



Disertační práce

Makroskopické modelování vláknenných struktur - pokročilé numerické modelování vláknenné příze

Studijní program:

P3106 Textilní inženýrství

Studijní obor:

Textilní technika a materiálové inženýrství

Autor práce:

Ing. Josef Vosáhlo

Školitel práce:

Ing. Ondřej Novák, Ph.D.

Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Liberec 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že svou disertační práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má disertační práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Poděkování

Tato disertační práce byla vypracována na Katedře netkaných textilií a nanovláknenných materiálů, Fakulty textilní, Technické univerzity v Liberci s podporou vybraných projektů, studentstské grantové soutěže (SGS) a dalších činností a výzkumných a vzdělávacích aktivit.

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří přispěli ke vzniku této práce. Obzvlášť bych rád vyjádřil poděkování svému školiteli panu Ing. Ondřeji Novákovi, Ph.D., za jeho odborné vedení a cenné rady, které byly klíčové pro dokončení této práce. Dále bych chtěl poděkovat vedení a členům Katedry netkaných textilií a nanovláknenných materiálů, Katedry technologií a struktur a Katedry částí a mechanismů strojů, jmenovitě pak doc. Ing. Jiřímu Chvojkovi, Ph.D., doc. Ing. Michalovi Petřů, Ph.D., doc. Ing. Petru Henyšovi, Ph.D. a Ing. Bc. Monice Vyšanské, Ph.D. za poskytnutí CT snímků, cenných rad, věcné podměty a podpory během studia.

Také bych chtěl poděkovat Ing. Pavlovi Srbovi, Ph.D. a Ing. Martině Ryvolové, Ph.D. a dále pánům Bc. Filipovi Sanetrníkovi a Josefu Stuchlíkovi za spolupráci a pomoc při uskutečňování experimentů a měření.

Zvláštní poděkování patří panu prof. Ing. Ladislavovi Ševčíkovi, CSc. za uvedení do problematiky pokročilého 3D modelování a simulování.

Na závěr bych rád vyjádřil svou vděčnost celé své rodině za podporu, pochopení a trpělivost během doktorského studia a psaní této práce.

ANOTACE

Disertační práce se zaměřovala na problematiku popisu a tvorbu pokročilého numerického modelu příze, který bude respektovat složité geometrické uspořádání vláken příze, dále nelineární vlastnosti příze, které jsou ovlivněné zákrutem, kontakty mezi vlákny a přeuspořádáním struktury během namáhání. Byla provedena experimentální měření pro stanovení mechanických vlastností příze z vybraného materiálu příze, které byly důležité pro stanovení vybraných mechanických vlastností a tvorbu materiálového modelu. Pro tvorbu 3D modelu vlákenné příze byla využita pokročilá obrazová analýza výpočetní tomografie, která umožnila vytvoření rekonstruované trajektorie vláken příze. Na základě obrazové analýzy byla provedena úprava získaných snímků v programu Matlab, který poskytuje širokou škálu nástrojů pro detekci, segmentaci a kvantifikaci vlastností obrazu. Tímto způsobem se získaly informace o struktuře příze pro následnou tvorbu 3D geometrie příze. Následně byl představen postup tvorby 3D geometrie modelu příze, který byly následně použit pro sestavení numerické simulace, kde byly uvedeny vhodné programy, nástroje a funkce pro vytvoření odpovídající konstrukce 3D modelu vlákenné příze včetně odpovídajících zákrutů a zaplnění. Další část práce se věnovala způsobu vytvoření samostatného numerického modelu, který by kvalitativně odpovídal reálné 3D geometrii příze. Pro tvorbu numerického modelu byla využita metoda konečných prvků, přičemž byl vytvořen strukturní model s kontakty mezi vlákny umožňující studovat a vizualizovat rozložení deformace a napětí v přízi i mezi jednotlivými vlákny. Dále bylo porovnáno chování vytvořených numerických modelů a experimenty s reálnými vzorky ve zvolených úsecích včetně řezů vlákenné příze. Z těchto vytvořených řezů bylo stanoveno zaplnění, jak pro zatěžování v tahu, tak následně pro model stlačování. Vytvořený numerický model vlákenné příze umožňuje identifikovat vliv intenzity zákrutů, na silové a deformační odezvy v závislosti na přetvoření při tahovém nebo tlakovém namáhání v závislosti na vlastnostech vláken a kontaktů. V disertační práci byly představeny různé metody modelování vlákenné příze, včetně způsobů, jakými lze získat informace o struktuře a vlastnostech příze. Vytvořené numerické simulace umožnily popsat chování příze za vybraných podmínek zatěžování a mohou být použity také pro optimalizaci struktury příze s cílem dosažení požadovaných vlastností. V závěru dizertační práce byla představena příkladová studie aplikace pokročilého numerického modelu vlákenné příze s nanovlákenou strukturou, kde s ohledem na okrajové podmínky lze stanovovat vliv použitého materiálového modelu na mechanické vlastnosti a optimalizovat tím změny geometrie příze a použité technologie výroby.

Klíčové slova

Příze, numerický model, tvorba modelu, 3D geometrie, zákrut, zaplnění, kontakty, řezy, obrazová analýza, výpočetní tomografie, měření, CAD, MKP, napětí, deformace

ANOTACE

The dissertation focused on the problem of description and creation of an advanced numerical model of yarn, which will respect the complex geometric arrangement of yarn fibres, as well as non-linear properties of yarn, which are influenced by twist, contacts between fibres and the rearrangement of the structure during loading. Experimental measurements were carried out to determine the mechanical properties of the yarn material selected and to develop the material model. Advanced computed tomography image analysis was used to create a 3D model of the yarn fibers, which allowed the creation of a reconstructed yarn fiber trajectory. The image analysis was used to modify the acquired images in Matlab, which provides a wide range of tools for image feature detection, segmentation and quantification. In this way, information about the yarn structure was obtained for the subsequent creation of 3D yarn geometry. Subsequently, the procedure for creating the 3D yarn geometry model was presented and then used to build a numerical simulation, where appropriate programs, tools and functions were presented to create the corresponding 3D fiber yarn model structure including the appropriate twists and fills. The next part of the thesis focused on how to create a stand-alone numerical model that would qualitatively match the real 3D yarn geometry. The finite element method was used to create the numerical model, and a structural model with contacts between fibres was created to study and visualise the distribution of strain and stress in the yarn and between individual fibres. Furthermore, the behaviour of the developed numerical models and experiments were compared with real specimens in selected sections including yarn fibre sections. From these generated sections, the filling was determined, both for the tensile loading and subsequently for the compression model. The developed numerical model of the fibre yarn allows the identification of the effect of the intensity of the twists, on the force and strain responses as a function of the remodelling under tensile or compressive loading, as a function of on fibre and contact properties. In this dissertation, different methods of modelling fibre yarns have been presented, including ways in which information on the structure and properties of the yarn can be obtained. The numerical simulations developed allowed to describe the behaviour of the yarn under selected loading conditions and can also be used to optimise the yarn structure in order to achieve the desired properties. At the end of the thesis, a case study of the application of an advanced numerical model of a nanofibrous yarn structure was presented, where the influence of the material model used can be determined with respect to the boundary conditions on the mechanical properties and thus optimize changes in the yarn geometry and the manufacturing technology used.

Keywords

Yarn, numerical model, model building, 3D geometry, twist, fill, contacts, sections, image analysis, computed tomography, measurements, CAD, FEM, stress, strain

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	IX
Seznam obrázků	XII
Seznam tabulek.....	XVII
1. Úvod.....	1
2. Současný stav řešené problematiky	4
2.1 Úvod do problematiky modelování vlákných struktur.....	4
2.2 Vybrané metody a postupy tvorby matematických modelů vlákných struktur pro studium mechanických vlastností	6
2.2.1 Speciální metody pro modelování vlákných struktur.....	10
2.3 Přístupy k tvorbě modelů pro studium mechanických vlastností příze	14
2.3.1 Přístupy a možnosti numerických simulací přízí	15
2.3.2 Podpůrné metody a nástroje pro sestavení odpovídajícího 3D modelu pro tvorbu pokročilých numerických simulací příze	20
2.4 Budoucí trendy v matematickém modelování přízí	26
2.5 Závěr a shrnutí kapitoly	28
3. Cíle disertační práce	29
4. Experimentální měření pro stanovení mechanických vlastností vlákné příze	31
4.1 Měření mechanických vlastností vybraných vzorků vlákné příze	31
4.2 Tvorba snímků geometrie vláken příze pomocí výpočetní tomografie	34
4.2.1 Tvorba vektorové geometrie vlákné příze.....	36
4.3 Závěr a shrnutí kapitoly	42
5. Tvorba pokročilé 3D geometrie modelu příze pro sestavení numerické simulace	43
5.1 Možnosti tvorby 3D geometrie modelu příze	43
5.2 Postup tvorby pokročilé 3D geometrie modelu příze	44
5.2.1 Optimalizovaný postup tvorby 3D geometrie modelu vlákné příze	47
5.3 Způsoby stanovení zaplnění 3D modelu vlákné příze	51
5.4 Závěr a shrnutí kapitoly	54
6. Tvorba numerické simulace 3D modelu vlákné příze pro stanovení mechanických vlastností	55
6.1 Import 3D modelu vlákné příze do MKP programu	55

6.2	Materiálový model vlákenné příze.....	56
6.3	Volba vhodných kontaktů mezi vlákny	57
6.3.1	Určení součinitele smykového tření mezi vlákny	58
6.4	Tvorba sítě konečných prvků vlákenné příze	59
6.5	Definice okrajových a počáteční podmínek.....	61
6.5.1	Přiřazení souřadnicových systémů pro okrajové a počáteční podmínky	65
6.6	Závěr a shrnutí kapitoly	66
7.	Výsledky numerické simulace 3D modelu vlákenné příze	67
7.1	Výsledky numerické simulace ideálního modelu vlákenné příze při tahovém a tlakovém namáhání	67
7.2	Výsledky numerické simulace pokročilého modelu vlákenné příze tahového namáhání	68
7.3	Výsledky numerické simulace pokročilého modelu vlákenné příze při stlačování deskou	70
7.4	Porovnání mechanických vlastností reálných vzorků vlákenné příze s pokročilými modely vlákenné příze	72
7.5	Závěr a shrnutí kapitoly	82
8.	Příkladová studie aplikace pokročilého numerického modelu vlákenné příze s nanovlákenou strukturou	83
8.1	Výroba vzorků a jejich charakterizace.....	83
8.2	Aplikace numerického modelování příze s nanovlákenou strukturou pro studium mechanických vlastností	84
8.3	Závěr a shrnutí kapitoly	89
9.	Přínosy disertační práce	90
9.1	Přínosy pro vědní obor.....	90
9.2	Přínosy pro praxi.....	91
10.	Závěr a doporučení	92
11.	Literatura.....	96
	Práce autora se vztahem ke studované problematice	102
	Stručná charakteristika dosavadní odborné, výzkumné a vědecké činnosti.....	105
	Přílohy	106
	Příloha [P1]	106
	Příloha [P2]	108
	Příloha [P3]	110
	Příloha [P4]	111

Příloha [P5]	118
Napětí a deformace vlákna	118
Vztah napětí a deformace pro jednosměrné protažení (stlačení)	120
Vztah mezi modulem objemové pružnosti K a modulem pružnosti v tahu E.....	122
Vztah mezi modulem pružnosti v tahu E a modulem pružnosti ve smyku G	123

Seznam zkratk a symbolů

MHP	Metoda hraničních prvků
MDP	Metoda diskretních prvků
MKO	Metoda konečných objemů
CBR	Case-based reasoning
FECS	System založený na fuzzy logice
MKP	Metoda konečných prvků
CAD	Počítačem podporované projektování
CFD	Proudění tekutin pomocí MKP
SEM	Skenovací elektronový mikroskop
PET	Označení materiálu polyethylentereftalát
DSC	Diferenční skenovací kalorimetrie
3D	Třidimenzionální
2D	Dvoudimenzionální
1D	Jednodimenzionální
CT	Výpočetní tomografie
CAE	Počítačová podpora inženýrství
CNTY	Příze z uhlíkových nanotrubic
UNS	Umělá neuronová síť
PTC	Parametric technology corporation
TUL	Technická univerzita v Liberci
GSS	Globální souřadnicový systém
LSS	Lokální souřadnicový systém
UDSS	Uživatelsky definovaný souřadnicový systém
KP	Konečný prvek
q	exponent zákrutu
G	Smykový modul..... [MPa]
K	Objemový modul [MPa]
I	Invariant..... [-]
ε	Poměrné prodloužení [-]

σ	Napětí.....	[MPa]
Ψ	Objemové zaplnění	[-]
c	Tuhost	[N.m ⁻¹]
C	Matice tuhosti	[N.m ⁻¹]
S	Matice poddajnosti	[m.N ⁻¹]
E	Elastický modul pružnosti	[MPa]
γ	Smyková deformace	[rad]
τ	Smykové napětí	[MPa]
μ	Poissonovo číslo	[-]
β	Úhel sklonu příze.....	[rad]
R_0	Poloměr příze.....	[m]
T	Vložený počet zákrutů na jednotku délky příze	[-]
$E^3 (\exists)$	Euklidovský prostor.....	[-]
T_i	Transformace	[-]
x_0, y_0, z_0	Kartézské souřadnice	[m]
\exists	Množina reálných čísel	[-]
$R(s,t)$	Polohový vektor.....	[m]
e_i	Jednotkový vektor.....	[m]
F_{at}	Rovnováhy sil	[N]
τ_a	Normálové napětí	[MPa]
α_m	Plocha pod úhlem	[rad]
α	Úhel zkosu vepsaného elementu.....	[rad]
f	Koeficient tření	[-]
ω	Úhlová rychlost.....	[rad.s ⁻¹]
Ω	Parametr úhlové rychlosti	[-]
e_z	Základní směrový vektor	[-]
μ	Zaplnění	[-]
π	Ludolfovo číslo (3,14)	[-]
m	Moment.....	[N.m]
R	Trajektorie příze	[-]
F	Síla odporu vzduchu	[N]

\bar{R}	Zrychlení rotace příze [m.s ⁻²]
\bar{T}	Středová akcelerace vlákna [m.s ⁻²]
T	Změna napětí [MPa]
s	Délka oblouku [m]
\bar{v}_n, \bar{S}	Dostředivé zrychlení příze [m.s ⁻²]

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Princip dopřádacího stroje.....	1
Obr. 2.1 Model kontinua s dělením na menší prvky [24].....	8
Obr. 2.2 Zjednodušený model kontinua [25]	8
Obr. 2.3 Studium charakteru přetržení při tahovém namáhání [25].....	8
Obr. 2.4 Diskrétní model příze – kontinuální svazek nití s mírným zákrutem [27].....	10
Obr. 2.5 Diskrétní model příze – kontinuální svazek nití s určitým zvlněním pro studii kontaktů mezi vlákny [28]	10
Obr. 2.6 Modelování příze založené na využití umělých neuronových sítí [27]	12
Obr. 2.7 Modelování příze založené na případovém usuzování [27].....	13
Obr. 2.8 3D modely struktur s využitím fuzzy logiky [34].....	13
Obr. 2.9 Orientace vláken v přízi [37] (<i>vlevo</i>), Substantivní průřez příze [38] (<i>uprostřed</i>), Povrchové vlákno v přízi [39] (<i>vpravo</i>)	15
Obr. 2.10 Svazek paralelně uspořádaných vláken [40] (<i>vlevo</i>), Struktura různých typů vláken [41] (<i>vpravo</i>)	15
Obr. 2.11 Numerické modelování s využitím rovnoměrně rozdělených částí vlákna [85].	17
Obr. 2.12 Numerické modelování mechanického chování ovíjené trubky: 3D trajektorie modelovaná na základě výpočetní geometrie (nahore), ovin příze pod různými úhly (uprostřed), koncentrace napětí v průběhu navíjení příze (dole) [54].....	19
Obr. 2.13 Modelování geometrie příze z mikrosnímků [68].....	21
Obr. 2.14 Numerické modelování mechanických vlastností pomocí mikro CT skenování [70].....	22
Obr. 2.15 Simulace geometrie příze [82]	23
Obr. 2.16 Algoritmus pro modelování příze [71].....	24
Obr. 2.17 Příklady modelů pro splétané vzorky příze [71]	24
Obr. 2.18 Matematický model příze z uhlíkových nanotrubic [73]	24
Obr. 2.19 Model migrace vodivých vláken v přízi: Schematický diagram migrace vláken v úseku příze (<i>vlevo</i>), Výsledky simulace úseků pramenů skané příze, ve kterých jsou zapuštěna vodivá vlákna (<i>vpravo</i>) [75].....	26
Obr. 4.1 Experimentální měření pro stanovení mechanických vlastností vlákenné příze ..	32
Obr. 4.2 Záznam průběhu tahových zkoušek	33

Obr. 4.3	Zaznamenané hodnoty tahové zkoušky do 10% deformace v kombinaci grafů ...	33
Obr. 4.4	Laboratorní mikro-CT skener Rigaku nano3DX (vlevo) v Ceitec, princip snímání vzorku příze prostřednictvím CT (vpravo)	35
Obr. 4.5	Pracovní postup extrakce vláken z mikro-CT dat [82]	35
Obr. 4.6	Blokové schéma vytvořených skriptů pro separace obrazu od sjednocených vláken získaných z CT	36
Obr. 4.7	Vytvořený CT snímek vlákněné příze a detailní zobrazení kontaktu ve vláknech (nahore), nastavení binárního obrazu a detailní zobrazení spojení vláken (dole).....	38
Obr. 4.8	Princip vodní transformace pro představu částečně zaplavených povrchů intenzit obrazu, které jsou odděleny imaginárními hrázemi [83]	38
Obr. 4.9	Binární zobrazení vláken (vlevo) a vodní transformace (vpravo)	39
Obr. 4.10	Překrytí binárního snímku s vodní transformací (vpravo) a detailní zobrazení (vlevo)	40
Obr. 4.11	Nová vodní transformace binárního snímku (vlevo), detailní zobrazení (vpravo).....	41
Obr. 4.12	Konečný výsledek rozdělených vláken získaný úpravou z původního CT snímku	42
Obr. 5.1	Pokročilá tvorba 3D geometrie příze: řez příze (vlevo) a CAD model (vpravo) ..	44
Obr. 5.2	Idealizovaná 3D geometrie modelu příze	44
Obr. 5.3	První postup tvorby pokročilé 3D geometrie modelu příze: využití jednotlivých rovin pro vytváření geometrie z vektorového obrazu	45
Obr. 5.4	Druhý postup tvorby pokročilé 3D geometrie modelu příze: využití středových bodů trajektorie vláken	45
Obr. 5.5	3D skica (vlevo), načtení a vložení souřadnic středu bodů do excelovského souboru (vpravo)	46
Obr. 5.6	Tvorba spojitě křivky, spojené středové body do jednotlivých křivek	46
Obr. 5.7	Importované jednotlivé křivky do 3D plochy	47
Obr. 5.8	Vytažený 3D model soustavy vlákněné příze (vlevo), izometrický náhled na sestavu vláken (uprostřed), izometrický náhled na vznikající zákrut (vpravo) 47	
Obr. 5.9	Optimalizovaný postup tvorby 3D geometrie modelu vlákněné příze prostřednictvím parametrického modelování	48

Obr. 5.10 Trajektorie jednotlivých vláken s definovanými průběhy křivosti v prostoru charakterizující zákruty prostřednictvím parametrických rovnic.....	50
Obr. 5.11 Optimalizovaný postup tvorby 3D geometrie modelu vlákně příze:	
a) Ukázka tvorby tažení trajektorie vláken s definovaným zákrutem,	
b) kompletní 3D model příze	51
Obr. 5.12 Řez 3D geometrií modelu vlákně příze uloženého do válce pro stanovení zaplnění	52
Obr. 5.13 Způsoby výpočtu zaplnění vláken v 3D modelu vlákně příze	52
Obr. 5.14 Metoda výpočtu zaplnění vláken v 3D modelu vlákně příze	53
Obr. 6.1 Importovaný 3D model vlákně příze do MKP programu.....	55
Obr. 6.2 Bilineární model pro popis vlákně příze	56
Obr. 6.3 Vytvořené kontaktní dvojice (vlevo), detailní zobrazení (vpravo)	59
Obr. 6.4 Navržená síť konečných prvků vlákně příze pro numerické simulace.....	61
Obr. 6.5 Numerický model vlákně příze pro tahové namáhání: fixační okrajová podmínka (vlevo), posuvná okrajová podmínka (vpravo)	63
Obr. 6.6 Působící síly v kontaktním dotyku mezi vlákny v přízi	64
Obr. 6.7 Numerický model vlákně příze pro tlakové namáhání.....	64
Obr. 6.8 Vytvoření souřadnicových systémů a vytvoření délkových úseků pro odečet ploch	66
Obr. 6.9 Rozmístěné jednotlivé plochy (vlevo), odečtená středová plocha s charakteristickým zaplněním vláken (vpravo)	66
Obr. 7.1 Výsledky numerické simulace ideálního modelu vlákně příze při tahovém namáhání: a–b) maximální deformace a napětí ve vláknech v závislosti na posuvu, c–d) deformace a napětí ve vláknech při aplikovaném radiálním stlačení	67
Obr. 7.2 Výsledky deformace pokročilého modelu vlákně příze při tahovém namáhání	68
Obr. 7.3 Výsledky rozložení deformace a napětí pokročilého modelu vlákně příze při tahovém namáhání v jednotlivých časových úsecích natahování.....	69
Obr. 7.4 Výsledky deformace pokročilého modelu vlákně příze při stlačování deskou .	71
Obr. 7.5 Výsledky rozložení deformace a napětí pokročilého modelu vlákně příze při stlačení v jednotlivých časových úsecích	72

Obr. 7.6 Porovnání deformace tahové zkoušky reálného vzorku s pokročilým modelem vlákenné příze a) deformace reálné vlákenné příze, b) deformace numerického modelu	73
Obr. 7.7 Porovnání tahové zkoušky: průběh reálného natahování vlákenné příze, ideální model vlákenné příze, pokročilý model vlákenné příze.....	74
Obr. 7.8 Porovnání průměru vlákenné příze reálného vzorku a pokročilého modelu vlákenné příze: zobrazení vlákenné příze v SEM (vlevo), stanovení průměru příze (uprostřed), model (vpravo).....	75
Obr. 7.9 Porovnání zúžení reálného vzorku vlákenné příze.....	76
Obr. 7.10 Jednotlivé řezy pro zkoumání radiálního průběhu zaplnění v pokročilém modelu vlákenné příze	76
Obr. 7.11 Stanovení plochy mezikruží a postup vytváření kruhu v programu Matlab	77
Obr. 7.12 Ukázka navrženého výpočtu zaplnění a vytvořený graf zaplnění ve středovém řezu příze.....	78
Obr. 7.13 Porovnání průměrných hodnot zaplnění při natahování v průběhu deformace: a) 0% b) 2%, c) 4%, d) 6%, e)8%, f) 10%, g) 0–10%.....	80
Obr. 7.14 Plošné rozložení zaplnění vláken v přízi při tahové zkoušce v průběhu deformace 0 % až 10 %.....	81
Obr. 7.15 Porovnání průměrných hodnot zaplnění při stlačování při deformaci 0 %–60 %.....	81
Obr. 8.1 Nanášení nanovlákného materiálu na ovíjenou přízi v laboratořích KNT TUL	84
Obr. 8.2 Objemová síť vytvořená na modelu vlákenné příze (vlevo), detailní zobrazení objemové sítě (uprostřed), model vlákenné struktury příze se segmenty nanovláken (vpravo).....	86
Obr. 8.3 Vložení okrajových podmínek svěru a posuvu segmentů (vlevo) pohled na zavedené posuvné podmínky v jednotlivých segmentech vložené v souřadnicovém systému (vpravo)	86
Obr. 8.4 a) Maximální deformace ve vláknech v závislosti na posuvu, b) Maximální napětí von-Mises ve vláknech v závislosti na posuvu.....	87
Obr. 8.5 Maximální deformace ve vláknech při stlačování ve druhém časovém kroku	87

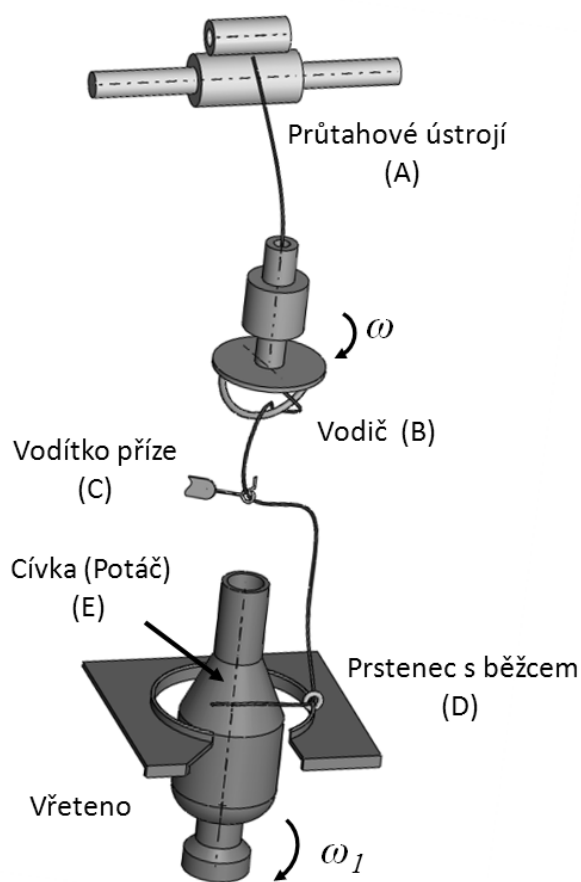
Obr. 8.6 Maximální napětí von-Mises ve vláknech při stlačování ve druhém časovém kroku	88
Obr. 8.7 Porovnání naměřených výsledných silových hodnot reálného vzorku příze a příze s nanovrstvou a modelu příze a modelu příze s nanovrstvou.....	88

Seznam tabulek

Tab. 4.1 Výsledné hodnoty tahové zkoušky vybraných vzorků.....	34
Tab. 6.1 Materiálový model vlákenné příze pro numerickou simulaci	57
Tab. 8.1 Statistická analýza mkp modelu a experimentálních vzorků	89

1. Úvod

V textilním průmyslu je výroba přízí jednou z nejpoužívanějších technologií pro oděvní aplikace a je proto nutné pro optimalizace nových strojů umět komplexně popsat mechanické vlastnosti příze [1]. Příze mohou být z přírodních a syntetických staplových vláken zpevněných zákrutem, tj. spředených v surovém stavu nebo upravené (skaním, barvením apod.) pro další zpracování. Dále mohou být vyráběny příze také pro výrobky z nekonečných vláken, vzniklé zvlákňováním jak chemických tavenin a roztoků, tak i živočišných sekretů (přírodní hedvábí) [2–3]. Výrobní technologie jsou z velké části specializované na zpracování daného druhu vlákna např. z bavlny, vlny, z lýkových vláken, skleněných, uhlíkových, basaltových, odpadových vláken a dalších. Podle způsobu předpřádání dělíme příze na mykané, česané, poločesané, směsové, atd., podle účelu použití tkalcovské, pletařské, pro ruční pletení, krepové, kobercové, nebo podle způsobu úpravy na barvené, mercerované, opalované, skané, efektní (buklé, nopkové, střapcové) atd. Skutečnost, že se proces prstencového dopřádání stal hlavním směrem předení přízí, je způsobena několika faktory. Nejdůležitějším z nich je jeho jednoduchá a důmyslná tvorba zákrutu a následného navíjení. Prstencové dopřádací stroje navíc umožňují spřádat téměř všechna vlákna s různou hustotou příze. Také mechanické vlastnosti, resp. pevnost v přetržení je nejvyšší ve srovnání s přízí vyráběnou na jiných spřádacích strojích. Po výstupu z průtahového zařízení procházejí nitě vodicím okem a poté tvoří rotující strukturu mezi vodicím očkem a běžcem, čímž se dodává



Obr. 1.1 Princip dopřádacího stroje

mercerované, opalované, skané, efektní (buklé, nopkové, střapcové) atd. Skutečnost, že se proces prstencového dopřádání stal hlavním směrem předení přízí, je způsobena několika faktory. Nejdůležitějším z nich je jeho jednoduchá a důmyslná tvorba zákrutu a následného navíjení. Prstencové dopřádací stroje navíc umožňují spřádat téměř všechna vlákna s různou hustotou příze. Také mechanické vlastnosti, resp. pevnost v přetržení je nejvyšší ve srovnání s přízí vyráběnou na jiných spřádacích strojích. Po výstupu z průtahového zařízení procházejí nitě vodicím okem a poté tvoří rotující strukturu mezi vodicím očkem a běžcem, čímž se dodává

zákrut. Vzniklá příze se následně navíjí na cívku umístěnou na rotujícím vřetenu (obr. 1.1). Teoretické, experimentální a numerické zkoumání mechanických vlastností příze pro různé uspořádání útvaru má zásadní vliv při zlepšování a optimalizaci technologie předení a také při navrhování konstrukce stroje. Napětí příze je klíčovým faktorem, který ovlivňuje strukturu a kvalitu příze a úzce souvisí s několika procesními parametry, jako jsou: jemnost příze, průměr příze, délka atd. Proto by měla být hodnota napětí příze kontrolována, aby byla zajištěna stabilita výroby příze a snížil se poměr přetrhů. Analýzy se provádějí na experimentálních vzorcích a také na výrobcích z příze. Samotná teoretická analýza a experimentální data získaná z laboratorního měření umožňují porovnávat a predikovat chování různě uspořádaných materiálů v krátkém čase bez vytvoření prototypu. V minulosti byly publikovány teorie procesu prstencového předení za účelem zlepšování parametrů výrobků a optimalizace. Přestože některé parametry jsou omezeny konkrétními specifikacemi stroje, stále existují některé parametry, které lze upravit podle různých podmínek a mechanického namáhání při spřádání. Pokroky v předení a studiu mechanických vlastností příze lze vysledovat už v minulosti, jak publikoval např. Ludicke [4]. Teorie mechanického chování přízi byla postupně rozvíjena a zdokonalována ve 20. století. V 50. a 60. letech 20. století byla popsána lineární diferenciální rovnice druhého řádu [5, 6] a rozvoj počítačů a numerických programů (např. Nastran, ANSYS, LS-Dyna, PAM CRASH, ABAQUS, COSMOS/M, ALGOR a jiné) umožnil v 90. letech vytvořit numerickou simulaci kvazistacionární tvorby zákrutu [7]. Následovaly další matematické modely, které publikoval např. Frazer v [8–10], kde v rámci popisu příze využil rovnic rovnováhy popisující pohyb vlákna a diskutoval vliv okrajových podmínek na výsledný tvar a napětí příze. Stump a Frazer [11] vyvinuli numerickou metodu řešení pohybových nelineárních časově závislých diferenciálních rovnic pro studium jevu balonování. Tang [12] a Clark [13] ve svých pracích provedli experimenty k porovnávání numerických výsledků. Jak se zlepšovaly možnosti tvorby materiálových modelů a numerické programy umožňovaly importovat složité geometrie tvaru příze, začaly vznikat pokročilejší numerické modely jako např. [14–16], popisující mechanické vlastnosti, napětí a deformace, za účelem zlepšování kvality příze, výrobního procesu a optimalizací výrobních zařízení. V současné době se také numerické modelování využívá pro studii směsových přízí s obsahem spandexu, pro které je nutné využít nových konstitutivních vztahů, které umožňují popsat nelineární chování, při procesu předení, při kterém se příze značně protahuje. Při tvorbě

numerických modelů je proto třeba zvážit lineární nebo nelineární elasticitu příze, aby bylo možné vhodně předpovědět napětí příze při její deformaci.

Předmětem disertační práce je tvorba pokročilého numerického modelu vlákenné příze pro studium mechanických vlastností.

Numerický model bude vytvořen využitím snímků získaných výpočetní tomografií vzorku příze a dalších postupů. Na základě zpracování snímků pomocí obrazové analýzy budou získány datové vstupy pro tvorbu CAD modelu s geometrií a strukturou odpovídající reálné přízi. Ověření modelu bude provedeno porovnáním s experimentálně získanými daty. Vytvořený model bude vhodný k simulaci a predikování strukturních změn při různých zátěžových stavech vznikajících při zatěžování vlákenných přízí, zejména při tahovém a tlakovém namáhání.

2. Současný stav řešené problematiky

V této kapitole se pojednává o důležitých souvislostech současného stavu poznání řešené problematiky, které byly už částečně zmíněny v úvodní kapitole. Přiblížen je zejména úvod do problematiky a komplexita různých přístupů modelování vlákných struktur, trendy modelování vláken, lineárních vlákných soustav a zejména přízí. Jedná se především o metody a přístupy tvorby modelů vlákných struktur pro studium mechanických vlastností, využití matematických postupů, modelů kontinua, diskretních modelů vláken, tvorby 3D geometrie vlákna i celé příze. V kapitole jsou také uvedeny další přístupy a speciální metody modelování vlákných struktur, např. využitím umělých neuronových sítí, použití sigmoidní aktivační funkce apod. V kapitole jsou diskutovány vybrané publikace a studie, zabývající se řešenou problematikou a jsou také uvedeny některé přístupy a projekty, které se řešily na TUL. V uvedených pracích a publikacích autoři popisují své výsledky, postupy, experimenty a hodnotí vhodnost navrhovaných metod pomocí modelových simulací pro studii, popis a optimalizaci řešené problematiky.

2.1 Úvod do problematiky modelování vlákných struktur

Existují různé způsoby výroby délkových útvarů z textilních vláken. Nejčastější a nejsložitější kategorie zahrnuje příze, tedy lineární útvary vyrobené ze staplových a střížových vláken. Rozmanitost vlastností přízí spočívá ve volbě vláken s konkrétními vlastnostmi, uspořádáním vláken v přízi různými způsoby a organizací v jednotlivých směrech. To dává výrobcům velkou svobodu a variabilitu při navrhování a modifikaci vlastností pro konkrétní aplikace. Teoretické modelování struktury příze a predikce vlastností lze provádět pomocí matematických, numerických, výpočetních metod nebo např. pomocí umělých neuronových sítí [17]. Modelování přízí je velmi důležité z několika důvodů. Modely mohou být použity k lepšímu porozumění dějů, ovlivňujících vlastnosti příze a způsobů, jak tyto vlastnosti plánovaně měnit. V průmyslovém prostředí mohou být nové typy přízí rychleji vyvíjeny pomocí modelů, úpravou designu již vyráběné příze nebo vytvořením zcela nové příze, která by jinak nevznikla bez pomoci modelování. Rizika, čas a náklady spojené s návrhem příze lze snížit modelováním vlastností přízí před jejich výrobou. Neméně důležité

je, že modelování může usnadnit výrobu přízí, splňujících požadavky na kladené vlastnosti. Příze jsou součástí mnoha produktů, jako jsou oděvy, technické textilie, textilie pro bezpečnostní a obranný průmysl apod. Funkční model příze, proto musí být schopen, co nejpřesněji předpovídat mechanické vlastnosti příze, jak je uvedeno např. v [18, 19]. V závislosti na využití a následnou aplikaci budou některé mechanické vlastnosti důležitější než jiné. Patří sem vlastnosti, jako je maximální tahová pevnost příze, prodloužení příze jako funkce tahové a tlakové axiální zátěže, ohybová síla jako funkce ohybového momentu a rozšíření příze jako laterální síly působící na přízi při jejím stlačování. Všechny tyto vlastnosti budou záviset na výsledné konstrukci příze a na materiálech, ze kterých je vyrobena. Vlastnost, která se obvykle považuje za nejdůležitější, je pevnost příze, protože má největší vliv na navíjení a další procesy, jako je tkaní, pletení, šití apod. Pevností přízí je míněna tahová pevnost vztažená na jemnost, nebo na průřez vláken příze. Jemnost [tex] je hmotnost v gramech na 1 km délky příze, resp. lineárního útvaru [20]. Je také označovaná jako délková, či lineární hustota. Vlivem procesu výroby a zpracování příze poměrně často dochází ve strojích k přetrhu. Je všeobecně známé, že velkou četností přetrhů příze jsou zatíženy prakticky všechny stroje (prstencové dopřádací stroje, tkací stroje, soukací stroje, pletací stroje, paličkovací stroje). To je dáno výrobními podmínkami, materiálem příze, technologií výroby, vnějšími vlivy (teplota okolí, vlhkost) apod. Toto popisuje např. Morgner, který ve své práci [21] uvádí, že k poruchám a přetržení přízí dochází neustále. Budeme-li např. vycházet z toho, že na prstencových strojích se vyrábí ročně desítky milionů tun příze, lze si představit o jaký problém s odstraňováním přetrhu přízí a údržbou stroje v rámci výroby se jedná¹. V současné době se tento problém začíná řešit manipulačními a robotickými systémy (kolaborativní roboti), které doplňují výrobní personál. Proto s ohledem na všechny parametry spojené s optimalizací výroby přízí, která je ovlivněna rychlostí výroby, typem materiálu, jemností vláken, požadavky na počet zákrutů přízí, požadavky na mechanické vlastnosti, atd., je nutné vytvořit pokročilé modely, které by umožňovaly tvořit a definovat materiálové modely, importovat složité 1D, 2D či dokonce 3D geometrie tvaru příze s parametrickým ovládáním pro změnu typu a průměru

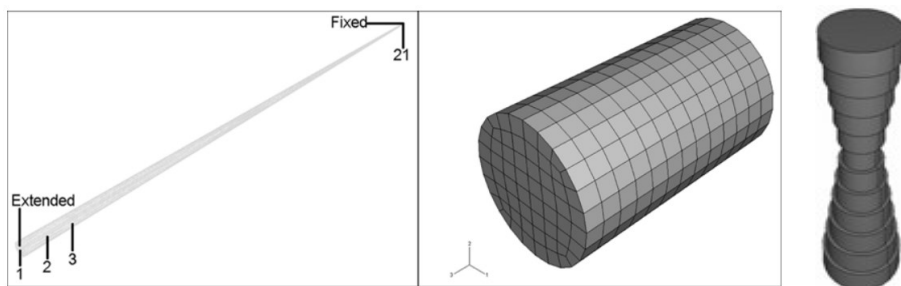
¹Wikipedie na svých stránkách [22] uvádí, že se na prstencových strojích vyrábí ročně 40 milionů tun příze, musí se například při průměrných 4 přetrzích na kilogram, nejméně 600 000 lidí ve světě zaměstnávat výhradně jejich odstraňováním. Přetrhy způsobují také 2–5 % ztrát na výrobní kapacitě dopřádacích strojů. Tyto údaje naznačují, že přetrhy příze zapříčiňují značnou část (až 10 %) výrobních nákladů zejména v regionech s vysokou úrovní mezd.

vlákna, počtu zákrutů a umožnily popisovat mechanické vlastnosti, jako napětí a deformace za účelem zlepšování kvality příze, výrobního procesu a optimalizaci stroje.

2.2 Vybrané metody a postupy tvorby matematických modelů vlákněných struktur pro studium mechanických vlastností

Analýzy a měření mechanických vlastností vzorků vláken, vlákněných struktur, příze jsou obecně omezeny jen pro určité informace, takže nemohou vypovídat o okamžitém rozložení deformací a napětí ve vláknu/vlákněch/celé přízi, kontaktech mezi vlákny. Je to dáno tím, že jsou omezeny možnostmi měření, snímání, vizualizací, přičemž některé vlastnosti nelze spolehlivě vůbec měřit (např. rozložení hlavních napětí a deformací vlákněné struktury). Znalost rozložení hlavních napětí a deformací ve struktuře je důležitá i proto, že z ní lze vycházet pro optimalizaci a navrhnutí odpovídajícího tvaru geometrie příze a tím optimalizovat problematiku výroby, viz kap. 2.1. S pomocí spolehlivého modelu by bylo možné posoudit, jak se struktura přetváří a při jakém napětí. V tomto případě je velmi výraznou možností sestavení modelové simulace prostřednictvím matematických metod modelování. Nejvýhodnější je pro tento účel vytvořit modelovou simulaci pomocí metody konečných prvků (MKP), ale možnosti pro simulace vlákněných útvarů nabízejí i jiné numerické metody, např. metoda diskretních prvků (MDP), metoda hraničních prvků (MHP), či metoda konečných objemů (MKO). V této práci byla pro simulace využívána výhradně MKP. Mechanické namáhání vlákněných struktur zejména přízi vyvolává ve vnitřní struktuře mnoho různorodých vlastností, které se mění s velikostí deformace, jak již bylo uvedeno. Clark [13] a Tang [14] se shodují, že při modelování vlákněných struktur a zejména přízi, je nutno některé charakteristické vlastnosti zjednodušit či zanedbat (např. některé nelinearity linearizovat), přičemž oba také uvádějí, že velkým problémem modelování nelineárních vlastností je zejména popsání hlavních napětí v krátkých časových diferencích $\Delta t = t_{i+1} - t_i$. Řešení okrajového problému malých či velkých deformací vzniklých protahováním nebo stlačováním vzorku dále spočívá nejen v zadání správných okrajových podmínek a materiálových vlastností, ale také v přípravě odpovídajícího 3D modelu a konstrukci navržené sítě konečných prvků. Petru ve své práci [23] uvádí, že: "*Programy MKP jsou v současné době velmi propracované a umožňují řešení spojitého problému převést na řešení konečné, kde v preprocesoru lze pro přibližné*

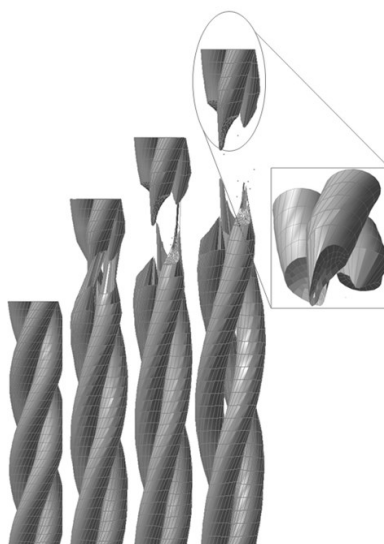
řešení navrhnout odpovídající geometricky jednoduché dílčí podoblasti, tzv. konečné prvky. Necht' $\mathcal{N} \subset \mathbb{R}^3$ je souvislá oblast třírozměrného prostoru, ve které je problém řešen. Její hranice označme Γ , kde je Γ tzv. Lipschitzovská hranice a necht' aproximace zvolených bázových funkcí jsou odvozeny nad každým konečným prvkem o velikosti l , neboť jakákoli spojitá funkce může být reprezentována lineární kombinací algebraických polynomů konvergujících ke spojitému řešení tj. $\lim_{n \rightarrow 1} \vartheta \sim 1$ ". Tedy MKP lze chápat jako speciální typ variační metody využívající matematického popisu řešení problému. Současné významné komerční softwary a programy MKP (např. Ansys, Abaqus, Permas, LS-Dyna, Marc, PAM CRASH) umožňují sestavit a následně řešit lineární i nelineární materiály pomocí matematických vztahů vycházejících z mechaniky kontinua či reologických modelů (např. Kelvinův model, Maxwellův model atd.). Také umožňují s určitou přesností studovat a modelovat kvalitativně složitější problém jakým bezesporu jsou kontaktní úlohy (např. interakce vláken, modelování stlačování vláken/příze v interakci se stlačovací deskou a jejich reorganizace). Samotné modely lze vytvářet různým přístupem prostřednictvím jednodušších či složitějších modelů, jak bude přibliženo dále. Každou geometrii vlákna nebo příze lze zjednodušit na celé kontinuum, kde se vytvoří jeden či více kontinuálních modelů reprezentujících n -počet vláken. Jedná se o určité zjednodušení a homogenizaci řešené úlohy, které však pro studium mechanického chování příze může mít přijatelné výsledky. Byla popsána celá řada modelů využívajících kontinua pro popis mechanických vlastností vlákenných struktur. Například Deng [24] uvádí, že kontinuum je objem, který lze dělit na menší prvky, a tyto prvky budou mít stejné vlastnosti jako hmotný materiál. Samozřejmě je uvažováno, že tento typ modelu nemůže popisovat všechny nespojitosti a variace v materiálech na molekulární a už vůbec ne na atomární úrovni, nicméně k výpočtu napětí a deformací lze na model kontinua vhodně aplikovat zavedené konstitutivní vztahy, a to i v případech velkých a složitých deformací příze (obr. 2.1). Dalším příkladem tvorby kontinuálního modelu vlákenné příze lze uvést zjednodušení, které je přibliženo na obr. 2.2 a detailněji popsáno ve skriptech v [25]. Zde je patrné zjednodušení geometrie příze do spletaného tvaru 3 kontinuí reprezentujících trojmo skanou nit. Takový model lze následně využít pro studii deformace a napětí při mechanickém namáhání, přičemž kontinuum reprezentuje celou řadu vláken a lze jej také využít při vhodně zadaných okrajových a počátečních podmínkách pro studium charakteru přetržení, což lze následně porovnávat s přetrhem reálným např. vzniklým na výrobním zařízení (obr. 2.3).



Obr. 2.1 Model kontinua s dělením na menší prvky [24]



Obr. 2.2 Zjednodušený model kontinua [25]

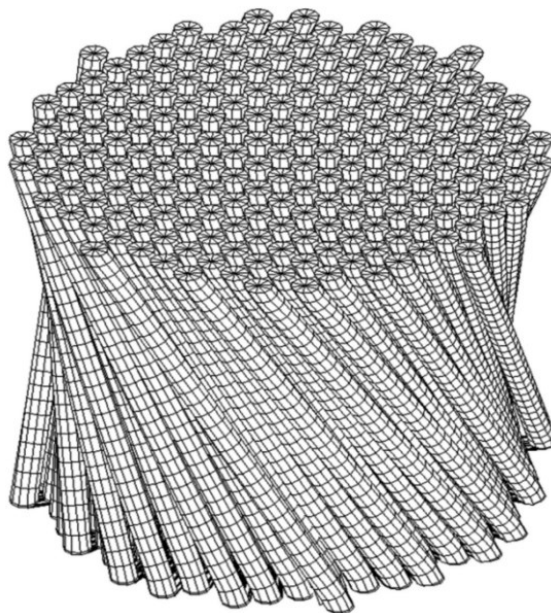


Obr. 2.3 Studium charakteru přetržení při tahovém namáhání [25]

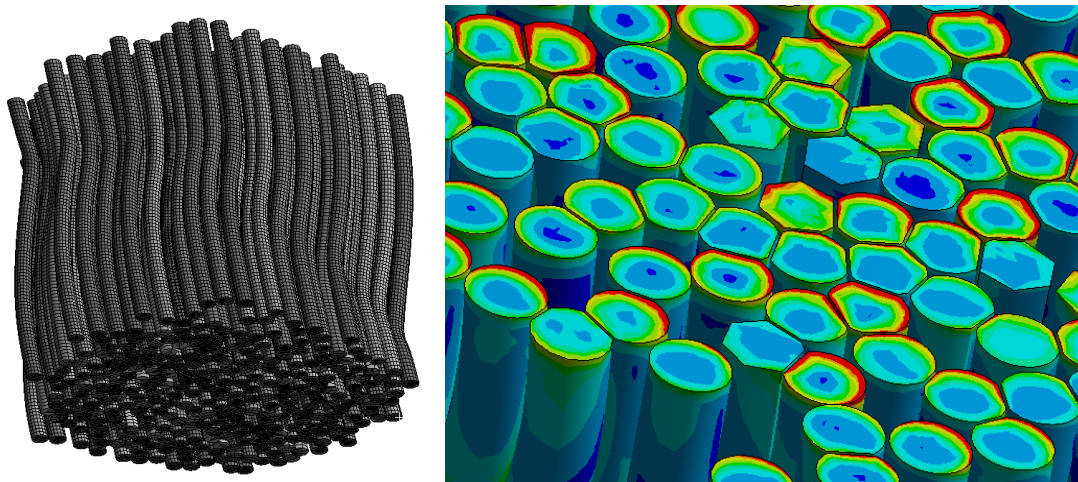
Další variantou jsou diskrétní modely vlákenných struktur, které umožňují rozvíjet a zpřesňovat kontinuální modely, resp. každé vlákno zpracovávají individuálně a sčítají efekt

mnoha vláken ve struktuře příze při popisu namáhání celé struktury. S nárůstem výpočetní síly a zdokonalením KP softwarů roste také velikost a složitost konečněprvkových modelů, které lze spustit. V posledních letech byly provedeny některé velmi realistické simulace přízí, jak bude uvedeno dále. Bylo zjištěno, že jedním z hlavních důvodů neuspokojivého výsledku většiny modelů je však velké množství zjednodušujících předpokladů v modelových simulacích. Nejběžnějším předpokladem je, že příze je považována za idealizovanou strukturu, kde cesta vlákna není náhodná. Jako příkladem lze uvést práci Wenyi Yan [26], kde byl vytvořen idealizovaný model struktury příze, která zahrnovala migraci a variace délky vláken. Podstatně složitější model vytvořil Ognjanovic [27], který je přiblížen na obr. 2.4, který navrhl geometrii vláken příze a následně ukázal, jak lze sestavit simulaci mechanického namáhání pro analýzu napětí a deformace při tahovém namáhání. Vycházel z distribuční funkce pro popis pravděpodobnosti $p(r)$, že vlákno obsadí malý objem ve vzdálenosti r od středu příze. Migrace vláken byla modelována tak, že bylo umožněno vláknu pohybovat se do neobsazeného prostoru mezi po sobě jdoucími průřezy. K určení toho, která neobsazená pozice se stane obsazenou, byl použit generátor náhodných čísel, a tento proces byl nastaven tak, aby produkoval migrační trasy podobné experimentálním výsledkům. Periodická migrace od středu příze na povrch a zpět byla modelována spolu s náhodnou migrací (obr. 2.4). Proto je na obr. 2.4 patrný i určitý zákrut, který charakterizuje elementární jednotku celé příze. Obě formy migrace byly nadřazeny nad zákrut příze. Přirozeným důsledkem tohoto modelu bylo, že konce vláken mohou končit poblíž povrchu příze a vytvářet tak chlupatost příze. Chlupatost v modelu byla určena počtem všech vláken. Studium a porovnání chlupatosti modelu a experimentálního měření je obtížné, protože model počítá počet odstávajících vláken na jednotkovou délku příze, zatímco v rámci laboratorních měření na zařízení Uster se měří celková délka a počet odstávajících vláken na jednotkovou délku příze. Přesto takto připravený model podle autorů byl schopen předpovídat tahovou pevnost příze Tencel s odchylkou do 5 % v porovnání s experimentálními výsledky. Nicméně model spoléhá převážně na experimentální výsledky pro ladění různých parametrů modelování a vytváření realistických struktur příze. Takto připravený model by bylo možné zlepšit zahrnutím více detailů procesu výroby příze. Pro ověření využitelnosti a náročnosti výpočtu velkého svazku vlákenné struktury byly v letech 2020–2023 vytvořeny řady diskrétních modelů autory Vosáhlo, Novák, Petřík [28], kde se v rámci projektu vytvořily studie mechanického chování vlákenné struktury, jež byly sestaveny z uvedeného principu tvorby diskrétního modelu podle [27]. Výsledný diskrétní

model je přiblížen na obr. 2.5. Z obrázku je patrné, že se vytvořil numerický model vláken, který reprezentoval zákrut vláken na krátkém úseku a také kontaktní tření mezi vlákny. Model byl tvořen 300 vlákny a posuzován na mechanické vlastnosti při tahovém namáhání.



Obr. 2.4 Diskrétní model příze – kontinuální svazek nití s mírným zákrutem [27]



Obr. 2.5 Diskrétní model příze – kontinuální svazek nití s určitým zvlhěním pro studii kontaktů mezi vlákny [28]

2.2.1 Speciální metody pro modelování vlákenných struktur

V současné době jsou vyvíjeny i jiné metody modelování vlákenných struktur než výše uvedené přístupy kontinuálního a diskrétního modelování. Postupně byly vyvinuty modely

ke zkoumání vlivu vlastností vláken na vlastnosti příze, prostřednictvím speciálních přístupů, využívajících moderních systémů jako je strojové učení, umělé neuronové sítě, umělé inteligence, případového usuzování, či využití fuzzy logiky a dalších.

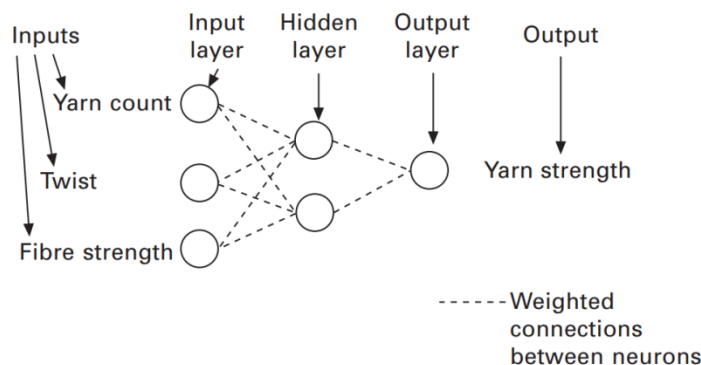
- **Umělé neuronové sítě**

Řada autorů vyvinula semiempirické vyjádření pro předpověď pevnosti vlněných přízí s nízkým zákrutem a prokázali, že pevnost závisí na délce a pevnosti vláken. Pevnost příze byla modelována tak, aby ukázala, že délka vlákna výrazně ovlivňuje pevnost příze. Analytické modely vycházejí z rozložení délky vlákna popsaného pomocí fibrogramu², který je vhodným nástrojem k výpočtu pevnosti příze. Tření mezi vlákny, které brání posuvu jednoho vlákna podél druhého vlákna, bude sečteno přes všechny délky vláken. Pokud jsou vlákna kratší než kritická délka, dojde k jejich prokluzu. Vlákna delší, než je kritická délka nebudou prokluzovat před tím, než dojde k jejich přetrhu, protože třecí síly jsou schopny vytvořit natolik pevný třecí spoj, který je pevnější, než je tahová pevnost vlákna. Další výzkumné skupiny ukázaly, že je vhodné semiempirické a analytické vztahy modelování přízí doplnit o využití umělé neuronové sítě pro distribuované paralelní zpracování dat k předpovídání vlastností příze na základě vlastností vláken. Umělá neuronová síť (UNS) je počítačový program, který se obdobně jako strojové učení (Machine learning) nebo umělá inteligence učí matematickým vztahům a lze je tedy implementovat i pro vyhledávání souvislostí mezi vlastnostmi vláken a přízí (obr. 2.6). UNS je matematická přenosová funkce, například sigmoidní funkce³, kde tok informací v UNS začíná třemi normalizovanými procesními proměnnými, které jsou představeny jako vstupy do tří vstupních neuronů, jak uvádí např. Gafurov [32]. Neurony transformují vstupní data pomocí sigmoidní přenosové funkce a předávají neuronům skryté vrstvy prostřednictvím vážených spojení. Předtím, než dosáhnou skrytých vrstev, jsou čísla násobena odpovídajícím váhovým faktorem každého spojení mezi vstupními a skrytými neuronovými vrstvami. Vstupy neuronů skryté vrstvy jsou sečteny a transformovány sigmoidní přenosovou funkcí skryté vrstvy, která je poté odeslána neuronu výstupní vrstvy. Vstupy neuronu výstupní vrstvy jsou váženy podle vah na spojení mezi skrytou vrstvou a výstupní

²Fibrogram [31] se skládá z řady vertikálních čar nebo bodů, kde každá čára nebo bod představuje vlákno nebo skupinu vláken, a jejich výška nebo poloha na horizontální ose reprezentuje délku vlákna.

³Sigmoidní aktivační funkce se využívá v různých úlohách, kde je třeba předpovědět možnost příslušnosti k jedné ze dvou tříd. Převádí vstupní hodnoty na pravděpodobnosti, které lze interpretovat jako pravděpodobnost příslušnosti k pozitivní třídě.

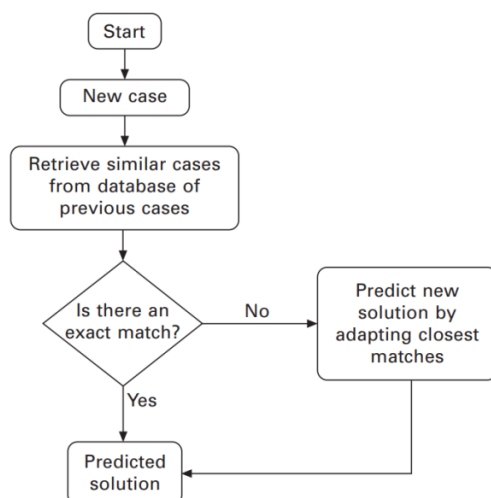
vrstvou. Výstup neuronové sítě je porovnán s experimentální hodnotou a váhy sítě jsou upraveny tak, aby minimalizovaly rozdíl během fáze učení. Tento postup se provádí pro všechna data ve výukové sadě jako iterativní proces pomocí rovnice k úpravě vah. Tímto způsobem lze získat nový přístup k modelování vstupních i výstupních parametrů pro modelování mechanických vlastností příze.



Obr. 2.6 Modelování příze založené na využití umělých neuronových sítí [27]

- **Případové usuzování**

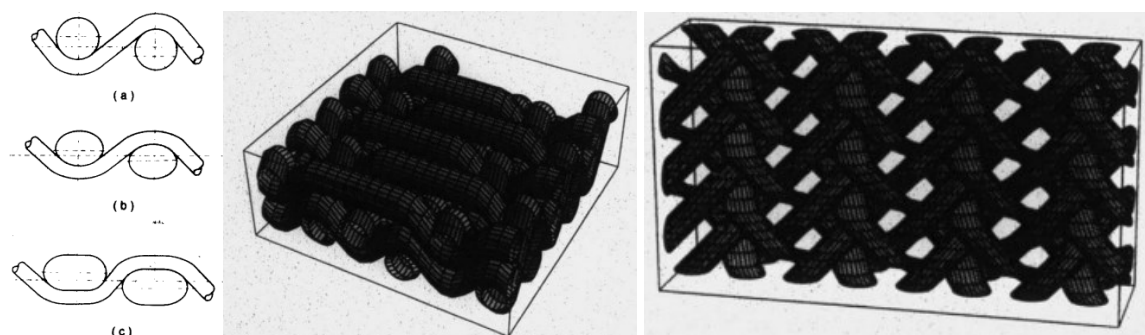
Anglicky Case-based reasoning (CBR), je pokročilá metoda odvozování, která modeluje lidské myšlení a úsudek. CBR spočívá v tom, že uživatel této metody přistupuje k problému tak, že se snaží najít jeho podobnost s problémy řešenými a úspěšně vyřešenými již v dřívějších testech, výzkumech, úlohách. Nehledá tak pro nový problém nové unikátní řešení, ale snaží se jej odvodit z modifikací řešení úspěšných v minulosti. Obvykle se tato technika skládá ze čtyř fází: reprezentace, indexace, vyhledávání a adaptace. Část reprezentace popisuje případ jako problém a jeho řešení a je uložena v databázovém indexu (část indexace). Vyhledání případu znamená, že jsou z databáze vyhledány nejpodobnější případy novému případu pomocí vyhledávacího dotazu. Jakmile je nalezen odpovídající případ, systém CBR předpoví řešení tím, že upraví uložené řešení pro nový případ, jak je schématicky přiblíženo na obr. 2.7. Cheng a Cheng v roce 2004 byli jedni z prvních [33], kteří využili systém CBR k porozumění vztahu mezi vlastnostmi vláken, a pevností bavlněných přízí. Ve své práci naměřili sedm vlastností vláken (pevnost, délka, prodloužení, obsah nečistot, rovnoměrnost délky, jemnost a odrazivost) a houževnatost příze pro 25 různých vzorků bavlny. Pro výběr nejdůležitější proměnné jako indexu v systému CBR byla použita metoda multi-regrese, přičemž systém správně identifikoval pevnost vláken jako nejdůležitější proměnnou ovlivňující pevnost příze.



Obr. 2.7 Modelování příze založené na případovém usuzování [27]

- **Modely fuzzy logiky**

Obdobně jako případové usuzování lze pro tvorbu modelů a stanovení vybraných vlastností vlákenných struktur využít fuzzy logiku (FECS).



Obr. 2.8 3D modely struktur s využitím fuzzy logiky [34]

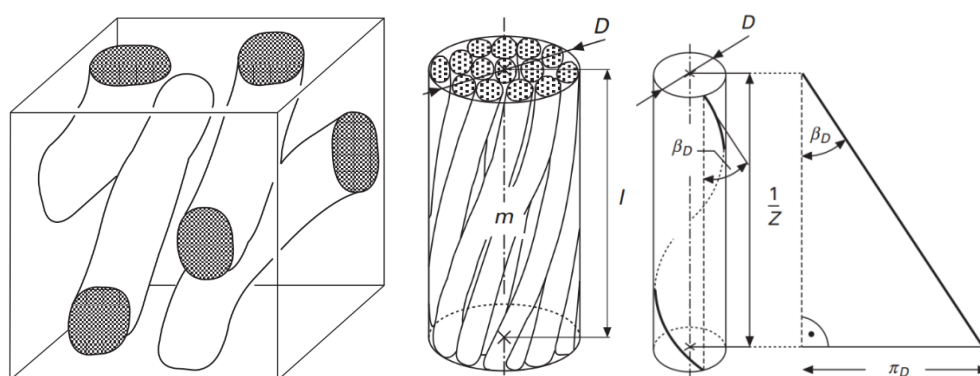
Jedná se o matematický přístup, který poskytuje modely termů a pravidel (např. poskytuje a stanovuje množiny proměnných, kde každý term vznikne konečným použitím vstupních pravidel okrajových a počátečních podmínek), které používají přirozeného jazyka a dovolují v něm uvažovat a argumentovat. Současně tato teorie pracuje s vágností sémantiky přirozeného jazyka. Proto spřadatelnost a pevnost příze mohou být předpovězeny pomocí pravidel vytvořených z dostupných dat. Pravidla pro modelování vlákenných struktur jsou následně typu "pokud-pak", která jsou automaticky generována pomocí učícího se klasifikačního systému založeného na fuzzy logice, jak je přiblíženo např. v [34]. Jak už bylo výše uvedeno, mechanické vlastnosti vlákenných útvarů a obecně textilií závisí na celé řadě parametrů, jako jsou geometrické vlastnosti příze, obloučkování, geometrický průřez, vzdálenost mezi vlákny,

jemnost, atd., což vše FECS bere v úvahu. Proto lze následně řešit např. **geometrické modelování průřezu příze**, kde modelovací technika může být použita na modelování jednotkové buňky. To následně povede k výpočtu objemového zaplnění vláken přízí. Příze budou modelovány jako pevné objemy, které ohraničují svazek vláken, přičemž průřez příze může být znázorněn jednoduchými geometrickými prvky jako elipsa nebo čokovitý průřez, který se obvykle předpokládá konstantní po celou délku příze [35]. Takovýto přístup je založen na konstrukci realistické jednotkové buňky z menší ideální podjednotkové buňky představující tři hlavní profily související s průřezem příze a zvlněným tvarem, jak bylo uvedeno na obr. 2.8. Modelování fyzikálních vlastností vyžaduje přesné geometrické modely, přičemž většina použitého geometrického modelování je založena na ideální jednotkové buňce, která dobře neodráží skutečnou geometrickou strukturu přízí a vláken, jak uvádí Lomov [36].

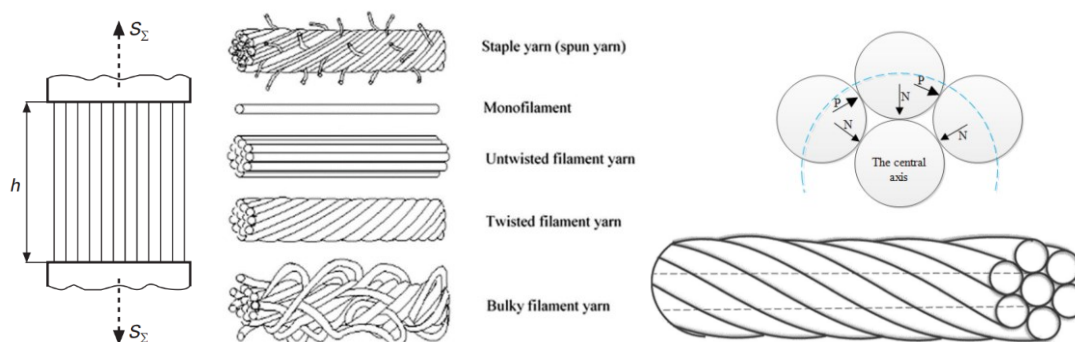
2.3 Přístupy k tvorbě modelů pro studium mechanických vlastností příze

Vybrané metody tvorby matematických modelů vlákenných struktur byly nastíněny v předešlé kapitole. Jestliže se však bude již konkrétně přistupovat k tvorbě modelu pro studium mechanických vlastností příze, musíme vždy uvažovat nějaké zjednodušení či omezení. V rámci tvorby modelu se vždy jedná o konkrétní zjednodušení dané tvarem strukturní jednotky, orientací a uspořádáním vláken, parametry příze, zákrutem, počtem filamentů, jak uvádí např. Neckář v [37, 38]. Neckář sestavil řadu vztahů a modelů, jako např. šroubovicový model využívající popis idealizované sestavy vláken ve struktuře příze (obr. 2.9). Během zákrutu příze se některá vlákna přemístí ze své centrální polohy k povrchu příze (migrační efekt). Strukturní a mechanické parametry závisí na uspořádání vláken. Mechanické parametry souvisejí s uspořádáním vláken v jádru příze. Stupeň chlupatosti je určen konfigurací vláken na vnější vrstvě příze. Nerovnoměrnost příze souvisí s rozložením vláken v celé přízi. Součet ploch všech vlákenných úseků v průřezu příze se nazývá substantivní průřez příze (obr. 2.9 uprostřed). Zákrutové koeficienty vytvářejí další skupinu charakteristik zákrutu. První typ se vztahuje k průřezové ploše příze S . Tento koeficient se nazývá „plošný“ a má pouze teoretickou hodnotu. Druhý typ souvisí s jemností příze. Tento koeficient se v praxi běžně používá. Obecné koeficienty používají danou hodnotu exponentu zákrutu q . Koechlinovy koeficienty používají zákrutový koeficient 0,5, jak je uvedeno v [38]. Uživatelské vlastnosti příze jsou výsledkem vlastností vláken, vzájemných interakcí vláken uvnitř příze a interakcí

mezi přízí a vnějšími vlivy. Vnitřní struktura příze je velmi důležitá zejména pro geometrické a mechanické vlastnosti příze. Na obr. 2.9 je zřejmé, že specifická ovlivnění vnitřní geometrie příze jsou poměrně komplikovaná v důsledku komplexní povahy deterministických a náhodných vlivů. Obecné trajektorie vláken mají komplikované průběhy, náhodný charakter a vykazují deterministické trendy [42]. Svazky paralelních a víceméně nezávislých vláken vytvářejí idealizovanou přízi (obr. 2.10). Toto uspořádání platí pro všechny druhy staplových a střížových přízí, vláken a svazků přízí. Matematické vztahy, na nichž je založeno mechanické chování takových svazků, pomáhají určit základní vlastnosti těchto typů přízí [40-41].



Obr. 2.9 Orientace vláken v přízi [37] (vlevo), Substantivní průřez příze [38] (uprostřed), Povrchové vlákno v přízi [39] (vpravo)

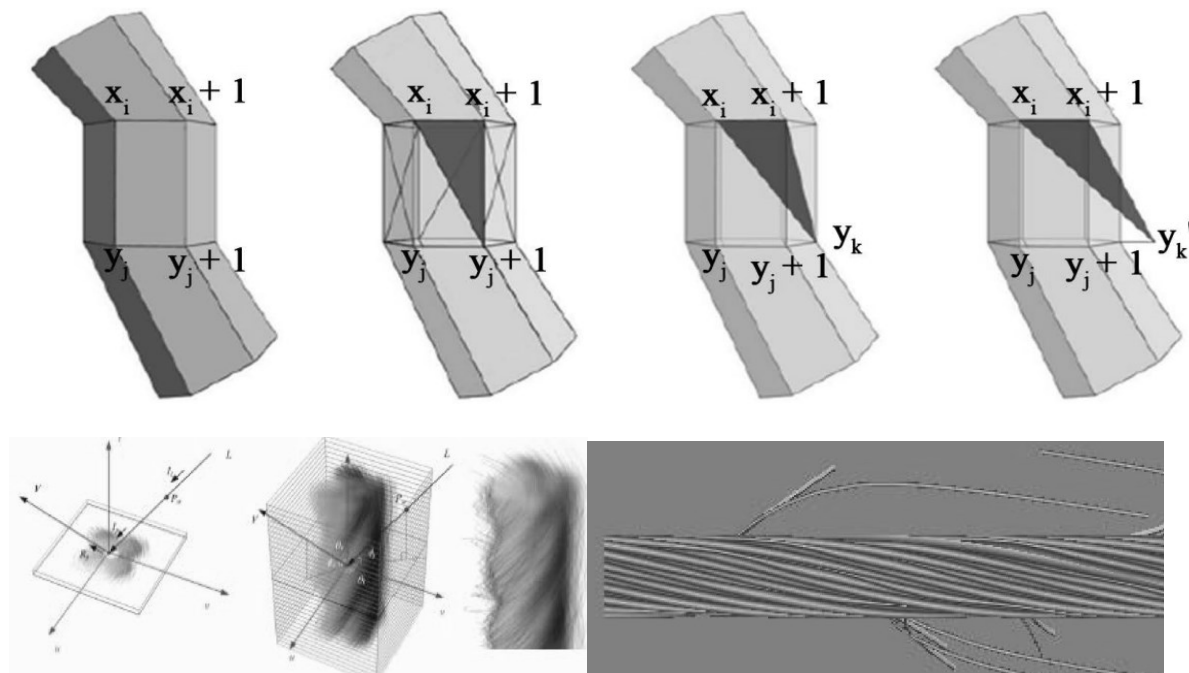


Obr. 2.10 Svazek paralelně uspořádaných vláken [40] (vlevo), Struktura různých typů vláken [41] (vpravo)

2.3.1 Přístupy a možnosti numerických simulací přízí

Simulace chování skané příze je velmi důležitá vzhledem k její roli při optimalizaci procesů výroby různých typů přízí. Virtuální modely přízí umožňují simulovat chování vláken a chování šicích přízí ve švech lépe, než kdyby byly použity jen odvozené vztahy. Struktura přízí je důležitým faktorem ovlivňujícím jejich chování, ale ve většině studií v oblasti simulace

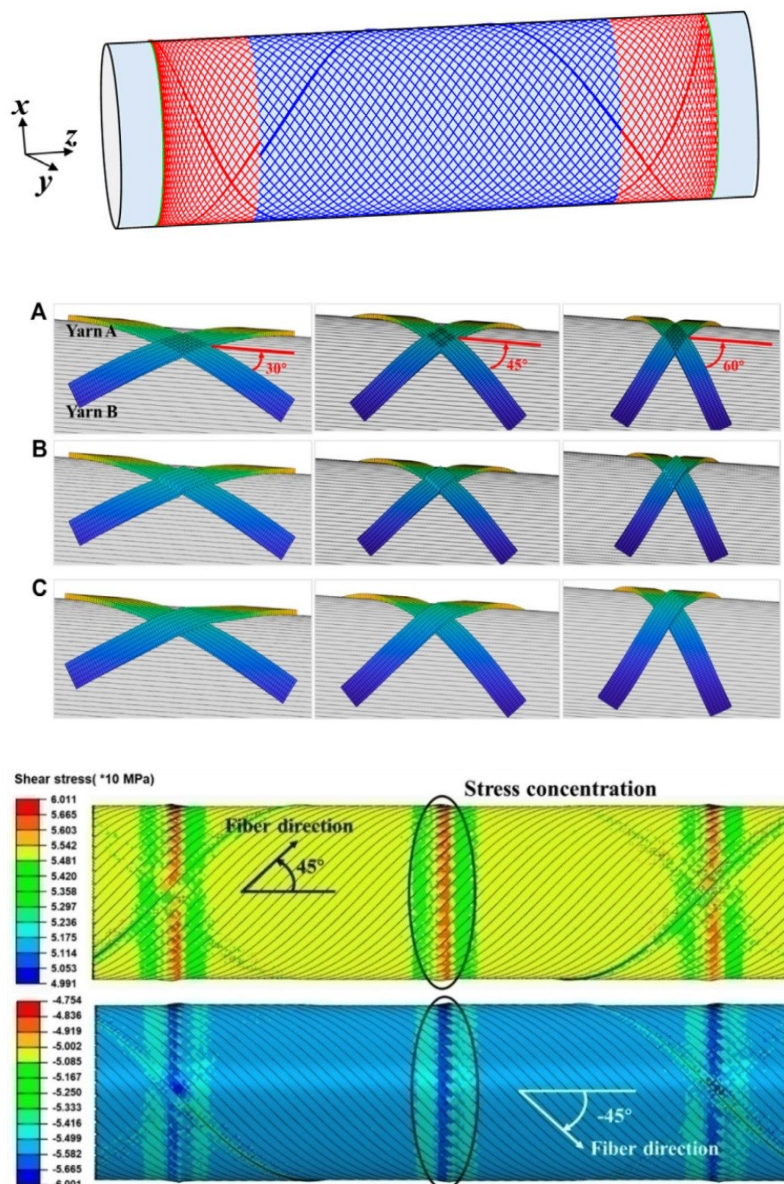
příze, je struktura přízi ignorována a simulace jsou tvořeny kontinuálně jako jednotlivá vlákna. Gong a další ve své práci [43] uvádí popis a možnosti simulace chování vícevláknových přízí na základě mnohovlákněné struktury a mezivlákněných sil ovlivněných tahem a zákrutem. Za tímto účelem do vytvořeného modelu začlenili vlastnosti, které ovlivňují strukturu příze, jako je počet vláken, počet zákrutů a také materiál a jemnost vláken. Aby bylo možné prozkoumat platnost a přesnost navrženého modelu, bylo simulované chování porovnáno s chováním skutečných přízí v šesti různých režimech. Výsledky ukazují, že jejich model je schopen simulovat chování přízí s průměrnou chybou 5,73 % oproti skutečnosti. Kargar a jeho kolegové [41] pro změnu zkoumali účinky struktury příze pomocí několika jednoduchých jednovlákněných modelů, ve kterých se neberou v úvahu mezivlákněné interakce. Porovnání modelů ukazuje, že navržený model může simulovat skládání a torzní chování multiflamentových svazků (obr. 2.10 vpravo) opatřených zákrutem s průměrnou chybou 5,73 % v různých situacích. Bylo také ukázáno, že model je schopen produkovat výsledky s o 4,2 % menší chybou, než konvenční simulační metoda, která nebere v úvahu strukturu příze, jak bylo prezentováno v [44]. Pro zlepšení efektivity numerického modelování příze může být využito Bezierovy křivky, spline křivky nebo B-spline křivky. Různé metody 3D modelování pro jednotlivou přízi jsou zkoumány z pohledu průřezu a středové linie. Jsou také znázorněna některá vylepšení pro lepší vizuální efekt, jako je vkládání zákrutu a chlupatosti. Na základě jednoduché příze lze také modelovat složenou přízi a některé efektní příze ve 3D prostoru, pokud jsou určeny průřezy řídicích úseků dílčí jednoduché příze. Zheng a další [85] ve své práci ukazují aplikaci různých 3D přízí, kde jsou vysvětleny a porovnány výhody a nevýhody různých metod. V porovnání s nimi je technika modelování založená na spline křivce pohodlnější a flexibilnější, protože je schopna navrhovat různé druhy výše uvedených přízí a získává maximální podporu od různých vývojových platforem, jako je OpenGL, 3DS-MAX, Creo Parametric, SolidWorks CAD atd. U 3D modelu příze lze považovat povrch za uzavřený, a proto při konstrukci 3D modelu pro konfiguraci příze je třeba zvážit dva problémy: 1 znázornění středové linie; 2 popis průřezu. V poslední době vedlo využití numerických metod také k modelování každého vlákna příze prostřednictvím sekvence rovnoměrně rozdělených částí vlákna/diskrétních prvků, jak bylo uvedeno na obr. 2.11. Jednotlivé části provádějí inerciální vlastnosti příze a numerickou úpravu kontaktní mechaniky, která zahrnuje příčné vlastnosti vláken.



Obr. 2.11 Numerické modelování s využitím rovnoměrně rozdělených částí vlákna [85]

Numerická simulace na obr. 2.11 je také příkladem, kde jsou diskrétní prvky považovány za tuhé, proto se předpokládá konstantní pole posuvů podél osy vláken. Za účelem znázornění spojitých vláken se používají deformovatelné příhradové nosníky, které spojují diskrétní prvky podél osy vláken. Toto řešení poskytuje kontinuální lineární pole posuvu podél podélného směru vláken. Podle modelu může být každý diskrétní prvek zatížen dvěma různými silami: vazebnými silami a kontaktními silami. V simulaci jsou použity dva typy diskrétních prvků. K diskretizaci vláken se používají sférické diskrétní prvky [26]. Pro modelování 3D geometrické konfigurace příze bylo využito několika přístupů. Příze jsou tvarovány podle Peirceovy teorie, zatímco technologie 3D konstrukce je založena na počítačové grafice. Všechny metody souvisejí s navrhováním průřezů podél osy příze. Metoda založená na spline křivce je nejrozšířenější, protože poskytuje největší flexibilitu při navrhování nejen nestejně rozdělené jednoduché příze s různými průřezy a efektem zákrutu, ale také skládané příze, efektní příze včetně slubové příze (ondé), nopkové příze. Příze se může volně ohýbat nebo deformovat ve 3D prostoru, takže ji lze snadno použít ve struktuře. Takový přístup k numerickému modelování lze aplikovat i na strukturu pleteniny či splétání, pokud je dána středová linie příze, jak je uvedeno v [86]. Mezi různými strategiemi používanými pro modelování příze se rozšířily také tzv. mezoskopické modely založené na metodě fázového

pole. Tyto modely předpokládají příze jako spojité těleso, zatímco geometrie je explicitně popsána. V dnešní době se všeobecně předpokládá, že **materiálové modely příze jsou lineárně elastické a ortotropní**. Tento přístup modelování se většinou zaměřuje na podélné chování příze, avšak analýzy v měřítku vláken a experimentální výsledky ukazují důležitost trojrozměrného stavu napětí na balistické hranici, tedy při vysokých rychlostech deformace. Za účelem získání trojrozměrného popisu stavu napětí příze během nárazu byly vytvořeny nelineární modely struktury příze např. v [45–48]. Lze konstatovat, že v prvním kroku byly provedeny předběžné analýzy na úrovni vláken, aby se získalo efektivní chování těchto struktur při dopadu projektilu. V druhém kroku byl implementován hyperelastický model na základě provedených mikroskopických testů. Nakonec byl vytvořen kontinuální model příze. Výsledky ukazují relevanci hyperelastického modelu ve srovnání s pozorováním na úrovni vláken a zvyšují limit klasického lineárně elastického materiálového modelu. Všechny hlavní kinematické aspekty dopadu pozorované v mikroskopické analýze, včetně šíření deformační vlny, byly zachyceny mezoskopickým modelem. Fáze soudržnosti, až do okamžiku selhání, je dána konstitutivním vztahem, zatímco fáze samotného selhání a následných dějů, klade důraz na kritéria selhání. Dalším příkladem vhodného využití numerického modelování je proces ovíjení vláken a pramenů, tato výkonná technologie je díky své vysoké automatizaci vhodná pro tvorbu ochranného obalu např. palivových tyčí. Byly vytvořeny studie trajektorie příze na povrchu vřetena, které jsou důležité pro návrh a výrobu pláště trubky s požadovanými mechanickými vlastnostmi, což snižuje výrobní čas a náklady [49–58]. Pro simulaci efektu překrytí v souladu s reálným procesem navíjení je navržena 3D metoda optimalizace dráhy příze založená na principu minimální potenciální energie. Pro mechanickou analýzu ovíjené trubky byla použita síť konečných prvků (KP) založená na 3D dráze příze. Na základě KP modelu v odpovídajícím měřítku bylo následně podrobně studováno mechanické chování ovíjené trubky SiCf/SiC, jak je uvedeno v [54]. Výsledky ukazují, že kvůli zanedbání efektu překrytí, běžný laminový model nadhodnocuje pevnost trubky (obr. 2.12), zatímco v mezoměřítku umožní navržený KP model přesně předpovědět selhání.



Obr. 2.12 Numerické modelování mechanického chování ovíjené trubky: 3D trajektorie modelovaná na základě výpočetní geometrie (nahore), ovin příze pod různými úhly (uprostřed), koncentrace napětí v průběhu navíjení příze (dole) [54]

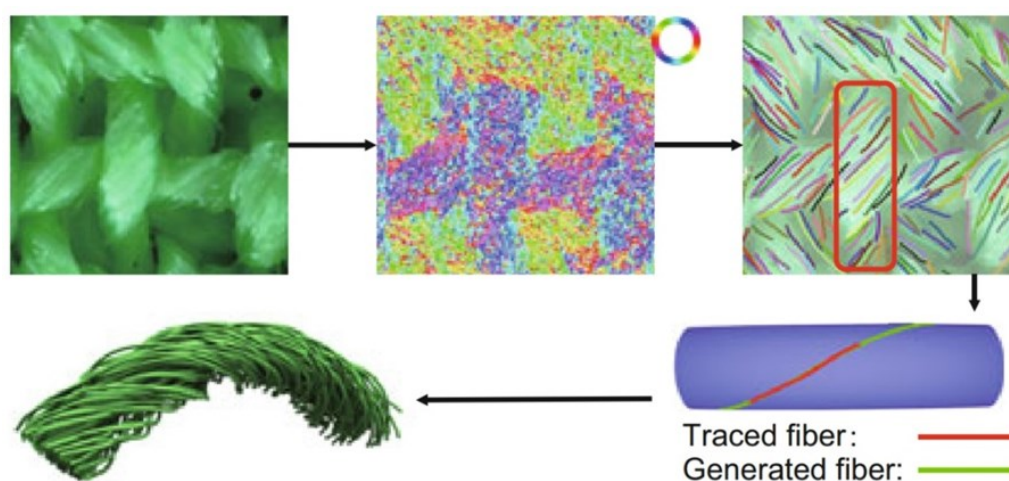
Výsledky uvedené na obr. 2.12 také znázorňují, že vytvoření 3D dráhy příze a odvozený KP model charakterizující strukturu ovinu, což je důležité pro predikci vlastností pláště trubky. 3D dráha navíjení poskytuje geometrický model příze, který může být síťován za účelem generování konečněprvkového modelu v patřičném měřítku. Na základě tohoto modelu bylo možné následně provést pevnostní analýzu. Z uvedených literatur a dalších zdrojů lze konstatovat, že lze prostřednictvím numerických simulací optimalizovat koncentraci napětí způsobenou efektem překrytí. Modely deformace z pohledu struktury a chování vláken

v počáteční fázi zatížení, která jsou orientována ve směru působení zátěže, byly v minulosti popsány v dalších publikacích [59–62]. Například bylo studováno umístění vláken podél spirálových linií, což vedlo ke zmenšení průřezu příze v důsledku přiblížení vláken. Také byly zkoumány změny jejich deformace v čase či studium vzorků deformace příze s využitím různých reologických modelů s přihlédnutím ke změně její struktury během procesu zatěžování. Využití reologických modelů pro numerické simulace může být provedeno pomocí Kelvinova či Maxwellova modelu s časově proměnnými parametry, které zohledňují okamžitý a časově závislý modul pružnosti materiálu. **Celkově lze na základě popsaných zdrojů konstatovat, že popis mechanického chování přízí během protažení ukazuje prostor pro další vývoj a zlepšení postupů modelování přízí.** Autoři v [63, 64] se zabývali ději, které nastanou v počáteční fázi zatížení, kdy se vlákna orientovaná ve směru zatížení začnou současně natahovat za přítomnosti třecí síly a vlákna umístěná pod úhlem ke směru této síly se částečně natahují, kloužou a pohybují se spolu s paralelně orientovanými vlákny. Vlivem zákrutu se vlákna začnou uspořádat podél šroubovicových linií a průřez přízí se zmenší. Po odstranění axiální síly přetrvávají ve vláknech nevratné deformace a u některých vláken také zbytková napětí. To vede k nerovnoměrnému napětí v průřezu, což je jedním z důvodů pevnostních nerovnoměrností přízí. Bylo tím také prokázáno, že opakované zatěžování vede k finální reorganizaci struktury příze a změně nejen pevnostních charakteristik příze. Dále počet cyklů a doba zatěžování závisí na vlastnostech použitých materiálů a surovin, použité metodě konstrukce příze, stavu návinnu a dalších faktorech. Při dostatečně dlouhém působení zatížení dosáhne příze maximální odolnosti struktury a vláken vůči napětí. Ukazuje se, že studium procesů probíhajících v přízích, až do ztráty odolnosti proti vnitřnímu napětí, jakož i stanovení doby vedoucí ke ztrátě celistvosti nitě, v souvislosti s velikostí působícího zatížení je velmi důležité [65].

2.3.2 Podpůrné metody a nástroje pro sestavení odpovídajícího 3D modelu pro tvorbu pokročilých numerických simulací příze

Jak bylo uvedeno v kap. 2.3.1 při sestavování simulací chování vlákenných struktur zejména přízí je nutné brát v úvahu i další možnosti tvorby 3D modelů a je proto důležité využívat všech současných metod a nástrojů. Jedním z takových přístupů je modelování geometrie příze z mikroobrazu. Při rovnoměrném okolním osvětlení se může bod na povrchu

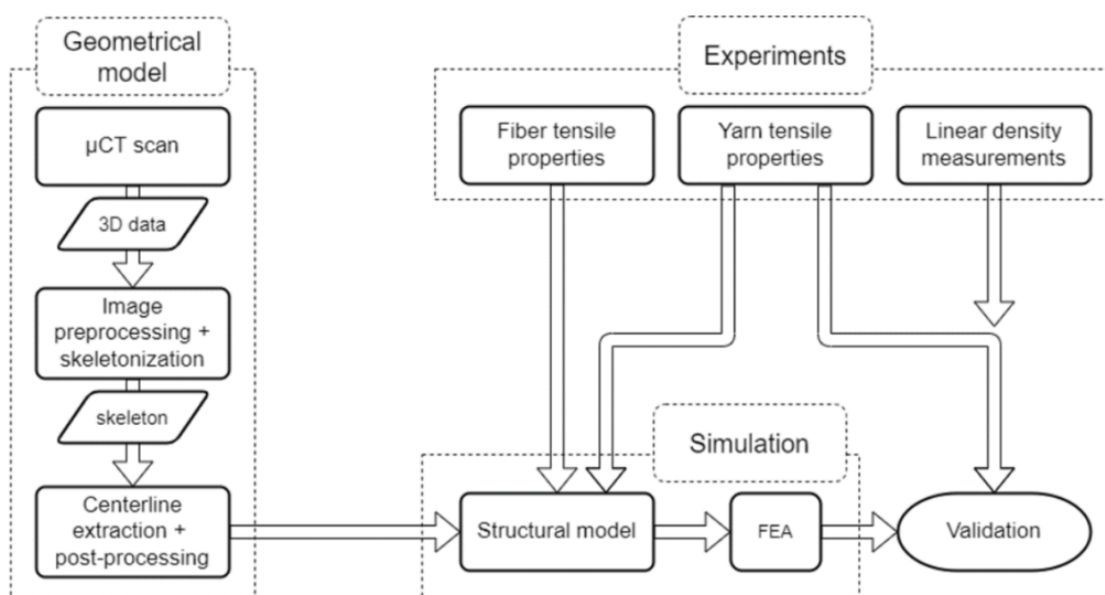
jevit tmavší, pokud leží hlouběji. Tento jednoduchý jev je známý jako „dark is deep“ a na jeho základě je navržen odhad tvaru přize podle hodnot intenzity jednotlivých obrazových bodů za předpokladu ortogonální projekce pro zachycení mikroobrazu. Zejména se předpokládá, že vztah mezi hloubkou povrchu a odpovídající obrazových bodů lze modelovat lineární funkcí. Měřítko převádějící hodnoty intenzity pixelů na hodnoty hloubky je určeno tloušťkou tkaniny, kterou může uživatel buď odhadnout, nebo přiřadit. Kromě toho, pokud zachycený obrázek obsahuje přize s různými barvami, měly by být předem odděleny a přeskupeny podle jejich barev. To lze provést pomocí techniky matování obrazu dle požadavků uživatele. Je třeba poznamenat, že v takových případech by měl být faktor měřítka vypočten samostatně pro různé oblasti přize (obr. 2.13). Kvůli složité struktuře vláken je odhad hloubky zatížen šumem obrazu. Vysokofrekvenční složka je odstraněna pomocí filtru detekujícím hrany metodou nejmenších čtverců se zachováním informace o globálním stínování vytvářeném osvětlením [66–68].



Obr. 2.13 Modelování geometrie přize z mikrosnímků [68]

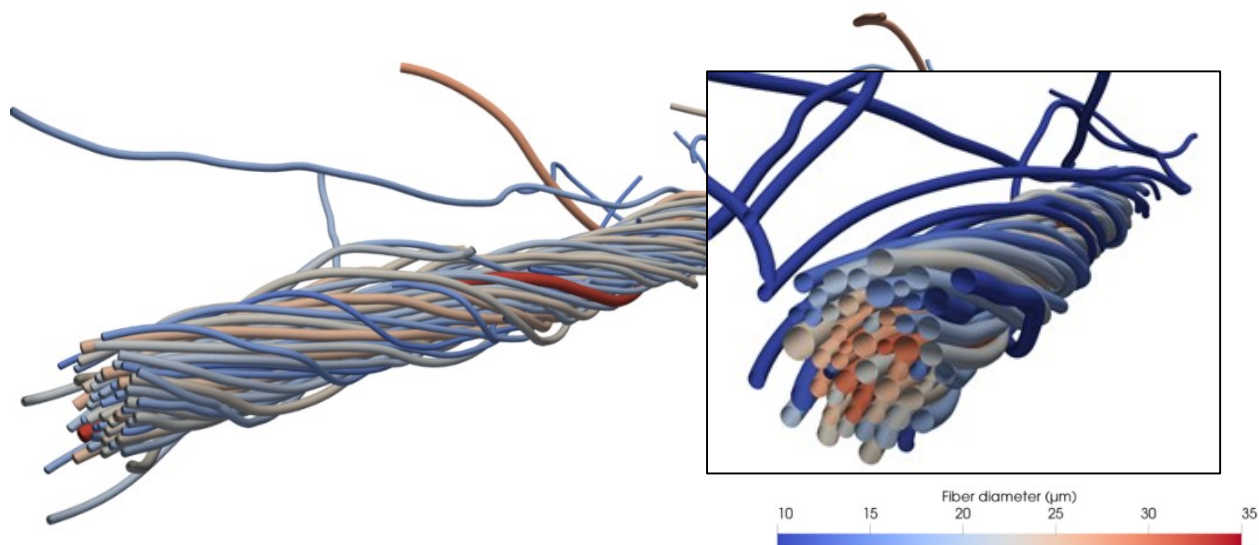
Dalším přístupem tvorby 3D modelu je využití výpočetní tomografie (CT). Jednotlivé skeny přize pomocí CT umožňují vytvářet věrný geometrický model v mikroměřítku, který charakterizuje složitost geometrie přize pomocí jejích vláken. Tento geometrický model se používá jako vstup pro mikrostrukturální simulace a je použit pro různé simulace v mikroměřítku, kde je cílem extrahovat koeficienty a těmi charakterizovat přizi, jak je schématicky uvedeno na obr. 2.14. Tyto koeficienty jsou pak použity jako vstup pro zjednodušené modely v makroměřítku, kde je přize reprezentována svou středovou linií obsahující vlastnosti v mikroměřítku. V takovémto případě tvoříme makroúrovňové pevnostní

modely, které umožňují popisovat např. zanášení útku do průslupu vzduchového tryskového stavu. Také simulované chování příze při osovém zatížení v mikroměřítku pak slouží jako vstup pro makromodel příze, což může být využito pro zkoumání chování příze v ohybu a tření příze o jiné materiály na mikroúrovni. Geometrie v mikroměřítku slouží jako vstup pro simulace toku v mikroměřítku pro zkoumání lokálních silových koeficientů příze.



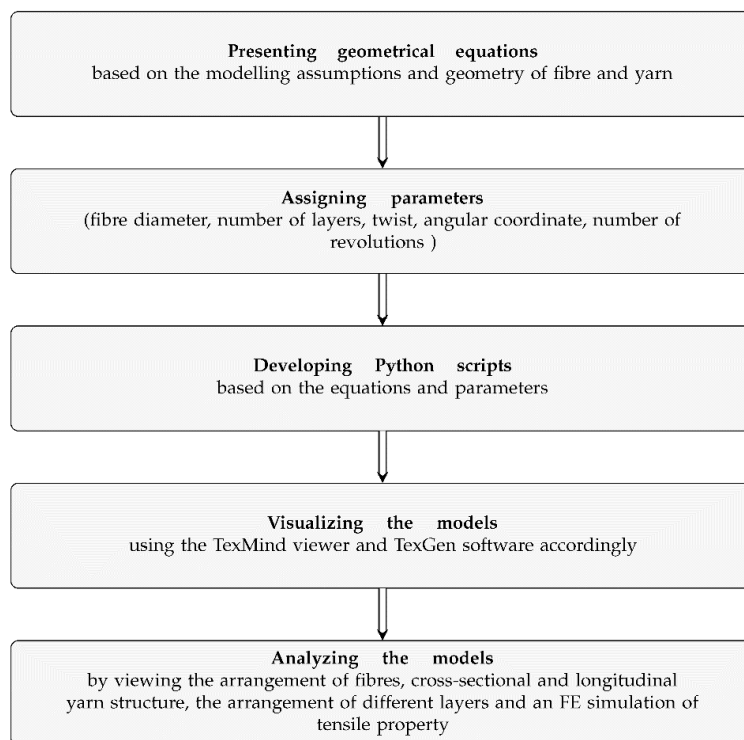
Obr. 2.14 Numerické modelování mechanických vlastností pomocí mikro CT skenování [70]

Dalším nástrojem může být algoritmické geometrické modelování textilních přízí na úrovni vláken, kde lze v řadě literatur a prací dohledat, že jsou příze považovány za jeden lineární prvek, přičemž ve skutečnosti se většina přízí skládá z řady staplových nebo filamentových vláken. Pro algoritmizaci geometrie lze vytvořit skripty v různých programovacích jazycích např. v Pythonu a následně je vizualizovat pomocí prohlížeče TexMind a modelovacího softwaru TexGen, jak je uvedeno na obr. 2.15. Navíc tímto lze modelovat přízi z krátkých staplových vláken. Software TexGen je vhodný pro vykreslení podélné struktury jednotlivých vláken v přízi. Kromě toho lze studovat spirálovitou strukturální změnu vláken na různých vrstvách a úrovních příze. Takovýto přístup umožňuje odpovídající tvorbu 3D geometrie modelu pro následnou numerickou simulaci pro studii mechanických vlastností včetně studie detekce kontaktních ploch mezi vlákny.



Obr. 2.15 Simulace geometrie příze [82]

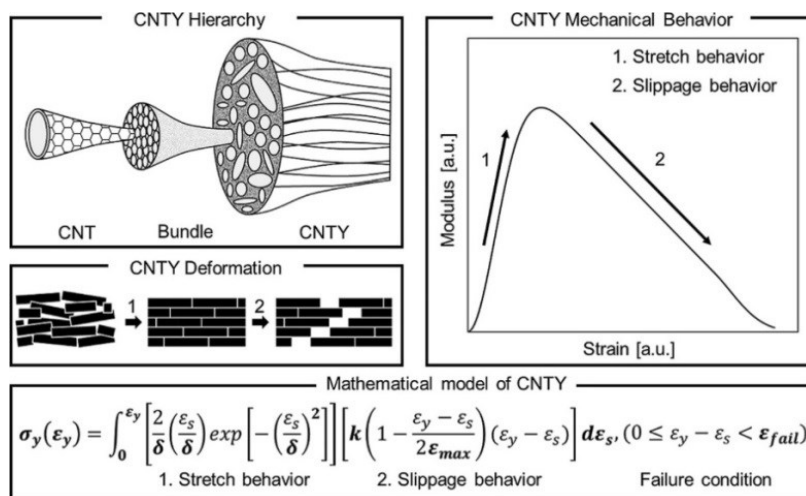
Dalším přístupem jsou procedurální modely skané příze, kde se provede rozdělení vláken v průřezu, které zachycuje pravděpodobnost existence vlákna vzhledem k jeho vzdálenosti od středu příze. Ačkoli je v tomto případě proces generování vláken vzhledem k parametrům modelu přímočarý, inverzní operace přizpůsobení parametrů není triviální, což je schématicky přiblíženo na obr. 2.16. Mnoho parametrů na úrovni vláken, jako je rozdělení vláken v průřezu a migrace vláken, je založeno na statistických vlastnostech mikrogeometrie příze. Tyto vlastnosti je obtížné získat kvůli jejich malému měřítku a je obtížné je přizpůsobit kvůli jejich přirozeně existujícím nepravidlostem, jak bylo uvedeno v některých literaturách jako např. [71 – 73].



Obr. 2.16 Algoritmus pro modelování příze [71]



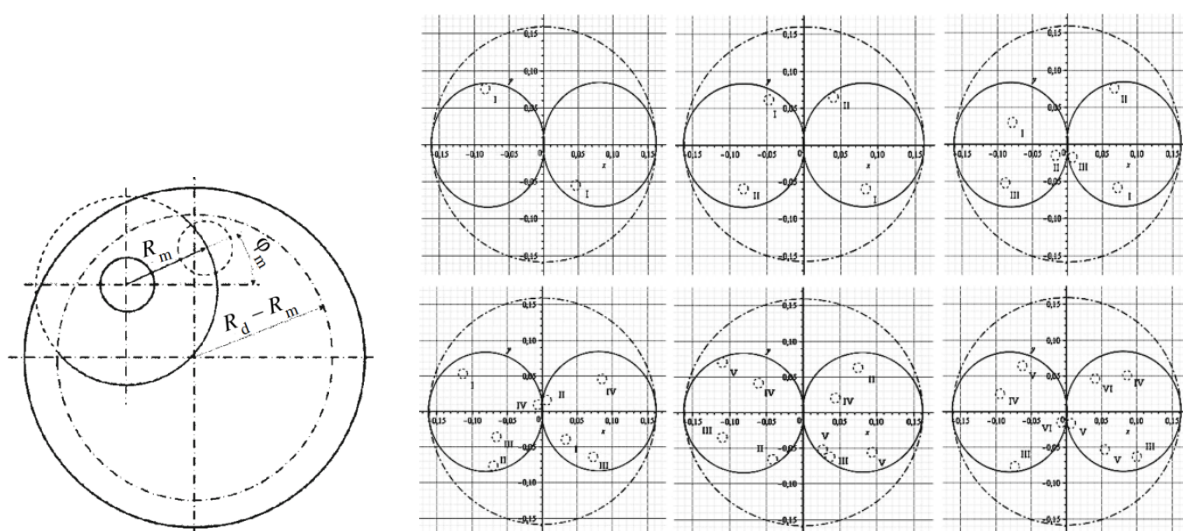
Obr. 2.17 Příklady modelů pro spletané vzorky příze [71]



Obr. 2.18 Matematický model příze z uhlíkových nanotrubic [73]

Dalším důležitým parametrem při tvorbě 3D modelu příze je odpovídající zákrut. Vkládání zákrutu je důležitý proces pro vytvoření souvislé příze z konečných vláken dané struktury a vlastností. Při tvorbě zákrutu je důležité se zabývat některými jevy současně, tj. generováním zákrutu a šířením zákrutu. Lze využít rovnice popisující tvorbu zákrutu jako je např. Newton–Raphsonova metoda. Yin a další [72] představili model s využitím zákrutu a výsledky simulace ověřovali experimenty, přičemž byla prokázána dobrá shoda pro systém s pohyblivým tuhým válcem jako krouceným prvkem. Bylo zjištěno, že úhel ovinutí a napětí příze mají značný vliv na proces zakrucování a torzní tuhost příze se mění s parametry zákrutu. Podobné výsledky představil Junbeom [73], který studoval mechanické chování příze z uhlíkových nanotrubiček (CNTY), kde pro porozumění účinků strukturálních nedokonalostí na vlastnosti CNTY na základě hierarchických struktur CNTY sestavil matematický model a dále experimentální a teoretické přístupy pro popis dynamického mechanického chování příze obsahující uhlíkové nanotrubičky. Cílem bylo dále identifikovat způsoby, jak zlepšit jejich vlastnosti řízením strukturálních nedokonalostí. Pórovitost uvnitř CNTY snižuje jejich pevnost snížením počtu dotýkajících se svazků. Matematické modely byly vyvinuty na základě teorie, která popisuje mechanické chování sypkých materiálů, které byly upraveny tak, aby odpovídaly křivkám napětí a deformace CNTY pro stanovení pevnostních charakteristik (viz obr. 2.18). Lze však konstatovat, že tyto modely nemohou vysvětlit podrobnosti mechanického chování CNTY, jako jsou dvě odlišné elastické oblasti, které se mění při 0,3% napětí. Toto chování je pravděpodobně vyvoláno hierarchickými chováními CNTY. Proto další zlepšení mechanických vlastností CNTY vyžaduje jednoduchý, ale přesný model, který bere v úvahu interakce prvků tvořících hierarchické struktury, ale přesto popisuje mechanické chování CNTY během deformace. Zajímavým přístupem je také studium predikce pevnosti příze s ohledem na rozdělení pravděpodobnosti pevnosti vlákna, jak uvádí např. Wang [74], který představil experiment a simulaci pro charakterizaci ohybového chování příze na základě, ohybového zatížení, ohybové tuhosti a skutečné kontaktní plochy. Podle autorů [74] byla sestavena vylepšená metodologie modelování s rozdělením pravděpodobnosti, inspirovaná metodou digitálních prvků a tím se docílilo vytvoření modelu geometrie přízi a simulovaného ohybového chování přízi. Modely odhalily, že zákrutová míra a počet vrstev ovlivňují vlastnosti ohybu příze, a proto se využití pravděpodobnosti pro numerické simulace jeví jako účinná metoda. Takový druh simulací mechanické odezvy přízi je využitelný i pro konstrukční návrhy výztuže pro vývoj kompozitních materiálů vyztužených vlákny. V neposlední řadě lze uvést příklad

simulace struktury příze zalité elektricky vodivými vlákny, což je speciální případ, který vyžaduje podpůrné metody a nástroje pro sestavení odpovídajícího 3D modelu. Elektricky vodivá vlákna se používají k řešení jednoho ze dvou problémů, buď k vytvoření antistatického efektu, nebo k odstínění elektromagnetického záření (obr. 2.19). Vláknem Bekinox, vyráběné firmou Bekaert (Belgie), je nejznámějším a nejběžnějším typem vlákna používaného k výrobě antistatických tkanin a jedná se o vlákno, které je ve formě segmentů vláken z nerezové oceli a obecně se vyrábí v čisté formě (Bekaert Bekinox VS) nebo ve směsi s polyamidem v pásce (Bekaert Bekinox LT). Ryklin a David [75] uvádí, že cílem vývoje simulačního modelu struktury skané příze, ve které je zapuštěno vodivé vlákno, bylo určit účinné složení příze, které zajistí stabilitu jejích elektrických vlastností. V daném případě se procesem zajištění stability vlastností rozumí výroba takové struktury vlákna, ve které existuje nepřetržitý sled kontaktů vodivých vláken od prvního do posledního kontaktu v daném úseku podél segmentu dané délky.



Obr. 2.19 Model migrace vodivých vláken v přízi: Schematický diagram migrace vláken v úseku příze (vlevo), Výsledky simulace úseků pramenů skané příze, ve kterých jsou zapuštěna vodivá vlákna (vpravo) [75]

2.4 Budoucí trendy v matematickém modelování přízi

Matematické modelování za účelem popisu příze začalo před více než 100 lety a navrhlo jednoduchý vzorec pro předpovídání pevnosti příze. Složitější analytické modely se začaly objevovat ve 40. letech 20. století a s postupně se vyvíjejícími technikami modelování, byly

také rozvíjeny modely přízí. Například modelovací software pracující na základě metody konečných prvků (MKP) se stal komerčně dostupným v 70. letech 20. století a využití této techniky pro modelování přízí se stále více rozšiřuje. Během několika posledních desetiletí se počítače a numerické softwary staly výkonnějšími, což vedlo ke zvýšení velikosti a složitosti simulací. Jednotlivá vlákna lze nyní modelovat v přízi s třením a kontaktem mezi vlákny, vlastnostmi viskoelastického materiálu, nelineárními efekty materiálu a velkými deformacemi, aby byly simulace ještě realističtější, jak bylo diskutováno v předešlých kapitolách. Modely lze aplikovat na širší škálu typů přízí, protože se používá méně zjednodušené modelování. Využívají se nové, lepší způsoby vytváření nedeformované struktury příze pro numerické simulace, protože mají značný vliv na předpovědi chování příze. Tyto modely se budou i nadále vyvíjet do složitějších modelů, protože počítačový software a hardware zvyšují výkon. K některým simulacím příze lze použít také bezplatné softwary s otevřeným zdrojovým kódem. Software může být provozován na výkonných, levných, výpočetních platformách, jako jsou klustery Linuxu. Výpočetní čas na klusteru lze zakoupit na různých webových stránkách, takže není nutné kupovat hardware a udržovat systém. Jak bezplatný software, tak minimální náklady na počítačový hardware znamenají, že tento typ modelování je mnohem snadněji dostupný, než tomu bylo dříve, což může urychlit pokrok v této oblasti výzkumu. Některé nedávné pokroky v hardwaru a softwaru počítačových her, jako je čip PhysX, začínají mít dopad na modelování textilií. Akcelerační čip PhysX se již používá k modelování tkanin v procesech vrstvení kompozitů. Při modelování příze se začínají uplatňovat výpočetní techniky, jako jsou neuronové sítě, fuzzy logika a systémy založené na znalostech, a lze tedy očekávat mnohem více výsledků v těchto oblastech (viz kap. 2.2). Techniky soft computingu jsou v průmyslu stále ve velmi rané fázi vývoje a je třeba vykonat značnou práci, aby se v odvětví vybudovala důvěra v tyto techniky. Dokonce i v této fázi, než se některé techniky prosadily, jsou používány ve spojení s jinými technikami, jako je klasifikační systém založený na kombinaci genetických algoritmů, fuzzy logiky a technik učení se klasifikátorů. V neposlední řadě budou více využívány nástroje strojového učení, umělé inteligence, ale i rozšířené a smíšené reality.

2.5 Závěr a shrnutí kapitoly

Kapitola 2 se věnovala studiu současného stavu ohledně problematiky různých přístupů a metod matematického modelování vlákenných struktur se zaměřením na vlákenné příze. V kap. 2.1 byl přiblížen úvod do problematiky modelování, byly představeny vybrané metody a postupy k tvorbě modelů (kap. 2.2), kde se diskutovaly přístupy různých autorů a byla přiblížena komplexita různých postupů modelování vlákenných struktur, trendy modelování vláken, dalších lineárních vlákenných soustav a zejména přízí. Také byly diskutovány podpůrné metody jako je využití mikroskopie či CT pro tvorbu 3D geometrie vlákna i celé příze (2.3.2). Na závěr byly krátce představeny trendy (kap. 2.4) v modelování přízí s využíváním nejnovějších možností v rámci rozvoje virtuální reality, klasifikačních systémů založených na využití genetických algoritmů, fuzzy logiky a techniky učení se klasifikátorů.

3. Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je **tvorba pokročilého numerického modelu vlákněné příze pro studium mechanických vlastností**, kde model bude respektovat složité geometrické uspořádání vláken příze, dále nelineární vlastnosti příze, které jsou ovlivněné zákrutem vláken, kontakty mezi vlákny a přeuspořádáním struktury během namáhání. Z takto vytvořeného pokročilého modelu bude možno stanovovat přetvoření vláken a hodnoty napětí a deformace v závislosti na protažení a stlačení, hodnoty zaplnění vlákněné příze a výsledky budou moci přispět nejen k poznání řešené problematiky samotných vlákněných přízí, ale také pro získání parametrů využitelným pro optimalizace textilních strojů pro výrobu vlákněných přízí.

Řešení popsané v práci je ucelené a multidisciplinární, související se studovaným zaměřením, jenž zahrnuje následující dílčí kroky vedoucí k cíli disertační práce.

Hlavního cíle bude dosaženo provedením následujících bodů:

- Experimentální měření pro stanovení mechanických vlastností vlákněné příze.
 - Měření mechanických vlastností reálných vzorků příze (stanovení maximální tahové síly, deformace, napětí a přetvoření) a snímání změny průměru příze během procesu zatěžování.
 - Makroskopické analýzy a rozborů vlákněné struktury vzorku příze pro studii určení změny průměru příze během zatěžování.
 - Tvorba a analýza snímků geometrie vláken s využitím nejmodernějších metod (využití výpočetní tomografie za účelem rekonstrukce vlákněné struktury příze).
- Tvorba pokročilé 3D geometrie modelu vlákněné příze.
 - Postup tvorby pokročilé geometrie modelu příze respektující odpovídající geometrii, tj. jednotlivé trajektorie vláken.
- Tvorba numerické simulace 3D modelu vlákněné příze pro stanovení mechanických vlastností.
 - Postup importování dat do vybraného numerického programu.

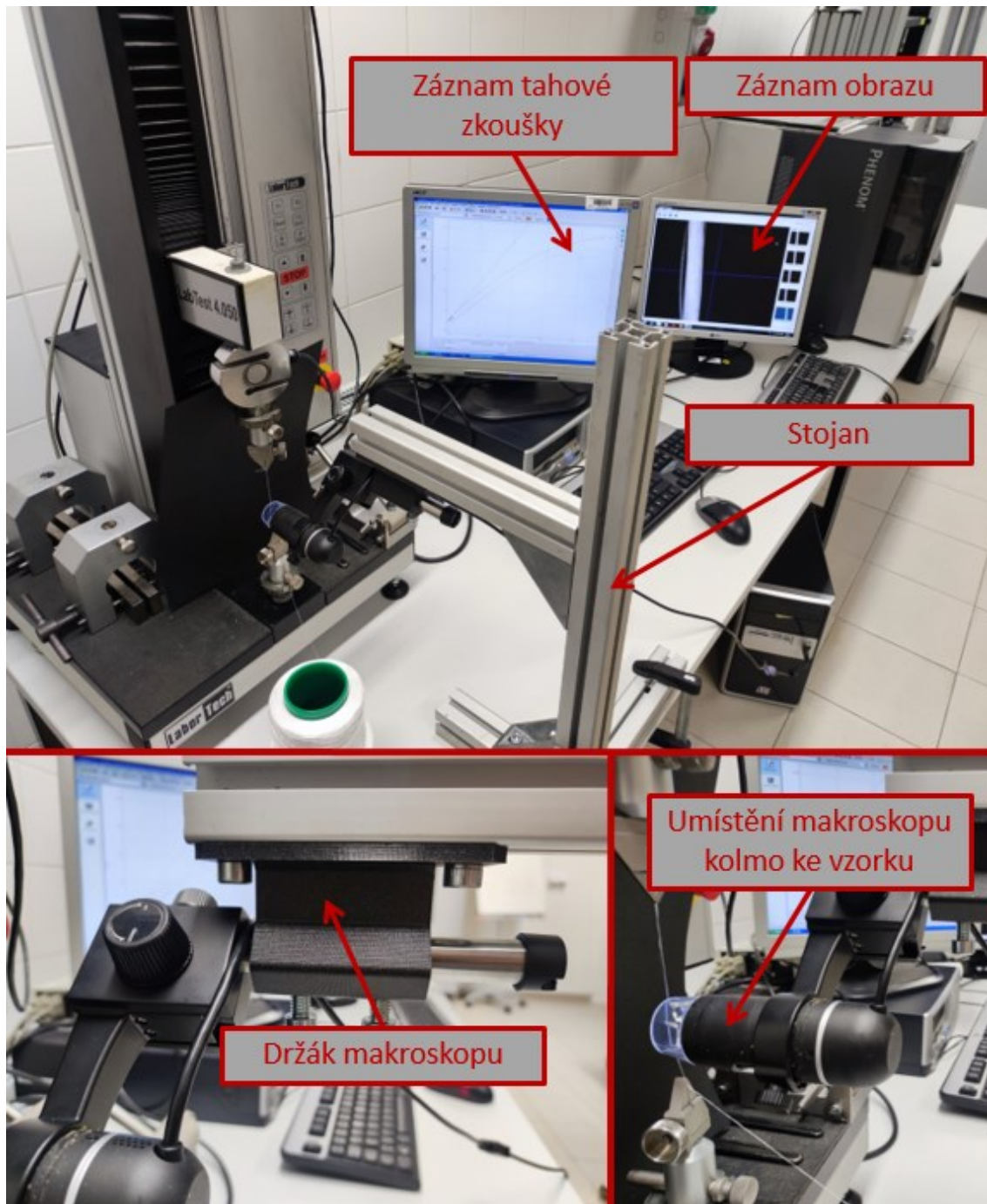
- Sestavení odpovídajícího materiálového modelu vlákenné příze.
- Sestavení jednotlivých požadavků a parametrů pro vytvoření odpovídající numerické simulace (např. volba vhodných kontaktů mezi vlákny, tvorba sítě konečných prvků, definice okrajových a počátečních podmínek).
- o Výsledky numerické simulace 3D modelu vlákenné příze.
 - Vytvoření a zpracování výsledků numerické simulace 3D modelu vlákenné příze pro studium mechanických vlastností.
 - Porovnání mechanických vlastností numerického modelu s reálnými měřeními.
 - Ukázka příkladové studie numerického modelu vlákenné příze pro vybranou aplikaci.

4. Experimentální měření pro stanovení mechanických vlastností vlákenné příze

V této kapitole byla provedena experimentální měření pro stanovení mechanických vlastností příze, které byly důležité pro stanovení maximální tahové síly, deformace, napětí a přetvoření a snímání změny průměru příze během procesu zatěžování tak, aby se vytvořily vstupní a porovnávací data pro verifikaci numerického modelu. Pro tvorbu odpovídající 3D geometrie modelu příze byla využita výpočetní tomografie a byl vytvořen skript s jednotlivými příkazy k vizualizaci a detailnímu popisu trajektorie vláken.

4.1 Měření mechanických vlastností vybraných vzorků vlákenné příze

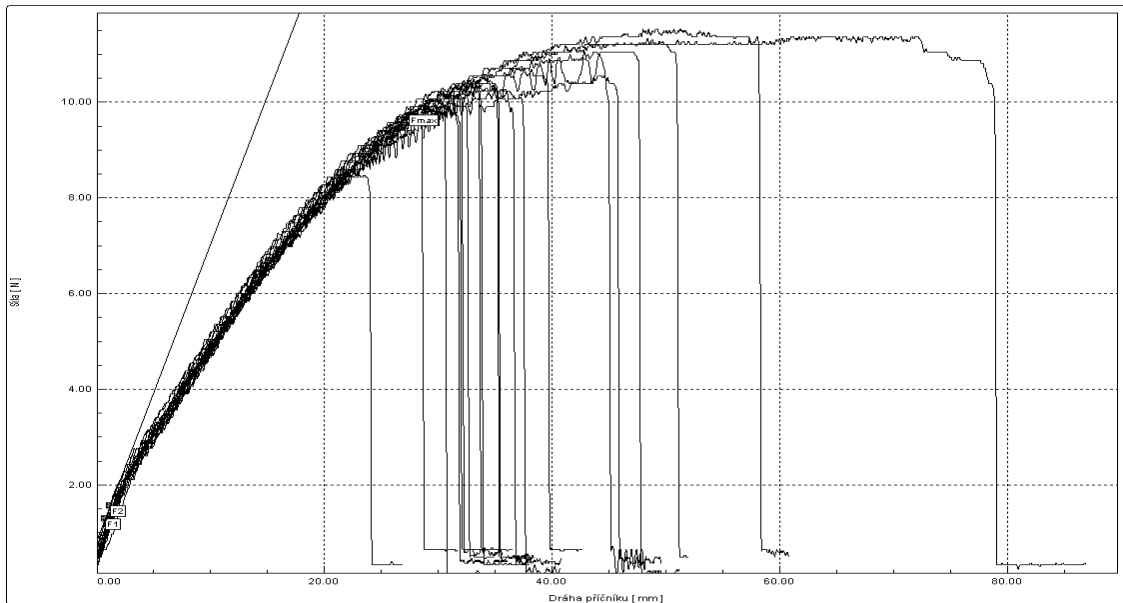
Byla provedena experimentální měření pro stanovení mechanických vlastností vybraných vzorků příze, kde se nejprve provedla tahová zkouška vzorků příze. Měření bylo realizováno na univerzálním zkušebním stroji společnosti Labortech 4.050. Vzorky příze s označením PES_40 TEX byly z polyesterového materiálu s průměrem vláken 25 μm a lineární hustotou 40 tex. Tahová zkouška byla dále doplněna o kamerový záznam pro studii určení změny průměru příze během zatěžování. Pro tento účel byl navržen a realizován rám pro upevnění makroskopu profilů z hliníkové slitiny. Samotný držák makroskopu (Levenhuk 90) byl realizován 3D tiskem. Parametry tahové zkoušky byly následující. Rychlost posuvu čelistí byla nastavena na 100 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$, což odpovídá standardním testům pro zkoušení přízí. Upínací délka byla stanovena na 200 mm. Při tahovém namáhání vzorku příze je patrné, že dochází ke změnám v uspořádání příze. Pro porovnání s numerickým modelem byl zaznamenáván průběh deformace na jednotlivých zkušebních vzorcích příze v jednotlivých deformačních krocích pro studii změny průřezu příze (viz kap. 6, obr. 6.7). Makroskop byl umístěn kolmo k pozorované přízi tak, aby příze ležela přibližně ve středu zorného pole. Snímání bylo realizováno při rozlišení 1920x1080 obrazových bodů. Celé spořádání experimentu je ukázáno na obr. 4.1.



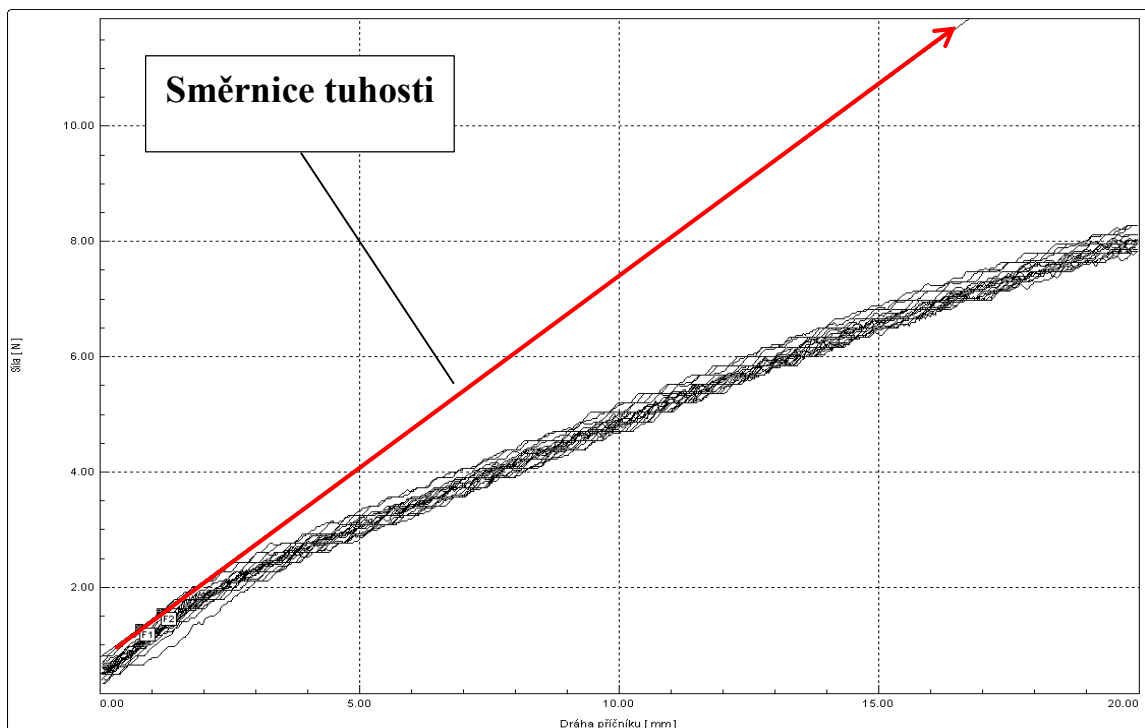
Obr. 4.1 Experimentální měření pro stanovení mechanických vlastností vlákenné příze

Výsledné průběhy závislosti síly na protažení/deformaci vybraných vzorků jsou uvedeny na obr. 4.2 a 4.3. Jednotlivé testy se prováděly, až do maximální hodnoty přetruh příze. Z vybraných výsledků je patrné, že průběh tahového namáhání vykazuje v počáteční fázi zatěžování nelineární závislost v oblasti do 3 mm, která charakterizuje počáteční vysokou

tuhost příze, která se postupně od síly ~ 2 N snižuje a následně se průběh blíží k lineární závislosti, až k oblasti přetrhu okolo ~ 10 N při protažení 25–30 mm, jak je patrné v detailu na obr. 4.3. Výsledky deformací, sil, spolu s vypočtenými elastickými moduly a protažením jsou uvedené v tab. 4.1.



Obr. 4.2 Záznam průběhu tahových zkoušek



Obr. 4.3 Zaznamenané hodnoty tahové zkoušky do 10% deformace v kombinaci grafů

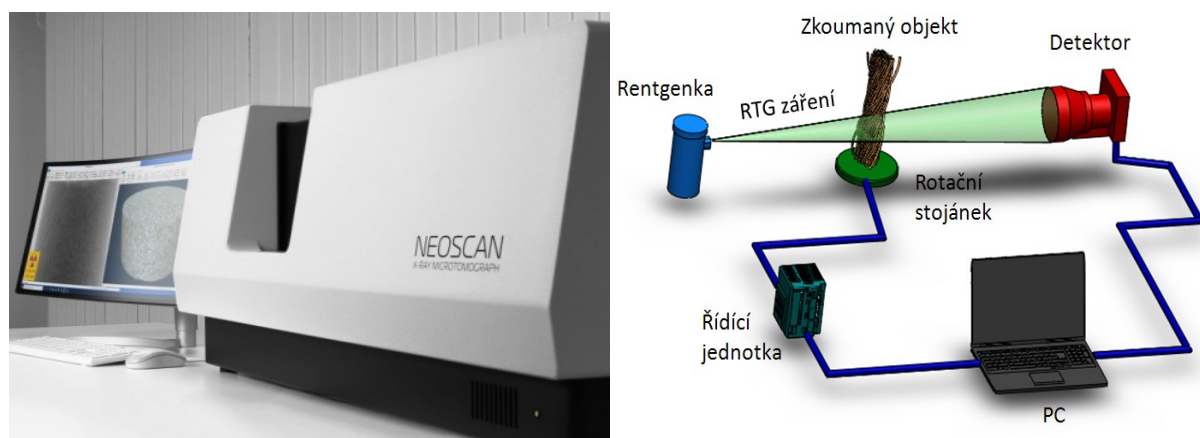
Tab. 4.1 Výsledné hodnoty tahové zkoušky vybraných vzorků

TAHOVÁ ZKOUŠKA DO PŘETRHU					TAHOVÁ ZKOUŠKA DO 10% DEFORMACE					STATISTIKA		
Zkouška	Amax	Fmax	E	Amax	Amax	Fmax	E	Amax	průměrná hodnota	průměrná hodnota E	sm.odchylka Fmax	sm.odchylka E
	mm	N	MPa	%	mm	N	MPa	%	N	MPa		
1	28,46	9,9	0,32	28,46	20	8,4	0,2688	20	9,15	0,2944	0,75	0,0256
2	27,41	9,74	0,34	27,41	20	8,35	0,2672	20	9,045	0,3036	0,695	0,0364
3	36,53	10,72	0,36	36,53	20	8,1	0,2592	20	9,41	0,3096	1,31	0,0504
4	31,26	10,39	0,43	31,26	20	8,41	0,2691	20	9,4	0,34956	0,99	0,08044
5	30,35	10,29	0,33	30,35	20	8,21	0,2627	20	9,25	0,29636	1,04	0,03364
6	48,01	11,53	0,32	48,01	20	8,34	0,2669	20	9,935	0,29344	1,595	0,02656
7	30,95	9,97	0,31	30,95	20	7,55	0,2416	20	8,76	0,2758	1,21	0,0342
8	32,97	10,39	0,34	32,97	20	7,85	0,2512	20	9,12	0,2956	1,27	0,0444
9	48,78	11,3	0,34	48,78	20	8,2	0,2624	20	9,75	0,3012	1,55	0,0388
10	33,72	10,52	0,29	33,72	20	7,62	0,2438	20	9,07	0,26692	1,45	0,02308
11	42,81	11,04	0,25	42,81	20	7,59	0,2429	20	9,315	0,24644	1,725	0,00356
12	30,33	9,9	0,31	30,33	20	7,87	0,2518	20	8,885	0,28092	1,015	0,02908
13	34,89	10,23	0,3	34,89	20	7,68	0,2458	20	8,955	0,27288	1,275	0,02712
14	44	10,55	0,33	44	20	7,97	0,255	20	9,26	0,29252	1,29	0,03748
15	32,12	10,23	0,36	32,12	20	8,15	0,2608	20	9,19	0,3104	1,04	0,0496
16	23	8,47	0,32	23	20	7,78	0,249	20	8,125	0,28448	0,345	0,03552
17	60,99	11,36	0,35	60,99	20	7,71	0,2467	20	9,535	0,29836	1,825	0,05164
18	34,95	10,33	0,35	34,95	20	8,33	0,2666	20	9,33	0,30828	1	0,04172
19	29,61	9,9	0,33	29,61	20	8,39	0,2685	20	9,145	0,29924	0,755	0,03076
20	43,6	11,04	0,31	43,6	20	7,82	0,2502	20	9,43	0,28012	1,61	0,02988

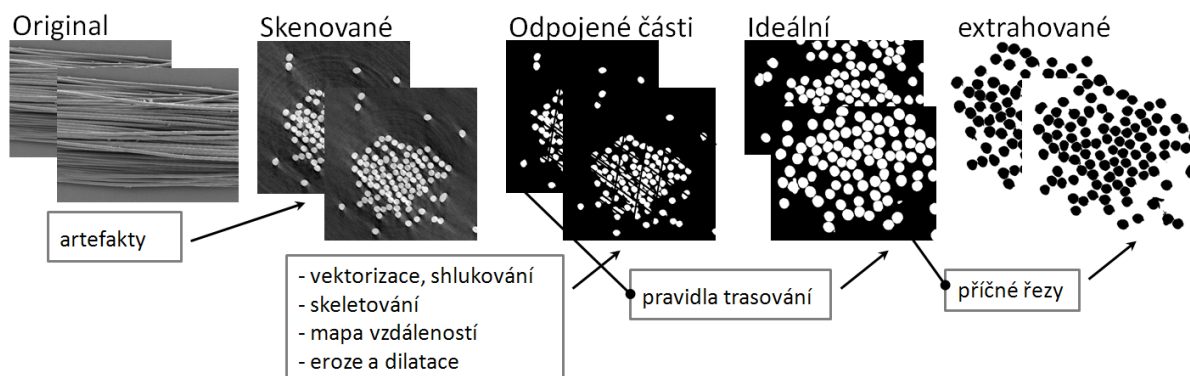
4.2 Tvorba snímků geometrie vláken příze pomocí výpočetní tomografie

Byla provedena analýza morfologie a uspořádání vláken vybraných vzorků příze prostřednictvím výpočetní tomografie (CT). Jak bylo přibliženo v kap. 2.3.2, lze prostřednictvím CT získat odpovídající geometrická data popisující vektorovou geometrii vláken příze, která následně budou využita pro tvorbu 3D modelu příze (viz. kap. 5). CT je zobrazovací metoda, umožňující na základě rentgenových snímků objektů, pořízených z jednotlivých řezů, sestavit 3D model vnitřního uspořádání zkoumaného objektu v tomto případě příze bez toho, aby došlo k porušení. Díky tomu může být CT použito k detailnímu zkoumání mikro objektů, jak je uvedeno v [79]. Samotný princip vychází z radiografie, kde je zkoumaný vzorek příze umístěn mezi zdroj rentgenového záření a citlivý rentgenový film nebo jiný vhodný detektor. Při průchodu záření objektem dochází k jeho absorpci v závislosti na materiálu či kombinaci odlišných materiálů, ze kterých je příze vytvořena, přesněji na jejich absorpčních koeficientech. Detekcí intenzity záření za vzorkem příze je získán radiograf, tedy

snímek o stupních šedi právě v závislosti na útlumu záření v objektu. Nahrazení rentgenového filmu detektorem záření umožňuje digitalizaci snímku a jeho následné zpracování, jak uvádí Dowsett v [80]. Principem je získání sady snímků příze pořízených s úhlovým inkrementem. Ze získané sady snímků je následně matematickým algoritmem dopočítán 3D model zkoumaného objektu = příze, tzv. rekonstrukce. Pro jednotlivá měření byl využit mikro-CT skener Rigaku nano3DX, který se nachází v laboratoři mikroskopie v Ceitecu (obr. 4.4). Základní princip pracovního postupu získávání analýzy obrazu z CT je uveden na obr. 4.5. Analýza zahrnuje optimální odstranění šumu z prvotních dat, až po konečný krok, který zahrnuje převzorkování a přesné sledování segmentů vláken. Jednotlivé kroky jsou podrobně popsány v kap. 4.2.1.



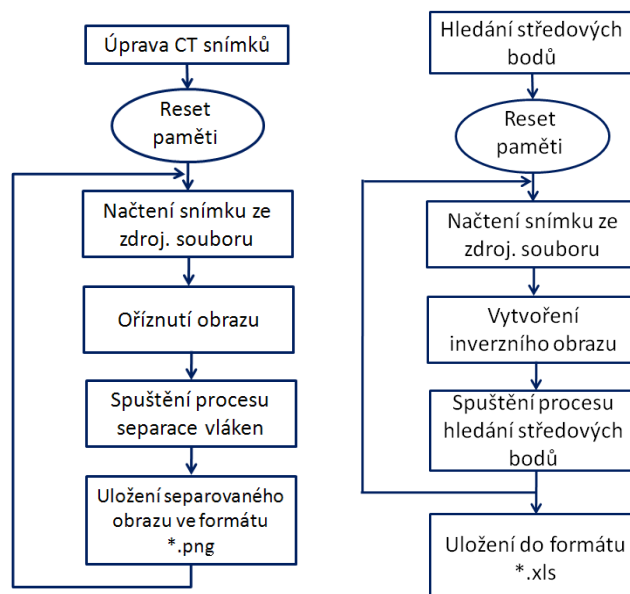
Obr. 4.4 Laboratorní mikro-CT skener Rigaku nano3DX (vlevo) v Ceitec, princip snímání vzorku příze prostřednictvím CT (vpravo)



Obr. 4.5 Pracovní postup extrakce vláken z mikro-CT dat [82]

4.2.1 Tvorba vektorové geometrie vlákněné příze

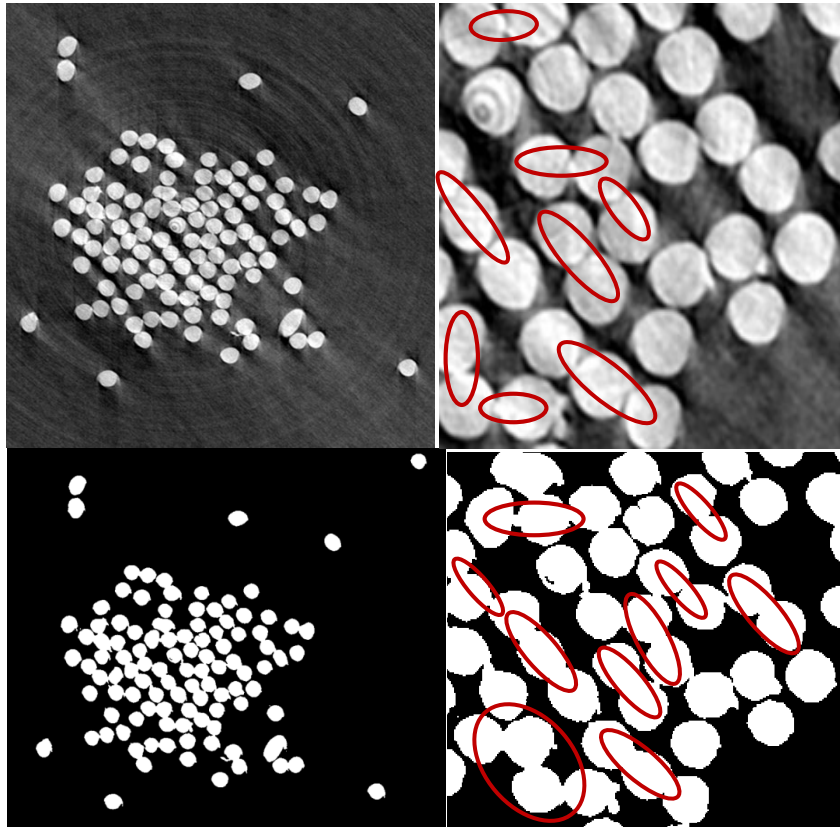
Pro vytvoření snímků, byl použit mikro-CT skener Rigaku nano3DX s napětím trubice v rozmezí 20 až 50 kV a proudem do 30 mA. Velikost datového pole TEX-Y je 1948x1843x1250 s roztečí voxelů 0,528 μm x 0,528 μm . Jedním z problémů při skenování vlákněné příze v detailním pohledu, je nedostatečné oddělení jednotlivých vláken, která jsou v kontaktu. Tento problém je zapříčiněn velkým kontrastem a světlostí při vytváření snímků v základní šedé stupnici, která má pouze 20 bodovou škálu a hodnotou jednotlivého stupně 0,10. Jednotlivé snímky byly pořizovány v rozlišení 1026x894 pixelů a ukládány do formátu souboru *.tif. V následujícím kroku bylo nutné spojená vlákna separovat za pomoci obrazových operací. Pro tento účel byl vytvořen skript v programu Matlab R2021a. Před vložením vytvořených CT snímků do programu bylo třeba upravit a zjednodušit označení zdrojových snímků tak, aby jednotlivé snímky po načtení skriptu navazovaly na sebe. Další úloha byla opět řešena pomocí skriptu a má za cíl vyhledat středové body průřezů jednotlivých separovaných vláken pomocí těžišť. V blokovém schématu uvedeném na obr. 4.6 jsou přiblíženy dílčí úkony separace obrazu od sjednocených vláken, až po vyhledávání středových bodů jednotlivých vláken a uložení do excelového souboru.



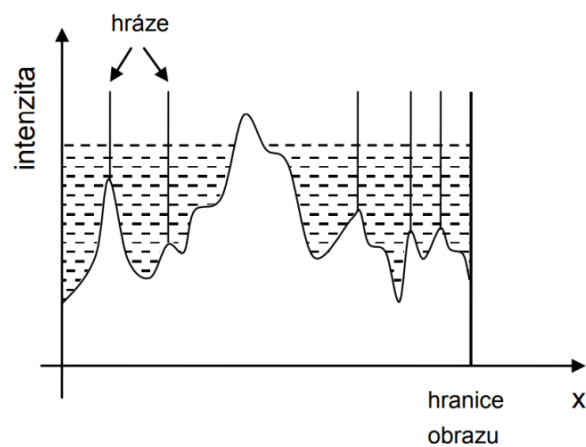
Obr. 4.6 Blokové schéma vytvořených skriptů pro separaci obrazu od sjednocených vláken získaných z CT

Nejprve byly vytvořeny binární obrazy z CT snímků (obr. 4.7). K tomuto účelu byl využit program Matlab. Pro konfiguraci binárních obrazů byla využita aplikace *Colortresholder*, ve které byly zprvu nastaveny parametry sytosti a jasu. Další operací bylo tento snímek převést do binárního obrazu pomocí funkce *Show Binary*. Takto modifikovaný snímek byl uložen do odkládací paměti pro další proces. Tyto dva kroky byly pomocí funkce *Image batchprocessor* aplikovány na další CT snímky. Pro představu o kvalitě vzniklých snímků jako podkladu pro vytvoření trajektorie vláken příze bylo využito prvních 100 CT snímků z celkového počtu 2500. Výsledky upravených binárních obrazů ukazují na problém průniku jednotlivých vláken, jak je vidět v detailu na obr. 4.7. K tomuto účelu byl načten první binární snímek, již zpracovaného obrazu v aplikaci *Colortresholder* a použita funkce *Invertmask*, čímž se vlákno nadefinuje jako objekt ke zpracování. Jako v předchozích krocích byla využita funkce pro kopírování vlastností *Image batchprocessor* pro prvních 100 snímků. Pro načtení upravených binárních snímků je třeba zadat plnou cestu k adresáři, kde jsou jednotlivé snímky uloženy. Pokud by vlákna nebyla oddělena, došlo by v následujících krocích k vyhledání společného těžiště dvou či více se dotýkajících vláken a trajektorie by pak byla pouze jedna společná pro více vláken. Pro separaci vláken byla zvolena metoda vodní transformace, která má za úkol nejvíce prolínající se vlákna označit k separaci (obr. 4.7 vpravo). Výsledný binární obraz je uveden na obr. 4.7 dole, který bude dále zpracován pomocí vodní transformace, jak je schématicky přiblíženo na obr. 4.8 kde, vytvoří obraz s označenými nejvíce se prolínajícími vlákny. Při prvním pohledu na zobrazení vodní transformace nemusí být na první pohled patrné, jak program pracuje. Segmentace pomocí metody rozvodí *watershed*, kterou popisuje funkce vyjádřená vztahy (4.1–4.2) stojí na rozhraní mezi metodami zaměřenými na homogenitu oblastí a analýzou hran obrazu. Tato metoda považuje za segmenty oblasti v okolí každého lokálního minima obrazového parametru, jako je jas. Parametrický obraz je tak pojímán jako reliéf, na jehož povrchu jsou identifikována lokální minima, která reprezentují samostatné segmenty. Při vnímání intenzity obrazu jako reliéfu je definován pojem povodí jako oblast, která náleží k lokálnímu minimu. K tomuto minimu směřuje tok vody po nejstrmější cestě. Pojem rozvodí pak vymezuje hranice segmentů, tedy jednotlivých povodí [83]. Princip výpočetní metody je ilustrován na analogii s vodou, která postupně zaplavuje terén od jeho nejnižších bodů, reprezentovaných nejnižšími hodnotami intenzity obrazu. Tímto způsobem vytváří v každém povodí homogenní oblasti. Aby se při zvyšování hladiny vody, až po nejvyšší body terénu

jednotlivá povodí nespojila do jednoho celku, jsou na hřebenech, které obklopují lokální povodí, umístěny hráze. Tyto hráze pak stanovují hranice mezi segmenty, tedy rozvodí (obr. 4.8).



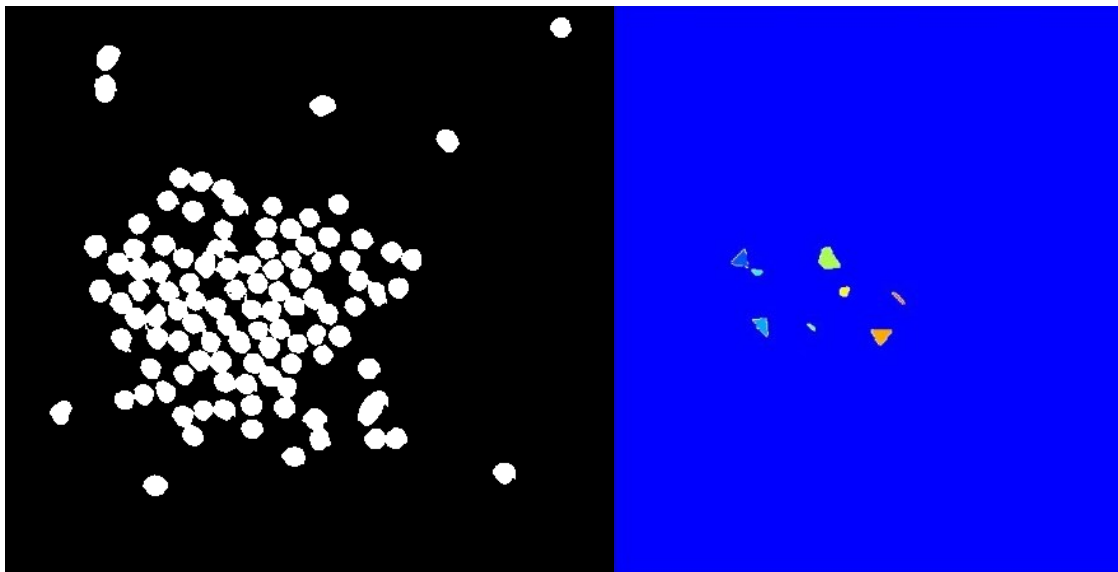
Obr. 4.7 Vytvořený CT snímek vlákenné přize a detailní zobrazení kontaktu ve vláknech (nahore), nastavení binárního obrazu a detailní zobrazení spojení vláken (dole)



Obr. 4.8 Princip vodní transformace pro představu částečně zaplavených povrchů intenzit obrazu, které jsou odděleny imaginárními hrázi [83]

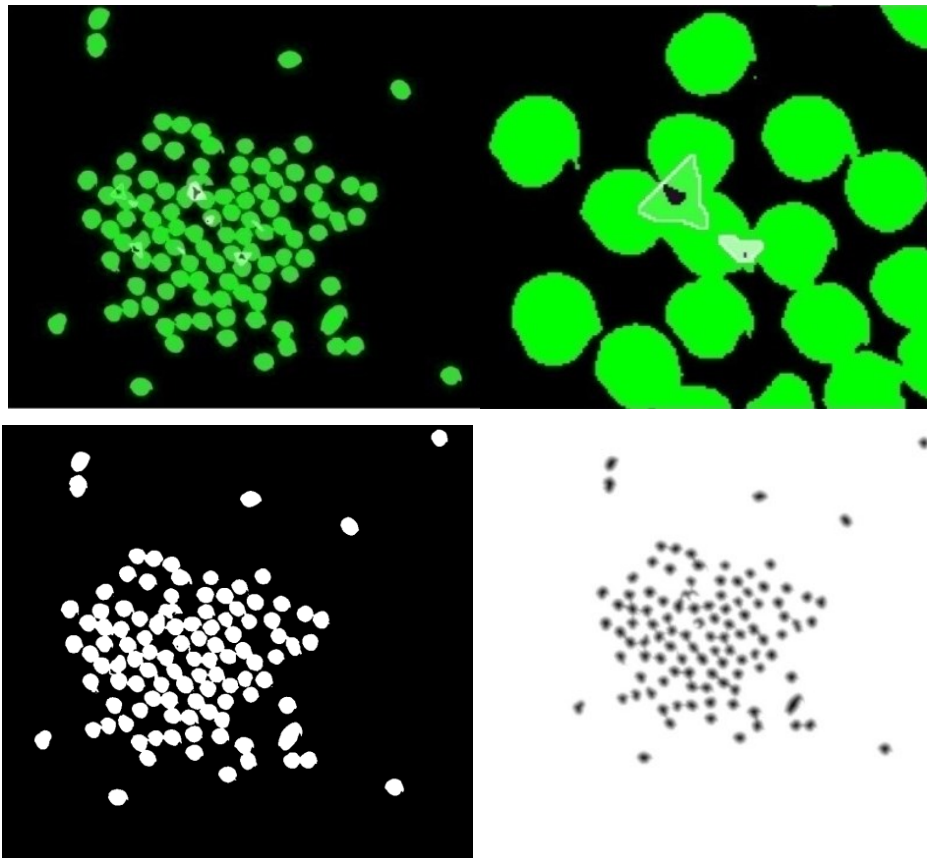
Oblasti, které zůstanou neoznačeny a nejsou spojeny s žádným z existujících povodí, jsou definovány jako samostatné oblasti – nová povodí. Metoda rozvodí *watershed* se tak ukazuje jako velmi vhodná pro účely separace vláken. Pro detailnější zobrazení byl vytvořen náhled na transformovaná místa, která program vybral k dalšímu řešení separace, jak je uvedeno na obr. 4.9 vpravo. Před zahájením distanční transformace, je třeba provést čištění šumu ve snímku. K odstranění velmi malých bodů lze použít funkci *bwareaopen* (4.1). Tato funkce odstraní jenom nečistoty popředí, takže obrázek doplňujeme před a po vyvolání příkazu *bwareaopen* (obr. 4.10) překrytí binárního snímku s vodní transformací a detailní zobrazení.

$$\left. \begin{array}{l} \text{bw1} = \text{imread}(\text{bw}); \\ \text{K} = \text{watershed}(\text{bw1}); \\ \text{Lrgb} = \text{label2rgb}(\text{K}); \\ \text{imshow}(\text{Lrgb}) \end{array} \right\} \quad (4.1)$$



Obr. 4.9 Binární zobrazení vláken (vlevo) a vodní transformace (vpravo)

$$\left. \begin{array}{l} \text{imshow}(\text{imfuse}(\text{bw1}, \text{Lrgb})); \\ \text{axis}([10 \ 175 \ 15 \ 155]); \end{array} \right\} \quad (4.2)$$

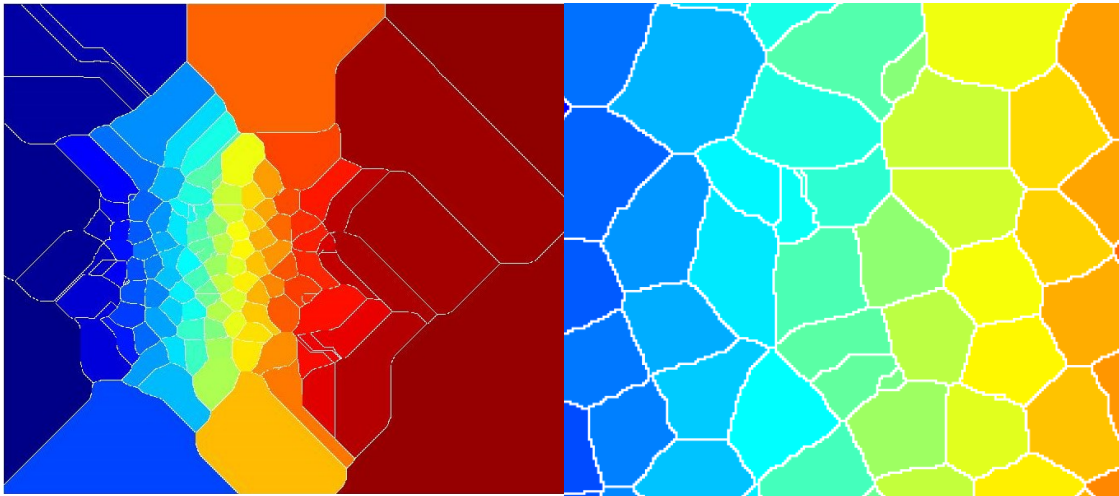


Obr. 4.10 Překrytí binárního snímku s vodní transformací (vpravo) a detailní zobrazení (vlevo)

Odstranění šumu a zobrazení funkce *bwareaopen* (4.3) Dalším krokem je výpočet tzv. vodní transformace - watershed (4.4) a poté její zobrazení, které je uvedeno na obr. 4.11.

$$\left. \begin{aligned}
 \text{bw2} &= \sim\text{bwareaopen}(\sim\text{bw1}, 10); \\
 &\text{imshow}(\text{bw2}) \\
 \text{D} &= -\text{bwdist}(\sim\text{bw}); \\
 &\text{imshow}(\text{D}, [])
 \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \text{Ld} &= \text{watershed}(\text{D}); \\
 &\text{imshow}(\text{label2rgb}(\text{Ld}))
 \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$



Obr. 4.11 Nová vodní transformace binárního snímku (vlevo), detailní zobrazení (vpravo)

Hraniční čáry z obr. 4.11 odpovídají segmentu v bílé barvě $Ld == 0$. Použijí-li se tyto hraniční čáry k segmentaci binárního obrazu, budou odpovídat příslušným změnám obrazových bodů umístěným na pozadí podle funkce dané vztahem (4.5).

$$\left. \begin{array}{l} Bw2 = bw1; \\ bw2(Ld == 0) = 0; \\ imshow(bw2) \end{array} \right\} \quad (4.5)$$

„Surová“ transformace funkce *watershed* je známá svou tendencí „přesegmentovat“ obraz. Běžným trikem v segmentačních metodách založených na funkci *watershed* je pak odfiltrování malých lokálních minim pomocí příkazu *imextendedmin* a poté úprava transformace vzdálenosti tak, aby se na odfiltrovaných místech nevyskytovala žádná minima. To se nazývá "minimaimposition" a je implementováno pomocí funkce *imimposemin* podle vztahu (4.6)

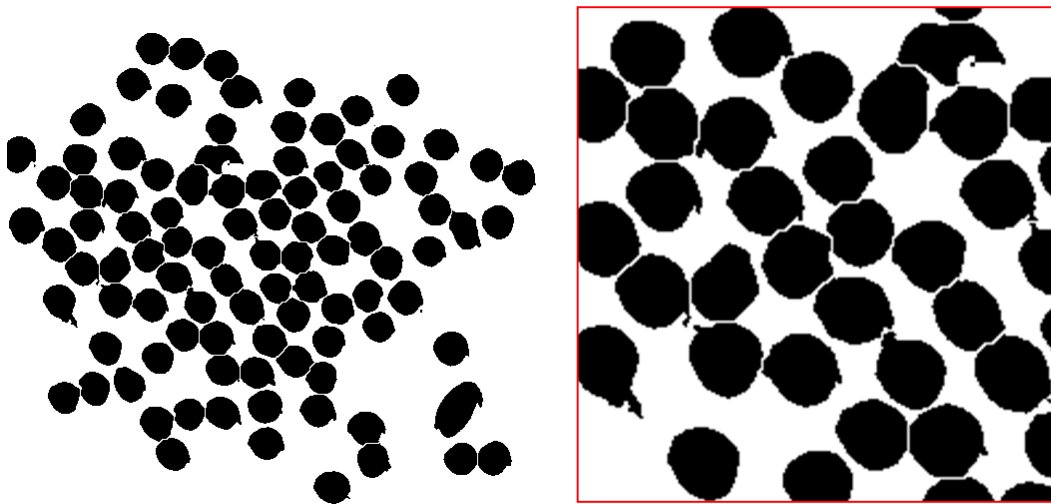
$$\left. \begin{array}{l} D2 = imimposemin(D, mask); \\ Ld2 = watershed(D2); \\ bw3 = bw; \\ bw3(Ld2 == 0) = 0; \\ imshow(bw3) \end{array} \right\} \quad (4.6)$$

Následujícím příkazem podle vztahu (4.7) se vyvolá funkce *imextendedmin*, která by měla v ideálním případě vytvořit pouze malé skvrny, které jsou zhruba uprostřed buněk, které mají být dále segmentovány. K tomuto účelu byla použita funkce *imshowpair* která překryje masku na původní obrázek.

```
mask = imextendedmin(D, 2);}
imshowpair(bw, mask, 'blend')}
```

(4.7)

Nakonec budou upraveny funkce transformace jednotlivé vzdálenosti tak, aby byla obsažena minima pouze na požadovaných místech, a poté bude funkce *watershed* opakována. **Výsledkem postupného řízeného procesu dělení je oddělení vláken příze na jednotlivá vlákna a takovýto obraz lze již využít pro tvorbu 3D geometrie modelu příze pro numerickou simulaci.** Tímto procesem lze postupně, nebo automaticky oddělit jednotlivá vlákna příze, která jsou již v kontaktu a nelze je zobrazit jednotlivě (obr. 4.12).



Obr. 4.12 Konečný výsledek rozdělených vláken získaný úpravou z původního CT snímku

4.3 Závěr a shrnutí kapitoly

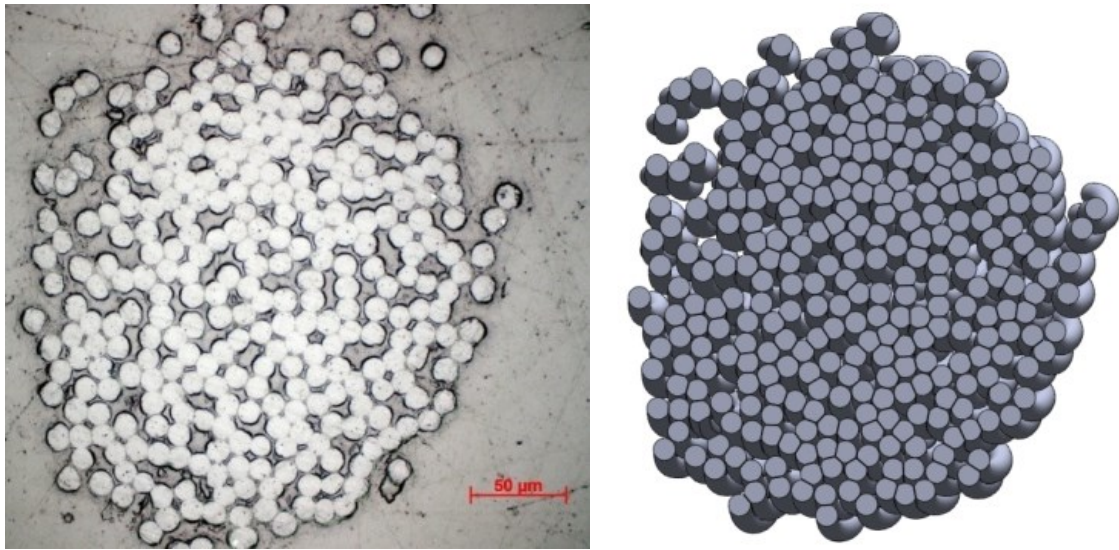
Kapitola 4 se věnovala stanovení vybraných mechanických vlastností zkušebních vzorků příze, které jsou důležité pro návrh a modelování geometrie vláken příze. Byla provedena experimentální měření pro stanovení mechanických vlastností příze, kde se stanovily maximální tahové síly a deformace včetně modulu pružnosti (kap. 4.1, tab. 4.1). Dále byly vytvořeny pokročilé metody tvorby snímků geometrie vláken příze, pro které byl vytvořen skript v programu Matlab R2021a (kap. 4.2) a následně sestaveny řady funkcí pro úpravu binárních obrazů pro získání konečného obrazu rozdělených vláken získaných úpravou z původních CT snímků, ze kterých se bude vycházet pro konstrukci 3D modelu příze, což bude přiblíženo v následující kapitole.

5. Tvorba pokročilé 3D geometrie modelu příze pro sestavení numerické simulace

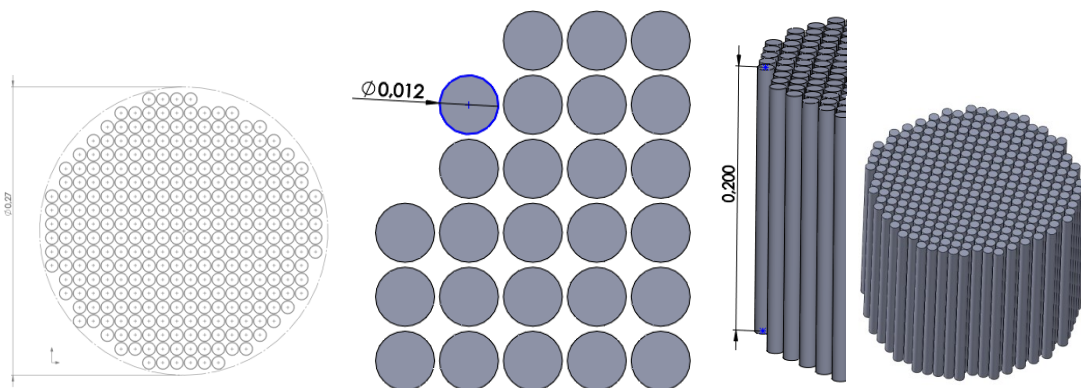
Obsahem kapitoly je představení postupu tvorby 3D geometrie modelu příze, který bude následně použit pro sestavení numerické simulace, což bude uvedeno v následující kapitole. Nejprve jsou uvedeny CAD softwary a vhodné nástroje a funkce pro tvorbu zpracování obrazu vláken příze z výpočetní tomografie tak, aby se vytvořila odpovídající konstrukce 3D modelu vlákněné příze. Dále je také uvedeno využití parametrických rovnic pro tvorbu 3D modelu. Na závěr je představen způsob stanovení zaplnění 3D modelu vlákněné příze.

5.1 Možnosti tvorby 3D geometrie modelu příze

Pro tvorbu 3D geometrie modelu příze z obrazu z vytvořeného snímku z CT podle kap. 4. je v současné době řadu nástrojů a funkcí, které jsou implementované do CAD (Computer aided design) programů a softwarů a umožňují vytvořit konstrukční virtuální geometrii. Mezi nejvýznamnější CAD softwary, patří např. Creo Parametric, Solidworks, Inventor, Catia, NX, Solid Edge, atd. Tvorba pokročilé 3D geometrie modelu pro numerické simulace příze byla vytvořena prostřednictvím funkcí pro tažení z vloženého obrazu v Creo Parametric, jenž je k dispozici na Katedře částí a mechanismů strojů, Fakulty strojní TUL. Byla vytvořena pokročilá 3D geometrie charakterizující uspořádání vláken v řezu, která dává představu o vzájemném uspořádání vláken ve struktuře příze (obr. 5.1 vlevo). Pro následné numerické simulace byl dále vytvořen ideální model příze, jak je patrné na obr. 5.2, který je zjednodušený, přesto zachovává odpovídající počet vláken a zaplnění. Rozdíl v idealizované 3D geometrii modelu spočívá ve faktu, že struktura je na rozdíl od skutečné příze rovnoměrně uspořádána a osa vlákna nemá křivkový charakter. Ten je vytvořen až v prvním kroku numerického modelu pootočením ploch podstav vláken.



Obr. 5.1 Pokročilá tvorba 3D geometrie příze: řez příze (vlevo) a CAD model (vpravo)

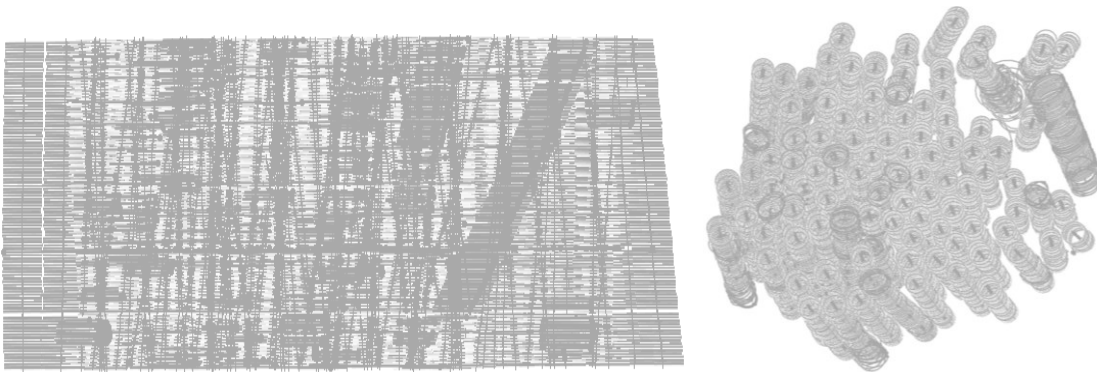


Obr. 5.2 Idealizovaná 3D geometrie modelu příze

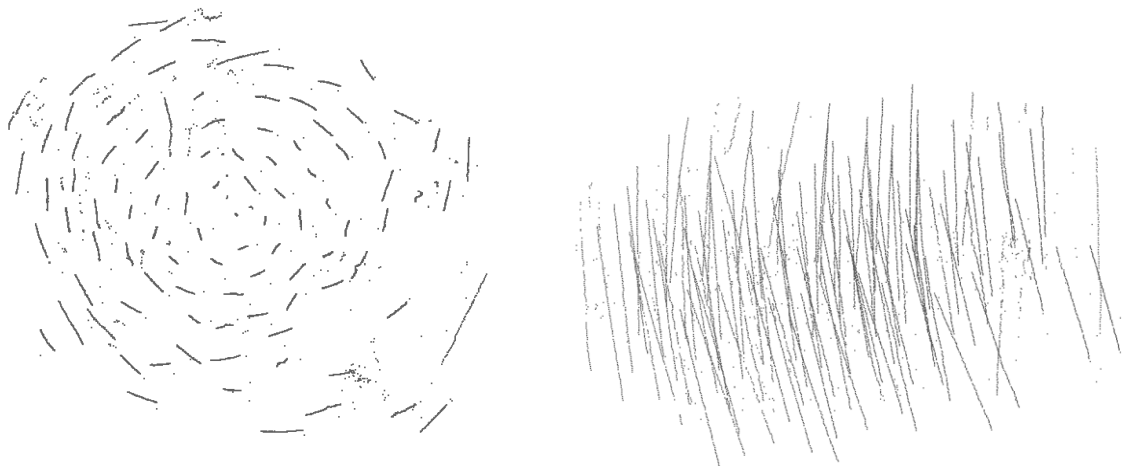
5.2 Postup tvorby pokročilé 3D geometrie modelu příze

Samotnou tvorbu pokročilé 3D geometrie lze realizovat více postupy. V rámci této práce byly vybrány dva postupy, které budou v následujícím textu popsány. Jejich vhodnost byla ověřována na vybrané části geometrie získané ze 100 snímků z celkového počtu 2500 snímků příze. Na základě odpovídající efektivity tvorby 3D modelu z hlediska času, softwarové a hardwarové náročnosti, byla sestavena metodika/postup tvorby geometrie. Úkolem bylo vytvoření 3D křivek reprezentujících osy vlákna z jednotlivých vrstev obrazů a následně vytvoření 3D modelu příze v délce jednoho zákrutu. **První postup** je založen na tvorbě

geometrie přímo v CAD programu pomocí vhodně zvolených funkcí umožňujících vygenerovat křivkovou trajektorii. Nejprve byl vybrán CAD software, jak bylo uvedeno v kap. 5.1, který umožňuje vytváření geometrie z vektorového obrazu. V CAD programu byly vytvořeny jednotlivé roviny, které byly mezi sebou odsazeny o 0.001 mm, což odpovídá vzdálenosti jednotlivých CT řezů. Tímto způsobem bylo vytvořeno 100 rovin. Do takto připravených rovin byly jednotlivě vkládány upravené binární obrazy řezů získané z jednotlivých CT snímků, jak je uvedeno na obr. 5.3. **Druhým postupem** je nejprve získat středové body trajektorií vláken v programu Matlab a ty následně importovat do CAD programu.



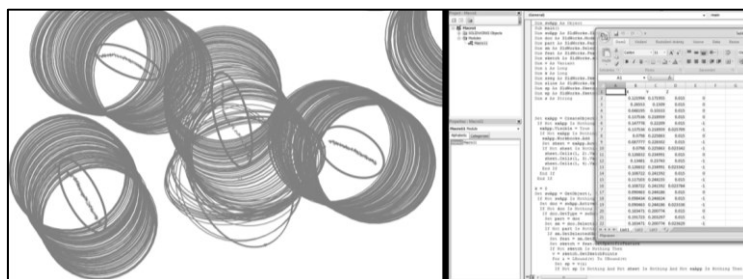
Obr. 5.3 První postup tvorby pokročilé 3D geometrie modelu příze: využití jednotlivých rovin pro vytváření geometrie z vektorového obrazu



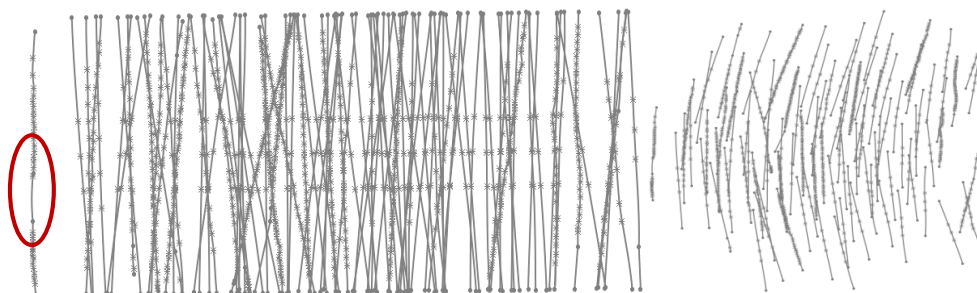
Obr. 5.4 Druhý postup tvorby pokročilé 3D geometrie modelu příze: využití středových bodů trajektorie vláken

Z vložených obrazů byly vybrány trajektorie obvodů jednotlivých vláken. Vybrané obvody tvořily jednu obrazovou plochu (jeden náčrt). Aby bylo možné z těchto ploch obsahujících jednotlivé obvody složit 3D křivku, bylo nutné vytvořit funkci řízenou prostřednictvím makra,

kteřé označovalo středové body obvodů. Prostřednictvím makra byly definovány příkazy, které zajišťovaly výběr odpovídající pracovní plochy, která se propojovala s příslušným náčrtem, tedy označovala výběr středových bodů, načtení a vložení souřadnic středu bodů do excelového souboru, jak je přibliženo na obr. 5.5. Tento soubor byl načten v programu Creo Parametric, kde byly příslušné středové body postupně propojeny úsečkami a postupně vytvořily trajektorii os vláken. Nevýhodou této metody bylo, že vytvořené trajektorie v některých případech nebyly spojitě. Důvodem byla skutečnost, že ne vždy byl správně nalezen středový bod (např. oválný průřez byl nahrazen dvěma kruhovými apod.). Pro vytvoření spojitě křivky proto bylo nutné vyhledat a ručně propojit nespojené části, jak je uvedeno na obr. 5.6. Další nevýhodou bylo, že model je tvořen jako jedna část, která neumožní provést funkci tažení geometrického útvaru po křivce na více trajektoriích současně a při postupném aplikování funkce ji lze použít jen v omezeném počtu opakování, a to výrazně menším, než je počet trajektorií. Aby bylo možné aplikovat vybranou funkci tažení, bylo nutné 3D model rozdělit do jednotlivých částí, tedy že pro každou trajektorii vlákna musí být vytvořena samostatná křivka. To bylo vyřešeno převedením celé geometrie modelu do neutrálního formátu (*.step) s nastavenou podmínkou ukládání 3D křivek. Tím se také zajistí spojitě a plynulě přechody v bodech spojení (viz obr. 5.13).

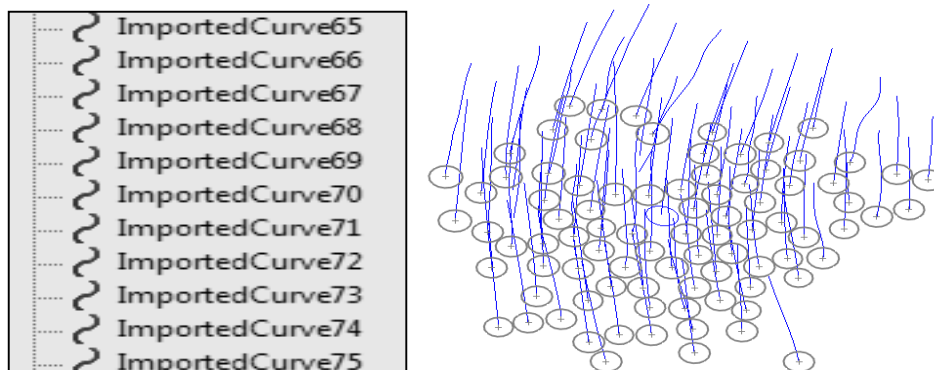


Obr. 5.5 3D skica (vlevo), načtení a vložení souřadnic středu bodů do excelovského souboru (vpravo)



Obr. 5.6 Tvorba spojitě křivky, spojené středové body do jednotlivých křivek

Poté bylo již možné aplikovat funkci tažení po křivce a každé trajektorii přiřadit kružnici o průměru 0.025 mm odpovídající velikosti vlákna získaného z CT, jak je přiblíženo na obr. 5.7. Výsledkem je vytvořená pokročilá 3D geometrie modelu příze (obr. 5.8)



Obr. 5.7 Importované jednotlivé křivky do 3D plochy

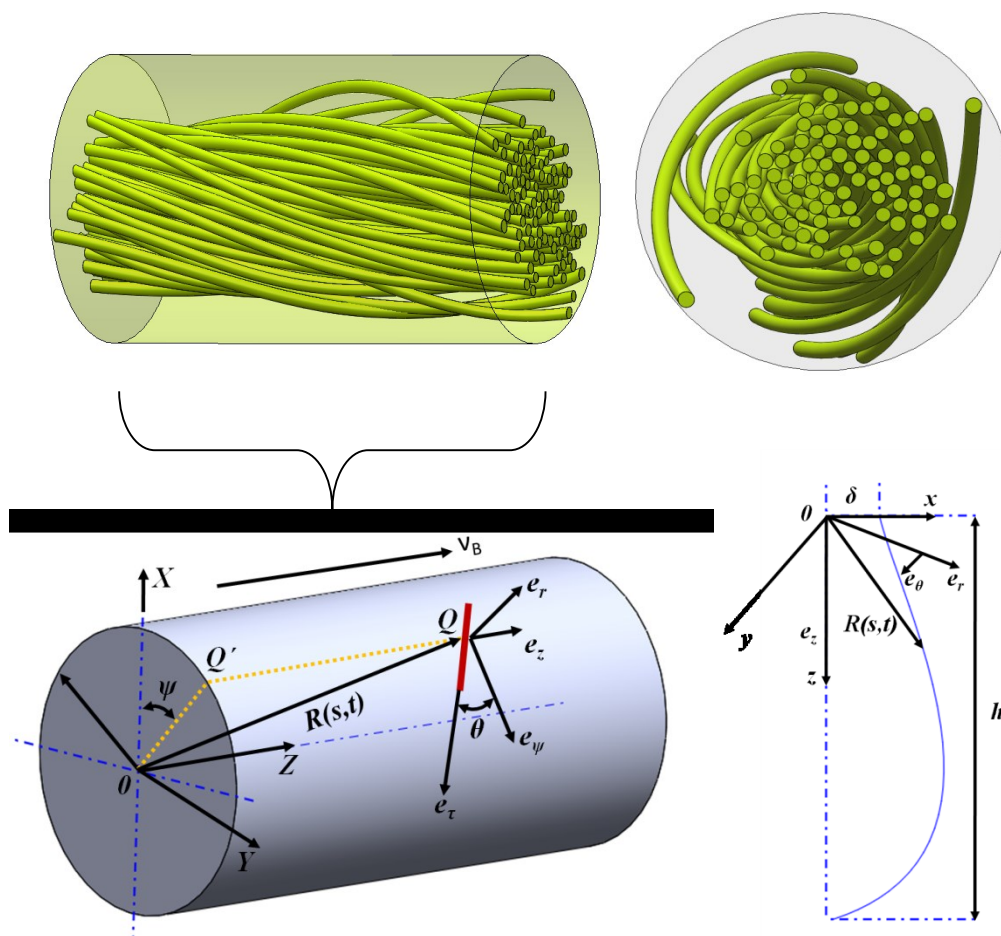


Obr. 5.8 Vytažený 3D model soustavy vlákenné příze (vlevo), izometrický náhled na sestavu vláken (uprostřed), izometrický náhled na vznikající zákrut (vpravo)

5.2.1 Optimalizovaný postup tvorby 3D geometrie modelu vlákenné příze

Postup popsáný v předchozí kapitole je velmi pracný a časově náročný, a proto nemusí vždy s ohledem na časový požadavek vytvoření numerické simulace, být tím nejvhodnějším. Proto byl navržen další „optimalizovaný“ postup tvorby. Optimalizovaný postup byl navržen tak, aby umožňoval vytvářet trajektorie vláken prostřednictvím geometrických rovnic. Prostřednictvím matematických vztahů lze trajektorie vláken převést do konstrukčních tvarů n -počtu vláken, které budou s odpovídající geometrií tvořit tvar výsledné příze. Takový přístup k tvorbě 3D geometrie modelu příze pro numerické simulace příze je poměrně ojedinělý. V literaturách lze nalézt postupy tvorby 3D geometrie různých vlákenných struktur, kde autoři

popisovali vytvoření CAD modelu prostřednictvím parametrických rovnic, jako např. v rámci studie mechanických vlastností drátů, kabelů, lan apod. Utting a Jones [31] nebo Petru [25] popisovali ve svých pracích tvorbu diskrétní trajektorie různých konfigurací spirálovitě zahnutých válců pro tvorbu jednotlivých drátů kabelu nebo kompozitní struktury vyztužené dlouhými vlákny. V této práci vychází optimalizovaný postup tvorby 3D geometrie modelu vlákněné příze podle principu uvedeném na obr. 5.9. Tento princip vychází z křivkové trajektorie bodu, který bude popsán prostřednictvím následujících rovnic (5.1–5.5).



Obr. 5.9 Optimalizovaný postup tvorby 3D geometrie modelu vlákněné příze prostřednictvím parametrického modelování

Obecně lze zavést trojrozměrný Eukleidovský prostor $E^3(\Xi)$, kde Ξ je množina reálných čísel s pravouhlým kartézským souřadným systémem $(0; x_1 = x; x_2 = y; x_3 = z)$. V takto definovaném prostoru je libovolný bod Q a jeho přemístění Q' jednoznačně určeno souřadnicemi $Q(x_Q, y_Q, z_Q)$ eventuálně $Q(x_Q, y_Q, z_Q, 1)$, kde x_Q, y_Q, z_Q jsou kartézské

souřadnice bodu Q . Přemístění bodu Q do Q' lze provést prostřednictvím geometrické transformace. Potom souřadnice bodu $Q'(x'_Q, y'_Q, z'_Q, 1)$ lze získat pomocí transformace $[T_i]$ bodu $Q(x_Q, y_Q, z_Q, 1)$ podle vztahu 5.1.

$$[T_i]^T \begin{Bmatrix} x_Q \\ y_Q \\ z_Q \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x'_Q \\ y'_Q \\ z'_Q \end{Bmatrix} \quad (5.1)$$

Jednotlivé zákruty lze definovat prostřednictvím jednotkových vektorů e_i souvisejících s polohovým vektorem $R(s, t)$ vztažených k polohovým úhlům θ, ψ , což lze popsat prostřednictvím cylindrických souřadnic (5.2–5.5), jak je přibliženo na obr. 5.9 dole.

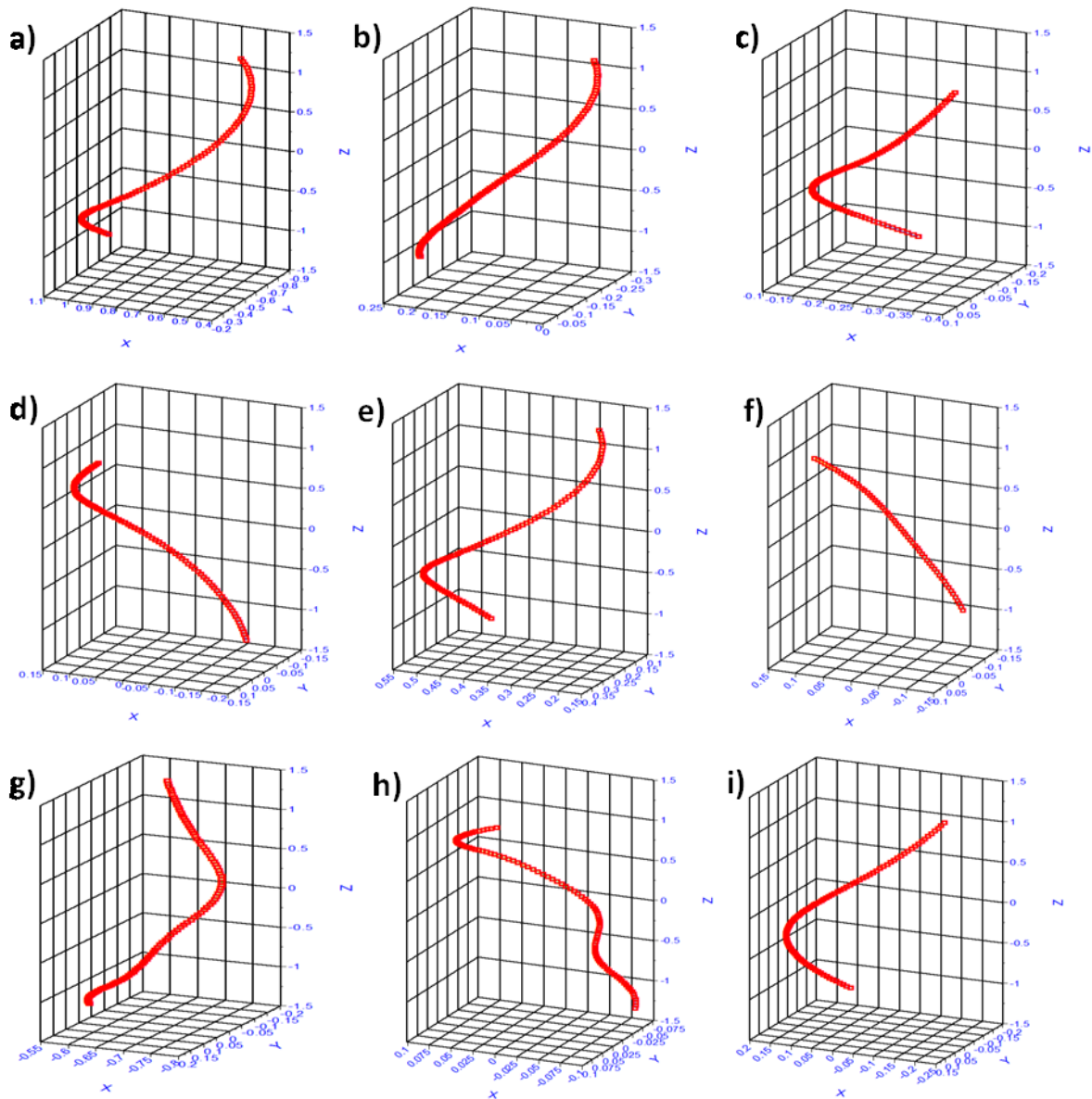
$$e_\tau = \frac{dR}{ds} = r_0 \frac{d\psi}{ds} e_\psi + \frac{dz}{ds} e_z \quad (5.2)$$

$$e_h = e_\tau \quad (5.3)$$

$$e_v = e_h \times e_\tau = -\frac{dz}{ds} e_\psi + r_0 \frac{d\psi}{ds} e_z \quad (5.4)$$

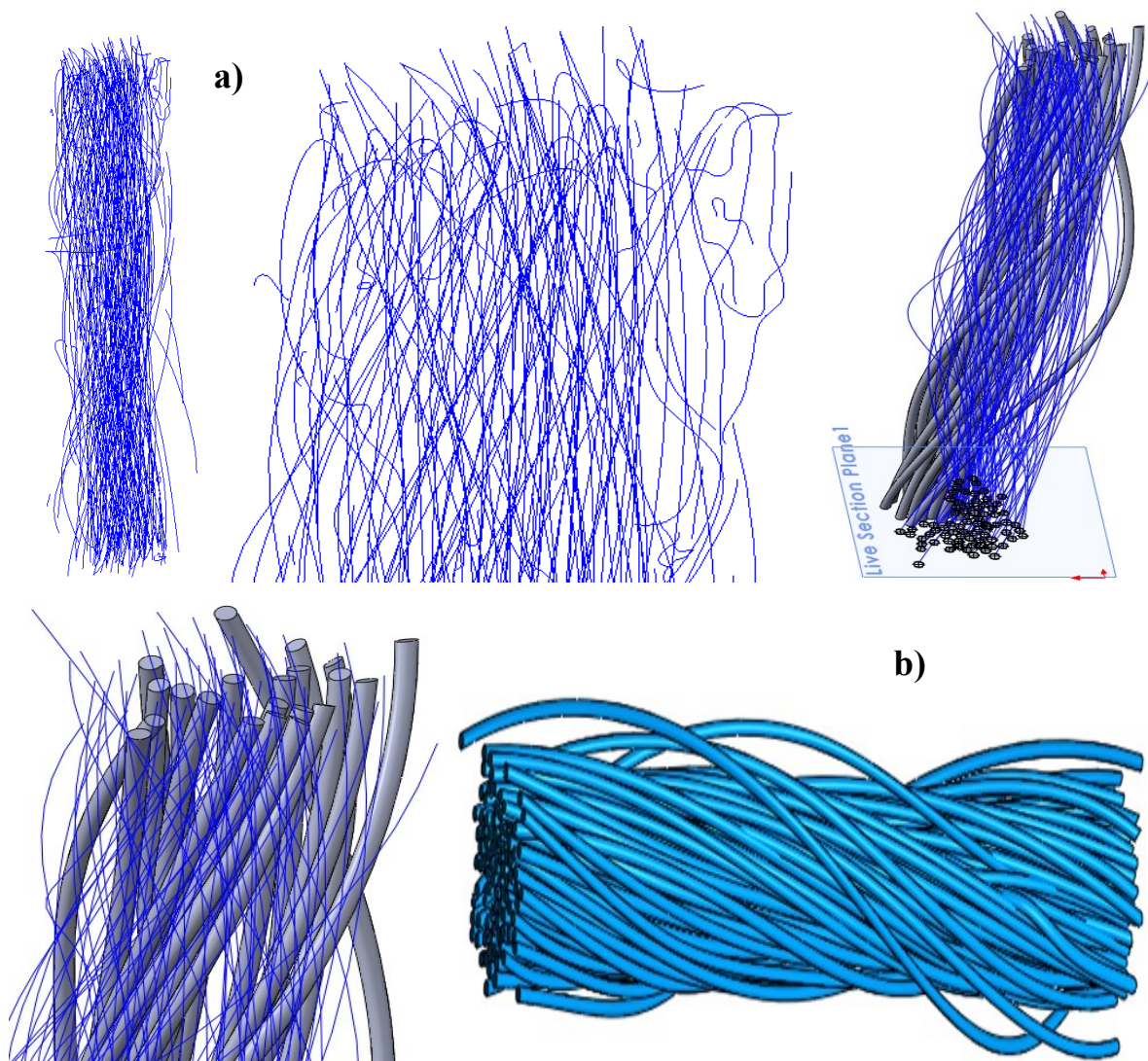
$$\frac{d^2 R}{ds^2} = -r_0 \left(\frac{d\psi}{ds} \right)^2 e_r + r_0 \frac{d^2 \psi}{ds^2} e_\psi + \frac{d^2 z}{ds^2} e_z \quad (5.5)$$

Uvedené parametrické rovnice (5.1–5.5) umožňují matematicky definovat geometrii i polohu libovolného vlákna a následně je lze použít pro tvorbu 3D geometrie modelu vlákenné příze v Creo Parametric. Na následujících grafech v obr. 5.10 je uvedena ukázka generování křivky požadovaného geometrického útvaru prostřednictvím parametrických rovnic. Parametry se definují v příkazovém editoru „Formula Editor“, kde lze zavést všechny vstupní parametry, tj. definovat proměnné funkce, křivky, geometrické tvary a rozměry, množství vlákenných pramenů atd. Princip postupu tvorby navíjení dobře popisuje také např. Stanova v [83]. Pro tvorbu trajektorie jednotlivých vláken lze následně vytvořit odpovídající trajektorie s definovanými průběhy křivosti v prostoru charakterizující zákruty, jak je uvedeno na obr. 5.11.



Obr. 5.10 Trajektorie jednotlivých vláken s definovanými průběhy křivosti v prostoru charakterizující zákruty prostřednictvím parametrických rovnic

Zvolená metoda optimalizovaného postupu tvorby 3D geometrie modelu vlákenné přize prostřednictvím parametrických rovnic následně umožnila tvorbu 3D modelu celé přize, jak je v jednotlivých krocích uvedeno na obr. 5.11. Na obr. 5.11a je přibliženo, že z jednotlivých křivek, které byly příkladově ukázány na obr. 5.10, byla vytvořena celá sestava resp. svazek střednic vláken. Následně střednice vláken posloužily jako osy budoucích vláken, které byly vytvořeny prostřednictvím tažení, kde byl definován průměr vlákna 0.025 mm a vygenerován finální tvar, který je uveden na obr. 5.11b.

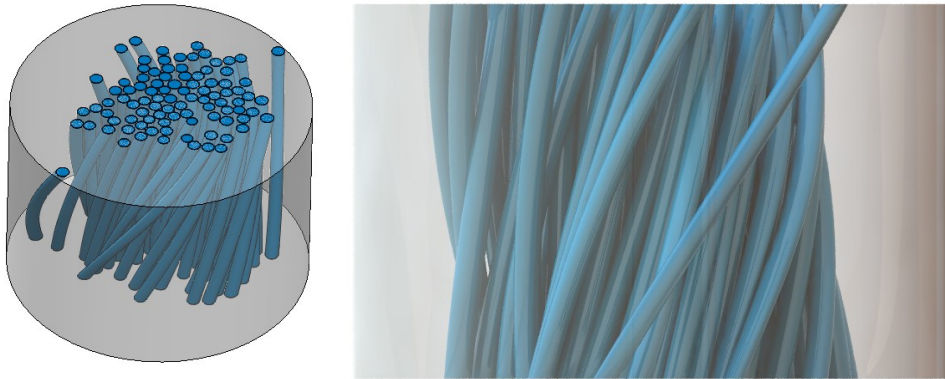


Obr. 5.11 Optimalizovaný postup tvorby 3D geometrie modelu vlákněné příze: a) Ukázka tvorby tažení trajektorie vláken s definovaným zákrutem, b) kompletní 3D model příze

5.3 Způsoby stanovení zaplnění 3D modelu vlákněné příze

Z vytvořené 3D geometrie modelu příze, která byla uvedena v kap. 5.2, byla stanovena hodnota zaplnění vlákněné příze. Objemovou definici zaplnění lze popsat podle rovnice (5.6), s tím že budeme při výpočtu zaplnění vycházet z obr. 5.12, který ukazuje řez přízí ve válcovém provedení. Zde byl zvolen objem vláken uložených ve válci jako V_{v1} a celkový objem válce jako V_c . Obecně platí, že objem vláken je roven, nebo menší, než celkový objem $V_{v1} \leq V_c$. Objem vzduchu se vyjádří jako rozdíl objemu celkového a objemu vláken $V_c - V_{v1}$. Výsledné

zaplnění μ je tedy definováno jako podíl objemu vláken V_{vl} ku celkovému V_c , přičemž zaplnění μ je bezrozměrné.

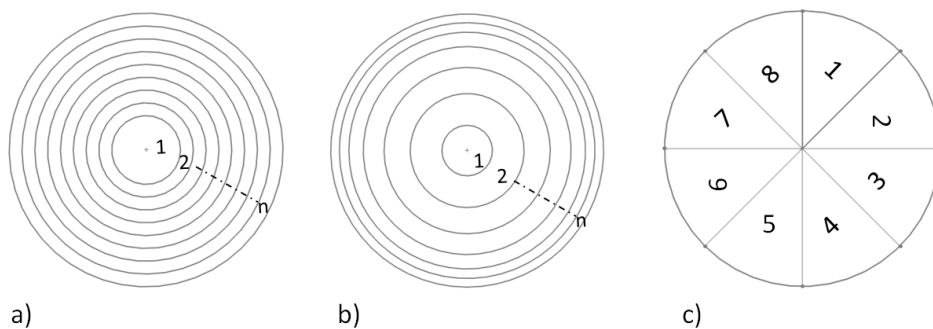


Obr. 5.12 Řez 3D geometrií modelu vlákněné příze uloženého do válce pro stanovení zaplnění

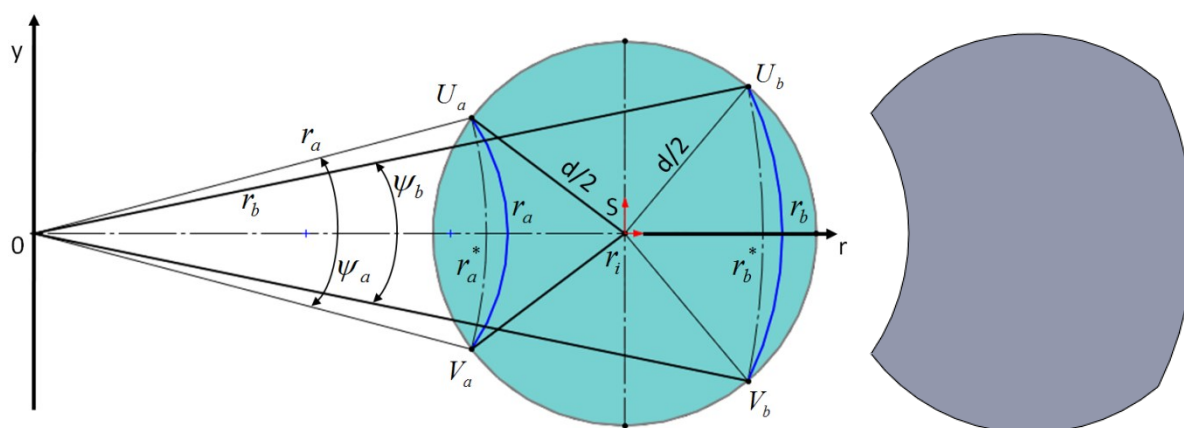
$$\mu = \frac{V_{vl}}{V_c} \quad (5.6)$$

Výpočet zaplnění lze posuzovat několika způsoby:

- Zaplnění může být získáno pomocí radiální analýzy, kde je plocha příze rozdělena do mezikruží s konstantním přírůstkem průměru mezikruží (obr. 5.13a).
- Dalším možným způsobem zjištění zaplnění může být zjištění pomocí radiální analýzy, kdy je plocha rozdělena do mezikruží se stejnou plochou mezikruží, přírůstek poloměru mezikruží není konstantní (obr. 5.13b).
- Zaplnění může být získáno pomocí axiální analýzy, kdy plocha příze je rozdělena do několika shodných výsečí (obr. 5.13c).



Obr. 5.13 Způsoby výpočtu zaplnění vláken v 3D modelu vlákněné příze



Obr. 5.14 Metoda výpočtu zaplnění vláken v 3D modelu vlákně příze

Plocha části kruhu vytvořeného válce podle obr. 5.12 je tvořena středem S a poloměrem $d/2$, kde se také nachází výšečové mezikruží, které neobsahuje vlákna s poloměry r_a ; r_b jak je patrné na obr. 5.14.

$$r_a \geq \left(r_i - \frac{d}{2} \right) \quad (5.7)$$

$r_b \geq \left(r_i - \frac{d}{2} \right)$ zároveň platí $r_a \leq r_b$ zkoumaná plocha je označena symbolem P .

Kde platí:

$$P = P^* - P_1 + P_2$$

P^* plocha části kruhu ležící mezi rovnoběžnými přímkami $U_a;V_a$ a $U_b;V_b$

P_1 plocha kruhové úseče, která je vyseknuta přímkou $U_a;V_a$ z kruhu a poloměru r_a

P_2 plocha kruhové úseče, která je vyseknuta přímkou $U_b;V_b$ z kruhu a poloměru r_b

Pro výpočet hodnot r_a^* a r_b^* lze využít standardních goniometrických funkcí.

5.4 Závěr a shrnutí kapitoly

Kapitola 5 se věnovala tvorbě pokročilé 3D geometrie modelu vlákenné příze, kde byly představeny možnosti tvorby 3D geometrie modelu příze (viz kap. 5.1), pomocí dvou metod využívajících CT snímků. Následně byl představen optimalizovaný postup tvorby 3D geometrie modelu vlákenné příze prostřednictvím parametrických rovnic, přičemž byla diskutována problematika časové náročnosti obou přístupů. Vlákenné struktury jsou ovlivněny zaplněním, proto na závěr byl uveden způsob stanovení zaplnění 3D modelu vlákenné příze (kap. 5.3), který bude při vyhodnocování výsledků aplikován.

6. Tvorba numerické simulace 3D modelu vlákněné příze pro stanovení mechanických vlastností

Obsahem kapitoly 6 je přiblížení tvorby numerické simulace 3D modelu vlákněné příze pro stanovení mechanických vlastností. V kapitole se pojednává o možnostech importu 3D modelu z CAD softwaru. Dále je uveden materiálový model, který byl přiřazen pro vlákněnou přízi. Dále jsou popsány přístupy a možnosti využití kontaktů mezi vlákny a stanovení koeficientu tření. Na závěr jsou definovány okrajové a počáteční podmínky.

6.1 Import 3D modelu vlákněné příze do MKP programu

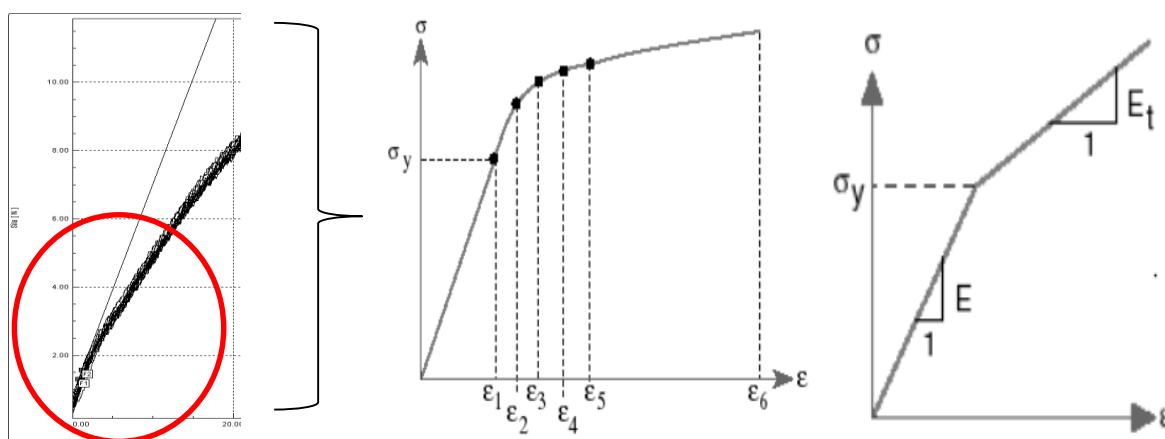
Sestavení numerického modelu vlákněné příze vychází z 3D modelu vlákněné příze, který byl vytvořen v kap. 5. 3D model vlákněné příze byl importován do konečněprvkového programu **ANSYS R20**, který je nainstalován v počítačových laboratořích TUL. Samotný import dat může proběhnout několika způsoby. **ANSYS Workbench** podporuje import mnoha různých formátů CAD souborů. Pokud jsou v modelu vyžadovány další úpravy před zahájením simulace, je možné načtenou geometrii otevřít a upravit ve vnitřním programu **ANSYS Space Claim** nebo **Design Modeler**. Dalším způsobem, jak načíst geometrii vytvořenou v CAD softwaru, je přímo v prostředí CAD, který je do ANSYS R20 implementován. V této práci byl použit způsob přímé importace vytvořeného 3D modelu vlákněné příze jak je ukázáno na obr. 6.1.



Obr. 6.1 Importovaný 3D model vlákněné příze do MKP programu

6.2 Materiálový model vlákenné příze

Materiálový model vlákenné příze by měl odpovídat průběhu nelineární závislosti síly na prodloužení, resp. napětí na deformaci, jak bylo uvedeno v kap. 4 a také diskutováno v kap. 2. Samotné vlákno lze obecně charakterizovat lineárními mechanickými vlastnostmi, jak uvádí např. [78]. Lze proto pro matematický popis materiálového chování vycházet ze základního lineárního vztahu mezi napětím a deformací, tedy že vlákna jsou schopna v rámci malých deformací se pružně deformovat. Dále lze postupně rozšířit Hookeův zákon na zobecnění ortotropního či anizotropního materiálu, jak se může charakterizovat chování vlákenné příze (viz Příloha 5). Z měření (kap. 4) bylo patrné, že závislost síly na protažení vlákenné příze je v počáteční fázi nelineární a následně má lineárnější průběh do oblasti přetržení. Takové chování lze popsat bilineárním modelem, který popisuje závislosti mezi napětím a deformací prostřednictvím modulu pružnosti, Poissonova čísla a tečného modulu, jak je schématicky přiblíženo na obr. 6.2.



Obr. 6.2 Bilineární model pro popis vlákenné příze

Vlákenná příze byla z polyesterového materiálu (PES_40 TEX), tedy základní fyzikální vlastnosti odpovídají materiálu polyesteru. Všechny potřebné hodnoty pro tvorbu odpovídajícího materiálového modelu jsou uvedeny v tab. 6.1. V tabulce 6.1 jsou také uvedeny hodnoty oceli pro materiálový model desek pro stlačování příze.

Tab. 6.1 Materiálový model vlákenné příze pro numerickou simulaci

Materiál	Hustota [kg m ⁻³]	Elastický modul [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Objemový modul [MPa]	Smykový modul [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Tangent. modul [MPa]
PES	1339	0,33	0,388	0,491	0,118	0,0090	0,0095
Ocel	7850	200000	0,3	166670	76923	-	-

6.3 Volba vhodných kontaktů mezi vlákny

Volba vhodného typu kontaktu je klíčová a musí odpovídat charakteru problému, který je řešen. Při modelování příze se řeší povrchové tření mezi jednotlivými vlákny, čímž je limitován výběr vhodných typů kontaktů. Většina standardních typů kontaktů je pro tento model nevhodná. Při modelování se v některých případech nelze vyhnout použití nelineárních kontaktních míst. Pro dosažení optimálních výsledků je nezbytné tyto nelineární kontakty využívat, avšak nelineárnost způsobí zvýšení výpočetní náročnosti a to může vést k potížím s konvergencí výpočtu.

Obecně máme několik typů kontaktů:

- **Bonded** – Tento typ kontaktu je nejčastěji používaný. Vytváří pevný spoj mezi dvěma povrchy nebo hranami a je proto využíván pro pevně spojená tělesa jako jsou sváry nebo lepené spoje. Jedná se o lineární typ kontaktu, neboť délka či kontaktní plocha se při aplikaci zatížení nezmění. Pro modelování tření není tato varianta vhodná, ale pomocí tohoto kontaktu lze pevně spojit jednotlivé části modelu.
- **No separation** – Tento typ kontaktu je podobný předchozímu kontaktu Bonded. Nabízí omezenější možnosti uplatnění a to pouze na plochy u 3D modelů a hrany u 2D modelů. Oddělení není povoleno, podobně jako u kontaktu Bonded. Je však umožněn malý pohyb podél aplikované geometrie, ale bez tření. Pro účely většího tření není vhodný, stejně jako v případě Bonded.
- **Frictionless** – Jedná se o první z nelineárních kontaktů, jelikož kontaktní plocha se může měnit s aplikovaným zatížením. Po jeho použití není pohyb v normálovém směru povolen. Používá se pro modelování symetrie nebo tam, kde k pohybu

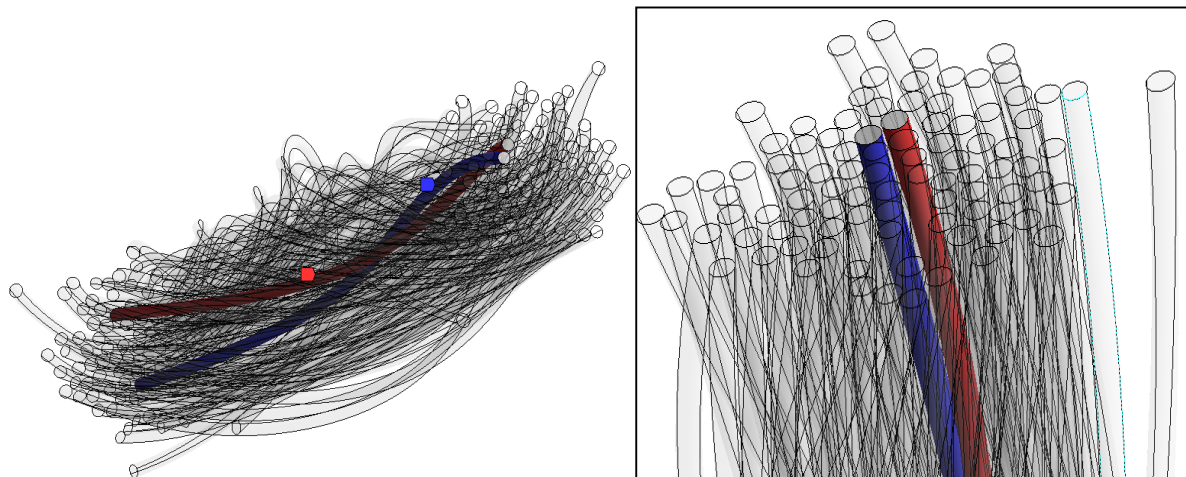
v normálovém směru nedochází a zároveň tření mezi povrchy může být zanedbatelné. Tento kontakt neumožňuje tření a povrchy po sobě kloužou bez odporu. Je to první použitelný kontakt pro úsporu počtu prvků a pro zkoumání situací, kde tření není klíčové.

- **Rough** – U tohoto nastavení nedochází k žádnému skluzu po kontaktních plochách, ale na rozdíl od kontaktu No separation se mohou plochy od sebe oddálit. Modeluje velmi hrubý povrch s nekonečným koeficientem tření, což je opět nelineární kontakt.
- **Frictional** – Tento kontakt je odpovídající variantou pro modelování tření mezi vlákny, kterou program ANSYS nabízí. Kontaktní páry přenášejí smykové napětí, které pokud dosáhne určité velikosti, způsobí, že se plochy začnou po sobě posouvat. Tento stav je označován jako "sticking" (slepení). Je definováno smykové napětí, při jehož překročení dojde ke skluzu. Nastavuje se koeficient tření, který může nabývat libovolné nezáporné hodnoty v rozsahu 0–1.

6.3.1 Určení součinitele smykového tření mezi vlákny

Pro stanovení odpovídajícího tření mezi vlákny a definování kontaktní vazby „*Frictional*“ bylo nutné určit součinitele smykového tření. Hodnoty koeficientů tření se často liší v závislosti na kombinaci použitých materiálů. Tyto hodnoty mohou být velmi nízké, až teoreticky dosahovat hodnoty 1. Specifickým případem je tření lomových ploch, kde dochází ke kontaktu dvou povrchů, který je jednodušší. Pro stanovení hodnoty tření je tedy nutné brát v úvahu materiál, z něhož jsou vlákna vyrobena a dalším významným faktorem ovlivňujícím koeficient tření, je stav povrchů. Rozdíly v míře mazání jsou zásadní (např. suchým povrchem a mazaným povrchem). Tyto rozdíly jsou často výraznější než ty, které jsou způsobeny použitím různých materiálů. Drsnost povrchů a míra mazání vedou k tomu, že koeficient tření je proměnlivá veličina s vysokým rozptylem. Je také důležité si uvědomit, že rozlišujeme mezi statickým koeficientem tření a dynamickým koeficientem tření. Pro naše účely jsou relevantní statické hodnoty, které jsou uvedeny pro suché a mazané povrchy. V publikacích je uvedeno, že pro vlákna polyesteru lze uvažovat součinitel statického smykového tření mezi vlákny, které má hodnotou $f = 0,58$, jak uvádí např. Militký [87]. Definování kontaktu s označením Frictional bylo zavedeno na obvodové plochy vláken příze, jak je pro jeden příklad kontaktu mezi vlákny

uvedeno na obr. 6.3. Plochy jsou označeny červenou a modrou barvou vyjadřující Slave a Master plochu⁴.



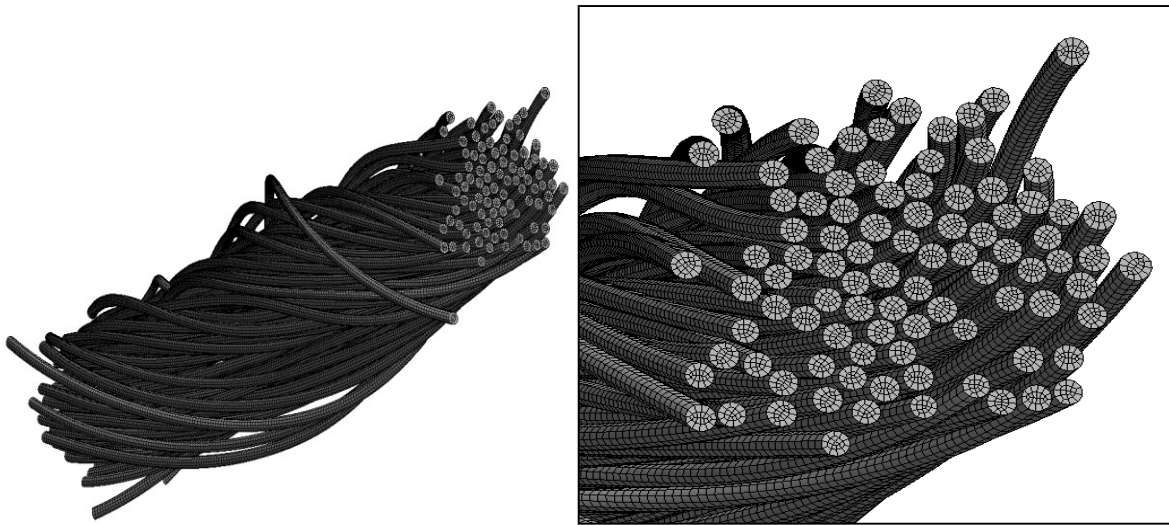
Obr. 6.3 Vytvořené kontaktní dvojice (vlevo), detailní zobrazení (vpravo)

6.4 Tvorba sítě konečných prvků vlákněné přize

Protože se vytvořil 3D model vlákněné přize, který byl importován do prostředí programu ANSYS, viz kap. 6.1, bylo nutné vytvořit na daném modelu odpovídající diskretizaci konečných prvků pro numerický výpočet. Metody síťování – generování sítě jsou proto důležitým nástrojem v programu ANSYS. Cílem metody síťování je rozdělit geometrii modelu na menší části, nazývané prvky, které se následně používají k aproximaci chování materiálu a provádění výpočtů. ANSYS nabízí několik různých metod síťování, které jsou vhodné pro různé typy geometrií. Použít lze několik základních metod vytvoření sítě v simulačním programu ANSYS. První metodou je manuální metoda síťování. Tato metoda umožňuje uživateli ručně vytvářet síť pomocí bodů, čar a ploch. Uživatel má plnou kontrolu nad tvarem a hustotou sítě. Ruční metoda vytváření sítě může být časově náročná a vyžaduje pokročilé zkušenosti s MKP. Program ANSYS poskytuje různé algoritmy pro automatické generování sítě. Tyto algoritmy se snaží vytvořit kvalitní síť s minimálním zásahem uživatele. Například metoda "*Tetrahedron*" generuje síť pomocí čtyřstěnnů, zatímco metoda "*Hexahedron*" používá

⁴Pozn. Pro některé simulace v závislosti na složitosti problému a usnadnění výpočtu by mohlo být zanedbáno tření mezi vlákny (simulace bez tření vláken) nebo by mohla být alternativně použita možnost kontaktu Frictionless. Avšak v disertační práci byl řešen komplexní přístup modelování vláken, proto byl využit typ kontaktu Frictional s koeficientem tření.

šestistěny. Další metodou zavedení sítě je tzv. Adaptivní síťování. Tato metoda umožňuje sledování změn sítě na základě výsledků z analýzy. Síť se může přizpůsobit změnám v oblastech pozorovaného zájmu, což umožňuje efektivnější výpočty a vyšší přesnost výsledků. Adaptivní síťování umožňuje dynamicky upravovat síť (*mesh*) během analýzy na základě výsledků. Tato metoda přináší několik výhod. Patří k nim např. zvýšená přesnost, protože Adaptivní síťování umožňuje koncentrovat síť ve vyšetřovaných oblastech, kde dochází k výrazným změnám v chování materiálu nebo kritickým deformacím. Tím se dosahuje vyšší přesnosti výsledků v těchto klíčových oblastech, respektive v místech nejvyšší potřeby. Za pomoci Adaptivního síťování lze optimalizovat hustotu sítě v celém modelu tak, aby bylo dosaženo požadované přesnosti výsledků při minimalizaci výpočetní náročnosti. Hustota sítě se může automaticky zvýšit v oblastech s vysokým gradientem a snížit v oblastech s nízkým gradientem zaplnění elementů, což vede k rychlejším výpočtům. Využití adaptivního síťování umožňuje uživatelům upravovat a optimalizovat síť během analýzy. Uživatelé mohou definovat kritéria pro adaptivní změny sítě, například na základě hodnot veličin, jako je deformace, napětí, teplota, tok nebo jiné parametry. To umožňuje přizpůsobit síť specifickým požadavkům analýzy a získat relevantní a přesné výsledky. Adaptivní síťování je užitečné pro modelování složitých geometrií, kde se výrazně mění detaily nebo oblasti zájmu. Tato metoda umožňuje přesně modelovat a analyzovat tyto oblasti, aniž by bylo nutné použít velmi jemnou a náročnou síť v celém modelu. Při provádění síťování je důležité dbát na kvalitu sítě. Kvalitní síť by měla obsahovat dostatečnou hustotu prvků v oblastech s vysokým zakřivením nebo změnou vlastností materiálu, ale zároveň by měla být dostatečně hrubá, aby výpočet nebyl příliš náročný vzhledem k hardwarovému vybavení. Optimální volba metody síťování v programu ANSYS závisí na konkrétní geometrii modelu a požadované přesnosti výpočtu. Síťovací prostředí poskytuje uživatelům různé nástroje a možnosti, které umožňují efektivní generování a úpravu sítě pro jejich konkrétní potřeby při výpočtu metody konečných prvků. **Pro vlákněnou přízi byl zvolen hexagonální objemový element.** V *Body sizing* byly detailněji nastaveny parametry zvětšení elementů na hodnotu 0,005 mm a pro některé oblasti 0,01 mm. Po celé délce vláken byla do ploch zavedena metoda *Face Meshing*, která jednotlivé elementy přetransformovala do mapované sítě po celém objemu vlákněné příze. Vytvořený MKP model vlákněné příze, který je uveden na obr. 6.4, měl 504483 prvků a 669041 uzlů.



Obr. 6.4 Navržená síť konečných prvků vlákenné příze pro numerické simulace

6.5 Definice okrajových a počáteční podmínek

Okrajové a počáteční podmínky jsou klíčovým prvkem a určitým větším či menším zjednodušením pro provedení numerické simulace. Při vytváření okrajových podmínek je důležité správně definovat chování vlákenné příze na hranicích nebo povrchu. Proto správná volba okrajových podmínek je nezbytná pro získání odpovídajících výsledků simulace. Existuje několik typů okrajových podmínek, které můžeme využít v programu ANSYS v závislosti na požadavcích charakteru řešeného problému a celkovém pojetí modelu.

Některé používané okrajové podmínky jsou:

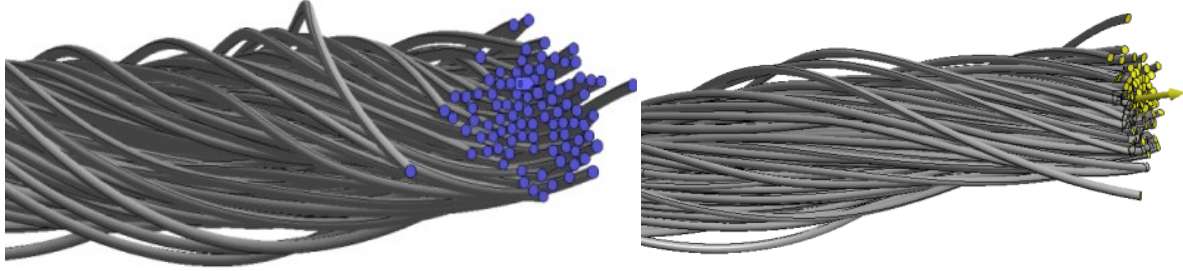
- i. Okrajová podmínka uložení pevného nebo flexibilního tělesa. Příkladem použití je *Fixed Support*. Tato podmínka se používá pro zakotvení modelu na určitých místech, kde se nepřipouští pohyb, popř. rotace. Pokud je například potřeba analyzovat pevnou konstrukci a řešit její chování při různých zatíženích, lze nastavit podmínku pevného tělesa na místech, kde je konstrukce pevně ukotvena.
- ii. Další okrajovou podmínkou pro fixaci, kterou je možné využít, nebo pro povolení pohybu v daném směru, je OP "*displacement*". V programu ANSYS je známá také jako "nucená pohybová podmínka". *Displacement*, se používá k vynucení přesného pohybu nebo deformace v určitých místech

modelu. Tato podmínka umožňuje definovat konkrétní posunutí nebo deformaci na daném uzlu či místě a simulovat tak chování systému v souladu s těmito vynucenými parametry. Pomocí nástroje pro výběr je vybráno místo na modelu, kde bude aplikována okrajová podmínka. Podmínka umožňuje vybrat jednotlivé uzly, hrany nebo povrchy. Správná volba a definice okrajové podmínky "*displacement*" je závislá na konkrétním problému a modelu, který bude analyzován. Je nutné se řídit fyzikálními vlastnostmi systému a zvolit taková místa a hodnoty, které odpovídají požadované charakteristice chování.

- iii. Silová okrajová podmínka – *Loads*. Tyto podmínky reprezentují vnější síly nebo momenty, které působí na model. Takto můžeme definovat konstantní, nebo proměnné zatížení, které může být aplikováno na povrchu, hraničním bodu, nebo na vnitřním bodu modelu. Například při analýze pevnosti konstrukce může být definované zatížení v podobě síly nebo tlaku, které působí na povrch konstrukce.
- iv. Teplotní okrajová podmínka – *Temperature*. Tyto teplotní podmínky se používají pro modelování tepelného chování materiálu. Lze zavést konstantní teplotu nebo gradient teploty na povrchovém, nebo vnitřním bodě modelu. To je užitečné při analýze šíření tepla v materiálu, nebo při simulaci tepelného namáhání konstrukce.
- v. Symetrická okrajová podmínka, nebo tzv. periodická podmínka (*Symmetry/Periodic*). Symetrické podmínky se používají, pokud je možné využít symetrie modelu, nebo když se jedná o periodický problém. Symetrické podmínky umožňují snížit výpočetní náročnost a zjednodušit analýzu. Periodické podmínky se mohou použít v případech modelování, kde model vykazuje opakované (periodické) chování geometrie.

Pro numerickou simulaci vlákenné příze byly vybrány dva druhy okrajových podmínek. **První okrajová podmínka - Fixed** byla umístěna na koncové plochy vláken (modrá barva), která zabraňovala rotacím a posuvům ve všech směrech (obr. 6.5 vlevo). **Druhá okrajová podmínka – displacement** pro řízené natahování byla aplikována také na koncové plochy vláken, ale na opačnou stranu, jak je patrné na obr. 6.5 vpravo. Příkazová definice umožňovala v jednotlivých směrech zadat hodnoty posunutí v závislosti na natočení kartézského souřadného

systému. Z této možnosti byl vybrán jeden směr posuvu, do kterého byla zavedena lineární hodnota posuvu 0,25 mm při rychlosti 100 mm.min⁻¹. Zbývající hodnoty byly nastaveny na nulovou hodnotu a tím byl model zbaven dalších stupňů volnosti.



Obr. 6.5 Numerický model vlákenné příze pro tahové namáhání: fixační okrajová podmínka (vlevo), posuvná okrajová podmínka (vpravo)

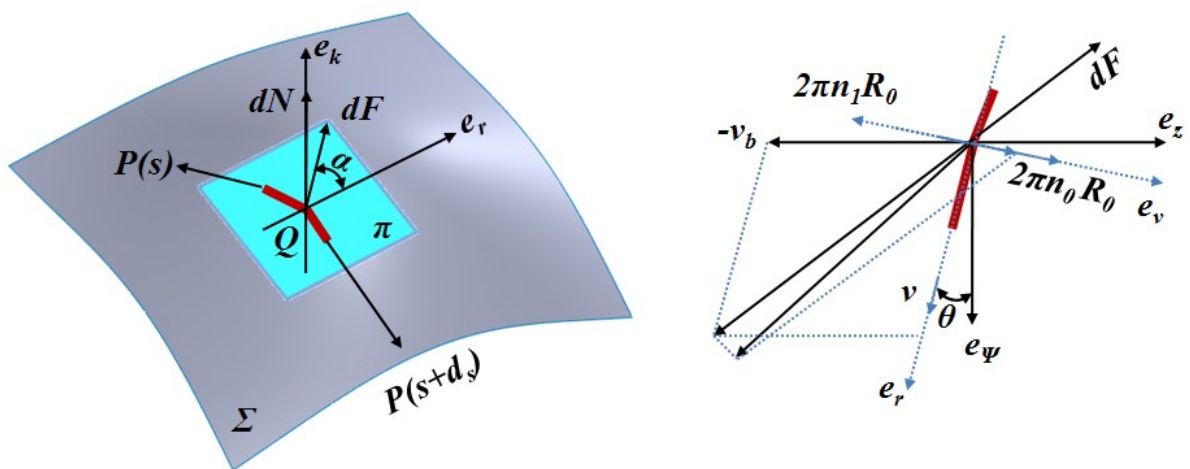
Při tahové deformaci vzniká silové působení, které je dáno jednak jednotlivými silovými poměry ve vláknech příze, kde výsledný součet všech sil je ovlivněn velikostí zákrutu daného vlákna, ale také kontakty mezi vlákny, které způsobují třením mezi vlákny větší silový účinek, jak popisuje např. Tang v [84]. To si lze představit rozložením silového působení mezi vlákny, jak je schématicky uvedeno na obr. 6.6, kde je patrné, že k silovému účinku F přibude další silový přírůstek P . Tento charakter lze následně popsat prostřednictvím rovnice (6.1).

$$m \left(\frac{D^2 \mathbf{R}}{Dt^2} + 2\omega \mathbf{e}_z \times \frac{D\mathbf{R}}{Dt} + \omega^2 \mathbf{e}_z \times (\mathbf{e}_z \times \mathbf{R}) \right) = \frac{\partial}{\partial S} \left(T \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial S} \right) + \mathbf{F} \quad (6.1)$$

kde:

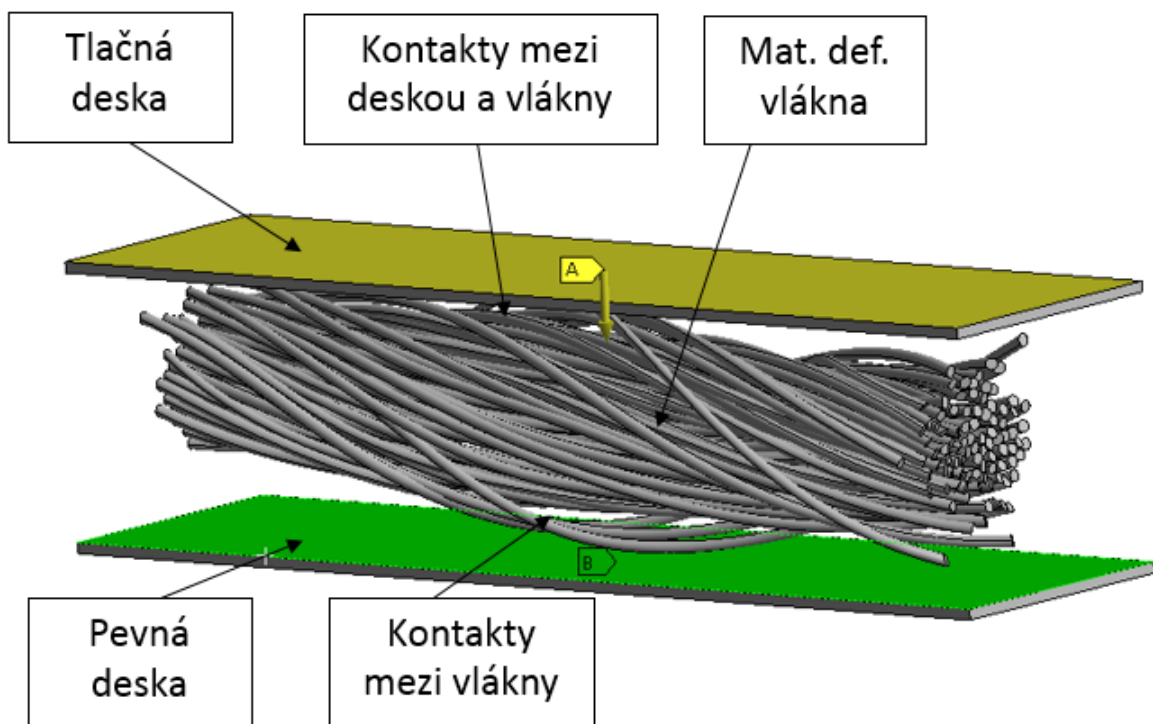
$$F = -D_n |v_n| v_n, \quad \frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial S}, \quad \bar{R} = \frac{R}{a} = \bar{r} e_r + \bar{z} e_z, \quad \bar{s} = \frac{s}{a}, \quad \bar{v}_n = \frac{v}{\omega d}, \quad \bar{T} = \frac{T}{m \omega^2 \alpha},$$

$$\bar{F} = \frac{F}{m \omega^2 \alpha}, \quad \Omega^{-2} \frac{d^2 \bar{R}}{ds^2} + 2\Omega^{-1} e_z \times \frac{d\bar{R}}{ds} + e_z \times (e_z \times \bar{R}) = \frac{d}{ds} \left(\bar{T} \frac{d\bar{R}}{ds} \right) + \bar{F},$$



Obr. 6.6 Působící síly v kontaktním dotyku mezi vlákny v přízi

Dále byla provedena simulace stlačování vlákněné příze mezi dvěma paralelními tuhými deskami pro stanovení příčné tuhosti. Tlačná deska o základních rozměrech 3x0,83 mm byla umístěna s přesahem příze 0,5 mm (žlutá barva). Následujícím krokem bylo umístění spodní části vlákněné příze do tečného kontaktu se spodní deskou (zelená barva), jak je uvedeno na obr. 6.7.



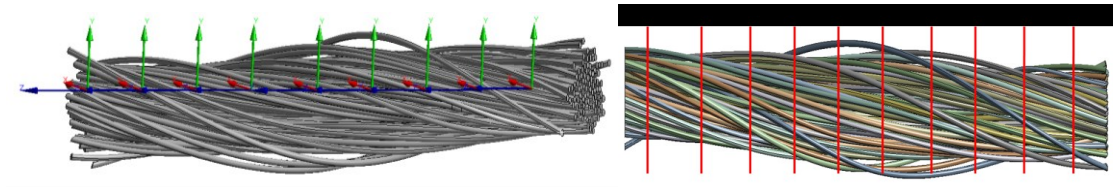
Obr. 6.7 Numerický model vlákněné příze pro tlakové namáhání

Spodní deska měla zavedenu fixační okrajovou podmínku, která zamezovala pohybu ve všech stupních volnosti resp. posuvu a rotaci ve všech směrech. Tlačné desce byla definována rychlost stlačování $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, stejně jako při natahování.

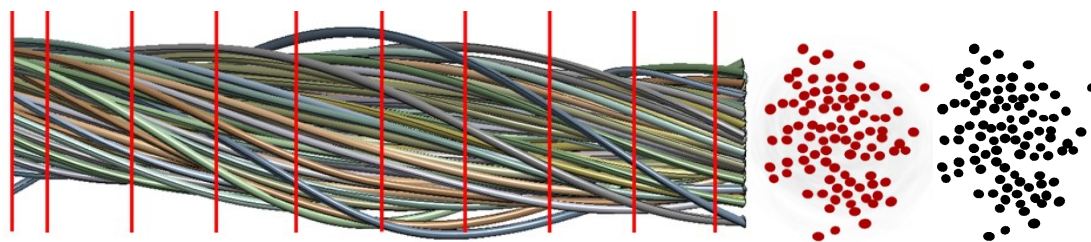
6.5.1 Přiřazení souřadnicových systémů pro okrajové a počáteční podmínky

S definováním okrajových a počátečních podmínek souvisí také přiřazení souřadnicových systémů pro výpočetní model. Souřadnicové systémy lze rozdělit do čtyř základních skupin. První je Globální Souřadnicový Systém (GSS), kde je standardní referenční umístění, do kterého vstupuje model se všemi částmi (vlákněná příže, desky). GSS je obvykle definován podle pravotočivého kartézského systému. Ve druhé skupině se nacházejí Lokální Souřadnicové Systémy (LSS), jsou oproti GSS posunuté. LSS mohou být vytvořeny podle potřeby uživatele, aby odpovídaly specifickým oblastem vlákněné příže nebo komponentám daného modelu. LSS můžeme rozdělit do podskupiny kartézské, válcové nebo sférické podle typu úlohy, která je řešena. LSS umožňují snadnější zadávání okrajových podmínek nebo zatížení v oblastech, kde by použití GSS bylo nepraktické nebo příliš složité. Do třetí skupiny se řadí uživatelsky definované souřadnicové systémy (UDSS). UDSS vytváří vlastní systémy v pozicích, které jsou vhodné pro analýzu a detekci (např. lokální deformace či napětí). UDSS mohou být přesunuty, otočeny nebo transformovány podle potřeby simulace. V poslední skupině se nachází souřadnicové systémy související s objekty (SSSO). Program ANSYS umožňuje vložení SSSO, jako jsou body, čáry, plochy nebo tělesa. Tyto systémy se pak pohybují nebo otáčejí společně s objekty, ke kterým jsou připojeny. Při práci se souřadnicovými systémy je důležité v programu ANSYS použít konvence pro definování směru os a pravidla pro pravotočivé a levotočivé systémy, a také jak se jednotlivé typy elementů chovají při transformacích souřadnicových systémů (obr. 6.8). V programu ANSYS byly vytvořeny pomocné souřadnicové systémy na vlákněné přízi, které byly dále využity pro zobrazení jednotlivých řezů (obr. 6.8 vpravo). Do jednotlivých souřadnicových systémů byly nastaveny hodnoty odsazení od počáteční průřezové plochy. Jednotlivé vzdálenosti odsazených ploch byly přepočítány na konečnou hodnotu vyšetřovaného úseku deformace. Všechny vytvořené systémy byly stejným způsobem kalibrovány podle GSS. Do importované geometrie v programu ANSYS jsou vloženy souřadnicové systémy ekvidistantně v závislosti na aktuální

délce deformované příze v deformačních krocích 0, 2, 4, 6, 8 a 10 % prostřednictvím paralelních rovin (obr. 6.9).



Obr. 6.8 Vytvoření souřadnicových systémů a vytvoření délkových úseků pro odečet ploch



Obr. 6.9 Rozmístění jednotlivé plochy (vlevo), odečtená středová plocha s charakteristickým zaplněním vláken (vpravo)

6.6 Závěr a shrnutí kapitoly

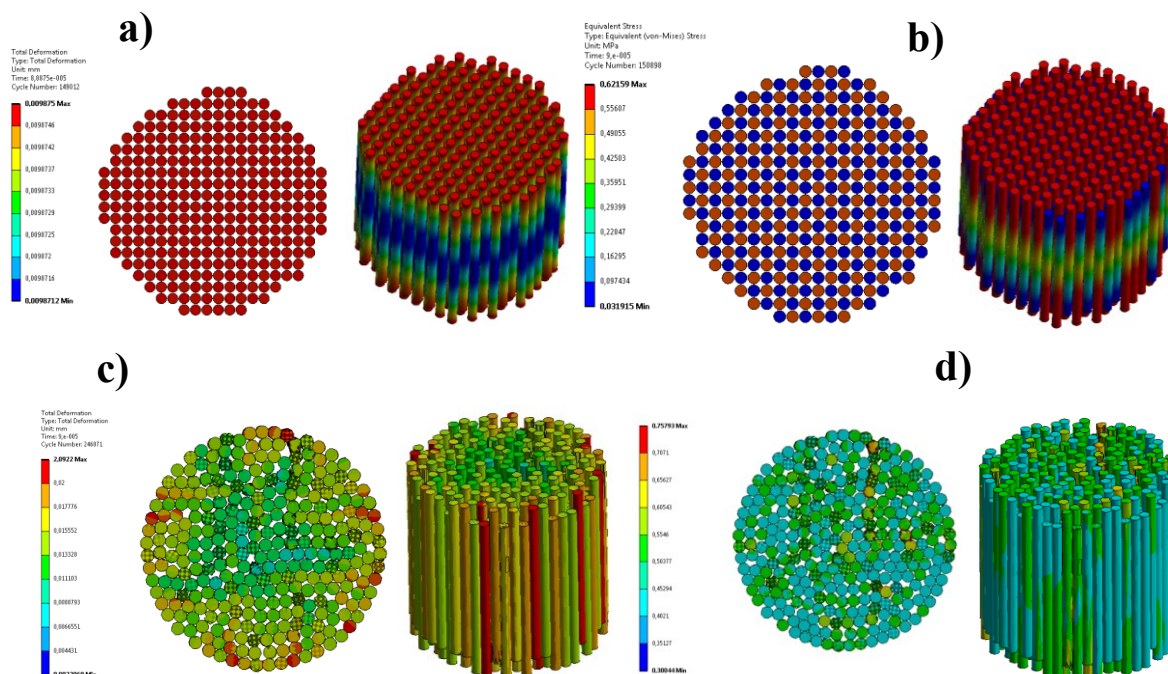
Tato kapitola popsala tvorbu pokročilého numerického modelu a stanovené dílčí úkony pro simulaci vlákenné příze při tahovém a tlakovém namáhání. V jednotlivých podkapitolách jsou uvedeny postupy importu 3D modelu vlákenné příze do MKP programu (viz kap. 6.1). Pro materiálový model vlákenné příze byl vybrán bilineární model, který popisuje závislosti mezi napětím a deformací prostřednictvím modulu pružnosti, Poissonova čísla a tečného modulu (kap. 6.2). Dále byla diskutována problematika vhodného typu kontaktu, který je klíčový pro odpovídající silové působení mezi vlákny a také ovlivňuje tvorbu sítě konečných prvků (viz kap. 6.3). Při modelování příze se řeší povrchové tření mezi jednotlivými vlákny, čímž je limitován výběr vhodných typů kontaktu a také výběr KP. Na závěr je uvedeno definování okrajových a počátečních podmínek, kde se navrhly pro tahovou zkoušku stejné okrajové podmínky, jako při měření viz kap. 4 a provedla se příprava numerické simulace stlačování vlákenné příze (kap. 6.5). Lze konstatovat, že byl přiblížen kompletní přístup tvorby numerické simulace 3D modelu vlákenné příze, jehož výsledky budou uvedeny v následující kapitole.

7. Výsledky numerické simulace 3D modelu vlákně příze

V této kapitole bylo provedeno vyhodnocení jednotlivých výsledků numerických simulací z vytvořených 3D modelů vlákně příze. Nejprve byly uvedeny výsledky ideálního modelu vlákně příze a následně pokročilého 3D modelu vlákně příze se zákruty při tahovém a tlakovém namáhání. Dále je také uvedeno porovnání výsledků s experimenty a jsou uvedeny výpočty zaplnění při stlačování příze.

7.1 Výsledky numerické simulace ideálního modelu vlákně příze při tahovém a tlakovém namáhání

Numerická simulace ideálního modelu vlákně příze (obr. 5.2) byla provedena podle jednotlivých kroků uvedených v kap. 6. Na následujícím obr. 7.1 jsou uvedeny výsledky pro tahové a tlakové namáhání podle okrajových podmínek dle kap. 6.5.

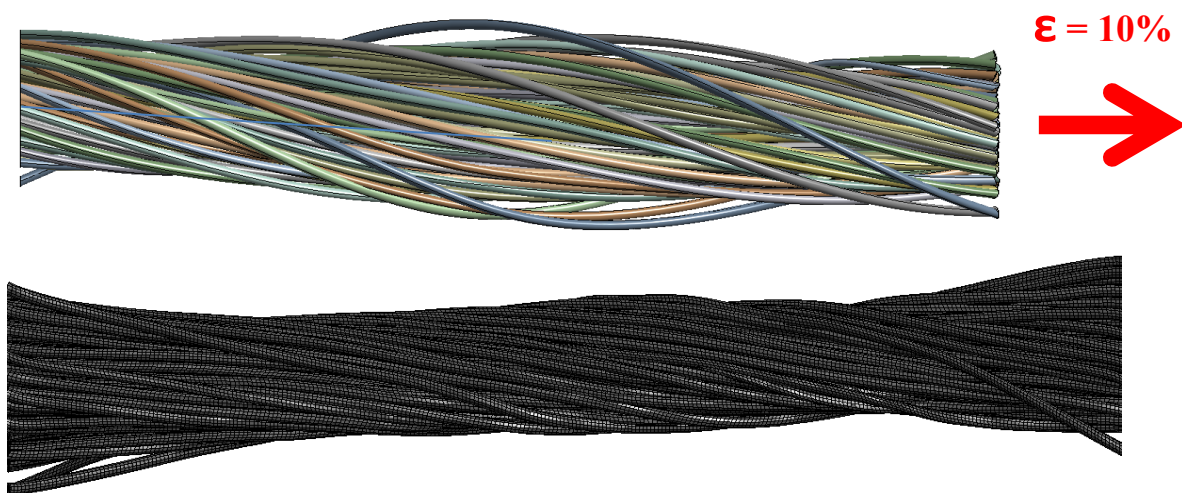


Obr. 7.1 Výsledky numerické simulace ideálního modelu vlákně příze při tahovém namáhání: a–b) maximální deformace a napětí ve vláknech v závislosti na posuvu, c–d) deformace a napětí ve vláknech při aplikovaném radiálním stlačení

Z výsledků uvedených na obr. 7.1 je patrné, že při tahovém namáhání se vlákna vzájemně posouvají a při deformaci 10 % je ve vzorku vlákenné příze napětí $620 \cdot 10^{-3}$ MPa (obr. 7.1 a, b). Je také patrné, že nedochází k reorganizaci vláken. Při rozboru výsledků tlakového namáhání je patrné, že dochází k přetvoření ideální struktury vláken a vlákna se při stlačení reorganizují. Při stlačení 0,02 mm dosahuje největší hodnota napětí $757 \cdot 10^{-3}$ MPa (obr. 7.1 c, d). Lze konstatovat, že z výsledků je patrné rovnoměrné rozložení deformace a napětí, což nemusí být problém pro studii tuhosti vlákenné příze, ale reálná příze se zákruty bude reorganizovat vlákna nerovnoměrně, což se následně projeví zvýšením napětí v některých částech modelu při shodné hodnotě deformace.

7.2 Výsledky numerické simulace pokročilého modelu vlákenné příze tahového namáhání

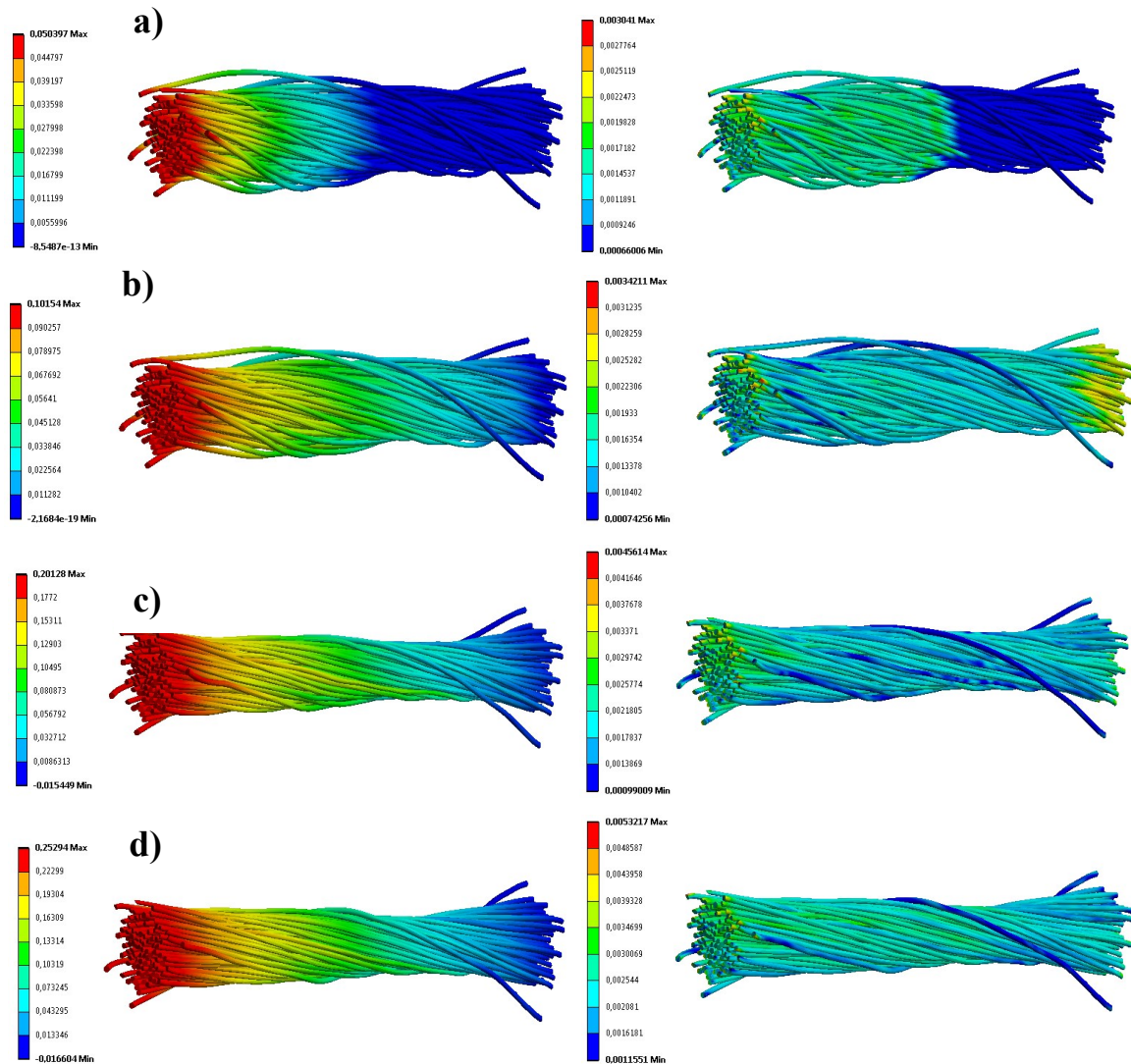
Výsledky numerické simulace pokročilého modelu vlákenné příze při tahovém namáhání ukázaly reorganizaci vláken mezi počátečním uspořádáním vláken v $t=0$ a natažením vláken při deformaci 10 % v $t=t_1$, jak je patrné na obr. 7.2.



Obr. 7.2 Výsledky deformace pokročilého modelu vlákenné příze při tahovém namáhání

Z výsledků uvedených na obr. 7.3a je patrné, že při 4% deformaci původní délky vlákenné příze, byla odečtena maximální délka protažení 0,1 mm. Maximální vzniklé napětí podle hypotézy HMH (von-Misses) při takovéto deformaci je $342 \cdot 10^{-3}$ MPa. V celém modelu vlákenné příze byly pozorovány průměrné hodnoty napětí $193 \cdot 10^{-3}$ MPa v průběhu natahování, které vznikaly po celé délce, a průměru příze, což je téměř dva-krát méně než maximální

hodnota (obr. 7.3b). Při protažení o 6 % původní délky vlákněné příze odpovídající maximální délce protažení 0,15 mm bylo maximální vzniklé napětí $392 \cdot 10^{-3}$ MPa a v celém modelu příze byly pozorovány průměrné hodnoty napětí $210 \cdot 10^{-3}$ MPa.



Obr. 7.3 Výsledky rozložení deformace a napětí pokročilého modelu vlákněné příze při tahovém namáhání v jednotlivých časových úsecích natahování

V 8% deformaci (0,2 mm protažení) celkové délky vlákněné příze byla naměřená hodnota maximálního vzniklého napětí $456 \cdot 10^{-3}$ MPa, jak je patrné na obr. 7.3c. V celém modelu vlákněné příze byly pozorovány průměrné hodnoty napětí okolo $257 \cdot 10^{-3}$ MPa. Při konečné 10% deformaci celkové délky vlákněné příze, tedy při maximální hodnotě délky protažení 0,25 mm, byla stanovena maximální hodnota napětí $532 \cdot 10^{-3}$ MPa (obr. 7.3). Výsledky také ukazují,

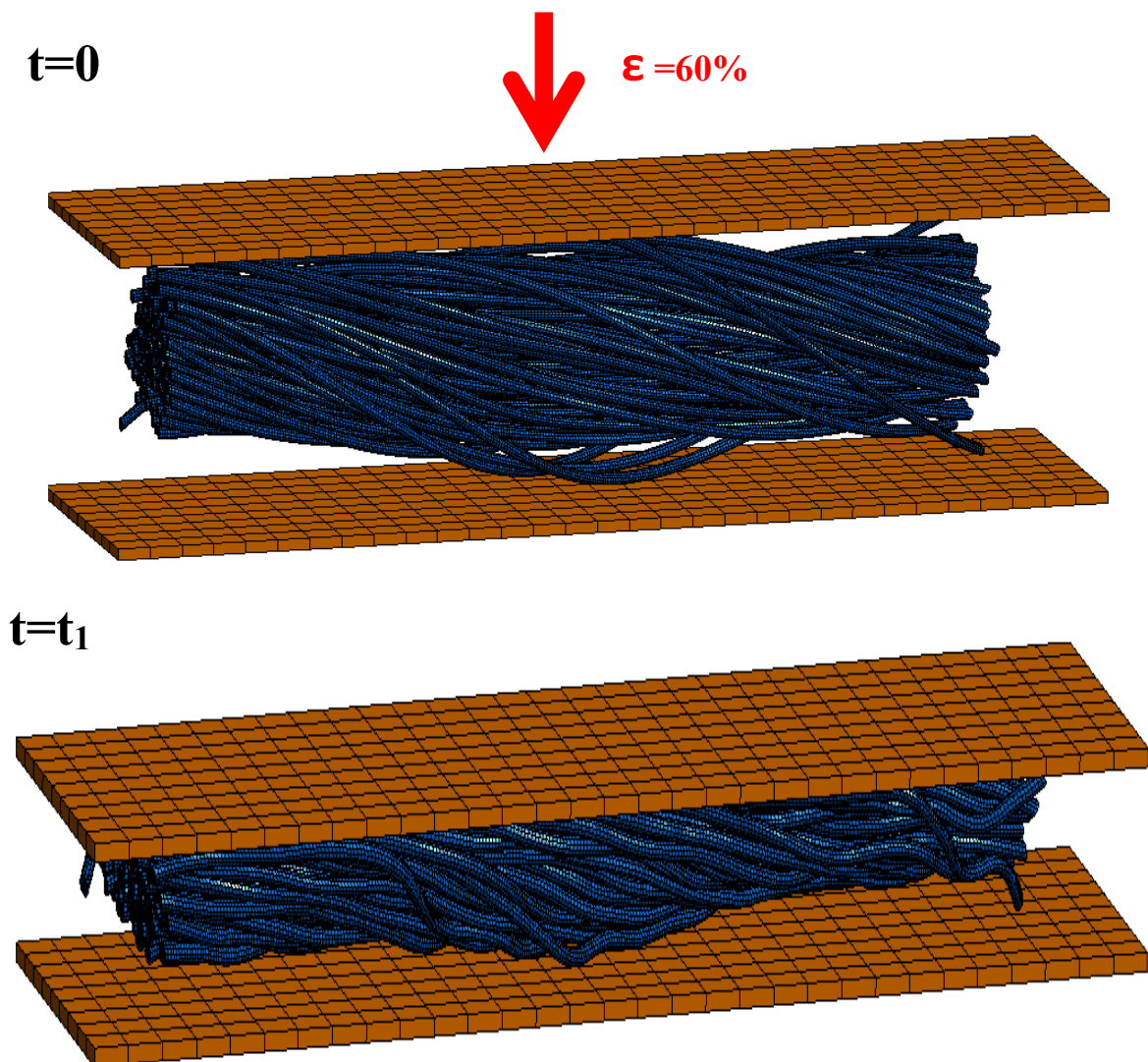
že v rámci časového průběhu natažení se vlákna příze nerovnoměrně deformují a postupně se vlákna přibližují důsledky existence zákrutů. Tedy pokročilý model vlákenné příze lze využít pro studii optimálního počtu zákrutů v závislosti na deformaci a tím doplnit či dokonce zpřesnit Koechlinův vztah⁵.

7.3 Výsledky numerické simulace pokročilého modelu vlákenné příze při stlačování deskou

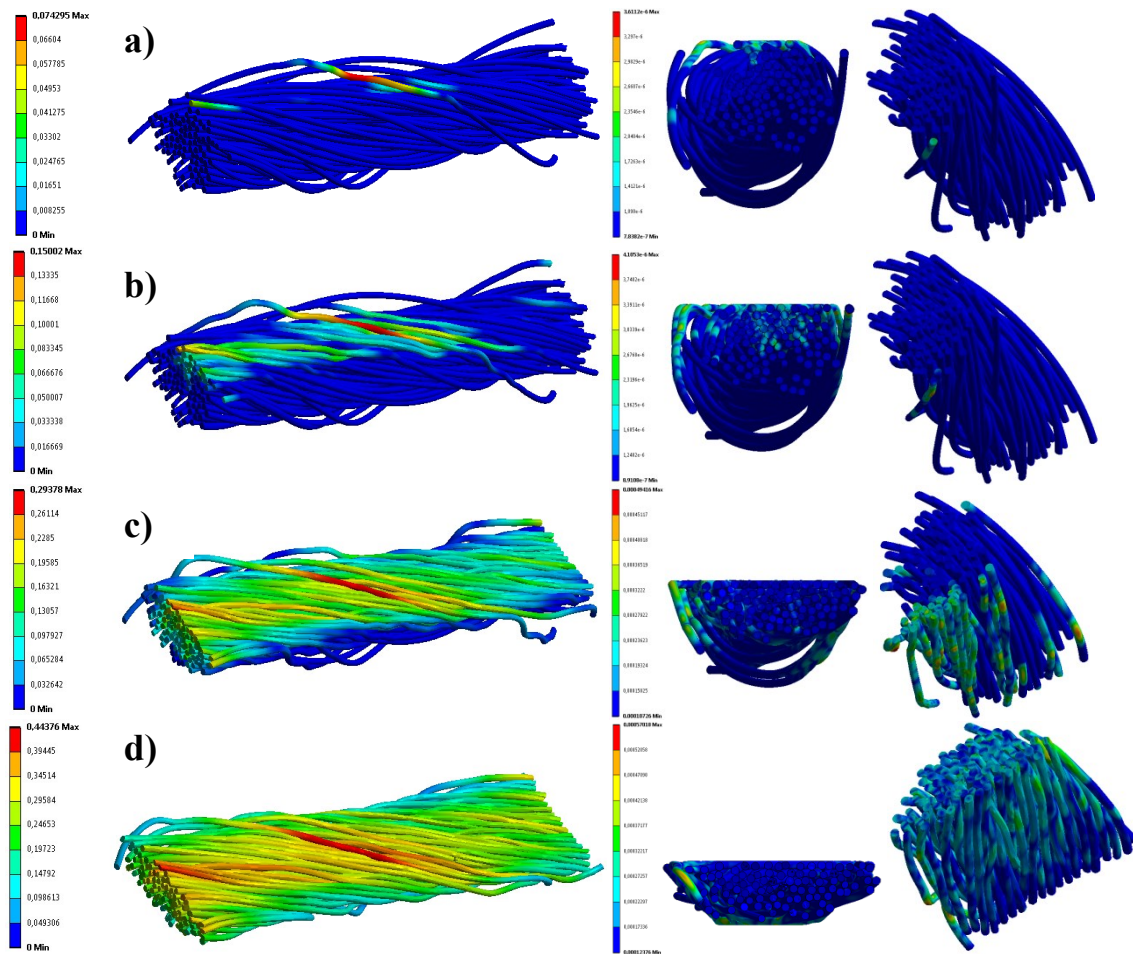
Výsledky numerické simulace pokročilého modelu vlákenné příze při tlakovém namáhání při stlačování deskou ukázaly významnou reorganizaci vláken mezi počátečním uspořádáním vláken v $t=0$ a natažením vláken při deformaci 60% v $t=t_1$, jak je patrné na obr. 7.4. Jestliže prostudujeme jednotlivé časové intervaly, tak lze charakterizovat, že při 10% deformaci celkového průměru vlákenné příze, kde byla odečtena maximální délka stlačení 0,0735 mm, je maximální hodnota napětí podle HMH (von-Misses) $361 \cdot 10^{-3}$ MPa. V průběhu stlačování byly pozorovány průměrné hodnoty napětí $204 \cdot 10^{-3}$ MPa vznikající po celé délce vlákenné příze, jak je přiblíženo na obr. 7.5a. Při deformaci 20 % při hodnotě stlačení 0,147 mm je maximální hodnota napětí $410 \cdot 10^{-3}$ MPa v kontaktním místě stlačující přítlačné desky. V objemu vlákenné příze při této deformaci byly pozorovány průměrné hodnoty napětí $231 \cdot 10^{-3}$ MPa (obr. 7.5b). Při deformaci 30 % celkového průměru vlákenné příze odpovídající maximální hodnotě stlačení 0,225 mm je vzniklé napětí $437 \cdot 10^{-3}$ MPa v kontaktním místě stlačující přítlačné desky. V průběhu stlačování byly pozorovány průměrné hodnoty napětí $247 \cdot 10^{-3}$ MPa, vznikající po celé délce vlákenné příze, jak je patrné na obr. 7.5c. V rámci 40% deformace celkového průměru vlákenné příze, byla odečtena maximální délka stlačení 0,294 mm, kde maximální vzniklé napětí má hodnotu $494 \cdot 10^{-3}$ MPa opět v kontaktním místě stlačující přítlačné desky. V celkovém průběhu stlačování byly pozorovány průměrné hodnoty napětí $279 \cdot 10^{-3}$ MPa, vznikající po celé délce vlákenné příze. V 50% deformaci celkového průměru vlákenné příze byla odečtena maximální délka stlačení 0,367 mm, přičemž maximální vzniklé napětí $513 \cdot 10^{-3}$ MPa je v místě mezi vlákny a kontaktem se stlačující přítlačnou deskou.

⁵Koechlinův vztah definuje stoupání šroubovice zákrutu, přičemž uvažuje, že šroubovice je stejná pro každou tloušťku příze a charakterizuje zákrutovou míru α pro vybraný materiál příze platící pro velký rozsah jemností příze podle vztahu $\alpha = \varphi \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^{-2}$, kde φ je experimentálně odvozený optimální počet zákrutů, T je jemnost příze v texech, přičemž $\alpha \sim 100 - 140$.

V průběhu stlačování byly pozorovány průměrné hodnoty napětí $289 \cdot 10^{-3}$ MPa, vznikající po celé délce vlákenné příze. Při konečné 60% deformaci celkového průměru příze, tedy při maximální hodnotě délky stlačení 0,441 mm byla stanovena maximální hodnota napětí $570 \cdot 10^{-3}$ MPa, přičemž v průběhu stlačování byly pozorovány průměrné hodnoty napětí $322 \cdot 10^{-3}$ MPa, vznikající po celé délce vlákenné příze viz obr. 7.5d.



Obr. 7.4 Výsledky deformace pokročilého modelu vlákenné příze při stlačování deskou

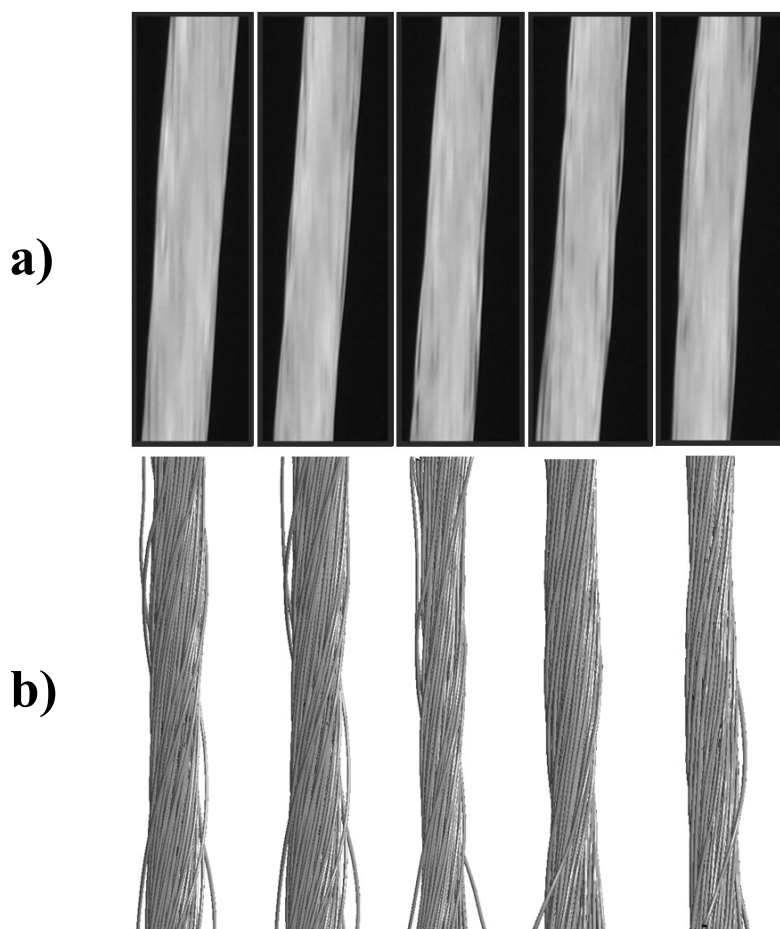


Obr. 7.5 Výsledky rozložení deformace a napětí pokročilého modelu vlákněné příze při stlačení v jednotlivých časových úsecích

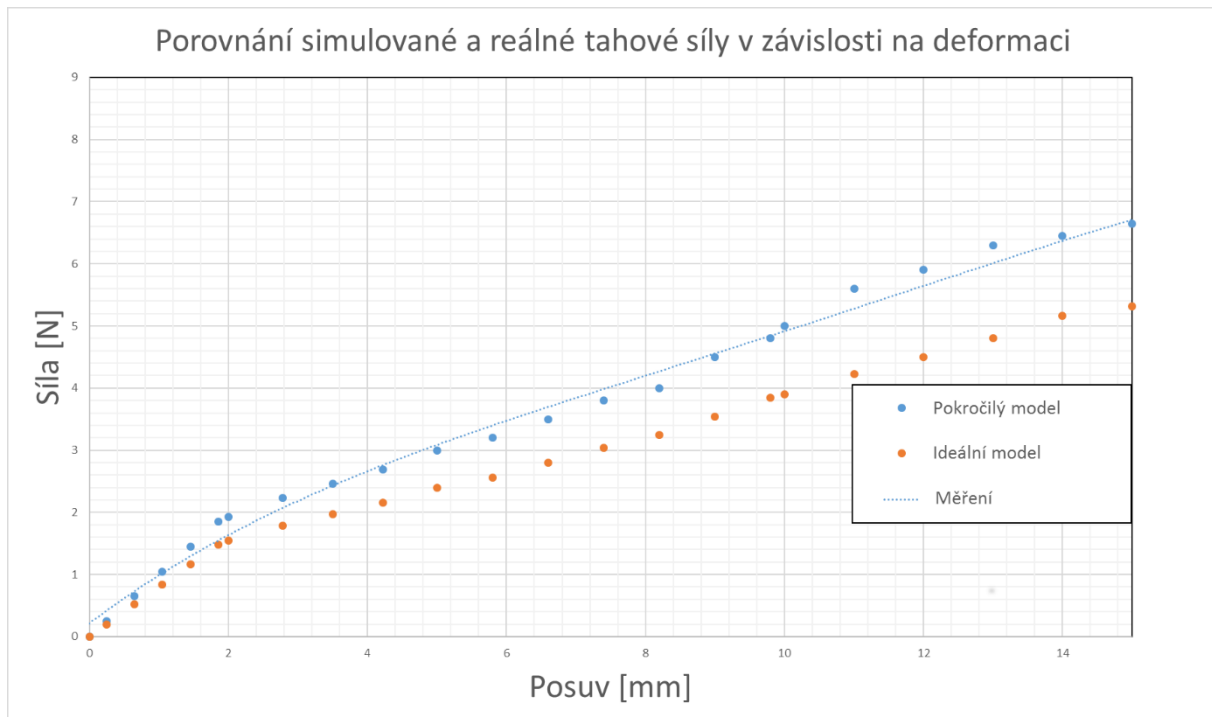
7.4 Porovnání mechanických vlastností reálných vzorků vlákněné příze s pokročilými modely vlákněné příze

Výsledky simulací uvedené v kap. 7.1–7.3 ukázaly určitý charakter přetváření vlákněné příze, z čehož byly stanoveny rozložení deformace a napětí. Bylo proto nutné provést porovnání mechanických vlastností pokročilého modelu vlákněné příze a reálných vzorků z experimentálních měření viz kap. 4. Charakter závislosti síly na protažení (obr. 4.3) znázorňuje silové průběhy jednotlivých křivek tahové zkoušky, kde průměrná hodnota byla ~10,39 N. Z celkového průběhu tahové křivky byly vyhodnocovány hodnoty v úseku 20 mm, které odpovídají 10 % deformaci reálného vzorku vlákněné příze. V uvedeném úseku 20 mm

došlo k přeuspořádání vláken, ale nevznikala žádná viditelná přetvoření či plastické deformace jak, je uvedeno na obr. 7.6a. Jednotlivá vlákna příze se zužují do „tenčího“ protaženého svazku, který způsobuje přiblížení vláken vlivem zákrutu a tím postupně vznikající větší počet třecích kontaktů mezi jednotlivými vlákny, který vede k intenzivnější silové odezvě. Neckář ve svých pracích diskutuje problematiku nárůstu kontaktních míst při tahovém/tlakovém namáhání ve vláknech a tím zvyšující se přírůstek síly [37, 38 a 40], který se bude projevovat až do přetrhu. Z výsledků porovnání numerické simulace je tento jev reorganizace a přiblížení vláken vlivem zákrutu patrný, jak uvádí obr. 7.6b. Z obr. 7.6b je také patrné, že v porovnání s ideálním modelem vlákněné příze je pro komplexní studii a popis deformace a napětí vhodné využít pokročilého modelu, neboť zde je zřetelný vliv zákrutu vláken příze pro stanovení výsledných mechanických vlastností. Porovnání závislosti síly na protažení reálného vzorku a numerických simulací je uvedeno na obr. 7.7.

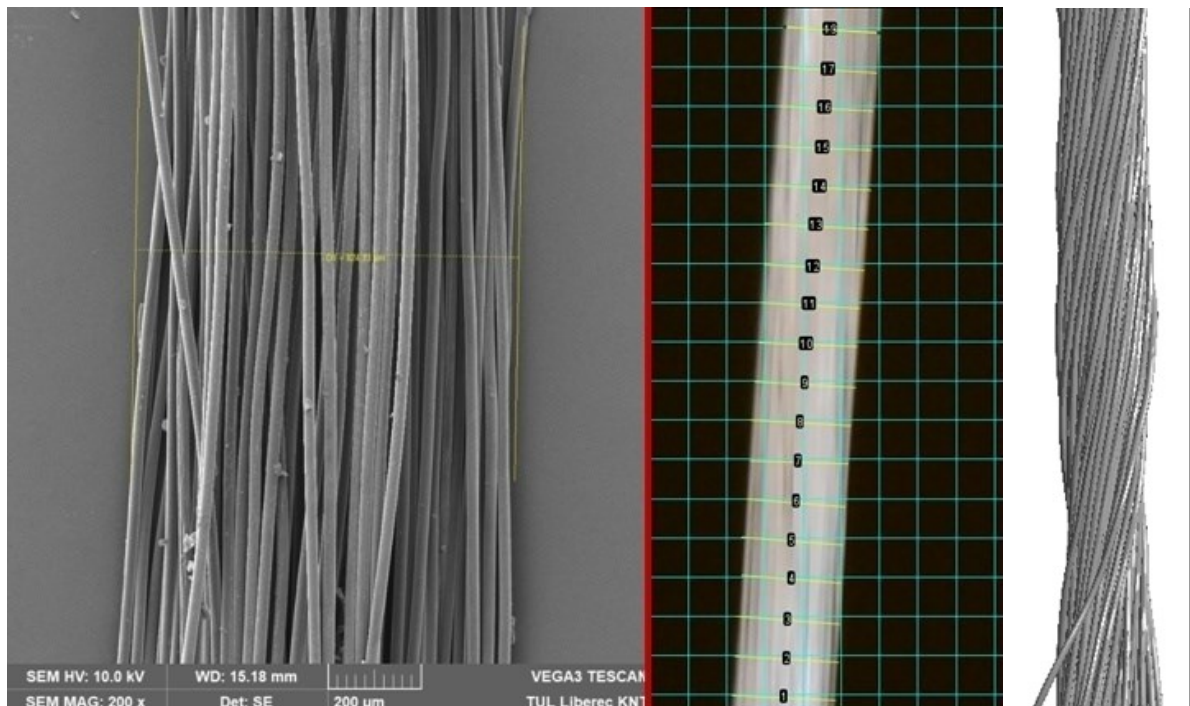


Obr. 7.6 Porovnání deformace tahové zkoušky reálného vzorku s pokročilým modelem vlákněné příze a) deformace reálné vlákněné příze, b) deformace numerického modelu



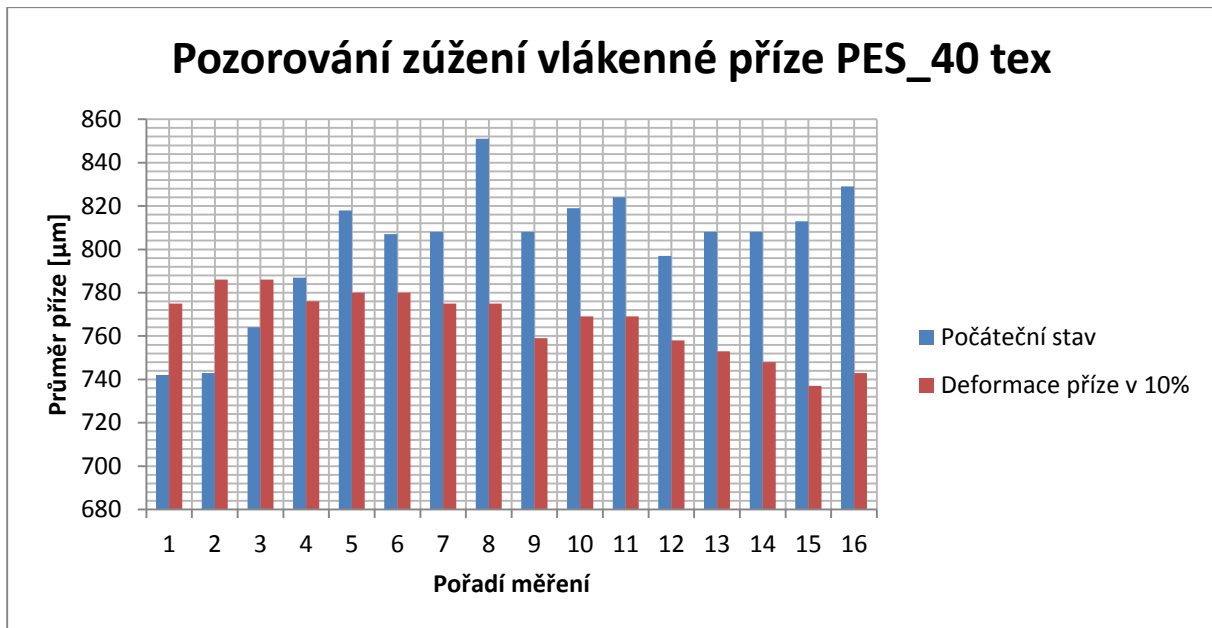
Obr. 7.7 Porovnání tahové zkoušky: průběh reálného protažení vlákně příze, ideální model vlákně příze, pokročilý model vlákně příze

Z výsledku porovnání tahové zkoušky je patrná dobrá shoda mezi reálným vzorkem a pokročilým modelem vlákně příze. Ideální model má naopak o něco nižší hodnotu silového nárůstu v závislosti na deformaci do 10 %. Tyto průběhy potvrzují výše uvedené komentáře ohledně zvýšeného silového působení vlákně příze v závislosti na růstu počtu kontaktních míst. Dále bylo provedeno porovnání vyhodnocení zaplnění při stlačování příze podle metodiky uvedené v kap. 5.3. Nejprve bylo provedeno ověření průměru vlákně příze reálného vzorku a modelu, kde byly vytvořeny snímky reálné vlákně příze pomocí elektronového mikroskopu (obr. 7.8). Tento postup umožnil podrobný a přesný pohled na strukturu vláken. Prostřednictvím těchto snímků bylo možné provést měření průměrů vláken a porovnat je s výsledky modelů. Dále s pomocí makroskopu byla vytvořena sada obrazů tahové zkoušky v odpovídajících bodech deformace (obr. 7.8 uprostřed). Cílem bylo získání přesného stanovení zúžení během zkoušky. V programu ImageJ byla provedena měření průměrů vlákně příze v příslušných deformacích a sledovaly se maximální a minimální hodnoty zúžení příze.



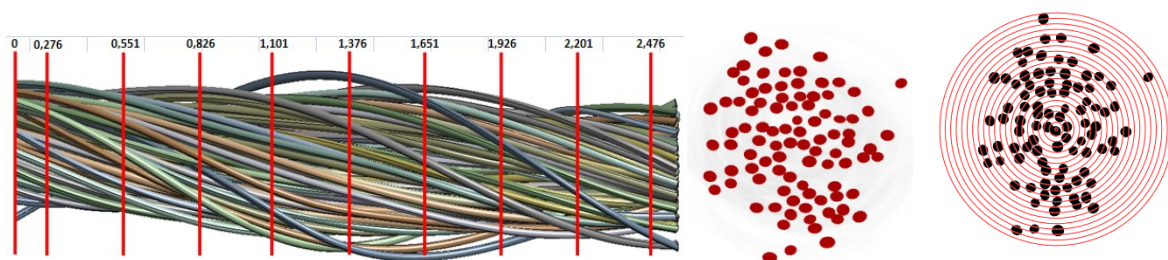
Obr. 7.8 Porovnání průměru vlákenné příze reálného vzorku a pokročilého modelu vlákenné příze: zobrazení vlákenné příze v SEM (vlevo), stanovení průměru příze (uprostřed), model (vpravo)

Vyhodnocení reálného vzorku a pokročilého modelu vlákenné příze, jak je uvedeno na obr. 7.8, bylo prováděno na všech zvolených úsecích příze pro deformace v rozmezí 0, 2, 4, 6, 8 a 10 %, kde v jednotlivých úsecích byly zjištěny plochy vláken a následně vztaženy k ploše příslušného mezikruží, čímž se získalo zaplnění v daném úseku (viz metodika uvedená v kap. 5.3). Tento proces byl opakován pro 0 % deformace v rozmezí od 0,276 mm až po úsek 2,476 mm. Z jednotlivých úseků zaplnění byly vytvořeny průměrné hodnoty, které byly zaneseny do grafu (obr. 7.9). Z grafu průměrných hodnot pro nulovou deformaci byla odečtena maximální hodnota zaplnění 0,45 v závislosti na odečtených 21 plochách mezikruží. Dosažené hodnoty zaplnění při stlačování pro 0% deformaci odpovídaly stejným hodnotám jako při natahování v podélném směru. Z grafu průměrných hodnot pro 10 % deformace byla odečtena maximální hodnota zaplnění 0,566, která byla porovnávána s maximální průměrnou hodnotou 0,45 zaplnění s nulovou deformací. Z porovnání křivek v grafu je patrné, že již při 10% deformaci stlačení z celkového průměru příze začíná hodnota zaplnění růst.



Obr. 7.9 Porovnání zúžení reálného vzorku vlákenné příze

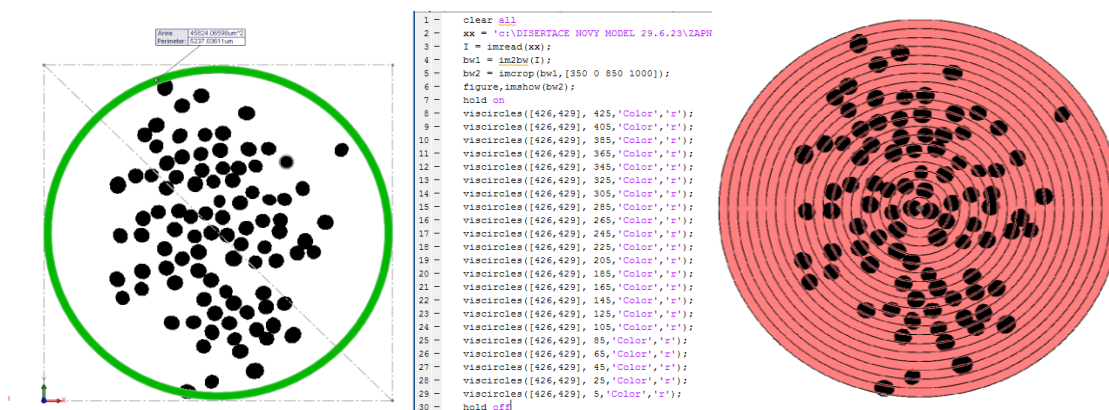
Pro zkoumání radiálního průběhu zaplnění příze pokročilého modelu bylo využito jednotlivých řezů, které byly rovnoměrně rozloženy podél modelu vlákenné příze, která měla délku 2,5 mm o celkovém průměru 0,8 mm (obr. 7.10). Průměr jednoho vlákna byl stanoven na průměrnou hodnotu 0.025 mm v celkovém počtu 98 vláken ve vlákenné přízi.



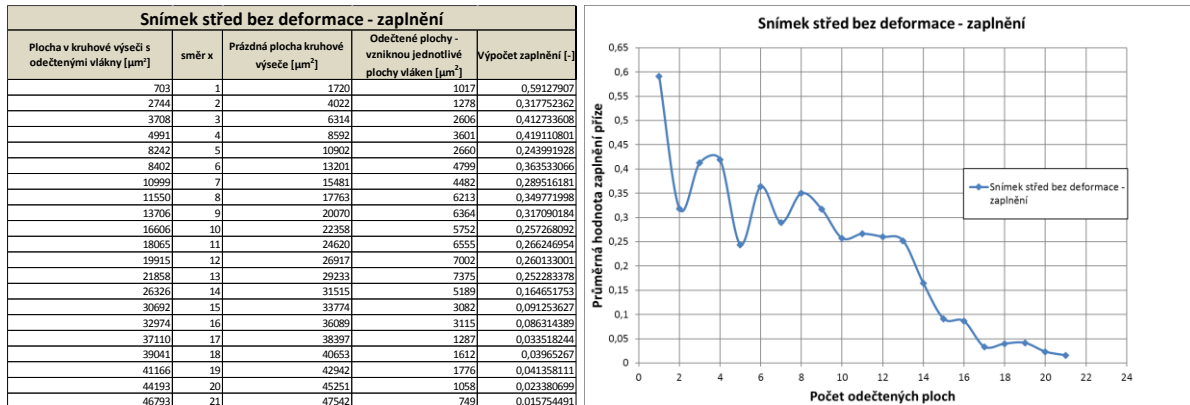
Obr. 7.10 Jednotlivé řezy pro zkoumání radiálního průběhu zaplnění v pokročilém modelu vlákenné příze

V prvním případě bylo pozorováno zaplnění vlákenné příze vlivem natahování v podélném směru do 0 %, 2 %, 4 %, 6 %, 8 %, a 10 % deformace (viz obr. 7.10). V postprocesorovém zobrazení výsledků, byla vytvořena skupina výsledků, která zobrazovala deformaci v jednotlivých úsecích modelu. Pro zobrazení deformací v jednotlivých plochách byly v rozsahu nastavení specifikovány plochy, do kterých byly vkládány odsazené plochy v závislosti na vytvořených souřadnicových systémech. Na jednotlivých plochách byly určeny

průřezy, které byly ukládány do bitmapového formátu s obrazovým rozlišením 1504x 857 obrazových bodů a hloubkou 24 bitů. Vytvořené obrazy byly dále zpracovávány v programu Matlab. Nejprve byla vyčištěna paměť programu příkazem *clearall*. Dalším krokem bylo načtení složky, ve které byly uloženy bitmapové obrazy průřezů příze. Příkazem *imread* byl obrázek načten do paměti Matlabu, ve kterém byl dále obraz zpracováván. Protože uložené obrazy byly v barevném formátu s bitmapovou hloubkou 32 bitů a daná obrazová analýza byla potřeba jenom 1 bitová hloubka, byly obrazy příkazem *im2bw* převedeny do binárního obrazu. Dalším využitým příkazem byla funkce ořezávání obrazu *imcrop*, ve kterém byla nastavena výška a šířka obrazu. Pro zobrazení výsledku slouží příkaz *imshow*. Podle teorie (obr. 7.11) byly do zobrazeného výsledku vloženy za pomoci příkazu *viscircles* kružnice. Zpracovaný obraz s kružnicemi byl uložen do připravené složky k dalšímu zpracování. Uložené obrazy s kružnicemi byly dále podstoupeny k procesnímu zpracování za účelem rozdělení ploch mezi dělicími kruhy a průřezy vláken. Nově vytvořené obrazy byly importovány do složky, ze které byly výsledky načítány aplikací *Image region analyzer*. V této aplikaci byly odečítány plochy, které byly následně vkládány do Excelu. Na základě importovaných hodnot z mezikruhových ploch z matlabu byly v excelovém prostředí vytvořeny jednotlivé grafy zaplnění (obr. 7.12).



Obr. 7.11 Stanovení plochy mezikruží a postup vytváření kruhu v programu Matlab

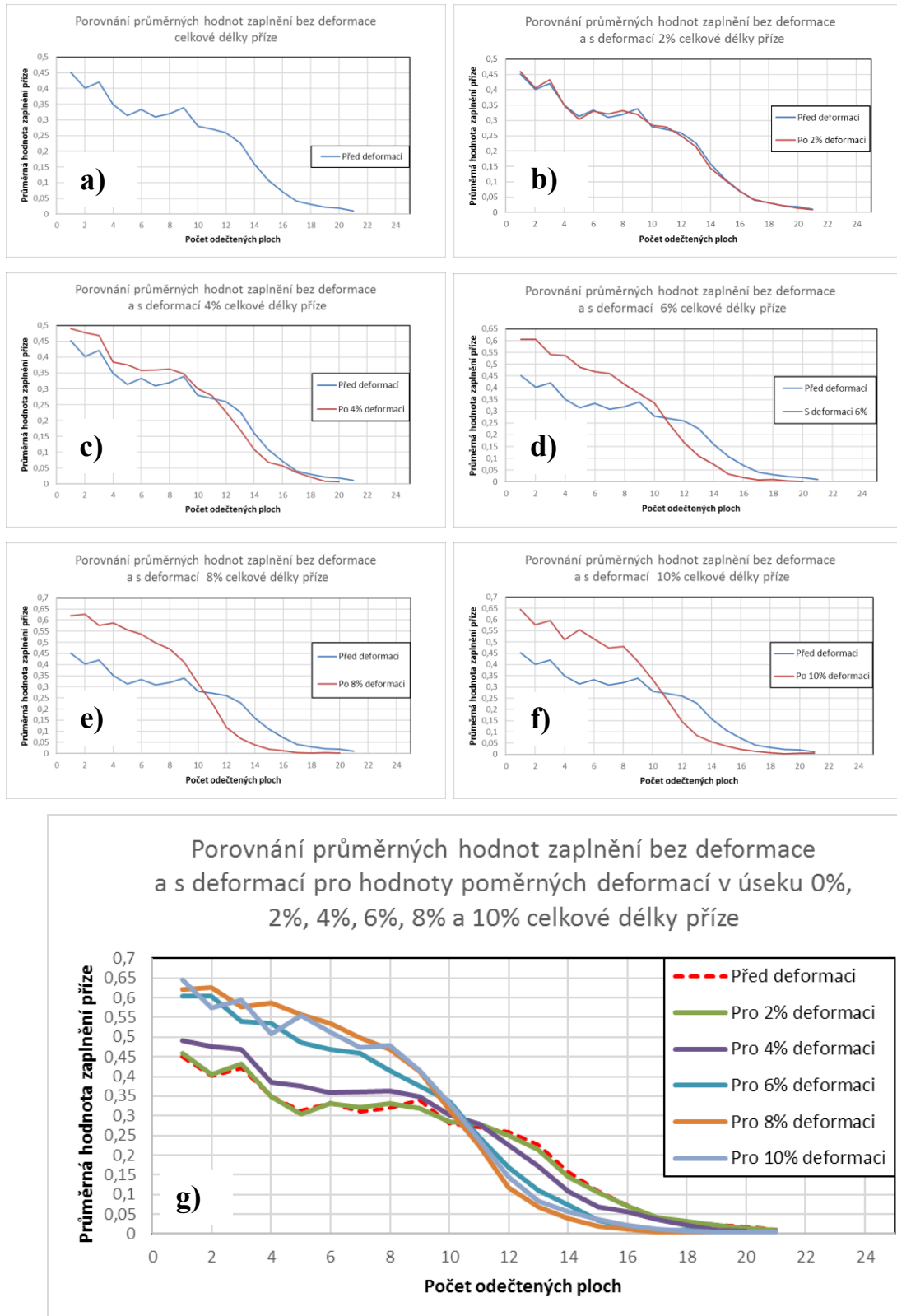


Obr. 7.12 Ukázka navrženého výpočtu zaplnění a vytvořený graf zaplnění ve středovém řezu příze

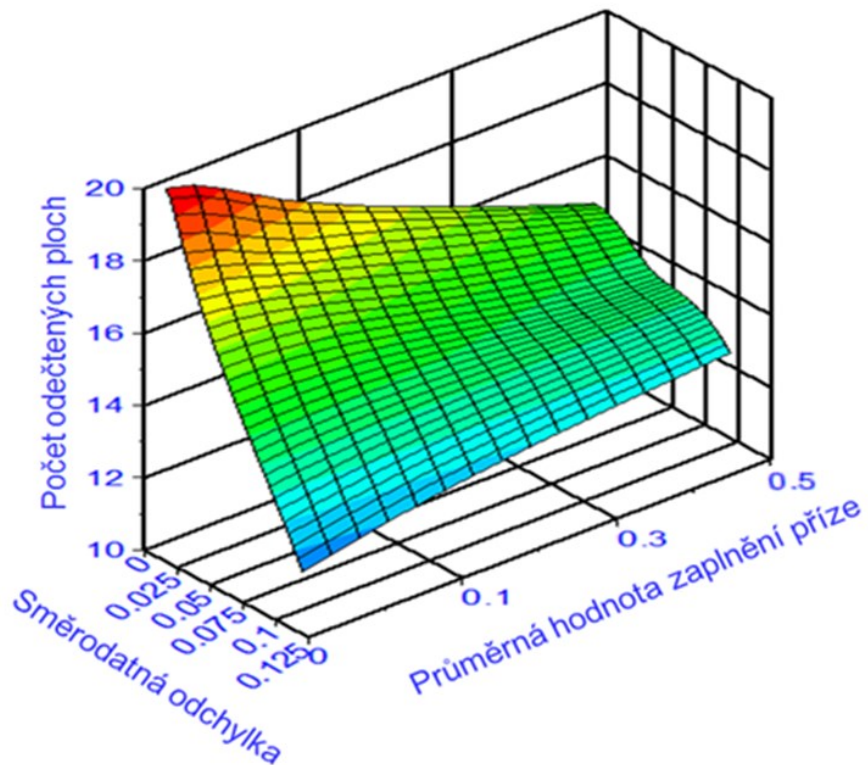
První výpočet zaplnění při tahovém namáhání byl vytvořen pro nulovou velikost deformace. Ve všech úsecích modelu vlákně příze byly odečteny plochy mezikruží s vlákny a prázdné plochy, které byly následně přepočítány do ploch jednotlivých vláken umístěných v mezikruží. V dalším kroku byly plochy s vlákny odečteny od prázdných ploch a výsledkem bylo nově vzniklé zaplnění v daném úseku. Tento proces byl opakován pro 0 % deformaci v rozmezí od 0,276 až po úsek 2,476 mm. Z jednotlivých úseků zaplnění byly vytvořeny průměrné hodnoty, které byly dány do grafu (obr. 7.13a). Z grafu průměrných hodnot pro nulovou deformaci byla odečtena maximální hodnota zaplnění 0,450 v závislosti na odečtených 21 plochách mezikruží. Z grafu průměrných hodnot pro 2% deformaci byla odečtena maximální hodnota zaplnění 0,458, která byla porovnáвана s maximální průměrnou hodnotou 0,450 zaplnění pro nulovou deformaci. Z porovnání křivek v grafu lze usoudit, že již při malé deformaci 2 % z celkové délky příze začíná hodnota zaplnění nepatrně růst. Křivka s 2% deformací zdánlivě kopíruje křivku s nulovou deformací, až do hodnoty 0,250 zaplnění, kde křivka dál pokračuje nepatrně pod hodnotou křivky s nulovou deformací a kopíruje jí, až téměř do nulového zaplnění, jak je patrné na obr. 7.13b. Z grafu průměrných hodnot pro 4% deformaci byla odečtena maximální hodnota zaplnění 0,491, která byla porovnáвана s maximální průměrnou hodnotou zaplnění 0,450 pro nulovou deformaci. Z porovnání křivek v grafu je již vidět větší deformace vedoucí k vyššímu zaplnění. V hodnotě zaplnění 0,226 se křivka 4 % deformace protíná s křivkou pro nulovou deformaci a lehce klesá k nulové hranici zaplnění (obr. 7.13c). Z grafu průměrných hodnot pro 6% deformaci byla odečtena maximální hodnota zaplnění 0,604, která byla porovnáвана s maximální průměrnou hodnotou zaplnění 0,450 pro nulovou deformaci. Z porovnání křivek v grafu, jsou již vidět výrazněji rostoucí

hodnoty zaplnění, které jsou dány kontrakcí v příčném směru, při které dochází k přibližování vláken. V hodnotě zaplnění 0,246 se křivka s 6% deformací protíná s křivkou pro nulovou deformaci a v tomto bodu křivka postupně klesá až k nulové hranici zaplnění. Vlivem geometrie zákrutu a vznikající větší deformace, vzniká nulová hranice již po odečtu hodnoty z 16 ploch mezikruží (obr. 7.13d). Z grafu průměrných hodnot pro 8% deformaci byla odečtena maximální hodnota zaplnění 0,620, která byla porovnáována s maximální průměrnou hodnotou zaplnění 0,450 pro nulovou deformaci. Z porovnání křivek v grafu je vidět strmě rostoucí hodnota zaplnění, která je dána vlivem natahování příze v příčném směru. V hodnotě zaplnění 0,224 křivka s 8% deformací protažení protíná křivku s nulovou deformací a v tomto bodu křivka strmě klesá až k nulové hranici. Vlivem geometrie zákrutu a vznikající větší deformace, vzniká nulová hranice již po odečtu hodnoty z 16 ploch mezikruží (obr. 7.13e). Z grafu průměrných hodnot pro 10% deformaci byla odečtena maximální hodnota zaplnění 0,645, která byla porovnáována s maximální průměrnou hodnotou zaplnění 0,450 pro nulovou deformaci. Z porovnání křivek v grafu, je vidět nejstrměji rostoucí hodnota zaplnění, která je dána vlivem protahování příze v příčném směru. V hodnotě zaplnění 0,241 křivka s 10% deformací protíná křivku s nulovou deformací a v tomto bodu křivka strmě klesá, až k nulové hranici. Vlivem geometrie zákrutu a vznikající větší deformace, vzniká nulová hranice již po odečtu hodnoty z 16 ploch mezikruží (obr. 7.13f). Ze všech vytvořených grafů byla vytvořena kombinace jednotlivých závislostí zaplnění pro stanovená procenta deformací v rozmezí 0 % až 10 % natahování, jak je uvedeno na obr. 7.13g a také plošné vyjádření prostřednictvím 3D grafu na obr. 7.14. Vypočtené hodnoty zaplnění při stlačení v rozmezí 0 % až 60 % jsou následně uvedeny na obr. 7.15.

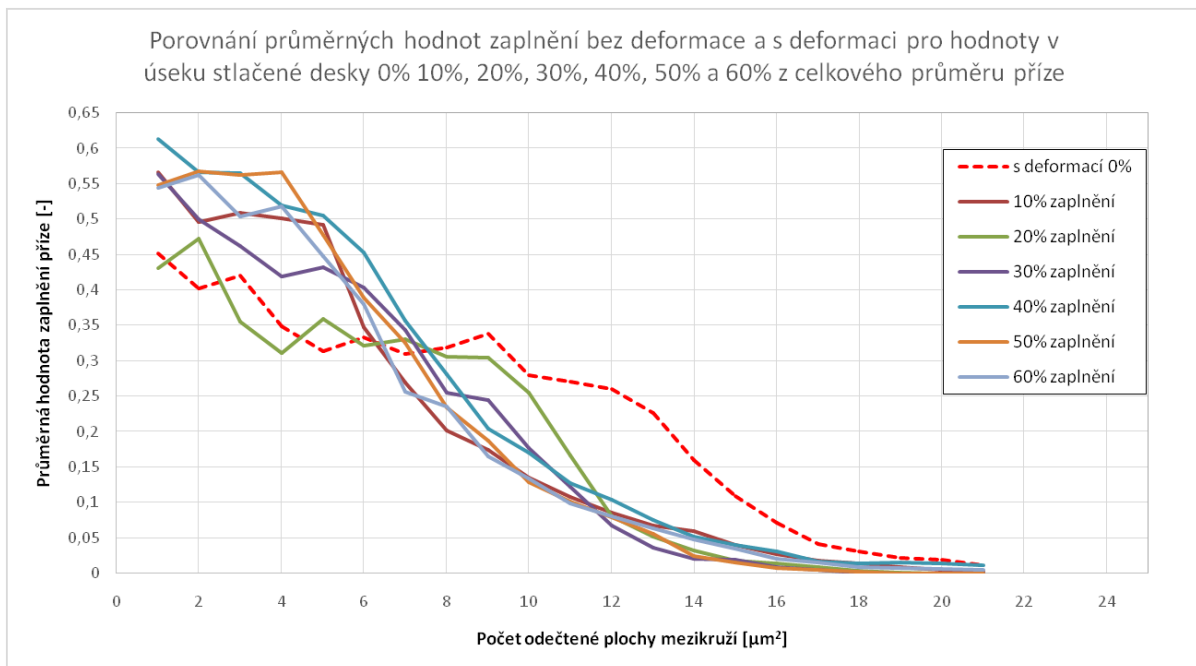
Makroskopické modelování vlákněných struktur – pokročilé numerické modelování vlákněné příze



Obr. 7.13 Porovnání průměrných hodnot zaplnění při protahování v průběhu deformace: a) 0% b) 2%, c) 4%, d) 6%, e) 8%, f) 10%, g) 0–10%



Obr. 7.14 Plošné rozložení zaplnění vláken v přízi při tahové zkoušce v průběhu deformace 0 % až 10 %



Obr. 7.15 Porovnání průměrných hodnot zaplnění při stlačování při deformaci 0 %–60 %

7.5 Závěr a shrnutí kapitoly

Kapitola 7 se věnovala výsledkům numerických simulací 3D modelu vlákenné příze při tahovém a tlakovém namáhání. Byly uvedeny výsledky pro ideální model vlákenné příze a diskutovány možnosti a omezení např. zjednodušení geometrie zákrutu. Dále se kapitola významně zabývá studiem a porovnáním výsledků pokročilého modelu vlákenné příze, který vznikl jako „dokonalý model“ v porovnání s reálným vzorkem. Byla studována reorganizace vláken při různých deformacích (viz kap. 7.3), která byla následně porovnána s výsledky reálného vzorku vlákenné příze. Výsledky také ukazují, že v rámci časového průběhu natažení se vlákna příze nerovnoměrně deformují a postupně se vlákna přibližují vlivem zákrutu. Pokročilý model vlákenné příze lze využít pro studii optimálního počtu zákrutů v závislosti na deformaci. Porovnání mechanických vlastností reálných vzorků vlákenné příze s pokročilými modely vlákenné příze bylo také provedeno pro hodnoty zúžení a zaplnění vláken. Bylo vyhodnoceno zaplnění vlákenné příze vlivem natahování v podélném směru v rozsahu 0–10 % deformace a při stlačování v rozmezí 0–60 % deformace, jak je uvedeno v kap. 7.4. Lze konstatovat, že využití pokročilého modelu vlákenné příze se zohledněním jednotlivých vláken a zákrutů včetně odpovídajícího zaplnění vláken může významně pomoci při studiu mechanických vlastností přízí, zejména studiu rozložení deformace a napětí, studiu zaplnění vláken v konkrétních oblastech příze a ke studiu reorganizace vláken. Tyto výsledky následně mohou pomoci také při optimalizaci vlákenné příze i textilních strojů.

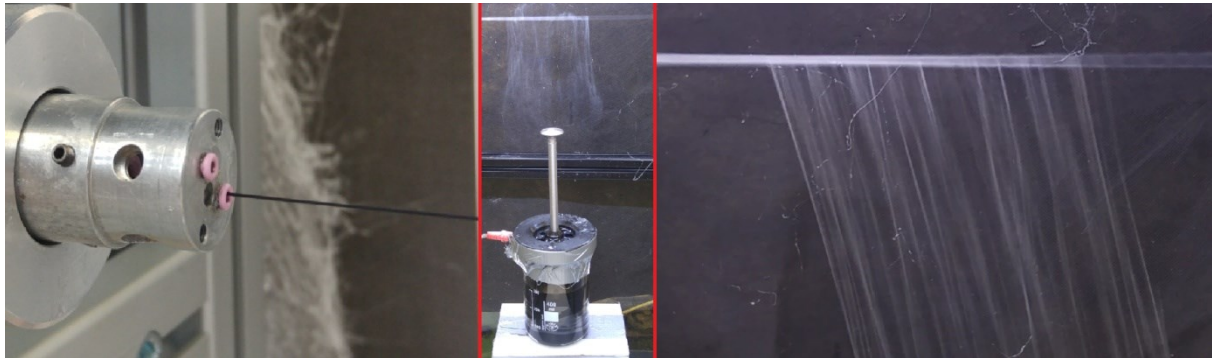
8. Příkladová studie aplikace pokročilého numerického modelu vlákenné příze s nanovlákenou strukturou

Kapitola 8 je krátkým ukázkovým příkladem využití pokročilého modelování uvedeného v předešlých kapitolách na vybranou vlákennou strukturu. Katedra netkaných textilií a nanovlákných materiálů, kde byla disertační práce vypracována se dlouhodobě zabývá vývojem nových principů zvlákňování, tvorby textilních materiálů a výrobních zařízení pro jejich produkci. Jeden z příkladů nových oblastí výzkumu jsou také příze ovíjené nanovlákenou vrstvou. Analýzy a měření mechanických vlastností vzorků příze s nanovlákenou strukturou jsou obecně omezeny jen pro určité informace, tedy nemohou vypovídat o okamžitém rozložení deformací a napětí ve vláknu/vlákně/celé přízi, natož celé příze ovinuté nanovláknem. Je to dáno tím, že jsou omezeny možnostmi měření, snímání, detekování, přičemž některé vlastnosti nelze spolehlivě měřit (např. rozložení hlavních napětí a deformací vlákenné struktury). Byla proto vytvořena příkladová aplikace využití pokročilého numerického modelování vlákenné příze diskutované v předešlých kapitolách tentokrát pro případ modelování příze ovinuté nanovláknem. Model vycházel z experimentu, kde příze rotuje kolem své osy v elektrostatickém poli a na obvod příze se ovíjí nanovláknem. Na těchto materiálech bylo pozorováno a experimentálně ověřeno zpevnění příze, které může být vysvětleno různými mechanismy. Jedním z nich je zvýšení vnitřního mezivláknenného tření uvnitř příze a větší zapojení povrchových vrstev příze během procesu zatěžování. Níže je popsán a diskutován zjednodušený matematický model studující tento jev při daných okrajových podmínkách zatěžování, vznikající z procesu nanášení a ovíjení příze nanovláknem.

8.1 Výroba vzorků a jejich charakterizace

Pro experimentální ověření byly vyrobeny vzorky materiálů příze s ovinem, tvořeným nanovláknem z polyvinylbutyralu. Roztok pro zvlákňování byl připraven rozpuštěním práškového polyvinylbutyralu (PVB, Mowitals B 60 H, Kuraray, America, Inc. Molekulová hmotnost 60000 g/mol) v 96% etanolu. Výsledná koncentrace byla 10 % hm. Takto připravený roztok byl zvlákňován na laboratorním zařízení pro střídaté zvlákňování při napětí

36 kV a frekvenci 50 Hz. Vytvořená vlákna byla nanášena na přízi, vzdálené od zvláknovací elektrody 300 mm. Ovíjení nanovláken bylo zajištěno rotací příze zařízením pro vkládání nepravého zákrutu. Počet otáček odpovídal 1000 ovinům/m (obr. 8.1).



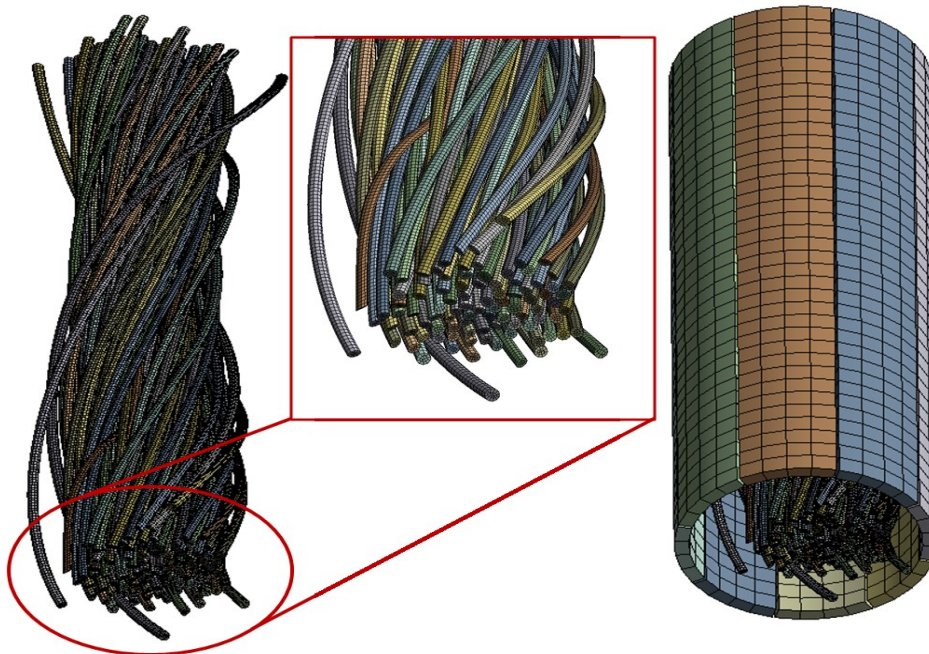
Obr. 8.1 Nanášení nanovláčenného materiálu na ovíjenou přízi v laboratořích KNT TUL

Po nánosu nanovláken bylo ještě před navinutím vzniklého výrobku na cívku provedeno sušení pro odstranění zbytků neodpařeného rozpouštědla při teplotě proudícího vzduchu 70–80°C. Množství nánosu nanovláčenného ovinu bylo stanoveno vážením na analytických váhách KernEG 300 a odpovídalo $10 \pm 1,2$ % z hmotnosti příze. Stanovení mechanických vlastností bylo realizováno na univerzálním zkušebním trhacím stroji LabTest 4.050. Měření byly pevnosti samotných přízí a přízí s ovinem. Upínací délka byla 250 mm, rychlost deformace 100 mm/min. Dále byly zjištěny vlastnosti jednotlivých vláken příze na zařízení LenzingVibroDYN a Vibroskop, kromě pevnosti, která byla stanovena na $0,577 \pm 0,08$ N při tažnosti přibližně $25,31 \pm 4,09$ %, byla stanovena i jemnost vláken na hodnotu $1,4 \pm 0,05$ dTex. Na základě naměřených hodnot byly stanoveny další veličiny, jako jsou napětí a elastický modul, které jsou vstupem pro materiálový model. Mimo to byla měřena orientačně také pevnost samotného nanovláčenného útvaru. Její měření bylo náročné vzhledem k obtížné manipulaci, protože útvar vykazuje nízkou pevnost. Pevnost při přetrhu byla stanovena na hodnotu $3,9 \pm 0,8 \cdot 10^{-3}$ N.

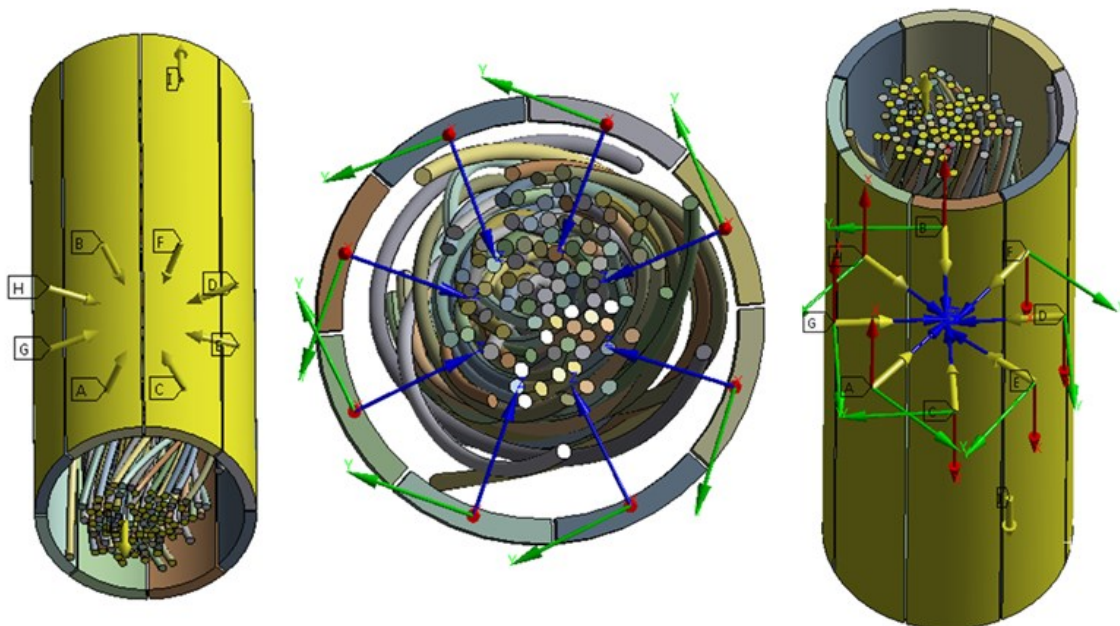
8.2 Aplikace numerického modelu příze s nanovláčennou strukturou pro studium mechanických vlastností

Navržené konečněprvkové modely, jak bylo uvedeno v předešlých kapitolách, umožňují simulaci tahového namáhání příze. Proto byly vytvořeny dva modely pro porovnání (bez a s nanovláčky). Okrajové podmínky byly nastaveny obdobně jako v kap. 6 tak, aby simulovaly

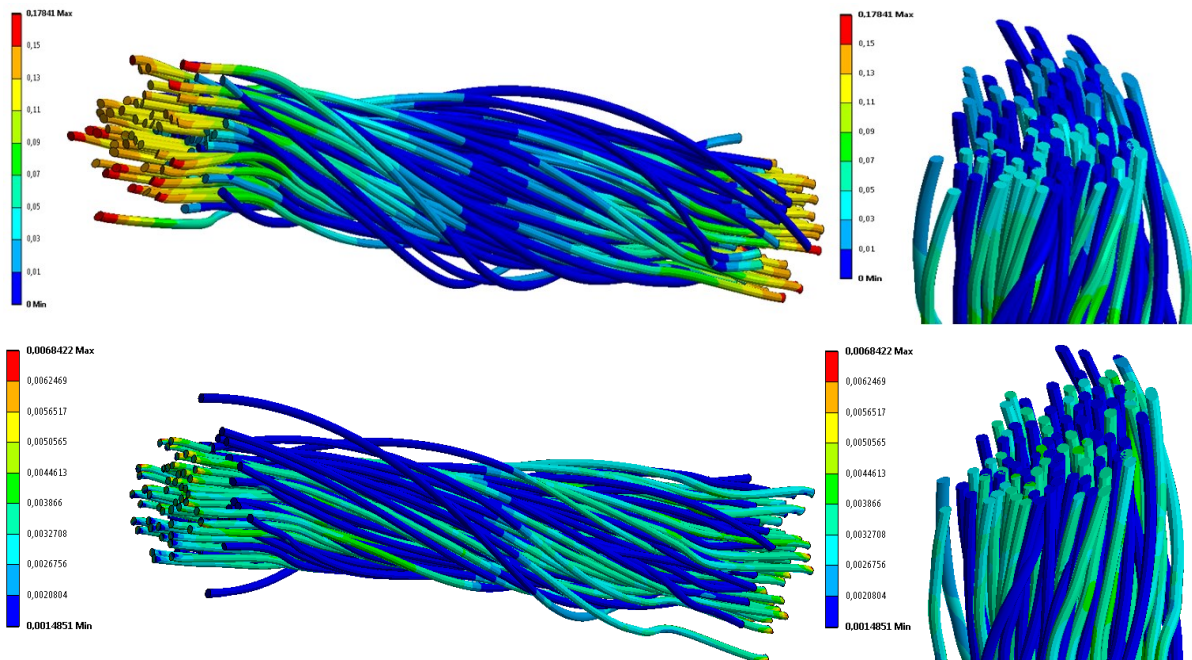
tahovou zkoušku. Uspořádání okrajových podmínek je znázorněno na obr. 8.2. Numerický model s nanovláknou má shodnou geometrii příze, avšak je doplněn segmenty, které vhodně simulují přízi ovinutou nanovláknou. Je to dáno tím, že nanovlákněná struktura při ovíjení působí na přízi svěrným tlakem. Model byl tvořen kontakty mezi svěrnými nanovlákněnými segmenty a vlákny a zároveň kontakty mezi vlákny. Přítlačné desky jsou nastaveny souřadnicovým systémem s možností rotace kolem osy X a úhlovým natočením směrem ke středu vlákněné struktury. Kontaktní plochy byly definovány s koeficientem tření 0,1. Jednotlivé kontakty byly nastavovány po plochách ručně mezi přítlačnými deskami a cílovými vlákny. S ohledem na odpovídající konvergenci a dosažení vypovídajících výsledků byla simulace rozdělena do dvou časových kroků. V prvním kroku se nastavil posuv přítlačných desek směrem ke středu, který stlačuje vlákna. Každý segment měl přidělenou posuvnou okrajovou podmínku s hodnotou 220 μm . Pro správný směr posuvu bylo potřeba do okrajové podmínky zavést upravený souřadnicový systém. Okrajová podmínka posuvu byla následující. Polovina vláken byla tažena ve směru osy příze, zbylá vlákna na opačném konci příze byla tažena v opačném smyslu. Tím se zajistil přenos síly pouze mezivlákněnými kontakty. Do jednotlivých polovin ploch vláken byly definovány posuvné okrajové podmínky s hodnotou $\pm 1,2 \cdot 10^{-2}$ mm. Počáteční podmínka posuvu byla pro oba modely (s/bez nanovláken) nastavena tak, aby došlo k protažení příze o 10 % původní délky příze. Síť konečných prvků byla nastavena s podmínkou Face Meshing. Materiálové vlastnosti příze pro tento model jsou převzaty z kap. 6.2. Na základě získaných výsledků (obr. 8.2–8.6) jsou odečítány nejvyšší a nejnižší hodnoty deformace a napětí. Hodnota maximální deformace o velikosti 0,55 mm byla zaznamenána na okrajích vláken a její hodnota postupně klesá do středu modelu. Nejnižší naměřená deformace o velikosti 0,061 mm se vyskytuje ve střední oblasti. Na základě okrajových podmínek ve druhém časovém kroku jsou odečítány maximální hodnoty redukovaného napětí von-Mises. Tyto maximální naměřené hodnoty dosahují $798 \cdot 10^{-3}$ MPa a vyskytují se ve třech oblastech, jak je zobrazeno na obrázku 8.6. V důsledku stlačování jsou vlákna nucena přemísťovat se a vyplňovat volné prostory. Tímto dochází ke vzniku dalších kontaktů mezi vlákny, kde se některá vlákna více či méně stlačují (například v lokálních oblastech je naměřeno nejnižší napětí von-Mises o hodnotě $451 \cdot 10^{-3}$ MPa).



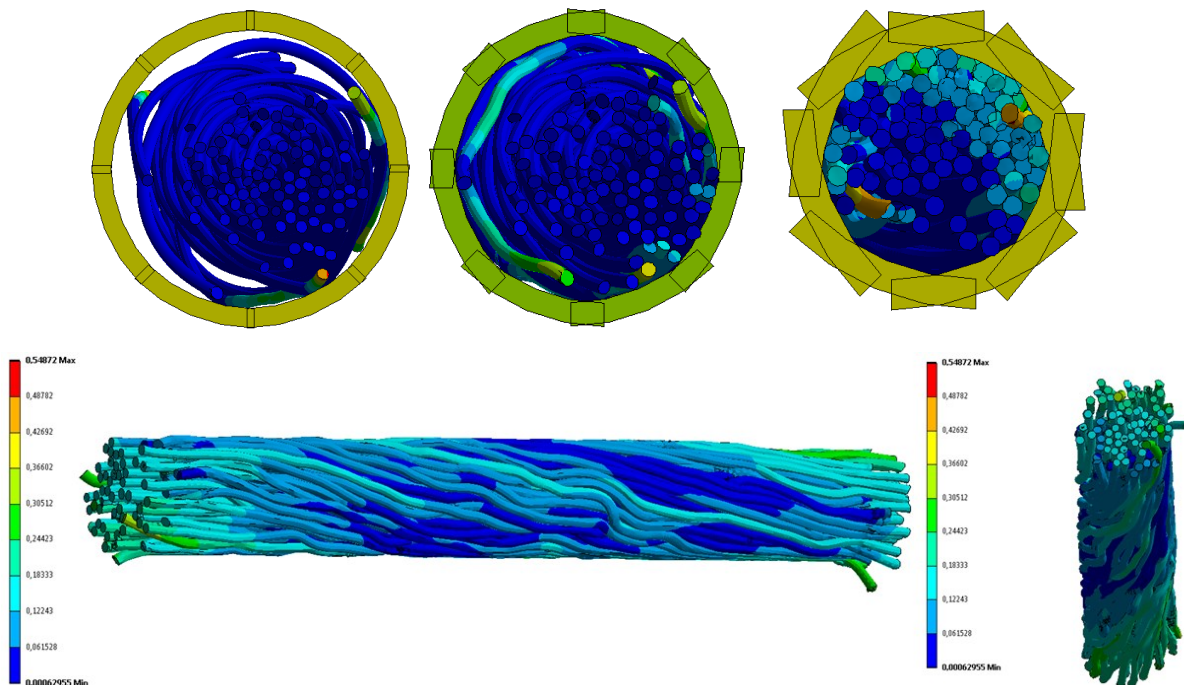
Obr. 8.2 Objemová síť vytvořená na modelu vlákněné příze (vlevo), detailní zobrazení objemové sítě (uprostřed), model vlákněné struktury příze se segmenty nánovláken (vpravo)



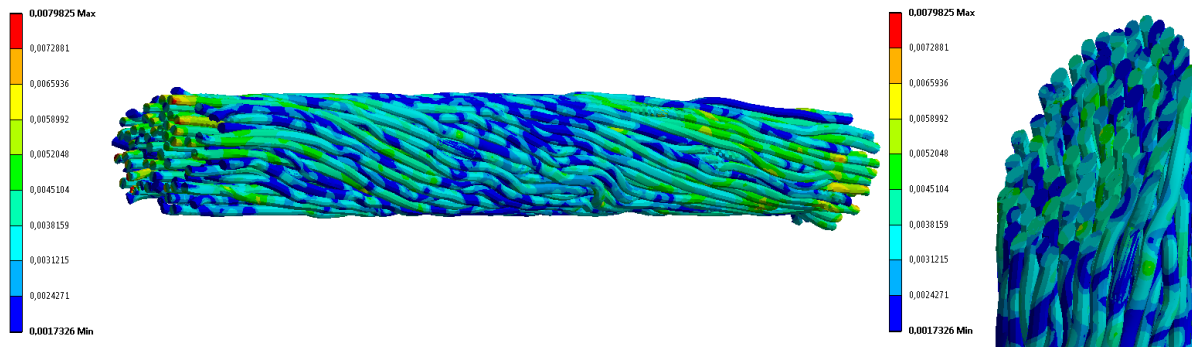
Obr. 8.3 Vložení okrajových podmínek svěru a posuvu segmentů (vlevo) pohled na zavedené posuvné podmínky v jednotlivých segmentech vložené v souřadnicovém systému (vpravo)



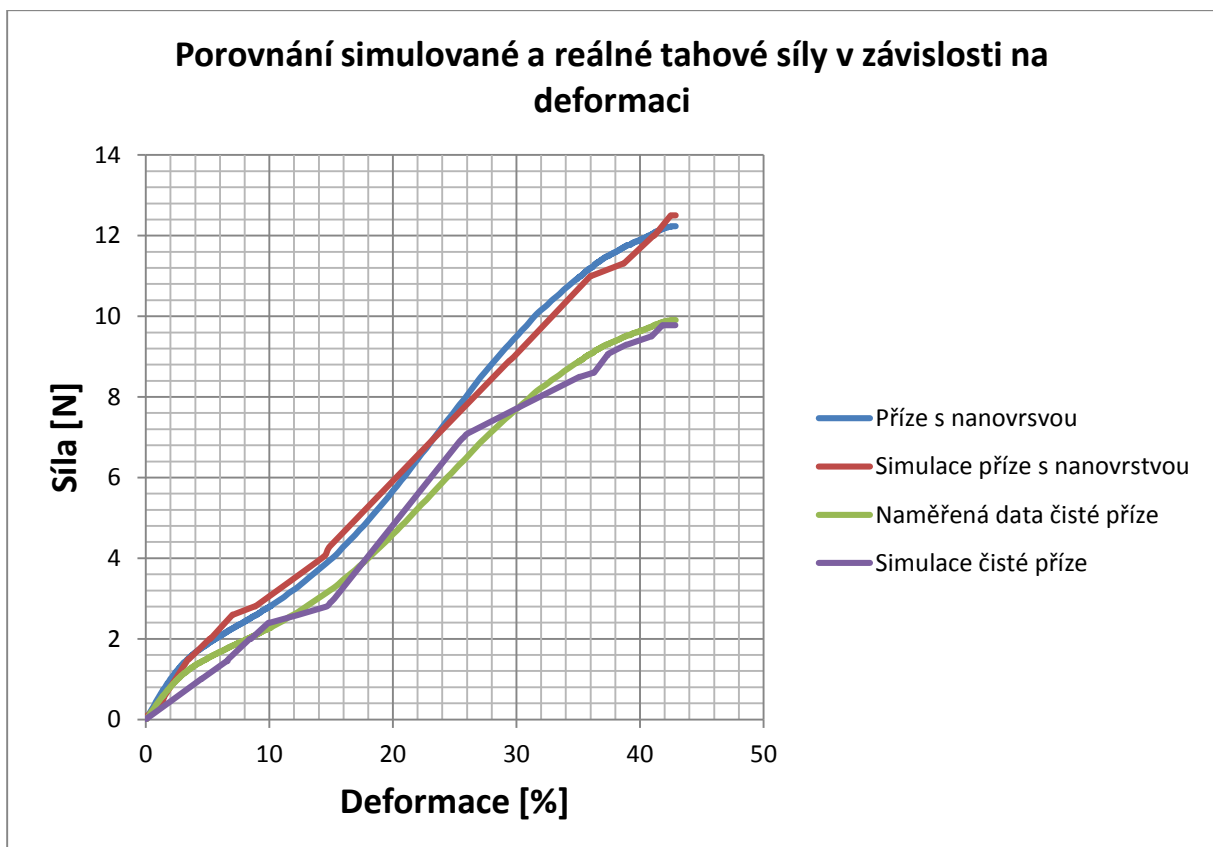
Obr. 8.4 a) Maximální deformace ve vláknech v závislosti na posuvu, b) Maximální napětí von-Mises ve vláknech v závislosti na posuvu



Obr. 8.5 Maximální deformace ve vláknech při stlačování ve druhém časovém kroku



Obr. 8.6 Maximální napětí von-Mises ve vláknech při stlačování ve druhém časovém kroku



Obr. 8.7 Porovnání naměřených výsledných silových hodnot reálného vzorku příze a příze s nanovrstvou a modelu příze a modelu příze s nanovrstvou

Z uvedených hodnot je patrné, že rostoucí vnější tlak způsobený stlačujícími válcovými segmenty tj. "ovinem", zvětšuje kontaktní plochy mezi vlákny. Výsledkem je zvýšená silová odezva vlákenného útvaru na aplikovaný posuv. Hodnoty síly potřebné k posuvu vláken uvedené na obr. 8.7 byly opět porovnány s reálně naměřenými hodnotami pevnosti ovíjené příze

s nanovláknou. I zde je patrná určitá významnost připraveného modelu s experimentálními testy, neboť průběh obou závislostí je velmi podobný, což bylo porovnáno i prostřednictvím ANOVA. Výsledky získané ANOVOU na hladině významnosti 0.05 jsou uvedeny v (Tab. 8.1).

Tab. 8.1 Statistická analýza MKP modelu a experimentálních vzorků

Model	F_{rat}	P_{value}	F_{krit}	R^2
Čistá příze	0.342	0.521	2.876	0,972
Příze s nanovrstvou	0.109	0.896	3.183	0,989

Kde F_{rat} je hodnota F - testu, P hodnota je hladina významnosti, na které hypotéza o rovnosti modelu s experimentem může být zamítnuta, F_{krit} je kritická hodnota porovnání modelu s experimentem, R^2 koeficient determinace.

8.3 Závěr a shrnutí kapitoly

Kapitola 8 se věnovala modelování a analýze vlákenné příze s nanovrstvou. Jednalo se o příkladovou studii využití pokročilého modelování uvedeného v předešlých kapitolách na vybranou vláknou strukturu. Katedra netkaných textilií a nanovlákných materiálů se dlouhodobě specializuje na vývoj nových metod zvláknování, výroby textilních materiálů a technologických zařízení pro jejich výrobu. V této souvislosti byla vytvořena metoda pokročilého numerického modelování vlákenné příze, která byla předmětem diskuse v předchozích kapitolách. V tomto případě byl navržen model příze se zaměřením na modelování s obsahem nanovláken. Model vycházel z experimentu, kde příze rotuje kolem své osy v elektrostatickém poli a na obvod příze se ovíjí nanovlákná. Na těchto materiálech bylo pozorováno a experimentálně ověřeno zpevnění příze, které může být vysvětleno různými mechanismy. Jedním z nich je zvýšení vnitřního mezivláknenného tření uvnitř příze a větší zapojení povrchových vrstev příze během procesu zatěžování. Model s nanovrstvou ukázal rozložení deformace a reorganizaci vláken, což může být podmětem pro další analýzy a pokročilé modelové simulace.

9. Přínosy disertační práce

V průběhu řešení disertační práce byla provedena měření a analýzy struktur vybraných vzorků vlákenné příze a vytvořena pokročilá numerická simulace 3D modelu vlákenné příze pro studium mechanických vlastností, ze kterých se získaly cenné výsledky a nové poznatky. Tyto poznatky mají významný přínos jednak pro daný vědní obor, ale mohou být využitelné i pro praxi.

9.1 Přínosy pro vědní obor

Přínosy disertační práce pro vědní obor lze shrnout do následujících bodů:

- Byla sestavena metodika získávání obrazu pro tvorbu pokročilé 3D CAD geometrie vlákenné příze. S využitím výpočetní tomografie (CT) byly vytvořeny snímky řezů příze v odpovídající kvalitě pro tvorbu pokročilé 3D CAD geometrie vlákenné příze. Bylo zjištěno, že vybrané vzorky polyesterového vlákna jsou vhodné pro vytvoření složeného obrazového modelu prostřednictvím výpočetní tomografie (CT). V průběhu mechanického zatěžování vlákenné příze byly zároveň pořizovány obrazové záznamy makroskopem, což umožňovalo pozorovat chování příze při natahování a analýzu reorganizace vláken v přízi.
- Byl uceleně popsán postup tvorby a provedení numerické simulace 3D modelu vlákenné příze pro stanovení mechanických vlastností. Byly vytvořeny a porovnány numerické modely – ideálního modelu příze a pokročilého modelu příze reprezentujícího geometrii vláken příze včetně zákrutů. Byly vyhodnoceny výsledky při tahovém a tlakovém namáhání, které měly velmi dobrou shodu s reálnými experimenty. Výsledky vytvořených numerických modelů ukázaly vliv zákrutu a uspořádání vláken na výsledné hodnoty rozložení deformace, napětí a zaplnění příze. Také stanovily, že pro všechny testované vzorky příze vykazovaly obdobný průběh zejména ve sledované 10% deformaci.

- Byl vybrán a realizován vhodný postup stanovení zaplnění vláken z 3D modelu vlákenné příze pomocí obrazové analýzy realizované v programu Matlab.

9.2 Přínosy pro praxi

Přínosy disertační práce pro praxi lze shrnout do následujících bodů:

- Použití pokročilého modelu vlákenné příze, který zahrnuje detailní analýzu jednotlivých vláken a jejich zákrutů včetně adekvátního zaplnění, může přinést významné přínosy nejen pro zkoumání mechanických vlastností přízí, ale také pro analýzu rozložení deformací a napětí, zkoumání zaplnění vláken v konkrétních oblastech příze, nebo pro výzkum reorganizace vláken. Tento model může být rovněž využit pro optimalizaci strojů a technologií pro výrobu přízí.
- Sestavená metodika tvorby numerické simulace 3D modelu vlákenné příze pro stanovení mechanických vlastností může být využita pro modelování různých vlákenných struktur (od měření, získání odpovídajícího obrazu geometrie vlákenných struktur, přes tvorbu modelu, zadání okrajových a počátečních podmínek, vyhodnocení). Lze jí využít také za účelem modelování mechanických vlastností netkaných textilií např. příze ovíjené nanovláknennou strukturou jak bylo uvedeno v příkladovou studii.

10. Závěr a doporučení

Disertační práce byla zaměřena na **problematiku tvorby numerického modelu vlákenné příze**, který bude respektovat složité geometrické uspořádání vláken příze, dále nelineární vlastnosti příze, které jsou ovlivněné zákrutem vláken, kontakty mezi vlákny a přeuspořádáním struktury během namáhání.

V úvodních dvou kapitolách práce se diskutuje současný stav řešené problematiky, kde samotná výroba vysoce kvalitních přízí je jednou z nejpoužívanějších současných technologií pro oděvní aplikace, a je proto nutné pro optimalizace přízí i výrobních zařízení umět komplexně popsat mechanické vlastnosti příze. Přiblížena je komplexita různých přístupů modelování vlákenných struktur, trendy modelování vláken, dalších lineárních vlákenných soustav a zejména přízí. Jedná se především o metody a přístupy tvorby modelů vlákenných struktur pro studium mechanických vlastností, využití matematických postupů, modelů kontinua, diskrétních modelů vláken, tvorby 3D geometrie vlákna i celé příze, včetně přiblížení dalších přístupů a speciálních metod modelování vlákenných struktur, např. využitím umělých neuronových sítí, použití sigmoidní aktivační funkce apod. (viz kap. 2).

Dále byla, na základě stanovených cílů disertační práce, tedy **tvorby pokročilého numerického modelu vlákenné příze pro studium mechanických vlastností**, provedena experimentální měření pro stanovení mechanických vlastností příze z vybraného materiálu, které byly důležité pro stanovení maximální tahové síly, deformace, napětí a přetvoření a snímání změny průměru příze během procesu zatěžování tak, aby se vytvořily vstupní a porovnávací data pro verifikaci numerického modelu. K tomuto účelu byla také sestavena modifikovatelná konstrukce pro upevnění makroskopu (viz kap 4.1). Výsledné hodnoty tahových zkoušek byly zaznamenávány do přehledových tabulek a následně byly vytvořeny kombinované grafy. Pro tvorbu odpovídající 3D geometrie modelu příze byla využita výpočetní tomografie (CT), kde pro vhodnou analýzu a zpracování CT snímků za účelem rekonstrukce vlákenné struktury byl vytvořen skript v programu Matlab s jednotlivými příkazy k vizualizaci a detailnímu rozdělení vláken (viz kap. 4.2).

Na základě experimentů a získaných dat z měření byla provedena tvorba pokročilé 3D geometrie modelu příze pro sestavení numerické simulace. V kap. 5 byla popsána metodika

a postup tvorby 3D geometrie modelu příze. Byly představeny vybrané nástroje a funkce pro tvorbu a zpracování obrazu vláken příze z CT tak, aby se vytvořila odpovídající konstrukce 3D modelu vlákně příze. Dále bylo využito parametrických rovnic pro tvorbu 3D modelu a způsob stanovení zaplnění 3D modelu příze. Za účelem stanovení zaplnění byly do 3D modelu příze přidány souřadnicové systémy a plochy, ve kterých byly zobrazeny jednotlivé řezy.

Z vytvořené pokročilé 3D geometrie modelu příze byla následně provedena tvorba numerické simulace 3D modelu vlákně příze pro stanovení mechanických vlastností (viz kap. 6). Nejprve byl představen import dat 3D modelu z CAD programu (Creo Parametric) do konečněprvkového programu ANSYS Workbench. Pro materiálový model vlákně příze byl vybrán bilineární model, který popisuje závislosti mezi napětím a deformací prostřednictvím modulu pružnosti, Poissonova čísla a tečného modulu (viz kap. 6.2). Dále byla diskutována problematika vhodného typu kontaktu, který je klíčový pro odpovídající silové působení mezi vlákny a také ovlivňuje tvorbu sítě konečných prvků (viz kap. 6.3). Při modelování příze se řešilo také povrchové tření mezi jednotlivými vlákny, čímž je limitován výběr vhodných typů kontaktu a také výběr prvků KP. Další problematikou, která byla diskutována, bylo zavedení odpovídajících okrajových a počátečních podmínek, které by odpovídaly provedeným měřením viz kap. 4.

Kapitola 7 se věnovala výsledkům numerických simulací 3D modelu vlákně příze při tahovém a tlakovém namáhání. Jednak byly uvedeny výsledky pro ideální model vlákně příze a diskutovány možnosti a omezení např. zjednodušení geometrie zákrutu. Dále se kapitola významně zabývá studiem a porovnáním výsledků pokročilého modelu vlákně příze, který vznikl za účelem verifikace a porovnání s experimentálními daty. Byla studována reorganizace vláken při různých deformacích, která byla následně porovnána s výsledky reálného vzorku vlákně příze. Získané výsledky také ukázaly, že v rámci časového průběhu natažení vlákně příze, se vlákna nerovnoměrně deformují a postupně se vlákna přibližují s ohledem na jednotlivé zákruty. Tedy pokročilý model příze lze využít pro studii optimálního počtu zákrutů v závislosti na konstrukci příze a jejích dalších parametrech. Mechanické vlastnosti reálných vzorků vlákně příze byly také porovnány s pokročilými modely vlákně příze, a to z hlediska hodnot zúžení a zaplnění vláken. Zaplnění vlákně příze bylo vyhodnoceno vlivem protahování v podélném směru do 0–10 % deformace a při stlačování v rozmezí 0 – 60 % deformace, jak je uvedeno v kap. 7.4.

Na závěr byla provedena příkladová studie aplikace pokročilého numerického modelu vlákněné příze s nanovláknennou strukturou (viz kap. 8). Jednalo se o příkladovou studii využití pokročilého modelování uvedeného v předešlých kapitolách na vybranou vláknennou strukturu. Katedra netkaných textilií a nanovlákněných materiálů se dlouhodobě zabývá vývojem nových principů zvlákňování, tvorby textilních materiálů. Proto byla vytvořena příkladová studie využití pokročilého numerického modelování vlákněné příze diskutované v předešlých kapitolách, tentokrát pro případ modelování příze s nanovláknem. Model vycházel z experimentu, kde příze rotuje kolem své osy v elektrostatickém poli a na obvod příze se ovíjí nanovláknem. Na těchto materiálech bylo pozorováno a experimentálně ověřeno zpevnění příze, které může být vysvětleno různými mechanismy. Jedním z nich je zvýšení vnitřního mezivlákněného tření uvnitř příze a větší zapojení povrchových vrstev příze během procesu zatěžování. Sestavený numerický model s nanovrstvou ukázal rozložení deformace a reorganizaci vláken, což může být podmětem pro další analýzy a pokročilé modelové simulace.

Celkově lze konstatovat, že využití pokročilého modelu vlákněné příze se zohledněním jednotlivých vláken a zákrutů včetně odpovídajícího zaplnění vláken může významně pomoci při studiu mechanických vlastností příze, zejména studiu rozložení deformace a napětí, studiu zaplnění vláken ve vybraných oblastech celé příze, či ke studiu reorganizace vláken. Tyto výsledky následně mohou pomoci také při optimalizaci nových strojů a výrobě vlákněné příze.

Pro zpřesnění a doplnění uvedených výsledků stanovených experimentálně a pomocí modelových simulací doporučuji další postup:

- Výzkum a zkoušení vybraných přízí při vysokých rychlostech zatěžování (simulace převíjení), realizovat měření a porovnávání na vzorcích a vytvořit proto odpovídající testovací metodiky a zkušební zařízení. Experimenty by mohly být provedeny v Laboratoři aplikované mechaniky Katedry částí a mechanismů strojů Technické univerzity v Liberci, kde jsou k dispozici řady zařízení pro testování dynamických dějů.

- Výzkum a modelování kontaktů mezi vlákny a jak jsou ovlivněny vlákněné příze jednotlivými zákruty s ohledem na různé druhy materiálů. Provést analýzy a důkladné studie trhlin vlákněných přízí (elastických, viskoelastických či hyperelastických přízí), které se vyrábějí pro různé průmyslové aplikace.
- Navrhuji provést modelové simulace umožňující posuzovat šíření trhliny v přízi a dále výsledky modelových simulací verifikovat s experimenty při využití vysokorychlostních kamer (např. Aramis).
- Pokračovat ve výzkumu optimalizace geometrie vlákněné příze. Následně doporučuji vytvořit odpovídající konstrukci sítě konečných prvků a sestavit vhodné počáteční a okrajové podmínky modelu a definovat odpovídající materiálové modely zahrnující i plastickou deformaci pro přiblížení reálného stavu.

11. Literatura

- [1] Kießling/Matthes: Textil- Fachwörterbuch, Berlin 1993, ISBN 3-7949-0546-6, pp. 146.
- [2] Délkové textilie a efektní nitě [online]. TU Liberec, 2015 datum přístupu = 2019-08-31 [cit. 2019-09-05]. (<https://elearning.tul.cz/mod/book/view.php?id=81756>).
- [3] Příže-nit-vlákně [online]. Naše řeč, 1986 (<http://naserec.ujc.cas.cz/archiv.php?art=6635>).
- [4] Ludicke A. Eine Studie uber dieringspindle, Dinglers. Polutech J. 1881; 181: 242, 334.
- [5] Mack C. Theory of spinning balloon. Q J Mech ApplMath 1958; 11: 196–207.
- [6] De Barr AE. The role of air drag in spinning. J Text Inst 1961; 52: 126–139.
- [7] Batra SK, Ghosh TK and Zeidman MI. Integrated approach to dynamic an alysis of the ring spinning process. Part I: without air drag and coriolisa cceleration. Text Res J 1989; 59: 309–317.
- [8] Fraser WB. On the theory of ring spinning. Proc R SocLond A 1993; 342: 439–468.
- [9] Fraser WB. Air drag and friction in thetwo-for- twister: results from the theory. J Text Inst 1993; 84: 364–375.
- [10] Fraser WB, Farnell L and Stump DM. Effect of yarn non-uniformity on the stability ofthe ring-spinning bal- loon. Proc R SocLond A 1995; 449: 597–621.
- [11] Stump DM and Fraser WB. Transient solutions of the ring spinning balloone quations. J Appl Mech Trans ASME 1996; 63: 523–528.
- [12] Tang ZX, Wang X, Fraser WB, et al. An experimental investigation of yarn tension in simulated ring spinning. Fiber Polym 2004; 5: 275–279.
- [13] Clark JD, Fraser WB, Sharma R, et al. The dynamic response of a ballooning yarn: theory and experiment. Proc R SocLond A 1998; 454: 2767–2789.
- [14] H.B.Tang, B.G.Xu, X.M.Tao J. Feng, Mathematical modeling and numerical simulation of yarn behavior in a modified ring spinning systém. Applied Mathematical Modelling, 35 (2011) 139–151.
- [15] R. Yin, X. M. Tao& B. G. Xu, Mathematical modeling of yarn dynamics in a generalized twisting systém, Nature – Scientific Reports, 2016, 6:24432, DOI: 10.1038/srep24432.
- [16] Xu Gaoping et al. Numerical modeling and analysis of yarn-end-capturing based on the immersed boundary-lattice Boltzmann method, Applied Mathematical Modelling 129 (2024) 70–87.
- [17] Xuzhong Su, Weidong Gao, Xinjin Liu, Chunping Xie, Bojun Xu. (2014), Theoretical Study of Yarn Torque Caused by Fibre Tension in the Spinning Triangle, Fibres & Textiles in Eastern Europe; 2014, Vol. 22, No. 6(108): pp. 41-50.
- [18] Dehghan Mahdiyeha & Ekhtiyari Esfandiyar. (2014), Review of distribution of fibre tension at the spinning triangle. Journal of the Textile Institute, 2014, Vol. 105, No. 11, pp. 1167-1177.
- [19] Platt MM. (1950), Mechanics of elastic performance of textile materials. Textile Research Journal 1950, Vol. 20, No. 10, pp. 665-667.

- [20] You Huh, Hyung Jin Kim, Jong Seong Kim. (2008) Tension dynamics of the fibres in a triangular plane flow of bundle. *Fibres and Polymers*, 2008; Vol. 9, No. 3, pp. 349-354.
- [21] Morgner J. (2003), Analyse und Optimierung des Verdichtungsspinnens im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Garnqualität, 2003, <https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/6552/1/JoergMorgner.pdf>
- [22] Přetrh příže: Prstencové dopřádací stroje. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99etrh_p%C5%99%C3%ADze. [cit. 2010-05-28].
- [23] Petřů M. (2012), Automobilová sedačka s nepolyuretanovým materiálem, Disertační práce, TUL, <https://dspace.tul.cz/items/e7058e48-4ddd-4017-9425-e3f2ac0c46af>.
- [24] C. M. Deng, L. J. Wang, X. G. Wang. (2007), Modeling the Tensile Strains of Non-uniform Fibres. *Fibres and Polymers*, May 2007, Vol. 8, No. 3, pp. 289-294.
- [25] Petřů M., Novák O., Lepšík P., Vosáhlo J. (2015), Modelování textilních útvarů I : příklady pro cvičení, Technická univerzita v Liberci.
- [26] Wenyi Yan, Zhi Li, Xungai Wang and Lijing Wang. (2009), Dynamic Responses of Irregular Fibres under Axial Tension. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, Vol. 113, No. 4, pp. 2561-2568.
- [27] R. Ognjanovic, Chapter 3 - Yarn modelling, Editor(s): X. Chen, In Woodhead Publishing Series in Textiles, Modelling and Predicting Textile Behaviour, Woodhead Publishing, 2010, Pages 112-143, ISBN 9781845694166, <https://doi.org/10.1533/9781845697211.1.112>.
- [28] Projekt Vosáhlo, Petřík (LTAUSA 18135 - Předmět: Luter – Exaltence).
- [29] J.K. Gafurov, B.M. Mardonov, M.H. Peerzada, K. Gafurov (2015), Investigating the Strain State of Fibres Located on the Helical Line in Extended Yarn. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2015; Vol. 23, No. 2(110), pp. 19-24.
- [30] Projekt Petřů Vosáhlo Petřík, Inherentně Flexibilní Areogely pro energeticky efektivní struktury (i-FACES), TO01000311.
- [31] Utting, W.S., Jones, N. (1987). The response of wire rope strands to axial tensile loads. 2.Comparison of experimental results and theoretical predictions, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.29(9), p.621-636, doi:10.1016/0020-7403(87)90034-8.
- [32] J.K. Gafurov, A. Sobirov, H.T. Bobojanov, K. Gafurov (2013), Evaluation of yarn structure based on its deformation, *Problems of textiles*, 2013; No. 4, P. 46-51.
- [33] Y.S.J. Cheng and K.P.S. Cheng. Case-Based Reasoning System for Predicting Yarn Tenacity. *Textile Research Journal*. 2004;74(8):718-722. doi:10.1177/004051750407400810.
- [34] Liao, T. and Adanur, S. (1998) A Novel Approach to Three-Dimensional Modeling of Interlaced Fabric Structures. *Textile Research Journal*, 68, 841-847. <http://dx.doi.org/10.1177/004051759806801109>.
- [35] Sultana Nasser, Ali Hallal, Mohammad Hammoud, Jaafar Hallal & Mohammad Karaki (2020): Geometrical modeling of yarn's cross-section towards a realistic unit cell of 2D and 3D woven composites, *The Journal of The Textile Institute*, DOI: 10.1080/00405000.2020.1778827.

- [36] Lomov, S.V., Mikolanda, T., Kosek, M. and Verposest, I. (2006) Model of Internal Geometry of Textile Fabrics: Data Structure and Virtual Reality Implementation. *Journal of the Textile Institute*, 98, 1-13. <http://dx.doi.org/10.1533/joti.2006.0251>.
- [37] Neckář, B., Das, D., (2006) ‘Mechanics of parallel fibre bundles’, *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 14:3, 23–28.
- [38] Neckář, B., Das, D. (2012), *Theory of structure and mechanics of Fibrous Assemblies and yarn*, CRC Press.
- [39] Li, Y., Zeng, P. and Zhao, L. (2004) The Study on the Clothing Simulation Based on 3D Graphics. *Journal of Textile Research (China)*, 25, 67-69.
- [40] B. Neckář, M. Vyšanská, Chapter 7 - Simulation of fibrous structures and yarns, Editor(s): D. Veit, In *Woodhead Publishing Series in Textiles, Simulation in Textile Technology*, Woodhead Publishing, 2012, 222-265, <https://doi.org/10.1533/9780857097088.222>.
- [41] Motahare Kargar, Pedram Payvandy & Vajiha Mozafary (2022) A numerical structure-based method of simulating filament yarns, *The Journal of The Textile Institute*, 113:12, 2681-2693, DOI: 10.1080/00405000.2021.2009185.
- [42] Lin, H., Zeng, X., Martin, S., Andrew, L. and Mike, C. (2011) Automated Geometric Modelling of Textile Structures. *Textile Research Journal*, 82, 1689-1702.
- [43] Gong, R.H., Ozgen, B. and Soleimani, M. (2009) Modeling of Yarn Cross-Section in Plain Woven Fabric. *Textile Research Journal*, 79, 1014-1020. <http://dx.doi.org/10.1177/0040517508101799>.
- [44] Deluca L B, Smith B and Waters W T (1990), ‘Analysis of factors influencing ring spun yarn tenacities for a long staple cotton Part I: Determining broken fibres in yarns’, *Text Res J*, 60(8), 475–82.
- [45] El Mogahzy Y and Chewning C H (2002), *Cotton fibre to yarn manufacturing technology – optimizing cotton production by utilizing the engineered fibre selection system*, 2nd edn, Cotton Incorporated, Cary, NC.
- [46] Pietro del Sorbo, Jeremie Girardot, Frederic Dau, and Ivan Iordanoff, Hyperelastic modelling of yarn structures for dynamic applications, *EPJ Web of Conferences* 183, 01031 (2018), *DYMAT 2018* <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818301031>.
- [47] El Mogahzy Y E, Broughton Jr R and Lynch W K (1990), ‘A statistical approach for determining the technological value of cotton using HVI fibre properties’, *Text Res J*, Oct, 497–500.
- [48] El Sourady A S, Worley S and Stith L S (1974), ‘The relative contribution of fibre properties to variations in yarn strength in upland cotton, *gossypium hirsutum L*’, *Text Res J*, 44(4), 301–6.
- [49] Johansen, B. S., Lystrup, A., and Jensen, M. T. (1998). CADPATH: a Complete Program for the CAD-, CAE- and CAM-Winding of Advanced Fibre Composites. *J. Mater. Process. Tech.* 77 (1-3), 194–200. doi:10.1016/s0924- 0136(97)00417-2.
- [50] Katoh, Y., Ozawa, K., Shih, C., Nozawa, T., Shinavski, R. J., Hasegawa, A., et al. (2014). Continuous SiC Fibre, CVI SiC Matrix Composites for Nuclear Applications: Properties and Irradiation Effects. *J. Nucl. Mater.* 448 (1-3), 448–476. doi:10.1016/j.jnucmat.2013.06.040

- [51] Kim, B. C., Weaver, P. M., and Potter, K. (2015). Computer Aided Modelling of Variable Angle Tow Composites Manufactured by Continuous Tow Shearing. *Compos. Structures* 129, 256–267. doi:10.1016/j.compstruct.2015.04.012.
- [52] Kim, C.-U., Kang, J.-H., Hong, C.-S., and Kim, C.-G. (2005). Optimal Design of Filament Wound Structures under Internal Pressure Based on the Semigeodesic Path Algorithm. *Compos. Structures*, 67 (4), 443–452. doi:10.1016/j.compstruct.2004.02.003.
- [53] Kim, D., Lee, H.-G., Park, J. Y., and Kim, W.-J. (2015). Fabrication and Measurement of Hoop Strength of SiC Triplex Tube for Nuclear Fuel Cladding Applications. *J. Nucl. Mater.* 458, 29–36. doi:10.1016/j.jnucmat.2014.11.117.
- [54] Tang J, Zhao G, Wang J, Ding Y, Feng Y, Chen Y, Zhang C, Huang Q, Xin S and Xu J (2021) Computational Geometry-Based 3D Yarn Path Modeling of Wound SiCf/SiC-Cladding Tubes and Its Application to MesoScale Finite Element Model. *Front. Mater.* 8:701205. doi: 10.3389/fmats.2021.701205.
- [55] Koussios, S., Bergsma, O. K., and Beukers, A. (2004). Filament Winding. Part 1: Determination of the Wound Body Related Parameters. *Composites A: Appl. Sci. Manufacturing* 35 (2), 181–195. doi:10.1016/j.compositesa.2003.10.003.
- [56] Koussios, S. (2004). *Filament Winding: A Unified Approach*. Delft University of Technology.
- [57] Hunter L (1988), ‘Prediction of cotton processing performance and yarn properties from HVI test results’, *Melliand Textilberichte*, 229–32 (E 123–E 124).
- [58] Jeong Y J and Kang T J (2001), ‘Analysis of compressional deformation of woven fabric using finite element method’, *J Text Inst*, 92 (Part 1, No 1), 1–5.
- [59] McPhee J R, Russell K P and Shaw T (1985), ‘The role of objective measurement in the wool textile industry’, *J Text Inst*, 76(2), 110–21.
- [60] Morris S J (1968), ‘The determination of the lateral compression modulus of fibres’, *J Text Inst*, 59, 536–47.
- [61] Morris P J, Merkin J H and Rennell R W (1999), ‘Modelling of yarn properties from fibre properties’, *J Text Inst*, 90(3), 322–35.
- [62] Morton W E (1956), ‘The arrangement of fibres in single yarns’, *Text Res J*, 26(5), 325–31.
- [63] Morris P J, Merkin J H and Rennell R W (1999), ‘Modelling of yarn properties from fibre properties’, *J Text Inst*, 90(3), 322–35.
- [64] Morton W E (1956), ‘The arrangement of fibres in single yarns’, *Text Res J*, 26(5), 325–31.
- [65] J K Gafurov, B Mardonov, K Gofurov, O Sh Dushamov, O O Ergashev and H T Bobajonov, Yarn Deformation with view of its structural structure, 2018, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 459 012042, doi:10.1088/1757-899X/459/1/012042.
- [66] Neelakantan P and Subramanian T A (1976), ‘An attempt to quantify the translation of fibre bundle tenacity into yarn tenacity’, *Text Res J*, 46(11), 822–7.
- [67] Onder E and Baser G (1996), ‘A comprehensive stress and breakage analysis of staple fibre yarns: Part I: Stress analysis of a staple yarn based on a yarn geometry of conical helix fibre paths’, *Text Res J*, 66(9), 562–75.

- [68] Wu, Hy., Chen, Xw., Zhang, Cx. et al. Modeling yarn-level geometry from a single micro-image. *Frontiers Inf Technol Electronic Eng*, 20, 1165–1174, (2019). <https://doi.org/10.1631/FITEE.1800693>.
- [69] A. Bral, L. Daelemans, J. Degroote, MICROSACLE NUMERICAL SIMULATION OF YARN TENSILE BEHAVIOR USING A HIGH-FIDELITY GEOMETRICAL FIBRE MODEL EXTRACTED FROM MICRO-CT IMAGING, The 8th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS Congress 2022 5 – 9 June 2022, Oslo, Norway.
- [70] Aychilie, Desalegn Beshaw, Yordan Kyosev, and Mulat Alubel Abteu. 2022. Automatic Modeller of Textile Yarns at Fibre Level, *Materials* 15, no. 24: 8887. <https://doi.org/10.3390/ma15248887>.
- [71] Shuang Zhao, Fujun Luan, Kavita Bala, Fitting Procedural Yarn Models for Realistic Cloth Rendering, Appears in the SIGGRAPH 2016 Proceedings, 2016.
- [72] Yin, R., Tao, X. & Xu, B. Mathematical Modeling of Yarn Dynamics in a Generalized Twisting System. *Sci Rep* 6, 24432 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep24432>.
- [73] Junbeom Park, Jaegeun Lee, Dong-Myeong Lee, Sung-Hyun Lee, Hyeon Su Jeong, Kun-Hong Lee, Seung Min Kim, Mathematical model for the dynamic mechanical behavior of carbon nanotube yarn in analogy with hierarchically structured bio-materials, *Carbon*, Volume 152, 2019, Pages 151-158, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.077>.
- [74] Wang, Yu, Xuejiao Li, Junbo Xie, Ning Wu, Yanan Jiao, and Peng Wang. 2023. Numerical and Experimental Investigation on Bending Behavior for High-Performance Fiber Yarns Considering Probability Distribution of Fiber Strength. *Textiles* 3, no. 1: 129-141. <https://doi.org/10.3390/textiles3010010>.
- [75] D. B. Ryklin and V. V. Davidyuk, Simulation modelling of the structure of twisted yarn with embedded electrically conductive fibres, *Fibre Chemistry*, Vol. 52, No. 2, July, 2020 (Russian Original No. 2, March-April, 2020), doi:10.1007/s10692-020-10167-w.
- [76] Hearle, J.W.S. and Shanahan, W.J. (1978) An Energy Method for Calculations in Fabric Mechanics. Part I: Principles of the Method. *Journal of the Textile Institute*, 69, 81-89. <http://dx.doi.org/10.1080/00405007808631425>.
- [77] Shanahan, W.J. and Hearle, J.W.S. (1978) An Energy Method for Calculations in Fabric Mechanics. Part II: Examples of Application of the Method to Woven Fabrics. *Journal of the Textile Institute*, 69, 81-89.
- [78] B. Meissner, V. Zilvar: *Fyzika polymerů*, SNTL, 1987, Kapitola 6 ,Elasticita, 199 - 224.
- [79] Computed Tomography. Dostupné na webových stránkách: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/AdvancedTechniques/computedtomography.htm>.
- [80] DAVID DOWSETT Patrick A Kenny, R Eugene Johnston. *The Physics of Diagnostic Imaging*. Second. CRC Press, 2006.
- [81] Neckář, B.: *Příze: Tvorba, struktura, vlastnosti*. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80 – 03 – 00213 – 3.
- [82] Petr Henyš, Multi-scale smoothed finite element micro-mechanical material analysis, Habilitace, TUL, <https://dspace.tul.cz/items/85b880a3-abf3-44af-b6ab-2342abc3a3e7>.
- [83] JAN, J. *Medical Image Processing, Reconstruction and Restoration – Concepts and Methods*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005. s. 730. ISBN 0-8247-5849-8.

- [84] H.B. Tang, B.G. Xu, X.M. Tao, J. Feng, Mathematical modeling and numerical simulation of yarn behavior in a modified ring spinning system, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 35, Issue 1, 2011, Pages 139-151, ISSN 0307-904X, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.05.013>.
- [85] Zheng, T.Y., Wei, J., Shi, Z.T., Li, T.T. and Wu, Z. (2015) An Overview of Modeling Yarn's 3D Geometric Configuration. *Journal of Textile Science and Technology*, 1, 12-24. <http://dx.doi.org/10.4236/jtst.2015.110>.
- [86] P. del Sorbo, J. Girardot, F. Dau, I. Iordanoff, Numerical investigations on a yarn structure at the microscale towards scale transition, *Composite Structures*, Volume 183, 2018, Pages 489-498, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.018>.
- [87] J. Militký: *Textilní vlákna*, Technická univerzita v Liberci, 2002.

Práce autora se vztahem ke studované problematice

- [1] M. Ryvolová, J. Vosáhlo, Determination of Mechanical Properties of FRP by Bending Test, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Switzerland, Springer International Publishing, 1, ISBN: 978-303033145-0, p. 581-587, 7 pages, ISSN: 21954356, [Online], 2020
- [2] M. Petrů, J. Vosáhlo, Principles of Increasing the Winding Effectivity of Composite Prepregs to Construction Application, Lecture Notes in Mechanical Engineering - Current Methods of Construction Design, Switzerland, Springer International Publishing, 1, ISBN: 978-3-030-33145-0, p. 557-564, 8 pages, ISSN: 21954356, [Online], 2020
- [3] M. Ryvolová, J. Vosáhlo, Comparison of mechanical properties of woven carbon reinforcements, Experimental Stress Analysis - 57th International Scientific Conference, EAN 2019 - Conference Proceedings, Czech Society for Mechanics, 1, ISBN: 978-802145766-9, p. 450-454, 5 pages, 2019
- [4] N. Kovalova, P. Kulhavý, J. Vosáhlo, A. Havelka, Experimental and Numerical Study of Sewing Seams of Automobile Seat Covers Under Unidirectional and Multiaxial Loading, TEKSTIL VE KONFEKSIYON, Izmir, Ege University, 1, p. 322-335, 14 pages, ISSN: 1300-3356, n. 4, [Online], 2019, IF-1
- [5] V. Malena, M. Fenkl, J. Vosáhlo, T. Martinec, M. Petrů, Hořák na principu kinetického spalování, 1, [Online], 2019
- [6] M. Petrů, P. Jandura, J. Vosáhlo, M. Mazač, O. Novák, A. Kešner, V. Křepčík, P. Fišer, Odpružení, zejména odpružení nápravy přípojných zemědělských strojů, zařízení a příslušenství, 1, [Online], 2019
- [7] I. Mašín, M. Petrů, P. Jandura, J. Vosáhlo, L. Hartman, Skladovací regál s policemi pro uložení tyčového materiálu, sledování jeho množství a optimalizaci polohy tyčového materiálu na polici, 1, 2019
- [8] M. Ryvolová, J. Vosáhlo, Crash Test of Carbon Composite, Experimental Stress Analysis - 56th International Scientific Conference, EAN 2018 - Conference Proceedings, Czech Society for Mechanics, 1, ISBN: 978-80-270-4062-9, p. 353-357, 5 pages, [Online], 2018
- [9] M. Petrů, O. Novák, P. Košvanec, I. Mašín, T. Martinec, J. Vosáhlo, P. Jandura, Funkční vzorek materiálu s nanostrukturami, 1, 2018
- [10] I. Mašín, M. Petrů, P. Jandura, L. Hartman, J. Vosáhlo, Funkční vzorek upínače komponenty průmyslového síta, 1, 2018
- [11] M. Petrů, M. Ryvolová, J. Vosáhlo, Increasing of winding effectivity of fiber prepregs aimed to improvement of mechanical properties of final composite parts, Advanced material congress, Composite materials congress, Stockholm, 1, ISBN: 978-91-88252-11-1, p. 71-72, 2 pages, 2018
- [12] O. Novák, M. Petrů, J. Vosáhlo, Numerical modeling of liquid filtration process, Experimental Stress Analysis - 56th International Scientific Conference, EAN 2018 - Conference Proceedings, 1, ISBN: 978-802704062-9, p. 306-307, 2 pages, 2018
- [13] J. Vosáhlo, M. Ryvolová, M. Petrů, Numerical Modelling of Behaviour of Surface Finishing of Composite Materials, Advances in Science and Technology Research

- Journal, Lublin, Wydawnictwo Naukowe Gabriel Borowski (WNGB), p. 48-53, 6 pages, ISSN: 2299-8624, n. 1, [Online], 2018
- [14] M. Petrů, J. Vosáhlo, Principles of increasing the winding effectivity of composite prepregs to construction application, THE 59TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF MACHINE DESIGN DEPARTMENTS, 1, p. 1-7, 7 pages, 2018
- [15] I. Mašín, M. Petrů, P. Jandura, J. Vosáhlo, L. Hartman, Upínač pro upínání polotovarů, zejména tyčí, drátů nebo trubek kruhového i nekruhového průřezu, 1, [Online], 2018
- [16] N. Kovalova, P. Kulhavý, J. Vosáhlo, A. Havelka, Experimental Investigation of Multiaxial Stress of the Sewing Seam and Creating its numerical model, Fibres and textiles (Vlákna a textil), Bratislava, Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1, p. 49-53, 5 pages, ISSN: 1335-0617, n. 2, 2017
- [17] T. Kalous, J. Soukupová, J. Vosáhlo, D. Jašíková, Global Imaging Method for Measuring Ionic Wind in the Vicinity of the Hv Powered Electrode, 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NANOMATERIALS - RESEARCH & APPLICATION (NANOCON 2016), Brno, TANGER Ltd; Reg Ctr Adv Technologies & Mat; Czech Soc New Mat & Technologies, 1, ISBN: 9788087294710, p. 201-206, 6 pages, n. 2016, 2017
- [18] M. Petrů, I. Mašín, J. Vosáhlo, Inovace výměníku tepla pro plynové ohříváče vzduchu, 35 pages, 2017
- [19] M. Surovátková, J. Vosáhlo, Modeling And Measuring Mechanical Damage for Adjustable Luminaire, The 58th International Conference of Machine Design Departments ICMD 2017, ISBN: 978-80-213-2769-6, p. 364-367, 4 pages, [Online], 2017
- [20] M. Petrů, M. Surovátková, J. Vosáhlo, Qualification and research tests needed for qualification of new paintshop for Alfa Romeo parts., 70 pages, 2017
- [21] P. Košvanec, M. Petrů, I. Mašín, T. Martinec, I. Doležal, O. Novák, J. Vosáhlo, P. Jandura, Testovací trať umožňující testování filtrů pro kapalinovou filtraci, 2017
- [22] M. Petrů, O. Novák, J. Vosáhlo, I. Mašín, M. Surovátková, Výzkumy, testy a optimalizace na pouličních svítidlech, 170 pages, 2017
- [23] M. Petrů, O. Novák, J. Vosáhlo, Experimental and numerical analysis for study a stress of new type lifting platform construction for car relocation, EAN 2016 - 54th International Conference on Experimental Stress Analysis, Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni, 1, ISBN: 978-802610624-1, 4 pages, [Online], 2016
- [24] O. Novák, M. Petrů, J. Vosáhlo, Experimental and numerical analysis of glass samples, EAN 2016 - 54th International Conference on Experimental Stress Analysis, Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni, ISBN: 978-802610624-1, 4 pages, [Online], 2016
- [25] T. Kalous, J. Soukupová, J. Vosáhlo, D. Jašíková, Global Imaging method for measuring ionic wind in the vicinity of the HV power electrode, NANOCON 2016 - Conference Proceedings, 8th International Conference on Nanomaterials - Research and Application, Brno, Tanger Ltd., ISBN: 9788087294710, p. 201-206, 7 pages, [Online], 2016
- [26] N. Kovalova, P. Kulhavý, J. Vosáhlo, A. Havelka, Numerical Model And Analysis of Multiaxial Stress on the Sewing Seam, 16th AUTEX World Textile Conference 2016, Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of Sciences and Engineering, Department of Textiles, Graphic Arts and Design, ISBN: 978-961-6900-17-1, 8 pages, 2016

- [27] P. Kulhavý, N. Kovalova, J. Vosáhlo, Numerical Model of the Static Loading of a Stitched Seam in the Composite Cover of Car Seat, Applied Mechanics and Materials, Švýcarsko, 2016 Trans Tech Publications Inc., Switzerland, 1, p. 137-140, 4 pages, ISSN: 1662-7482, n. 827, [Online], 2016
- [28] J. Vosáhlo, O. Novák, M. Petrů, P. Lepšík, FEM Modelling and Experimental Analysis of Mechanical Properties of Artificial Blood Vessel, Applied Mechanics and Materials, Švýcarsko, Trans Tech Publications Ltd, 1, ISBN: 9783038354130, p. 165-168, 4 pages, ISSN: 1662-7482, n. 2, [Online], 2015
- [29] M. Petrů, O. Novák, P. Srb, P. Kulhavý, M. Syrovátková, J. Vosáhlo, R. Kovář, Funkční vzorek simulátoru automyčky, 2015
- [30] M. Petrů, O. Novák, P. Kulhavý, P. Srb, M. Syrovátková, J. Vosáhlo, R. Kovář, Funkční vzorek zařízení pro testování tvrdosti povrchu, 2015
- [31] P. Kulhavý, J. Vosáhlo, N. Kovalova, Methods of Creating a Numerical Model of a Real Seam Based on Experimental Data, EAN 2015 - 53rd Conference on Experimental Stress Analysis, Praha, Czech Technical University in Prague, 1, ISBN: 9788001057346, p. 195-202, 8 pages, 2015
- [32] M. Petrů, O. Novák, P. Lepšík, J. Vosáhlo, Modelování textilních útvarů I - příklady pro cvičení, Liberec, Technická univerzita v Liberci, 1, ISBN: 978-80-7494-181-8, 2015
- [33] M. Petrů, O. Novák, J. Vosáhlo, P. Lepšík, Experimental and Numerical Study of Mechanical Properties of Artificial Blood Vessel, EAN 2014 - 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis, Plzeň, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o, 1, ISBN: 978-80-231-0377-6, p. 175-176, 2 pages, 2014

Stručná charakteristika dosavadní odborné, výzkumné a vědecké činnosti

Smluvní výzkum (Dílčí činnost)

- 2021 Škoda Auto a.s. Mladá Boleslav, Vývoj odlehčené palety s kompozitními prvky za účelem snížení hmotnosti a redukce uhlíkové stopy vlivem přepravy, člen řešitelského týmu. Projekt smluvní činnosti je zapsán v pod interním identifikačním kódem.
RIV/46747885:24620/20:00008366!RIV21-MSM-24620, Skoda_TUL_2020_1
- 2020 Kovo Staněk s.r.o., Analýza vlivu konstrukce lopatek tryskacích zařízení na procesní parametry. Klíčový řešitel, Reg.č. 19126, Inovační voucher
- 2019 MUBEA s.r.o, Konstrukce a měření, měření adheze v uchyceních zrcadel v závislosti na teplotních změnách. Člen řešitelského týmu, smluvní výzkum.
- 2018 Spoluřešitelská činnost na konstrukci a měření, měření mechanických vlastností hliníkové příruby. Projekt je zapsán pod číslem 5819/8430_19_1
- 2017 - 2018 Spoluřešitelská činnost na testování a analýze automobilových dílů z kompozitu. Projekt je zapsán pod číslem BS-15-04421
- 2015 Spoluřešitelská činnost na Modelování textilních útvarů I - příklady pro cvičení. Projekt je zapsán pod interním identifikačním kódem
RIV/46747885:24410/15:00002893!RIV16-MSM-24410,ISBN: 978-80-7494-181-8

Spolupráce na řešení projektů s vědeckovýzkumným charakterem

- 2020 - 2023 TAČR Trend: Vývoj přesného secího stroje pro současné setí hlavní plodiny a meziplodiny, reg. č. FW01010577, klíčový řešitel (TUL, BEDNAR)
- 2020 - 2023 TAČR Trend: Inteligentní filtrace terciárního čištění odpadních vod pomocí super textilií a nano membrán, reg. č. FW01010306, člen řešitelského týmu (TUL, IN - EKO TEAM s.r.o.)
- 2018 - 2022 Spoluřešitelská činnost na úspěšném projektu modulární platforma pro autonomnípodvozky specializovaných elektrovozidel pro dopravu nákladu a zařízení. Reg. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_025/0007293
- 2018 - 2019 TAČR Zeta: Výzkumu systémů pro zvýšení energetické efektivity zpracování půdy, reg. č. TJ01000099, klíčový řešitel (TUL, BEDNAR)

Přílohy

Příloha [P1]

Vytvořený skript pro rozdělení spojených vláken.

```
xx = 'f:\DISERTACNI PRACE9\';
bw = imread(xx);
L = watershed(bw);
Lrgb = label2rgb(L);
imshow(Lrgb)
imshow(imfuse(bw,Lrgb))
bw2 = ~bwareaopen(~bw, 10);
D = -bwdist(~bw);
imshow(D, [])
Ld = watershed(D);
imshow(label2rgb(Ld))
L = watershed(bw);
Lrgb = label2rgb(L);
imshow(Lrgb)
imshow(imfuse(bw,Lrgb))
axis([10 175 15 155])
bw2 = ~bwareaopen(~bw, 10);
D = -bwdist(~bw);
imshow(D, [])
Ld = watershed(D);
imshow(label2rgb(Ld))
bw2 = bw;
bw2(Ld == 0) = 0;
mask = imextendedmin(D,2);
imshowpair(bw,mask, 'blend')
D2 = imimposemin(D,mask);
Ld2 = watershed(D2);
bw3 = bw;
bw3(Ld2 == 0) = 0;
bw4 = bw3;
bw5 = imcomplement(bw4);
bw6 = bw5;
```

```
bw7 = imcrop(bw5,[110 250 565 480]);  
bw8 = bw7;  
imwrite(bw8, "1.png")  
image_folder = 'f:\DISERTACNI PRACE\pes40texBW_tif';  
filename = dir(fullfile(image_folder, '*.tif'));  
total_images = numel(filename);  
for n=1:total_images  
    f=fullfile(image_folder,filename(n).name);  
    our_images = imread(f);  
end
```

Příloha [P2]

Použitý skript v jazyce visual basic sloužící pro odečtení jednotlivých středových bodů v programu Solidworks.

```
Dim swApp As Object
Sub main()
Dim swApp As SldWorks.SldWorks
Dim doc As SldWorks.ModelDoc2
Dim part As SldWorks.PartDoc
Dim sm As SldWorks.SelectionMgr
Dim feat As SldWorks.Feature
Dim sketch As SldWorks.sketch
Dim v As Variant
Dim i As Long
Dim k As Long
Dim sseg As SldWorks.SketchSegment
Dim sline As SldWorks.SketchLine
Dim sp As SldWorks.SketchPoint
Dim ep As SldWorks.SketchPoint
Dim s As String
Set exApp = CreateObject("Excel.Application")
If Not exApp Is Nothing Then
    exApp.Visible = True
    If Not exApp Is Nothing Then
exApp.Workbooks.Add
        Set sheet = exApp.ActiveSheet
        If Not sheet Is Nothing Then
sheet.Cells(1, 2).Value = "X"
sheet.Cells(1, 3).Value = "Y"
sheet.Cells(1, 4).Value = "Z"
            End If
        End If
    End If
k = 0
Set swApp = GetObject(, "sldworks.application")
If Not swApp Is Nothing Then
Set doc = swApp.ActiveDoc
If Not doc Is Nothing Then
If doc.GetType = swDocPART Then
Set part = doc
Set sm = doc.SelectionManager
If Not part Is Nothing And Not sm Is Nothing Then
If sm.GetSelectedObjectType2(1) = swSelSKETCHES Then
Set feat = sm.GetSelectedObject4(1)
Set sketch = feat.GetSpecificFeature
```

```
If Not sketch Is Nothing Then
  v = sketch.GetSketchPoints
  For i = LBound(v) To UBound(v)
    Set sp = v(i)
    If Not sp Is Nothing And Not sheet Is Nothing And Not exApp Is Nothing Then
      If Not sp.Type = 10 Then
        sheet.Cells(2 + k, 2).Value = (sp.X) * 1000
        sheet.Cells(2 + k, 3).Value = (sp.Y) * 1000
        sheet.Cells(2 + k, 4).Value = (sp.Z) * 1000
        sheet.Cells(2 + k, 5).Value = sp.Type
        k = k + 1
      End If
    End If
  End If
```

Příloha [P3]

Vytvořený skript pro vybírání středových bodů z pracovní složky.

```
source = "f:\DISERTACNI PRACE\";
listing = dir(source);

data = [];

for index=3:length(listing)
    I = imread(source + listing(index).name);
    L = bwlabel(I);
    s = regionprops(L, 'Centroid');
    c = cat(1, s.Centroid);
    %     figure;
    %     imshow(I);

    z = ones(size(c,1),1)*((index-2)/1000);

    data = [data;[c, z]];

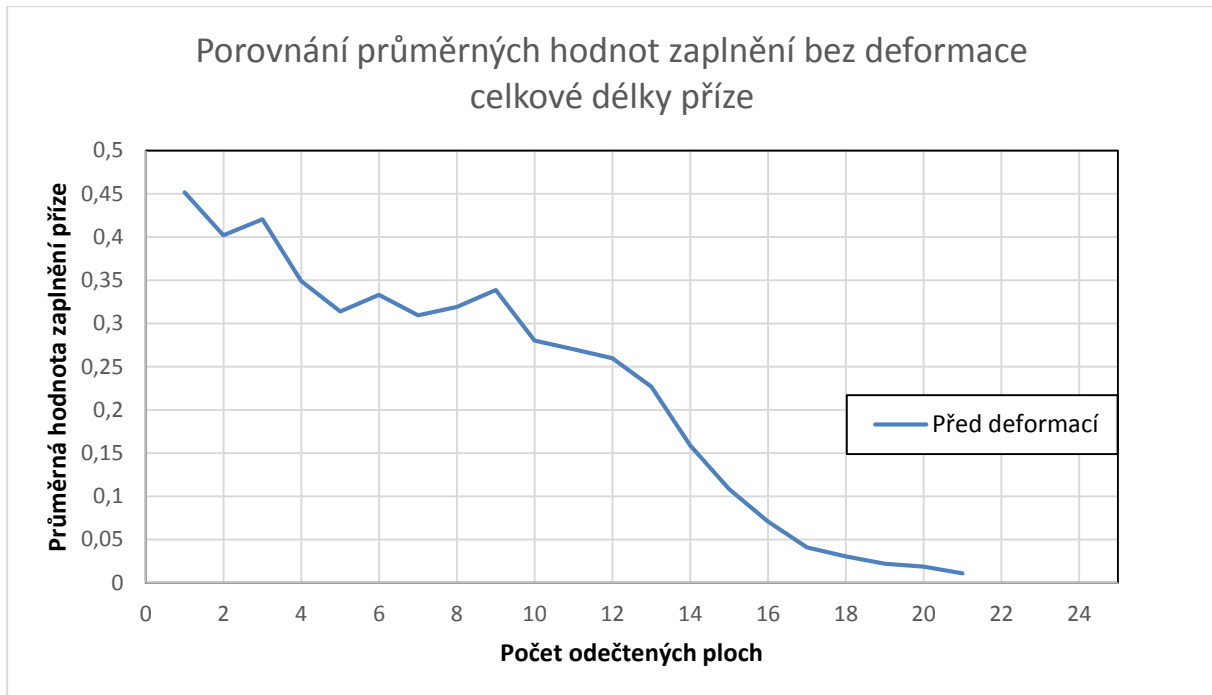
    %     hold on
    %     PP = plot(c(:,1), c(:,2), 'b*');
    %     hold off
end

data = 1*data;

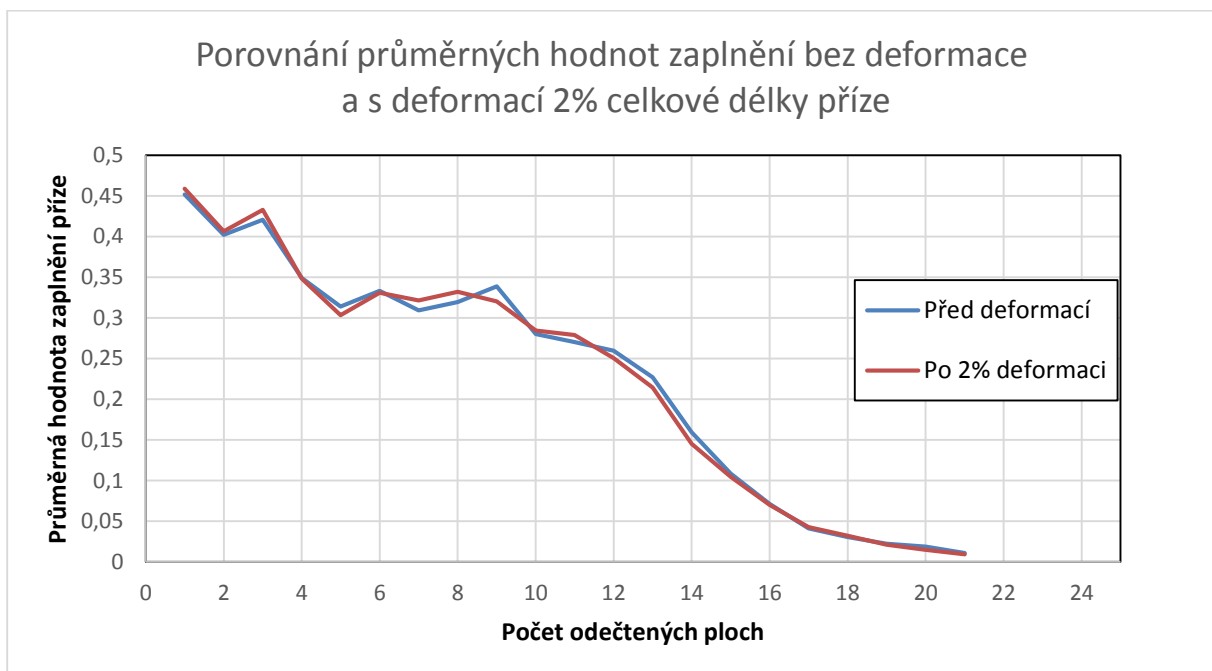
writematrix(data, 'verze_1.xls')
```

Příloha [P4]

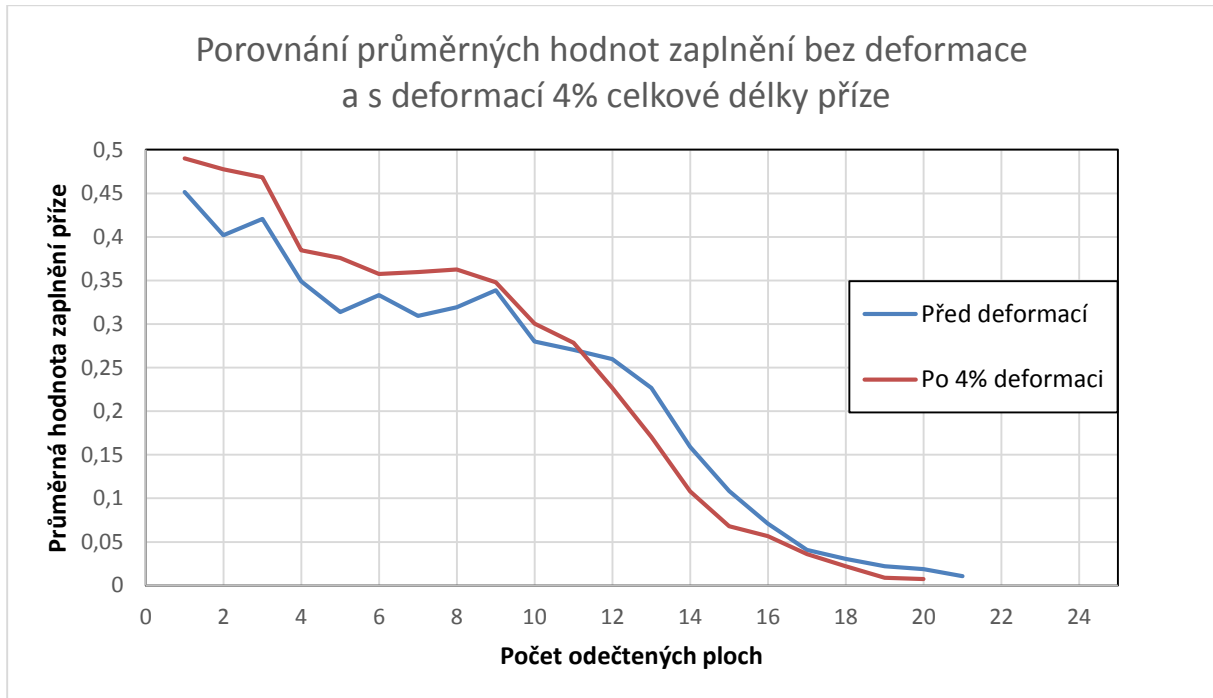
- Vyhodnocené grafy zaplnění pro tahovou deformaci v podélném směru



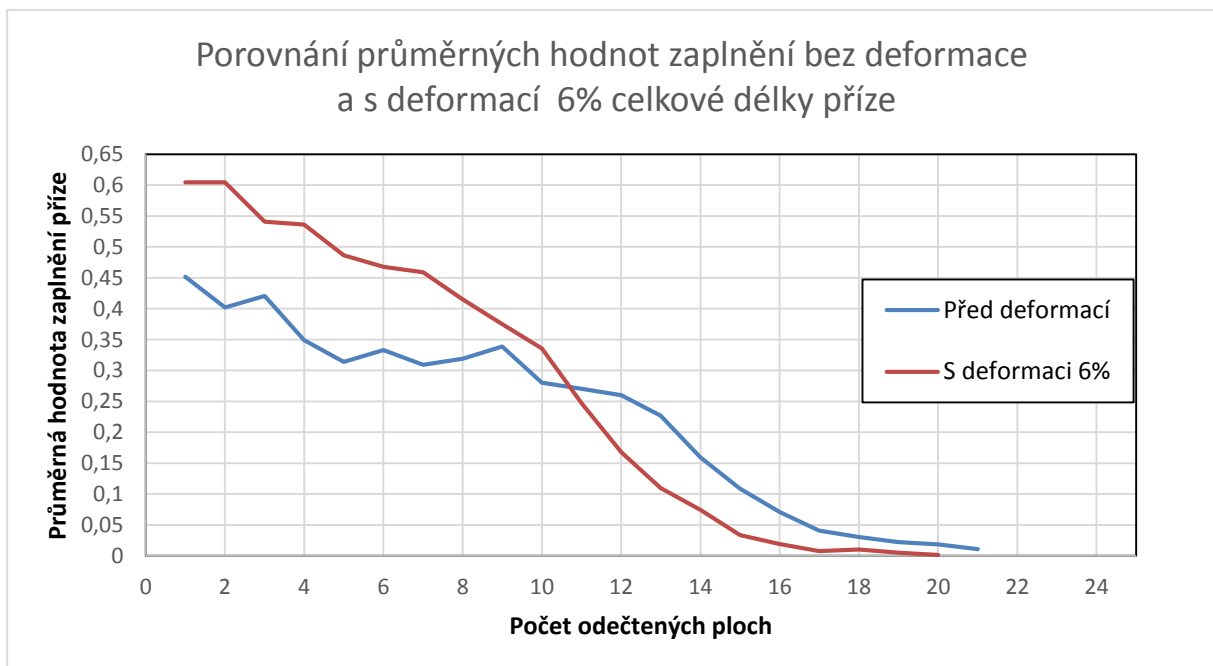
Obr. P4 – 1 Graf průměrných hodnot zaplnění pro nulovou deformaci.



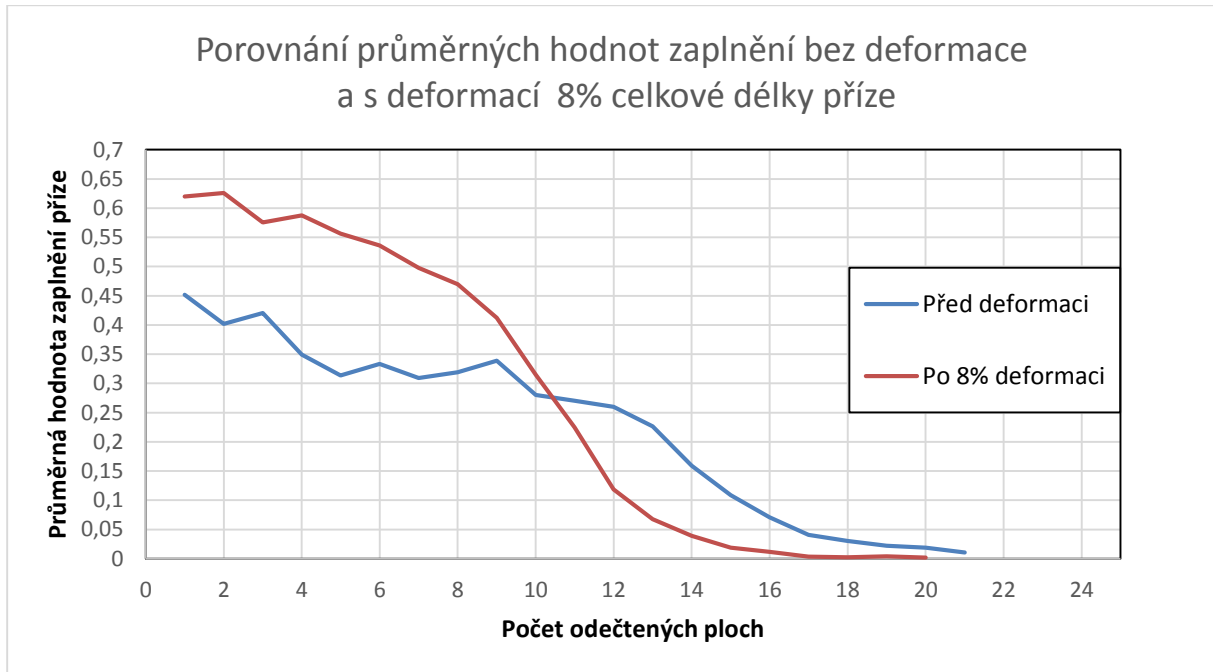
Obr. P4 – 2 Graf porovnání průměrných hodnot zaplnění mezi nulovou deformací a 2% deformací.



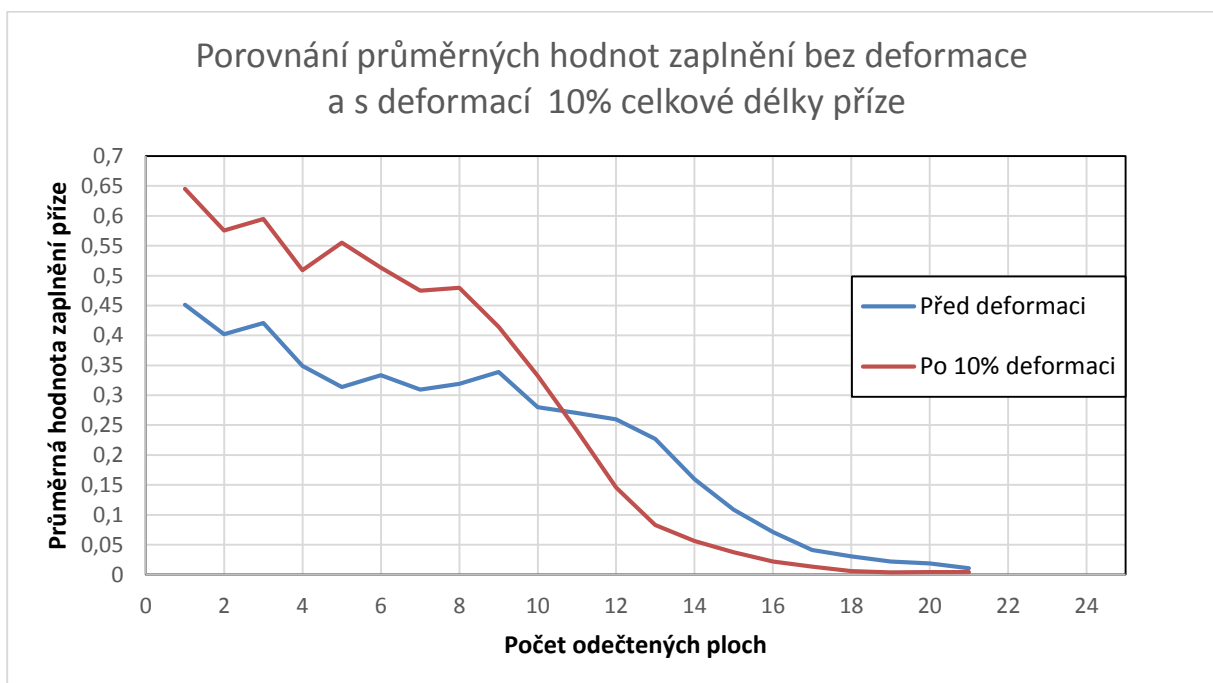
Obr. P4 – 3 Graf porovnání průměrných hodnot zaplnění mezi nulovou deformací a 4% deformací.



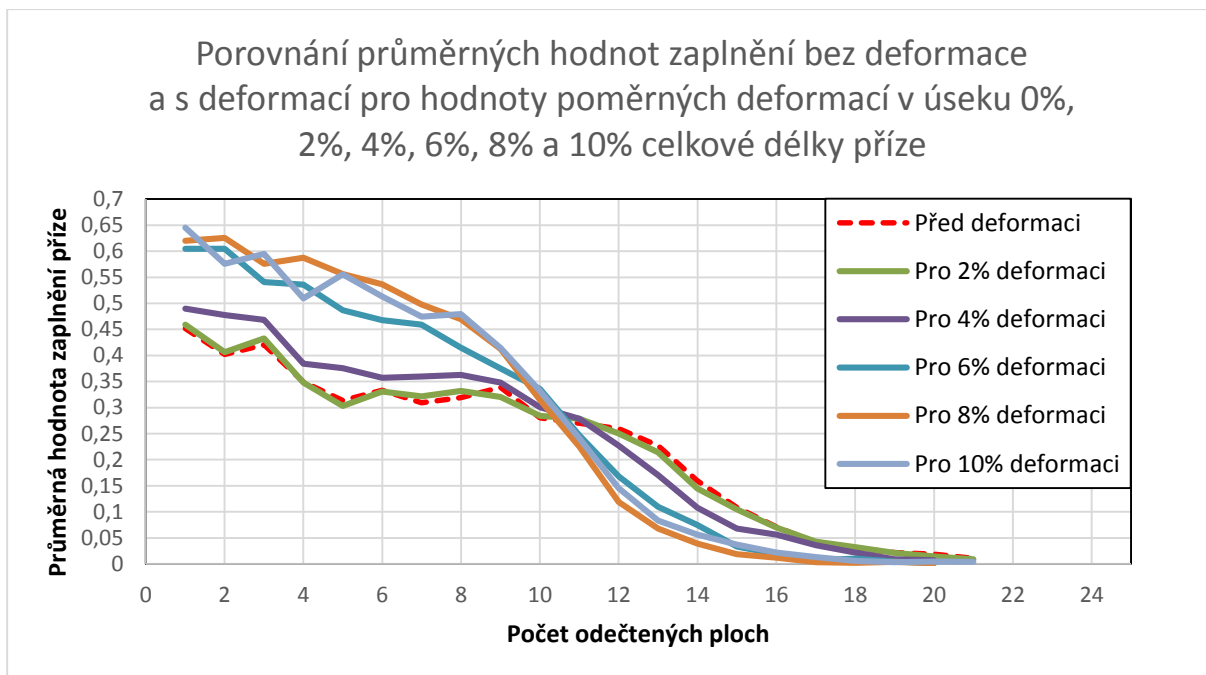
Obr. P4 – 4 Graf porovnání průměrných hodnot zaplnění mezi nulovou deformací a 6% deformací.



Obr. P4 – 5 Graf porovnání průměrných hodnot zaplnění mezi nulovou deformací a 8% deformací.

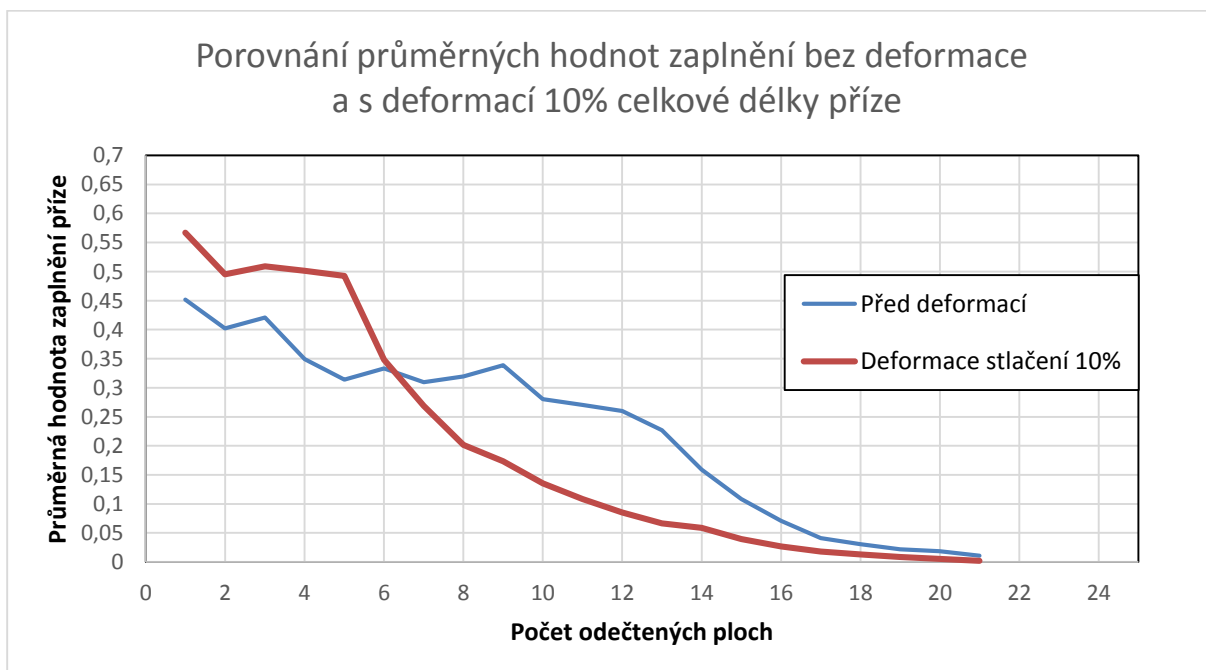


Obr. P4 – 6 Graf porovnání průměrných hodnot zaplnění mezi nulovou deformací a 10% deformací.

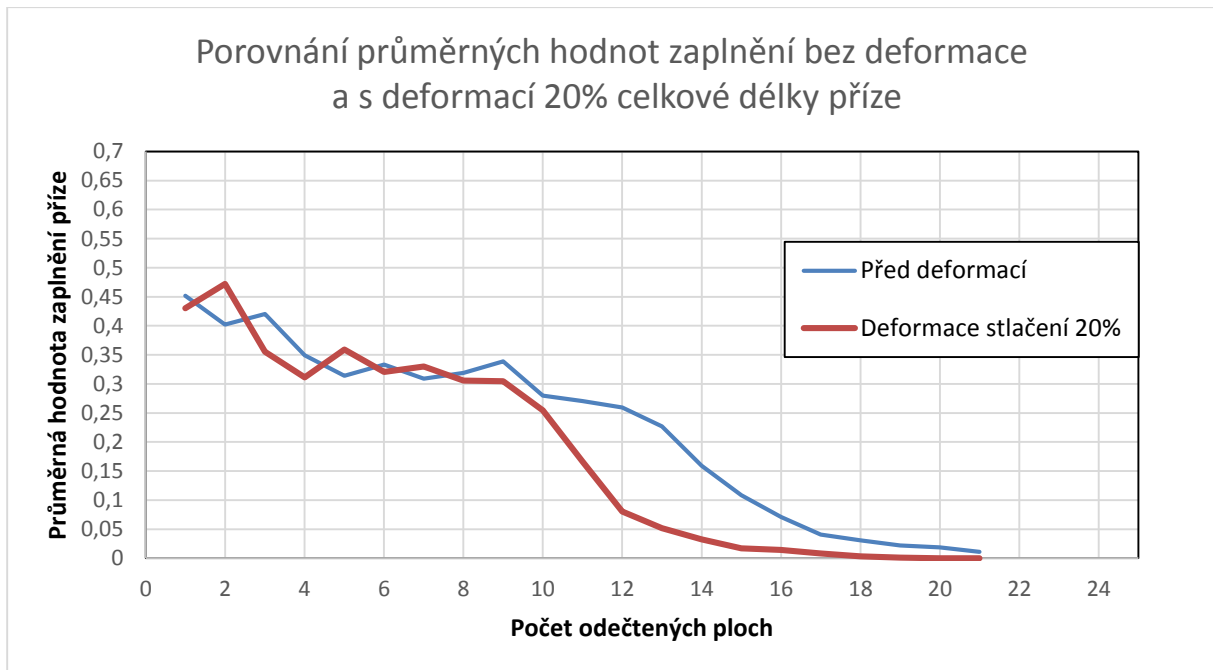


Obr. P4 – 7 Kombinace grafů průměrných hodnot zaplnění mezi nulovou deformací až 10% deformací.

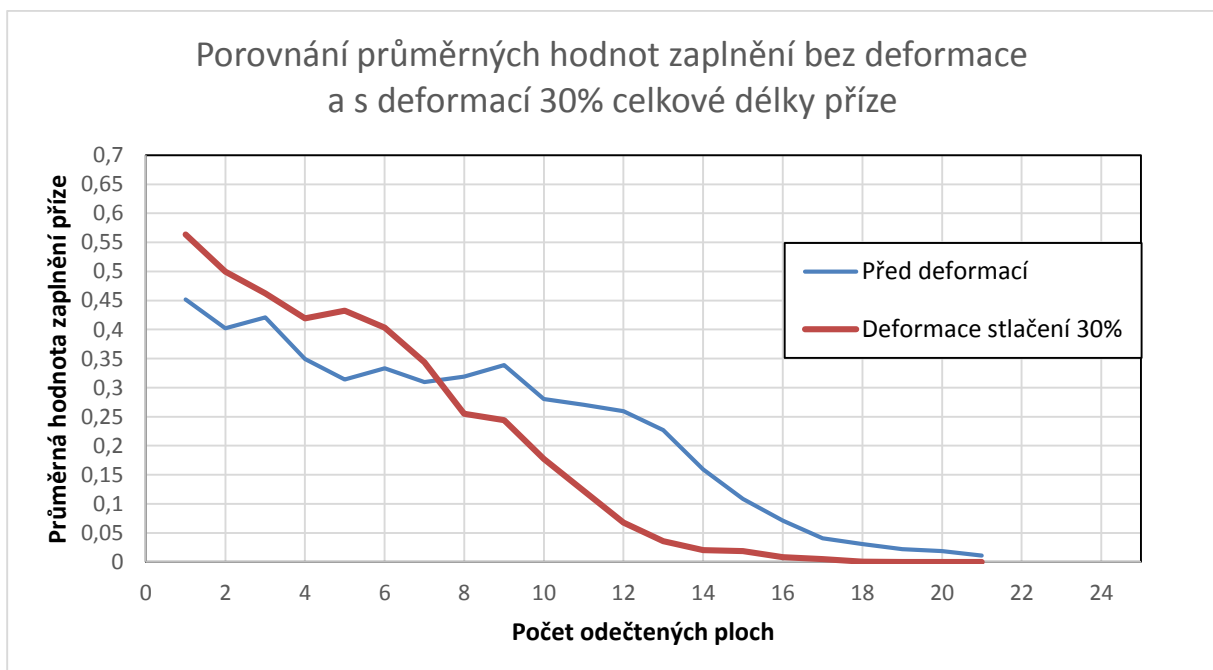
- Vyhodnocené grafy zaplnění při stlačování příze



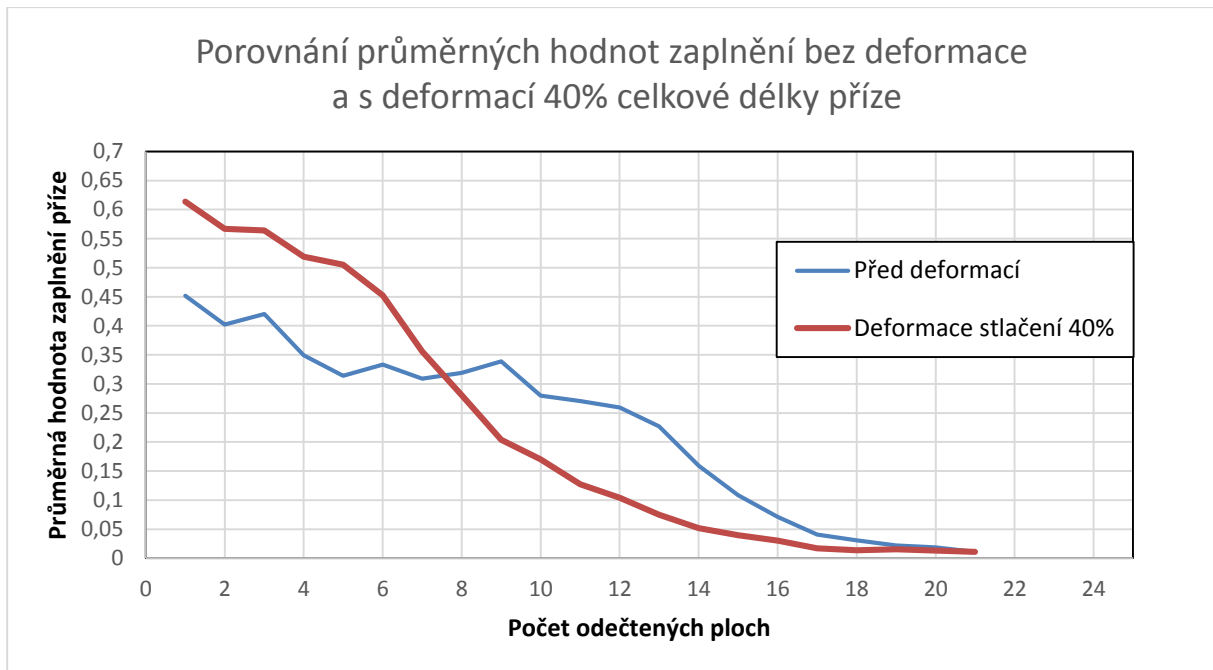
Obr. P4 – 8 Graf průměrných hodnot zaplnění pro 10% deformaci stlačené příze.



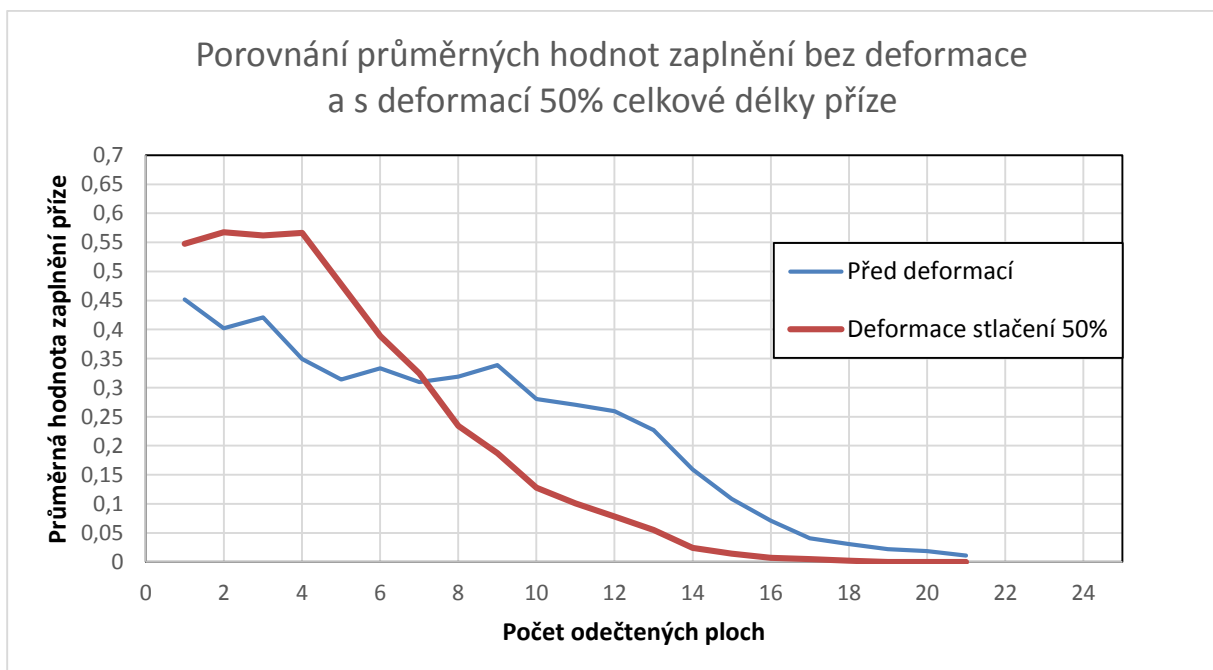
Obr. P4 – 9 Graf průměrných hodnot zaplnění pro 20% deformaci stlačené příze.



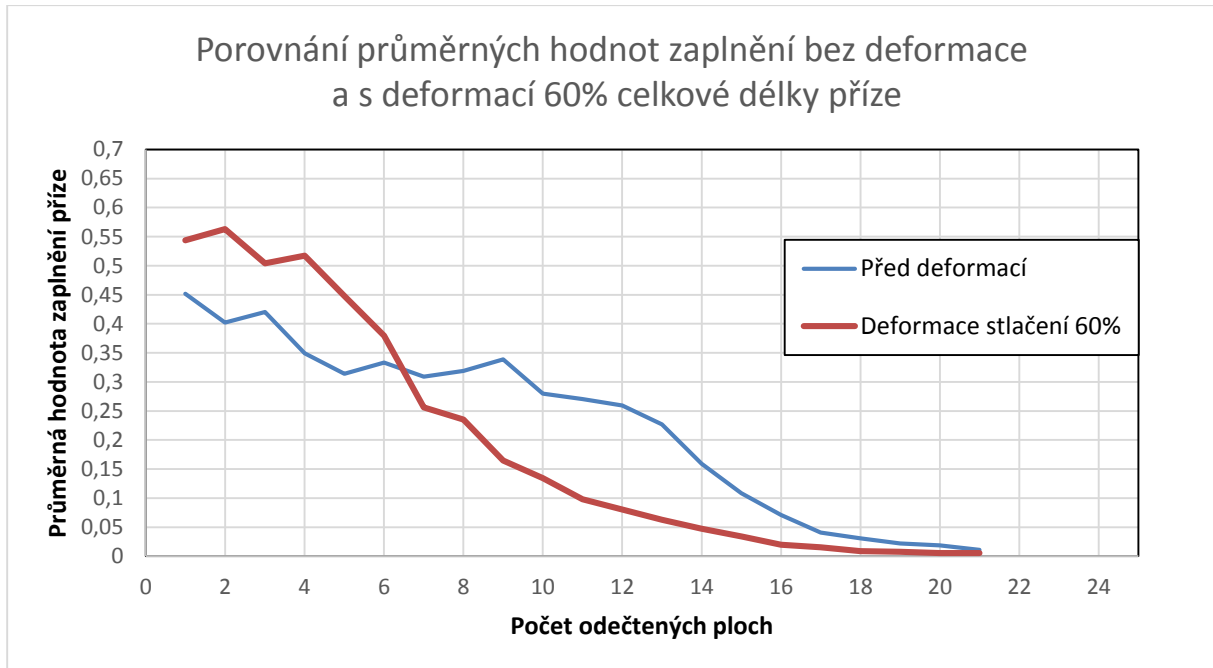
Obr. P4 – 10 Graf průměrných hodnot zaplnění pro 30% deformaci stlačené příze.



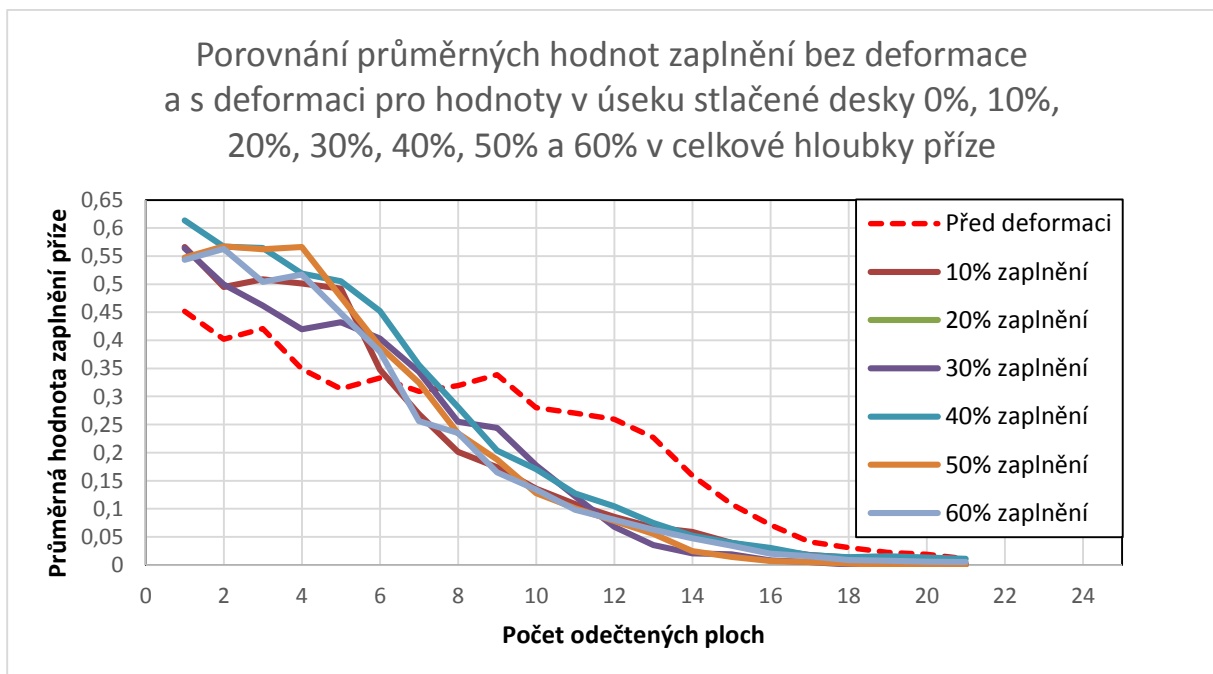
Obr. P4 – 11 Graf průměrných hodnot zaplnění pro 40% deformaci stlačené příze.



Obr. P4 – 12 Graf průměrných hodnot zaplnění pro 50% deformaci stlačené příze.



Obr. P4 – 13 Graf průměrných hodnot zaplnění pro 60% deformaci stlačené přize.

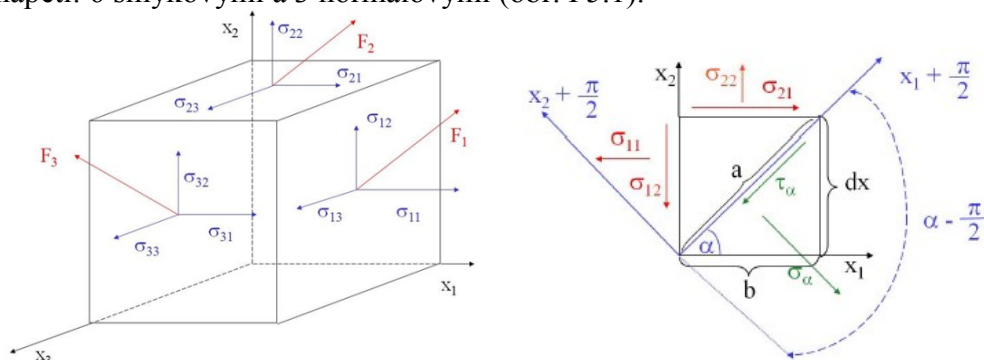


Obr. P4 – 14 Kombinace grafů průměrných hodnot zaplnění v průběhu stlačování mezi nulovou deformací až 60%

5. Příloha [P5]

Napětí a deformace vlákna

Samotné vlákno lze obecně charakterizovat lineárními mechanickými vlastnostmi, jak uvádí např. [78]. Lze proto pro matematický popis vycházet ze základního lineárního vztahu mezi napětím a deformací tedy, že vlákna jsou schopna v rámci malých deformací se pružně deformovat. Deformace lineárně elastických materiálů je okamžitá (časově nezávislá) a dokonale vratná. Jednoduše to lze charakterizovat tím, že působí-li na infinitezimální objemový element vlákna soustava sil F_1, F_2, F_3 , je napjatost elementu určena 9 složkami napětí: 6 smykovými a 3 normálovými (obr. P5.1).



Obr. P5.1 Napjatost v objemovém infinitezimálním elementu a změna orientace souřadného systému

Při zachování podmínky rovnováhy vzhledem k těžišti elementu platí vztah (P5.1),

$$|\sigma_{12}| = |\sigma_{21}| \quad |\sigma_{23}| = |\sigma_{32}| \quad |\sigma_{13}| = |\sigma_{31}| \quad (\text{P5.1})$$

a tedy pro určení napjatosti systému postačí 6 složek napětí z celkových 9. Lineární vztah mezi napětím a deformací se vyjadřuje Hookeovým zákonem podle (P5.2), nebo v rozšířeném maticovém tvaru podle (P5.3).

$$\sigma = k\varepsilon, \quad \sigma \neq f(t) \quad (\text{P5.2})$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1113} & C_{1123} & C_{1112} \\ & C_{2211} & & & & \\ & & \dots & & & \\ & & & \dots & & \\ & & & & \dots & \\ C_{1211} & & & & & C_{1212} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix} \quad (\text{P5.3})$$

Vlákna využitá pro účely této disertační práce jsou syntetického původu z polymerního materiálu, konkrétně polyesteru, kde lze popsat napěťový stav prostřednictvím tenzorové závislosti. Při výpočtu lze vycházet z charakteristického popisu invariantu napětí a deformace,

což jsou veličiny nezávislé na souřadném systému, jak uvádí [78]. Následně můžeme vyjádřit poměrné deformace podle vztahů (P5.4).

$$\lambda_1 = 1 + \varepsilon_{11} \quad \lambda_2 = 1 + \varepsilon_{22} \quad \lambda_3 = 1 + \varepsilon_{33} \quad (\text{P5.4})$$

Pro invarianty (I) deformace platí vztahy (P5.5 – P5.7)

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (\text{P5.5})$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 + \lambda_1^2 \cdot \lambda_3^2 + \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 \quad (\text{P5.6})$$

$$I_3 = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (\text{P5.7})$$

Pro invarianty napětí pak platí vztahy (P5.8 – P5.10)

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \quad (\text{P5.8})$$

$$I_2 = \sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 - \sigma_{11} \cdot \sigma_{22} - \sigma_{22} \cdot \sigma_{33} - \sigma_{33} \cdot \sigma_{11} \quad (\text{P5.9})$$

$$I_3 = -\sigma_{11}\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{31}^2 - \sigma_{33}\sigma_{12}^2 + \sigma_{11} \cdot \sigma_{22} \cdot \sigma_{33} + 2\sigma_{12} \cdot \sigma_{23} \cdot \sigma_{31} \quad (\text{P5.10})$$

Často je žádoucí určit, jak se složky napětí změní se změnou orientace souřadného systému. Zavedeme-li předpoklad, že složky napětí v jedné rovině jsou rovny nule, pak se napjatost systému zjednodušuje na rovinnou. Elementem vymezeným rozměry b a dx schematicky znázorněným na (obr. P5.2) vedeme řez pod úhlem α (v našem případě 45°). Smykové τ_a a normálové σ_a napětí v řezu určíme z rovnice rovnováhy sil, vychází ze vztahu (P5.11 – P5.12) [78].

$$F_{at} = \tau_a a = \tau_a \frac{dx}{\sin \alpha} \quad (\text{P5.11})$$

$$F_{a\sigma} = \sigma_a a = \sigma_a \frac{dx}{\sin \alpha} \quad (\text{P5.12})$$

Pro výpočet smykového normálového napětí platí vztah (P5.13 – P5.22)

$$-\sigma_{11} \cos \alpha \cdot dx + \sigma_{22} \sin \alpha \cdot b - \sigma_{12} \sin \alpha \cdot dx + \sigma_{21} \cos \alpha \cdot b - \tau_a \frac{dx}{\sin \alpha} = 0 \quad (\text{P5.13})$$

$$\tau_a = -\frac{1}{2}(\sigma_{11} - \sigma_{22})\sin 2\alpha + \sigma_{21} \cos 2\alpha \quad (\text{P5.14})$$

Výpočet napětí σ_a

$$\sigma_{11} \sin \alpha \cdot dx + \sigma_{22} \cos \alpha \cdot b - \sigma_{12} \cos \alpha \cdot dx + \sigma_{21} \sin \alpha \cdot b - \sigma_a \frac{dx}{\sin \alpha} = 0 \quad (\text{P5.15})$$

$$\sigma_a = -\sigma_{11} \sin 2\alpha + \sigma_{11} \sin^2 \alpha + \sigma_{22} \cos^2 \alpha \quad (\text{P5.16})$$

Výpočet smyku $\tau_{a+\frac{\pi}{2}}$:

$$\tau_{a+\frac{\pi}{2}} = -\tau_a \quad (\text{P5.17})$$

Vyjádření napětí $\sigma_{a+\frac{\pi}{2}}$

$$\sigma_{a+\frac{\pi}{2}} = \sigma_{12} \sin 2\alpha + \sigma_{11} \cos^2 \alpha + \sigma_{22} \sin^2 \alpha \quad (\text{P5.18})$$

Dalším krokem se bude zjišťovat existence takového orientačního souřadného systému, že smykové napětí zanikne.

$$\tau_{a,m} = -\frac{1}{2} \sin 2\alpha (\sigma_{11} - \sigma_{22}) + \sigma_{21} \cos 2\alpha = 0 \quad (\text{P5.19})$$

po úpravě vyjádříme α_m

$$\quad (\text{P5.20})$$

normálová napětí dosáhnou extrémních hodnot.

$$\frac{d\sigma_\alpha}{d\alpha} = -2\sigma_{12} \cos 2\alpha + \sigma_{11} \sin 2\alpha \cdot \cos \alpha + 2\sigma_{22} \cos \alpha (-\sin \alpha) = 0 \quad (\text{P5.21})$$

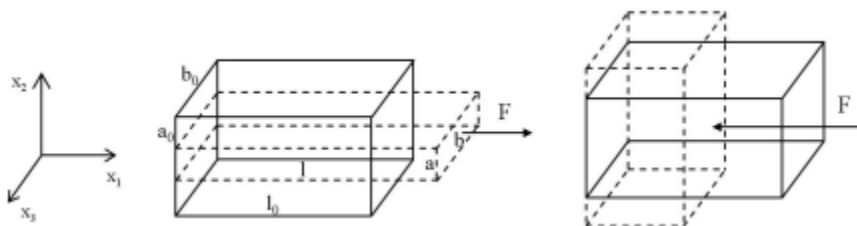
po derivování a následné úpravě.

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \cot g \frac{2\sigma_{12}}{\sigma_{11} - \sigma_{22}} \quad (\text{P5.22})$$

V soustavě se nacházejí dvě plochy pod úhlem α_m a $\alpha_m + \frac{\pi}{2}$, kde jsou smyková napětí rovna nule a normálová napětí jsou nejvyšší. Tato napětí se pak označují jako hlavní σ_1, σ_2 .

Vztah napětí a deformace pro jednosměrné protažení (stlačení)

Pro jednosměrné protažení/stlačení izotropního elementu znázorněném na obr. P5.2 platí



Obr. P5.2 Jednosměrné protažení (a) a stlačení (b) izotropního tělesa

Pro napětí ve směru osy protahování/stlačení platí vztah (P5.23).

$$\sigma_{11} = \sigma_0 \quad (\text{P5.23})$$

Napětí v ostatních směrech platí a vychází ze vztahu (P5.24).

$$\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0 \quad (\text{P5.24})$$

deformace pro jednosměrné protažení a deformace při jednoosém stlačení jsou vyjádřena vztahem (P5.25 – P5.27).

$$\varepsilon_{11} = \frac{l - l_0}{l_0} \langle 0 \text{ podélné prodloužení } \varepsilon_{11} \rangle 0 \quad (\text{P5.25})$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{a - a_0}{a_0} \langle 0 \text{ boční zkrácení } \varepsilon_{22} \rangle 0 \quad (\text{P5.26})$$

$$\varepsilon_{33} = \frac{b - b_0}{b_0} \langle 0 \text{ boční zkrácení } \varepsilon_{33} \rangle 0 \quad (\text{P5.27})$$

Poměr bočního zkrácení a podélného prodloužení při jednoosém a tahovém namáhání se nazývá Poissonův poměr podle vztahu (P5.28) uvedené v literatuře [78].

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} \quad (\text{P5.28})$$

Poměrná změna objemu platí pro malé deformace ze vztahu (P5.29).

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \quad (\text{P5.29})$$

Vztah pro jednosměrné protažení/stlačení mezi napětím a deformací je vyjádřen Hookovým zákonem.

$$\sigma_{11} = E \cdot \varepsilon_{11} \quad (\text{P5.30})$$

Konstantou úměrnosti mezi napětím a deformací pro namáhání na tah/tlak je modul pružnosti v tahu (Youngův modul) E. Deformace v jednotlivých směrech se vyjádří podle vztahu (P5.31 – P5.32).

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E} \quad (\text{P5.31})$$

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = -\nu \varepsilon_{11} = -\frac{\nu \sigma_{11}}{E} \quad (\text{P5.32})$$

Poměrnou změnu objemu lze vyjádřit následně ze vztahu (P5.33).

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_{11} - 2\nu\varepsilon_{11} = \varepsilon_{11}(1 - 2\nu) = \frac{\sigma_{11}}{E}(1 - 2\nu) \quad (\text{P5.33})$$

Poissonův poměr lze vyjádřen vztahem (P5.34).

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{V} \frac{dV}{d\varepsilon_{11}} \right) \quad (\text{P5.34})$$

Tab. P5.1 Hodnoty Poissonova čísla pro vybrané materiály

Materiál	ν	Materiál	ν
Zlato	0,28	PA 6.6	0,44
Diamant	0,23	PS	0,38
Voda	0,3	PES	0,43
Ocel	0,28	PMMA	0,33

Poissonovo číslo pro lineární materiály dosahuje své maximální možné hodnoty ($\nu=0,5$) viz tab. P5.1. Maximální hodnota Poissonova čísla 0,499 je velmi blízká pro pryžové materiály.

- **Výpočet vztahu pro moduly**

Charakteristické elastické konstanty materiálů jsou Youngův modul pružnosti v tahu E , smykový modul pružnosti G , objemový modul pružnosti K a Poissonův poměr ν . Při znalosti hodnoty jednoho modulu a Poissonova poměru lze další moduly vypočítat, protože mezi nimi existuje vzájemný vztah. K plné definici lineárního elastického deformačního chování izotropního tělesa při dané teplotě tedy stačí znát hodnoty dvou charakteristických konstant ze čtyř.

Vztah mezi modulem objemové pružnosti K a modulem pružnosti v tahu E

Vztahem mezi modulem pružnosti v tahu E a modulem objemového vyjádření budeme kombinovat deformaci způsobenou tahem a všestranným stlačením. Při všestranném stlačení jsou normálové složky napětí všechny stejně velké a vyrovnávají působení všestranného tlaku P . Např. složka napětí σ_{11} vyvolá deformace v jednotlivých směrech vztah (P5.35 – P5.36).

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E} = -\frac{P}{E} \quad (\text{P5.35})$$

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{33} = -\sigma_{11} \cdot \frac{\nu}{E} = \frac{P\nu}{E} \quad (\text{P5.36})$$

Deformace vzniklé účinkem dalších složek napětí (σ_{22} , σ_{33}) jsou shodné.

Zavedením předpokladu malých deformací platí vztah (P5.37).

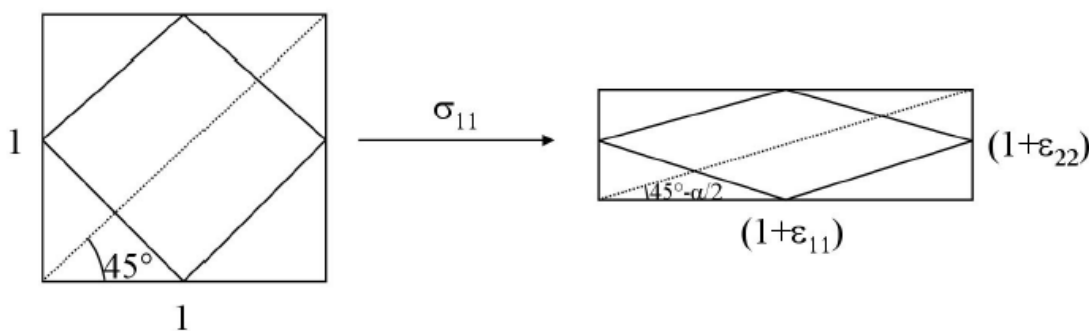
$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = 3 \left(-\frac{P}{E} + \frac{2P\nu}{E} \right) = -\frac{3P}{E(1-2\nu)} \quad (\text{P5.37})$$

Spojením s Hookovým zákonem je vyjádřeno stlačení pro všechny směry. Tímto je získán vztah (P5.38) mezi modulem pružnosti v tahu a modulem objemové pružnosti:

$$E = 3K(1-2\nu) \quad (\text{P5.38})$$

Vztah mezi modulem pružnosti v tahu E a modulem pružnosti ve smyku G

Pro vyjádření vztahu mezi modulem pružnosti v tahu E a modulem pružnosti ve smyku G budeme kombinovat deformaci způsobenou tahem a smykem, jak je schematicky znázorněno na (obr. P5.5). K tomuto účelu nám poslouží modelová situace, kdy na objemový element o jednotkových rozměrech, do něhož je vepsán stejný element potočený o úhel 45° , působí normálová síla F, vyvolávající napětí σ_{11} . Deformace, kterou vyvolá normálové napětí je schematicky znázorněna na obr. P5.3.



Obr. P5.3 Schematické vyjádření vztahu mezi moduly E a G

Deformace elementu se vyjádří prostřednictvím deformace úhlu úhlopříčky elementu ze vztahu (P5.39)

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} \right) = \frac{1 + \varepsilon_{22}}{1 + \varepsilon_{11}} = (1 + \varepsilon_{22})(1 - \varepsilon_{11}) = 1 - \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} = 1 - \varepsilon_{11} - \nu \varepsilon_{11} = 1 - [\varepsilon_{11}(1 + \nu)] \quad (\text{P5.39})$$

pro malé deformace zároveň platí vztah (5.40)

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} \right) = \frac{1 - \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right)}{1 + \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right)} = \frac{1 - \left(\frac{\alpha}{2} \right)}{1 + \left(\frac{\alpha}{2} \right)} = \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right)^2 = 1 - \alpha = 1 - \gamma \quad (\text{P5.40})$$

kde α je úhel zkosu vepsaného elementu a γ je smyková deformace. Porovnáním (P5.39) a (P5.40) se získá vyjádření deformace γ vztahem (P5.41)

$$\gamma = \varepsilon_{11}(1 + \nu) \quad (\text{P5.41})$$

Dosazením za smykovou a normálovou deformaci dle Hookova zákona, podle kterého platí, že smykové napětí působící na vepsaný element má poloviční hodnotu normálového napětí. Získá se tak následující vztah (P5.42), platící mezi elastickými konstantami

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (\text{P5.42})$$

Vlákna příze lze charakterizovat jako ortotropní materiál, který byl použit pro popis chování vláken příze. Existují tři hlavní ortotropní osy 1, 2 a 3, které jsou vzájemně ortogonální (viz obr. P4.3). Pokud působí v jejich směrech normálová napětí σ , potom vyvolá pouze poměrná přetvoření a nikoliv zkos ($\varepsilon \neq 0, \gamma = 0$), zatímco smyková napětí způsobí pouze zkos a nikoliv poměrná přetvoření $\varepsilon = 0, \gamma \neq 0$. Hookeův zákon obecného ortotropního materiálu v hlavním ortotropním souřadnicovém systému odvodíme z Hookeova zákona obecného anizotropního materiálu s uvažováním předchozí charakteristiky hlavních ortotropních os lze popsat prostřednictvím (P5.43).

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad \text{nebo} \quad \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (\text{P5.43})$$

S uvažováním symetrie obsahuje matice tuhosti $[C]$ u obecného ortotropního materiálu celkem 9 nezávislých materiálových konstant. Úpravou Hookeova zákona v inverzním tvaru pro obecný anizotropní materiál získáme matice materiálové poddajnosti $[S]$ je stejně jako matice materiálové tuhosti $[C]$ maticí symetrickou, kdy platí $S_{ij} = S_{ji}$ a obdržíme Hookeův zákon obecného ortotropního materiálu. Rovněž matice poddajnosti obecného ortotropního materiálu obsahuje 9 nezávislých materiálových konstant. Jednotlivé prvky matice poddajnosti S_{ij} je možné rovněž stanovit pomocí tzv. inženýrských (fyzikálních) charakteristik, které mají jasný fyzikální či geometrický význam. Do této skupiny patří modul pružnosti E , modul pružnosti ve smyku G a Poissonovo číslo, které byly zavedeny [76] pro izotropní materiál. V případě ortotropního materiálu mají tyto veličiny navíc směrové indexy v souladu s hlavním

ortotropním souřadnicovým systémem 1, 2 a 3 (obr. P5.3). Mechanické charakteristiky jsou pochopitelně v různých ortotropních směrech různé. Použitím principu superpozice pro zatěžování napětími v hlavních ortotropních směrech 1, 2 a 3 obdržíme vztahy pro poměrná přetvoření a zkosity. Poměrná přetvoření a zkosity v hlavních ortotropních směrech jsou následně popsány v (P5.44 – P5.46), kde pro deformace platí

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \mu_{21} \cdot \frac{\sigma_2}{E_2} - \mu_{31} \cdot \frac{\sigma_3}{E_3} \quad (\text{P5.44})$$

$$\varepsilon_2 = -\mu_{12} \cdot \frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{\sigma_2}{E_2} - \mu_{32} \cdot \frac{\sigma_3}{E_3} \quad (\text{P5.45})$$

$$\varepsilon_3 = -\mu_{13} \cdot \frac{\sigma_1}{E_1} - \mu_{32} \frac{\sigma_2}{E_2} + \frac{\sigma_3}{E_3} \quad (\text{P5.46})$$

Pro zkosity pak platí vztahy (P5.47 – P5.49)

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{23}}{G_{23}} \quad (\text{P5.47})$$

$$\gamma_{23} = \frac{\tau_{31}}{G_{31}} \quad (\text{P5.48})$$

$$\gamma_{31} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}} \quad (\text{P5.49})$$

Indexy u složek napětí označují příslušné hlavní ortotropní směry, první index u Poissonových čísel představuje směr působení příslušného napětí, druhý index potom označuje směr kontrakce. Předchozí složkové rovnice lze napsat v maticovém tvaru.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & -\frac{\mu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\mu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{13}}{E_1} & -\frac{\mu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (\text{P5.50})$$

A následně symbolicky podle rovnice (5.51).

$$\{\varepsilon\} = [S] \cdot \{\sigma\} \quad (\text{P5.51})$$

Tvar matice poddajnosti [S] vyplývá z relace (P5.52 – P5.54). Matice obsahuje celkem 12 materiálových parametrů. Z podmínky symetrie pro matici materiálové poddajnosti [S] vyplývá velice důležitá vazba mezi technickými materiálovými parametry.

$$\frac{\mu_{21}}{E_2} = \frac{\mu_{12}}{E_1} \quad (\text{P5.52})$$

$$\frac{\mu_{31}}{E_3} = \frac{\mu_{13}}{E_1} \quad (\text{P5.53})$$

$$\frac{\mu_{32}}{E_3} = \frac{\mu_{23}}{E_2} \quad (\text{P5.54})$$

jak lze zapsat obecně ze vztahu (P5.55)

$$\frac{\mu_{ij}}{E_i} = \frac{\mu_{ji}}{E_j} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (\text{P5.55})$$

Jak již bylo uvedeno dříve, obecný ortotropní materiál má 9 nezávislých parametrů, kterými jsou při použití technických materiálových veličin (P5.8)

$$E_1, E_2, E_3, \mu_{12}, \mu_{23}, \mu_{31}, G_{12}, G_{23}, G_{31}$$

Zbývající tři materiálové parametry $\mu_{12}, \mu_{23}, \mu_{31}$ se stanoví pomocí vztahů (P5.14 – P5.25).

$$S_{11} = \frac{1}{E_1} \quad (\text{P5.56})$$

$$S_{12} = -\frac{\mu_{21}}{E_2} \quad (\text{P5.57})$$

$$S_{13} = -\frac{\mu_{31}}{E_3} \quad (\text{P5.58})$$

$$S_{21} = -\frac{\mu_{12}}{E_1} \quad (\text{P5.59})$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_2} \quad (\text{P5.60})$$

$$S_{23} = -\frac{\mu_{32}}{E_3} \quad (\text{P5.61})$$

$$S_{31} = -\frac{\mu_{13}}{E_1} \quad (\text{P5.62})$$

$$S_{32} = -\frac{\mu_{23}}{E_2} \quad (\text{P5.63})$$

$$S_{33} = \frac{1}{E_3} \quad (\text{P5.64})$$

$$S_{44} = \frac{1}{G_{23}} \quad (\text{P5.65})$$

$$S_{55} = \frac{1}{G_{31}} \quad (\text{P5.66})$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \quad (\text{P5.67})$$

Matice tuhosti [C] a matice poddajnosti [S] jsou podle $[S] = [C]^{-1}$ maticemi inverzními a platí pro ně následující transformační vztahy (P5.26 – P5.34) [77]:

$$C_{11} = \frac{S_{22} \cdot S_{33} - S_{23}^2}{S} \quad (\text{P5.68})$$

$$C_{12} = \frac{S_{13} \cdot S_{23} - S_{12} \cdot S_{33}}{S} \quad (\text{P5.69})$$

$$C_{22} = \frac{S_{33} \cdot S_{11} \cdot S_{13}^2}{S} \quad (\text{P5.70})$$

$$C_{13} = \frac{S_{12} \cdot S_{23} - S_{13} \cdot S_{22}}{S} \quad (\text{P5.71})$$

$$C_{23} = \frac{S_{12} \cdot S_{13} - S_{23} \cdot S_{11}}{S} \quad (\text{P5.72})$$

$$C_{33} = \frac{S_{11} \cdot S_{22} - S_{12}^2}{S} \quad (\text{P5.73})$$

$$C_{44} = \frac{1}{S_{44}} \quad (\text{P5.74})$$

$$C_{55} = \frac{1}{S_{55}} \quad (\text{P5.75})$$

$$C_{66} = \frac{1}{S_{66}} \quad (\text{P5.76})$$

$$\text{Kde } S = S_{11} \cdot S_{22} \cdot S_{33} - S_{11} \cdot S_{23}^2 - S_{22} \cdot S_{13}^2 - S_{33} \cdot S_{12}^2 + 2S_{12} \cdot S_{23} \cdot S_{13} \quad (\text{P5.77})$$

Podobně jako u izotropního materiálu jsou hodnoty inženýrských konstant u obecného ortotropního materiálu jistým způsobem omezeny. V případě obecného ortotropního materiálu platí následující relace plynoucí ze vztahu (P5.36 – P5.42) [77]:

$$E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{23}, G_{31} > 0 \quad (\text{P5.78})$$

$$(1 - \mu_{23} \cdot \mu_{23}) > 0 \quad (\text{P5.79})$$

$$(1 - \mu_{13} \cdot \mu_{31}) > 0 \quad (\text{P5.80})$$

$$(1 - \mu_{12} \cdot \mu_{21}) > 0 \quad (\text{P5.81})$$

$$|\mu_{21}| < \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^{0,5} \quad (\text{P5.82})$$

$$|\mu_{12}| < \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{0,5} \quad (\text{P5.83})$$

$$|\mu_{32}| < \left(\frac{E_3}{E_2} \right)^{0,5} \quad (\text{P5.84})$$

$$|\mu_{23}| < \left(\frac{E_2}{E_3} \right)^{0,5} \quad (\text{P5.85})$$

$$|\mu_{13}| < \left(\frac{E_1}{E_3} \right)^{0,5} \quad (\text{P5.86})$$

$$|\mu_{31}| < \left(\frac{E_3}{E_1} \right)^{0,5} \quad (\text{P5.87})$$

Ze vztahů (P5.40 – P5.42) např. vyplývá, že hodnota Poissonova čísla μ_{ij} může být větší než 0,5, časté jsou hodnoty větší než 1. Pokud je μ_{ij} pro některé směry vysoké, potom musí být pro ostatní směry o to menší, protože např. při tahovém namáhání musí být poměrná objemová změna $e = \Delta V / V$ kladná.