



**MAKROSKOPICKÉ MODELOVÁNÍ
VLÁKENNÝCH STRUKTUR –
POKROČILÉ NUMERICKÉ
MODELOVÁNÍ VLÁKENNÉ PŘÍZE**

Ing. Josef Vosáhlo

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

Název disertační práce: **Makroskopické modelování vlákných struktur – pokročilé numerické modelování vlákné příze**

Autor: **Ing. Josef Vosáhlo**

Program doktorského studia: **Textilní inženýrství**

Forma studia: **Kombinovaná**

Školící pracoviště: **Katedra netkaných textilií a nanovlákných materiálů**

Školitel: **Ing. Ondřej Novák, Ph.D.**

Složení komise pro obhajobu disertační práce:

předseda:
prof. Dr. Ing. Zdeněk Kůs FT TUL, Katedra oděvnictví

místopředseda:
doc. Ing. Maroš Tunák, Ph.D. FT TUL, Katedra hodnocení textilií

prof. Ing. Vojtěch Dynybyl, Ph.D. (oponent) Škoda Auto Vysoká škola, Katedra strojírenství a elektrotechniky

prof. Ing. David Herák, Ph.D. Česká zemědělská Univerzita v Praze, Technická fakulta, Katedra mechaniky a strojnictví

doc. Ing. Lukáš Čapek, Ph.D. FT TUL, Katedra technologií a struktur

doc. Ing. Brigita Kolčavová Sirková, Ph.D. FT TUL, Katedra technologií a struktur

Ing. Bc. Monika Vyšanská, Ph.D. FT TUL, Katedra technologií a struktur

oponent, který není členem komise
prof. Rajesh Kumar Mishra, Ph.D. Česká zemědělská Univerzita v Praze, Technická fakulta, Katedra materiálu a strojírenské technologie

S disertační prací je možno seznámit se na studijním oddělení doktorského studia Fakulty textilní Technické univerzity v Liberci.

Liberec, 2024

Doktorské studium

Seznam zkoušek	Strukturní teorie vláknenných soustav, 04. 04. 2016
	Vybrané partie z řešení diferenciálních rovnic a jejich soustav, 19. 04. 2017
	Simulace v materiálovém inženýrství, 23. 6. 2020
	Experimentální technika oboru 19. 11. 2021
	Strukturní mechanika vláknenných systémů, 20. 01. 2022
SDZ	Státní doktorská zkouška vykonána dne 02. 03. 2023 s celkovým hodnocením prospěl.

Pedagogická činnost

Výuka	Textilie pro průmyslové aplikace 2013 - 2018
	Modelování textilních útvaru 2014 - 2018
	Konstruování 1 (KOI) na fakultě strojní (KST) 2017 - dosud
	Konstruování 2 (KOII) na fakultě strojní (KST) 2017 - dosud
	Výpočty plastových a kompozitních dílů (VPKD) (KST) doposavad
	CADI (PGC-P) na fakultě strojní (KST) 2017 - dosud
	Modelování CADII na fakultě strojní (KST) 2017 - dosud
	Technická dokumentace (TDK) na fakultě strojní (KST) doposavad
	Návrhové prostředky CAD - CAD*H

Výzkumné projekty

Optimalizace šroubového spoje v neželezných a nekovových konstrukcích, reg. č.: SGS-2022-5047 člen řešitelského týmu, SGS 2022 – 2023

Vývoj přesného secího stroje pro současné setí hlavní plodiny a meziplodiny, reg. č.: FW01010577, člen řešitelského týmu, 2020 – 2023

Inteligentní filtrace terciárního čištění odpadních vod pomocí super textilií a nanomembrán, reg. č. FW01010306, člen řešitelského týmu, 2020 – 2023

Výzkum systémů pro zvýšení energetické efektivity zpracování pudy, reg. č.: TJ01000099, člen řešitelského týmu, 2018

Inovační voucher, návrh tréninkové tratě Industrial Engineering 4.0, I.č.: 19045, člen řešitelského týmu, 2018

Vývoj hořáku pro plynový infrazářič na principu kinetického spalování. Projekt MV č.: TH03020122, člen řešitelského týmu, 2018

Modulární platforma pro autonomní podvozky specializovaných elektrovozidel pro dopravu nákladu a zařízení, CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_025/0007293, člen řešitelského týmu, 2018

TAČR Epsilon: Vývoj technických prostředků pro rychlou změnu sortimentu na stroji pro přípravu výroby průmyslových třídících sít. Projekt MV č.: TH02010964, člen řešitelského týmu, 2017 – 2018

TAČR Epsilon: Funkční rozvoj bi-systémového kapalinového filtru pro recyklaci procesních vod s použitím moderních metod modelování. Projekt MV č.: TH02020949, člen řešitelského týmu, 2017

TAČR Delta: Rozvoj technologie a výroba jednodílných GFRP lopatek pro větrné elektrárny, Projekt MV č.: TF02000051 člen řešitelského týmu, 2016 – 2017

Norské granty: Spolupráce ve vykonávání doktorských studijních programů pro strojírenství, mechatroniku a materiály, člen řešitelského týmu, 2015 – 2016

Ostatní projekty

Konstrukce a měření, měření adheze v uchycených zrcadel v závislosti na teplotních změnách, člen řešitelského týmu, 2019

Konstrukce a měření, měření mechanických vlastností hliníkové příruby, člen řešitelského týmu, 2018

Konstrukce a měření, měření mechanických vlastností hliníkové příruby, člen řešitelského týmu, 2018

Mubea: Testování a analýzy automobilových dílů z kompozitu, člen řešitelského týmu, 2017 – 2018

Nanopharma: Mechanické testování nanovláknenných materiálů a kompozitních mat, člen řešitelského týmu 2016

Lersen: Tvorba virtuálních modelů, člen řešitelského týmu 2016

Pegas: Modelování vlastností textilií, člen řešitelského týmu 2015 – 2016

KNT: Zkoušky mechanických vlastností připravených nanovláknenných struktur, člen řešitelského týmu

Sklopan: Konstruování a návrhy vybraných úseků výrobní linky na recyklaci skla, člen řešitelského týmu 2011 – 2012

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.

Klíčová slova:

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

Abstract

The dissertation is 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 packing ratio. 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 packing ratio 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 assembly, 3D geometry, twist, packing ratio, contacts, sections, image analysis, computed tomography, measurements, CAD, FEM, stress, strain

Obsah

1	<i>Přehled o současném stavu problematiky, který je předmětem disertační práce, s odkazy na použité prameny</i>	1
2	<i>Rešerše současného stavu</i>	2
3	<i>Cíle disertační práce</i>	7
4	<i>Experimentální měření pro stanovení mechanických vlastností vlákenné příze</i>	8
	4.1 Materiály a metody	9
	4.2 Teorie mechanického chování vlákna	10
5	<i>Numerické modelování vlákenné struktury</i>	13
6	<i>Tvorba vektorové geometrie vlákenné příze</i>	14
7	<i>Možnosti tvorby 3D geometrie modelu příze</i>	19
	7.1 Postup tvorby pokročilé 3D geometrie modelu příze	20
	7.2 Optimalizovaný postup tvorby 3D geometrie modelu vlákenné příze	22
	7.3 Tvorba numerické simulace 3D modelu vlákenné příze pro stanovení mechanických vlastností	24
	7.4 Materiálový model vlákenné příze	24
	7.5 Volba vhodných kontaktů mezi vlákny	25
	7.6 Tvorba sítě konečných prvků vlákenné příze	25
	7.7 Definice okrajových a počáteční podmínek	26
8	<i>Výsledky numerické simulace pokročilého modelu vlákenné příze tahového namáhání</i>	28
	8.1 Výsledky numerické simulace pokročilého modelu vlákenné příze při stlačování deskou	30
	8.2 Porovnání mechanických vlastností reálných vzorků vlákenné příze s pokročilými modely vlákenné příze	31
9	<i>Zhodnocení výsledků pro vědní obor nebo pro praxi</i>	35
10	<i>Doporučení na pokračování práce v daném tématu a oboru</i>	35
11	<i>Seznam publikovaných prací studenta DSP (včetně uvedení všech spoluautorů publikovaných prací a jejich autorských podílů) a jejich případné citace</i>	36
12	<i>Seznam použité literatury</i>	38
13	<i>Curriculum Vitae</i>	43
14	<i>Stručná charakteristika dosavadní odborné, výzkumné a vědecké činnosti</i>	46
15	<i>Vyjádření školitele doktoranda</i>	48
16	<i>Oponentské posudky disertační práce</i>	49

1 Přehled o současném stavu problematiky, který je předmětem disertační práce, s odkazy na použité prameny

V textilním průmyslu je výroba přízi 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, směšové, atd., podle účelu použití tkalcovské, pletařské, pro ruční pletení, kreповé, 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 přízi, 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 přízi 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 balónování. 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 směšových přízi 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 Rešerše současného stavu

V této kapitole se pojednává o důležitých souvislostech současného stavu poznání, které byly částečně zmíněny v úvodní kapitole. Provedl se rozbor současného stavu, kde v uvedených pracích a publikacích autoři popisují své výsledky a postupy, experimenty, modelování a hodnotí vhodnost navrhovaných metod pomocí modelových simulací pro studii, popis a optimalizaci řešené problematiky.

i. Modelování vlákenných struktur

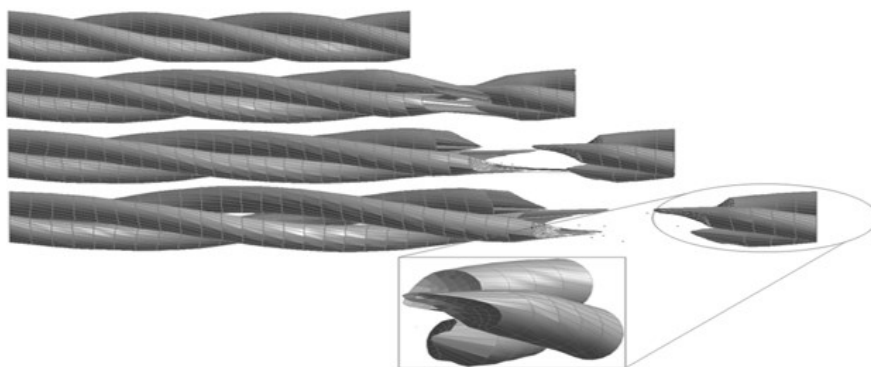
Existují různé způsoby výroby příze z textilních vláken. Nejčastější a nejsložitější kategorie zahrnuje příze vyrobené ze staplových a střížových vláken. Teoretické modelování struktury příze a predikce vlastností lze provádět pomocí matematických, numerických, výpočetních metod a také pomocí umělých neuronových sítí [17-21].

ii. Tvorba matematických modelů vlákenných struktur

Analýzy a měření mechanických vlastností vzorků příze jsou obecně omezeny jen pro určité informace, tedy nemohou vypovídat o okamžitém rozložení deformací a napětí ve vláknu/vlákně/celé přízi. Je to dáno tím, že jsou omezeny možnostmi měření, snímání, přičemž některé vlastnosti nelze spolehlivě měřit (např. rozložení hlavních napětí a deformací vlákenné 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, neboť pomocí jejích znalostí by se dalo posoudit, jak se struktura přetváří a při jakém napětí. V tomto případě je velmi výraznou možností sestavení modelové simulace např. prostřednictvím numerických metod. Nejvýznamnější je pro tento účel vytvořit modelovou simulaci v prostředí MKP (metoda konečných prvků), ale možnosti pro simulace vlákenných útvarů nabízejí i jiné numerické metody, např. metoda diskretních prvků (MDP), metoda hraničních prvků (MHP), či metoda konečných objemů (MKO) [13,14, 23].

iii. Kontinuální model

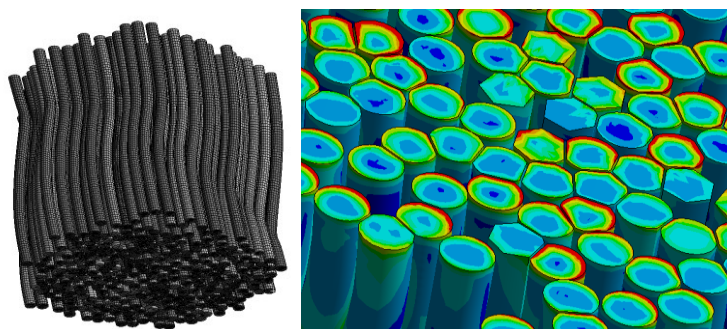
Kontinuální model předpokládá, že geometrie příze tvořená n -počtem vláken lze považovat za kontinuum. Jedná se o určité zjednodušení a homogenizaci řešené úlohy, které však pro studium mechanického chování příze může být přijatelné a výsledky deformace využitelné. Byla popsána celá řada modelů využívající kontinua pro popis mechanických vlastností vlákenných struktur, jako je příkladově uveden na obr. 2.1. Zde je patrné zjednodušení geometrie příze do spletaného tvaru 3 kontinuí reprezentujících trojmo skanou nit, kde lze sledovat deformaci a napětí při mechanickém namáhání a charakter přetržení.



Obr. 2.1
 Modelování zjednodušené geometrie skané příze ze 3 kontinuí pro studii přetrhu při tahovém namáhání [25]

iv. Diskrétní model vlákna

Diskrétní modely vláken jsou modely, které každé vlákno zpracovávají individuálně a sčítají efekt mnoha vláken ve struktuře příze k předpovědi vlastností příze. MKP může být použita k modelování jednotlivých vláken v přízi. S nárůstem výpočetní síly a zdokonalením konečněprvkových softwarů roste také velikost a složitost konečněprvkových modelů, které lze spustit. Příkladem diskrétního modelu vlákna lze uvést model uvedený na obr. 2.2, který zahrnuje migraci a variace délky vláken [26].



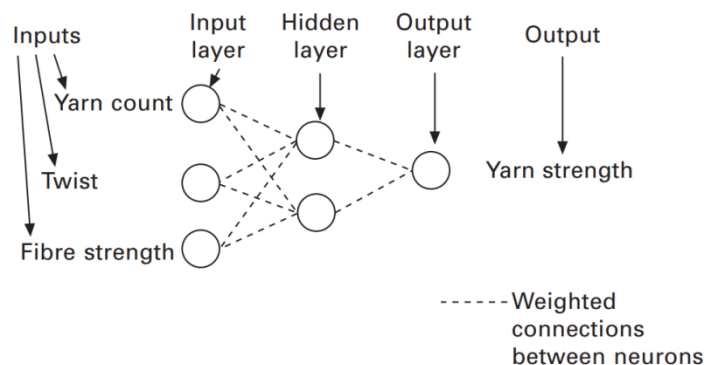
Obr. 2.2 Diskrétní model příze – model se zvlněním vláken pro studii kontaktů mezi vlákny [28]

v. Speciální přístupy k modelování vlákenných struktur

V současné době jsou vyvíjeny i jiné přístupy k modelování vlákenných struktur.

- **Umělé neuronové sítě**

Další výzkumné skupiny ukázaly, že je vhodné při modelování přízi využívat také 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 (viz obr. 2.3)



Obr. 2.3 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. Jedná se o způsob řešení nových problémů na základě řešení podobných dřívějších problémů. Obvykle se tato technika skládá ze čtyř fází: reprezentace, indexace, vyhledávání a adaptace.

- **Modely fuzzy logiky**

Spřadatelnost a pevnost příze mohou být předpovězeny pomocí pravidel vytvořených z dostupných dat. Pravidla jsou typu "pokud-pak", která jsou automaticky generována pomocí učícího se klasifikačního systému založeného na fuzzy logice (FECS) [34].

vi. Tvorba matematických modelů příze pro studium mechanických vlastností

V rámci tvorby modelu se vždy jedná o konkrétní zjednodušení dané tvarem strukturní jednotky, orientací a uspořádáním vláken, parametry příze, zákrutem, počtem multifilamentů jak je uvádí např. Neckář, v [37, 38]. Šroubovicový model se obvykle používá k popisu idealizované sestavy vláken ve struktuře příze. Během zákrutu příze se některá vlákna přemístí ze své centrální polohy k povrchu příze (migrační efekt). Strukturální 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.

- **Mechanika paralelních svazků vláken**

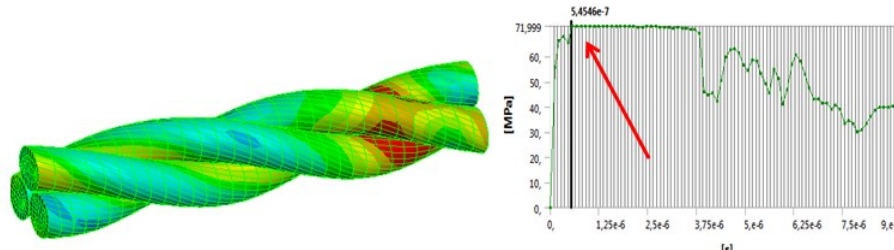
Svazky paralelních a víceméně nezávislých vláken vytvářejí idealizovanou přízi (viz obr 2.4). Toto uspořádání platí pro všechny druhy staplových a střižových přízí, vláken a svazků přízí, např. lan, ale také osnovních příze pro tkaní atd. Matematické vztahy, na nichž je založeno mechanické chování takových svazků, pomáhají určit základní vlastnosti těchto typů přízí [40].



Obr. 2.4 Struktura zakroucené multifilamentové příze [41]

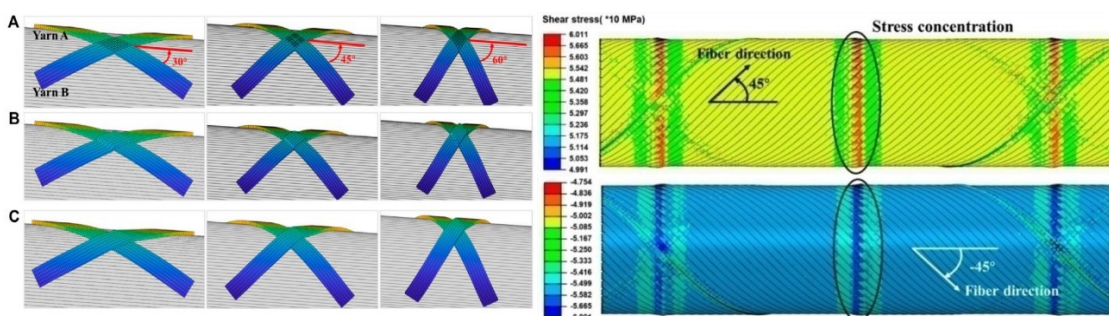
- **Numerická strukturně založená metoda simulace skaných přízí**

Simulace chování skané příze je velmi důležitá vzhledem k její roli při optimalizaci procesů výroby různých typů přízí. Virtuální modely přízí umožňují přesněji simulovat chování látek a realističtější chování šicích přízí ve švech. Struktura přízí je důležitým faktorem ovlivňujícím jejich chování. Ve většině studií v oblasti simulace příze je však struktura přízí ignorována a jsou simulovány jako jednotlivá vlákna (viz obr 2.5).



Obr. 2.5 Příklad numerické simulace skané příze svazku 3 vláken

Dalším příkladem je proces navíjení vláken, který je díky své vysoké automatizaci výkonná technologie vhodná pro tvorbu ochranného obalu např. palivových tyčí. Studium dráhy příze na povrchu vřetena je životně důležité pro návrh a výrobu pláště trubky s požadovanými mechanickými vlastnostmi, což snižuje výrobní čas a náklady. Geodetické a semigeodetické trajektorie se používají k vytvoření 3D dráhy příze. 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 plášťové trubky byla použita síť konečných prvků (KP) založená na 3D dráze příze. Omezení vnořené oblasti je použito k definování interakce mezi maticovou sítí a sítí příze pro modelování mezostruktury trubky. Na základě KP modelu v mezoměřítku je podrobně studováno mechanické chování vinuté trubky SiCf/SiC [49–53]. Výsledky ukazují, že kvůli zanedbání efektu překrytí běžný laminový model nadhodnocuje pevnost trubky, zatímco v mezoměřítku navržený KP model dokáže přesně předpovědět selhání. Výsledky také potvrzují, že vytvoření 3D dráhy příze a odvozený KP model v mezoměřítku, představující přesnou strukturu vinutí, jsou důležité pro predikci vlastností pláště trubky [54] (viz obr 2.6).



Obr. 2.6 Ovin příze pod různými úhly (vlevo), koncentrace napětí (vpravo) [54]

- **Modely deformace příze z pohledu její struktury**

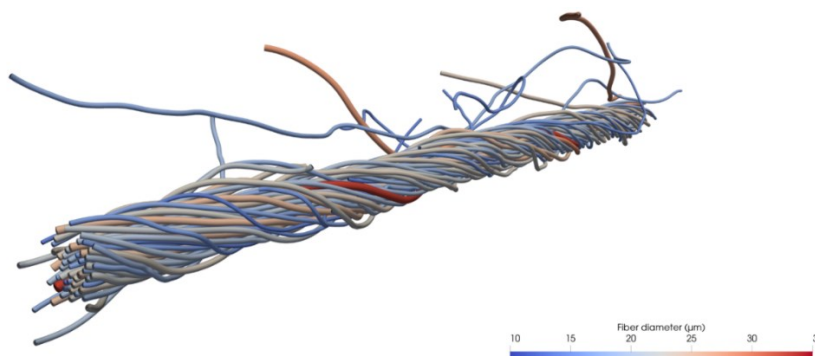
V tomto případě je uvažováno chování vláken v počáteční fázi jejich zatížení, která jsou orientována ve směru působení zátěže.

- **Modelování geometrie na úrovni příze z mikroobrazu**

Při rovnoměrném okolním světle 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 odhadnout tvar příze podle hodnot intenzity pixelů (je vytvořen předpoklad ortogonální projekce pro zachycení mikroobrazu). Zejména se předpokládá, že vztah mezi hloubkou povrchu a odpovídající intenzitou pixelů 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 příze s různými barvami, měly by být předem odděleny a přeskupeny podle jejich barev.

- **Numerická simulace chování příze v mikroměřítku pomocí Mikro CT**

Pro simulaci interakce mezi přízí a vzduchem je navržen nový víceúrovňový a multifyzikální přístup. Počínaje skeny příze pomocí výpočetní mikrotomografie (μ CT) je sestaven vysoce věrný geometrický model v mikroměřítku, který představuje přízi pomocí jejích vláken (viz obr 2.7).



Obr. 2.7 Simulace geometrie příze pomocí MikroCT

- **Procedurální modely pro vzorky skané příze**

Klíčovou součástí procedurálního modelu příze je rozdělení vláken v průřezu, které zachycuje pravděpodobnost existence vlákna vzhledem k jeho vzdálenosti od středu příze. Ačkoli je proces generování vláken vzhledem k parametrům modelu přímočarý, jeho inverzní problém přizpůsobení parametrů není ani zdaleka triviální (viz obr 2.8).



Obr. 2.8 Příkladů modelů pro splétané vzorky příze

vii. Budoucí trendy v modelování přízí

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. Modely lze aplikovat na širší škálu typů přízí, protože se používá méně zjednodušené modelování. Vyuvíjejí se nové, lepší způsoby vytváření nedeformované

struktury příze v simulaci FEA, protože mají velký vliv na předpovědi příze. Tyto modely se budou i nadále vyvíjet do složitějších modelů, protože počítačový software a hardware zvyšují výkon. K některým simulacím příze lze použít bezplatný software FEA s otevřeným zdrojovým kódem. Software může běžet na výkonných, levných výpočetních platformách, jako jsou clustery Linuxu. Výpočetní čas na clusteru 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, a to urychlí 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 látkového sukna v procesech vrstvení kompozitů. Při modelování příze se začínají uplatňovat měkké výpočetní techniky, jako jsou neuronové sítě, fuzzy logika a systémy založené na znalostech, a lze očekávat mnohem více práce v těchto oblastech. 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 fuzzy účinnosti, který kombinuje genetické algoritmy, fuzzy logiku a techniky učení se klasifikátorů. Mezioborový přístup k modelování byl již dříve pozorován u statistických a mechanistických modelů. Tento trend bude pravděpodobně pokračovat s některými z nejnovějších technik umělé inteligence. Stále existuje značná potřeba dalších modelovacích přístupů a všechny mají své silné a slabé stránky. Neexistuje žádný modelovací přístup, který by jasně dokázal modelovat příze lépe než všechny ostatní modelovací přístupy. **Na základě uvedeného lze konstatovat, že trendy v efektivním modelování tak složité vláknenné struktury jako je příze, vede na pokročilé techniky kombinující mnoho různých typů modelů.**

3 Cíle disertační práce

Na základě studie a rozboru poznatků o současném stavu problematiky související s matematickým modelováním textilních útvarů, zejména přízí, byl stanoven **hlavní cíl disertační práce je tvorba pokročilého numerického modelu příze pro studium napětí a deformace a jeho ověření**, kde model bude popisovat lineárně elastické chování příze, a bude ho možné využít pro návrhy tvarů výsledné geometrie příze různých typů vláken a vláknenných struktur, což je důležité nejen ke studiu mechanického chování vláknenných struktur přízí, ale také to přispívá ke získání poznatků o rozložení napětí, deformace, kontaktů mezi vlákny, což lze využít pro optimalizace nových textilních strojů. Řešení popsané v práci je multidisciplinární, související se studovaným zaměřením, jenž zahrnuje následující dílčí kroky vedoucí k cíli disertační práce.

Cílů bude dosaženo provedením těchto bodů:

- Makroskopické analýzy a rozboru vláknenné struktury vzorku příze.
- Stanovení mechanických vlastností vzorků příze (stanovení maximální tahové síly, deformace, napětí a přetvoření) a snímání změny průměru příze během procesu zatěžování.
- Analýza a zpracování CT snímků za účelem rekonstrukce vláknenné struktury příze
- Tvorba skriptů pro automatizované zpracování obrazu s cílem oddělit spojená vlákna a získat jejich středové body.
- Importování středových bodů do CAD softwaru a vytvoření os jednotlivých vláken pomocí 3D křivek.
- Vytvoření 3D struktury vláken pomocí objemových prvků.

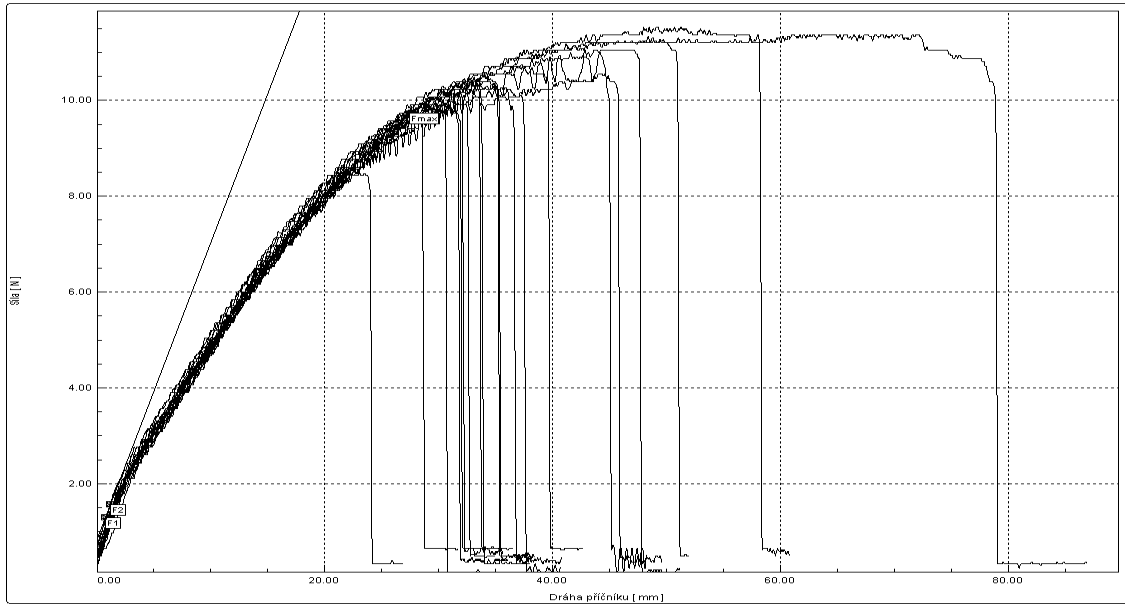
- Tvorba numerického modelu vlákenné příze pro porovnání s tahovou zkouškou do 10% deformace.
- Provedení numerické simulace stlačování vlákenné příze do 60% deformace původního průměru.
- Návrh a realizace stanovení změny a průběhu zaplnění při tahovém a tlakovém namáhání.
- Výsledkem disertační práce budou modely popisující chování a část procesu výroby nanovlákný ovíjené příze, které budou verifikovány s naměřenými hodnotami.

4 Experimentální měření pro stanovení mechanických vlastností vlákenné příze

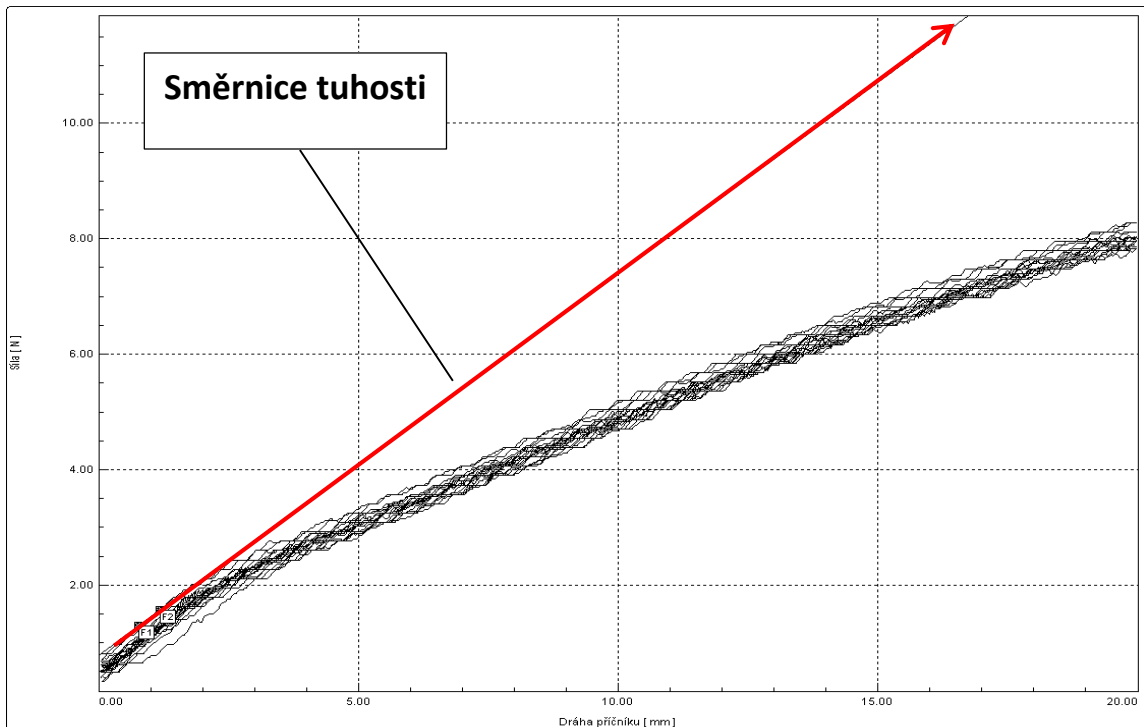
V této kapitole byla provedena experimentální měření pro stanovení mechanických vlastností příze, které byly důležité pro stanovení maximální tahové síly, deformace, napětí a přetvoření a snímání změny průměru příze během procesu zatěžování tak, aby se vytvořily vstupní a porovnávací data pro verifikaci 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.

i. 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 z 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. Výsledné průběhy závislosti síly na protažení/deformaci vybraných vzorků jsou uvedeny na obr. 4.1 a 4.2. Jednotlivé testy se prováděly až do maximální hodnoty přetrhu 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 přibližně 2 N snižuje a následně se průběh blíží k lineární závislosti, až k oblasti přetrhu okolo 10 N při protažení 25 - 30 %, jak je patrné v detailu na obr. 4.3. Výsledky deformací a sil spolu s vypočtenými elastickými moduly a protažením jsou uvedené v kapitole 4 tab. 4.1.



Obr. 4.1 Záznam průběhu tahových zkoušek



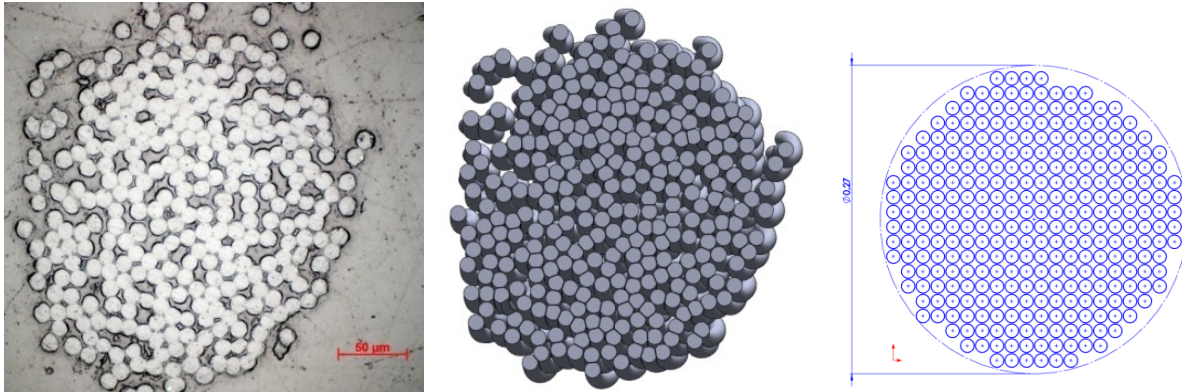
Obr. 4.2 Zaznamenané hodnoty tahové zkoušky do 10% deformace

4.1 Materiály a metody

V této kapitole je popsána realizace výpočetních modelů pro studium mechanických vlastností, kde byl nejprve vytvořen model ideální geometrie, který byl následně porovnán s výsledky mikroskopických analýz.

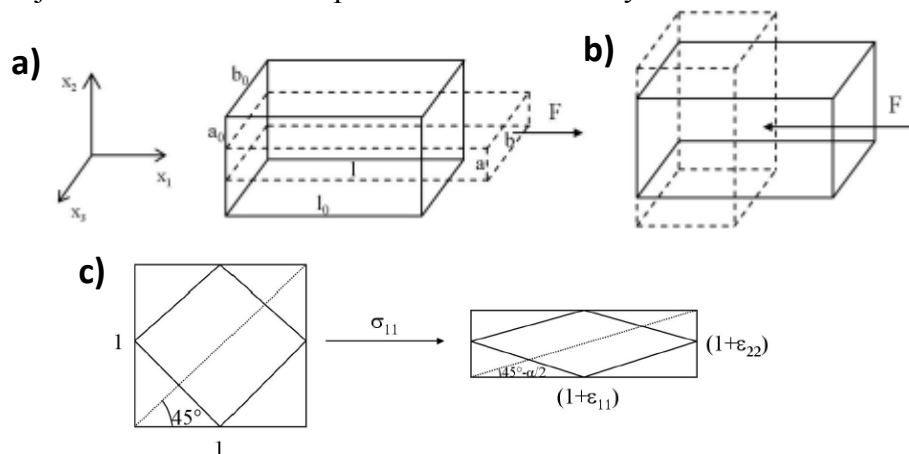
4.2 Teorie mechanického chování vlákna

Sestavení matematického modelu příze vycházelo z idealizovaného modelu geometrie jednotlivých vláken, která přízi tvoří. Nejprve byl vytvořen CAD model prostřednictvím makroskopického snímku řezu příze. Na základě snímků získaných pomocí optické a elektronové mikroskopie byla vytvořena představa o vzájemném uspořádání vláken ve struktuře příze, jak je patrné na Obr. 4.3 vlevo.



Obr. 4.3 Řez příze (vlevo), CAD model příze (uprostřed), idealizovaná geometrie (vlevo)

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. Pro jednosměrné protažení/stlačení vlákna, které lze charakterizovat jako elementární izotropní element znázorněný na Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Jednosměrné protažení (a), stlačení izotropního tělesa (b), schematické vyjádření vztahu mezi moduly E a G (c)

Poměrná změna objemu platí pro malé deformace ze vztahu (4.1) velikost písma, číslování rovnic

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \quad (4.1)$$

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

$$\sigma_{11} = E \cdot \varepsilon_{11} \quad (4.2)$$

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 (4.2 – 4.4).

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = -\nu \varepsilon_{11} = -\frac{\nu \sigma_{11}}{E} \quad (4.4)$$

Poměrnou změnu objemu lze vyjádřit následně ze vztahu (4.5)

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_{11} - 2\nu \varepsilon_{11} = \varepsilon_{11}(1 - 2\nu) = \frac{\sigma_{11}}{E}(1 - 2\nu) \quad (4.5)$$

Poissonův poměr je zapsat způsobem a je vyjádřen vztahem (4.6)

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{V} \frac{dV}{d\varepsilon_{11}} \right) \quad (4.6)$$

Zavedením předpokladu malých deformací platí vztah (4.7)

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = 3 \left(-\frac{P}{E} + \frac{2P\nu}{E} \right) = -\frac{3P}{E(1 - 2\nu)} \quad (4.7)$$

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. 4.5). K tomuto účelu poslouží modelová situace, kdy na objemový element o jednotkových rozměrech, do něhož je vepsán stejný element pootočený o úhel 45°, působí normálová síla F, vyvolávající napětí σ_{11} . Deformace, kterou vyvolá normálové napětí je schematicky znázorněna na obr. 4.6. Deformaci elementu vyjádříme prostřednictvím deformace úhlu úhlopříčky elementu ze vztahu (4.8)

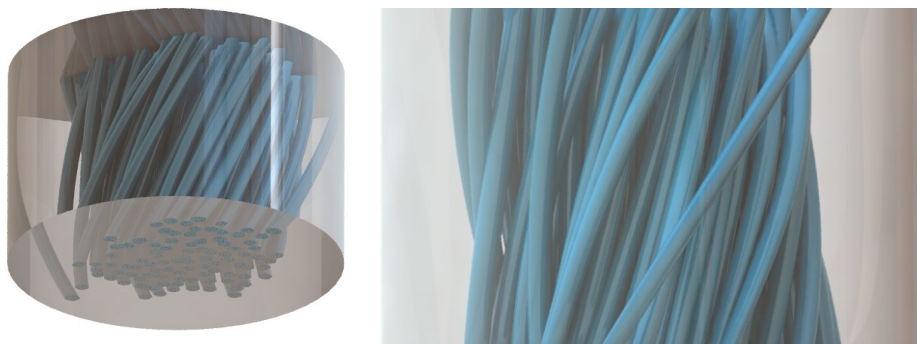
$$\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} \right) = \frac{1 + \varepsilon_{22}}{1 + \varepsilon_{11}} = (1 + \varepsilon_{22})(1 - \varepsilon_{11}) = 1 - \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} = 1 - \varepsilon_{11} - \nu \varepsilon_{11} = 1 - [\varepsilon_{11}(1 + \nu)] \quad (4.8)$$

pro malé deformace zároveň platí vztah (4.40)

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} \right) = \frac{1 - \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right)}{1 + \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right)} = \frac{1 - \left(\frac{\alpha}{2} \right)}{1 + \left(\frac{\alpha}{2} \right)} = \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right)^2 = 1 - \alpha = 1 - \gamma \quad (4.9)$$

kde α je úhel zkosu vepsaného elementu a γ je smyková deformace. Porovnáním (4.8) a (4.9) se získá vyjádření deformace γ vztahem.

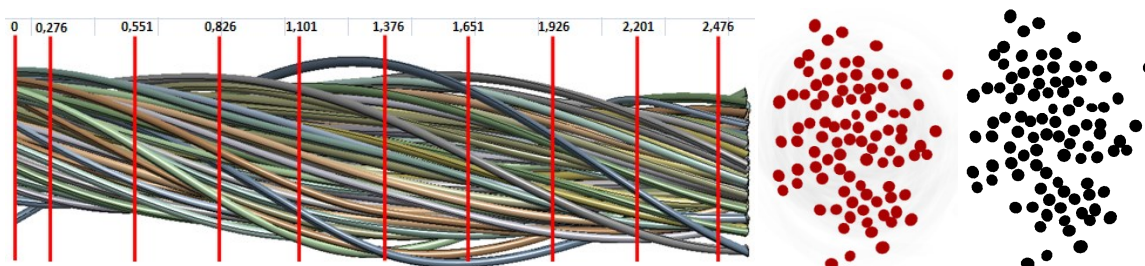
Objemovou definicí zaplnění lze popsat tak, jak je vidět na obr. 4.5, který ukazuje řez přízí [14].



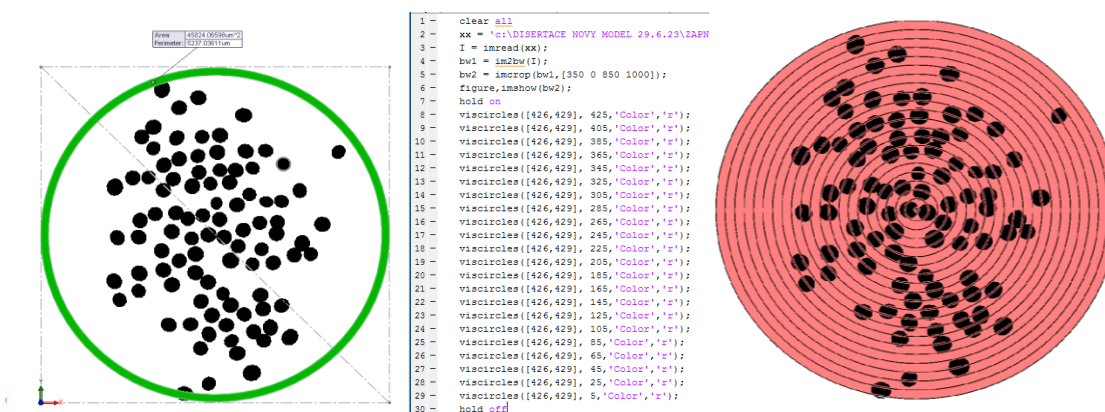
Obr. 4.5 Řez vláknennou strukturou

Možné způsoby výpočtu zaplnění:

- zaplnění může být získáno pomocí radiální analýzy, kde je plocha příze rozdělena do mezikruží s konstantním přírůstkem poměru mezikruží.
- zjištění zaplnění může být zjištěno pomocí radiální analýzy, kdy je plocha rozdělena do mezikruží se stejnou plochou mezikruží, přírůstek poloměru mezikruží není konstantní.
- pomocí axiální analýzy, kdy plocha příze je rozdělena do několika výsečí (sektorů).

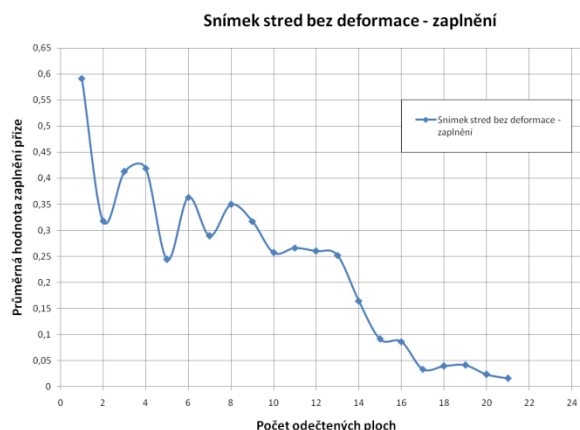


Obr. 4.6 Příklad stanovení oblastí pro výpočet zaplnění



Obr. 4.7 Stanovení plochy mezikruží a postup vytváření kruhu v programu Matlab.

Snímek střed bez deformace - zaplnění				
Plocha v kruhové výseči s odečtenými vlákny [μm^2]	směr x	Prázdná plocha kruhové výseče [μm^2]	Odečtené plochy - vzniknou jednotlivé plochy vláken [μm^2]	Výpočet zaplnění [-]
703	1	1720	1017	0,59127907
2744	2	4022	1278	0,317752362
3708	3	6314	2606	0,412733608
4991	4	8592	3601	0,419110801
8242	5	10902	2660	0,243991928
8402	6	13201	4799	0,363533066
10999	7	15481	4482	0,289516181
11550	8	17763	6213	0,349771998
13706	9	20070	6364	0,317090184
16606	10	22358	5752	0,257268092
18065	11	24620	6555	0,266246954
19915	12	26917	7002	0,260133001
21858	13	29233	7375	0,252283378
26326	14	31515	5189	0,164651753
30692	15	33774	3082	0,091253627
32974	16	36089	3115	0,086314389
37110	17	38397	1287	0,033518244
39041	18	40653	1612	0,03965267
44166	19	42942	1776	0,041358111
44193	20	45251	1058	0,023380699
46793	21	47542	749	0,015754491

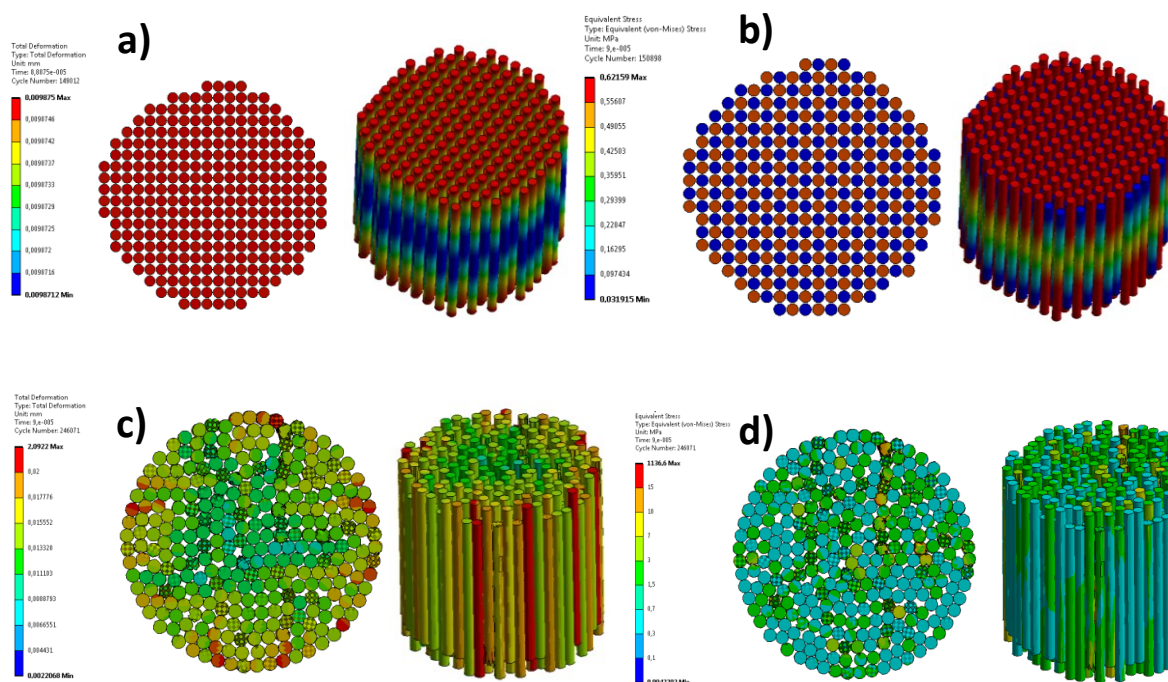


Obr. 4.7 Ukázka výpočtu zaplnění a vytvořený graf zaplnění ve středovém řezu příze.

Z jednotlivých ploch byly odečítány vzniklé průřezy, které byly ukládány do bitmapového formátu s obrazovým rozlišením 1504 x 857 pixelů a bitovou hloubkou 24 bit (viz obr 4.3). Vytvořené obrazy byly dále zpracovávány v programu Matlab. Nejprve byla vyčištěna paměť programu příkazem clearall. Dalším krokem bylo načtení složky, ve kterých 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 bit, hloubka, byly obrazy příkazem im2bw převedeny do 1 bitové, hloubky obrazu. Dalším využitým příkazem byla funkce ořezávání obrazu imcrop, ve kterém byla nastavena výška a šířka obrazu. Pro zobrazení výsledku slouží příkaz imshow. 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 (viz obr 4.6). V této aplikaci byly odečítány plochy, které byly následně vkládány do Excelu (viz obr 4.7). Na základě importovaných hodnot z mezikruhových ploch z matlabu byly v excelovém prostředí vytvořeny jednotlivé grafy zaplnění.

5 Numerické modelování vlákenné struktury

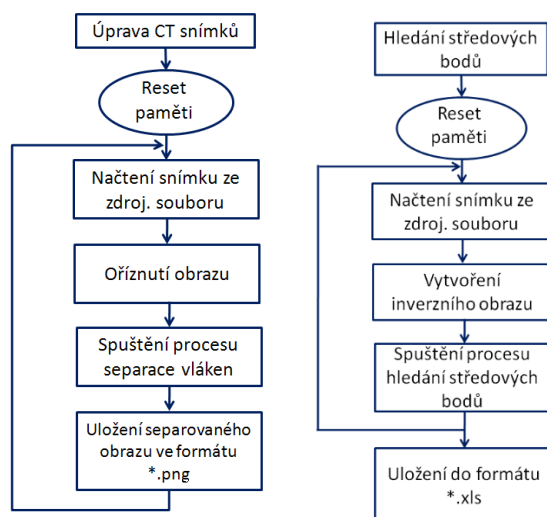
Numerická simulace ideálního modelu vlákenné příze (obr. 5.1) byla provedena podle jednotlivých kroků uvedených v disertační práci. Na následujícím obr. 5.1 jsou uvedeny výsledky pro tahové a tlakové namáhání podle okrajových podmínek dle kap. 6.5. Z výsledků uvedených na obr. 5.1 je patrné, že při tahovém namáhání se vlákna vzájemně posouvají a při deformaci 10 % je ve vzorku vlákenné příze napětí $620 \cdot 10^{-3}$ MPa (obr. 5.1 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. 5.1 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.



Obr. 5.1 Výsledky numerické simulace ideálního modelu vlákenné přize 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

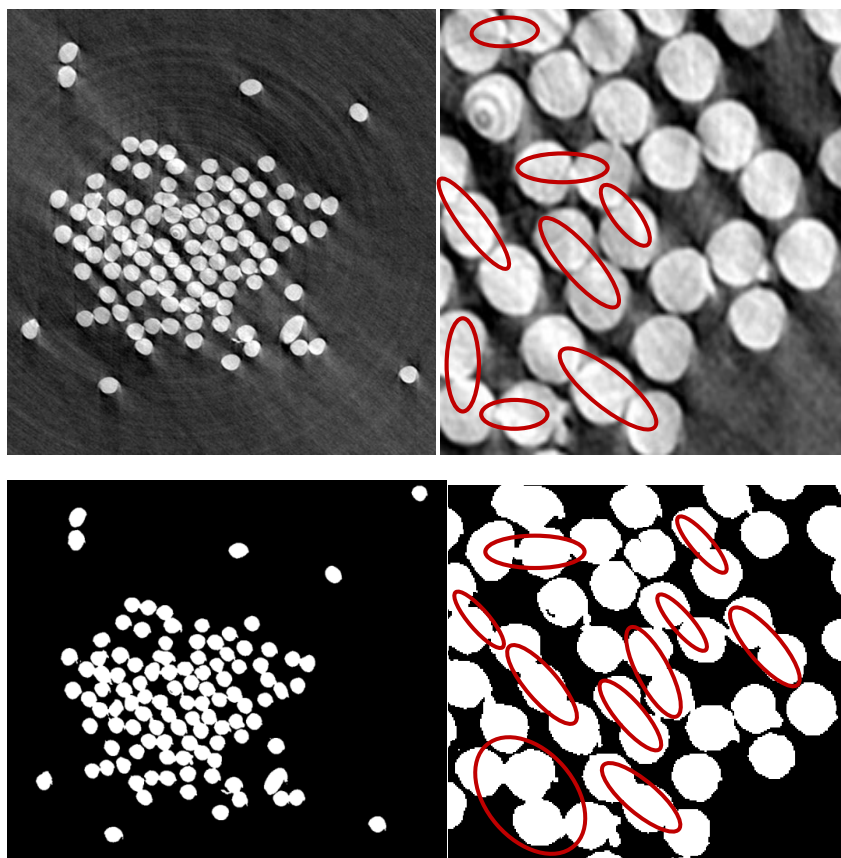
6 Tvorba vektorové geometrie vlákenné přize

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 vlákenné přize 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. 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. 6.1) jsou přiblíženy dílčí úkony separace obrazu od sjednocených vláken, až po vyhledávání středových bodů jednotlivých vláken a uložení do excelového souboru.



Obr. 6.1 Blokové schéma vytvořených skriptů pro separace obrazu od sjednocených vláken získaných z CT

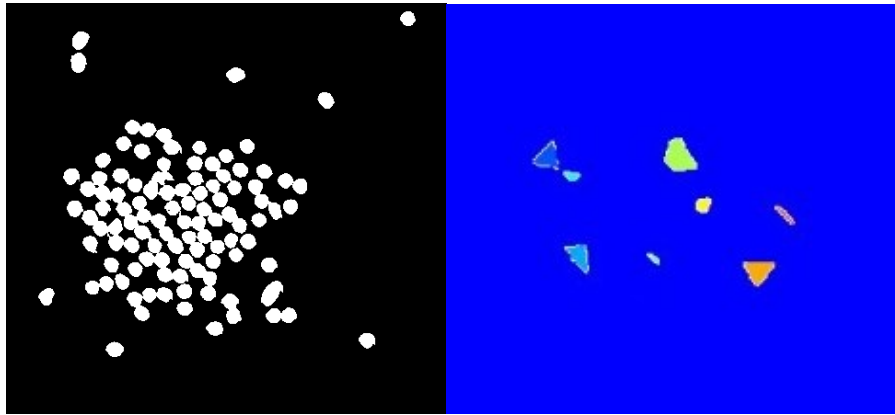
Nejprve byly vytvořeny binární obrázky z CT snímků (obr. 6.2). K tomuto účelu byl využit program Matlab. Pro konfiguraci binárních obrazů byla využita aplikace Colortresholder, ve které byly zprvu nastaveny parametry sytosti a jasu. Další operací bylo tento snímek převést do binárního obrazu pomocí funkce 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 příže 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. 6.2. 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. 6.2 vpravo). Výsledný binární obraz je uveden na obr. 6.2 dole, který bude dále zpracován pomocí vodní transformace, jak je schematicky 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) popisuje funkce vyjádřená vztahy (6.1 - 6.2) 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 pojmán 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. 6.2 Vytvořený CT snímek vlákenné příze a detailní zobrazení kontaktu ve vláknech (nahore), nastavení binárního obrazu a detailní zobrazení spojení vláken (dole)

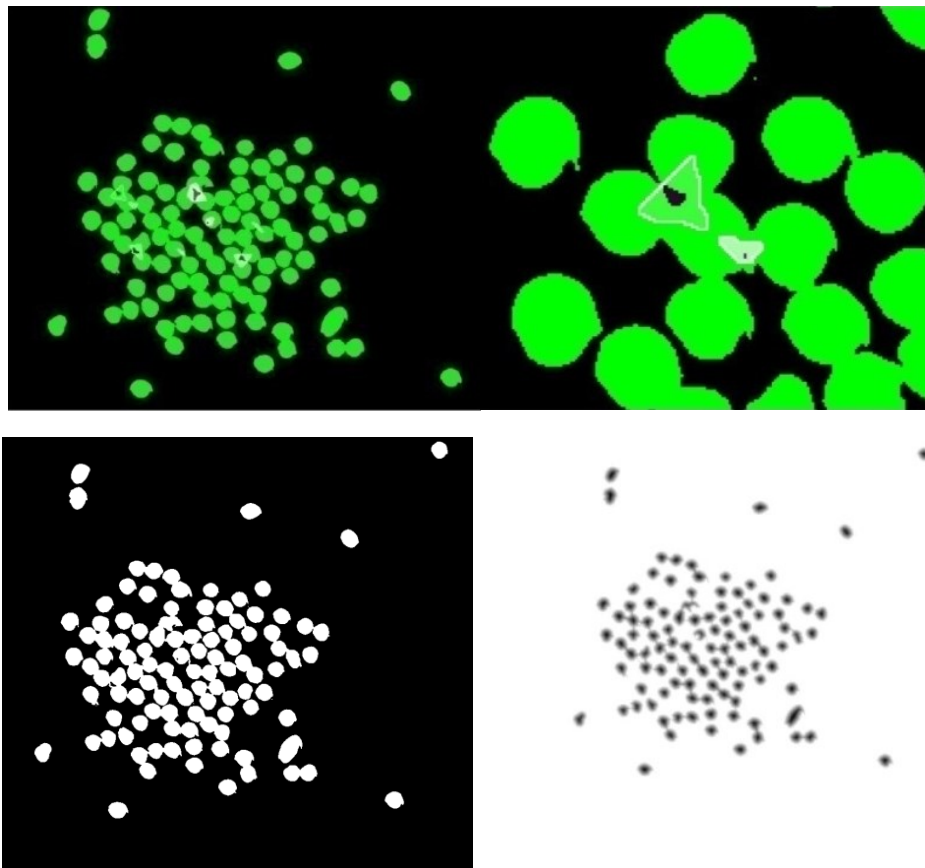
Oblasti, které zůstanou neoznačeny a nejsou spojeny s žádným z existujících povodí, jsou definovány jako samostatné oblasti – nová povodí. Metoda rozvodí watershed se tak ukazuje jako velmi vhodná pro účely separace vláken. Pro detailnější zobrazení byl vytvořen náhled na transformovaná místa, která program vybral k dalšímu řešení separace, jak je uvedeno na obr. 6.3 vpravo. Před zahájením distanční transformace, je třeba provést čištění šumu ve snímku. K odstranění velmi malých bodů lze použít funkci `bwareaopen` (6.1). Tato funkce odstraní jenom nečistoty popředí, takže obrázek doplňujeme před a po vyvolání příkazu `bwareaopen` (obr. 6.4).

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{bw1} = \text{imread}(\text{bw}); \\
 \text{K} = \text{watershed}(\text{bw1}); \\
 \text{Lrgb} = \text{label2rgb}(\text{K}); \\
 \text{imshow}(\text{Lrgb})
 \end{array} \right\} \quad (6.1)$$



Obr. 6.3 Binární zobrazení vláken (vlevo) a vodní transformace (vpravo)

```
imshow(imfuse(bw1, Lrgb)); } (6.2)
axis([10 175 15 155]); }
```



Obr. 6.4 Překrytí binárního snímku s vodní transformací (vpravo) a detailní zobrazení (vlevo)

Odstranění šumu a zobrazení funkce `bwareaopen` (6.3) Dalším krokem je výpočet tzv. vodní transformace - watershed (6.4) a poté její zobrazení, které je uvedeno na obr. 6.5.


```

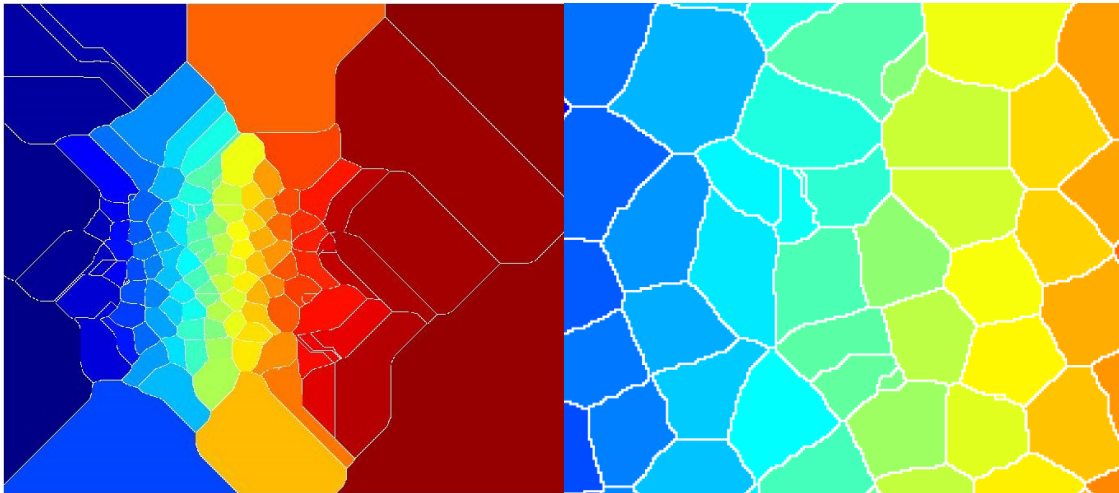
bw2 = ~bwareaopen(~bw1, 10);
    imshow(bw2)
    D = -bwdist(~bw);
    imshow(D, [])
    }
    (6.3)

```

```

Ld = watershed(D);
imshow(label2rgb(Ld))
    }
    (6.4)

```



Obr. 6.5 Nová vodní transformace binárního snímku (vlevo), detailní zobrazení (vpravo)

Hraniční čáry z obr. 6.5 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 (6.5).

```

    Bw2 = bw1;
    bw2(Ld == 0) = 0;
    imshow(bw2)
    }
    (6.5)

```

„Syrová“ 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 (6.6)

```

    D2 = imimposemin(D, mask);
    Ld2 = watershed(D2);
    bw3 = bw;
    bw3(Ld2 == 0) = 0;
    imshow(bw3)
    }
    (6.6)

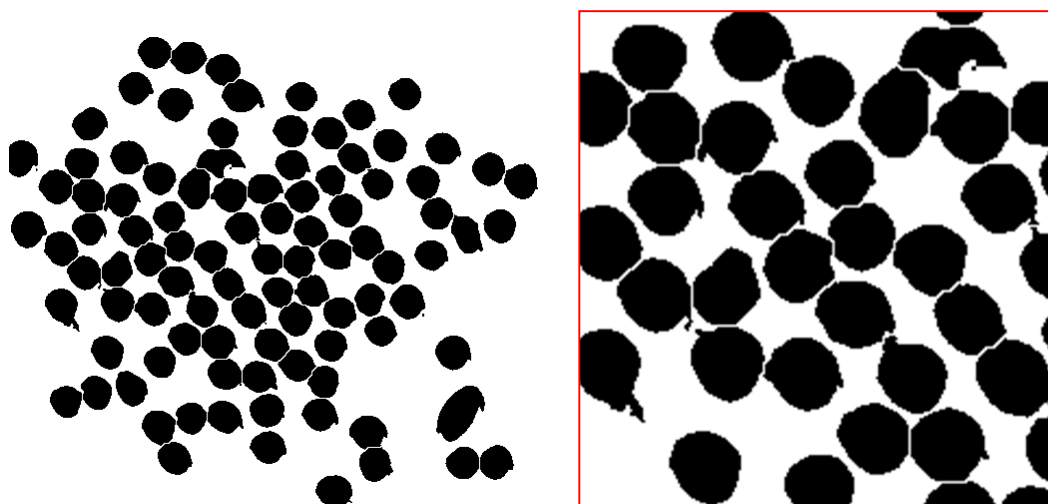
```

Následujícím příkazem podle vztahu (6.7) 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')}
```

(6.7)

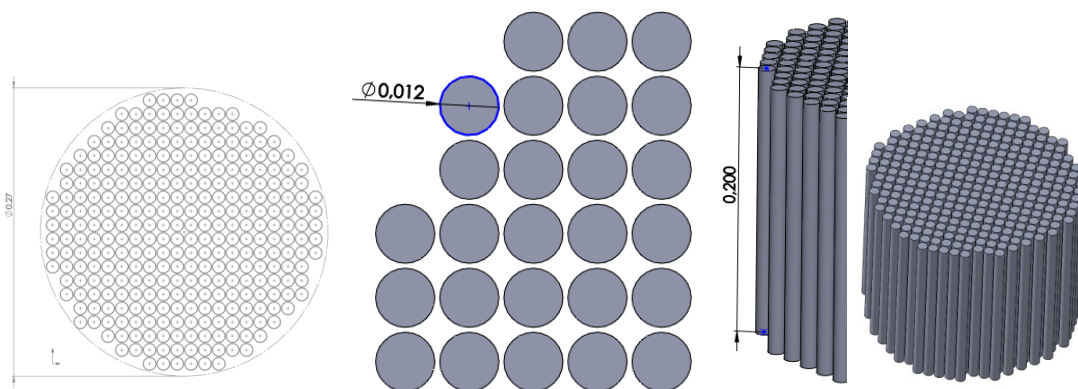
Nakonec budou upraveny funkční transformace jednotlivé vzdálenosti tak, aby byla obsažena minima pouze na požadovaných místech, a poté bude funkce watershed opakována. Výsledkem postupného řízeného procesu dělení je oddělení vláken příze na jednotlivá vlákna a takovýto obraz lze již využít pro tvorbu 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. 6.6).



Obr. 6.6 Konečný výsledek rozdělených vláken získaný úpravou z původního CT snímku

7 Možnosti tvorby 3D geometrie modelu příze

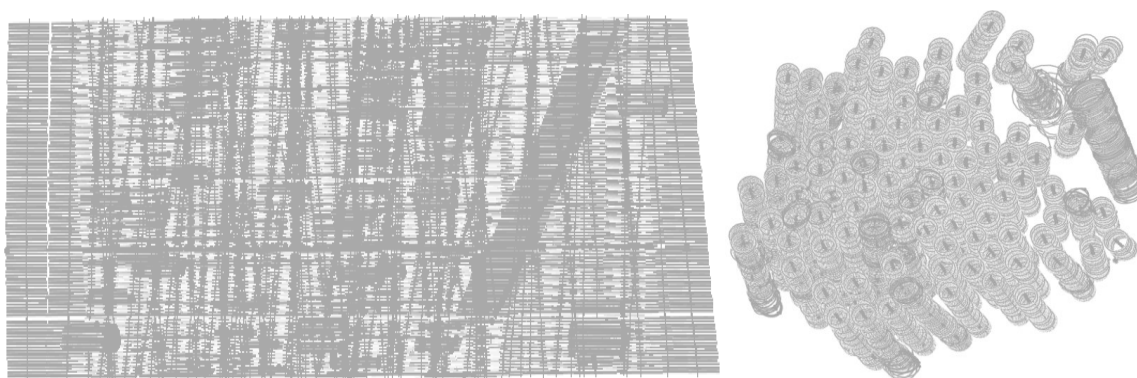
Pro tvorbu 3D geometrie modelu příze z obrazu z vytvořeného snímku z CT podle kap. 4 je v současné době řadu nástrojů a funkcí, které jsou implementované do CAD (Computer aided design) programů a softwarů a umožňují vytvořit konstrukční virtuální geometrii. Mezi nejvýznamnější CAD softwary, patří např. 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, jež 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. Pro následné numerické simulace byl dále vytvořen ideální model příze, jak je patrné na obr. 7.1, 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.



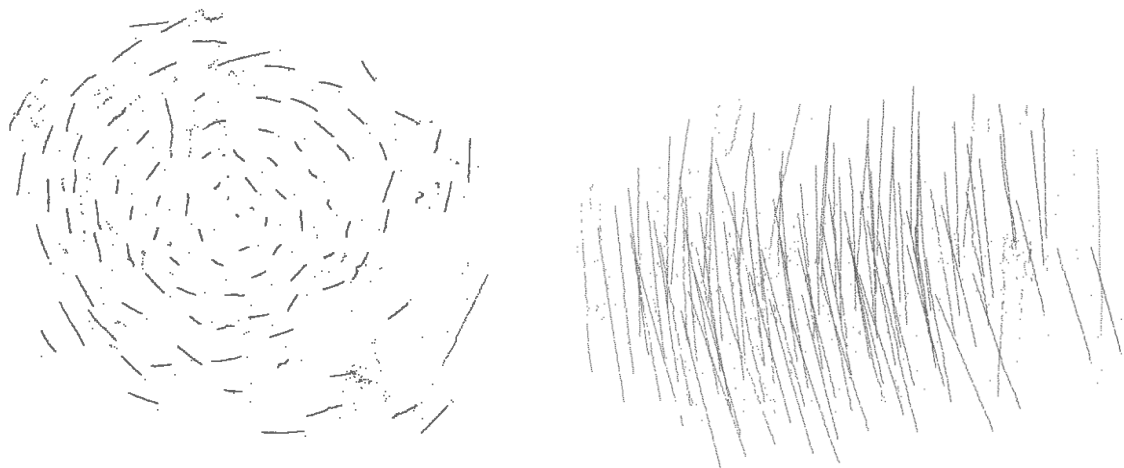
Obr. 7.1 Idealizovaná 3D geometrie modelu příze

7.1 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 vláknů 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 program, 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. 7.2. **Druhým postupem** je nejprve získat středové body trajektorií vláken v programu Matlab a ty následně importovat do CAD programu viz obr 7.3.

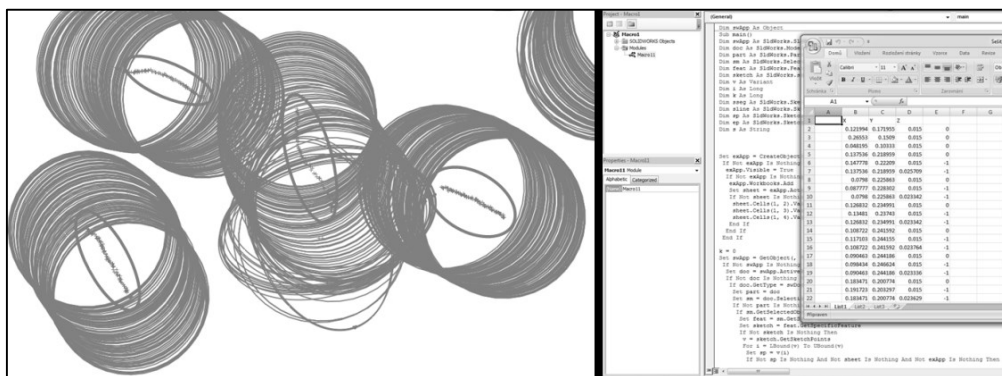


Obr. 7.2 První postup tvorby pokročilé 3D geometrie modelu příze: využití jednotlivých rovin pro vytváření geometrie z vektorového obrazu

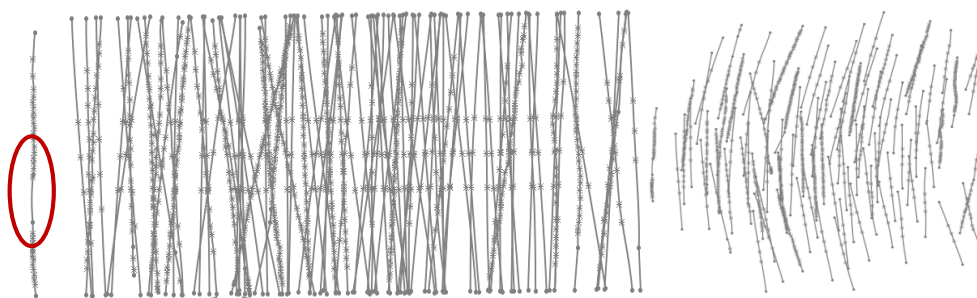


Obr. 7.3 Druhý postup tvorby pokročilé 3D geometrie modelu příže: využití středových bodů trajektorie vláken

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, které 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 přiblíženo na obr. 7.4. 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. 7.5).



Obr. 7.4 3D skica (vlevo), načtení a vložení souřadnic středu bodů do excelovského souboru (vpravo)



Obr. 7.5 Tvorba spojité křivky, spojené středové body do jednotlivých křivek

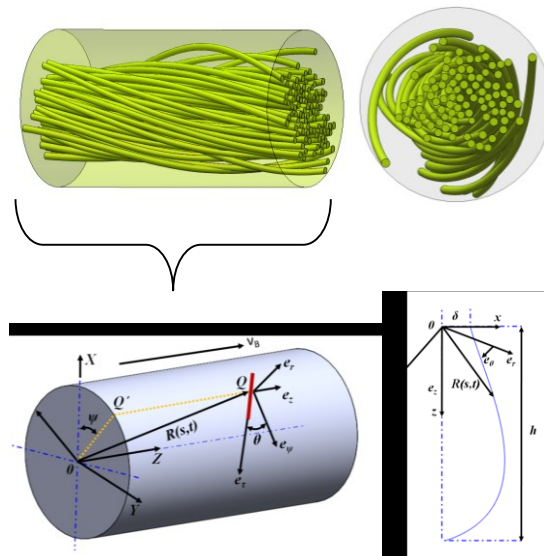
Poté bylo již možné aplikovat funkci tažení po křivce a každé trajektorii přiřadit kružnici o průměru 0.025 mm odpovídající velikosti vlákna získaného z CT. Výsledkem je vytvořená pokročilá 3D geometrie modelu příze (obr. 7.6)



Obr. 7.6 Vytážený 3D model soustavy vlákně příze (vlevo), izometrický náhled na sestavu vláken (uprostřed), izometrický náhled na vznikající zákrut (vpravo)

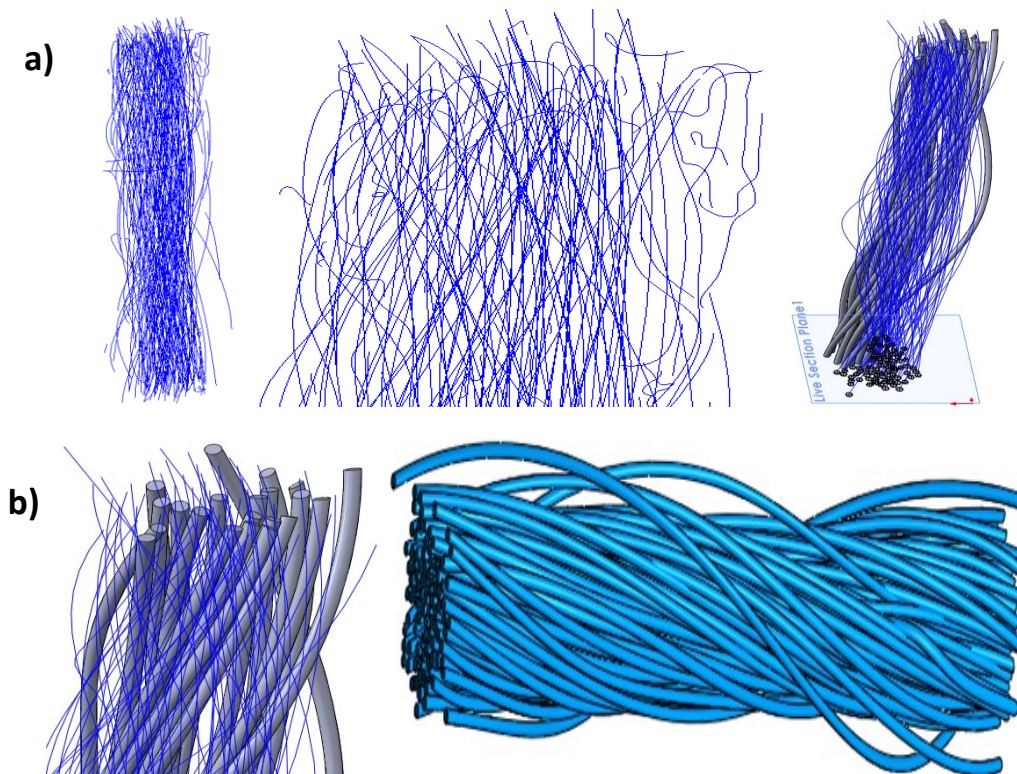
7.2 Optimalizovaný postup tvorby 3D geometrie modelu vlákně příze

Postup popsany 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 vlákněných 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 Petřů [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 vlákně příze podle principu uvedeném na obr. 7.7.



Obr. 7.7 Optimalizovaný postup tvorby 3D geometrie modelu vlákenné příze prostřednictvím parametrického modelování

Zvolená metoda optimalizovaného postupu tvorby 3D geometrie modelu vlákenné příze prostřednictvím parametrických rovnic následně umožnila tvorbu 3D modelu celé příze, jak je v jednotlivých krocích uvedeno na obr. 7.8. Na obr. 7.8a je přiblíženo, že z jednotlivých křivek, které byly příkladově ukázány v kap. 5.2 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. 7.8b



Obr. 7.8 Optimalizovaný postup tvorby 3D geometrie modelu vlákenné příze: a) Ukázka tvorby tažení trajektorie vláken s definovaným zákrutem, b) kompletní 3D model příze

7.3 Tvorba numerické simulace 3D modelu vlákenné příze pro stanovení mechanických vlastností

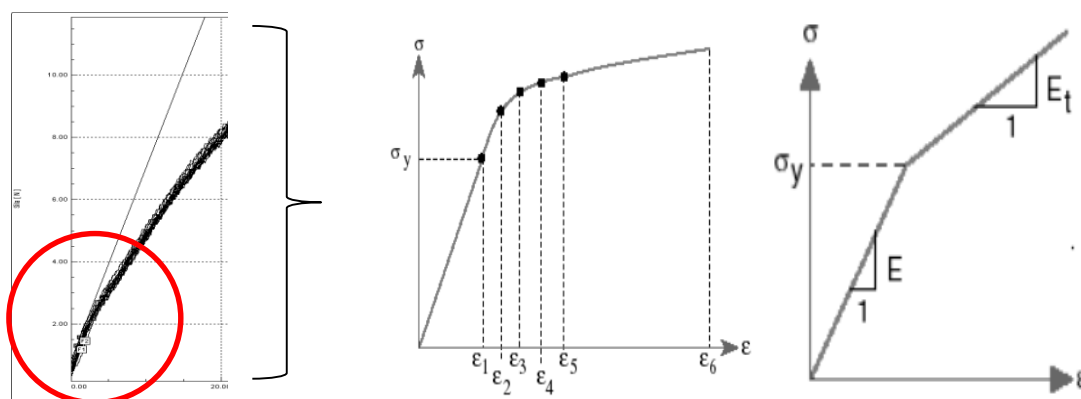
Sestavení numerického modelu vlákenné příze vychází z 3D modelu vlákenné příze, který byl vytvořen v kap. 5. 3D model vlákenné příze byl importován do konečněprvkového programu ANSYS R20, který je nainstalován v počítačových laboratořích TUL. Samotný import dat může proběhnout několika způsoby. ANSYS 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 vlákenné příze, jak je ukázáno na obr. 7.9.



Obr. 7.9 Importovaný 3D model vlákenné příze do MKP programu

7.4 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. Hookeův zákon lze postupně rozšířit 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 schematicky přiblíženo na obr. 7.10.



Obr. 7.10 Bilineární model pro popis vlákenné příze

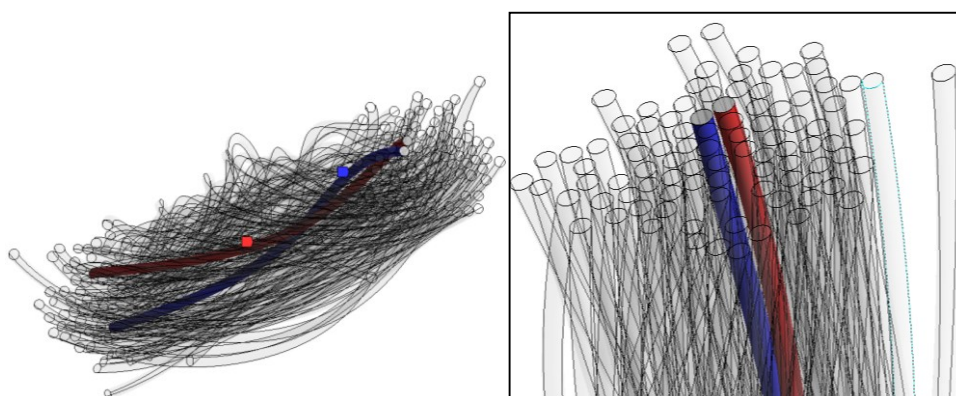
Vláknenná příze byla z polyesterového materiálu (PES_40 TEX), tedy základní fyzikální vlastnosti odpovídají materiálu polyesteru. Všechny potřebné hodnoty pro tvorbu odpovídajícího materiálového modelu jsou uvedeny v tab. 7.1. V tabulce 7.1 jsou také uvedeny hodnoty oceli pro materiálový model desek pro stlačování příze.

Tab. 7.1 Materiálový model vláknenné 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	-	-

7.5 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. Pro naše účely jsou relevantní statické hodnoty, které jsou uvedeny pro suché a mazané povrchy. Definování kontaktu s označením Frictional bylo zavedeno na obvodové plochy vláken příze, jak je pro jeden příklad kontaktu mezi vlákny uvedeno na obr. 7.11. Plochy jsou označeny červenou a modrou barvou vyjadřující Slave a Master plochu.

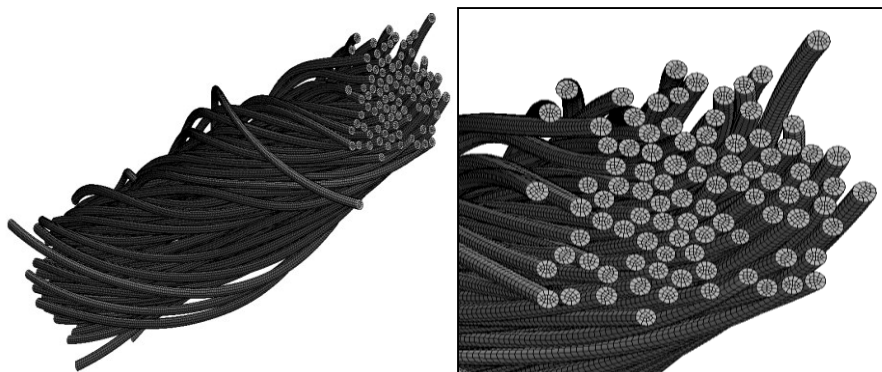


Obr. 7.11 Vytvořené kontaktní dvojice (vlevo), detailní zobrazení (vpravo)

7.6 Tvorba sítě konečných prvků vláknenné příze

Po vytvoření 3D modelu vláknenné příze, 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

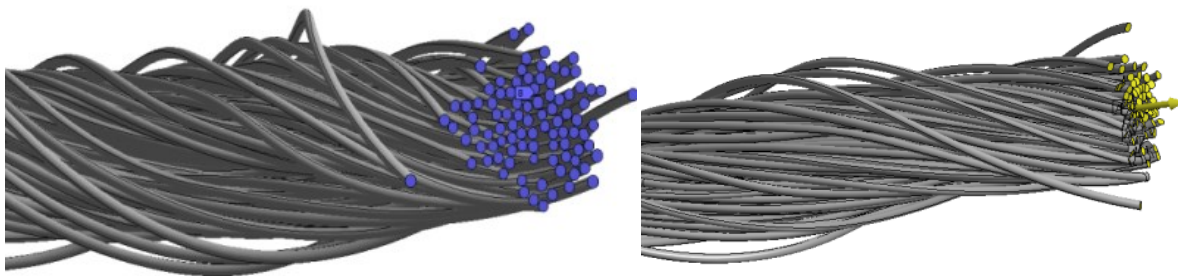
na menší části, nazývané prvky, které se následně používají k aproximaci chování materiálu a provádění výpočtů. ANSYS nabízí několik různých metod síťování, které jsou vhodné pro různé typy geometrií. Použit lze několik základních metod vytvoření sítě v simulačním programu ANSYS. První metodou je manuální 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. 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 vláknennou 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 vláknenné příze. Vytvořený MKP model vláknenné příze, který je uveden na obr. 7.12, měl 504483 prvků a 669041 uzlů.



Obr. 7.12 Navržená síť konečných prvků vláknenné příze pro numerické simulace

7.7 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 vláknenné 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. Pro numerickou simulaci vláknenné 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. 7.13 vlevo). **Druhá okrajová podmínka – displacement** pro řízené natahování, byla aplikována také na koncové plochy vláken, ale na opačnou stranu, jak je patrné na obr. 7.13 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. 7.13 Numerický model vláknenné příze pro tahové namáhání: fixační okrajová podmínka (vlevo), posuvná okrajová podmínka (vpravo)

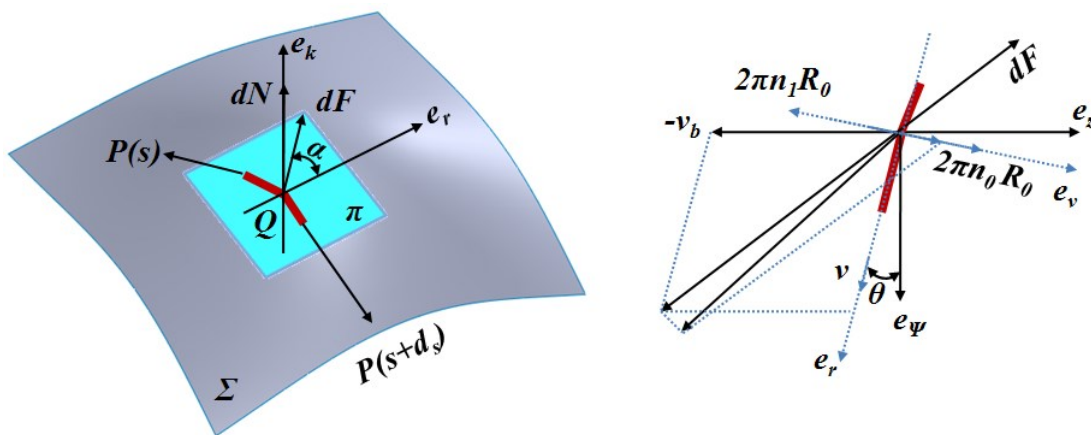
Při tahové deformaci vzniká silové působení, které je dáno jednak jednotlivými silovými poměry ve vláknech příze, kde výsledný součet všech sil je ovlivněn velikostí zákrutu daného vlákna, ale také kontakty mezi vlákny, které způsobují třením mezi vlákny větší silový účinek, jak popisuje např. Tang v [84]. To si lze představit rozložením silového působení mezi vlákny, jak je schematicky uvedeno na obr. 7.14, kde je patrné, že k silovému účinku F přibude další silový přírůstek P . Tento charakter lze následně popsat prostřednictvím rovnice (7.1).

$$m \left(\frac{D^2 \mathbf{R}}{Dt^2} + 2\omega \mathbf{e}_z \times \frac{D\mathbf{R}}{Dt} + \omega^2 \mathbf{e}_z \times (\mathbf{e}_z \times \mathbf{R}) \right) = \frac{\partial}{\partial S} \left(T \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial S} \right) + \mathbf{F} \quad (7.1)$$

kde:

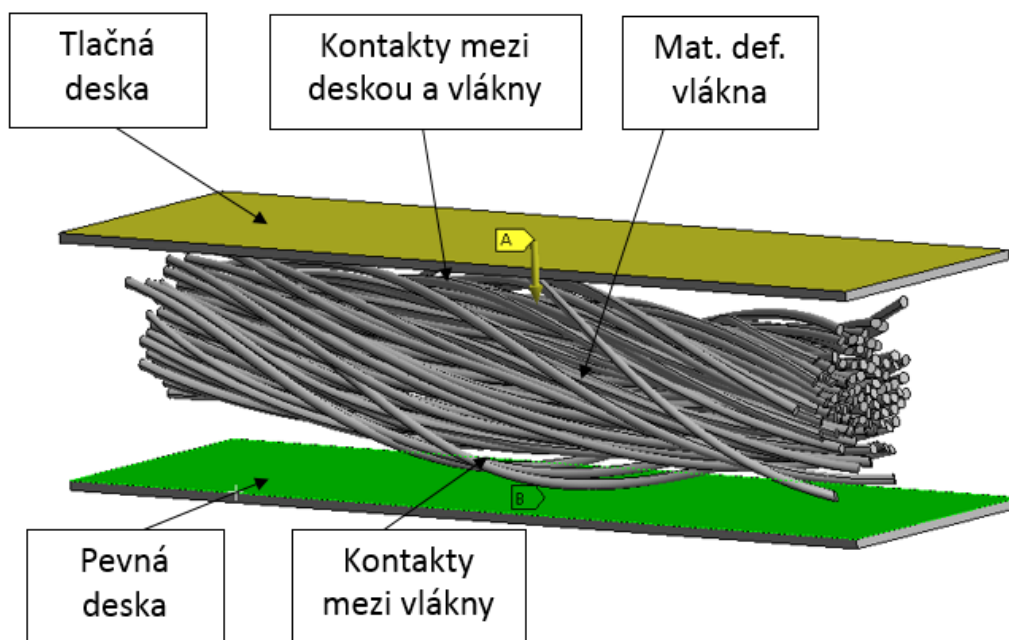
$$F = -D_n |v_n| v_n, \quad \frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial S}, \quad \bar{R} = \frac{R}{a} = \bar{r} e_r + \bar{z} e_z, \quad \bar{s} = \frac{s}{a}, \quad \bar{v}_n = \frac{v}{\omega d}, \quad \bar{T} = \frac{T}{m \omega^2 \alpha},$$

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



Obr. 7.14 Působící síly v kontaktním dotyku mezi vlákny v přízi

Dále byla provedena simulace stlačování vláknenné 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 vláknenné příze do tečného kontaktu se spodní deskou (zelená barva), jak je uvedeno na obr. 7.15.

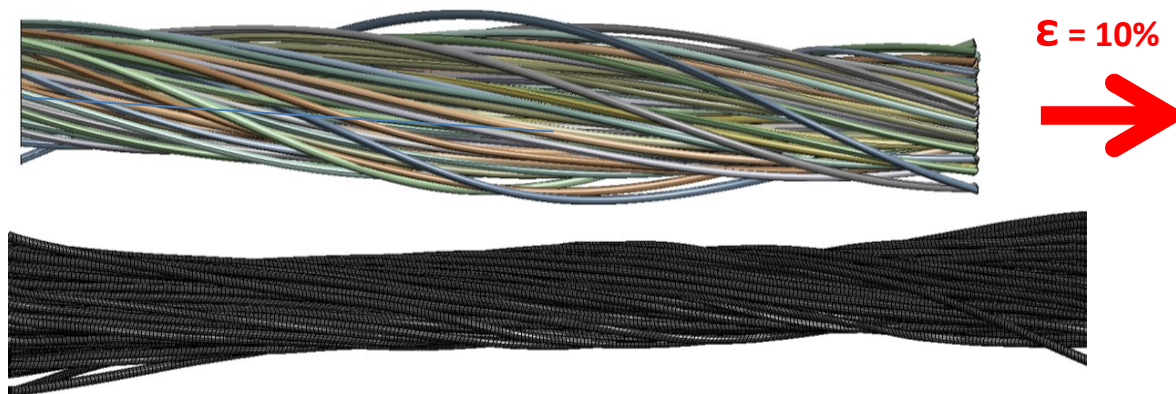


Obr. 7.15 Numerický model vlákenné příze pro tlakové namáhání

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.

8 Výsledky numerické simulace pokročilého modelu vlákenné příze tahového namáhání

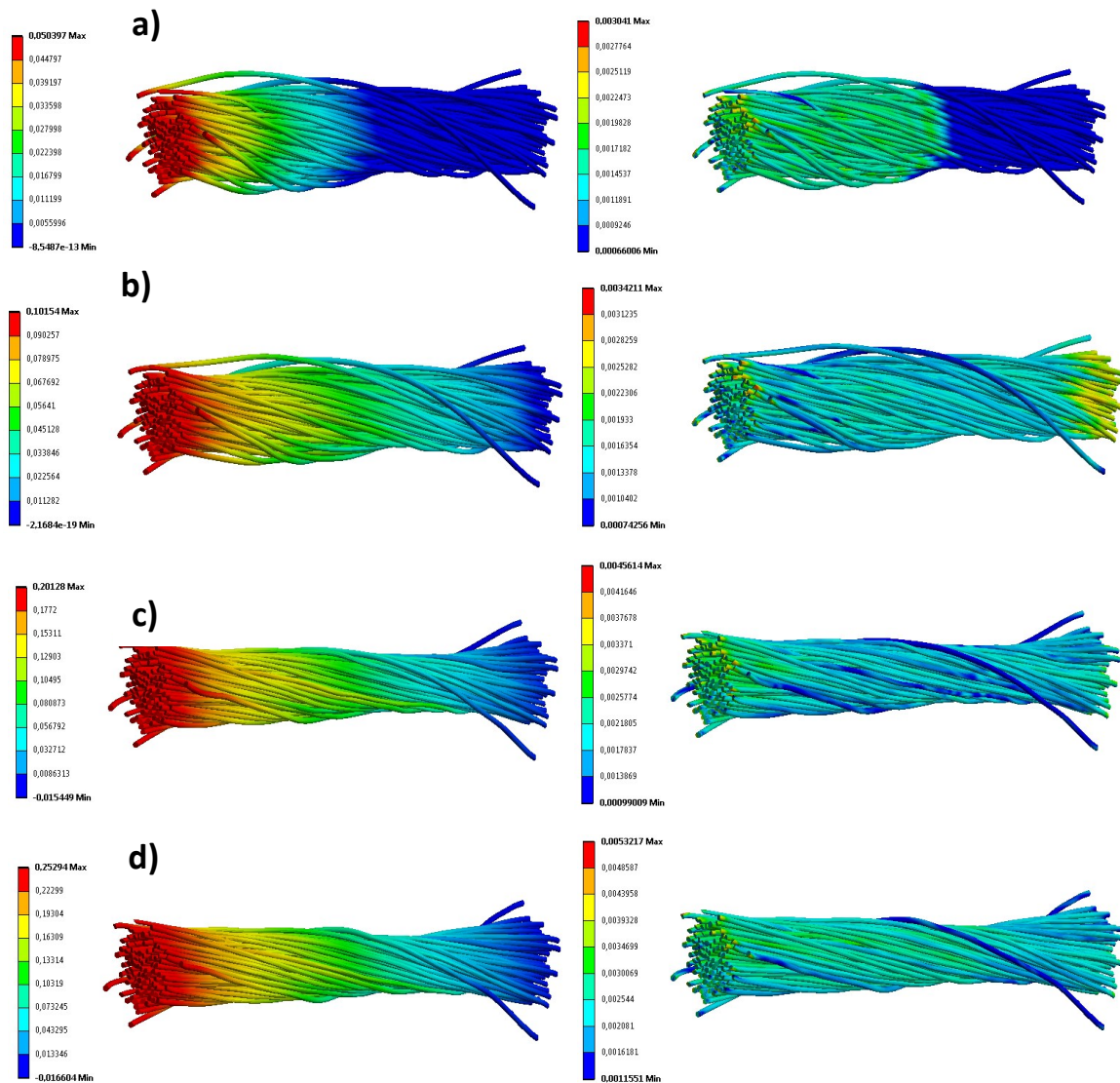
Výsledky numerické simulace pokročilého modelu vlákenné příze při tahovém namáhání ukázaly reorganizaci vláken mezi počátečním uspořádáním vláken v $t=0$ a natažením vláken při deformaci 10 % v $t=t_1$, jak je patrné na obr. 8.1.



Obr. 8.1 Výsledky deformace pokročilého modelu vlákenné příze při tahovém namáhání

Z výsledků uvedených na obr. 8.2a 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 této deformaci je $342 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$. 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 dvakrát méně než maximální hodnota (obr. 8.2b). Při protažení o 6 % původní délky vlákně 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.

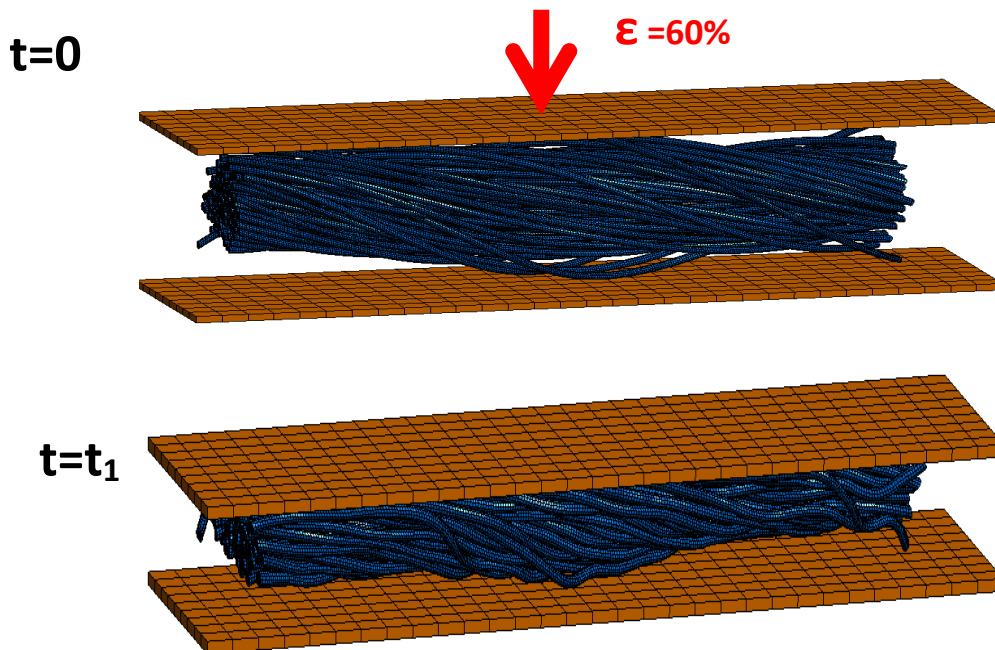


Obr. 8.2 Výsledky rozložení deformace a napětí pokročilého modelu vlákně příze při tahovém namáhání v jednotlivých časových úsecích natahování

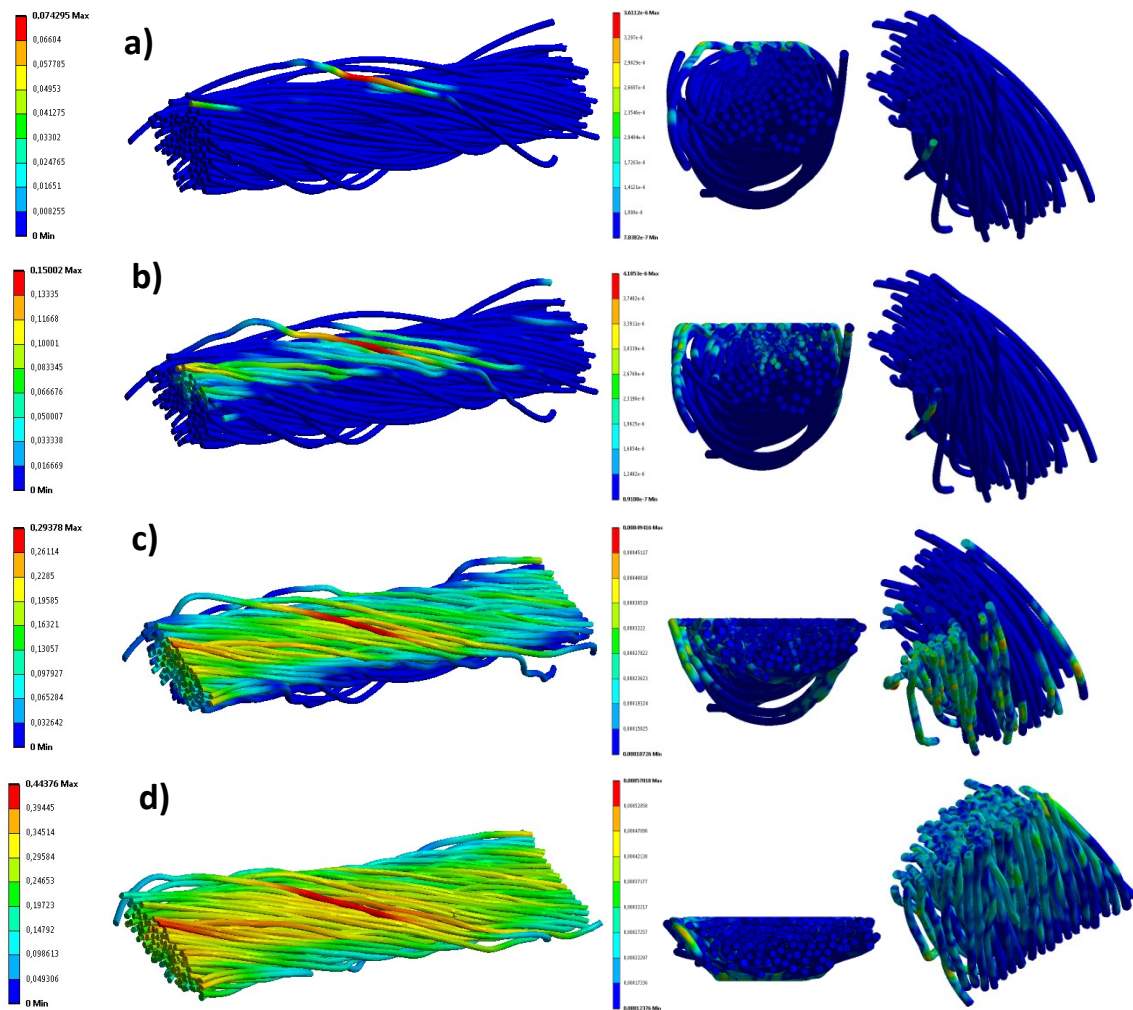
V 8% deformaci (0,2 mm protažení) celkové délky vlákně příze byla naměřená hodnota maximálního vzniklého napětí $456 \cdot 10^{-3}$ MPa, jak je patrné na obr. 8.2c. V celém modelu vlákně příze byly pozorovány průměrné hodnoty napětí okolo $257 \cdot 10^{-3}$ MPa. Při konečné 10% deformaci celkové délky vlákně příze, tedy při maximální hodnotě délky protažení 0,25 mm, byla stanovena maximální hodnota napětí $532 \cdot 10^{-3}$ MPa (obr. 8.2). Výsledky také ukazují, že v rámci časového průběhu natažení se vlákna příze nerovnoměrně deformují a postupně se vlákna přibližují v důsledku přítomnosti zákrutů. Tedy pokročilý model vlákně příze lze využít pro studii optimálního počtu zákrutů v závislosti na deformaci.

8.1 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. 8.3. Jestliže prostudujeme jednotlivé časové intervaly, lze charakterizovat, že při 10% deformaci celkového průměru vlákenné příze, kde byla odečtena maximální délka stlačení 0,0735 mm, je maximální hodnota napětí podle HMM (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 přibliženo na obr. 8.4a. 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. 8.4b). 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. 8.4c. 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. 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. 8.4d.



Obr 8.3 Výsledky deformace pokročilého modelu vlákenné příze při stlačování deskou

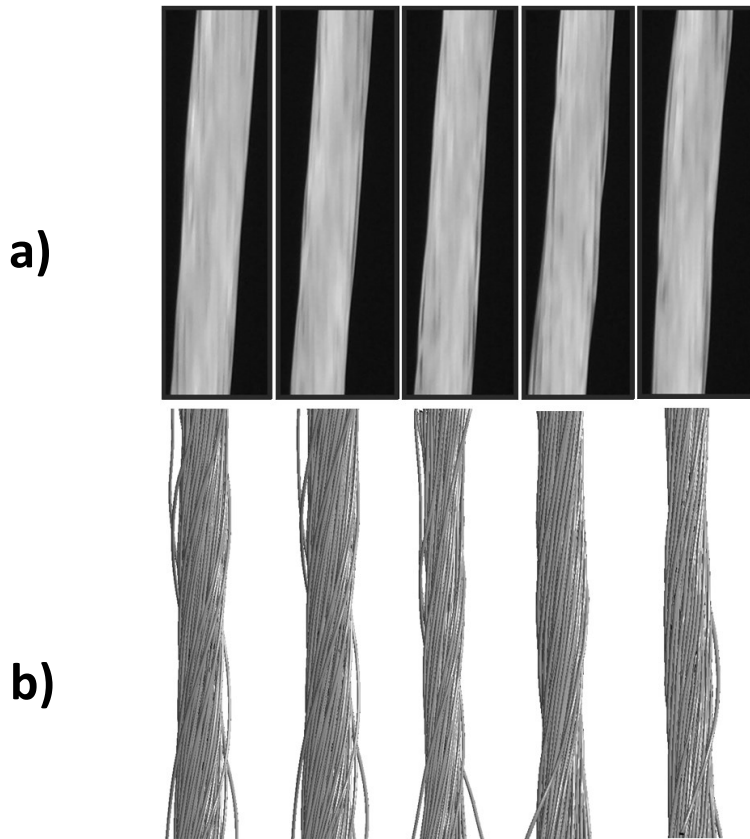


Obr. 8.4 Výsledky rozložení deformace a napětí pokročilého modelu vlákně přize při stlačení v jednotlivých časových úsecích

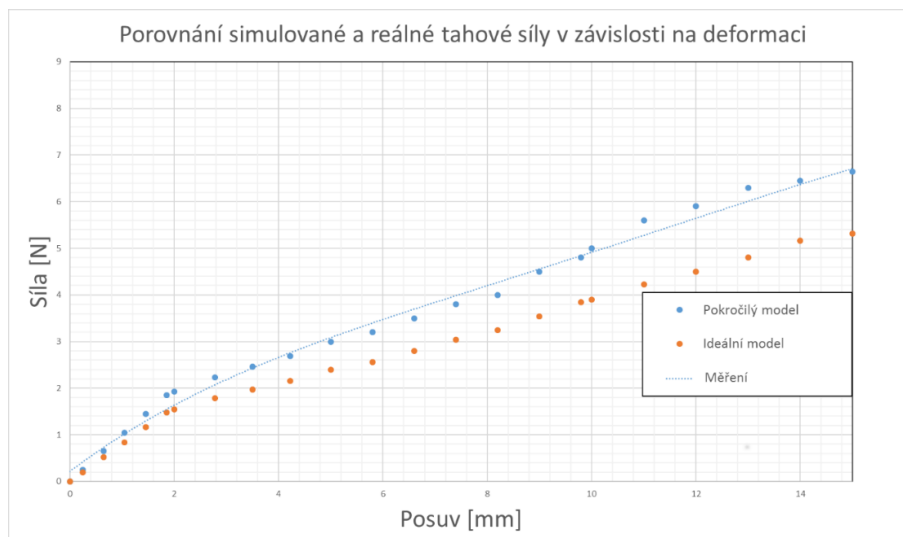
8.2 Porovnání mechanických vlastností reálných vzorků vlákně přize s pokročilými modely vlákně přize

Výsledky simulací uvedené v kap. 7.1–7.3 ukázaly určitý charakter přetváření vlákně přize, z čehož byly stanoveny rozložení deformace a napětí. Bylo proto nutné provést porovnání mechanických vlastností pokročilého modelu vlákně přize 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 $\sim 10,39$ N. Z celkového průběhu tahové křivky byly vyhodnocovány hodnoty v úseku 20 mm, které odpovídají 10 % deformaci reálného vzorku vlákně přize. V uvedeném úseku 20 mm došlo k přeuspořádání vláken, ale nevznikala žádná viditelná přetvoření či plastické deformace jak, je uvedeno na obr. 8.5a. Jednotlivá vlákna přize 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.8.5b. Z obr. 8.5b je také patrné, že v porovnání

s ideálním modelem vlákně 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. 8.6.

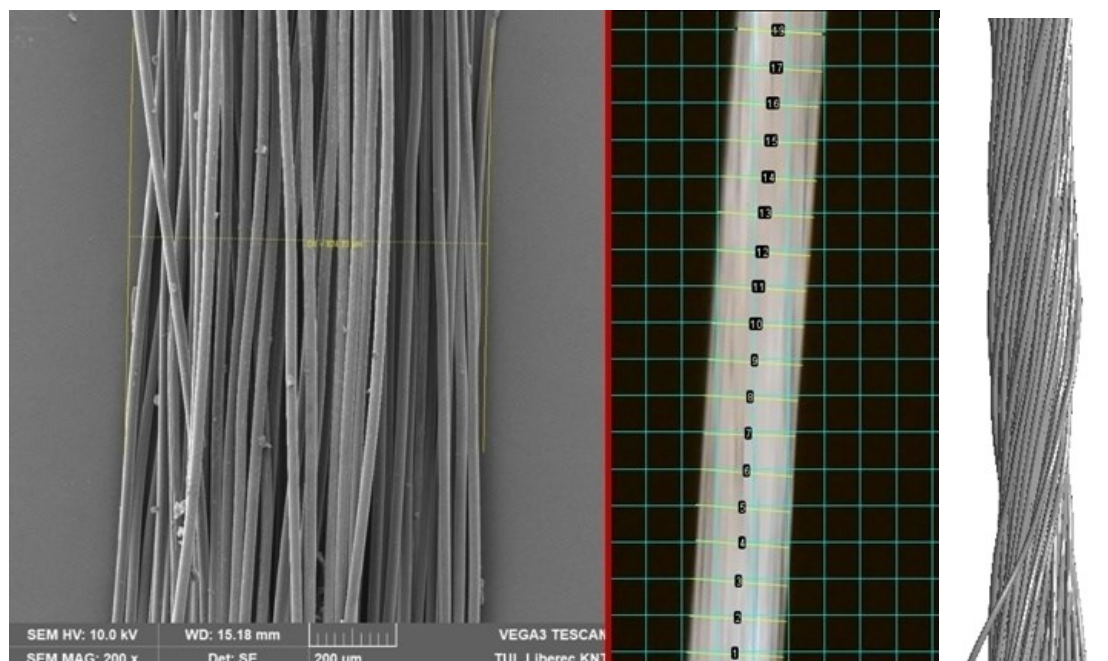


Obr. 8.5 Porovnání deformace tahové zkoušky reálného vzorku s pokročilým modelem vlákně příze a) deformace reálné vlákně příze, b) deformace numerického modelu



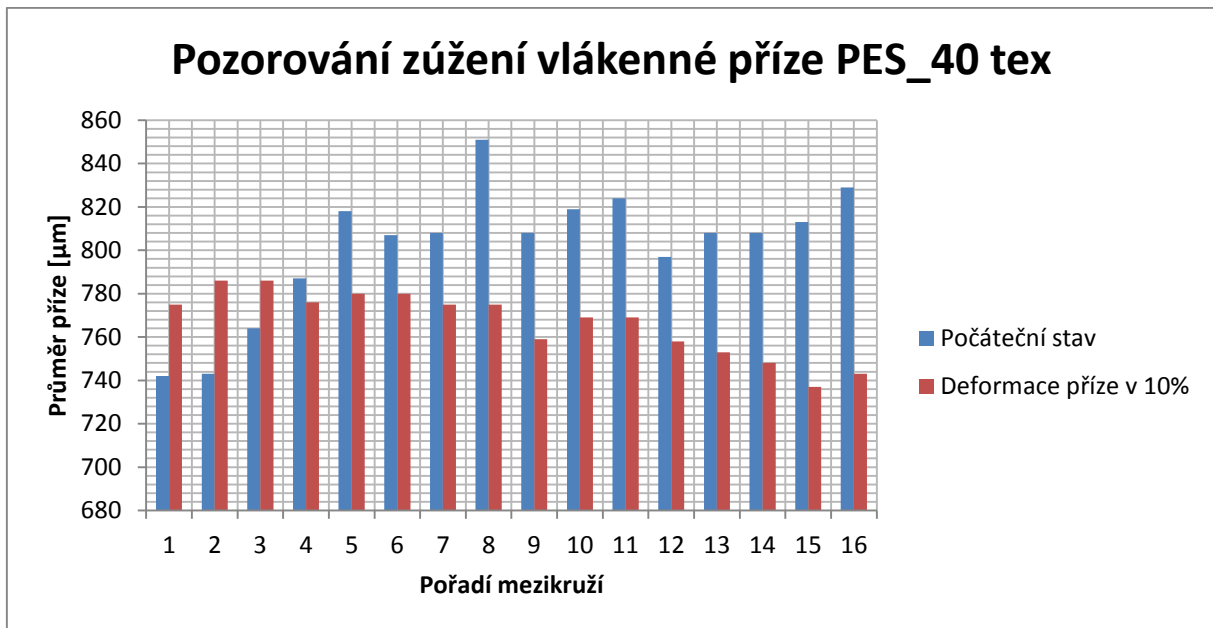
Obr. 8.6 Porovnání tahové zkoušky: průběh reálného protažení vlákně příze, ideální model vlákně příze, pokročilý model vlákně příze

Z výsledku porovnání tahové zkoušky je patrná dobrá shoda mezi reálným vzorkem a pokročilým modelem vlákenné 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 vlákenné 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 vlákenné příze reálného vzorku a modelu, kde byly vytvořeny snímky reálné vlákenné příze pomocí elektronového mikroskopu obr. 8.7. 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. 8.7 uprostřed). Cílem bylo získání přesného stanovení zúžení během zkoušky. V programu ImageJ byla provedena měření průměrů vlákenné příze v příslušných deformacích a sledovaly se maximální a minimální hodnoty zúžení příze.



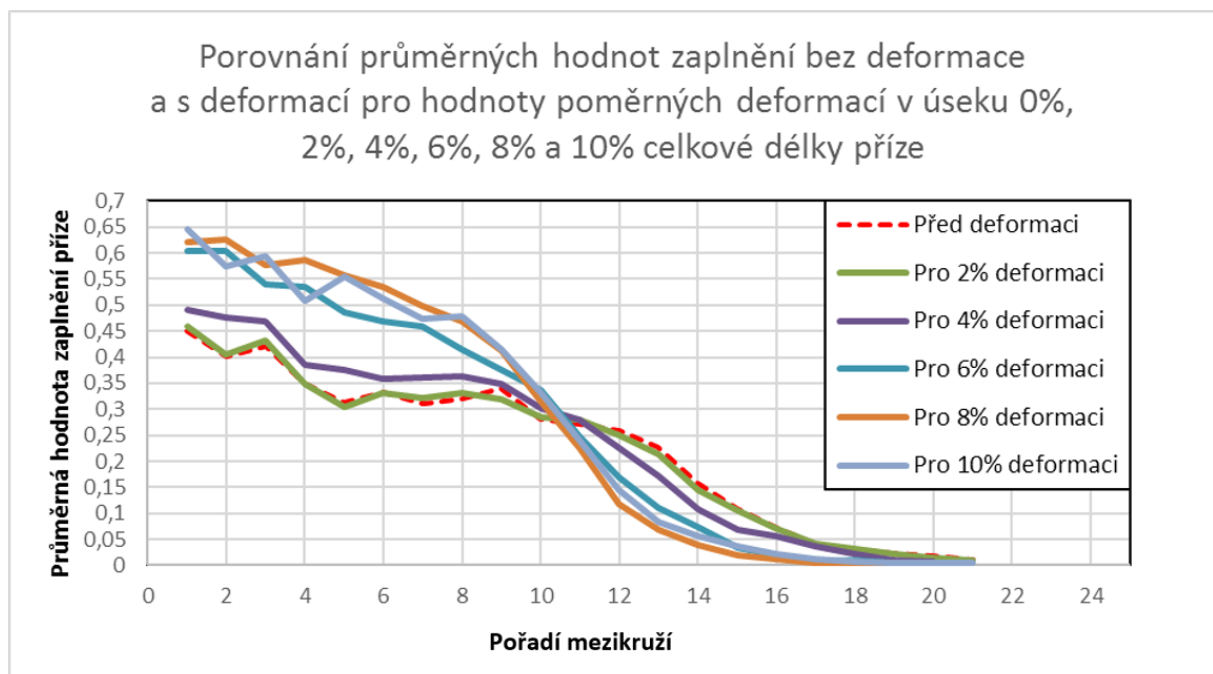
Obr. 8.7 Porovnání průměru vlákenné příze reálného vzorku a pokročilého modelu vlákenné příze: zobrazení vlákenné příze v SEM (vlevo), stanovení průměru příze (uprostřed), model (vpravo)

Vyhodnocení reálného vzorku a pokročilého modelu vlákenné příze, jak je uvedeno na obr. 8.8, 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. 8.9a – 8.9f). 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 porovnáována 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. 8.8 Porovnání zúžení reálného vzorku vláknenné příze

První výpočet zaplnění při tahovém namáhání byl vytvořen pro nulovou velikost deformace. Ve všech úsecích modelu vláknenné 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. 8.9).



Obr. 8.9 Porovnání průměrných hodnot zaplnění při protahování v průběhu deformace

9 Zhodnocení výsledků pro vědní obor nebo pro praxi

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

- Byla využita Metoda CT, která poskytla snímky řezů příze pro tvorbu CAD geometrie. Bylo zjištěno, že vybrané vzorky polyesterového vlákna jsou vhodné pro vytvoření složeného obrazového modelu prostřednictvím počítačové tomografie (CT). V průběhu mechanického zatěžování vlákenné příze byly zároveň pořizovány obrazové záznamy makrokamerou, což umožňovalo pozorovat chování příze při řízené deformaci. Výsledky stanovily, že pro všechny testované vzorky vlákenné příze vykazovaly obdobný průběh zejména ve sledované oblasti při 10% deformaci z celkové upínací délky.
- Prostřednictvím CAD modelu byl navrhnout a realizován pokročilý numerický model pro simulaci dvou zatěžovacích stavů (při tahovém a tlakovém zatížení), včetně okrajových podmínek, diskretizační sítě MKP. Z vytvořeného modelu byly stanoveny napětí a deformace, také kontaktní tlaky mezi vlákny.
- Z výsledků pokročilých MKP simulací byly vytvořeny řezy a v jednotlivých časových fázích vzniklých deformací. Následně lze z těchto průřezových snímků vyjádřit množství zaplněných vláken ve svazku příze.
- Bylo zjištěno, že na základě počítačové tomografie lze vytvořit objemový 3D model rekonstruovaných vláken příze, který na rozdíl od snímků CT lze využít pro tvorbu CAD geometrie. Jednotlivá vlákna ve svazku příze vykazují v závislosti na rychlosti deformaci obdobné vlastnosti s reálnými přízemi.
- Byly provedeny optimalizační modelové zkoušky, které lze výhodně využít pro porovnání s vlastností s odlišnou hodnotou zaplnění, nebo změnou a kombinací materiálového modelu. Změny lze výhodně použít pro optimalizaci nového materiálového složení, změnou hmotnosti a úspory materiálu.

10 Doporučení na pokračování práce v daném tématu a oboru

- 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 přízi, ale také pro analýzu rozložení deformací a napětí, zkoumání zaplnění vláken v konkrétních oblastech příze, nebo pro výzkum reorganizace vláken.
- 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 příkladové studii.

11 Seznam publikovaných prací studenta DSP (včetně uvedení všech spoluautorů publikovaných prací a jejich autorských podílů) a jejich případné citace

- 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
- 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
- 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
- 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.
- V. Malena, M. Fenkl, J. Vosáhlo, T. Martinec, M. Petrů, Hořák na principu kinetického spalování, 1, [Online], 2019
- 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
- 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
- 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
- M. Petrů, O. Novák, P. Košvanec, I. Mašín, T. Martinec, J. Vosáhlo, P. Jandura, Funkční vzorek materiálu s nanostrukturami, 1, 2018
- Mašín, M. Petrů, P. Jandura, L. Hartman, J. Vosáhlo, Funkční vzorek upínače komponenty průmyslového síta, 1, 2018
- M. Petrů, M. Ryvolová, J. Vosáhlo, Increasing of winding effectivity of fiber prepregs aimed to improvement of mechanical properties of final composite parts, Advanced materials congress, Composite materials congress, Stockholm, 1, ISBN: 978-91-88252-11-1, p. 71-72, 2 pages, 2018
- 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

- 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
- M. Petrů, J. Vosáhlo, Principles of increasing the winding effectivity of compo-site prepregs to construction application, *THE 59TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF MACHINE DESIGN DEPARTMENTS*, 1, p. 1-7, 7 pages, 2018
- 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
- 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
- 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
- M. Petrů, I. Mašín, J. Vosáhlo, Inovace výměníku tepla pro plynové ohříváče vzduchu, 35 pages, 2017
- M. Syrovátková, 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
- M. Petrů, M. Syrovátková, J. Vosáhlo, Qualification and research tests needed for qualification of new paint shop for Alfa Romeo parts., 70 pages, 2017
- 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
- M. Petrů, O. Novák, J. Vosáhlo, I. Mašín, M. Syrovátková, Výzkumy, testy a optimalizace na pouličních svítidlech, 170 pages, 2017
- 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
- 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
- T. Kalous, J. Soukupová, J. Vosáhlo, D. Jašíková, Global Imaging method for measuring ionic wind in the vicinity of the HV powered 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
- 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

- 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
- J. Vosáhlo, O. Novák, M. Petruž, 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
- M. Petruž, O. Novák, P. Srb, P. Kulhavý, M. Syrovátková, J. Vosáhlo, R. Kovář, Funkční vzorek simulátoru automyčky, 2015
- M. Petruž, O. Novák, P. Kulhavý, P. Srb, M. Syrovátková, J. Vosáhlo, R. Kovář, Funkční vzorek zařízení pro testování tvrdosti povrchu, 2015
- 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

12 Seznam použité literatury

- [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] Příze-nit-vlákno [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 system, *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 příze: 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] Petrů 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] Petrů 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 Petrů 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 biomaterials, *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. Davidiyuk, 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. Jordanoff, 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.

13 Curriculum Vitae

Osobní údaje

Jméno a příjmení :	Ing. Josef Vosáhlo
Datum a místo narození:	07.02.1983 Hořice
Národnost:	česká
Rodinný stav:	svobodný
Telefon:	736 547 997
Email:	josef.vosahlo@tul.cz

Vzdělání

2014 - dosud	Doktorandské studium TUL, Fakulta textilní, <i>téma DP: Modelování mechanických vlastností vláknenných útvarů</i>
2012	Ing. TUL, Fakulta strojní
2003	Centrum odborné přípravy chladírenské a klimatizační techniky – maturita
2001	Centrum odborné přípravy chladírenské a klimatizační techniky – výuční list

Praxe a pracovní zkušenosti

2020 – 2023	Technická univerzita v Liberci – katedra části strojů, vyučování předmětu Výpočty plastových a kompozitních dílů (VPKD).
2020 – 2023	Technická univerzita v Liberci – katedra části strojů, vyučování předmětu Konstruování 1 a 2 (KOI a KOII).
2018 – 2019	Technická univerzita v Liberci – katedra části strojů, vyučování předmětu 2D CAD.
2018 – 2019	Technická univerzita v Liberci – katedra části strojů, vyučování předmětu -Počítačová grafika a CAD (PGC-P).
2017 – dosud	Zaměstnanec v oblasti technických věd - pracovník výzkumu v oddělení konstrukce strojů.
2015	Odborná stáž na univerzitě Clemson, Testování chemické odolnosti nanovláknenné vrstvy nanosené na přízi.

2014 – dosud	Technická univerzita v Liberci – Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace, spolupráce pro oddělení konstrukce strojů.
2014 – 2018	Technická univerzita v Liberci – Fakulta strojní a Fakulta textilní, vyučování programu ANSYS.
2008 – 2009	Technická univerzita v Liberci – katedra částí strojů, spolupráce na projektových činnostech.

Vedení projektu:

Inovační voucher, Návrh tréninkové tratě Industrial Engineering 4.0. Projekt je zapsán v GAPU pod interním číslem 19045.

Duševní vlastnictví:

- Upínač pro upínání polotovaru, zejména tyčí, drátů nebo trubek kruhového i nekruhového průřezu. Číslo patentu/vzoru 32186
- Funkční vzorek upínače komponenty průmyslového síta. Funkční vzorek 48109606,
- Funkční vzorek zařízení pro testování tvrdosti povrchu. Funkční vzorek 46747885
- Funkční vzorek simulátoru automyčky. Funkční vzorek 46747885
- Testovací trať umožňující testování filtrů pro kapalinovou filtraci. Funkční vzorek 28742800
- Odpružení, zejména odpružení nápravy přípojných zemědělských strojů, zařízení a příslušenství. Číslo patentu/vzoru 32590
- Hořák na principu kinetického spalování. Funkční vzorek 25480596
- Prototyp odlehčené palety s kompozitními prvky za účelem snižování hmotnosti a redukce uhlíkové stopy vlivem přepravy. GA – Prototyp46747885, 00177041

Jazykové znalosti:

německý jazyk - pasivně

anglický jazyk - aktivně

Další dovednosti:

MS Office (MS Word, MS Excel),

CAD programy:

Autocad

CreoParametric,

Solidworks

CAE programy:

Ansys,
Comsol
PamCRASH
Hyperworks

14 Stručná charakteristika dosavadní odborné, výzkumné a vědecké činnosti

Pedagogická činnost

2008 – 2009 Technická univerzita v Liberci – katedra části strojů, spolupráce na projektových činnostech, doplňková činnost.

2014 – 2018 Technická univerzita v Liberci – Fakulta strojní a Fakulta textilní, cvičení v předmětech zaměřených pro studii modelování a konstruování.

2014 – dosud Technická univerzita v Liberci – Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace, konstrukční a výpočetní práce na oddělení konstrukce strojů, spolupráce pro oddělení konstrukce strojů.

2015 Odborná stáž na univerzitě Clemson (USA), Testování chemické odolnosti nanovlákněných vrstvy nanosené na přízi.

2018 – 2019 Technická univerzita v Liberci – katedra části strojů, vyučování předmětu 2D CAD.

2018 – 2019 Technická univerzita v Liberci – katedra části strojů, vyučování předmětu PGC-P

2019 – Dosud Technická univerzita v Liberci – katedra části strojů, vyučování předmětu KO1, KO2, CAD–I, CAD–II, VPKD.

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 uchycených 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 autonomní podvozky 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)

15 Posudek školitele doktoranda

Dizertační práce: **Makroskopické modelování vláknenných struktur – pokročilé numerické modelování vláknenné příze**

Auto: Ing. Josef Vosáhlo

Hodnocení školitele

Předložená dizertační práce je koncipována jako originální autorské dílo. Práce se zabývá modelováním vlastností příze a stanovením zaplnění při různých stupních zatížení a dvou formách zatížení – tahu působícím v ose a stlačení působící kolmo na osu příze. Tyto zátěžové stavy popisují reálné chování příze při běžném používání, jako je např. při tkaní, pletení nebo v textilních výrobcích, které jsou vystaveny různým mechanickým vlivům během jejich životního cyklu. Autor pro získání informací o uspořádání vláken v přízi využil pokročilou techniku mikro výpočetní tomografie (micro-CT), která umožňuje získat detailní 3D obraz mikrostruktury příze bez jejího narušení. Pomocí pokročilých obrazových operací postupně získal data pro vytvoření vektorové geometrie, která je dále použita jako vstup pro metodu konečných prvků (Finite Element Method, FEM). Tento přístup umožňuje přesné modelování a analýzu vlastností příze pod různými zatíženími. Vytvořený model umožňuje studovat chování příze v závislosti na deformačním chování jednotlivých vláken a využívat jej pro popis dalších dějů, což autor demonstruje na příkladové studii modelu zpevnění příze při ovíjení nanovláknennou stužkou. Navržený přístup poskytuje automatizaci při hromadném zpracování obrazových dat, což je klíčové pro efektivní a přesnou analýzu komplexních textilních struktur. Tento postup je použitelný nejen pro příze, ale i pro další, komplexnější struktury, jako jsou tkaniny, pleteniny nebo netkané textilie. Automatizace a přesnost tohoto přístupu mohou výrazně přispět k výzkumu a vývoji nových textilních materiálů s vylepšenými mechanickými vlastnostmi a širším spektrem aplikací. Autor tímto přístupem prokázal schopnost řešit složité, multidisciplinární problémy, které kombinují pokročilé materiálové vědy, inženýrství a počítačovou techniku. Práce přináší nové poznatky a metodiky, které mohou být dále rozvíjeny a aplikovány v různých oblastech textilního průmyslu a materiálového inženýrství. Tento inovativní přístup také podtrhuje význam integrace moderních zobrazovacích technik a pokročilých výpočetních metod pro analýzu a optimalizaci materiálů.

Během doktorského studia publikoval více než 30 prací a je také spoluautorem učebního textu pro předmět „Modelování textilních útvarů“. Během denní formy studia se podílel na textilní fakultě na výuce předmětů „Textile pro průmyslové aplikace“ a „Modelování textilních útvarů“ a byl konzultantem několika diplomových prací. Po přestupu do kombinované formy studia se na fakultě strojní podíl a podíl na výuce dalších předmětů (v současné době je to celkem sedm předmětů).

Doktorand spolupracoval v průběhu studia na řadě projektů a výzkumných činností s průmyslovými podniky. Podílel se na zhruba 14 projektech jako člen týmu a desítkách doplňkových činností, kde byl nejen členem řešitelského týmu, ale také řešitelem.

Kontrola plagiátorství proběhla dne 12. 6. 2024. Bylo nalezeno 14 shod z 8 dokumentů. Nejvyšší míra shody byla nalezena 2 %. Často se jedná o název zdroje v literatuře, popř. o podobné formulace popisující konkrétní fyzikální děj. Nejedná se však o doslovně převzatý text, ale text volně formulovaný, zachovávající smysl sdělení. V nalezených podobnostech proto neshledávám náznak plagiátorství.

Předložená práce splňuje požadavky k udělení titulu Ph.D. a proto navrhuji, aby práce Ing. Josefa Vosáhlha byla přijata k obhajobě.

Ing. et Ing. Ondřej Novák, Ph.D.

V Liberci dne 1. 7. 2024

16 Oponentské posudky disertační práce

prof. Rajesh Kumar Mishra, Ph.D.

Technická fakulta
Česká zemědělská univerzita v Praze
Kamýcká 129, 165 00 Praha-Suchdol

Posudek disertační práce

Jméno a příjmení doktoranda: Ing. Josef Vosáhl

Název práce: Makroskopické modelování vlákenných struktur – pokročilé numerické modelování vlákenné příze

Školitel práce: Ing. Ondřej Novák, Ph.D.

1. Teoretická a odborná úroveň práce se zaměřením na výpočtové modely struktury příze

Ph.D. práce se zaměřuje na vývoj výpočtového a numerického modelu struktury příze na bázi vláken. Část výzkumu v rámci řešení disertační práce byla zaměřena na získání vstupních hodnot materiálových charakteristik vlákna pro výpočty pomocí metody konečných prvků (MKP) a porovnání experimentálních výsledků s materiálovými modely založenými na MKP. Tato práce analyzovala modelování ideálních přízí s ohledem na síly mezi vlákny. Autor práce použil definovanou metodiku pro aplikaci výpočtu na bázi MKP přímo na návrh příze.

K vytvoření 3D modelu vláken příze byla použita obrazová analýza prostřednictvím počítačové tomografie, která umožnila vytvoření rekonstruované trajektorie vláken příze. Obrazová analýza byla použita k úpravě získaných snímků v MATLABU, který poskytuje širokou škálu nástrojů pro detekci, segmentaci a kvantifikaci obrazových prvků. Tímto způsobem byly získány informace o struktuře příze pro následnou tvorbu 3D geometrie příze v CAD. Následně byl představen postup pro vytvoření 3D modelu geometrie příze, který byl použit k sestavení numerické simulace, kde autor popisuje vhodné programy, nástroje a funkce pro vytvoření odpovídající struktury 3D vlákenného modelu příze včetně příslušných zákrutů a výplní. Další část práce se zaměřila na to, jak vytvořit samostatný numerický model, který by kvalitativně odpovídal skutečné 3D geometrii příze. K vytvoření numerického modelu byla použita metoda konečných prvků a ke studiu a vizualizaci rozložení napětí a napětí v přízi a mezi jednotlivými vlákny byl vytvořen strukturální model s kontakty mezi vlákny. Dále bylo porovnáno chování vyvinutých numerických modelů a experimentů s reálnými vzorky ve vybraných řezech včetně řezů přízových vláken. Z těchto vygenerovaných řezů byla stanovena výplň, a to jak pro tahové zatížení, tak následně pro model při tlakovém zatížení. Vyvinutý numerický model vlákenné příze umožňuje identifikaci vlivu intenzity zákrutů na silové a deformační odezvy v závislosti na přetvoření při tahovém nebo tlakovém zatížení, v závislosti na vlastnostech jednotlivých vláken v kontaktu. V této disertační práci

byly představeny různé metody modelování vláknitých přízí, včetně způsobů, jak lze získat informace o struktuře a vlastnostech příze. Vyvinuté numerické simulace umožnily popsat chování příze za zvolených podmínek zatížení a lze je také použít k optimalizaci struktury příze za účelem dosažení požadovaných vlastností.

Práce je na velmi dobré odborné úrovni a splňuje všechny požadavky kladené na disertační práci. Práce začíná přehledem literatury a současným stavem techniky s existujícími modely přízí. Design a koncepty byly vytvořeny s popisem modelů ilustrovaných tvary a geometriemi. Konečné vzorky byly vybrány na základě struktury příze a také rozměrů vláken. Práce se zabývá pokročilou numerickou simulací pro výpočet mechanických vlastností. Součástí této práce je také experimentální stanovení přesnosti modelů.

2. Vhodnost postupu řešení, metodika řešení

Úroveň práce, vhodnost postupu řešení, od stanovení mechanických vlastností na zkoušených vzorcích, přes teoretický postup a sestavení rovnic, až po výsledky lze konstatovat, že je na velmi dobré až výborné úrovni. Práce vysvětluje návrh a vývoj modelů příze s využitím filamentů. Pro měření a modelování pro analýzu byla navržena vhodná metodika.

3. Přesnost a posouzení výsledků

Výsledky se zdají být správné a autentické. Jsou vysvětleny a náležitě diskutovány a za použití vhodných modelovacích nástrojů a experimentálních měření včetně počítačové tomografie.

4. Výhody a přínosy práce pro praktické aplikace

Téma disertační práce úzce souvisí se současným výzkumným trendem a zaměřením Fakulty textilní Technické univerzity v Liberci. Návrh a vývoj vhodných modelů přispívá ke studii a pochopení mechanických vlastností přízí a může přispět k optimalizaci výroby průmyslových přízí zejména v technických textiliích. Také to může být užitečné pro modelové simulace následných tkaných a pletených struktur.

5. Případné nedostatky a chyby práce

Práce má velmi dobrou úroveň komentářů a vysvětlení jednotlivých výsledků. V práci jsou některé gramatické chyby a překlepy, které však nejsou nijak problematické.

6. Otázky k zodpovězení při obhajobě disertační práce

- Jak se liší modely pro nekonečná vlákna a krátká vlákna?
- Jaká je úroveň zkroucení přízí? Zlepšuje zkroucení mechanickou pevnost vláken nebo se snižuje?
- Jaké změny budou nutné pro modelování přízí z přírodních vláken?
- Jaký je váš model ve srovnání s jinými modely v literatuře? Je lepší nebo podobný?

7. Závěrečné vyjádření

Přes uvedené komentáře, připomínky a některé nejasnosti, musím konstatovat, že předložená disertační práce má originální výsledky a je na velmi dobré úrovni, autor prokázal odpovídající znalosti v daném oboru, jednotlivé grafy, obrázky jsou přehledné, popisy výsledků mají vysokou kvalitu, formální a gramatická úroveň práce je v uspokojivé kvalitě.

Autor má také odpovídající seznam svých publikací v časopisech a na konferencích.

Na základě vypracovaného posudku doporučuji disertační práci k obhajobě a v případě úspěšné obhajoby **doporučuji** udělit panu Ing. Josef Vosáhlo akademický titul „doktor“ resp. Ph.D.

ČZU v Praze, Datum: 26.08.2024

prof. Rajesh Kumar Mishra, Ph.D.

Prof. Ing. Vojtěch Dynybyl, Ph. D.
ŠKODA AUTO VYSOKÁ ŠKOLA, o. p. s.
Katedra strojírenství a elektrotechniky
Na Karmeli 1457, Mladá Boleslav

Oponentský posudek disertační práce Ing. Josefa Vosáhla

„Makroskopické modelování vláknenných struktur – pokročilé numerické modelování vláknenné příze“

Na základě pověření doc. Ing. Vladimíra Bajzíka, Ph.D., děkana Fakulty textilní TU Liberec (č. j. TUL24/4114/052406), jsem vypracoval tento oponentský posudek na výše uvedenou disertační práci.

Rozbor práce

Práce v rozsahu 128 stran včetně příloh je členěna do 11 kapitol, 5 příloh a 4 dodatků. Kapitola 1 je úvodem, v kapitole 3 jsou stanoveny cíle práce, kapitola 9 uvádí přínosy práce, v kapitole 10 je závěr a v kapitole 11 je výčet literatury. Vlastní práce je soustředěna do kapitol 4 až 8.

V kapitole 4 jsou popsány metodiky experimentálního výzkumu a jeho výsledky. Tvorba metody modelování 3D geometrie příze je vysvětlena v kapitole 5. Kapitola 6 je popisem postupu numerické simulace pro stanovení mechanických vlastností příze. V kapitole 7 jsou výsledky simulací při tahovém a tlakovém namáhání příze. Kapitola 8 je případovou studií, ve které je aplikován metodický postup vytvořený v této práci.

a) Zhodnocení významu práce pro obor, aktuálnost tématu

Tématem práce je výzkum simulačních metod, které mají sloužit k popisu vlastností vláknenných přízí. Cílem takových postupů je podpora rozvoje know-how v oboru vláknenných přízí a dále v širším smyslu podpora rozvoje textilního průmyslu. Z tohoto důvodu považuji téma za aktuální pro daný obor významné.

b) Vyjádření k postupu řešení, metodám a splnění cílů

Postup řešení je srozumitelný a jsou využity vhodné výzkumné a inženýrské metody. Výzkumné kroky na sebe logicky navazují.

Je využito experimentálních i simulačních metod. Kapitola 4, která je první vlastní prací autora, řeší experimentální měření mechanických vlastností příze a geometrické uspořádání příze (makroskopické analýzy a tomografie). Další kapitoly jsou zaměřeny na 3D modelování (CREO) a MKP (ANSYS) simulace příze.

Cíle práce jsou uvedeny na straně 29 a 30. Hlavním cílem práce je tvorba pokročilého numerického modelu vláknenné příze pro studium mechanických vlastností. Tento cíl je rozčleněn na čtyři dílčí cíle, které jsou ještě blíže specifikovány v jednotlivých odrážkách. Dílčí cíle jsou v podstatě totožné s názvy jednotlivých kapitol, což usnadňuje posouzení jejich splnění.

Po prostudování práce konstatuji, že hlavní cíl i dílčí cíle jsou splněné.

c) Vyjádření k výsledkům a významu původního konkrétního přínosu autora práce

Za původní výsledky autora disertace považuji v oblasti experimentální zjištění mechanických vlastností a geometrické distribuce vláken. Do toho je třeba zahrnout

i metodiky měření a sestavení experimentálních aparatur. Dalším výsledkem je tvorba 3D geometrie modelu vlákenné příze pomocí parametrických rovnic. Dalším výsledkem je metodika tvorby simulačního modelu pro tahové a tlakové namáhání příze včetně provedených simulací. Posledním výsledkem je aplikace modelu na simulace příze ovíjené nanovláknennou vrstvou.

Uvedené výsledky považuji za velmi přínosné v oboru výzkumu vláken. Vypracované metodiky považuji za přenositelné a aplikovatelné na další studie vlákenných přízí.

d) Vyjádření k systematickosti, přehlednosti, formální zpracování a jazyková úroveň práce

Po formální stránce je práce zpracována systematicky. Je uspořádána do logických celků, které odpovídají obsahům jednotlivých kapitol. Členění na body druhé a třetí úrovně poskytuje v jednotlivých kapitolách smysluplný důraz na jednotlivé pasáže práce. Vě struktuře kapitol jsou zahrnuty i závěry a shrnutí jednotlivých kapitol. K přehlednosti a dobrému formálnímu zpracování přispívá i uvedení seznamů zkratk, symbolů, obrázků a tabulek. Přílohy jsou vhodně strukturovány.

Přehled aktuálního stavu řešení problematiky je proveden dobře, literární zdroje jsou označeny včetně převzatých obrázků.

Obrázky i tabulky jsou dobře čitelné, označované a v textu avizované. Jazykově je práce na dobré úrovni, je čtivá a bez výrazných chyb.

e) Hodnocení publikací disertanta

Publikační činnost disertanta je uvedena na straně 102 až 104. Jedná se o soubor 33 výsledků z let 2014 až 2020 a je v korelaci s přehledem projektové činnosti uvedené na straně 105. Přehled publikací, které se přímo vztahují k předložené disertaci, není samostatně uveden.

Z předloženého je patrné, že disertant je aktivní a dovede své výsledky publikovat v rámci autorských řešitelských kolektivů.

Celkové zhodnocení práce

Práce se opírá o náročné moderní výzkumné metody, maximálně využívá současnou počítačovou podporu i moderní experimentální techniku. Obsahuje také vhodné analytické postupy a programování potřebných úloh. Odborná všestrannost autora vedla k úspěšnému řešení této disertační práce. V práci jsou uvedeny původní výsledky. Metodické postupy popsány v práci jsou aplikovatelné na další výzkumné aktivity. Disertant pravidelně publikuje a je zapojen do výzkumných týmů, které se zabývají relevantními výzkumnými projekty.

Otázky k obhajobě:

- 1) Které části Vaší disertační práce jste již publikoval?

f) Závěrečné vyjádření

Na základě výše uvedeného **doporučuji** práci Ing. Josefa Vosáhla k obhajobě. V případě úspěšné obhajoby doporučuji dle zákona č. 111/1998 Sb. §47 udělit disertantovi akademický titul

„doktor“.

V Mladé Boleslavi dne 16. 10. 2024

prof. Ing. Vojtěch Dýňnybyl, Ph. D.