231 <229; 232>
P29,5U	247 <244; 250>	214 <212; 215>
R29,5U	245 <244; 247>	203 <197; 209>
E29,5U	248 <245; 250>	200 <197; 204>

Tabulka 13 Tloušťka

Označení vzorku	Tloušťka [mm]				
	<i>t_{CSN}</i>	<i>t_{model}</i>	<i>t_{řezv}</i>	KES	
				<i>t_m</i>	<i>t₀</i>
P10R	0,21 <0,21; 0,21>	0,256	0,243	0,193	0,48
E10R	0,212 <0,2081; 0,2159>	0,256	0,222	0,187	0,563
P20R	0,2774 <0,271; 0,2838>	0,370	0,314	0,303	0,687
R20R	0,288 <0,2841; 0,2919>	0,370	0,311	0,307	0,65
E20R	0,274 <0,2692; 0,2788>	0,370	0,321	0,32	0,69
P29,5R	0,352 <0,3481; 0,3559>	0,462	0,463	0,37	0,727
R29,5R	0,382 <0,3781; 0,3859>	0,462	0,448	0,38	0,727
E29,5R	0,364 <0,3592;0,3688>	0,462	0,399	0,37	0,777
P10U	0,2 <0,2;0,2>	0,256	0,201	0,213	0,54
E10U	0,202 <0,1981; 0,2059>	0,256	0,218	0,21	0,513
P20U	0,27 <0,27; 0,27>	0,370	0,310	0,31	0,65
R20U	0,282 <0,2781; 0,2859>	0,370	0,298	0,333	0,7
E20U	0,278 <0,2741; 0,2819>	0,370	0,308	0,307	0,743
P29,5U	0,356 <0,3512; 0,3608>	0,462	0,390	0,363	0,84
R29,5U	0,364 <0,3592; 0,3688>	0,462	0,426	0,407	0,927
E29,5U	0,386 <0,3812; 0,3908>	0,462	0,378	0,383	0,873



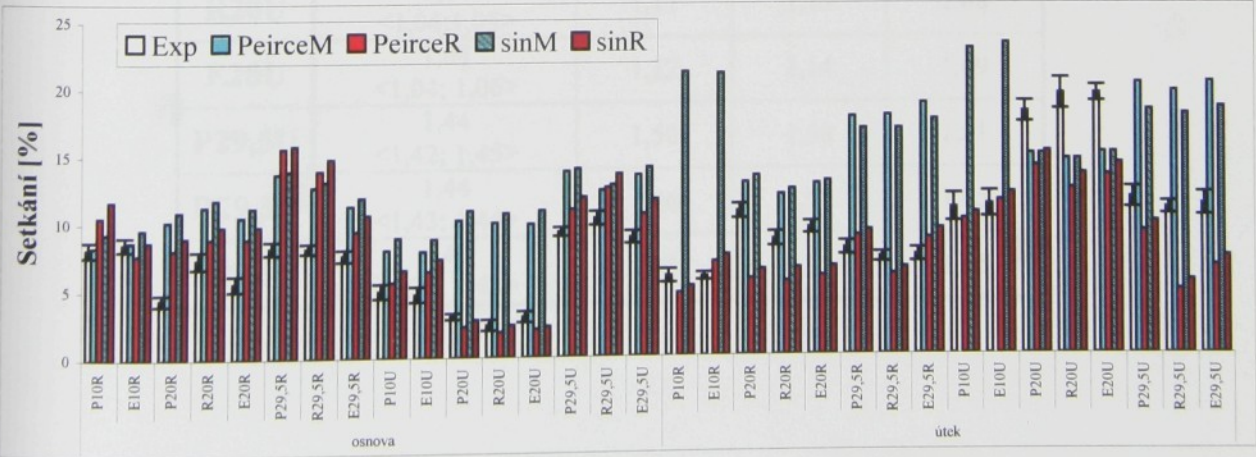
Obr. 5 Porovnání hodnot tloušťky tkanin hodnocené různými metodami

Tabulka 14 Porovnání hodnot tloušťky tkanin

Korelační koeficienty		<i>t</i> _{CSN}	<i>t</i> _{model}	<i>t</i> _{řezy}	<i>t</i> _m	<i>t</i> ₀	Relativní odchylka [%] <i>t</i> _{CSN} =100%	<i>t</i> _{model}	<i>t</i> _{řezy}	<i>t</i> _m	<i>t</i> ₀
	<i>t</i> _{CSN}	1	0,98	0,95	0,95	0,893		—			
	<i>t</i> _{model}		1	0,96	0,98	0,91		28	12	8	139
	<i>t</i> _{řezy}			1	0,93	0,81		—			
	<i>t</i> _m				1	0,92					
	<i>t</i> ₀					1					

Tabulka 15 Setkání

Označení vzorku	Setkání vypočtené podle modelů vazné vlny v kapitole 4.3									
	Setkání změřené s_{exp} [%]		Ideal $s_{PeirceV}$		Experiment $s_{PeirceO}$		Ideal s_{sinV}		Experiment s_{sinO}	
	osnova	útek	osnova	útek	osnova	útek	osnova	útek	osnova	útek
P10R	8,2 <7,6; 8,7>	6 <5,5; 6,4>	8,3	-	10,5	4,7	9,3	21,2	11,7	5,2
E10R	8,6 <8,0; 9,1>	5,9 <5,6; 6,2>	8,7	-	7,7	7	9,6	21,1	8,7	7,5
P20R	4,4 <4,0; 4,8>	10,8 <10,2; 11,3>	10,2	12,9	8,1	5,7	10,9	13,4	9	6,4
R20R	7,4 <6,7; 8,0>	8,7 <8,1; 9,2>	11,3	12	8,9	5,5	11,8	12,4	9,8	6,5
E20R	5,6 <5,0; 6,2>	9,5 <9,0; 10>	10,5	12,8	8,9	5,9	11,2	13	9,8	6,6
P29,5R	8,2 <7,7; 8,7>	8 <7,4; 8,5>	13,7	17,8	15,6	8,9	13,9	16,9	15,8	9,3
R29,5R	8,2 <7,8; 8,5>	7,3 <6,9; 7,6>	12,7	17,9	13,9	6	13,1	16,9	14,8	6,5
E29,5R	7,6 <7,2; 8,0>	7,4 <6,9; 7,9>	11,3	18,8	9,4	8,7	11,9	17,6	10,6	9,4
P10U	5 <4,4; 5,5>	11 <9,9; 12>	8	-	5,6	10,1	8,9	22,9	6,5	10,6
E10U	4,7 <4,1; 5,3>	11,2 <10,2; 12,2>	7,9	-	6,4	11,5	8,8	23,3	7,3	12,1
P20U	3,1 <2,8; 3,3>	18,2 <17,4; 18,9>	10,2	15	2,3	14,1	10,9	15	2,8	15,2
R20U	2,4 <2,0; 2,8>	19,2 <18,3; 20,7>	10	14,6	1,9	12,4	10,7	14,6	2,4	13,5
E20U	3 <2,6; 3,4>	19,5 <18,9; 20,1>	9,9	15,1	2,1	13,4	10,9	15,1	2,3	14,3
P29,5U	9,3 <9,0; 9,6>	11,7 <10,9; 12,5>	13,8	20,3	11	9,2	14	18,3	11,9	9,9
R29,5U	10,3 <9,8; 10,8>	10,9 <10,4; 11,4>	12,4	19,7	12,6	4,8	12,8	18	13,6	5,5
E29,5U	8,9 <8,4; 9,3>	11,2 <10,3; 12,1>	13,5	20,4	10,6	6,6	14,1	18,5	11,7	7,3



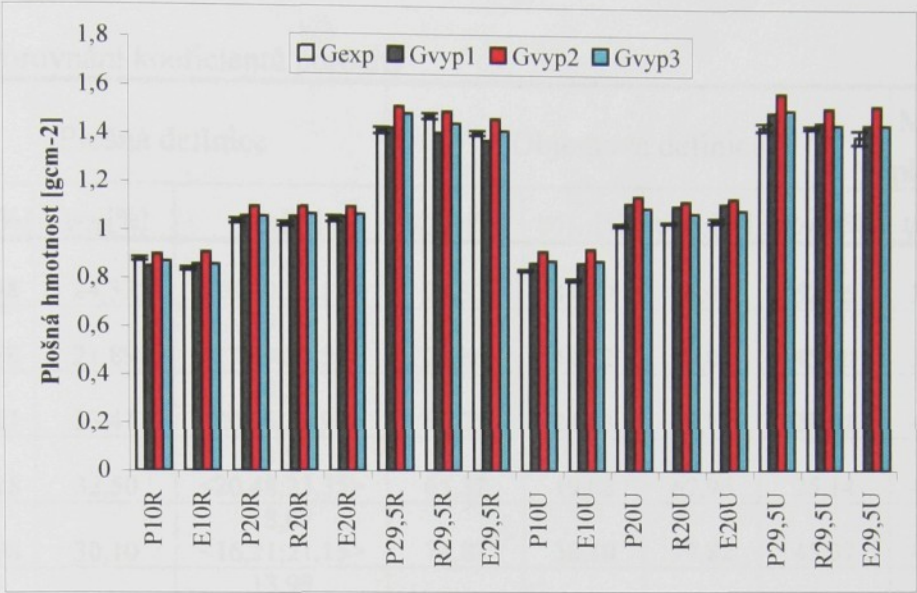
Obr. 6 Porovnání hodnot setkání tkanin hodnocené různými metodami

Tabulka 16 Porovnání hodnot setkání tkanin

Korelační koeficienty		s_{exp}	$s_{PeirceV}$	s_{sinO}	s_{sinV}	$s_{PeirceO}$	Relativní odchylka [%] $s_{exp}=100\%$					
	s_{exp}	1	0,45	0,61	0,51	0,62			$s_{PeirceV}$	$s_{PeirceO}$	s_{sinV}	s_{sinO}
	$s_{PeirceV}$		1	0,18	1	0,16		osnova	93	25	106	39
	$s_{PeirceO}$			1	0,22	1		útek	58	-20	84	-14
	s_{sinV}				1	0,2		—				
	s_{sinO}					1						

Tabulka 17: Plošná hmotnost

Označení vzorku	experiment	podle modelu sin vazné vlny v kapitole 4.3.2		
	$G_{exp} [g/dm^2]$	$G_{vyp1} [g/dm^2]$	$G_{vyp2} [g/dm^2]$	$G_{vyp3} [g/dm^2]$
P10R	0,88 <0,87; 0,88>	0,85	0,90	0,87
E10R	0,84 <0,83; 0,85>	0,86	0,91	0,86
P20R	1,04 <1,03; 1,05>	1,06	1,10	1,06
R20R	1,03 <1,02; 1,04>	1,06	1,10	1,07
E20R	1,05 <1,04; 1,06>	1,06	1,10	1,07
P29,5R	1,42 <1,41; 1,43>	1,43	1,52	1,49
R29,5R	1,48 <1,47; 1,50>	1,41	1,50	1,45
E29,5R	1,41 <1,40; 1,42>	1,38	1,47	1,42
P10U	0,84 <0,83; 0,84>	0,87	0,92	0,88
E10U	0,80 <0,80; 0,81>	0,87	0,93	0,88
P20U	1,03 <1,02; 1,04>	1,12	1,15	1,10
R20U	1,04 <1,04; 1,05>	1,11	1,13	1,08
E20U	1,05 <1,04; 1,06>	1,12	1,14	1,09
P29,5U	1,44 <1,42; 1,45>	1,50	1,58	1,51
R29,5U	1,44 <1,43; 1,44>	1,46	1,52	1,45
E29,5U	1,40 <1,37; 1,43>	1,45	1,53	1,45



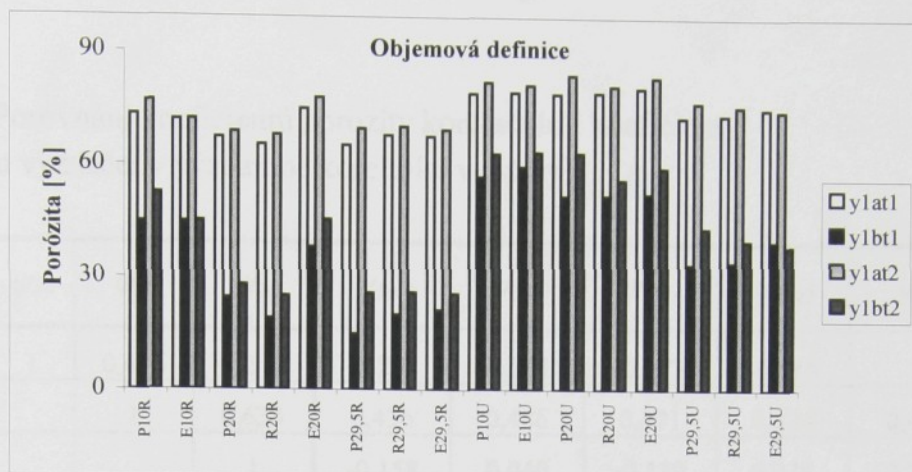
Obr. 7 Porovnání hodnot plošné hmotnosti tkanin hodnocené různými metodami

Tabulka 18 Porovnání hodnot plošné hmotnosti tkanin

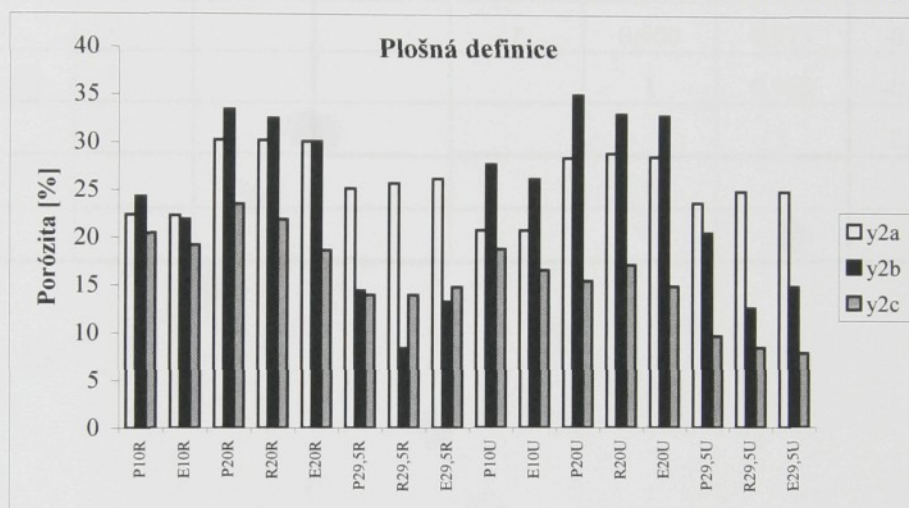
Korelační koeficienty		G _{exp}	G _{vyp1}	G _{vyp2}	G _{vyp3}	Relativní odchylka [%] G _{exp} =100%	G _{vyp1}	G _{vyp2}	G _{vyp3}
	G _{exp}	1	0,985	0,989	0,992		—		
	G _{vyp1}		1	0,997	0,995		3	7,5	3
	G _{vyp2}			1	0,999		—		
	G _{vyp3}				1		—		

Tabulka 19 Porovnání koeficientů porózity

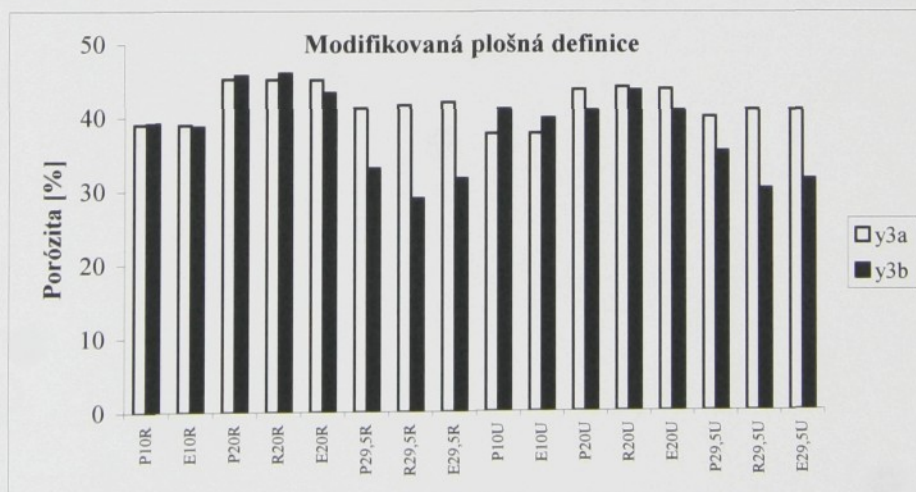
značení zorku	Plošná definice			Objemová definice				Modifikovaná plošná definice	
	$\psi_{2a}[\%]$	$\psi_{2b}[\%]$	$\psi_{2c}[\%]$	$\psi_{1at1}[\%]$	$\psi_{1bt1}[\%]$	$\psi_{1at2}[\%]$	$\psi_{1bt2}[\%]$	$\psi_{3a}[\%]$	$\psi_{3b}[\%]$
P10R	22,38	24,33	20,46 <18,40;22,51>	73,33	44,79	76,99	52,36	39,04	39,18
E10R	22,28	21,89	19,19 <17,89;20,50>	71,86	44,72	72,00	45,00	38,96	38,70
P20R	30,23	33,41	23,50 <20,06;26,93>	67,25	24,53	68,75	28,01	45,20	45,69
R20R	30,18	32,50	21,91 <20,48;23,35>	65,37	19,08	67,96	25,14	45,16	46,02
E20R	30,08	30,10	18,67 <16,21;21,13>	74,87	38,10	77,82	45,37	45,09	43,37
P29,5R	25,15	14,45	13,99 <12,32;15,67>	65,21	14,93	69,69	25,90	41,22	33,08
E29,5R	25,72	8,38	13,99 <11,87;16,11>	67,89	20,12	70,28	26,07	41,66	29,00
P29,5R	26,23	13,30	14,82 <12,97;16,67>	67,69	21,39	69,47	25,71	42,06	31,70
P10U	20,77	27,74	18,81 <17,79;19,83>	79,14	56,81	82,17	63,09	37,77	41,12
E10U	20,78	26,19	16,58 <15,28;17,87>	79,45	59,62	81,44	63,54	37,78	39,87
P20U	28,41	35,05	15,47 <14,00;16,93>	79,09	51,82	84,11	63,39	43,77	40,92
R20U	28,88	33,03	17,15 <15,62;18,69>	79,46	52,02	81,27	56,24	44,14	43,65
E20U	28,53	32,86	14,89 <13,24;16,55>	80,70	52,45	83,54	59,45	43,87	40,93
P29,5U	23,69	20,53	9,68 <8,32;11,04>	72,89	33,72	76,82	43,32	40,07	35,37
E29,5U	24,93	12,62	8,45 <6,85;10,06>	73,56	34,23	75,89	40,02	41,04	30,28
P29,5U	24,92	14,82	7,83 <6,51;9,16>	75,24	39,77	74,69	38,43	41,03	31,53



Obr 8a Porovnání poróznosti*) vypočtené podle objemové definice viz kap. 7.3.1



Obr 8b Porovnání poróznosti*) hodnocené podle plošné definice viz kap. 7.3.1



Obr 8c Porovnání poróznosti*) vypočtené podle modifikované plošné definice viz kap. 7.3.1

Tabulka 20 Porovnání koeficientů porozity korelačními koeficienty
(červeně jsou vyznačeny významně korelující veličiny)

	ψ_{2a}	ψ_{2b}	ψ_{2c}	ψ_{1at1}	ψ_{1at2}	ψ_{1bt1}	ψ_{1bt2}	ψ_{3a}	ψ_{3b}
ψ_{2a}	1	0,436	0,241	-0,203	-0,351	-0,173	-0,316	1	0,409
ψ_{2b}		1	0,633	0,436	0,486	0,471	0,524	0,436	0,953
ψ_{2c}			1	-0,158	0,040	-0,139	0,038	0,241	0,788
ψ_{1at1}				1	0,950	0,966	0,945	-0,203	0,246
ψ_{1at2}					1	0,900	0,973	-0,352	0,348
ψ_{1bt1}						1	0,955	-0,173	0,264
ψ_{1bt2}							1	-0,316	0,362
ψ_{3a}								1	0,409
ψ_{3b}									1

U 595 T