

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

SVOČ 2013

**Monitorování vnitřní struktury nanovláknenných vrstev použitím
obrazové analýzy**

Bc. Řičicová Michaela

Sekce - TEXTIL

Fakulta textilní, 2. ročník
Magisterský studijní program – MANAGAMENT JAKOSTI

Monitorování vnitřní struktury nanovláknenných vrstev použitím obrazové analýzy

Bc. Řičicová Michaela

Sekce - TEXTIL,
Fakulta textilní, 2. ročník
Magisterský studijní program – MANAGAMENT JAKOSTI

Abstrakt: Monitorování vnitřní struktury nanovláknenných vrstev je složitý proces, jehož cílem je přesné stanovení kvantitativních nebo kvalitativních parametrů objektů zájmu, za které považujeme vlákna, mezivláknenné póry nebo celé vláknenné systémy. Metody stanovení parametrů nanovláken vychází především z nástrojů obrazové analýzy, jejímž výstupem jsou obrazová data popisující vlastnosti definovaných objektů. Příspěvek se zabývá představením navržených objektivních algoritmů v prostředí programu MATLAB a popisem posloupných kroků v programu ImageJ vedoucích k určení základních charakteristik nanovláknenných vrstev, jakými je průměr vláken, parametry mezivláknenných pórů, vlastnosti vyskytujících se defektů a orientace vláknenných systémů.

Klíčová slova: Nanovláknna, póry, průměr vláken, detekce defektů, orientace, obrazová analýza, algoritmus navržený pro MATLAB, posloupnost kroků v ImageJ.

Úvod

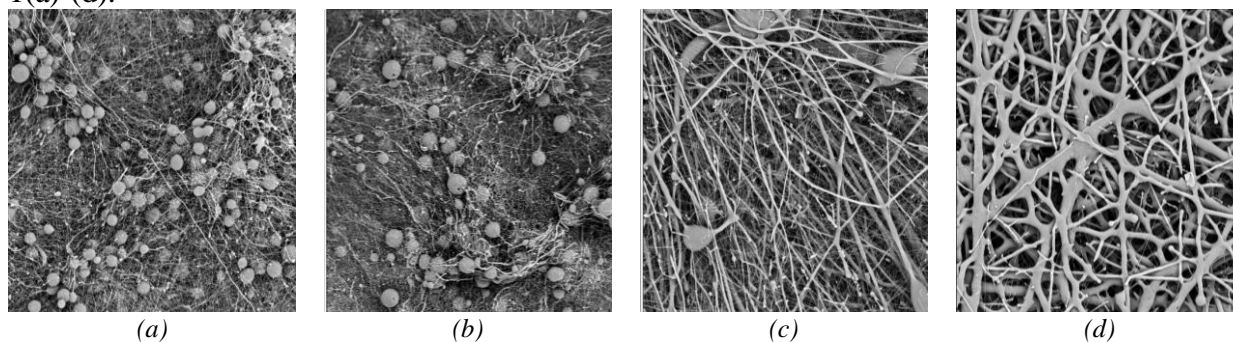
Nanovláknna jsou vlákna v rozsahu desítek až stovek nanometrů, jejich zanedbatelná struktura je nositelem unikátních vlastností, které jsou určující pro aplikace, ve kterých jsou obsaženy. Vzhledem ke svým vlastnostem jsou nanovláknna úspěšně aplikována v různých průmyslových oborech jako je například automobilový průmysl, zdravotnictví, tkáňové inženýrství, stavební průmysl a další. Pro maximální využití vlastností nanovláken mezi které patří velký měrný povrch, vysoká poróznost, zanedbatelný průměr a velikost pórů, je nutné dokonale identifikovat jejich strukturní parametry. Starší metody stanovení parametrů nanovláken jsou založeny především na manuálních metodikách měření realizovaných pomocí primitivních nástrojů obrazové analýzy, mezi které patří například digitální pravítka. Tyto metody jsou nefektivní, subjektivní, špatně interpretovatelné a nepřesné.

V tomto příspěvku jsou uvedeny automatizované metody identifikace základních parametrů nanovláknenných vrstev navržené v rámci řešení diplomové práce ve dvou programových prostředích umožňujících obrazovou analýzu. Mezi parametry nanovláken pro které byly stanoveny v rámci řešení diplomové práce algoritmy usnadňující jejich detekci patří

- stanovení základních charakteristik mezivláknenných pórů,
- detekce a určení parametrů defektů vyskytujících se v nanovláknenných vrstvách,
- stanovení orientace nanovláken,
- určení průměru nanovláken.

Prvním programem ve kterém byly navrženy objektivní algoritmy pro stanovení parametrů nanovláknenných struktur je interaktivní program MATLAB, druhým programem ve kterém byla navržena posloupnost kroků identifikace parametrů nanovláknenných struktur je volně dostupný a uživatelsky atraktivní program ImageJ. V obou programových prostředích byly parametry nanovláknenných vrstev stanoveny na základě SEM snímků polykaprolaktanových nanovláknenných vrstev vytvořených v laboratoři KNT elektrostatickým zvlákněním. Jednotlivé vytvořené nanovláknenné vrstvy se lišily koncentrací zvlákněného polymeru, na snímcích určených k testování metodik stanovení základních parametrů byly například

zobrazeny vrstvy zvlákněného PCL o koncentracích 14%, 16%, 18% a 20% zobrazené na obr. 1(a)-(d).



Obr. 1 Monochromatický snímek 14% PCL (a), 16% PCL (b), 18% PCL (c), 20% PCL (d).

1. Určení parametrů pórů nanovlákněných vrstev

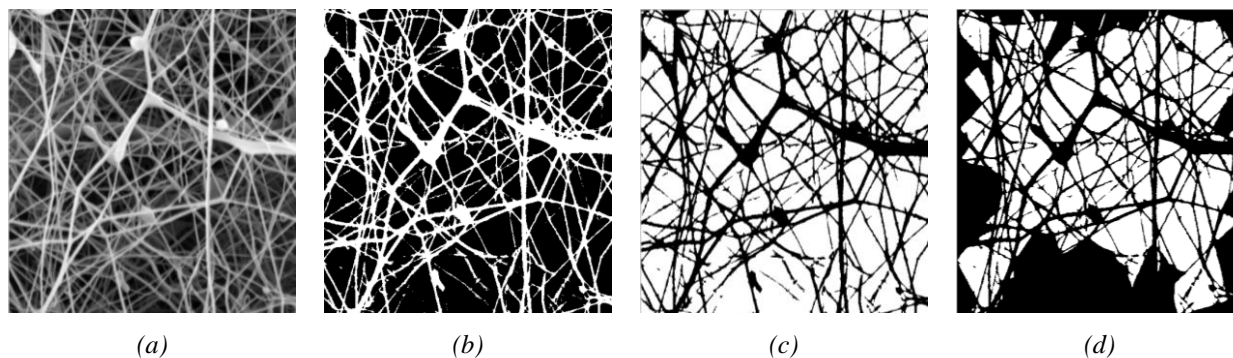
Poróznost je vlastnost nanovlákněných vrstev, která ovlivňuje prodyšnost a prostupnost jiných medií materiálem. V následujících podkapitolách jsou uvedeny metody stanovení parametrů mezivlákněných pórů v prostředí programu MATLAB a prostředí programu ImageJ.

1.1 Metodika navržená ke stanovení parametrů pórů v programu MATLAB

V prostředí programu MATLAB bylo stanovení parametrů nanovlákněných pórů realizováno na základě navrženého algoritmu, jehož princip vychází ze segmentace obrazu. Metoda je demonstrována na monochromatickém snímku 14% PCL uvedeném na obr. 2 (a), po odstranění šumu následuje binarizace obrazu pomocí prahování a sada morfologických operací (například vyplnění děr objektů). Binární obraz je uveden na obr. 2(b). Dalším krokem je převod binárního obrazu na negativ (obr. 2(c)) a potlačení nekompletních objektů ležících na obrazové hranici. Takto upravený obraz uvedený na obr. 2 (d) slouží jako vstup pro vyhodnocení základních parametrů pomocí dostupné zaimplementované funkce. Posloupnost jednotlivých kroků tvořících algoritmus spolu s uvedenými zaimplementovanými funkcemi programu MATLAB jsou uvedeny níže.

- Odstraň šum vstupního obrazu použitím mediánového filtru (`medfilt2.m`).
- Převed' vstupní obraz na binární, použij operaci prahování, hodnotu prahu T nalezni experimentálně (`im2bw.m`).
- Odstraň malé objekty z obrazu (`bwareaopen.m`).
- Potlač nekompletní struktury dotýkající se hranic obrazu (`imclearborder.m`).
- Převed' pixely nesoucí informaci 1 na 0 a naopak, (vytvoř negativ obrazu).
- Detekuj jednotlivé regiony, vytvoř vstupní matici pro získání informací o objektech (`bwlabel.m`).
- Detekuj hranice pórů, vykresli je do vstupního obrazu (`imerode.m`).
- Proveď kalibraci, převed' pixely jednotlivých regionů na mikrometry.
- Vypočítej parametry jednotlivých regionů, vyhodnoť parametry pórů celého obrazu (`regionprops.m`).

Na základě uvedeného algoritmu byly prostřednictvím navržené metody stanoveny v prostředí programu MATLAB parametry mezivlákněných pórů nanovlákněných vrstev lišících se koncentrací PCL uvedené v tab. 1.



Obr. 2 Vstupní monochromatický snímek nanovlákněné vrstvy 14% PCL (a), transformovaný binární snímek (b), negativní obraz po sérii morfologických operací (c), obraz s potlačenými nekompletními objekty (d).

Tab. 1 Výsledky stanovení základních parametrů pórů nanovlákněných vrstev lišících se koncentrací v Matlabu.

Koncentrace	Počet pórů	Celková plocha [μm^2]	Průměrná plocha [μm^2]	Std [μm^2]	Porózita [%]	Průměrný obvod [μm]	Std [μm]
14 PCL [%]	266	180.78	0.67	1.09	45	3.25	3.13
16 PCL [%]	248	238.88	0.96	1.58	59	3.99	3.85
18 PCL [%]	116	160.07	1.37	2.79	40	4.95	5.55
20 PCL [%]	124	31757	256.11	331.79	35	85.11	84.98

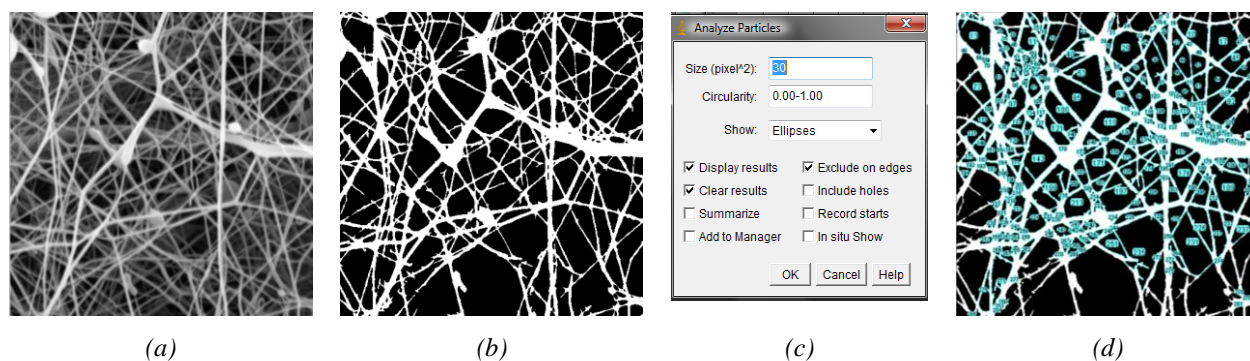
1.1 Metodika navržená ke stanovení parametrů pórů v programu ImageJ

V prostředí programu ImageJ byl aplikován stejný princip stanovení základních parametrů mezivlákněných pórů jako tomu bylo v prostředí programu MATLAB. Navržené kroky vedoucí ke stanovení základních parametrů pórů jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Kroky navržené v programu ImageJ vedoucí k zjištění základních charakteristik pórů.

Analyze → Set Scale	Proveď kalibraci pixelů na reálné jednotky
Image → Crop	Vyřež vstupní obraz
Process → Noise → Despeckle	Odstraň šum mediánovým filtrem
Image → Adjust → Threshold	Transformuj vstupní obraz na binární prahováním
Process → Binary → Fill Holes	Vyplň díry morfologickou operací
Analyze → Set Measurements	Nastav parametry určené k vyhodnocení
Analyze → Analyze Particles	Analyzuj jednotlivé objekty
Results → Distribution	Zobraz distribuci naměřených parametrů
Analyze → Summarize	Stanov výsledky měření použitím statistických operací

Na obr. 2(a) je uveden vstupní snímek 14% PCL po odstranění šumu, na obr. 2 (b) je zobrazen binarizovaný snímek po aplikaci série morfologických operací. Na obr. 2(c) je zobrazeno dialogové okno *Analyze Particles* sloužící v prostředí programu ImageJ jako nástroj pro určení parametrů pórů a na obr. 2(d) jsou pomocí indexů označeny póry, které byly vyhodnoceny. Stejně jako v MATLABU nebyly vyhodnoceny nekompletní objekty ležící na hranici obrazu. V tab. 3 jsou uvedeny výsledky stanovení parametrů pórů v programu ImageJ.



Obr. 2 Vstupní monochromatický snímek nanovlákněné vrstvy 14% PCL (a), transformovaný binární snímek po sérii morfologických operací (b), dialogové okno *Analyze Particles* (c), indexy označené póry jejichž parametry byly vyhodnoceny (d).

Tab. 3 Výsledky stanovení základních parametrů pórů nanovlákněných vrstev lišících se koncentrací v *ImageJ*.

Koncentrace	Počet pórů	Celková plocha [μm^2]	Průměrná plocha [μm^2]	Std [μm^2]	Poróznost [%]	Obvod [μm]	Std [μm]
14 PCL [%]	253	175.60	0.69	1.10	45	3.35	3.08
16 PCL [%]	238	237.23	1.00	1.61	60	4.10	3.81
18 PCL [%]	110	159.01	1.45	2.84	40	5.18	5.53
20 PCL [%]	117	31008.18	265.03	325.24	35	89.06	82.74

Navržené metodiky stanovení parametrů pórů v prostředí programu MATLAB i prostředí programu *ImageJ* lze považovat za přesné, vzhledem ke shodě dosažených výsledků.

2. Určení parametrů kulovitých defektů nanovlákněných vrstev

Na pořízených snímcích PCL nanovlákněných vrstev zobrazených na obr. 1(a)-(c), jsou viditelné nežádoucí kulovité útvary - defekty, způsobené nízkou koncentrací PCL ve zvlákněvaném roztoku. Parametry těchto defektů byly v prostředí programu MATLAB a v prostředí programu *ImageJ* zjišťovány dvěma rozdílnými způsoby. Uvedené metody jsou pro demonstraci realizovány na snímku nanovlákněné vrstvy 14% PCL uvedené na obr. 1(a). První způsob vyhledává defekty za použití korelační metody. Druhý způsob je založen na segmentaci defektů z obrazu.

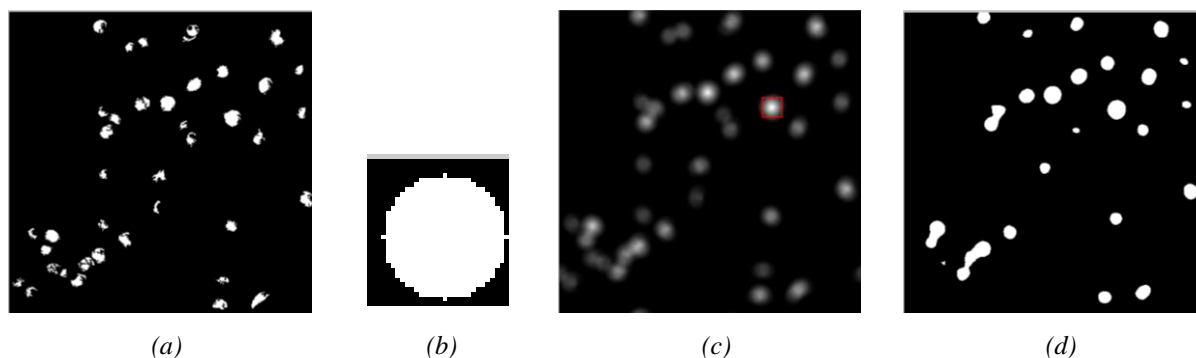
2.1 Metodika stanovení parametrů defektů korelační metodou v programu MATLAB

Princip metody vychází z práce autorů *Gonzalez a Woodse* [1] a je založen na vzájemné korelaci upraveného binárního obrazu 14 % PCL zobrazeného na obr. 3(a) a vytvořené šablony uvedené na obr. 3(b) definující tvar hledaných objektů ve všech místech obrazu. Výstupem metody je korelovaný obraz zobrazený na obr. 3(c), místa, ve kterých byl detekován hledaný objekt jsou místa s nejvyšší vzájemnou korelací a jsou reprezentována nejsvětleji, na obr. 3(b) je místo nejvyšší shody označeno červeným rámečkem. Parametry defektů jsou určeny z binarizovaného korelovaného obrazu uvedeného na obr. 3(d). Navržený algoritmus pro stanovení parametrů defektů v prostředí programu MATLAB je uveden níže.

- Převeď vstupní obraz na binární, použij operaci prahování, hodnotu prahu nalezní experimentálně jako interval, ten odvoď od hodnot úrovně šedi defektů (*imtool.m*).
- Uprav obraz použitím morfologických operací, odstraň malé objekty, vyplň díry v objektech, potlač objekty ležící na hranici obrazu. (*bwareaopen.m*, *imclearborder.m*, *imfill.m*).
- Vytvoř vzorovou šablonu pro detekci defektů (*strel.m*, *padarray.m*).

- Použitím filtru rozostří obraz (`imfilter.m`, `fspecial.m`, `unsharp.m`).
- Proveď korelaci mezi šablonou a obrazem, najdi a vyznač místo s nejvyšší korelací (`dftcorr.m`).
- Proveď prahování korelovaného obrazu (`im2bw.m`).
- Vytvoř vstupní matici pro získání informací o jednotlivých regiorech (`bwlabel.m`).
- Proveď kalibraci, převed' pixely jednotlivých defektů na mikrometry.
- Vypočítej a vyhodnot' parametry jednotlivých defektů (`regionprops.m`).
- Vykresli obvody nalezených defektů do vstupního obrazu (`bwmorph.m`, `remove.m`).

Výsledky detekce a stanovení parametrů defektů nanovlákných vrstev jsou uvedeny v tab. 4. V nanovlákné vrstvě 20% PCL nebyly nalezeny žádné defekty. Bylo zjištěno, že se zvyšující se koncentrací klesá výskyt defektů ve všech zkoumaných PCL nanovlákných vrstvách.



Obr. 3 Upravení binární obraz 14% PCL (a), vyhledávací šablona (b), korelovaný obraz (c), výsledný obraz (d).

Tab. 4 Základní parametry defektů nanovlákných vrstev v závislosti na koncentraci určené v MATLABU.

Koncentrace	n	Celková plocha [μm^2]	Průměrná plocha [μm^2]	Std [μm^2]	Celkový obvod [μm]	Průměrný obvod [μm]	Std [μm]
14 PCL [%]	24	3337.70	139.07	103.14	1016.40	42.35	21.40
16 PCL [%]	13	12080.40	929.51	423.65	1396.20	107.40	28.17
18 PCL [%]	5	1315.90	263.18	281.64	252.88	50.57	39.39

2.2 Metodika stanovení parametrů defektů korelační metodou v programu ImageJ

Stanovení defektů korelační metodou v prostředí programu ImageJ bylo realizováno prostřednictvím volně stahovatelného pluginu *Create Template*. Posloupnost kroků navržených pro určení parametrů defektů v prostředí programu ImageJ je uvedena v tab. 5. Výsledky stanovení parametrů defektů jsou uvedeny v tab. 6. V případě nanovlákné vrstvy o koncentraci 20% PCL nebyly opět nalezeny žádné defekty.

Tab. 5 Posloupnost kroků stanovení základních parametrů defektů korelační metodou v programu ImageJ.

Analyze → Set Scale	Proveď kalibraci pixelů na reálné jednotky
Image → Crop	Vyřež vstupní obraz na požadovanou velikost
Image → Adjust → Threshold	Transformuj vstupní obraz na binární prahováním
Process → Binary → Fill Holes	Vyplň díry morfologickou operací
Plugins → Create Template	Vytvoř šablonu Proveď korelaci mezi vstupním obrazem a šablonou Proveď prahování korelovaného obrazu a vyhodnot' výsledky

Tab. 6 Základní parametry defektů nanovláknenných vrstev v závislosti na koncentraci určené v ImageJ.

Koncentrace	n	Celková plocha [μm^2]	Průměrná plocha [μm^2]	Std [μm^2]	Obvod [μm]	Std [μm]
14 PCL [%]	37	3558.13	96.17	27.60	38.93	6.30
16 PCL [%]	16	6642.00	415.18	118.02	78.57	9.92
18 PCL [%]	3	348.86	87.21	57.15	39.75	12.31

2.3 Metodika stanovení parametrů defektů segmentací v programu MATLAB a ImageJ

Dalším metodou stanovení parametrů defektů vyskytujících se v nanovláknenných vrstvách vláken je přístup založený na segmentaci obrazu. Metoda je totožná s metodou určení základních parametrů pórů s tím rozdílem, že jsou jako objekty zájmu vnímány defekty a transformace na binární obraz je realizována prostřednictvím použití prahové hodnoty, která je definovaná jako interval ohraničený minimální a maximální hodnotou šedi kulovitých defektů vyskytujících se v nanovláknenných vrstvách. Výsledky stanovení parametrů defektů založené na segmentaci získané v prostředí programu MATLAB jsou uvedeny v tab. 7, výsledky stanovení parametrů defektů zjištěné v programu ImageJ jsou uvedeny v tab. 8. V obou případech nebyly ve vrstvě 20% PCL nalezeny žádné defekty.

Tab. 7 Základní parametry defektů nanovláknenných vrstev v závislosti na koncentraci určené v MATLABU.

Koncentrace	n	Celková plocha [μm^2]	Průměrná plocha [μm^2]	Std [μm^2]	Celkový obvod [μm]	Průměrný obvod [μm]	Std [μm]
14 PCL [%]	33	2868.20	86.91	38.37	1600.7	48.51	9.89
16 PCL [%]	20	1201.20	600.61	306.39	2687.6	134.38	43.67
18 PCL [%]	7	1504.50	214.93	168.60	751.42	107.35	39.27

Tab. 8 Základní parametry defektů nanovláknenných vrstev v závislosti na koncentraci určené v ImageJ.

Koncentrace	n	Celková plocha [μm^2]	Průměrná plocha [μm^2]	Std [μm^2]	Obvod [μm]	Std [μm]
14 PCL [%]	34	2755.28	81.04	40.03	36.95	9.26
16 PCL [%]	21	12471.63	593.89	331.73	105.5	41.85
18 PCL [%]	9	1669.56	185.51	180.30	69.74	37.76

Stanovení parametrů defektů vyskytujících se v nanovláknenných vrstvách je komplikovaný proces. V rámci řešení diplomové práce se osvědčily metody vycházející ze segmentace obrazu, vzhledem k tomu, že v obou programech bylo dosaženo podobných výsledků shodujících se s reálnými rozměry a počtem defektů. Stanovení parametrů defektů založené na vzájemné korelaci obrazu a vyhledávací šablony, se jeví jako nevhodné z důvodu velkých rozdílů zjištěných výsledků v jednotlivých programových prostředích.

3. Určení orientace nanovláken ve vláknenné vrstvě

Orientace vláken je velmi důležitým parametrem, který ovlivňuje výsledné vlastnosti výchozích struktur, například kompozitních materiálů. Na orientaci vláken závisí především mechanické vlastnosti, tzn., pokud jsou vlákna plošné či délkové textilie orientovaná v jenom směru, textilie vykazuje v tomto směru vyšší pevnost. Dále orientace vláken ovlivňuje prodyšnost, propustnost a absorpci kapalin vláknenných porézních materiálů.

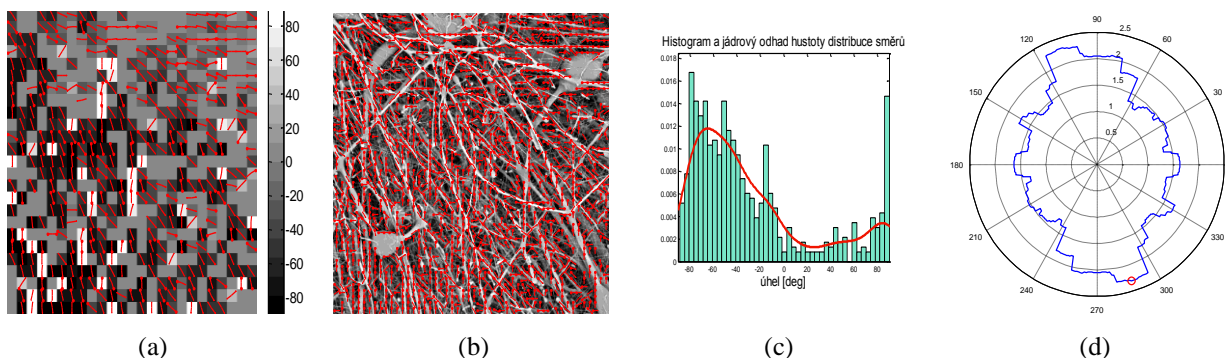
V práci *Rataje a Saxla* [2] je uvedena grafická metoda pro odhad anizotropie vláken, grafická metoda je experimentální a špatně interpretovatelný proces. Z tohoto důvodu je vhodné manuální grafickou metodu nahradit technikou založenou na obrazové analýze.

Podstata aplikovaných metodik určených ke stanovení orientace vláken vlákenné struktury vychází dle [3] z vlastností Fourierova spektra. Monochromatický snímek vlákenné vrstvy je nejprve Fourierovou transformací převeden do frekvenční oblasti, směr vláken je určen na základě výskytu vysokých hodnot frekvenční oblasti. Pokud se jedná o náhodně orientovanou strukturu, obraz ve frekvenční oblasti má kruhovitý tvar. Všechny uvedené metodiky stanovení orientace vláken jsou pro demonstraci aplikovány na snímku 18% PCL nanovlákněné vrstvy zobrazeném dříve na obr. 1(c).

3.1 Metodika stanovení orientace vláken v programu MATLAB

Pro přesné určení směru nanovláken bylo nutné rozdělit vstupní obraz 18% PCL uvedený na obr. 1(a) na mnoho podobrazů, pro každý podobraz byla na základě Fourierovy transformace stanovena orientace vláken. Převládající orientace vláken v jednotlivých podobrazech je na obr. 4(a) graficky znázorněna pomocí směrových vektorů, na obr. 4(b) jsou uvedeny směrové vektory ve stupním obraze. Výsledky stanovení orientace jednotlivých snímků byly interpretovány prostřednictvím polárního diagramu obr. 4(c), histogramu a jádrovému odhadu distribuce směrů obr. 4(d). Algoritmus navržený pro stanovení orientace vláken spolu s funkcemi aplikovanými v prostředí programu MATLAB je uveden v následujícím textu.

- Uprav kontrast vstupního snímku (`imadjust.m`).
- Definuji velikost okna ohraničující oblasti, pro které má být určena orientace.
- Pro jednotlivé podobrazy proved' 2D Fourierovu transformaci (`fft2.m`).
- Přiřaď počátek oblasti frekvenčních polí do středu podobrazu (`fftshift.m`).
- Zredukuji dynamický rozsah koeficientů logaritmickou transformací.
- Najdi hlavní a vedlejší osu elipsy definující tvar frekvenční oblasti.
- Definuji nejnižší přijatelný poměr hlavní a vedlejší osy elipsy (`regionprops.m`).
- Přiřaď směrový vektor jednotlivým frekvenčním oblastem.
- Vytvoř histogram distribuce směrů vláken a proved' jádrový odhad hustoty.
- Vytvoř polární diagram orientace vláken.



Obr. 4 Směrové vektory určené pro jednotlivé podobrazy vstupního snímku (a), směrové vektory zobrazené ve vstupním obraze (b), histogram a jádrový odhad hustoty distribuce směrů (c), polární diagram orientace (d).

3.2 Metodika stanovení orientace vláken v programu ImageJ

Stanovení orientace vláken v prostředí programu ImageJ vycházelo z aplikace dvou volně dostupných pluginů, v obou případech realizovaných v prostředí programu ImageJ byla orientace vláken stanovena na základě analýzy Fourierova frekvenčního spektra. Program ImageJ má otevřenou architekturu, kterou je možné rozšiřovat pomocí volně dostupných pluginů. Prvním aplikovaným pluginem byl plugin *OrientationJ*, který poskytuje uživateli možnost plně automatizovaného stanovení orientace vláken v nanovlákněné vrstvě

prostřednictvím nástroje *Distribution*. Výstupem nástroje *Distribution* je graf popisující četnost výskytu vláken nanovlákněné vrstvy 18% PCL o zjištěných orientacích uvedený na obr. 5(a) a RGB mapa směrů zobrazená na vstupním snímku uvedená na obr. 5(b). Posloupnost kroků zjištění orientace vláken prostřednictvím pluginu *OrientationJ* je uvedena v tab. 9.

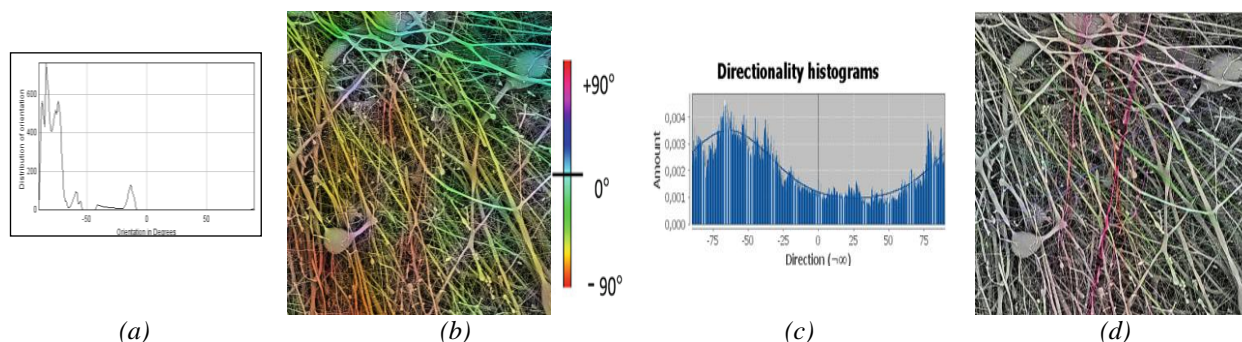
Tab. 9 Posloupnost kroků zjištění orientace vláken v programu *ImageJ* použitím pluginu *OrientationJ*.

Image → Crop	Vyřež vstupní obraz
Plugins → OrientationJ → Distribution	Automatizované stanovení orientace vláken

Druhým aplikovaným pluginem vedoucím k zjištění orientace nanovláken ve vrstvě byl plugin *Directionality*, jenž je součástí volně dostupného balíčku *Fiji* rozšiřujícího funkce programu *ImageJ*. Tento plugin nabízí uživateli velmi snadné a intuitivně ovladatelné rozhraní umožňující rychlou a efektivní metodu stanovení orientace vláken v nanovlákněné vrstvě. Posloupnost kroků je uvedena v tab. 10. Výstupem je histogram orientace a mapa směrů vláken. Na obr. 5(c) je uveden histogram orientace vláken nanovlákněné vrstvy 18% PCL, na obr. 5(d) je uvedena odpovídající mapa směrů.

Tab. 10 Posloupnost kroků zjištění orientace vláken v programu *ImageJ* použitím pluginu *Directionality*.

Image → Crop	Vyřež vstupní obraz
Analyze → Directionality	Automatizované stanovení orientace vláken



Obr. 5 Graf popisující četnost orientace vláken snímku 18% PCL na základě pluginu *OrientationJ* (a), odpovídající mapa směrů (b), histogram orientace vláken zjištěná pluginem *Directionality* (c), odpovídající mapa směrů (d).

V prostředí programu *MATLAB* je stanovení orientace vláken podmíněno tvorbou složitého algoritmu, což je možné považovat za uživatelsky nevýhodné. Prostředí programu *ImageJ* je ujištění orientace vláken uživatelsky přístupnější a to především díky volně dostupným pluginům.

4. Určení průměrů nanovláken ve vlákněné vrstvě

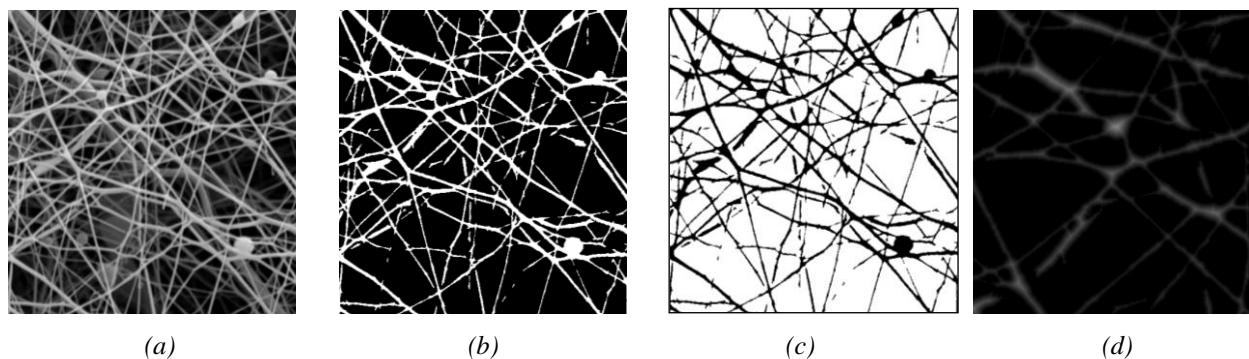
Průměr vláken je jedním ze základních strukturálních parametrů, od kterého se odvíjí vlastnosti celé vlákněné struktury. Často používanou metodou určenou k získání informací o průměrech vláken ze snímků vlákněných vrstev je manuální metoda, při níž je uživatel nucen naměřit a zaznamenat velké množství průměrů. Tato metodika je zdlouhavá, málo efektivní, obtížně reprodukovatelná a vzhledem k subjektivitě hodnocení nepřesná. Z tohoto důvodu bylo dalším cílem práce nalézt automatizovanou metodu stanovení průměrů vláken, která by byla efektivní a dobře reprodukovatelná.

Metoda, která byla pro stanovení automatického průměru v obou programových prostředích v rámci řešení diplomové práce navržena, byla inspirována studií autorů *Pourdeyhimi a Dent* [4] a vychází ze stanovení Euklidovských vzdáleností pro objektové pixely, tzn. vzdáleností jednotlivých obrazových pixelů (pixelů vláken) od jejich nejbližšího pixelu reprezentujícího pozadí tzv. hranového pixelu.

4.1 Metodika stanovení průměrů vláken v programu MATLAB

Stanovení orientace vláken vstupního snímku 14% PCL zobrazeného na obr. 6(a), převedeného na binární obraz uvedený na obr. 6(b), bylo provedeno na základě stanovení Euklidovských vzdáleností obrazových pixelů z transformovaného binárního obrazu na negativní, který je uveden na obr. 6(c). Mapa získaných Euklidovských vzdáleností je uvedena na obr. 6(d). Nejsvětlejší místa vzdálenostní mapy jsou hledané poloměry vláken. V prostředí programu MATLAB byl pro stanovení orientace vláken navržen následující algoritmus s přiřazenými zaimplementovanými funkcemi, které toto prostředí nabízí. Výsledky stanovení průměrů vláken jsou uvedeny v tab. 12.

- Převed' vstupní binární obraz na negativ.
- Vypočti Euklidovskou vzdálenost mezi všemi nulovým a jejich nejbližšími nenulovými pixely, vzdálenosti zapiš jako matici (`bwdist.m`).
- Proveď skeletonizaci obrazu ztenčením, tím vyčleň poloměry vláken (`bwmorph.m`).
- Detekuj průsečíky skeletonizované struktury.
- Každému průsečíku vykresli kružnici o poloměru rovném průměru daného vlákna (`imcircle.m`).
- Proveď kalibraci a vyjádři průměry vláken.
- Sestroj histogram průměrů vláken.



Obr. 6 Vstupní monochromatický snímek nanovláknenné vrstvy 14% PCL (a), binární obraz (b), negativ (c), získaná mapa Euklidovských vzdáleností (d).

4.2 Metodika stanovení průměrů vláken v programu ImageJ

Algoritmus uvedený v prostředí programu MATLAB byl použitím odpovídajících nástrojů aplikován v prostředí programu ImageJ. Princip zjištění průměru nanovláken je založen na průniku kostry vláken a mapy Euklidovských vzdáleností, čímž jsou ponechány pouze poloměry vláken. Posloupnost kroků navržených v prostředí programu ImageJ vedoucí ke stanovení průměru vláken je uvedena v tab. 11. Výsledky stanovení průměrů vláken jsou uvedeny v tab. 12.

Tab. 11 Posloupnost kroků zjištění průměrů vláken v programu ImageJ.

Process → Filters → Median	Odstraň šum mediánovým filtrem
Image → Adjust → Threshold	Transformuj vstupní obraz na binární

Image → Duplicate	Vytvoř kopii binárního obrazu
Process → Binary → Distance Map	Vytvoř mapu Euklidovských vzdáleností vláken
Process → Binary → Skeletonize	Vytvoř skeleton (kostru) vláken
Process → Image Calculator → AND	Získej poloměry vláken prostřednictvím průniku dvou obrazů
Process → Math → Multiple	Vynásob obraz konstantou, získej průměr vláken
Analyze → Histogram	Interpretuj výsledky měření histogramem

Tab. 12 Výsledky stanovení průměrů vláken v závislosti na koncentraci PCL v obou programech.

Koncentrace	Výsledky dosažené v MATLABU		Výsledky dosažené v ImageJ	
	Průměr [μm]	Std [μm]	Průměr [μm]	Std [μm]
14% PCL	0.16	0.09	0.16	0.09
16% PCL	0.22	0.15	0.21	0.13
18% PCL	0.19	0.22	0.17	0.14
20% PCL	0.65	0.70	0.56	0.41

Pro ověření přesnosti navržených automatických metodik stanovení průměru vláken bylo provedeno i manuální měření průměrů, dosažené výsledky se shodovaly s výsledky získanými v prostředí programu MATLAB i programu ImageJ. Na základě tohoto zjištění lze k vyhodnocení průměrů vláken doporučit algoritmus navržený v programu MATLAB nebo uživatelsky lépe aplikovatelnou metodu vytvořenou v prostředí programu ImageJ.

5. Závěr

Cílem příspěvku bylo představení objektivních algoritmů navržených v prostředí programu MATLAB a posloupných kroků vytvořených v prostředí programu ImageJ, vedoucích k určení kvantitativních charakteristik PCL nanovlákněných struktur lišících se koncentrací. Mezi charakteristiky, které lze na základě uvedených metodik spolehlivě identifikovat patří stanovení parametrů nanovlákněných pórů a kulovitých defektů vyskytujících se v nanovlákněných vrstvách, dále stanovení orientace a průměrů nanovláken. Všechny uvedené metodiky jsou efektivní, snadno interpretovatelné a lze jimi objektivně stanovit uvedené základní parametry nanovlákněných struktur. Přínos práce je mimo identifikaci parametrů nanovlákněných struktur i ve snadné interpretaci algoritmů navržených v prostředí programu MATLAB prostřednictvím uživatelsky lépe pochopitelného a přístupného programu ImageJ. Navržené posloupné kroky v prostředí programu ImageJ mohou být vhodnou předlohou pro stanovení datových informací z obrazu bez nutnosti tvorby složitých algoritmů, jako je tomu v prostředí programu MATLAB. Navržená posloupnost kroků vedoucích ke stanovení parametrů nanovlákněných struktur najde uplatnění nejen v oblasti nanovláken, ale i oblasti tkáňového inženýrství, kde může sloužit k identifikaci a popisu strukturálních parametrů buněk nebo buněčných systémů.

Literatura

- [1] GONZALES, R.C., WOODS, R.E. *Digital Image Processing*, 2nd edition, Prentice-Hall, 2002.
- [2] RATAJ J., SAXL I. Analysis of Planar Anisotropy by Means of Steiner Compact: A Simple Graphical Method. *Acta Stereologica*, **7**(2), 107 – 112, 1988.
- [3] KULA, J., CHOJKA, J., TUNÁK, M. Odhad orientace vlákněných systémů. In: *REQUEST12, Reliability, Quality and Estimation*. Praha, Czech Republic, 2012.
- [4] POURDEYHIMI, B., DENT, R. Measuring Fiber Diameter Distribution in Nonwovens. *Textile Research Journal*, **69**, 233 (1999).

