

Politechnika Łódzka

Anna Firych-Nowacka

Modele komputerowe nanowłókien o własnościach magnetycznych

Monografie Politechniki Łódzkiej
Łódź 2021

Anna Firych-Nowacka

Modele komputerowe nanowłókien
o własnościach magnetycznych

Monografie Politechniki Łódzkiej

Łódź 2021

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Lech Andrzej Nowak

prof. dr hab. inż. Jan Sikora

© Copyright by Politechnika Łódzka, Łódź 2021

ISBN 978-83-66741-34-8

DOI: 10.34658/9788366741348

Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej

90-924 Łódź, ul. Wólczańska 223

Tel. 42-631-20-87, 42-631-29-52

E-mail: zamowienia@info.p.lodz.pl

www.wydawnictwo.p.lodz.pl

Monografie Politechniki Łódzkiej, Nr 2392

Pragnę wyrazić serdeczne podziękowania

mojemu Promotorowi,

Panu Profesorowi dr hab. inż. Sławomirowi Wiakowi

za cierpliwość okazaną mi

podczas wykonywania niniejszej pracy.

Praca została częściowo sfinansowana ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Projekt badawczy - promotorski wykonywany w latach 2010-2011 o numerze: N N509 4321

SPIS TREŚCI

1.	Wstęp	6
1.1.	Wprowadzenie.....	6
1.2.	Cele i teza pracy.....	8
2.	Nanosystemy i nanotechnologie	11
2.1.	Podstawowe zagadnienia	11
2.2.	Wytwarzanie nanostruktur i ich właściwości	14
2.3.	Możliwości zastosowania nanosystemów	20
2.4.	Inteligentne tekstylia	24
2.5.	Mikro- i nanowłókna magnetyczne	35
2.5.1.	Technologia wytwarzania.....	36
2.5.2.	Zastosowania mikro- i nanowłókien magnetycznych	38
2.5.3.	Właściwości magnetyczne i mechaniczne nanowłókien.....	40
3.	Podstawowe zależności opisujące pole magnetyczne	44
3.1.	Równania pola elektromagnetycznego	44
3.1.1.	Równania Maxwella	44
3.1.2.	Zastosowanie potencjałów do opisu pola elektromagnetycznego.....	46
3.1.3.	Warunki brzegowe	48
3.2.	Własności fizyczne ferromagnetyków	50
4.	Badanie mikroskopowe mikro- i nanowłókien magnetycznych	56
4.1.	Techniki mikroskopowe	56
4.1.1.	Mikroskopia świetlna	57

4.1.2. Mikroskopia elektronowa	59
4.2. Analityczna obserwacja mikrowłókien	61
5. Automatyzacja procesów modelowania w środowisku programistycznym MATLAB	65
5.1. Metody losowania rozkładu ziaren ferromagnetycznych	65
5.2. Generacja mikro- i nanowłókien magnetycznych	68
6. Trójwymiarowe modele MES mikro- i nanowłókien magnetycznych.....	76
6.1. Metoda Elementu Skończonego.....	76
6.2. Budowa i analiza modeli polowych pojedynczych włókien magnetycznych	87
6.3. Modele homogenizowane	95
6.4. Modelowanie wiązek mikro- i nanowłókien magnetycznych w oparciu o język skryptowy pakietu OPERA 3D.....	99
7. Podsumowanie	110
Bibliografia.....	112
Spis tabel	118
Spis rysunków.....	119
Dodatek (kody programów)	123

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Nanotechnologie i nanostruktury są zagadnieniami, które obecnie cieszą się dużym zainteresowaniem, zarówno ze strony naukowej, jak i przemysłowej. W technologiach w mikro- i nanoskali pokłada się wielkie nadzieje aplikacyjne w wielu dziedzinach życia codziennego i nie tylko. Dzieje się tak dlatego, gdyż cały świat dąży do miniaturyzowania wszystkich urządzeń, w celu zmniejszania ich wymiarów i wagi. Mikro- i nanowłókna magnetyczne stanowią istotny element wyrobów tekstronicznych. Urządzenia tekstroniczne znajdują zastosowania w różnorodnych gałęziach nauki i przemysłu, do których możemy zaliczyć między innymi medycynę, wojsko, sport, czy rozrywkę.

Od wielu lat obserwuje się, iż wiele ośrodków badawczych zajmuje się opracowywaniem nowoczesnych technologii modelowania, syntezy struktur oraz wytwarzania mikro- i nanosystemów. W dotychczasowej literaturze brak jest informacji na temat kompleksowej analizy porównawczej własności magnetycznych i mechanicznych wiązek mikro- i nanowłókien magnetycznych. Stosowane dotychczas podejście, znane z literatury, sprowadza się jedynie do określenia własności fizycznych: mechanicznych i magnetycznych, wytworzonej już wiązki włókien. Nie jest to podejście efektywne, służące do projektowania określonej klasy sensorów i aktuatorów tekstronicznych. Przy obecnie rozwiniętych metodach numerycznych, możliwe jest opracowywanie modeli komputerowych dowolnych struktur. Naturalnym wydaje się poprzedzenie procesu wytwarzania, mikro- i nanowłókien magnetycznych, analizą numeryczną tych materiałów.

W niniejszej pracy opisano sposoby wyznaczania własności magnetycznych mikrowłókien magnetycznych, wykorzystując w tym celu metody numeryczne, stochastyczne oraz analizę mikroskopową. Prowadzone w ramach niniejszej rozprawy badania pozwolą w przyszłości zmniejszyć koszty wytwarzania rzeczywistych wiązek mikrowłókien magnetycznych, dzięki uprzedniej analizie komputerowej. W pracy przedstawiono multidyscyplinarne podejście do zagadnienia projektowania urządzeń tekstronicznych. Przeprowadzona kompleksowa analiza komputerowa własności magnetycznych mikro-

i nanowłókien daje możliwość obniżenia kosztów procesu wytwarzania tego rodzaju materiałów.

1.2. Cele i teza pracy

Od wielu lat obserwuje się dynamiczny rozwój badań związanych, nie tylko z systemami MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems), ale również z wytwarzaniem mikro i nanowłókien o zdefiniowanych (o czekiowanych) własnościach, w tym również własnościach magnetycznych. Badania z tego zakresu koncentrują się głównie na opanowaniu technologii wytwarzania, popartych szeregiem patentów z tego obszaru. Tematykę należy uznać za nowatorską, zarówno pod kątem możliwości aplikacyjnych, ale również ze względu na opracowywane nowoczesne technologie wytwarzania tego rodzaju włókien, jak i ze względu na stopień złożoności ich modeli matematycznych (komputerowych). Modele te winny odwzorowywać z dostateczną dokładnością rozkłady wielkości fizycznych w strukturze włókien, w tym wielkości wektorowych.

Precyzyjne zdefiniowanie własności włókien magnetycznych jest zagadnieniem bardzo trudnym. Wynika to z faktu, iż w procesie wytwarzania nie można dokładnie określić położenia mikrocząstek - ziaren ferromagnetyka o rozmiarach rzędu mikro- i nanometrów - zarówno w przekroju poprzecznym, jak i wzdłuż długości włókna. Problem ten należy zdefiniować, jako zadanie o rozkładzie stochastycznym dla pojedynczego włókna, a w konsekwencji dla całej wiązki.

Dotychczasowy wysiłek badawczy w wielu ośrodkach koncentruje się głównie na opanowaniu procesu wytwarzania w połączeniu z oszacowaniem własności magnetycznych wiązki włókien poprzez pomiar ich własności z użyciem magnetometrów. Jest to w pewnym zakresie skuteczne, lecz niewystarczające, jeśli mówimy o zastosowaniu tychże włókien między innymi w diagnostyce medycznej. Z tej przyczyny w niniejszej pracy zostało zaprezentowane podejście bardziej dokładne, poprzez budowę zintegrowanych modeli komputerowych dla trójwymiarowych struktur wiązek włókien magnetycznych.

Możliwości zastosowań mikro- i nanowłókien magnetycznych są ogromne. Tekstylią wielofunkcyjną, oprócz naturalnych cech włókienniczych, mają nadane nowe właściwości, poszerzające ich możliwości aplikacyjne w wyrobach tekstronicznych. Posiadają właściwości przewodzące, magnetyczne, piezoelektryczne i transmitujące promieniowanie świetlne. Właściwości te są dominującymi nad właściwościami mechanicznymi.

Jednymi z wyżej wymienionych tekstyliów są tekstylia magnetyczne mogące posłużyć do budowy wyrobów tekstronicznych, których jednym z ważnych celów jest monitorowanie wybranych funkcji („wskaźników”) fizjologicznych człowieka.

Strategia ochrony zdrowia człowieka jest obecnie realizowana w wielu krajach Europy, a także w Polsce. Przykładem zastosowania włókien magnetycznych do tego celu może być czujnik tekstylny, który mierzy jeden z parametrów fizjologicznych człowieka - jest to czujnik do pomiaru częstości oddechu, który jest zintegrowany z ubiorem tekstronicznym. Inną interesującą aplikacją, z wykorzystaniem tekstylnej elektrotechniki, jest tekstylny ekran magnetyczny chroniący przed promieniowaniem elektromagnetycznym.

Analiza opracowań publikowanych przez różne ośrodki badawcze upoważnia do sformułowania następujących wniosków:

- w dostępnej literaturze brak jest kompleksowej analizy porównawczej własności magnetycznych i mechanicznych trójwymiarowych struktur wiązek włókien;
- stosowane dotychczas podejście, znane z literatury, sprowadza się jedynie do określenia własności fizycznych (mechanicznych i magnetycznych).

Należy wyraźnie stwierdzić, iż w procesie wytwarzania mikro- i nanowłókien o właściwościach magnetycznych nie można zapewnić równomiernego rozkładu ziaren magnetyka, o czym wspomniano już wcześniej. Z tej przyczyny wydaje się być wręcz niemożliwe opracowanie zastępczego, ogólnego modelu strukturalnego pojedynczego włókna o zdefiniowanych, oczekiwanych własnościach magnetycznych. Należy wziąć ponadto pod uwagę, iż istnieje jeszcze jeden poważny problem, który należy traktować jako zadanie z kategorii zadań statystycznych. Mianowicie, w procesie technologicznym wytwarzania ziaren magnetyka jesteśmy w stanie zdefiniować jedynie w przybliżeniu ich wielkości, jako reprezentatywne. Z tego powodu wysiłek badawczy koncentruje się na budowie modeli komputerowych strukturalnych dla wybranych wiązek włókien. Takie podejście jest w pełni uzasadnione, gdyż do budowy rdzeni tekstylnych sensorów i aktuatorów wykorzystuje się wiązki włókien magnetycznych.

Powyższe wprowadzenie pozwala na zdefiniowanie celów pracy oraz sformułowanie tezy pracy.

Cele podstawowe:

- Opracowanie kompleksowych trójwymiarowych polowych modeli wiązek mikro- i nanowłókien, definiowanych jako włókna magnetyczne;
- Budowa zintegrowanych modeli numerycznych;
- Budowa homogenizowanych zastępczych modeli komputerowych wiązek mikrowłókien w funkcji liczby mikro-włókien w wiązce, wymiaru ziaren, rodzaju ferromagnetyka.

Cele aplikacyjne:

- Określenie granicznych wartości wielkości ziaren ferromagnetyka i procentowej zawartości ferromagnetyka (również z punktu widzenia możliwości technologicznych) w celu uzyskania najlepszych własności magnetycznych mikro-włókien;
- Weryfikacja doświadczalna modeli komputerowych.

Teza pracy:

- Komputerowe modele strukturalne wiązki mikro- i nanowłókien magnetycznych umożliwiają obliczenie zastępczej charakterystyki magnesowania rdzenia tekstylnego.

2. Nanosystemy i nanotechnologie

2.1. Podstawowe zagadnienia

Nanotechnologia obejmuje projektowanie, wytwarzanie oraz użytkowanie materiałów, w których przynajmniej jeden wymiar mierzony jest w nanometrach. Materiały o takiej strukturze można projektować tak, aby wykazywały pożądane właściwości fizyczne, chemiczne oraz biologiczne, w sposób, na który dominujący wpływ mają wielkości tworzących je cząstek. Struktury, których wymiary mieszczą się w zakresie od 1 do 100 nm, czyli w przedziale, którego krańce z jednej strony wyznaczają wymiary typowe dla pojedynczych atomów (10^{-19} m), a z drugiej strony są stosowne dla ciała stałego (10^{-7} m), mogą wykazywać właściwości znacznie odbiegające od właściwości pojedynczych atomów czy typowych kryształów. Należy stwierdzić, iż nanotechnologia jest obiecującym obszarem działań, który umożliwi tworzenie materiałów o właściwościach wcześniej niespotykanych (Kelsall et al., 2008).

Powyżej opisane materiały, których przynajmniej jeden wymiar jest mniejszy niż 100 nm nazywane są *nanomateriałami*. Można je podzielić na 12 grup (Kołaciński, 2009):

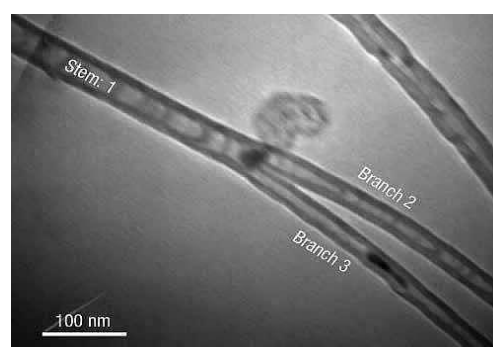
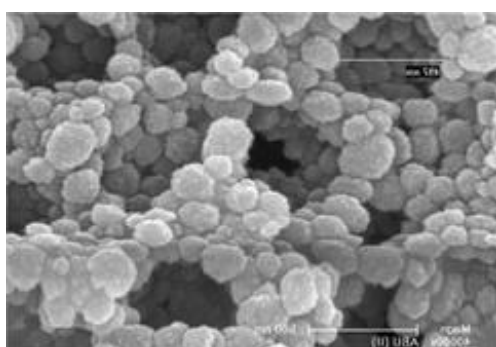
- Nanosrtukturalne materiały,
- Nanocząstki / nanokompozyty,
- Nanokapsuły,
- Nanoporowate materiały,
- **Nanowłókna,**
- Fulereny,
- Nanodruły,
- Nanorurki węglowe,
- Dendryty,
- Molekularne elektromateriały,
- Kropki kwantowe,
- Cienkie warstwy.

O nanomateriałach mówimy wówczas, kiedy rozmiar jakiegoś ciała w przynajmniej jednym wymiarze jest poniżej 100 nanometrów. Zgodnie z tą klasyfikacją nanomateriały można podzielić jeszcze w inny sposób na trzy grupy klasyfikujące nanostruktury (Kelsall et al., 2008 – Rys. 2.1):

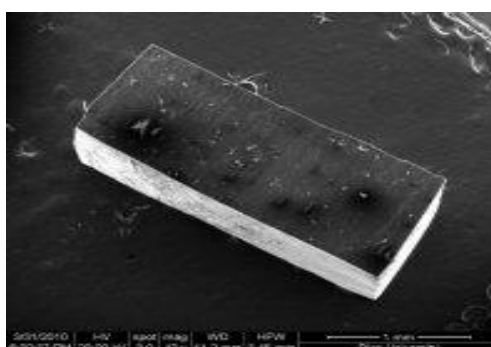
- Nanocząstki i nanopory (struktury organiczne w trzech wymiarach - Rys. 2.1a);
- Nanorurki i nanowłókna (struktury organiczne w dwóch wymiarach - Rys. 2.1b);
- Nanowarstwy (struktury organiczne w jednym wymiarze - Rys. 2.1c).

(a)

(b)



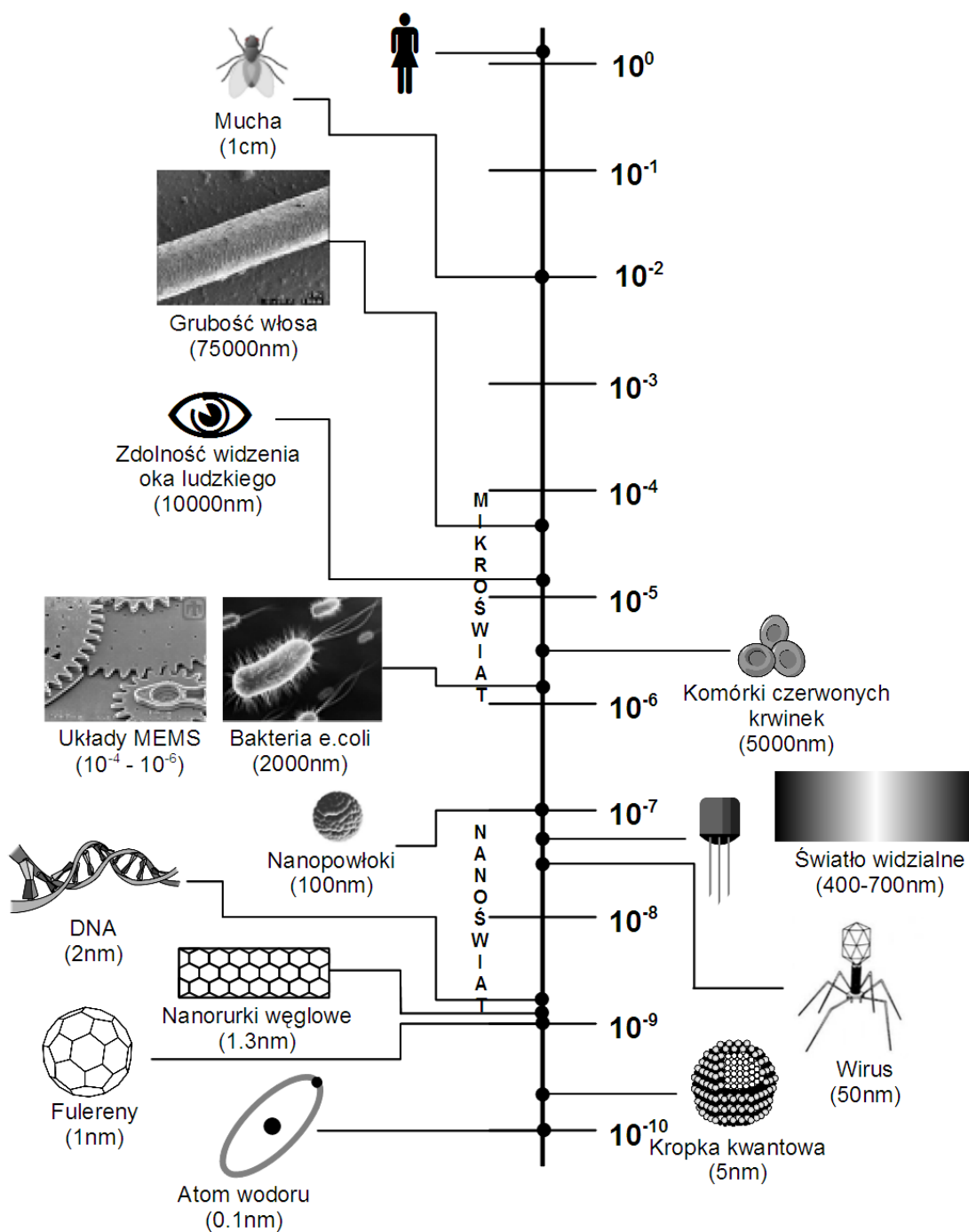
(c)



Rys. 2.1. Klasyfikacja nanostruktur: a) nanocząstki, b) nanowłókna, c) nanowarstwy (Kelsall et al., 2008)

W podrozdziale 2.5 zostaną bliżej scharakteryzowane nanowłókna, które stanowią główny obszar badań realizowany w ramach przygotowanej rozprawy doktorskiej. Jak można wywnioskować z powyższej klasyfikacji, nanowłókna należą do grupy nanostruktur, w których rozmiar został zmniejszony do skali nano w dwóch wymiarach.

Na poniższym rysunku (Rys. 2.2) zostały zilustrowane różnice w skali, począwszy od wielkości nas samych (człowieka), aż do rozmiaru jednego atomu wodoru:



Rys. 2.2. Przekrój przez ciała o różnych rozmiarach (10^{-10} – 10^0) m
(Booker, Boysen, 2005)

2.2. Wytwarzanie nanostruktur i ich właściwości

W związku ze zwiększającym się zainteresowaniem nanotechnologiami, jakie można zaobserwować w ostatnim dziesięcioleciu, wielu badaczy prowadzi prace naukowe związane z wyżej wspomnianą dziedziną. Konkuruje się o jak najlepsze, i jak najbardziej perfekcyjne metody wytwarzania nanostruktur. Naukowcy proponują coraz więcej sposobów tworzenia nanomateriałów, które w najprostszy sposób można podzielić następująco (Kelsall et al., 2008):

- Metody *bottom-up*, czyli takie, w których atom po atomie budowany jest od podstaw;
- Metody *top-down*, w których wymiary są redukowane poprzez rozdrobnienie cząstek.

Procesy *top-down* są najodpowiedniejsze do produkcji nanostruktur o uporządkowanej architekturze o dużym zasięgu i przy wytwarzaniu połączeń makroskopowych. Z drugiej strony, techniki *bottom-up* są lepsze dla układów o uporządkowaniu w krótkim zasięgu, na skalę nanometryczną, w których budulcem mogą być atomy, cząsteczki lub same nanocząstki, w zależności od zaprojektowanych właściwości wytwarzanego produktu. Inspiracją do tego typu procesów były układy biologiczne i obserwowane skomplikowane struktury tworzone przez naturę. Naukowcy dążą do tego, aby możliwe było wytwarzanie małych specyficznych klastrów atomów, które mogłyby ulegać samoorganizacji i tworzyć bardziej wyszukane struktury o pożądanym właściwościach.

Metody oparte na procesach top-down:

- Jednym z najważniejszych procesów tego typu jest wysokoenergetyczne *mielenie* proszków o grubych ziarnach. Jest to metoda stosowana na szeroką skalę do produkcji nanomateriałów metalicznych, ostatnio również ceramicznych oraz polimerów. Słabą stroną tej metody jest metastabilność termodynamiczna cząstek (Morris, Morris, 1991), (Dabhade et al., 2007), (Rawers, 1999);
- Inne metody wytwarzania materiałów nanostrukturalnych, wykorzystujące duże odkształcenie plastyczne to: *skrawanie, walcowanie na zimno, przeciąganie, cykliczna deformacja, walcowanie, przeciskanie przez kanał kątowy, skręcanie pod wysokim*

ciśnieniem, cykliczne wyciskanie ściskające oraz wyciskanie hydrostatyczne (Kelsall et al., 2008);

- Bardzo popularne są metody wykorzystujące procesy *litograficzne*, które umożliwiają otrzymywanie nanostrukturalnej formy w podłożu (Menard et al., 2007), (Ducker et al., 2008), (Prucker et al., 1996);
- W metodach *fotolitograficznych* stosuje się światło UV, promienie X, elektrony lub jony. Proces wytwarzania nanostrukturalnego wzoru na podłożu może zachodzić na drodze *trawienia chemicznego, trawienia plazmowego* (reaktywne trawienia jonowe lub chemicznie, wspomagane trawienie jonowe), *domieszkowania* z użyciem implantacji jonów czy osadzania cienkich filmów. Innym sposobem odwzorowania wzoru na podłożu jest wykorzystanie tzw. *miękkiej litografii*, w której nanostrukturę tworzy się za pomocą odciskania stempla (tzw. nanowdrukowywanie) (Chou et al., 1996);
- Nanostruktury przestrzenne można otrzymać dzięki zastosowaniu procesów używanych do obróbki tradycyjnych materiałów. Obecnie możliwe jest uzyskanie zdolności rozdzielczej w skali submikronowej, dzięki zastosowaniu technik wykorzystujących wiązkę zogniskowanych jonów (ang. focused ion beam, FIB) oraz laserów o dużej mocy (Kelsall et al., 2008).

Metody oparte na procesach bottom-up:

Wytwarzanie nanostruktur poprzez samoorganizację polega na wykorzystaniu sił natury fizycznej lub chemicznej, działających w nanoskali w celu układania podstawowych elementów w większe struktury. Metody tego typu można podzielić na dwie główne grupy (Kelsall et al., 2008):

- *Metody kontrolowanego osadzania.* Polegają one na przeprowadzeniu materiału stałego do fazy gazowej, a następnie jego osadzania na podłożu poprzez chłodzenie, rozprężanie lub kondensację. Proces wytworzenia fazy gazowej może być prowadzony na drodze fizycznej, mamy wówczas do czynienia z osadzaniem fizycznym (ang. Physical vapour deposition, PVD) (Kruis et al., 1998) lub chemicznej, gdy zachodzi osadzanie substancji wytwarzanej w wyniku reakcji chemicznej w wysokich temperaturach (ang. Chemical vapour deposition, CVD) (Hata, Nakayama,

2008). Do metod PVD należą m. in. termiczne odparowywanie, ablacja laserowa, osadzanie za pomocą impulsów laserowych, obróbka elektroiskrowa i rozpylanie. Możliwe jest również wspomaganie osadzania fizycznego lub chemicznego plazmą, polegające na wprowadzeniu do środowiska zjonizowanego gazu. Umożliwia to otrzymywanie znacznie czystszych materiałów. Wśród technik stosowanych w metodach wspomaganych plazmą należą na przykład stałoprądowe wyładowanie jarzeniowe, rozpylanie magnetronowe i próżniowe osadzanie z łuku elektrycznego. Jedną z odmian metody PVD jest technika termicznego natryskiwania fazy ciekłej, w której strugę rozpylonej fazy ciekłej można otrzymać ze źródła elektryczno-termicznego (natryskiwanie plazmowe) lub w wyniku spalania chemicznego (np. natryskiwanie z płomienia);

- *Metody oparte na uporządkowanym wzroście kryształów.* Technika epitaksji z wiązki molekularnej (ang. Molecular beam epitaxy, MBE) prowadzona jest w warunkach ultra wysokiej próżni i umożliwia wytwarzanie uporządkowanych warstw atomowych o grubości al. 0.3 nm, osadzanych z wiązek molekularnych lub atomowych. Modyfikacją tej metody jest epitaksja z wiązki chemicznej oraz metaloorganiczna epitaksja z wiązki molekularnej. Możliwe jest też prowadzenie epitaksji z fazy gazowej, z użyciem związków metaloorganicznych (ang. Metalorganic vapour phase epitaxy, MOVPE) (Stringfellow, 1999).

Ponadto wyróżnia się:

- *Metody koloidalne,* które sprowadzają się do wytrącania z roztworu nanometrycznych cząstek; są one stosunkowo proste i niedrogie. Konieczna jest jednak dokładna optymalizacja parametrów reakcji i warunków, w jakich są prowadzone z uwagi na zachodzące procesy agregacji i starzenia świeżo wytrączanych cząstek (Jiang et al., 1998);
- Kolejną szeroko stosowaną techniką jest *metoda zol-żel*, która polega na przejściu homogenicznego układu koloidalnego (zolu) w trójwymiarowy polimer (żel). Warunki syntezy pozwalają na domieszkowanie wytwarzanych w ten sposób materiałów substancjami chemicznymi i biologicznymi lub modyfikację powierzchni grupami funkcyjnymi (Ikesue, 2002);

- Materiały nanostrukturalne można też otrzymywać przez *osadzanie elektrolityczne* na przewodzącym podłożu, zachodzące w wyniku reakcji chemicznej między elektrolitami pod wpływem przyłożonego napięcia. Można je prowadzić metodą stałoprądową lub impulsową (Kelsall et al., 2008);
- Miko- i nanowłókna magnetyczne są otrzymywane tzw. *metodami suchymi i mokrymi*, wśród których wyróżnia się *metodę elektrospinningu*. Zagadnienia te zostaną opisane bardziej szczegółowo w podrozdziale 2.5.

Właściwości materiałów nanostrukturalnych:

Właściwości materiałów zbudowanych z nanstruktur zależą od rozmiaru oraz struktury, jaką tworzą elementy składowe. Są dwie grupy najważniejszych czynników, z których wynikają odmienne właściwości materiałów nanostrukturalnych w porównaniu z ich klasycznymi odpowiednikami. Do pierwszej grupy należą *efekty kwantowe – mechaniczne*, które nabierają znaczenia przy niewielkich wymiarach i powodują zmianę właściwości fizycznych lub chemicznych. Zmienia się wówczas całkowita energia układu, ponieważ ze zmniejszeniem rozmiaru maleje liczba atomów, co prowadzi do zmian struktury elektronowej w porównaniu z ciałem stałym w ujęciu makroskopowym (Kelsall et al., 2008). W efekcie czego, trwała termodynamicznie nanostruktura staje się inna niż w przypadku pełnowymiarowych struktur. Również reaktywność chemiczna w dużym stopniu zależy od wielkości układu. W przypadku układów nanometrycznych można zaobserwować jej silny wzrost, np. nanocząsteczkowe złoto charakteryzuje się bardzo wysoką reaktywnością, nawet w niskich temperaturach, podczas gdy makroskopowe złoto jest chemicznie obojętne.

Kolejnymi właściwościami silnie zależnymi od wielkości układu są *przewodnictwo cieplne i elektryczne, właściwości optyczne, magnetyczne, wytrzymałość mechaniczna oraz właściwości transportowe*. Do drugiej grupy zalicza się efekty związane ze zmianami strukturalnymi. Materiały nanostrukturalne charakteryzuje bardzo duży stosunek powierzchni do objętości ziaren oraz rozwinięta powierzchnia właściwa. Oznacza to, że większość atomów znajduje się na powierzchni lub granicy międzyfazowej, a niewiele z nich jest w objętości, tak jak to ma miejsce w materiałach klasycznych. Oddziaływanie atomów na takich powierzchniach o wyższej energii wpływa na energię wiązań chemicznych, co zmienia właściwości materiału, np. napięcie powierzchniowe lub międzyfazowe.

Z uwagi na wielkość nanokryształów wykluczone jest tworzenie wakansów, czyli luk atomowych w kryształach. Podobnie jest z dyslokacjami, które są przykładem defektów liniowych w kryształach i w przypadku nanometrycznych rozmiarów kryształów są one defektem termodynamicznie niestabilnym.

Zmniejszenie wymiaru elementów struktury materiału z klasycznego do nanometrycznego, powoduje zmianę następujących właściwości, takich jak (Kelsall et al., 2008):

- *Właściwości strukturalne.* Zwiększenie energii powierzchniowej i powierzchni właściwej powoduje zmiany odległości międzyatomowych w nanocząstkach. Efekt ten można tłumaczyć wzrostem ciśnienia wewnętrznego, które rośnie ze zwiększaniem krzywizny cząstki. Innym obserwowanym zjawiskiem jest tworzenie się form stabilnych tylko w skali nanometrycznej. Przykładem może być struktura quasi-kryształiczna w formie wielościanów wielokrotnie zbliżonych (np. ośmiościan ścięty, podwójna piramida pentagonalna). Formy te nie mają uporządkowania dalekiego zasięgu i można im przypisać tylko oś pięciokrotną, która jest zabroniona dla nieskończonych kryształów;
- *Właściwości termiczne.* W przypadku nanometrycznego złota zaobserwowano obniżenie temperatury topnienia, w odniesieniu do mikrokryształu. Istnieją też badania dowodzące wzrost temperatury topnienia metalicznych nanocząstek w osnowie, czyli efekt odwrotny;
- *Właściwości chemiczne.* Reaktywność substancji w dużym stopniu zależy od jej rozdrobnienia. Nanocząstki mogą ulegać pewnym procesom, których nie obserwuje się w układach makroskopowych, np. rozpuszczalność niektórych form leków w wodzie jest możliwa tylko dla nanometrycznego rozdrobnienia cząstek. Działanie katalizatorów jest również ściśle uwarunkowane rozmiarem ziaren. Nanocząstki katalizatora mogą zwiększać szybkość, selektywność i wydajność reakcji chemicznych;
- *Właściwości mechaniczne.* Zmniejszaniu rozmiaru cząstek do nanoskali towarzyszy ograniczanie tworzenia się defektów, co prowadzi do zwiększania odporności na pękanie, wytrzymałość czy sprężystość. Znany przykład są nanorurki węglowe

o niesamowitej wytrzymałości i giętkości lub kompozyty nanowarstwowe o dużej plastyczności i ciągliwości;

Właściwości magnetyczne. Duża liczba atomów na powierzchni cząstek sprawia, że mogą się sprzęgać magnetycznie z sąsiadami w różny sposób, co prowadzi do odmiennych właściwości magnetycznych. Nanocząstki magnetyczne często są zbudowane tylko z jednej domeny, dzięki czemu wykazują tzw. *superparamagnetyzm*. Z kolei w przypadku cienkich, nanometrycznych warstw zaobserwowano zjawisko gigantycznego magnetooporu, co znalazło zastosowanie w technologii zapisu danych. Właściwościom magnetycznym zostanie poświęcone więcej uwagi w podrozdziałach 2.5 oraz 3.2;

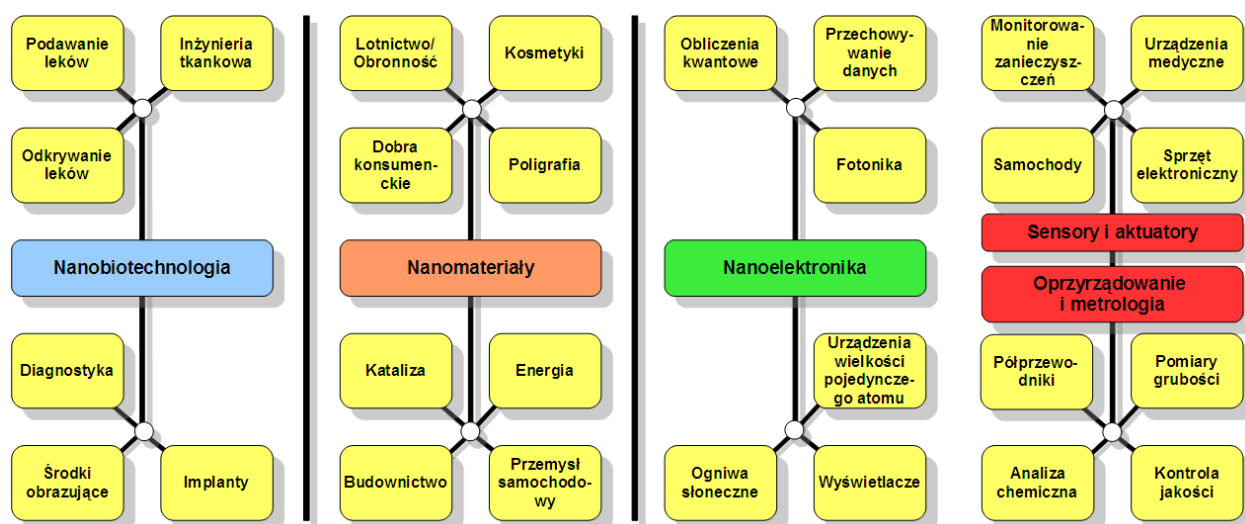
- *Właściwości optyczne.* Są one wynikiem zmiany energii orbitalnych i położenia pasm w wyniku zmniejszania układu. Zmienia się wówczas energia emisji, absorpcji i emisji światła, czego wynikiem jest np. zmiana koloru roztworu koloidalnego złota ze wzrostem wielkości nanocząstek z czerwonego na żółty. Inne zjawiska optyczne, zależne od rozmiaru cząstek to fotokataliza, fotoemisja, fotoprzewodnictwo oraz elektroluminescencja (Kelsall et al., 2008).

2.3. Możliwości zastosowania nanosystemów

W sektorze badań i rozwoju, tzw. R&D (Research and Development) obserwuje się wyraźny wzrost zainteresowania dziedzinami nanotechnologii. Przewiduje się, że możliwości konstruowania nano-objektów i nano-urządzeń będzie prowadzić do rozwoju w pełni funkcjonalnych nano-maszyn mających wpływ na każdy wytwarzany produkt; w tym: wytwarzanie i przetwarzanie energii, w medycynie (począwszy od diagnostyki do regeneracji kości) (Correia et al., 2007), etc.

Ewaluacja oczekiwanego wpływu fali technologii zawsze niesie za sobą ryzyko. Do tej pory pojawia się wiele wątpliwości, czy nanotechnologie wpłyną na przyspieszenie ważnych zmian. Pierwszym mierzalnym efektem wpływu nanotechnologii są media. Na przestrzeni ostatnich kilku lat wszystko z przedrostkiem „nano” stało się przedmiotem wielu artykułów i raportów w czasopismach naukowych i nie tylko.

Nanotechnologia w aspekcie społecznym odnosi się do zdolności generowania aplikacji i urządzeń, mających bezpośrednie zastosowanie w naszym życiu codziennym. Nanotechnologia diametralnie zrestrukturyzuje technologie dotychczas wykorzystywane przy produkcji, w medycynie, w obszarze bezpieczeństwa, obrony, wytwarzaniu i przetwarzaniu energii, ochronie środowiska, transporcie, komunikacji, informatyzacji i edukacji, itp. Multidyscyplinarny charakter nanotechnologii przedstawia poniższy schemat:



Rys. 2.3. Nanotechnologie- Kluczowe obszary zastosowań (Correia et al., 2007)

Jest wiele zastosowań urządzeń i technik w skali nano, które wpływają na różne aspekty rozwoju cywilizacyjnego społeczeństw. Z jednej strony koncentrują się na poprawie ludzkiego zdrowia, a z drugiej związane są z optymalizacją źródeł energii i zmniejszaniem ich złego wpływu na środowisko. Poniżej zostały przedstawione potencjalne zastosowania nanotechnologii i ich wpływ na rozwój społeczeństw (Correia et al., 2007):

- Nanotechnologia wiąże się z efektywnym projektowaniem w procesie produkcji, umożliwiając znaczne oszczędności w materiałach oraz w źródłach energii poprzez redukcję strat i emisji;
- Nanoelektronika odgrywa strategiczną rolę w technologiach informacyjnych i komunikacji, m.in.: telekomunikacji, multimediami, automatyce i systemie medycznym;
- Nanorurki węglowe są najbardziej obiecującym materiałem w skali nano. Posiadają wiele unikatowych cech, które stanowią o ich licznych możliwych zastosowaniach. Nanorurki mogą być wykorzystywane w czujnikach chemicznych, w konwencjonalnych tranzystorach i półprzewodnikach, w procesach elektromigracji, w typowych urządzeniach elektronicznych oraz w płaskich wyświetlaczach. Mogą być użyte przy produkcji pojazdów i floty powietrznej, w celu zmniejszenia poboru paliwa i w konsekwencji emisji spalin;
- Nanotechnologia koncentruje się na wytwarzaniu nowych nanomateriałów, które mogą posiadać wiele użytecznych cech, m.in. mniejszą wagę, lepszą izolację ciepła, większą przewodność elektryczną oraz większą funkcjonalność powierzchni. Bezpośrednim zastosowaniem nanomateriałów może być np. działanie antybakteryjne, ochrona przed polami magnetycznymi oraz absorpcja emisji radioaktywnych;
- Nanotechnologia biomedyczna może przyczynić się do postępów w diagnostyce molekularnej, leczeniu, biologii molekularnej i bioinżynierii. Sieci nanosensorów będą mogły informować o jakości wody, jedzenia oraz powietrza w czasie rzeczywistym, będą mogły kontrolować warunki środowiskowe w naszych domach, biurach i fabrykach. Nanosensory będą miały ogromny wpływ na medycynę poprzez

poprawę technik diagnostycznych, mogących dawać natychmiastowe wyniki, a także w dziedzinie bezpieczeństwa terytorialnego przy groźbach użycia broni biologicznej;

- W dziedzinie medycyny nanourządzenia mogą wpłynąć na polepszenie przepływu krwi w układzie krążenia. Ponadto będą pomagać podawać leki bez niszczenia narządów i organów pośrednich (bez konieczności przyjmowania leków doustnie);
- Postępy w zrozumieniu nowych zjawisk optycznych w nanoskali są szczególnie istotne w rozwoju nowych sensorów (czujników). Początki nanooptyki mają swoje korzenie w rozwoju różnych optycznych odpowiedników skaningowego mikroskopu tunelowego. Żmudne badania doprowadziły w kolejnych latach do wprowadzenia i rozwoju nowych koncepcji oraz obszarów badań, takich jak chociażby spektroskopia pojedynczych cząstek i plazmonika. Obecnie wiedza o zastosowaniach kryształów fotonicznych i nanostrukturalnych materiałów o nietypowych właściwościach optycznych jest rozproszona w różnych dyscyplinach. Połączenie optycznych właściwości nowych materiałów jest szczególnie istotne dla termofotowoltaika (TPV), czy też przy projektowaniu bardziej wydajnych źródeł światła i emiterów podczerwieni. Nowa klasa sensorów znajduje zastosowanie w obszarze szeroko rozumianego bezpieczeństwa, umożliwiając zastosowanie zaawansowanych czujników wykrywających materiały wybuchowe czy zagrożenia biologiczne.

Mimo wielu korzyści płynących z możliwości, jakie daje nanotechnologia, nie można zapominać o licznych zagrożeniach wynikających z działania w skali nano. Do głównych problemów, które niesie za sobą nanotechnologia należą (Kołaciński, 2009), (Kelsall et al., 2008):

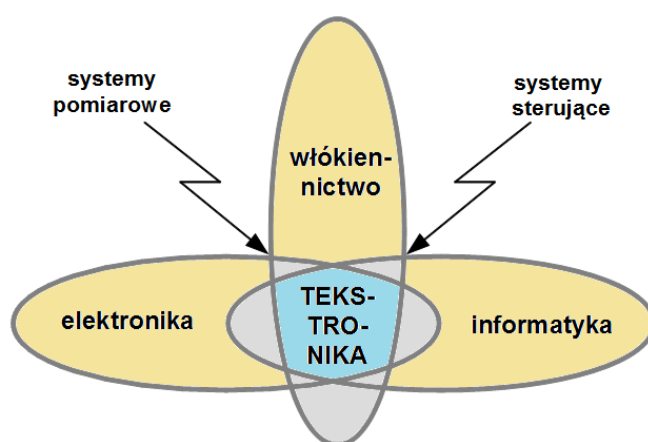
- Toksyczność nanomateriałów (nanocząstek). Wytwarzanie takich struktur wymaga specjalnego środowiska laboratoryjnego, gdyż do ich produkcji wykorzystywane są reagenty i rozpuszczalniki. Ma to ogromny wpływ na bezpieczeństwo i zdrowie ludzi, ponieważ nanomateriały wykazują bardzo dużą aktywność biologiczną;
- Starzenie się i reaktywność niektórych nanocząstek. Powoduje to konieczność przechowywania tych materiałów w atmosferze gazu obojętnego, gdyż na powietrzu zapalają się i wybuchają;

- Wykorzystanie nanomateriałów przez organizacje terrorystyczne do budowy broni. Broń zbudowana np. z nanorurek węglowych nie będzie możliwa do wykrycia przez urządzenia do wykrywania metali lub środków chemicznych;
- Instalowanie nanosensorów w celu zbierania informacji np. o średniej ilości osób w danym obszarze, czy istnieniu broni. Informacje te mogliby wykorzystywać terroryści, których zamiarem byłyby ataki na miejsca użyteczności publicznej oraz na jednostki tajnych służb wojskowych.

2.4. Inteligentne tekstylia

W XXI wieku, w dekadzie „szybko starzejących się rozwiązań technicznych” nowe technologie powstają, aby ulepszyć „coś”, co jest współczesne, lub pokazać i użyć „czegoś”, co wcześniej wydawałoby się nieosiągalne. Jedną z intensywnie rozwijających się dziedzin jest technologia wytwarzania tzw. ”inteligentnych wyrobów włókienniczych”. Zainteresowanie materiałami inteligentnymi systematycznie wzrasta od końca lat 80-tych XX wieku. W ostatnich latach stały się one wyodrębnioną grupą materiałów. Cechy tych materiałów dosyć dobrze charakteryzuje definicja stwierdzająca, że mianem *materiału inteligentnego* określa się taki, który posiada cechy sensora, procesora i urządzenia. Istnieje teoretyczny i doświadczalny dowód na to, że materiały inteligentne mogą zmieniać kolor, wytwarzać i przechowywać ciepło, czy na przykład monitorować stan zdrowia (Boczkowska, Leonowicz, 2006).

Jedną z definicji tekstroniki zaproponowali pracownicy Katedry Odzieżownictwa i Tekstroniki Politechniki Łódzkiej. Uważają Oni, że *tekstronika* to nowa interdyscyplinarna dziedzina nauki integrująca wiedzę z zakresu włókiennictwa, elektroniki i teleinformatyki (Gniotek, Frydrych, 2010 - Rys. 2.4). Tekstronika umożliwia umieszczanie w bezpośredniej bliskości człowieka (w odzieży) urządzeń elektronicznych, które mogą poprawiać komfort życia lub bezpieczeństwo w środowisku zagrażającym zdrowiu (Gniotek et al., 2003).



Rys. 2.4. Obszar tekstroniki (Gniotek, Frydrych, 2010)

Kierunki badań prowadzonych między innymi w instytutach z obszaru włókiennictwa uwzględniają transformację europejskiego przemysłu włókienniczego, który zmienia swój charakter i przesuwa ciężar zainteresowania z produkcji tradycyjnych wyrobów włókienniczych powszechnego użytku na (Goss, Szubska, 2009):

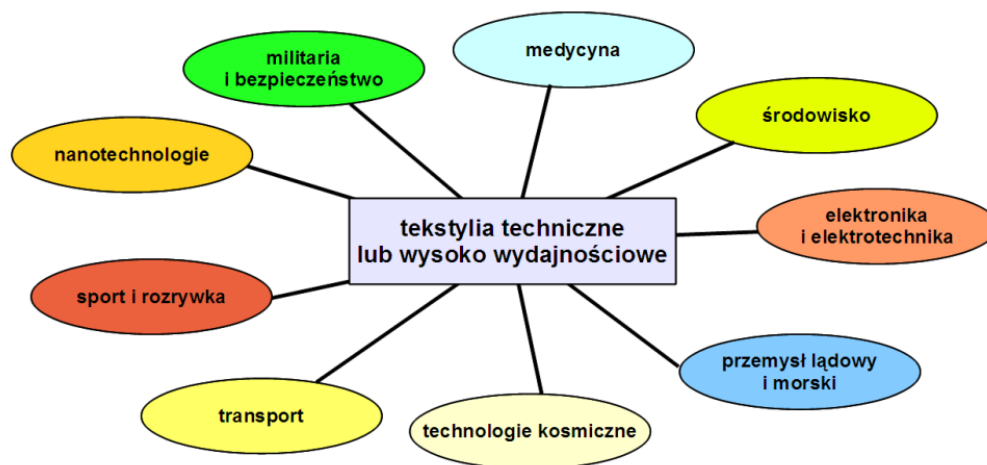
- innowacyjne wyroby typu high-tech o specjalnych właściwościach i nowych zastosowaniach,
- funkcjonalne materiały włókiennicze,
- tekstylia inteligentne,
- biomateriały.

Dlaczego tekstylia wydają się być takim interesującym tematem? Odzież to rzecz osobista, wygodna, leżąca blisko ciała, używana prawie wszędzie i o każdej porze. Dzięki tym cechom na odzieży może zostać zamontowanych wiele czujników, które kontrolują i mierzą różne parametry. Ponadto ze wszystkich stron ludzie są otoczeni tekstyliami. W dzisiejszych czasach, człowiek i ubranie, tworzą swoistą więź. W związku z tym dobrym rozwiązaniem jest to, aby dzięki tym tekstyliom uzyskiwać jak najwięcej informacji o człowieku i jego stanie zdrowia (Norstebo, 2003).

Integracja mikroelektronicznego sprzętu z tkaninami umożliwia produkcję tekstyliów i odzieży, które mogą znaleźć zastosowanie w różnych dziedzinach życia. Można wyróżnić wiele gałęzi, w których są używane tekstylia inteligentne (Magnat, 2009 – Rys. 2.5):

- medycyna / ochrona zdrowia,
- wojsko,
- ratownictwo i odzież ochronna,
- nanotechnologie,
- elektronika, elektrotechnika i telekomunikacja,
- środowisko,
- logistyka,
- sport,
- rozrywka,
- moda,

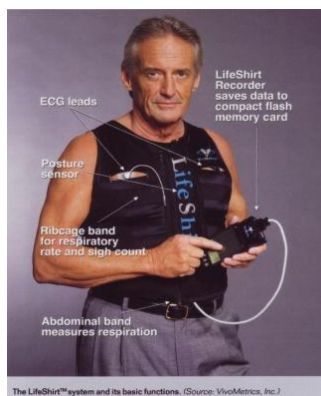
- budownictwo i mieszkalnictwo,
- technologie kosmiczne,
- przemysł lądowy i morski,
- przemysł motoryzacyjny.



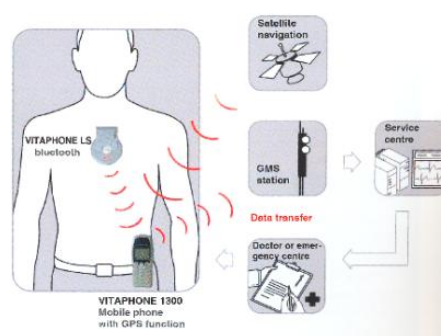
Rys. 2.5. Gałęzie wykorzystania tekstyliów technicznych i wysokowydajnościowych (Magnat, 2009)

Poniżej opisane zostaną zastosowania inteligentnych tekstyliów dla wybranych dziedzin życia, takich jak: medycyna, militaria i ratownictwo, komunikacja, sport i rozrywka, mieszkalnictwo oraz transport.

Przykładem zastosowania elektronicznych tekstyliów w medycynie jest tzw. Lifeshirt (Rys. 2.6), czyli podkoszulek z sensorami i elektrodami implementowanymi do dzianiny, produkowany przez firmę VivoMetrics Inc. z USA (Mecheels et al., 2005). Lifeshirt umożliwia ciągłe monitorowanie pulsu, oddechu i temperatury ciała pacjenta, podczas snu, a także podczas wykonywania codziennych czynności. Innym przykładem jest odzież z wbudowanym systemem GPS (Global Positioning System), pozwalającym na zlokalizowanie pacjenta, co ma szczególne znaczenie w przypadku osób cierpiących na zaburzenia pamięci (Bendkowska, 2002 - Rys. 2.7) oraz osób z niesprawnością ruchową.



Rys. 2.6. Koszulka „Lifeshirt”
(Mecheels et al., 2005)



Rys. 2.7. System pozycjonowania
i lokalizacji (Bendkowska, 2002)

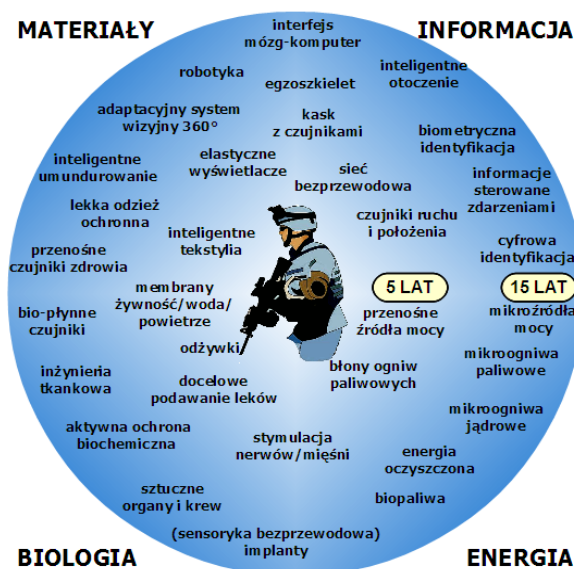
Monitorowanie stanu zdrowia osób w podeszłym wieku pozwoli również na znacznie większy stopień niezależności tych osób i na pozostawanie ich we własnym domu, zamiast pobytu w szpitalu, czy w domu opieki. Innymi przykładami zastosowania tekstroniki w medycynie są np. materace przeciwoleżynowe, pościel z mikroukładami pomiarowymi telemetrycznymi, ponadto aktywne implanty włókniste, czy sztuczne mięśnie (Gniotek, Frydrych, 2010).

Istnieje również duża potrzeba posiadania informacji o czynnościach życiowych ludzi pracujących w warunkach niebezpiecznych, np. żołnierzy czy strażaków, w czasie, kiedy znajdują się w niebezpieczeństwie (Coyle et al., 2007).

Nanotechnologia dla żołnierzy dzieli się na kilka następujących dziedzin (Wiśniewski, 2007):

- *sensory* - multispektralne i akustyczne,
- *zdolność walki* - mechaniczna i przy użyciu akcji człowieka,
- *podstęp* - zredukowana sygnatura,
- *ochrona środowiska*,
- *medycyna* - zautomatyzowany system medyczny.

Wszystkie odniesienia do nanotechnologii militarnej koncentrują się wokół czterech następujących aspektów: materiały, informacje, biologia i energia. Wszystkie te aspekty przedstawiono na poniższym rysunku (Simonis, Schilthuisen, 2006 - Rys. 2.8).



Rys. 2.8. Łączność, mobilność i inteligentne otoczenie człowieka (Simonis, Schilthuisen, 2006)

W wojsku szczególnie istotne są systemy monitorujące zdrowie żołnierza. Stosowane są specjalne mundury, które na przykład zmieniają swoje kolory w zależności od otoczenia tzw. mundury kameleonowe oraz aktywne kamizelki kuloodporne umożliwiające sterowanie mikro- i nanomięśniami, a także ubrania wielowarstwowe, które będą sygnalizować przebicie. Ciekawym rozwiązaniem są tzw. ekrany aktywne powodujące, że żołnierz staje się niewidzialny dla wroga (prace Perdue University, USA) (Gniotek, Frydrych, 2010).

Tekstylia inteligentne dla strażaków zostały opracowane w celu zdalnego monitorowania parametrów fizjologicznych człowieka. Unikatowy strój strażacki został wyposażony w czujniki pozwalające na pomiar takich parametrów, jak:

- temperatura skóry,
- parametry akcji serca,
- temperatura warstw odzieży,
- wykrywanie stanu bezdechu.

Monitorowanie stanu fizjologicznego może odbywać się w sposób ciągły u kilku strażaków jednocześnie. Rejestrowane parametry fizjologiczne są przekazywane drogą bezprzewodową do jednostki sterującej akcją strażacką. W przypadku wystąpienia sygnału o zagrożeniu zdrowia lub życia człowieka może nastąpić bezzwłoczna ewakuacja strażaka z miejsca akcji. Łączność pomiędzy strażakiem a jednostką jest możliwa dzięki antenie tekstylnej, umieszczonej w odzieży strażaka. Poniższy rysunek przedstawia inteligentne ubranie strażackie, z wmontowaną anteną tekstylną (Kacprzak et al., 2009 – Rys. 2.9).



Rys. 2.9. Unikatowy strój strażacki z systemem zdalnego monitorowania parametrów fizjologicznych człowieka (Kacprzak et al., 2009)

Pożar, płomienie, dym stwarzają ryzyko dla życia pracującej w miejscu ognia ekipy. Inteligentne układy czujników w odzieży potrafią dostarczyć cennych informacji dla wczesnego ustalenia niebezpiecznych sytuacji i pomóc w podjęciu właściwych decyzji (Gniotek, Frydrych, 2010).

Nie tylko pożar i płomienie niosą za sobą niebezpieczeństwo. Także osoby pracujące w pobliżu materiałów chemicznych o wysokich stężeniach substancji niebezpiecznych narażone są na groźne działanie tych materiałów. Do wykonywania prac w chemicznie

ochronnym ubraniu potrzebna jest wiedza o możliwym skażeniu środowiska. Elementy QTC zintegrowane z odzieżą mogą wykrywać na przykład poziom promieniowania w warunkach przemysłowych. Jeżeli czujnik pomiarowy jest zintegrowany z ubraniem ochronnym i związany z systemem monitoringu, to noszący ubranie będzie mógł lepiej się skoncentrować i ograniczyć techniczne problemy bardziej skutecznie na miejscu skażenia (Rys. 2.10). To samo dotyczy kombinezonów ratownictwa górskiego, czy morskiego (Gniotek, Frydrych, 2010).



Rys. 2.10. Odzież chroniąca przed chemikaliami
(Mecheels et. al., 2005)

Obszar zastosowania tekstroniki rozszerza się, pojawiają się trendy w kierunku przenośności i miękkości konwencjonalnych plastikowych urządzeń. Stwarza to możliwości dla tekstyliów z wbudowanymi interfejsami, które mogą także występować i funkcjonować, jako odzież codziennego użytku. Poprzez wbudowanie przełączników w odzież, elektroniczne produkty mogą być sterowane przez ruchy ciała lub gesty. W tym celu zostały stworzone tkaniny SOFTswitch, które zmieniają swoją rezystancję powierzchniową pod wpływem naprężeń ściskających. Są one stosowane, jako tzw. miękkie przełączniki wytwarzane za pomocą technologii włókienniczych. SOFTswitch oferuje niezwykle możliwości „zmiękczenia” istniejących plastikowych komponentów i osłon oraz stworzenie interfejsów „bardziej przenośnych”, na przykład zwijana klawiatura QWERTY dla komputerów PDA oraz telefonów komórkowych lub miękka, dotykowa myszka komputerowa. Istniejące już praktyczne rozwiązania przedstawiono na poniższych rysunkach (Rys. 2.11 i 2.12).



Rys. 2.11. Klawiatura QWERTY z tkaniny
SOFTswitch
(Gniotek, Frydrych, 2010)



Rys. 2.12. Przełączniki z tkaniny SOFTswitch
umieszczone na rękawie kurtki
(Gniotek, Frydrych, 2010)

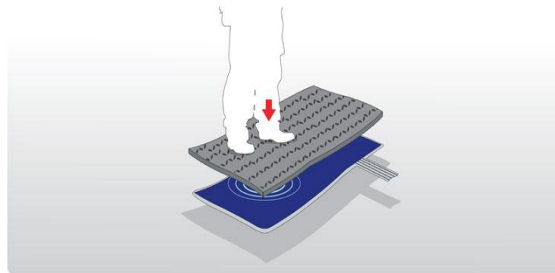
Technologia SOFTswitch pozwala na niewidoczne inkorporowanie przełączników i czujników naprężeń w tekstyliach domowych czy biurowych w celu np. sterowania oświetleniem, sprzętem alarmowym, temperaturą lub innymi urządzeniami elektronicznymi. Włączniki światła lub ściemniacze mogą być wbudowane w tapicerkę siedzeń mebli lub w dywany. Audio – wizualne zdalne sterowanie telewizorem, roletami lub oświetleniem może być umieszczone w poduszkach lub działać poprzez dotknięcie zasłony lub tapety. Innym ciekawym zastosowaniem inteligentnych tkanin może umieszczenie czujnika nacisku, w celu informowania o osobach, które znajdują się pod drzwiami mieszkania. Szereg innych rozwiązań inteligentnych tekstyliów stosowanych w budownictwie i mieszkalnictwie przedstawiono na poniższych rysunkach (Rys. 2.13, 2.14 i 2.15).



Rys. 2.13. Przełączniki z tkaniny SOFTswitch
- pilot TV na poduszcze
(Gniotek, Frydrych, 2010)



Rys. 2.14. Przełączniki z tkaniny SOFTswitch
w wyposażeniu wnętrza
(Gniotek, Frydrych, 2010)



Rys. 2.15. Sensory ciśnienia montowane w dywanach
(Gniotek, Frydrych, 2010)

Przemysł sportowy dokłada wszelkich starań, aby sukcesywnie zwiększać komfort osobisty oraz przygotowanie kondycyjne zawodników i osób uprawiających sport czysto rekreacyjnie. Na poniższym rysunku przedstawiono część garderoby sportowca zaopatrzonej w czujniki monitorujące ruch. Na rysunku 2.16a przedstawiono bluzę umożliwiającą obserwację ruchów ramienia, przedramienia i barku, natomiast na rysunku 2.16b opaskę na kolano, służącą do monitorowania ruchów stawu kolanowego.



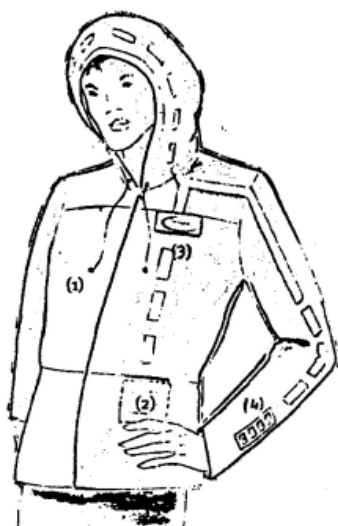
Rys. 2.16. a) Bluza monitorująca ruch przedramienia,
b) Opaska monitorująca ruch kolana (Coyle et al., 2007)

Nowoczesne, inteligentne ubrania sportowe mają m.in. ułatwiać trening. Obudowany licznymi czujnikami dres będzie mierzył ciśnienie krwi i tętno, odtwarzał podkład muzyczny (motywujący do zwiększenia wysiłku albo skłaniający do zwolnienia tempa), a wyniki wszystkich badań będą na bieżąco wysyłane do centrum komputerowego w klubie sportowym. Holenderscy naukowcy stworzyli wibrującą koszulkę dla sportowców (Gniotek, Frydrych, 2010 - Rys. 2.17). Wmontowane w nią czujniki analizują pracę zawodnika – wyczuwają, gdy mięśnie pracują słabiej. Wówczas wysyłają w ich kierunku wibracje, które stymulują je do szybszego tempa pracy.



Rys. 2.17. Koszulka monitorująca puls sportowca (Gniotek, Frydrych, 2010)

Kolejną, ciekawą dziedziną życia, która została wsparta przez inteligentne tekstylia jest sfera muzyki i rozrywki. Wymyślona została już odzież z zaimplementowanym zminiaturyzowanym odtwarzaczem MP3 (Rys. 2.18). System zawiera mikrochipowy audiomoduł, do którego interfejsów mogą być podłączone mikrofony, słuchawki, media pamięci, klawiatury, monitory, sensory i bateria zasilająca oraz wbudowany software.



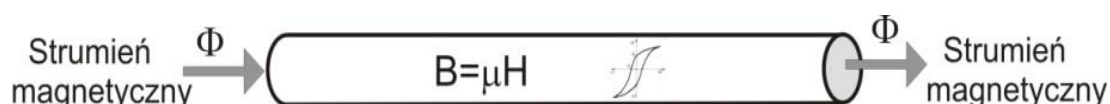
Rys. 2.18. Schemat kurtki z wbudowanym odtwarzaczem MP3
(Sybilska, Frydrych, 2007)

Rozwój w dziedzinie inteligentnych nanotekstyliów wpływa na wiele aspektów życia codziennego. Inteligentne tekstylia muszą być na tyle elastyczne, aby możliwe było ich noszenie przez długi czas, bez poczucia dyskomfortu. Dzięki temu mają one szerokie spektrum zastosowań i odbiorców (Coyle et al., 2007).

2.5. Mikro- i nanowłókna magnetyczne

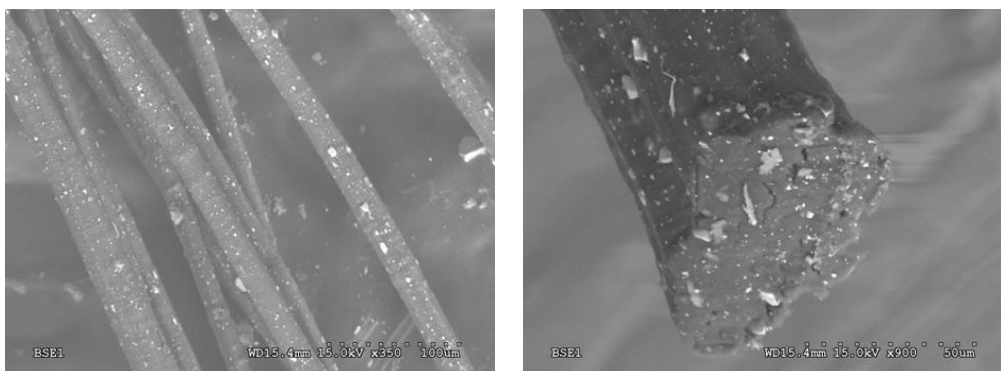
W niniejszym rozdziale zostanie omówiona tematyka mikro- i nanowłókien magnetycznych, w tym: technologia wytwarzania, zastosowania i własności włókien opracowanych i wyprodukowanych w Katedrze Włókien Sztucznych Politechniki Łódzkiej. Dla tej grupy włókien zbudowano modele komputerowe pojedynczych włókien oraz wiązek w ramach przygotowanej rozprawy doktorskiej.

Włókna magnetyczne charakteryzujące się właściwościami magnetycznymi (Rys. 2.19) stanowią ważne uzupełnienie zbioru włókien wielofunkcyjnych. Otrzymuje się je przez dodanie granulatu ferromagnetycznego lub magnetycznego do bazowego polimeru w czasie ich wytwarzania. Magnetyk we włóknie powoduje, że staje się ono materiałem makroskopowo monolitycznym.



Rys. 2.19. Włókno magnetyczne (Rubacha, Zięba, 2006)

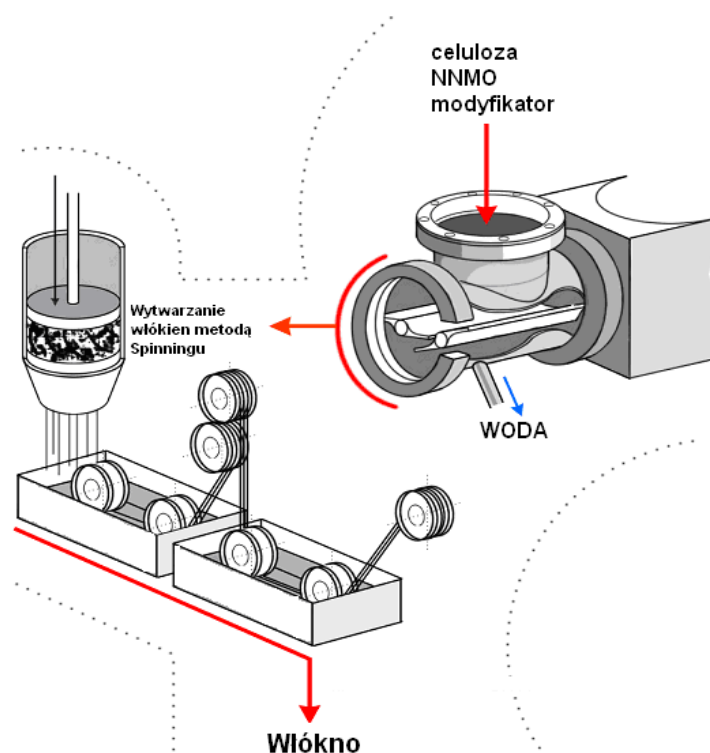
Taki materiał nazywany jest kompozytem, gdyż polimer z wypełniaczem proszkowym tworzy fazę nieciągłą. Dla uzyskania wymaganej wartości zastępczej przenikalności magnetycznej ważne jest, aby współczynnik wypełnienia objętościowego granulatu we włóknie był możliwie duży. Włókna magnetyczne są niejednorodnymi kompozytowymi magnetykami; należą one do grupy tzw. kompozytów elektrycznych. Widok rzeczywisty kompozytu, jakim są włókna magnetyczne przedstawiono na rysunku 2.20.



Rys. 2.20. Mikrowłókna wypełnione granulatem magnetycznych
(Katedra Włókien Sztucznych PŁ)

2.5.1. Technologia wytwarzania

W Politechnice Łódzkiej opracowano metodę wytwarzania kompozytowych włókien celulozowych o właściwościach magnetycznych. W procesie wytwarzania stosowana jest metoda wykorzystująca jako rozpuszczalnik celulozy N-tlenek-N-metylomorfoliny. Przy użyciu tego rozpuszczalnika można uzyskać roztwory zawierające około 25% celulozy. W porównaniu do tradycyjnej metody wiskozowej jest to wynik bardzo dobry, gdyż metoda wiskozowa używa rozpuszczalnika o zawartości 10% celulozy. Zaletą metod opartych na rozpuszczalnikach organicznych jest również możliwość całkowitej automatyzacji procesu i brak gazowych oraz ciekłych produktów przedostających się do atmosfery (Łaszkiewicz, 2000). Poniższy rysunek obrazuje nowoczesną, w pełni zautomatyzowaną, instalację do produkcji celulozy opisaną metodą, która powstała w Katedrze Włókien Sztucznych (Rubacha, Zieba, 2007).

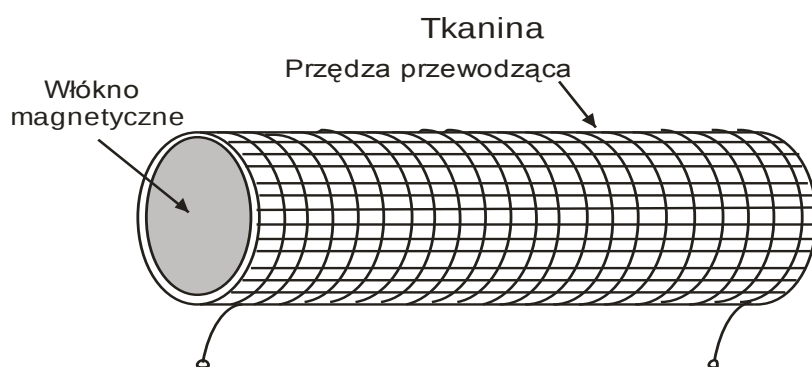


Rys. 2.21. Proces wytwarzania modyfikowanych włókien celulozowych (Rubacha, Zięba, 2007)

Opracowana technologia produkcji oraz przyjęte rozwiązania konstrukcyjne pozwalają na modyfikowanie właściwości wytwarzanych włókien proszkami innych materiałów. Osiągane rezultaty świadczą, że w zależności od rodzaju modyfikatora możliwe jest otrzymywanie włókien celulozowych o różnych właściwościach fizycznych, np.: przewodzących prąd, magnetycznie miękkich i twardych oraz mogących znaleźć zastosowanie w różnych klasach sensorach. Przeprowadzone badania wstępne wykazały, iż istnieją ogromne możliwości kształtowania właściwości omawianego materiału. Optimalizacja tych właściwości oraz dobór postaci materiału (np. włókna, tkaniny, maty) musi być poprzedzona określeniem możliwych obszarów zastosowań. Obecnie rozważane są możliwości zastosowania tych materiałów, jako ekrany i odzież chroniąca przed polem magnetycznym, separatory, filtry, itp. (Kaszuwara et al., 2004).

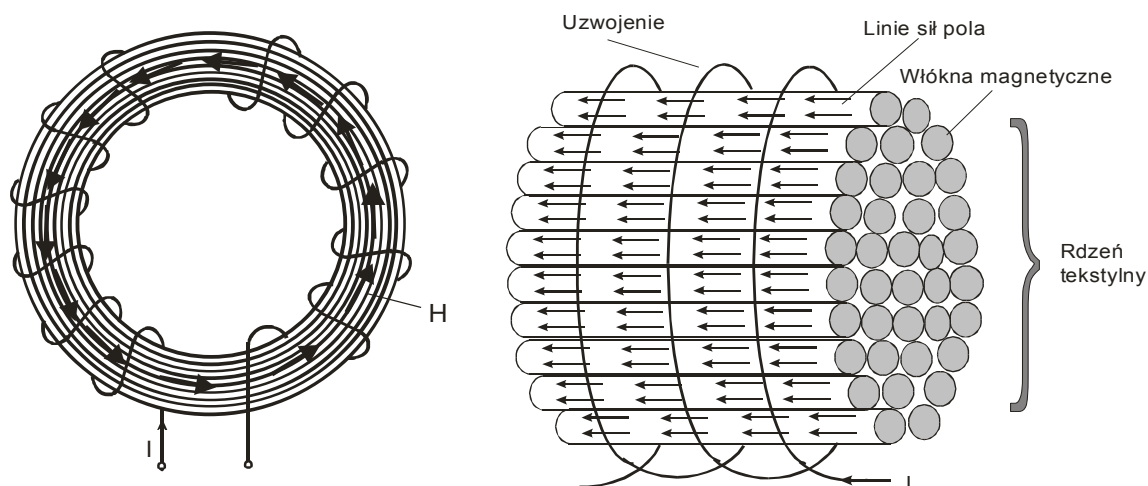
2.5.2. Zastosowania mikro- i nanowłókien magnetycznych

Włókna magnetyczne otwierają możliwości dla konstrukcji tekstylnych elementów elektrycznych i elektronicznych oraz układów w inteligentnej odzieży, jako sensory i akuatory. Włókna o własnościach magnetycznych (włókna magnetyczne) służą do budowy tekstylnych cewek magnetycznych (Rubacha, Zięba, 2007). Cewka magnetyczna jest jednym z podstawowych elementów obwodów elektrycznych i elektronicznych. Zbudowana jest z tkaniny, która pełni funkcję karkasu (Rys. 2.22), na którym nawinięte jest uzwojenie z drutu miedzianego lub z przędzy elektroprowadzącej. Jedną z zalet cewek tekstylnych jest możliwość praktycznie dowolnego kształtowania karkasu uzyskując liniową, prostokątną lub toroidalną cewkę (Rys. 2.23).



Rys. 2.22. Wygląd tekstylnej cewki magnetycznej z tekstylnym rdzeniem (Rubacha, Zięba, 2006)

Jeżeli uzwojenie jest wykonane z przędzy elektroprowadzącej, to przędza ta powinna charakteryzować się dużą konduktywnością, tak aby uzwojenie cewki posiadało możliwe małą rezystancję wewnętrzną.



Rys. 2.23. Tekstylna cewka toroidalna i jej fragment (Rubacha, Zięba, 2006)

Wewnątrz cewki umieszczono magnetyczny rdzeń tekstylny składający się z dużej liczby włókien magnetycznych. Rdzeń magnetyczny może być wykonany również z włókniny magnetycznej. Przykładem tego może być włóknina magnetyczna wykonana z włókien magnetycznych metodą igłowania (Rys. 2.24). Z włókien magnetycznych można wytworzyć przędzę, która posłuży do wykonania tekstronicznej tkaniny lub dzianiny. Włóknina ta może być wykorzystana między innymi w konstrukcji ekranów magnetycznych.



Rys. 2.24. Włóknina magnetyczna (Gniotek, Frydrych, 2010)

2.5.3. Właściwości magnetyczne i mechaniczne nanowłókien

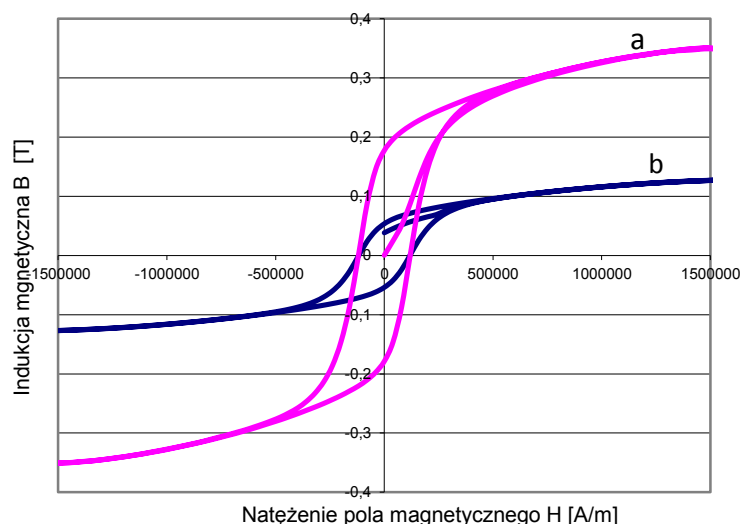
Właściwości magnetyczne kompozytowych włókien celulozowych zależą przede wszystkim od właściwości i procentowego udziału domieszki. Remanencja i energia magnetyczna włókien kompozytowych zawierających proszki materiałów magnetycznych powinny zwiększać się w miarę wzrostu udziału modyfikatora. Udział proszku modyfikatora pogarsza jednak właściwości technologiczne masy przędzalniczej i wpływa na właściwości mechaniczne otrzymanych włókien. Dodatki wprowadzone w postaci proszków zwiększają lepkość masy i utrudniają jej przeróbkę. Istnieją ograniczenia wielkości cząstek wprowadzanego proszku. Ze względu na średnice otworów dysz przędzalniczych oraz średnice mikrowłókien ziarna proszku (aglomeraty cząstek) powinny być mniejsze niż około 12 μm . Jednocześnie, w przypadku materiałów magnetycznie twardych, jako dodatek do celulozy może być stosowany jedynie proszek wysokokoercyjny, to znaczy taki, którego cząstki stanowią pojedyncze magnesy. Cząstki te muszą więc być polikrystaliczne i posiadać mikrostrukturę umożliwiającą wystąpienie określonego mechanizmu koercji. Z tego powodu najlepszym rozwiązaniem jest stosowanie jako domieszek proszków o ziarnach nanometrycznych (Kaszuwara et al., 2004).

Właściwości magnetyczne włókna są określone zależnością między indukcją magnetyczną B , a natężeniem pola magnetycznego H . Graficznie właściwości magnetyczne są zdeterminowane przez charakterystykę magnesowania. Charakterystycznym parametrem włókien magnetycznych jest zastępcza przenikalność magnetyczna μ (Wiak et al., 2010).

Do modyfikacji właściwości magnetycznych włókien celulozowych wytwarzanych w Politechnice Łódzkiej zastosowano materiał magnetycznie twardy - ferryt baru - o składzie $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (otrzymany z tlenku żelaza Fe_2O_3 i węglanu baru BaCO_3) i materiał magnetycznie miękki – w postaci stopu nano-krystalicznego - uzyskanego w wyniku kontrolowanej krystalizacji szkieł metalicznych o składzie $\text{Fe} - \text{M} - \text{B}$ (gdzie $\text{M} = \text{Nb}, \text{Cu}, \text{Hf}, \text{Zr}, \text{Si}$). Oba zastosowane modyfikatory wprowadza się do roztworów przędzalniczych w postaci proszków, o średnicach ziaren nie większych niż 8 μm (Rys. 2.25).

Przeprowadzone doświadczenia wykazały, że wartość indukcji remanencji włókien z zawartością magnetyka twardego stanowi ułamek wartości remanencji czystego

magnetyka odpowiadający jego procentowemu udziałowi objętościowemu we włóknie. Wartość indukcji remanencji ferrytu baru wyniosła 0,177 T. Poziom natężenia pola koercji włókien jest w przybliżeniu równy wartości koercji zastosowanego proszku magnetycznego i wynosi 11,9 kA/m (Rubacha, Zięba, 2006).



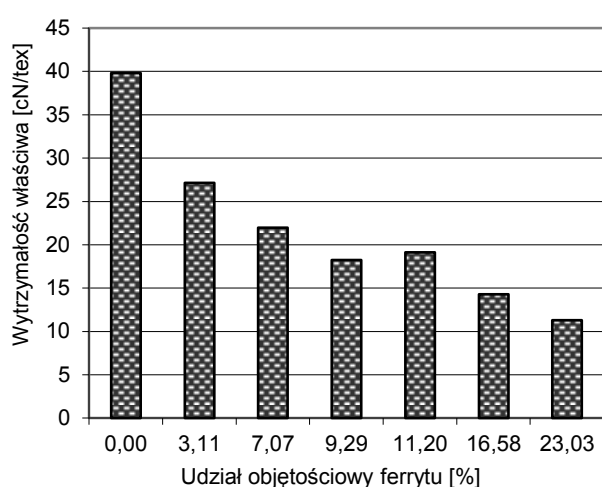
Rys. 2.25. Histerezy magnesowania: a) ferrytu baru (twardego magnetyka), b) włókien zawierających 23% obj. ferrytu baru (Zięba, 2007)

Poprawienie właściwości magnetycznych włókien, czyli między innymi podwyższanie wartości indukcji remanencji i indukcji nasycenia możliwe jest jedynie poprzez wprowadzenie do włókna większych ilości materiału magnetycznie aktywnego.

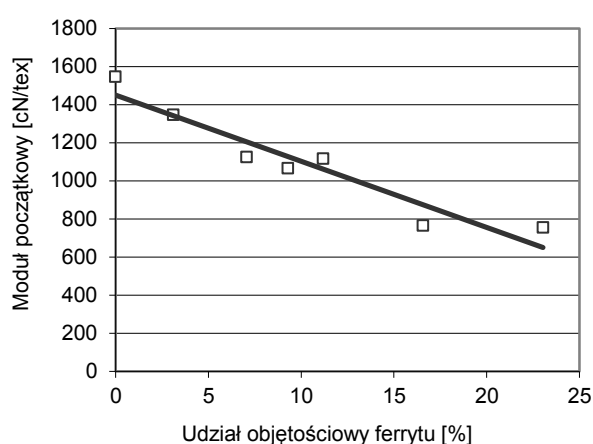
Możliwości te są jednak ograniczone, ponieważ duża ilość modyfikatora w postaci proszku znacznie pogarsza przerobowe właściwości roztworu przędzalniczego. Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu może być zastosowanie proszków magnetycznych o mniejszej średnicy pojedynczych ziaren ($d < 3\mu\text{m}$), a także mniejszym rozrzucie ich wielkości (Wiak et al., 2010). Wtrącenie zbyt dużej ilości ziaren ferromagnetycznych powoduje zmniejszenie elastyczności włókna, co przecież jest jedną z głównych zalet mikro- i nanowłókien magnetycznych.

Istotnym parametrem warunkującym możliwość praktycznego zastosowania włókien jest ich wytrzymałość. Jak można było oczekiwać obecność stosunkowo dużych ziaren

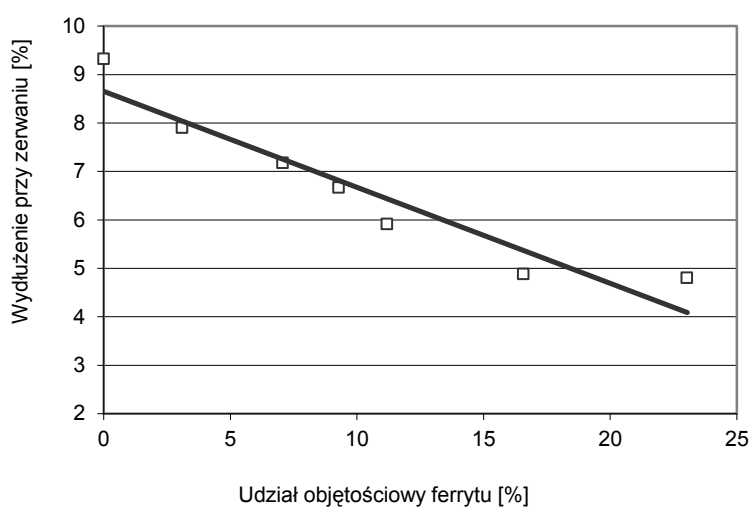
modyfikatora we włóknach nie pozostała bez wpływu na ten parametr. Wraz ze wzrostem udziału magnetyka, niestety znacząco spadał współczynnik wytrzymałości właściwej materiału, jakim są włókna celulozowe (Rys. 2.26). Stwierdzono także, że pozostałe zbadane wskaźniki wytrzymałościowe otrzymanych włókien również istotnie zależą od ilości zawartego w nich modyfikatora magnetycznego. Wraz ze wzrostem udziału magnetyka następowało również zwiększanie się masy liniowej włókien spowodowane dużą różnicą gęstości pomiędzy składnikami włókien, a także zmniejszanie się ich modułu początkowego i wydłużenia przy zerwaniu (Rys. 2.27 i Rys. 2.28).



Rys. 2.26. Zależność wytrzymałości włókien od udziału ferrytu (Rubacha, Zięba, 2006)



Rys. 2.27. Zależność modułu początkowego włókien od udziału ferrytu (Rubacha, Zięba, 2006)



Rys. 2.28. Zależność wydłużenia przy zerwaniu włókien od udziału ferrytu (Rubacha, Zięba, 2006)

Pogarszanie się parametrów wytrzymałościowych włókien z udziałem magnetyków (zwłaszcza wytrzymałości) spowodowane jest między innymi znacznymi różnicami właściwości składników uzyskanego kompozytu. W tym przypadku odkształcanie włókna prowadzi do powstawania nieciągłości jego struktury na granicy pomiędzy matrycą celulozową a cząstkami modyfikatora. Powstające w ten sposób szczeliny znacznie osłabiają strukturę (Rubacha, Zięba, 2006).

Podsumowując należy stwierdzić, iż jedną z głównych zalet tekstyliów magnetycznych jest to, że mogą być one łatwo połączone z ubiorem monitorującym parametry fizjologiczne człowieka poprzez wszycie lub zespolenie podczas procesu technologicznego. Czujniki tekstylne i ekrany mogą być wykonane z włókien, tkaniny, dzianiny lub włókniny. Urządzenia tekstylne magnetyczne znajdują szerokie zastosowanie począwszy od ubiorów cywilnych do uniformów służb ratowniczych, różnego rodzaju oraz w technice wojskowej (mundury) i technikach kosmicznych. Prezentowana w rozprawie doktorskiej tematyka badawcza jest aktualna i bardzo nowoczesna, z ogromnymi perspektywami, co do zastosowań.

3. Podstawowe zależności opisujące pole magnetyczne

3.1. Równania pola elektromagnetycznego

3.1.1. Równania Maxwella

Pole elektromagnetyczne opisane jest *równaniami Maxwella*. Równania te w postaci różniczkowej można zapisać następująco (Kuczyński, 2000):

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.2)$$

gdzie:

$\mathbf{H}$ - wektor natężenia pola magnetycznego,

$\mathbf{B}$ - wektor indukcji magnetycznej,

$\mathbf{J}$ - wektor gęstości prądu,

$\partial \mathbf{D} / \partial t$ - prąd przesunięcia.

Dodatkowo *równania Maxwella* uzupełniają równania rozbieżności określające źródłowość pól (Turowski, 1993), (Krakowski, 1995):

$$\operatorname{div}\mathbf{B} = 0 \quad (3.3)$$

$$\operatorname{div}\mathbf{D} = \rho \quad (3.4)$$

gdzie:

$\mathbf{D}$ - wektor indukcji elektrycznej,

ρ - gęstość objętościowa ładunku,

oraz tzw. *równania konstytutywne* określające zależności pomiędzy wektorami pola (Turowski, 1993):

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.6)$$

i równanie:

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad (3.7)$$

Współczynniki występujące w równaniach (3.5) – (3.7) to:

ε – współczynnik przenikalności elektrycznej $[\frac{F}{m}]$;

μ – współczynnik przenikalności magnetycznej $[\frac{H}{m}]$;

γ – konduktywność $[\frac{S}{m}]$.

Analiza komputerowych modeli nanowłókien magnetycznych prowadzona była przy założeniu istnienia zewnętrznego *pola magnetostatycznego*, czyli pola stałego w czasie wytworzonego przez magnesy trwałe lub stałe prądy (Krakowski, 1995).

W takim przypadku równania opisujące pole magnetyczne ograniczają się do równań (3.1), (3.3) oraz (3.6) (Krakowski, 1995), (Kuczyński, 2000). W *Pierwszym Równaniu Maxwella* przy założeniu, że pole jest stacjonarne lub wolnozmiennie można pominąć składnik będący prądem przesunięcia (Turowski, 1993). Równania różniczkowe opisujące pole magnetyczne można wówczas zapisać następująco:

$$\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3.8)$$

$$\text{div} \mathbf{B} = 0 \quad (3.9)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.10)$$

3.1.2. Zastosowanie potencjałów do opisu pola elektromagnetycznego

Wektorowy potencjał magnetyczny można wprowadzić w celu ułatwienia rozwiązań równań pola magnetycznego, zamiast bezpośredniego rozwiązywania równań Maxwella. *Magnetyczny potencjał wektorowy $\mathbf{A}$* definiowany jest wzorem (Di Barba et al., 2008), (Krakowski, 1995), (Furlani, 2001):

$$\mathbf{B} = \text{rot}\mathbf{A} \quad (3.11)$$

Powyższa definicja wektorowego potencjału magnetycznego $\mathbf{A}$ nie jest jednoznaczna, ponieważ można uzyskać różne wektory, dające tę samą indukcję magnetyczną (np. dla $\mathbf{A}$ oraz $\mathbf{A} + \text{grad}(\varphi)$ otrzymuje się ten sam wektor $\mathbf{B}$) (Krakowski, 1995). Aby uzyskać jednoznaczną definicję należy przyjąć dodatkowy warunek, tzw. *warunek Coulomba* (Krakowski, 1995), (Furlani, 2001):

$$\text{div}\mathbf{A} = 0 \quad (3.12)$$

Podstawiając do wzoru (3.8) wzór definicyjny (3.11) jednocześnie uwzględniając zależność (3.10) łączącą wektory $\mathbf{H}$ oraz $\mathbf{B}$ można uzyskać równanie:

$$\text{rot} \frac{1}{\mu} \text{rot}\mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (3.13)$$

W środowiskach jednorodnych przenikalność magnetyczna jest niezależna od współrzędnych przestrzennych, czyli $\mu(x, y, z) = \text{const.}$ Zatem równanie (3.13) przyjmuje postać:

$$\text{rot} \text{rot}\mathbf{A} = \mu \mathbf{J} \quad (3.14)$$

Korzystając z tożsamości wektorowej (Krakowski, 1995):

$$\text{rot} \text{rot}\mathbf{A} = \text{grad} \text{div}\mathbf{A} - \nabla^2 \mathbf{A} \quad (3.15)$$

oraz z warunku Coulomba opisanego równaniem (3.12), równanie (3.13) można zapisać następująco (Di Barba et al., 2008):

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (3.16)$$

Równanie opisane wzorem (3.16), to tzw. *równanie Poissona* (Sikora, 1985), (Turowski, 1993).

W obszarach, w których pole magnetyczne jest bezwirowe, czyli tam gdzie nie występują prądy ($\mathbf{J}=0$), równanie (3.8) przyjmuje postać:

$$\text{rot} \mathbf{H} = 0 \quad (3.17)$$

W takim przypadku równanie Poissona przekształca się do postaci tzw. *równania Laplace'a* (Feynman et al., 2007), (Sikora, 1985), (Turowski, 1993):

$$\nabla^2 \mathbf{A} = 0 \quad (3.18)$$

Równania Poissona i Laplace'a dla potencjału wektorowego $\mathbf{A}$ wymagają rozwiązania trzech równań różniczkowych cząstkowych dla poszczególnych składowych (A_x , A_y , A_z) tego wektora. Znacznie komplikuje to zagadnienie, a w przypadku obliczeń numerycznych wydłuża czas uzyskania rozwiązania. Uproszczenie może być zastosowane do opisu pola potencjału skalarnego, który może być wprowadzony jedynie dla pól bezwirowych (Bolkowski et al., 1993).

Korzystając z faktu, że w analizowanych mikrowłóknach nie występują prądy (pole jest bezwirowe), wówczas można wprowadzić *magnetyczny potencjał skalarny* V_μ , który można zdefiniować następująco (Di Barba et al., 2008), (Krakowski, 1995):

$$\mathbf{H} = -\text{grad} V_\mu \quad (3.19)$$

Po podstawieniu równania (3.19) do równania (3.9) oraz uwzględnieniu zależności pomiędzy wektorami $\mathbf{B}$ oraz $\mathbf{H}$ równanie dla potencjału V_μ można zapisać jako:

$$-\text{div } \mu \text{ grad} V_\mu = 0 \quad (3.20)$$

Przy założeniu, że $\mu(x, y, z) = \text{const.}$ równanie to przyjmuje postać:

$$\operatorname{divgrad} V_{\mu} = 0 \quad (3.21)$$

czyli:

$$\nabla^2 V_{\mu} = 0 \quad (3.22)$$

Zatem skalarny potencjał magnetyczny V_{μ} spełnia równanie Laplace'a.

3.1.3. Warunki brzegowe

Niezbędnym uzupełnieniem równań opisujących pole magnetyczne równaniami różniczkowymi jest przyjęcie odpowiednich warunków brzegowych. W literaturze dwa najpowszechniej stosowane warunki brzegowe to *warunek Dirichleta* i *warunek Neumana* (Skoczkowski, 2000), (Wiak, Zwoliński, 1997). Dla dowolnej funkcji $u(x)$ określonej wewnątrz obszaru Ω z brzegiem Γ , warunki te w ogólnej postaci, można przedstawić następująco (Skoczkowski, 2000), (Sikora, 2011):

- *warunek Dirichleta*

$$u = f(x), \quad \forall u \in \Gamma \quad (3.23)$$

- *warunek Neumana*

$$\frac{\partial u}{\partial n} = \varphi(x), \quad \forall u \in \Gamma \quad (3.24)$$

gdzie f i φ są danymi funkcjami.

W zagadnieniach magnetostatycznych opisanych skalarnym potencjałem magnetycznym warunki te przeważnie występują w postaci (Bolkowski et al., 1993), (Wiak, Zwoliński, 1997):

$$V_{\mu} = 0 \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial V_{\mu}}{\partial n} = 0 \quad (3.26)$$

a w przypadku wektorowego potencjału magnetycznego dla zagadnień trójwymiarowych (Opera 3-d, 2009), (Golovanov et al., 1998):

$$\operatorname{rot} \mathbf{A} \times \mathbf{n} = 0 \quad (3.27)$$

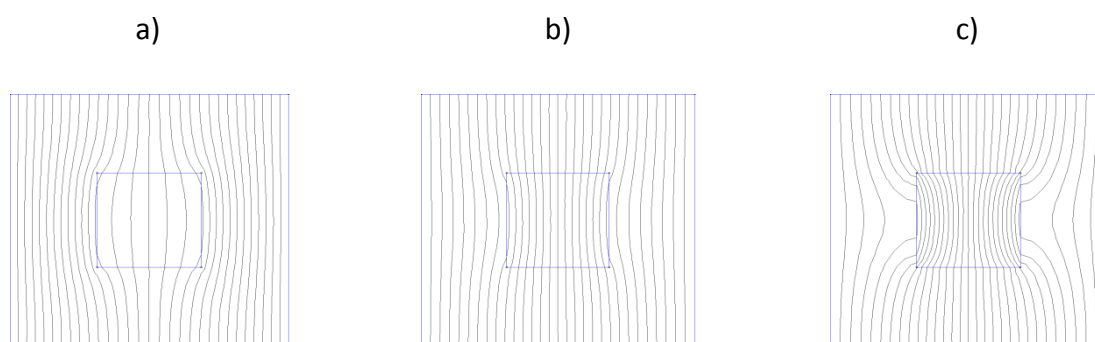
$$\mathbf{A} \times \mathbf{n} = 0 \quad (3.28)$$

3.2. Własności fizyczne ferromagnetyków

Ogólnie rozróżnia się dwa typy materiałów magnetycznych (Kaltenbacher, 2007):

- Materiały magnetycznie miękkie, do których można zakwalifikować *diamagnetyki*, *paramagnetyki* i *ferromagnetyki*,
- Materiały magnetycznie twarde - *ferromagnetyki*, z których można wytwarzać magnesy trwałe.

Linie sił pola magnetycznego w obszarze różnych materiałów magnetycznych przebiegają w sposób przedstawiony na poniższym rysunku:



Rys. 3.1. Rozkład linii pola w: a) diamagnetyku, b) paramagnetyku, c) ferromagnetyku

Diamagnetyki i paramagnetyki są to środowiska liniowe, których przenikalność magnetyczna $\mu = \text{const}$. Ich zależność $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ jest linią prostą przechodzącą przez początek układu współrzędnych. Względna przenikalność magnetyczna diamagnetyków spełnia warunek $\mu_r < 1$, zaś względna przenikalność magnetyczna paramagnetyków $\mu_r > 1$. Jednakże względna przenikalność magnetyczna tych materiałów w niewielkim stopniu różni się od 1, dlatego można przyjąć, że $\mu_r = 1$, czyli przenikalność magnetyczna μ jest równa przenikalności próżni μ_0 (Krakowski, 1995), (Bastos, Sadowski, 2003).

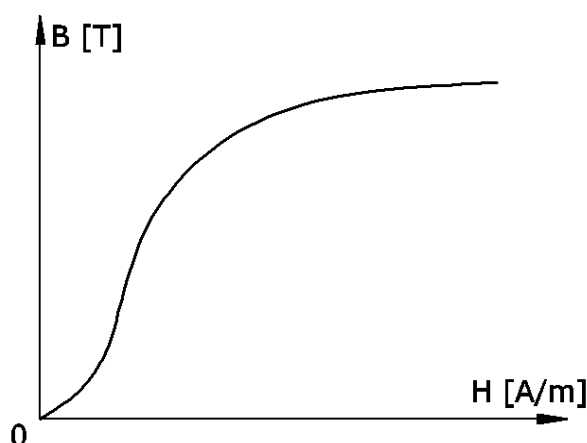
Poza ciałami diamagnetycznymi i paramagnetycznymi istnieją materiały ferromagnetyczne, których własności zostaną opisane w kolejnym podrozdziale.

Istnieją dwie cechy odróżniające materiały ferromagnetyczne od dia- i paramagnetyków. Po pierwsze przenikalność magnetyczna tych materiałów jest dużo większa od jedności, a ponadto jest ona zależna od natężenia H pola magnetycznego, czyli od stanu magnetycznego ciała (Krakowski, 1995). W związku z tym wykres funkcji $B=f(H)$ jest nieliniowy. Po drugie ferromagnetyki wykazują namagnesowanie pod nieobecność pola zewnętrznego (Sawieliew, 1998).

Właściwości magnetyczne tych materiałów zależą od wielu czynników, takich jak (Skoczkowski, 2000), (Feynman et al., 2007):

- skład chemiczny,
- skład stopu (dokładnie liczby zanieczyszczeń takiego stopu),
- sposób poddania obróbce mechanicznej i cieplnej,
- sposób i częstotliwość magnesowania,
- temperatura.

Termin „materiały ferromagnetyczne” jest ściśle związany między innymi z pojęciem krzywej magnesowania. *Krzywą magnesowania* lub *charakterystyką magnesowania* ferromagnetyka nazywa się wykres zależności $B = f(H)$ otrzymany w wyniku zwiększania natężenia H od wartości początkowej 0 dla ciała uprzednio nienamagnesowanego (Krakowski, 1995).



Rys. 3.2. Krzywa magnesowania

Krzywą magnesowania można podzielić na trzy odcinki (Turowski, 1993):

- I. Odcinek początkowy, w którym krzywa jest wklęsła ku dołowi, wychodzi z początku układu współrzędnych pod kątem określonym przez przenikalność początkową wyrażoną wzorem:

$$\frac{dB}{dH} = \mu_{pocz} \quad (3.29)$$

- II. Odcinek środkowy, w którym krzywa przebiega najbardziej stromo. W tym odcinku zachodzi najsilniejszy proces magnesowania, przenikalność dB/dH jest największa;
- III. Odcinek końcowy, w którym dB/dH dąży do μ_0 . Odcinek ten odpowiada nasyceniu, a zmiany indukcji są tu nieodwracalne.

Pojawiające się w powyższych wzorach pojęcie *przenikalności magnetycznej* μ to stosunek indukcji magnetycznej do natężenia pola magnetycznego (Turowski, 1993):

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3.30)$$

a w przypadku gdy punkt (B,H) leży na krzywej magnesowania pierwotnej, jest to wówczas *przenikalność pierwotna*. Z kolei *przenikalnością początkową* nazywamy granicę, do której dąży przenikalność pierwotna przy H dążącym do zera.

Istnieje wiele podziałów na rodzaje przenikalności magnetycznej. Jednym z zaproponowanych jest podział na (Kaltenbacher, 2007):

- Przenikalność odwracalną:

$$\mu_{rev} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{dB}{dH} \quad (3.31)$$

- Przenikalność różniczkową:

$$\mu_{diff} = \frac{dB}{dH} \quad (3.32)$$

- Przenikalność wyjściowa:

$$\mu_s = \frac{dB}{dH} \quad B = 0, H = 0 \quad (3.33)$$

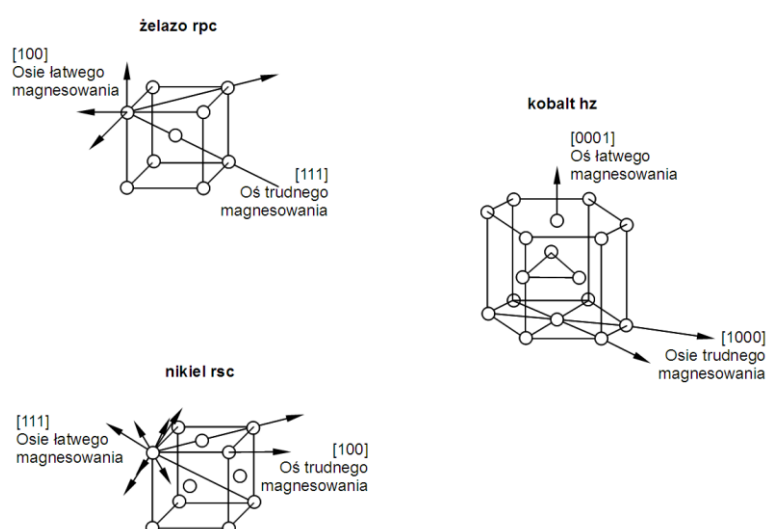
Kolejnym pojęciem związanym z właściwościami ferromagnetyków jest pojęcie anizotropii magnetycznej.

Anizotropią magnetyczną jest zjawisko, w którym namagnesowanie monokryształu ferromagnetyka umieszczonego w polu magnetycznym skierowanym wzdłuż różnych kierunków krystalograficznych będzie się zmieniało w zależności od wybranego kierunku przyłożonego pola (Kelsall et al., 2008). Materiały anizotropowe są materiałami, których pewne właściwości zależą od kierunku przyłożonego pola, co szczególnie mocno występuje w kryształach. *Izotropia* z kolei występuje wówczas, gdy wszystkie kierunki w materiale są równouprawnione (Skoczkowski, 2000).

Jedną z najogólniejszych klasyfikacji anizotropii jest podział na (Furlani, 2001):

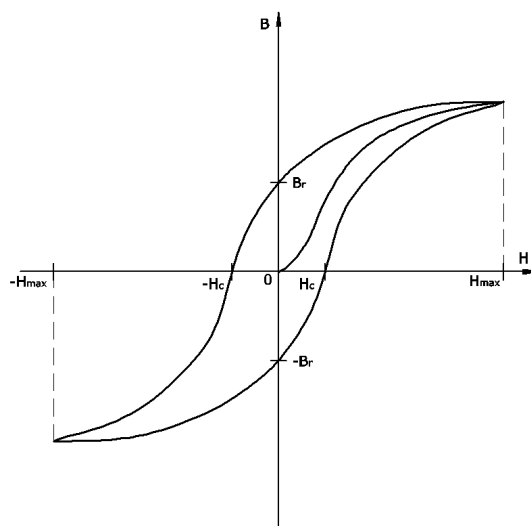
- anizotropię magnetokrystaliczną,
- anizotropię kształtu,
- anizotropię naprężeń,
- anizotropię wymiany.

W ciałach anizotropowych wyróżnia się osie (kierunki): łatwego i trudnego namagnesowania. Istnieją również materiały z kierunkiem namagnesowania pośredniego (Purcel, 1974), (Kelsall et al., 2008). Na rysunku 3.3 przedstawiono osie magnesowania dla różnych materiałów wskazujących anizotropową naturę procesu magnesowania.



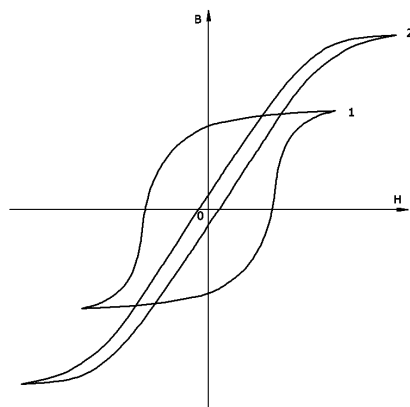
Rys. 3.3. Struktura krystaliczna materiałów o anizotropowej naturze magnesowania (Kelsall et al., 2008)

Proces magnesowania ferromagnetyków opisują krzywe magnesowania, a zjawisko występujące przy przemagnesowaniu ciał ferromagnetycznych nazywa się *histerezą magnetyczną*. Histereza magnetyczna jest wynikiem zjawisk zachodzących w skupiskach krystalicznych ferromagnetyków, a krzywe opisujące to zjawisko nazywa się *pętlą histerezy* (Krakowski, 1995).



Rys. 3.4. Pętla histerezy (Furlani, 2001)

Występujące na rysunku 3.4 symbole oznaczają kolejno: H_c – siłę koercji i B_r - indukcję szczątkową (remanencji). W przypadku, gdy siła koercji jest mała mówi się o materiałach magnetycznie miękkich, a gdy jej wartość jest duża o materiałach magnetycznie twardych. Magnetyki miękkie mają wąską pętlę histerezy, a twarde szeroką pętlę histerezy. Ponadto do grupy materiałów magnetycznie miękkich zalicza się te, które można łatwo namagnesować polami magnetycznymi o bardzo małych natężeniach. Z kolei materiały magnetycznie twarde wymagają silnych pól do ich namagnesowania, a po namagnesowaniu same wytwarzają pole magnetyczne (Wiak, Welfle, 2001).



Rys. 3.5. Przykłady pętli histerezy: 1- magnetyków twardych, 2- magnetyków miękkich (Krakowski, 1995)

Na rysunku 3.5 przedstawiono dwie pętle histerezy; dla magnetyków miękkich i magnetyków twardych. Gdy pętla histerezy jest dostatecznie wąska w obliczeniach można używać jedynie krzywej magnesowania, pomijając zjawisko histerezy magnetycznej (Krakowski, 1995).

Mikro- i nanowłókna magnetyczne będące przedmiotem prowadzonych badań w ramach przygotowanej rozprawy doktorskiej były wypełniane proszkami różnego typu; magnetykami twardymi i miękkimi.

4. Badanie mikroskopowe mikro- i nanowłókien magnetycznych

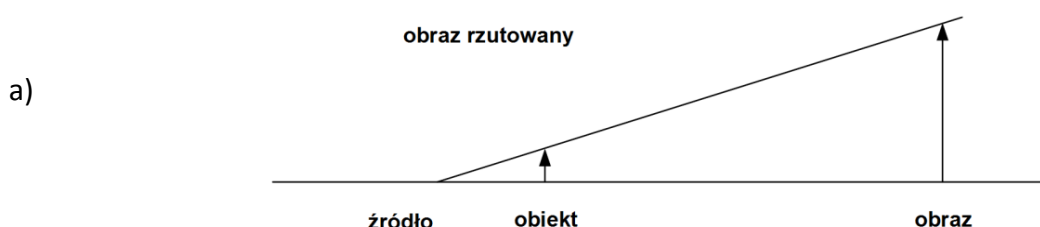
Mikroskopia jest nauką, która została stworzona w celu umożliwienia rozróżniania szczegółów niewidocznych „gołym” okiem. W przypadku materiałów o rozmiarach mikro- czy nanometrycznych konieczne jest dokonanie analizy mikroskopowej, tak aby móc przyrzeć się strukturze badanych materiałów. Bez użycia mikroskopów o bardzo wysokiej rozdzielczości byłoby to oczywiście niemożliwe. Niniejszy rozdział poświęcony jest analizie mikroskopowej mikrowłókien magnetycznych.

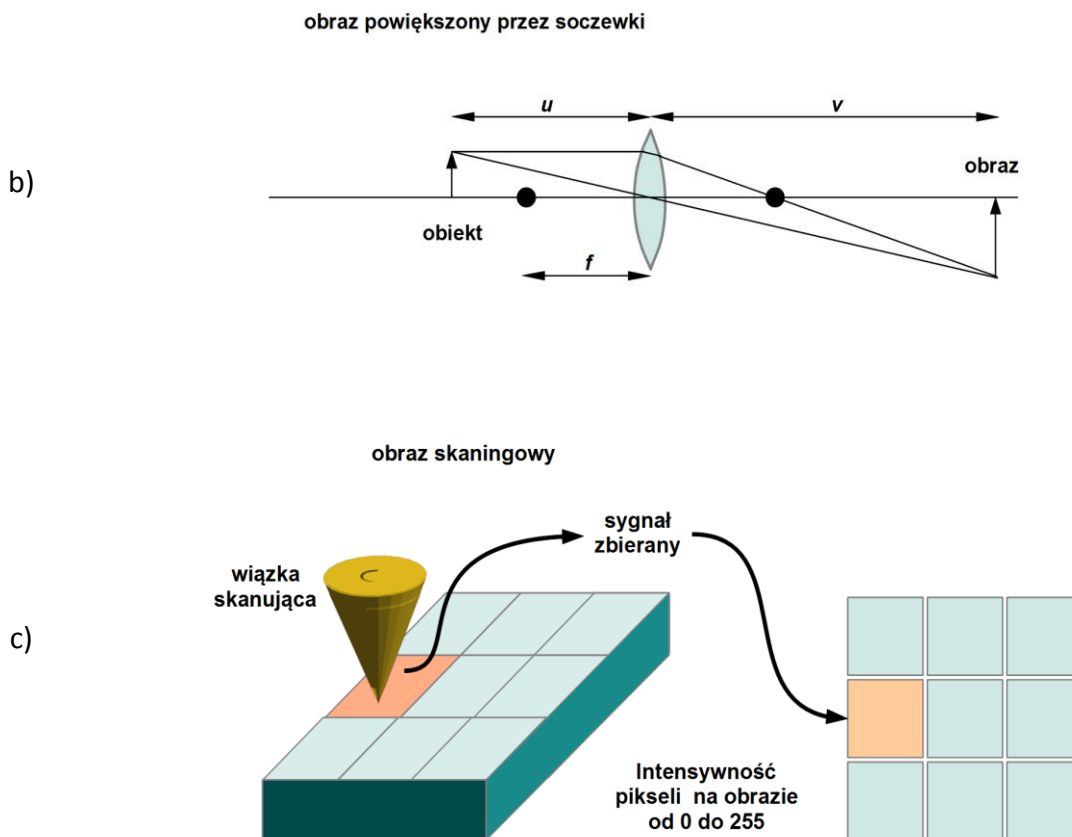
4.1. Techniki mikroskopowe

Istnieją trzy różne metody przekształcania obserwowanego obiektu w obraz (Kelsall et al., 2008):

- Mikroskopia obrazów rzutowanych, np. jonowa polowa (FIM- Field Ion Microscopy).
- Mikroskopia obrazów powiększonych przez soczewki, np. świetlna, o której więcej zostanie powiedziane w kolejnym podrozdziale.
- Mikroskopia obrazów skaningowych, np. SEM (Scanning Elektron Microscopy), SFM (Scanning Force Microscopy), STM (Scanning Tunneling Microscopy).

Na rysunku 4.1 pokazano sposoby rzutowania obrazu. Do analizy mikroskopowej mikrowłókien magnetycznych zostały wykorzystane metody świetlne (optyczne) oraz skaningowe.





Rys. 4.1. Tworzenie obrazu: a) rzutowanego, b) powiększonego przez soczewki, c) skaningowego (Kelsall et al., 2008)

4.1.1. Mikroskopia świetlna

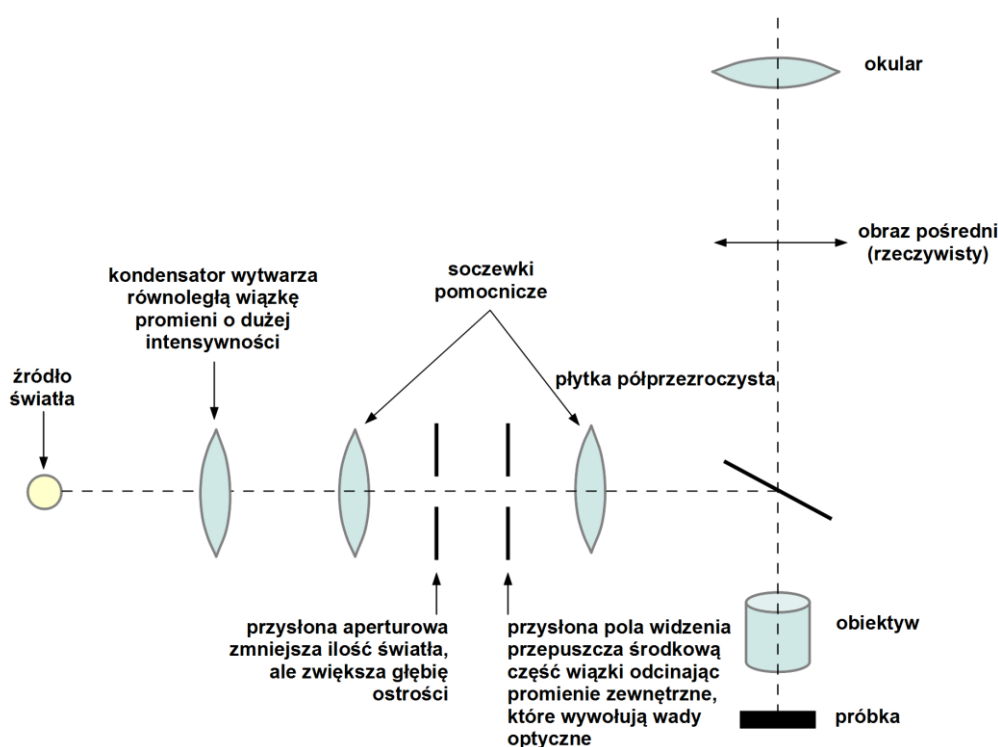
Mikroskop optyczny jest to urządzenie służące do silnego powiększania obrazu, wykorzystujące do generowania tego obrazu światło przechodzące przez specjalny układ optyczny składający się zazwyczaj z zestawu od kilku do kilkunastu soczewek optycznych.

Mikroskop optyczny może wykorzystywać światło naturalne, dostarczane do układu optycznego przez specjalne lustro lub wykorzystywać sztuczne światło, którego źródło znajduje się zazwyczaj pod analizowaną próbką. Mikroskopy ze sztucznym źródłem światła bywają nazywane *mikroskopami świetlnymi*. Mikroskopy świetlne mogą pracować w świetle odbitym lub przechodzącym. Światło może padać na oglądany obiekt z góry – mówi się wtedy o odbiciowym mikroskopie optycznym. Światło może też padać na badany obiekt

z dołu i przechodzić przez niego, co wymaga jednak, aby obiekt był półprzezroczysty (Kelsall et al., 2008).

Rozdzielczość mikroskopów wykorzystujących światło widzialne lub ultrafioletowe nie jest wystarczająca do obserwacji nanostruktur. W przypadku mikrostruktur taka analiza jest jednak pomocna do oszacowania pewnych właściwości takiego materiału. Daje również możliwość obserwowania np. chropowatości struktury, bądź kształtu, czy ułożenia.

Na poniższym rysunku przedstawiono sposób przybliżania struktur przy użyciu mikroskopów optycznych.

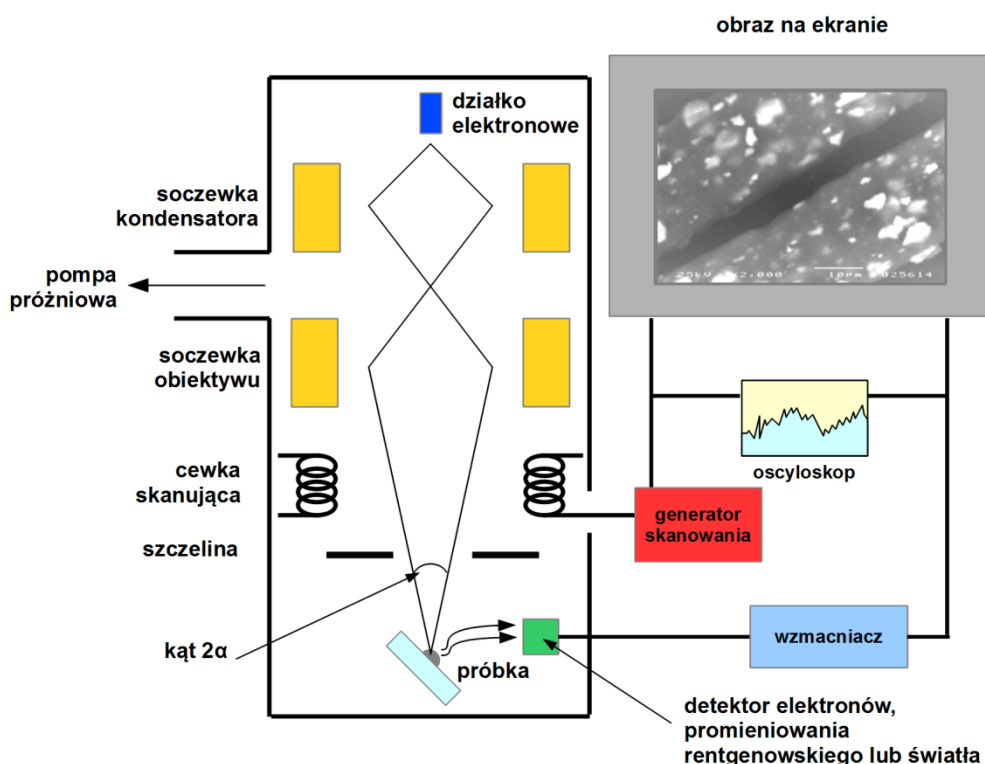


Rys. 4.2. Schemat układu optycznego mikroskopu świetlnego (www.pg.gda.pl)

Analiza mirowłókien magnetycznych opisana w podrozdziale 4.2, w jednym z etapów dokonana była z użyciem mikroskopu świetlnego, który dawał możliwość obserwacji w świetle przechodzącym i odbitym. Badania przeprowadzono mikroskopem Delta Optical wraz z kamerą USB i oprogramowaniem MicroScan, zakupione w ramach wykonywanego grantu promotorskiego.

4.1.2. Mikroskopia elektronowa

Optyka elektronowa jest bardzo ważną techniką służącą do analizy mikroskopowej nanostruktur. W tym celu wykorzystuje się najczęściej elektronowe mikroskopy skaningowe (SEM), które dają możliwość obserwacji takiej struktury w całym przekroju. Mikroskopia elektronowa jest podobna do mikroskopii świetlnej. Daje jednak dużo lepszą rozdzielczość, gdyż długość fali przyspieszonych elektronów jest dużo mniejsza niż długość fali światła widzialnego czy ultrafioletowego. Główna korzyść stosowania mikroskopów elektronowych do obserwacji nanostruktur polega na tym, że siła sygnału pochodzącego z niewielkiej objętości materiału jest duża i porównywalna z innymi sygnałami większych źródeł promieniowania. Dzięki ładunkowi, jaki posiadają elektrony wiązka ich może być ogniskowana przez pole magnetyczne lub elektryczne. Taką wiązką można łatwo sterować przy użyciu pola elektrostatycznego (Kelsall et al., 2008 – Rys. 4.3).



Rys. 4.3. Uproszczony schemat budowy skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) (Kelsall et al., 2008)

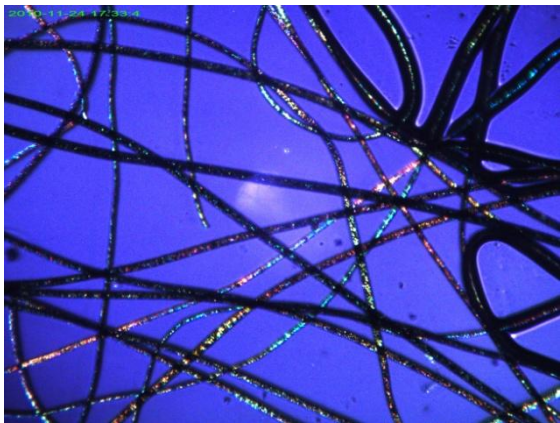
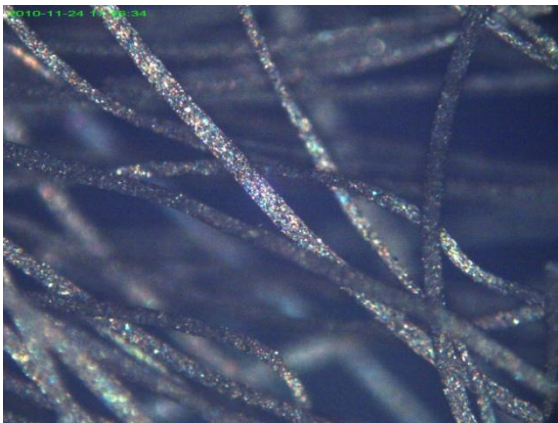
W przypadku obrazowania nanostruktur konieczne jest stosowanie działła elektronowego (widocznego na Rys. 4.3) z emisją polową. Ponadto należy używać napięcia przyspieszającego o wartościach 1-30 kV, gdyż niskie napięcie może spowodować zbieranie się ładunków elektrostatycznych na powierzchni próbek nie- lub słabo- przewodzących. Wykorzystuje się kilka soczewek kondensatora, w celu rozogniskowania generowanej wiązki przez działło. Wiazka elektronów, skanująca powierzchnię próbki w dwóch kierunkach przechodzi przez oś optyczną obiektywu. W tym czasie elektrony wtórne (elektrony wstecznie rozproszone, czy promieniowanie rentgenowskie) są zbierane przez właściwy detektor. Ten sam generator skanowania steruje jednocześnie wiązką monitora. Wzmocniony sygnał detektora kontroluje intensywność każdego piksela na monitorze, odtwarzając natężenie emisji w odpowiadającym mu punkcie powierzchni próbki. Stosunek wielkości pola rastra monitora do wielkości pola rastra próbki jest powiększeniem mikroskopu skaningowego (Kelsall et al., 2008).

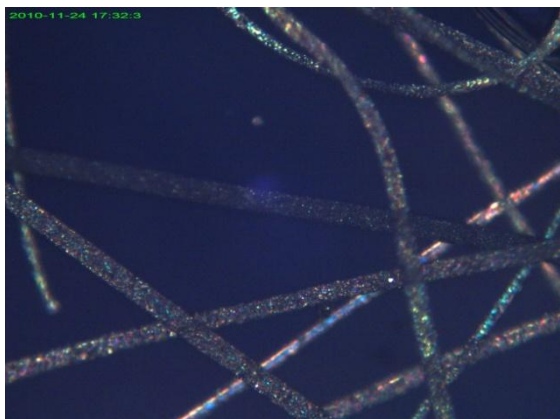
4.2. Analityczna obserwacja mikrowłókien

Przeprowadzenie analitycznej obserwacji próbek mikrowłókien było niezbędne, w celu przystąpienia do etapu generowania modeli komputerowych włókien. Dzięki zdjęciom uzyskanym z mikroskopów obrazującym rzeczywiste struktury mikrowłókien można było przystąpić do budowy komputerowych modeli włókien rzeczywiste struktury mikrowłókien. Kształt i struktura granulatu magnetycznego jest bardzo skomplikowana. W wyniku przeprowadzonej analizy ustalono rzeczywiste kształty pojedynczych ziaren granulatu. Wyniki przeprowadzonych analiz stanowiły podstawę do zdefiniowania zastępczych modeli geometrycznych pojedynczych ziaren.

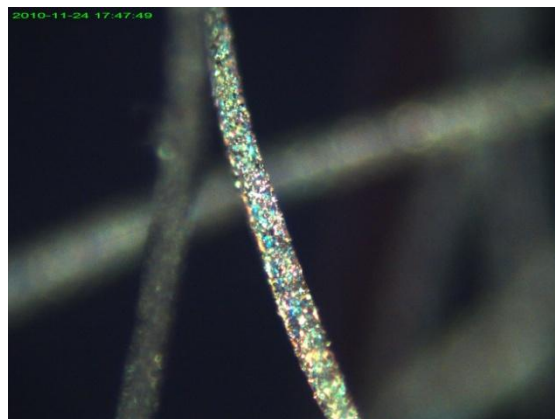
W poniższej tabeli zestawiono zdjęcia wykonane mikroskopem optycznym dla dwóch rodzajów wiązek włókien magnetycznych. Obie wiązki włókien wytworzono w Katedrze Włókien Sztucznych Politechniki Łódzkiej.

Tabl. 4.1. Zdjęcia mikrowłókien magnetycznych wykonane mikroskopem optycznym

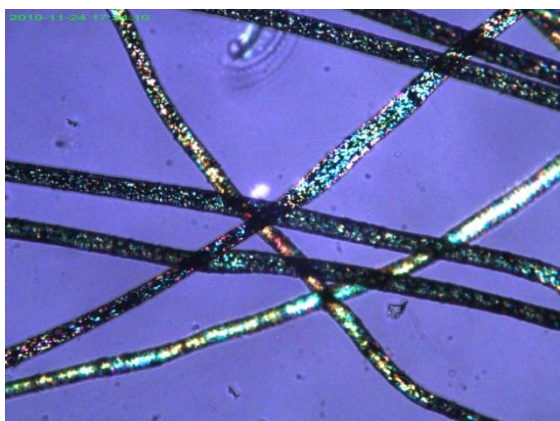
Próbka nr 1	Próbka nr 2
	
Powiększenie 40x - światło przechodzące	Powiększenie 100x - światło odbite



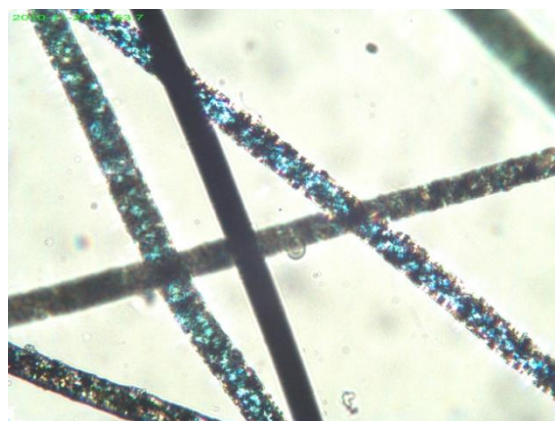
Powiększenie 100x - światło odbite



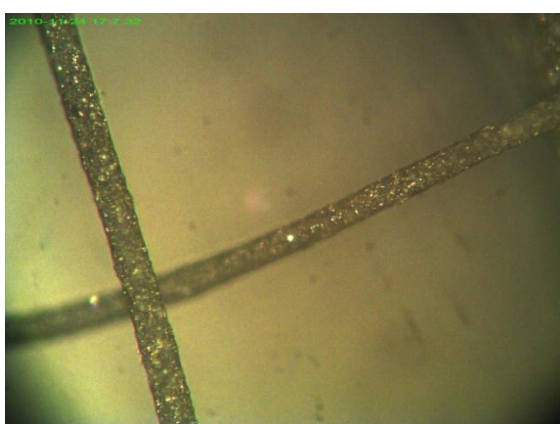
Powiększenie 200x - światło odbite



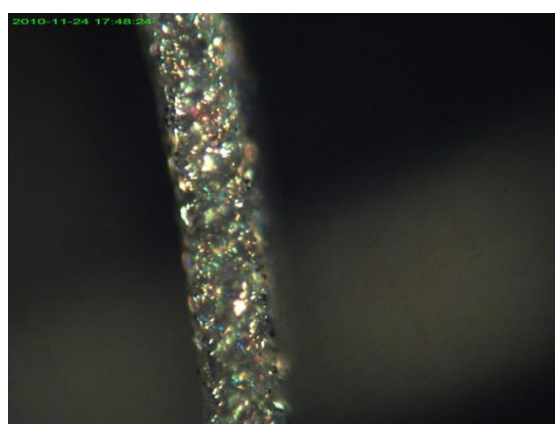
Powiększenie 100x - światło przechodzące



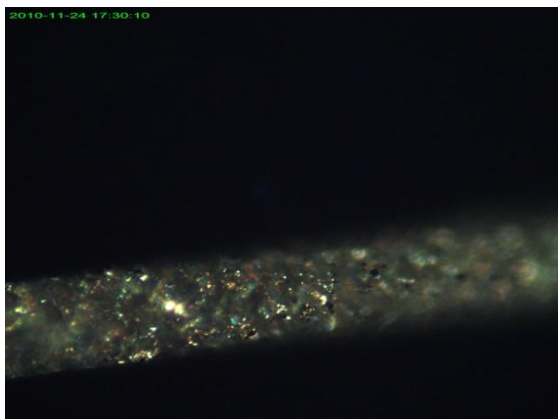
Powiększenie 200x - światło przechodzące



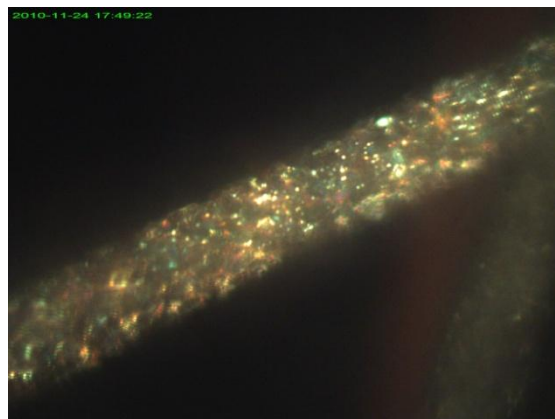
Powiększenie 200x - światło odbite



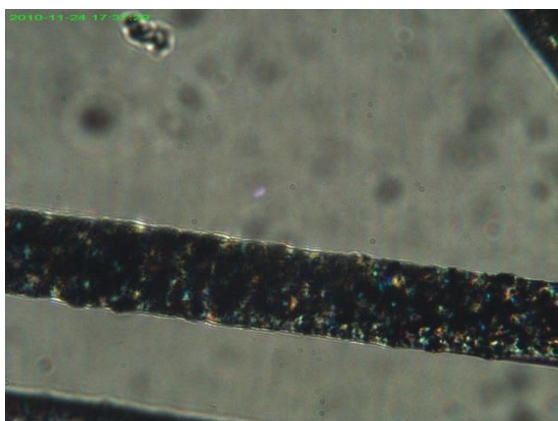
Powiększenie 400x - światło odbite



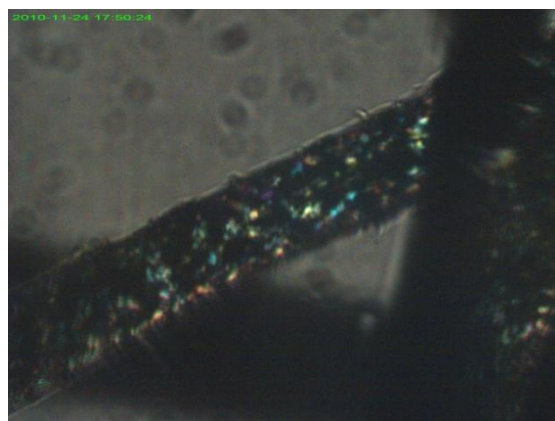
Powiększenie 400x - światło odbite



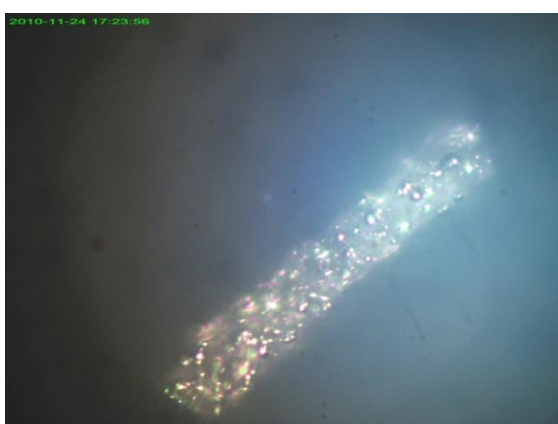
Powiększenie 600x - światło odbite



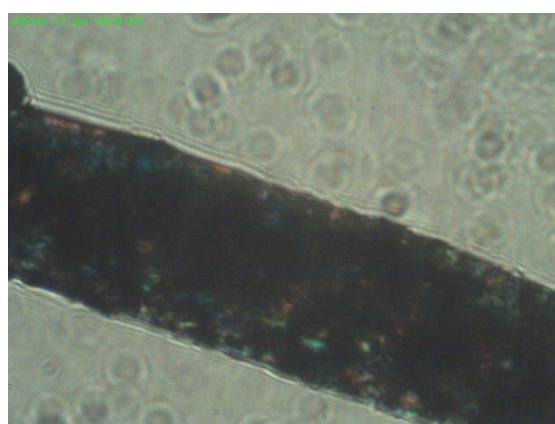
Powiększenie 400x - światło przechodzące



Powiększenie 600x - światło przechodzące

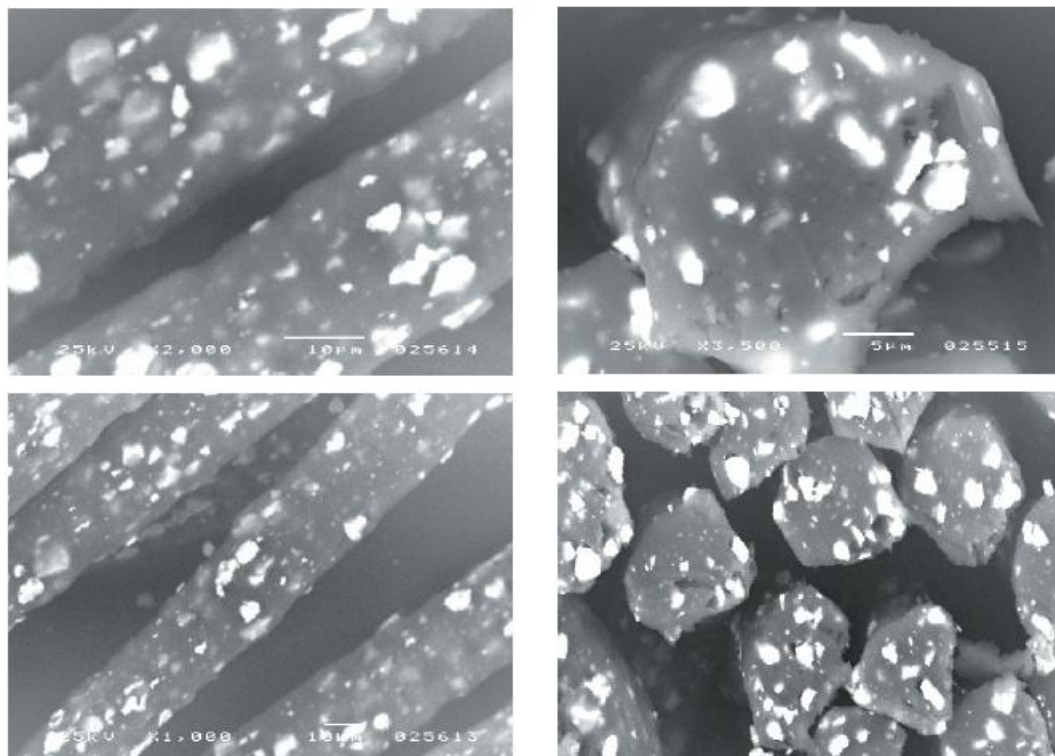


Powiększenie 600x - światło odbite



Powiększenie 1000x - światło przechodzące

Poza analizą przeprowadzoną z użyciem mikroskopu optycznego wykonano szereg zdjęć z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego w celu określenia struktury włókna, jak również kształtu ziaren proszku (Rys. 4.4).



Rys. 4.4. Widok podłużny i poprzeczny włókien magnetycznych (Rubacha, Zięba, 2006)

Powyższe obserwacje pozwoliły na wyciągnięcie wniosków dotyczących rozkładu ziaren ferromagnetycznych we włóknie. Dzięki zdjęciom z mikroskopu skaningowego otrzymano trójwymiarowy obraz struktury włókna. Natomiast przy użyciu mikroskopu optycznego można było przeprowadzić jedynie analizę dwuwymiarową. Wyniki przeprowadzonych obserwacji i analiz pozwoliły na przyjęcie odpowiednich założeń, co do kształtu brył reprezentujących pojedyncze ziarna oraz ich rozkładu wewnątrz struktury włókna stanowiąc podstawę przy opracowywaniu zastępczych modeli komputerowych włókien. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, iż pojedyncze ziarna mają dowolne kształty (nie są to bryły idealne - kule, prostopadłościany, sześciiany), a rozkład ziaren w strukturze pojedynczego włókna ma charakter przypadkowy (rozkład stochastyczny).

5. Automatyzacja procesów modelowania w środowisku programistycznym MATLAB

Wnioski z poprzedniego rozdziału, dotyczącego sposobów analizy mikroskopowej, pozwoliły rozpocząć prace programistyczne, związane z generacją struktury włókien magnetycznych przy użyciu platformy MATLAB. Zdjęcia mikroskopowe wskazały konieczność analizy rozmieszczenia ziaren ferromagnetyka we włóknie dla jego różnych położeń.

Zaobserwowano, iż ziarna układają się wzdłuż włókna przypadkowo. Jednak można było doszukać się w tym rozmieszczeniu pewnej regularności. W związku z tym należało przeprowadzić analizę, jaki wpływ na własności magnetyczne włókien ma rozkład ziaren ferromagnetyka w całej długości włókna. W tym celu zbudowano generator mikro- i nanowłókien magnetycznych dający możliwość wyboru sposobu rozłożenia ziaren we włóknie w zamierzony sposób.

5.1. Metody losowania rozkładu ziaren ferromagnetycznych

Do generowania położeń ziaren we włóknie magnetycznym wykorzystano pakiet MATLAB. Liczby pseudolosowe o rozkładzie jednostajnym i normalnym generowano przy użyciu poleceń *rand* i *randn* (Moler, 2004):

- *rand* - zwraca macierz losową wypełnioną liczbami o rozkładzie (rozłożeniu) równomiernym (jednostajnym),
- *randn* - zwraca macierz losową wypełnioną liczbami o rozkładzie (rozłożeniu) normalnym (Pratap, 2007), (Mrozek, Mrozek, 2004).

Funkcja *rand* jest funkcją generującą liczby pseudolosowe o rozkładzie jednostajnym w przedziale $<0,1>$, natomiast funkcja *randn* generuje liczby pseudolosowe o rozkładzie normalnym, średniej 0 i wariancji 1 „ $N(0,1)$ ” (Zalewski, Cegieła, 1997).

Liczby pseudolosowe są to liczby generowane w sposób jednoznaczny, deterministyczny, ale udający swoim zachowaniem losowy. Liczby pseudolosowe

generowane są w komputerze na podstawie deterministycznego przepisu iteracyjnego poczynając od wybranej wartości początkowej (Biecek, 2008).

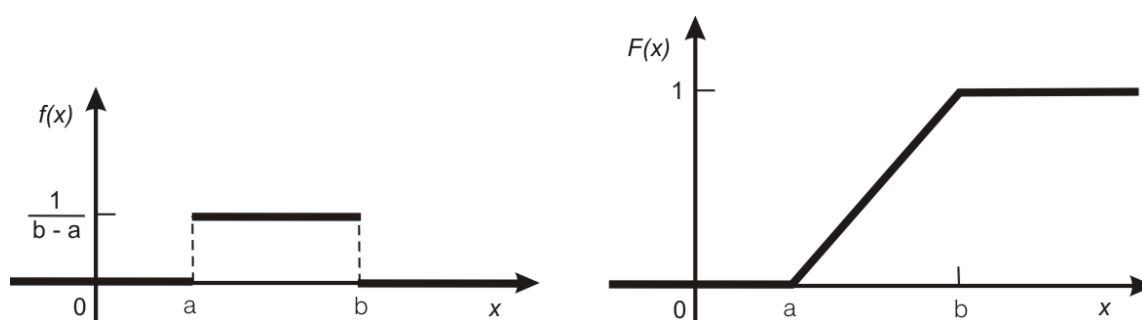
Generatory liczb losowych dzielą się na takie, które wywołują liczby o rozkładach ciągłych i skokowych. Wśród zmiennych o rozkładzie ciągłym wyróżnia się (Dobrowolska et al., 1997):

- zmienne o rozkładzie prostokątnym (Rys. 5.1);
- zmienne o rozkładzie normalnym (Rys. 5.2).

Jak już wspomniano wcześniej do rozmieszczenia ziaren ferromagnetycznych we włóknie zastosowano rozkład równomierny (jednostajny) i normalny.

Zmienne o rozkładzie prostokątnym wyrażane są wzorem (Sobczyk, 2008):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & \text{dla } a < x < b \\ 0, & \text{dla } x \leq a \vee x \geq b \end{cases} \quad (5.1)$$



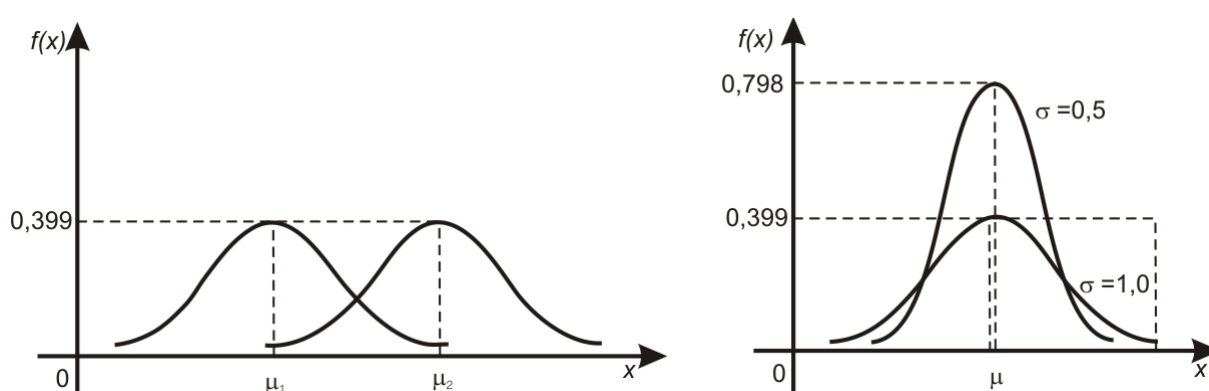
Rys. 5.1. Rozkład prostokątny (Dobrowolska et al., 1997)

Na powyższym rysunku (Rys. 5.1) przedstawiono rozkład prostokątny. Zmienne o rozkładzie prostokątnym zostały użyte do losowania położenia ziaren ferromagnetycznych w przypadku rozkładu równomiernego oraz jego wariantu, tzw. rozkładu nierównomiernego.

Różnicę między tymi dwoma sposobami losowań rozłożenia ziaren we włóknie przedstawiono w tabeli 5.1.

Zmienne o rozkładzie normalnym zwane także zmiennymi o rozkładzie Gaussa, wyrażane są wzorem (Sobczyk, 2008):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \text{ dla } -\infty < x < \infty \quad (5.2)$$



Rys. 5.2. Rozkład normalny (Dobrowolska et al., 1997)

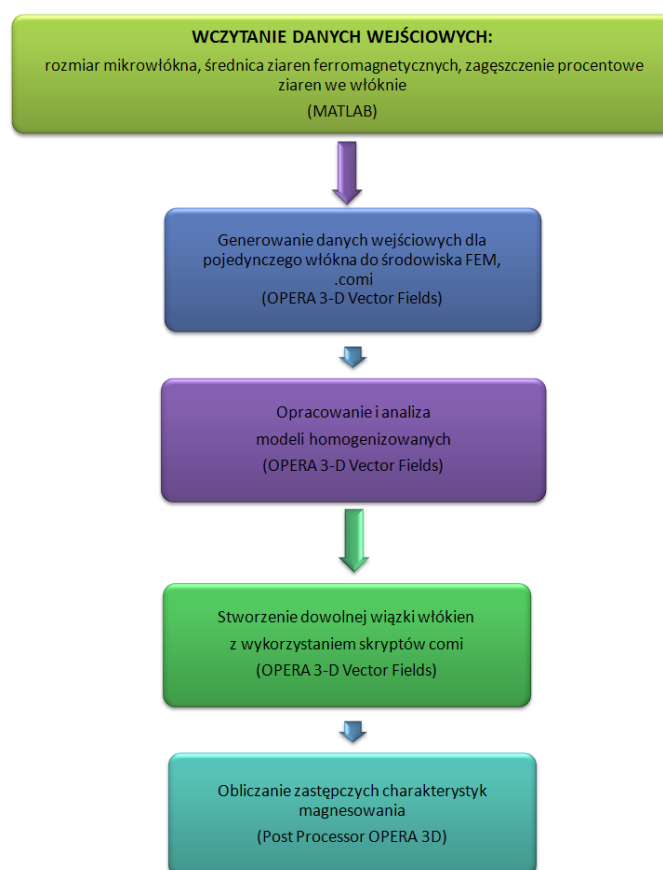
Zmienne o rozkładzie normalnym (Rys. 5.2) wykorzystano do losowania położenia ziaren ferromagnetycznych w przypadku rozkładu ziaren w skupiskach.

Funkcja *rand* była użyta do znajdowania rozmiarów kul, będących obszarem skupiska ziaren. Odbywało się to poprzez zadanie przedziału promienia, w jakim miały być wyszukiwane, a następnie generowane ziarna. Funkcja ta była wykorzystywana do znajdowania położenia ziaren w całej objętości włókna.

5.2. Generacja mikro- i nanowłókien magnetycznych

Opisane w podrozdziale 5.1 metody losowania liczb pseudolosowych pozwoliły na stworzenie algorytmu generowania modeli bryłowych analizowanych włókien magnetycznych. Proces tworzenia tych struktur przebiegał dwustopniowo. W pierwszym etapie zbudowano model pojedynczego mikrowłókna, dla którego opracowano model homogenizowany. W drugim etapie zamodelowano wiązkę włókien magnetycznych zbudowaną w oparciu o wcześniej przygotowane modele.

Poniższy algorytm przedstawia sposób postępowania, przeprowadzonej analizy porównawczej modeli komputerowych mikro- i nanowłókien magnetycznych. Przedstawiono w nim algorytmizację procesów generacji pojedynczych włókien wykonaną w MATLAB'ie (krok 1) ze skryptami tworzącymi całe wiązki włókien w pakiecie OPERA 3D (krok 2).



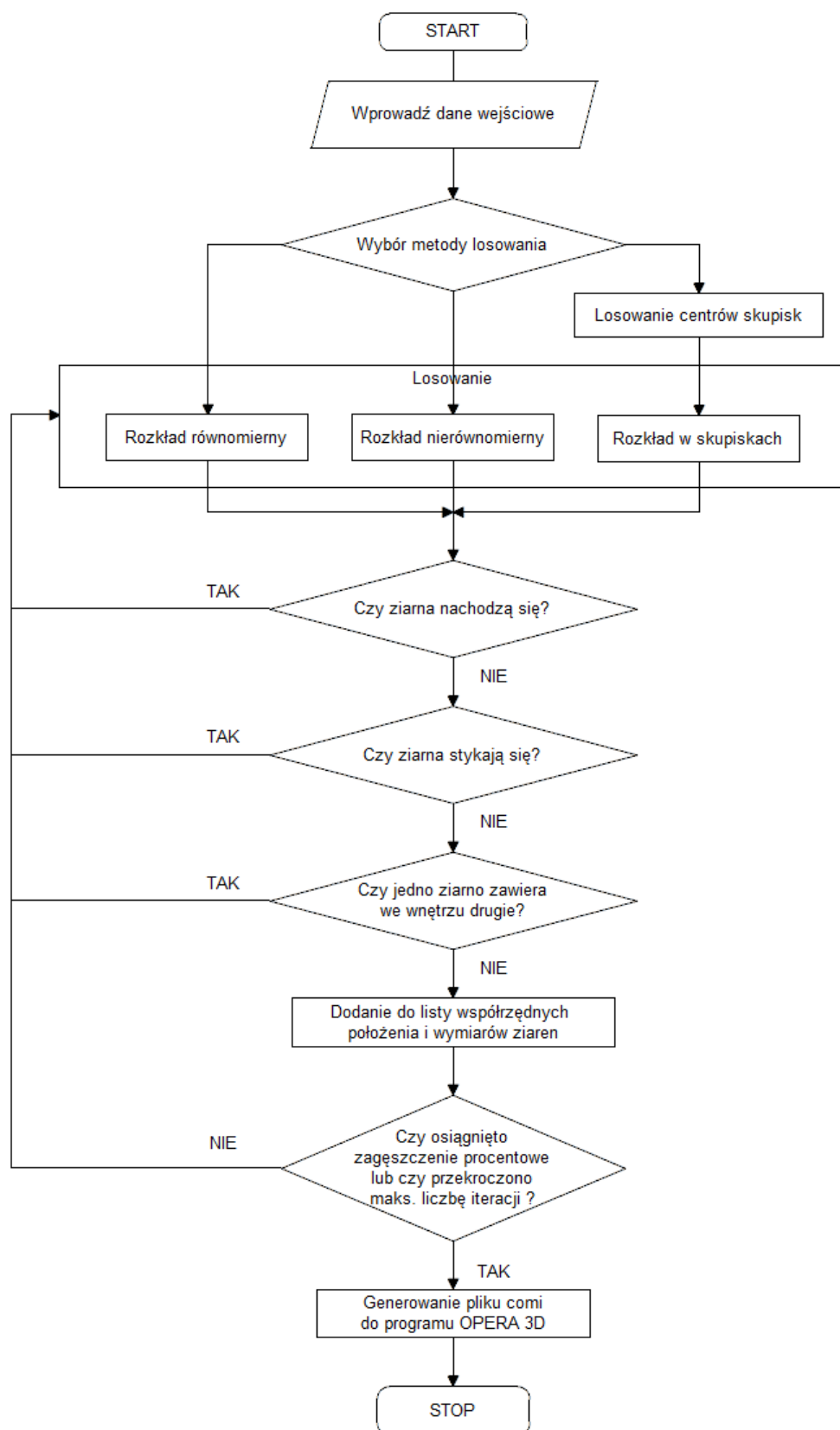
Rys. 5.3. Algorytm tworzenia modeli komputerowych mikro- i nanowłókien magnetycznych

W pierwszym etapie budowy modeli komputerowych włókien generowane były współrzędne położenia oraz rozmiary ziaren ferromagnetycznych przy użyciu programu MATLAB. Wynikiem tego procesu były pliki `.com`, języka skryptowego pakietu OPERA 3D, zawierające definicje geometrii ziaren i włókna.

W celu stworzenia modelu pojedynczego włókna magnetycznego został opracowany wewnętrzny generator, który umożliwił stworzenie mikrowłókna o dowolnych parametrach:

- długości,
- średnicy,
- rozmiarze ziaren ferromagnetycznych,
- zagęszczeniu procentowym, jakie stanowi magnetyk we włóknie magnetycznym.

Algorytm generowania modeli bryłowych włókien przedstawiono na rysunku 5.4.

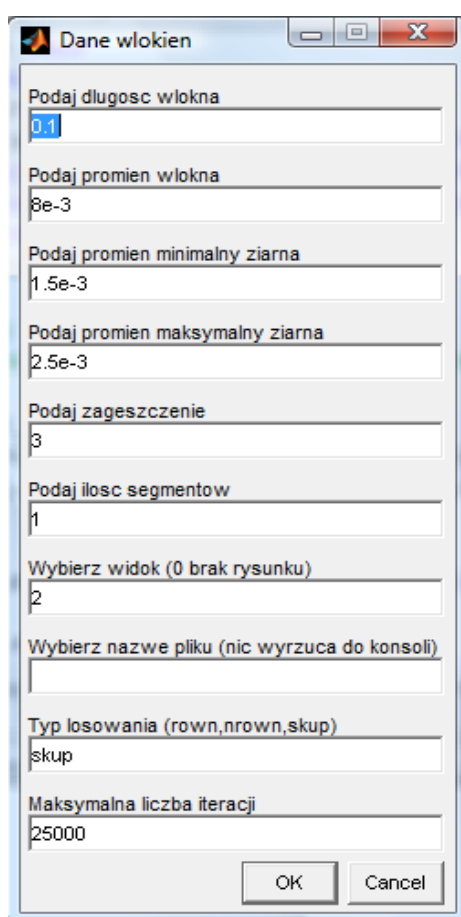


Rys. 5.4. Algorytm zasady działania aplikacji generującej pojedyncze włókno magnetyczne

Generacja mikrowłókna w pakiecie MATLAB odbywała się przy następujących założeniach:

- Ziarna ferromagnetyka rozmieszczone były przypadkowo (losowo);
- Kształt ziaren uproszczony został do kształtu mikrokul;
- Mikrokule zdefiniowane zostały poprzez podanie rozmiaru i pozycji (definicja położenia we włóknie);
- Ziarna nie mogły się stykać, ani nachodzić na siebie;
- Jedno ziarno nie mogło zawierać drugiego, mniejszego w swoim wnętrzu.

Po zastosowaniu tych wszystkich założeń w kodzie programistycznym nastąpiła generacja mikrowłókna magnetycznego, jako struktury trójwymiarowej, przy użyciu własnego interfejsu (Rys. 5.5):



Dane włókien

Podaj długość włókna
0.1

Podaj promień włókna
8e-3

Podaj promień minimalny ziarna
1.5e-3

Podaj promień maksymalny ziarna
2.5e-3

Podaj zagęszczenie
3

Podaj ilość segmentów
1

Wybierz widok (0 brak rysunku)
2

Wybierz nazwę pliku (nic wyrzuca do konsoli)

Typ losowania (rown,nrown,skup)
skup

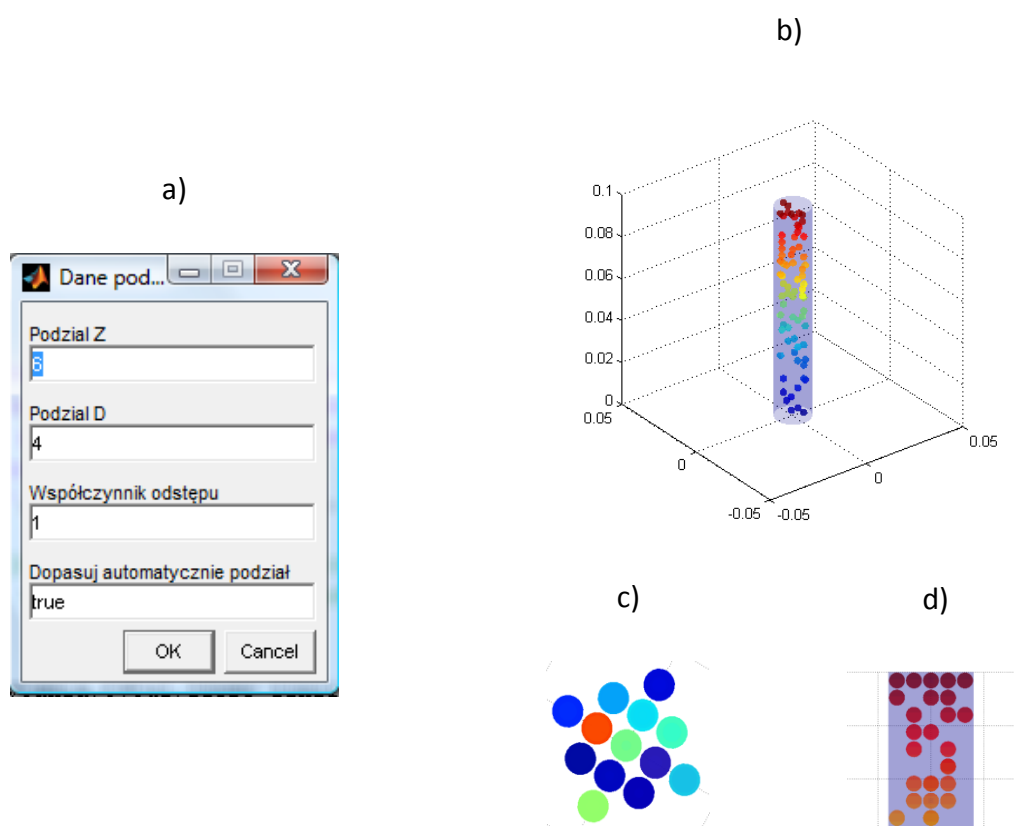
Maksymalna liczba iteracji
25000

OK Cancel

Rys. 5.5. Interfejs generatora mikrowłókien magnetycznych opracowany na platformie MATLAB

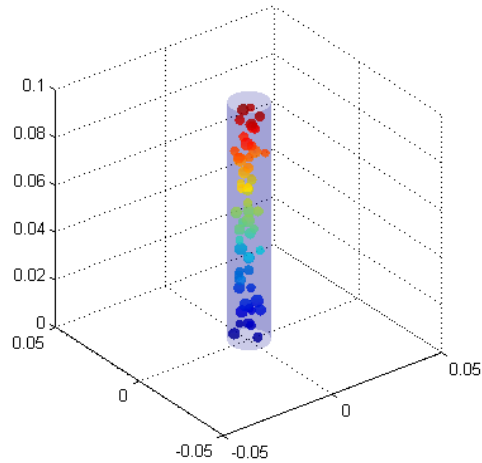
Zbudowany dedykowany generator dawał możliwość wyboru sposobu losowania rozkładu ziaren ferromagnetycznych w całej objętości włókna. Było to niezbędne do przeprowadzenia analizy polowej, w celu określenia jak najlepszych właściwości magnetycznych włókien. Należało dokonać wyboru, czy rozkład winien być równomierny, czy ziarna powinny być generowane w skupiskach, czy może też rozkład winien być nierównomierny:

- *Losowanie równomierne* wraz z możliwością narzucenia podziału siatki lub automatycznego dopasowania do średniego promienia ziarna. Losowanie liczb o rozkładzie równomiernym (rand - Rys. 5.6);



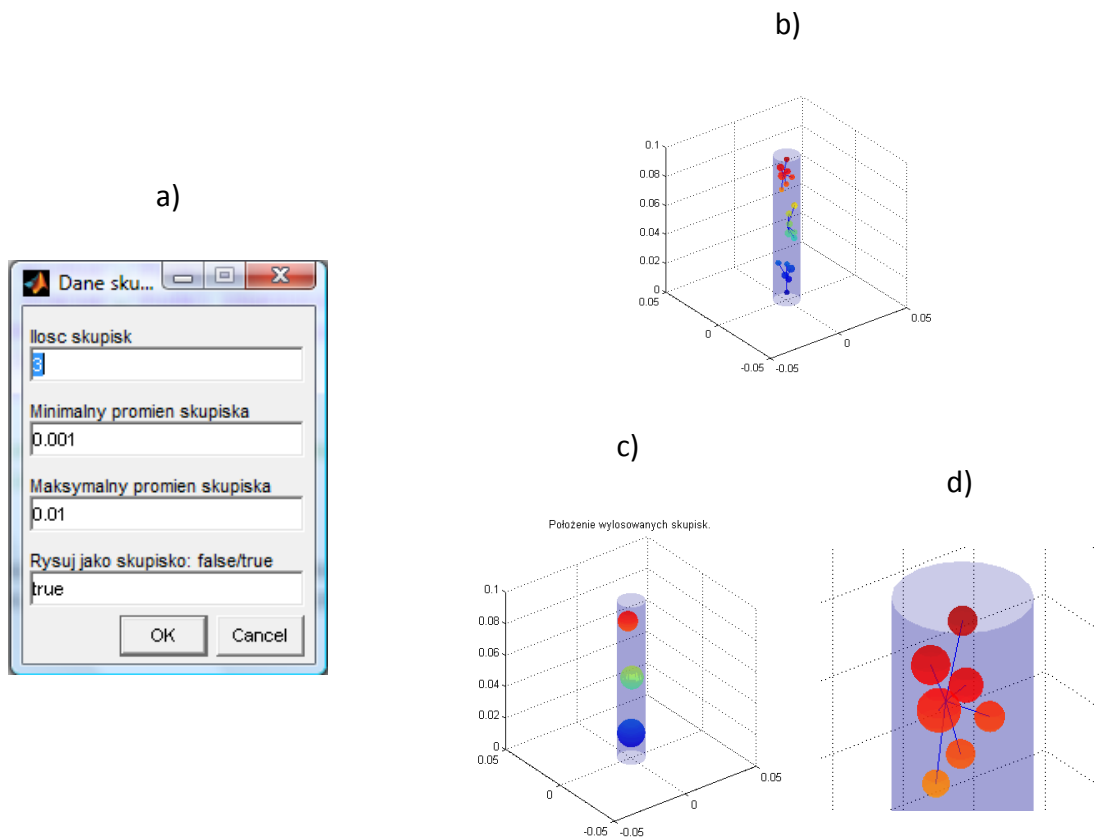
Rys. 5.6. Losowanie równomierne rozkładu ziaren ferromagnetycznych we włóknie:
 a) interfejs, b) wynik losowania, c) widok z góry, d) widok z boku

- *Losowanie nierównomierne* polegało na przypadkowym rozmieszczeniu ziaren ferromagnetycznych w przestrzeni włókna. Model ten również korzystał z algorytmu losowania o rozkładzie równomiernym (rand - Rys. 5.7);



Rys. 5.7. Losowanie nierównomierne rozkładu ziaren ferromagnetycznych we włóknie

- *Losowanie według skupisk* dawało możliwość wyboru ilości skupisk oraz minimalnego i maksymalnego promienia skupiska. Wykorzystywany algorytm losowania to rozkład normalny z ograniczeniami i wyborem środka (randn- Rys. 5.7).

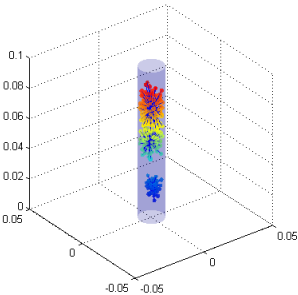
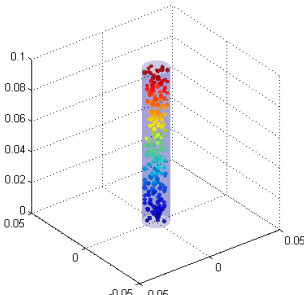
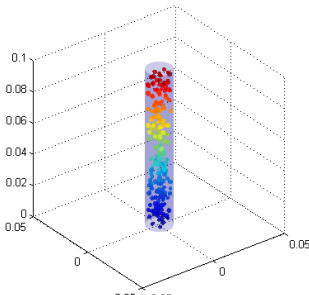
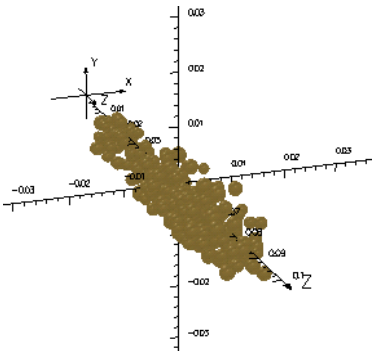
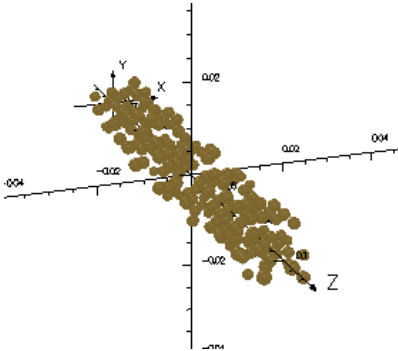
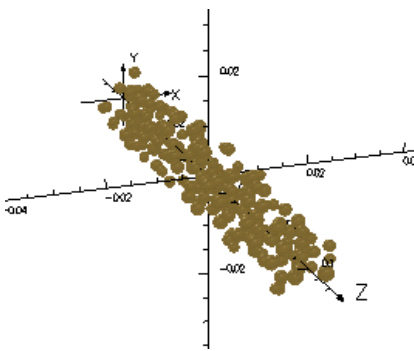


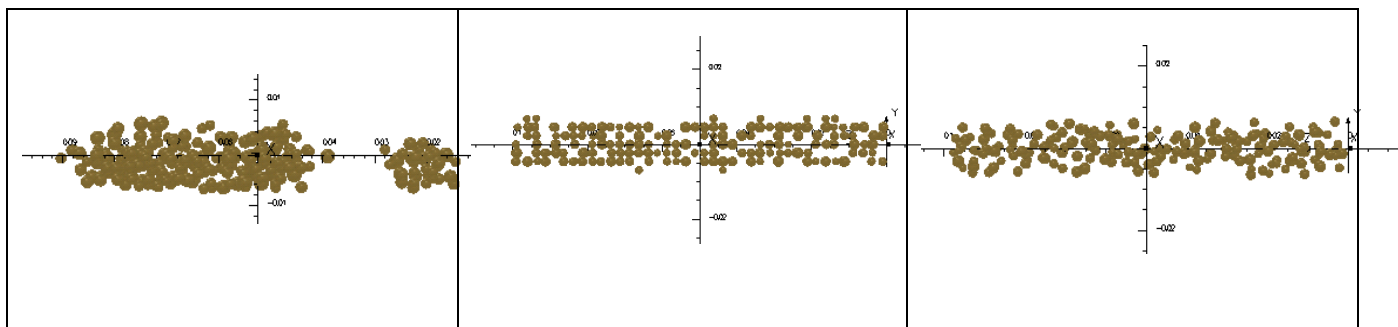
Rys. 5.8. Losowanie według skupisk rozkładu ziaren ferromagnetycznych we włóknie:
a) interfejs, b) wynik losowania, c) położenie i promień wylosowanych skupisk, d) pojedyncze skupisko

W wyniku działania poszczególnych algorytmów generacji otrzymano następujące dane wyjściowe:

- Zestaw danych wraz z wylosowanym rozmieszczeniem ziaren z możliwością wykorzystania go w innych algorytmach obliczeniowych;
- Kod dla aplikacji OPERA 3D tworzący dla wylosowanego zestawu model MES.

Tabl. 5.1. Przykłady generacji mikrowłókna wraz z modelami MES

<i>Losowanie według skupisk</i>	<i>Losowanie równomierne</i>	<i>Losowanie nierównomierne</i>
Zagęszczenie założone = 8 % Zagęszczenie osiągnięte = 7.9849 % Ilość kulek = 217 Ilość losowań = 7148 / 25000	Zagęszczenie założone = 8 % Zagęszczenie osiągnięte = 7.9647 % Ilość kulek = 196 Ilość losowań = 311 / 25000	Zagęszczenie założone = 8 % Zagęszczenie osiągnięte = 7.9939 % Ilość kulek = 187 Ilość losowań = 375 / 25000
		
		



W tabeli 5.1 przedstawiono kolejno: widok włókna wraz z ziarnami ferromagnetyka, wygenerowane w środowisku MATLAB oraz po dwa widoki ziaren wczytanych do pakietu OPERA 3D. Wszystkie ilustracje obrazują trzy sposoby losowania rozkładu proszku ferromagnetycznego (ziaren) we włóknie, tj.: w skupiskach, równomiernego i nierównomiernego.

Tak wygenerowane włókna z wylosowanym rozmieszczeniem ziaren zostały przebadane polowo, co opisano w kolejnym rozdziale.

6. Trójwymiarowe modele MES mikro- i nanowłókien magnetycznych

6.1. Metoda Elementu Skończonego

Metoda Elementu Skończonego (MES) w chwili obecnej jest jedną z najczęściej stosowanych metod numerycznych służących do rozwiązywania zagadnień pola elektromagnetycznego. Dzieje się tak z dwóch powodów. Po pierwsze, MES jest skuteczną metodą, którą z łatwością można stosować w wielu dziedzinach. Po drugie, istnieje duża liczba komercyjnych programów, które są wykorzystywane do kompleksowego rozwiązywania dowolnych zagadnień bez konieczności tworzenia indywidualnych algorytmów (Furlani, 2001).

Metoda ta wykorzystywana jest dla szerokiego spektrum zagadnień liniowych i nieliniowych. Związana jest między innymi z problematyką dotyczącą obliczeń rozkładu pola elektromagnetycznego w przetwornikach elektromechanicznych (Nowak, 1995), (Wiak et al., 2005), (Di Barba et al., 2008) rozkładu pola temperatury (Antal et al., 2005) oraz obliczeń wytrzymałościowych (Liu, Quek, 2003)).

Metoda Elementu Skończonego dzieli się na poniższe etapy (Cichoń, 2005), (Furlani, 2001):

1. Podział obszarów, w których poszukiwane jest rozwiązanie na skończoną liczbę podobszarów zwanych elementami wraz z numerowaniem węzłów, które definiują te elementy;
2. Wybór funkcji aproksymującej dla poszukiwanej wielkości pola w każdym elemencie.
3. Sformułowanie rozwiązania w każdym elemencie, jako funkcję wartości węzłowych zależną od zmiennych przestrzennych w tym elemencie;
4. Zdefiniowanie funkcjonału dla równania opisującego analizowane pole oraz przedstawienie go, jako sumę funkcjonałów dla poszczególnych elementów;
5. Przeprowadzenie minimalizacji funkcjonału za względu na wartości węzłowe, czego wynikiem są równania macierzowe elementów;
6. Przekształcenie równań macierzowych elementów na równanie macierzowe dla całego obszaru;
7. Rozwiązanie równania macierzowego.

Równanie (3.22) dla pola magnetycznego opisanego skalarnym potencjałem magnetycznym V_μ można przedstawić następująco:

$$\frac{\partial^2 V_\mu}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_\mu}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_\mu}{\partial z^2} = 0 \quad (6.1)$$

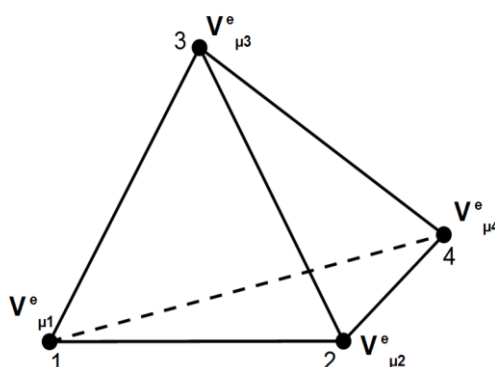
natomiast warunki brzegowe Dirichleta i Neumana w poniższy sposób:

$$V_\mu = 0 \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial V_\mu}{\partial n} = 0 \quad (6.3)$$

Rozwiązania równania (6.1) poszukujemy w obszarze Ω ograniczonym brzegiem Γ . Obszar Ω podzielony został na podobszary Ω^e – elementy skończone. W elementach tych poszukiwane rozwiązanie można aproksymować funkcją liniową, która w układzie kartezjańskim, dla czworościennych elementów trójwymiarowych (Rys. 6.1.) ma postać:

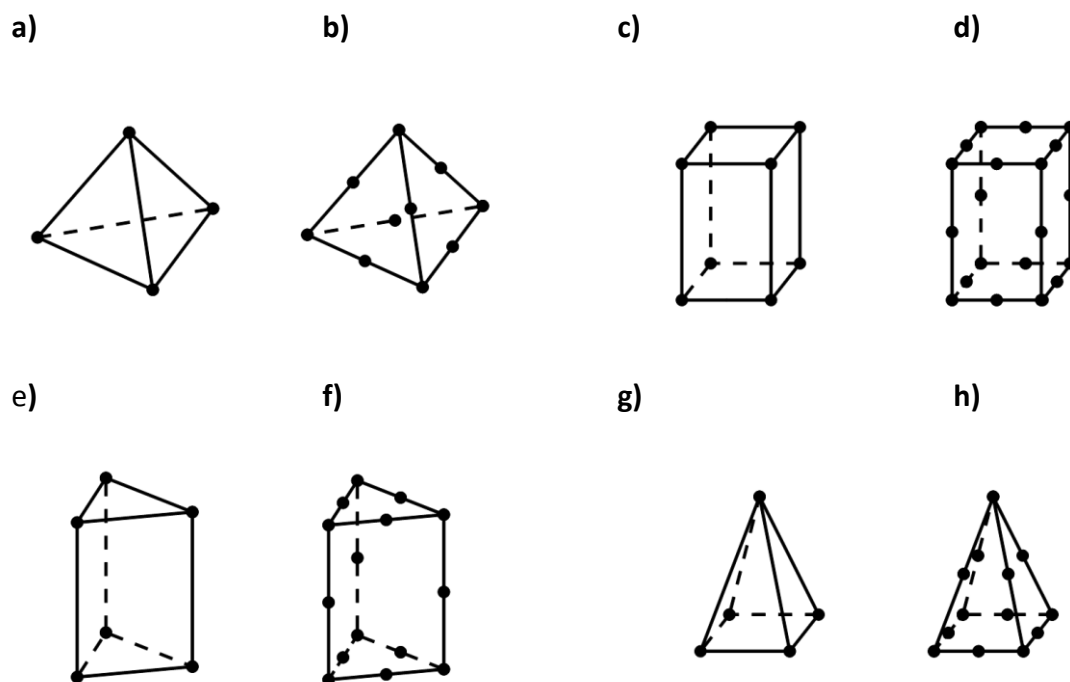
$$V_\mu^e(x, y, z) = a + bx + cy + dz \quad (6.4)$$



Rys. 6.1. Czworościenny element siatki z oznaczonymi węzłami

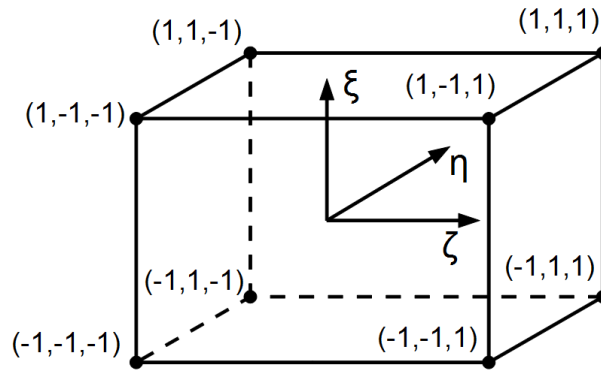
Oprócz wymienionego powyżej czterowęzłowego elementu czworościennego do aproksymacji obszaru, w którym poszukiwane jest rozwiązanie, stosuje się również inne rodzaje elementów. Elementy te rozróżnia się zarówno pod względem kształtu, jak i stopnia

wielomianu, jakim aproksymowana jest poszukiwana funkcja wewnątrz elementu. Do najpowszechniej stosowanych elementów można zaliczyć, oprócz elementów czworościennych (Rys. 6.2a i 6.2b), także elementy sześciocienne (Rys. 6.2c i 6.2d), graniastosłupowe (Rys. 6.2e i 6.2f) oraz ostrosłupowe (Rys. 6.2g i 6.2h).



Rys. 6.2. Elementy czworościenne: a) liniowy, b) kwadratowy;
 elementy sześciocienne: c) liniowy, d) kwadratowy;
 elementy pięciocienne: e) liniowy, f) kwadratowy;
 elementy ostrosłupowe: g) liniowy, h) kwadratowy (Rusiski, 1994)

Do opisu funkcji kształtu elementów sześciociennych wygodniejsze jest zastosowanie przekształcenia globalnego układu współrzędnych XYZ do lokalnego układu współrzędnych ξ, η, ζ (Zienkiewicz, 2000), (Sikora, 2008), (Kaltenbacher, 2007- Rys. 6.3).



Rys. 6.3. Element sześciocienny 8-węzłowy w lokalnym układzie współrzędnych ξ, η, ζ (Zienkiewicz, 2000), (Sikora, 2008)

W przypadku elementów sześciociennych 8-węzłowych (liniowych), funkcję kształtu N_i w lokalnym układzie współrzędnych można zapisać następująco (Zienkiewicz, 2000), (Kaltenbacher, 2007):

$$N_i = \frac{1}{8} \left(1 + \xi_i \xi + \eta_i \eta + \zeta_i \zeta \right) \quad i = 1, \dots, 8 \quad (6.5)$$

Natomiast dla elementów sześciociennych 20-węzłowych (kwadratowych) funkcje kształtu przyjmują postać (Zienkiewicz, 2000):

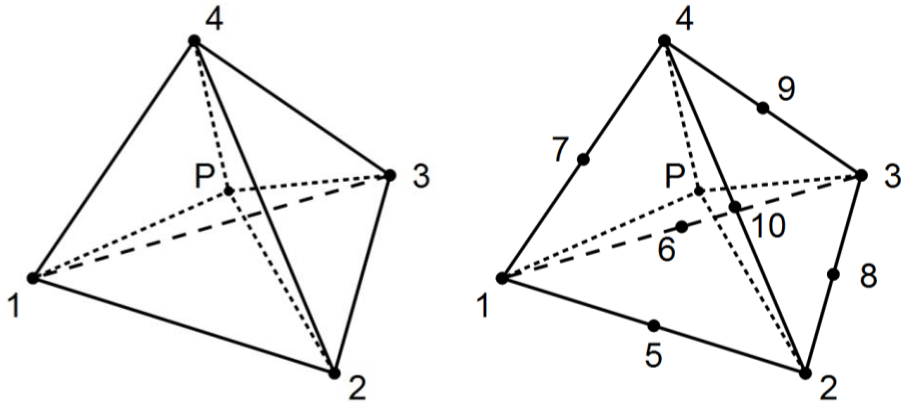
- dla węzłów narożnych

$$N_i = \frac{1}{8} \left(1 + \xi_i \xi + \eta_i \eta + \zeta_i \zeta + \xi_i \eta + \xi_i \zeta + \zeta_i \zeta - 2 \right) \quad i = 1, \dots, 8 \quad (6.6)$$

- dla węzłów na krawędziach

$$N_i = \frac{1}{4} \left(1 - \xi^2 + \eta_i \eta + \zeta_i \zeta \right) \quad \xi_i = 0, \quad \eta_i = \pm 1, \quad \zeta_i = \pm 1 \quad i = 1, \dots, 8 \quad (6.7)$$

W podobny sposób, używając współrzędnych lokalnych, można opisać także elementy czworocienne (Kaltenbacher, 2007), jednak częściej można spotkać zapis przy użyciu współrzędnych objętościowych (Liu, Quek, 2003), (Zienkiewicz, 2000 – Rys .6.4).



Rys. 6.4. Elementy czworoscienne: a) element 4-węzłowy, b) element 10-węzłowy
(Zienkiewicz, 2000)

We współrzędnych objętościowych L_i funkcje kształtu N_i można przedstawić, jako stosunek objętości wyznaczonej przez punkt P leżący wewnątrz elementu oraz trzy z czterech węzłów elementu, dla których dana funkcja kształtu nie jest określana (Zienkiewicz, 2000), (Liu, Quek, 2003):

$$\begin{aligned} N_1 = L_1 &= \frac{V_{P234}}{V_{1234}} \\ N_2 = L_2 &= \frac{V_{P134}}{V_{1234}} \\ N_3 = L_3 &= \frac{V_{P124}}{V_{1234}} \\ N_4 = L_4 &= \frac{V_{P123}}{V_{1234}} \end{aligned} \quad (6.8)$$

przy czym zależności między współrzędnymi objętościowymi a współrzędnymi układu kartezjańskiego są następujące:

$$\begin{aligned} x &= L_1 x_1 + L_2 x_2 + L_3 x_3 + L_4 x_4 \\ y &= L_1 y_1 + L_2 y_2 + L_3 y_3 + L_4 y_4 \\ z &= L_1 z_1 + L_2 z_2 + L_3 z_3 + L_4 z_4 \end{aligned} \quad (6.9)$$

W przypadku czworoscianu 10-węzłowego (kwadratowego) funkcje kształtu dla poszczególnych węzłów można opisać poniższymi równaniami (Zienkiewicz, 2000):

- dla węzłów w wierzchołkach

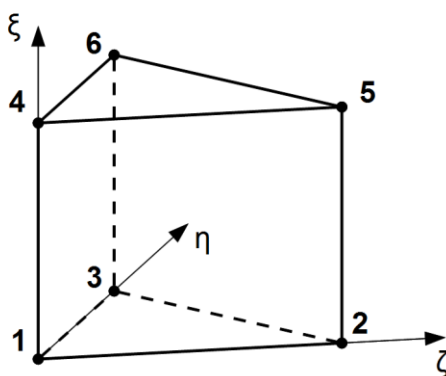
$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta) & N_2 &= \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta)(1 + \zeta) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta)(1 - \zeta) & N_4 &= \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta) \end{aligned} \quad (6.10)$$

- dla węzłów na krawędziach

$$\begin{aligned} N_5 &= 4L_1L_2 & N_6 &= 4L_1L_3 & N_7 &= 4L_1L_4 \\ N_8 &= 4L_2L_3 & N_9 &= 4L_3L_4 & N_{10} &= 4L_2L_4 \end{aligned} \quad (6.11)$$

Wśród elementów graniastosłupowych najpowszechniej stosowane są, oprócz prostopadłościanów, graniastosłupy o podstawie trójkątnej (elementy pięciościenne). Dla tego rodzaju elementów można przyjąć lokalny układ współrzędnych ξ, η, ζ (Dhondt, 2004 – Rys. 6.5):

$$0 \leq \xi, \eta \leq 1, \quad -1 \leq \zeta \leq 1, \quad \xi + \eta \leq 1 \quad (6.12)$$



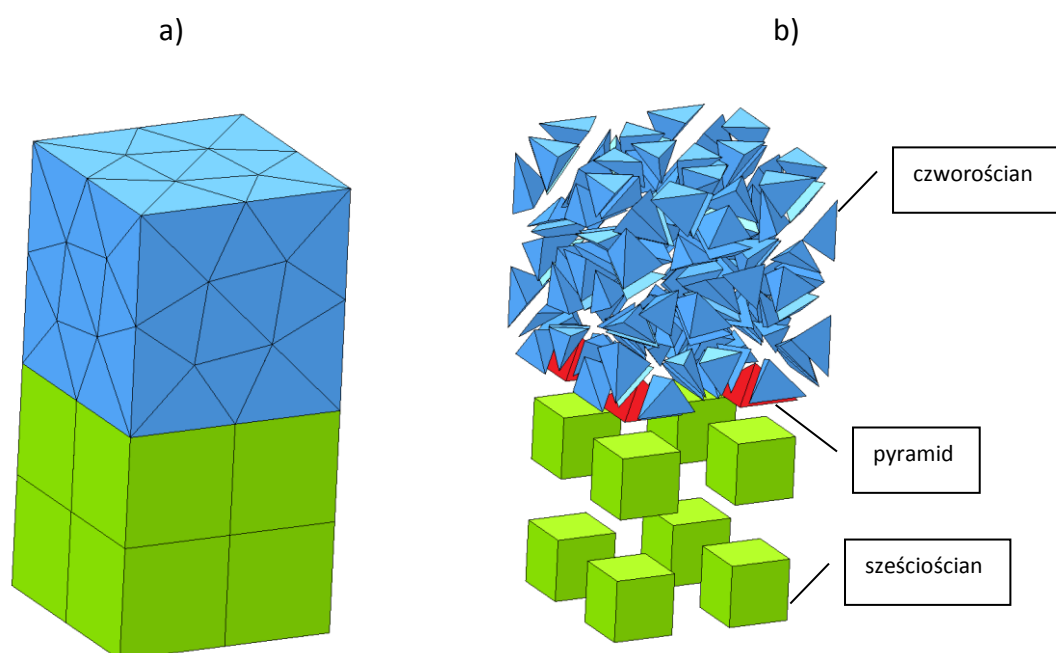
Rys. 6.5. Element pięciościenny 6-węzłowy (Dhondt, 2004)

Funkcje kształtu elementu pięciościennego 6-węzłowego (liniowego), we współrzędnych lokalnych, mają postać (Dhondt, 2004):

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1 - \xi - \eta)(1 - \zeta) & N_2 &= \frac{1}{4}(1 - \xi - \eta)(1 + \zeta) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1 + \xi - \eta)(1 - \zeta) & N_4 &= \frac{1}{4}(1 + \xi - \eta)(1 + \zeta) \\ N_5 &= \frac{1}{4}(1 - \xi + \eta)(1 - \zeta) & N_6 &= \frac{1}{4}(1 - \xi + \eta)(1 + \zeta) \end{aligned} \quad (6.13)$$

W podobny sposób można zapisać funkcje kształtu dla elementu pięciościennego 15-węzłowego (kwadratowego) (Dhondt, 2004).

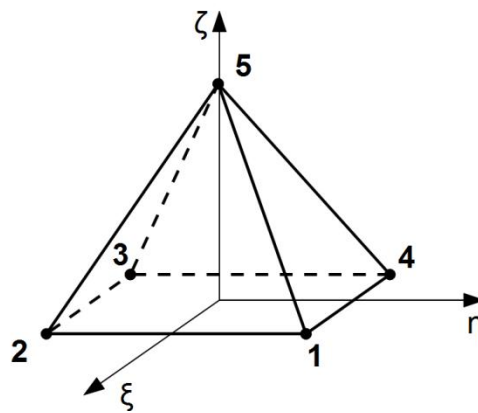
Szczególny rodzaj elementów stanowią elementy ostrosłupowe o podstawie prostokątnej (elementy typu *pyramid*). Wykorzystywane są one głównie w siatkach niestukturalnych, jako elementy warstwy przejściowej pomiędzy elementami sześciściennymi i czworościennymi (Owen et al., 2001), (Opera Reference Manual, 2009). Przykład zastosowania elementów tego typu elementów przedstawiono na rysunku 6.6:



Rys. 6.6. Siatka podziałowa z elementami typu pyramid:
a) powierzchniowa; b) odpowiadająca jej siatka objętościowa

Funkcje kształtu dla 5-węzłowego (liniowego) elementu typu pyramid w lokalnym układzie współrzędnych ξ , η , ζ (Rys. 6.7) można opisać następującymi wzorami (Zgainski et al., 1996):

$$\begin{aligned}
N_1 & \frac{1}{4} \left[\zeta + \eta - \zeta + \frac{\xi \eta \zeta}{1 - \zeta} \right] \\
N_2 & \frac{1}{4} \left[\zeta + \eta - \zeta - \frac{\xi \eta \zeta}{1 - \zeta} \right] \\
N_3 & \frac{1}{4} \left[\zeta - \eta - \zeta + \frac{\xi \eta \zeta}{1 - \zeta} \right] \\
N_4 & \frac{1}{4} \left[\zeta - \eta - \zeta - \frac{\xi \eta \zeta}{1 - \zeta} \right] \\
N_5 & = \zeta
\end{aligned} \tag{6.14}$$



Rys. 6.7. 5-wzłowy elementu typu piramid w lokalnym układzie współrzędnych (Zgainski et al., 1996)

Wartości magnetycznego potencjału skalarnego $V_\mu(x, y, z)$, dla poszczególnych węzłów czworościanu można zapisać w postaci macierzowej (Furlani, 2001):

$$\begin{aligned}
V_{\mu 1}^e & \quad 1 \quad x_1 \quad y_1 \quad z_1 \quad a \\
V_{\mu 2}^e & \quad 1 \quad x_2 \quad y_2 \quad z_2 \quad b \\
V_{\mu 3}^e & \quad 1 \quad x_3 \quad y_3 \quad z_3 \quad c \\
V_{\mu 4}^e & \quad 1 \quad x_4 \quad y_4 \quad z_4 \quad d
\end{aligned} = \tag{6.15}$$

Przekształcając równanie macierzowe (6.15) można wyznaczyć wartości współczynników a, b, c, d:

$$\begin{matrix} a & 1 & x_1 & y_1 & z_1 & -1 & V_{\mu 1}^e \\ b & 1 & x_2 & y_2 & z_2 & & V_{\mu 2}^e \\ c & 1 & x_3 & y_3 & z_3 & & V_{\mu 3}^e \\ d & 1 & x_4 & y_4 & z_4 & & V_{\mu 4}^e \end{matrix} = \quad (6.16)$$

Można zatem przedstawić magnetyczny potencjał skalarny $V_{\mu}^e(x, y, z)$ określony dla elementu, w zależności od wartości węzłowych, przez podstawienie wyrażeń od (6.14) do (6.16). W efekcie można uzyskać równanie magnetycznego potencjału skalarnego w postaci (Furlani, 2001):

$$\begin{matrix} a & 1 & x_1 & y_1 & z_1 & -1 & V_{\mu 1}^e \\ b & 1 & x_2 & y_2 & z_2 & & V_{\mu 2}^e \\ c & 1 & x_3 & y_3 & z_3 & & V_{\mu 3}^e \\ d & 1 & x_4 & y_4 & z_4 & & V_{\mu 4}^e \end{matrix} = \quad (6.17)$$

lub w postaci:

$$V_{\mu}^e(x, y, z) = \sum_{k=1}^4 V_{\mu k}^e N_k^e(x, y, z), \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (6.18)$$

Przy czym,

$$N_k^e(x, y, z) = \frac{1}{6V^e} (a_k + b_k x + c_k y + d_k z), \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (6.19)$$

to tzw. *funkcje kształtu*, które charakteryzują się tym, że dla węzła, dla którego są napisane przyjmują wartość 1, a dla pozostałych węzłów wartość 0 (Bastos, Sadowski, 2003), co można zapisać następująco (Liu, Quek, 2003):

$$N_k^e(x, y, z) = \begin{cases} 0 & k \neq j \\ 1 & k = j \end{cases}, \quad k, j = 1, 2, 3, 4 \quad (6.20)$$

Występujący we wzorze (6.19) opisującym funkcje kształtu współczynnik V^e , to *objętość elementu e* określona wzorem (Di Barba et al., 2008):

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (6.21)$$

natomiast współczynniki a_k , b_k , c_k i d_k dla węzła 1 można przedstawić w postaci:

$$\begin{aligned} a_1 &= \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} & b_1 &= \begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \\ c_1 &= \begin{vmatrix} x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \\ x_4 & 1 & z_4 \end{vmatrix} & d_1 &= \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (6.22)$$

Dla węzłów 2, 3 i 4 współczynniki te można otrzymać przez cykliczną zmianę indeksów (Turowski et al., 1993).

Równania MES można wyprowadzić z zasady wariacyjnej albo metody Galerkina (Bolkowski, 1993). W metodzie wariacyjnej po aproksymacji obszaru Ω , w którym poszukiwane jest rozwiązanie elementami skończonym oraz po wyborze funkcji kształtu należy skonstruować funkcjonał $I(V_\mu)$. Funkcjonał ten można przedstawić w postaci (Turowski et al., 1993), (Bolkowski et al., 1993), (Sikora, 2011):

$$I(V_\mu) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \left(\frac{\partial^2 V_\mu}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_\mu}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_\mu}{\partial z^2} \right) dx dy dz + \int_{\Gamma} V_\mu d\Gamma \quad (6.23)$$

Określony wzorem (6.23) funkcjonał należy zminimalizować, czyli obliczyć wyrażenie (Bianchi, 2005), (Bolkowski et al., 1993):

$$\frac{\partial I}{\partial V_\mu} = 0 \quad (6.24)$$

Ponieważ funkcjonał $I(V_\mu)$ (wzór 6.23) może być przedstawiony, jako suma poszczególnych funkcjonałów zdefiniowanych dla elementów, co pokazano poniżej (Bianchi, 2005), (Bolkowski et al., 1993):

$$I = \sum_{i=1}^n I_i^e \quad (6.25)$$

Zatem równanie (6.24) można przedstawić, jako pochodną funkcjonału I^e określonego dla elementu o wartościach węzłowych funkcji V_μ dla danego elementu. Równanie (6.24) można przedstawić w postaci (Bianchi, 2005):

$$\frac{\partial I^e}{\partial V_{\mu i}} = 0 \quad (6.26)$$

Dla równania (6.1) opisującego pole magnetyczne pochodna funkcjonału przybiera następującą postać:

$$\frac{\partial I^e}{\partial V_{\mu i}} = \frac{1}{2} \int_{\Omega^e} \left(\frac{\partial V_\mu^e}{\partial x} \frac{\partial}{\partial V_{\mu i}} \frac{\partial V_\mu^e}{\partial x} + \frac{\partial V_\mu^e}{\partial y} \frac{\partial}{\partial V_{\mu i}} \frac{\partial V_\mu^e}{\partial y} + \frac{\partial V_\mu^e}{\partial z} \frac{\partial}{\partial V_{\mu i}} \frac{\partial V_\mu^e}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (6.27)$$

Uwzględniając zależności pomiędzy poszczególnymi wyrazami wzoru na pochodną funkcjonału I^e i funkcjami kształtu (6.19) można zapisać wzór (6.27) w postaci macierzowej (Turowski et al., 1993), (Bolkowski et al., 1993):

$$\frac{\partial I^e}{\partial V_\mu} = \mathbf{h}^e \mathbf{V}_\mu^e, \quad (6.28)$$

gdzie: $\mathbf{h}^e$ - macierz elementu

Dla całego obszaru Ω równanie macierzowe przyjmuje postać (Cichoń, 2005), (Turowski et al., 1993), (Bolkowski et al., 1993):

$$\mathbf{H} \cdot \mathbf{V}_\mu = 0, \quad (6.29)$$

gdzie: $\mathbf{H}$ - macierz sztywności

$\mathbf{V}_\mu$ - macierz poszukiwanych wartości elektrycznego potencjału skalarne.

6.2. Budowa i analiza modeli polowych pojedynczych włókien magnetycznych

W celu opracowania kompleksowych trójwymiarowych modeli polowych wiązek mikrowłókien magnetycznych należało zastanowić się nad wieloma kwestiami związanymi z zamodelowaniem tak skomplikowanej struktury, jaką są rozważane włókna. W zbudowanym dedykowanym algorytmie, służącym do modelowania mikrowłókien magnetycznych (Rys. 5.1) wyraźnie widać, że analiza polowa została poprowadzona w pierwszej kolejności dla pojedynczego włókna, a dopiero po stworzeniu modelu homogenizowanego, dla całej wiązki włókien. Warto w tym miejscu nadmienić, iż struktura tego algorytmu zmieniała się, jako efekt wprowadzanych zmian do wcześniej zakładanej koncepcji. Bowiernie ideologia opracowania zintegrowanych modeli komputerowych nanowłókien magnetycznych nie była jednoznaczna i przez cały czas realizacji pracy była dopracowywana.

Idea budowy modeli komputerowych mikrowłókien magnetycznych jest bardzo skomplikowana. Spowodowane jest to tym, że proszek ferromagnetyczny, który wypełnia włókno jest rozdrobniony (w wyniku czego przyjmuje nieregularne kształty) i rozmieszczony we włóknie w sposób losowy. Dodatkowym utrudnieniem jest to, że wytwórcy mikrowłókien magnetycznych posiadają jedynie informacje o:

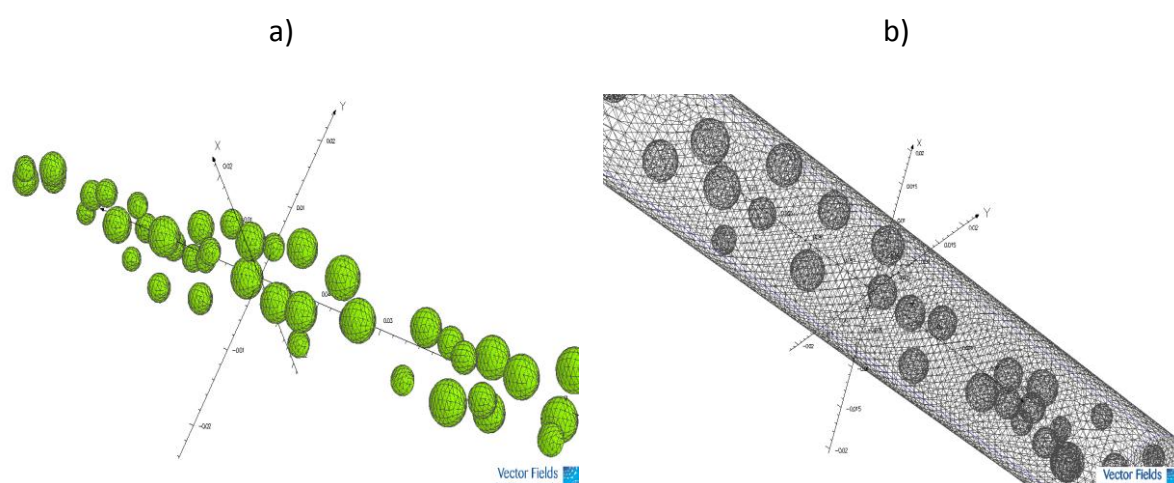
- rozmiarze mikrowłókna (długość i średnica);
- przedziale, w jakim zawierają się średnice (tak naprawdę przekątne) ziaren ferromagnetyka;
- objętościowej (procentowej) zawartości ferromagnetyka we włóknie - zagęszczeniu.

Posiadając tak wybiórcze, bliżej nieokreślone, dane wejściowe trudno jest dokonać szybkiej i precyzyjnej analizy włókien metodami komputerowymi. Pomimo, że Metoda Elementu Skończonego jest czasochłonna uznano, że najlepiej nadaje się do obliczenia modeli zastępczych dla materiałów o tak nieregularnych kształtach.

Całość prac badawczych sprowadzała się do budowy modeli komputerowych dla wiązek mikrowłókien magnetycznych wytworzonych w Katedrze Włókien Sztucznych Politechniki Łódzkiej. Autorka pracy dysponowała charakterystykami magnesowania wiązek

włókien, pomierzonymi w Politechnice Częstochowskiej, próbkami wiązek oraz dodatkowymi danymi od Wytwórców.

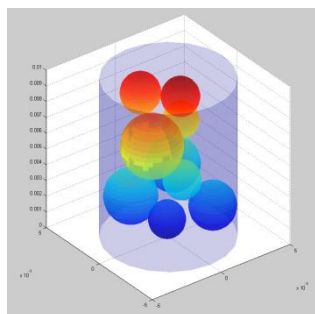
W pierwszej fazie pracy nad budową modeli komputerowych mikrowłókien magnetycznych, zostały zamodelowane różne struktury pojedynczych włókien, z wykorzystaniem pakietu OPERA 3D. Do analizy wzięto włókno o długości 20 cm i promieniu 6 μm .



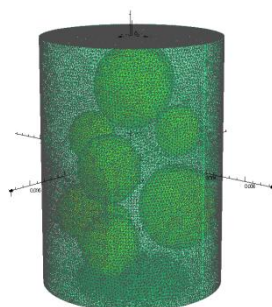
Rys. 6.8. Przybliżone widoki mikrowłókna magnetycznego:
a) ziarna ferromagnetyka, b) włókno z naniesioną siatką elementów skończonych

Jak się okazało zbyt duża dysproporcja między wymiarami średnicy [μm], a długością włókna [cm] bardzo spowalniała proces generacji modelu komputerowego. Fakt ten wymusił dokonanie badań dla wycinków (segmentów) włókna, tak aby oba wymiary zbliżyły się do siebie. W pierwszej kolejności zamodelowano wycinek włókna o: długości 10 μm , średnicy włókna 8 μm , średnicy ziaren z przedziału (2-5) μm oraz zagęszczeniu 20%, co zobrazowano na rysunku 6.9.

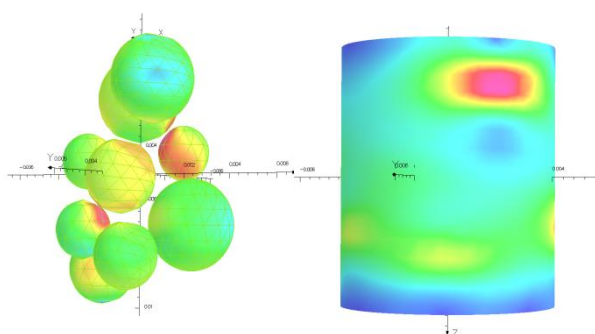
Krok 1:
Generacja włókna
z ferromagnetykiem w MATLABIE



Krok 2:
Wczytanie danych do OPERY
oraz wykonanie siatki obiektu



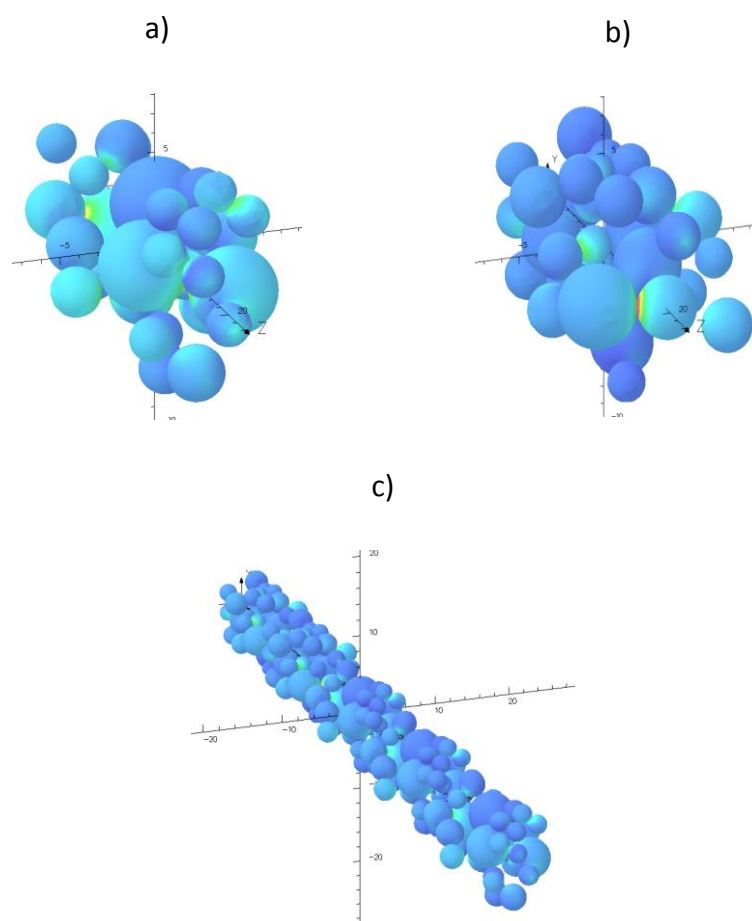
Krok 3:
Analiza wyników w Post-Processorze



Rys. 6.9. Etapy analizy modeli polowych mikrowłókien magnetycznych

Okazało się jednak, że nie można nadto skracać włókna, gdyż wówczas pojawia się problem z generacją ziaren o odpowiednich rozmiarach i zagęszczeniu. W związku z tym przystąpiono do analizy nieco dłuższych segmentów.

Stworzono model stanowiący jedną dziesięciotysięczną część 20-centymetrowego włókna (Rys. 6.10 a i b), tj. segment o długości 20 μm , średnicy włókna 12 μm oraz średnicy ziaren z przedziału (2-5) μm . Zagęszczenie ferromagnetyka w analizowanym przypadku wynosiło 23%, co wynikało z tego, że było to największe wypełnienie mikrowłókna magnetykiem, przy którym włókno nie traciło właściwości mechanicznych, czyli elastyczności i giętkości.



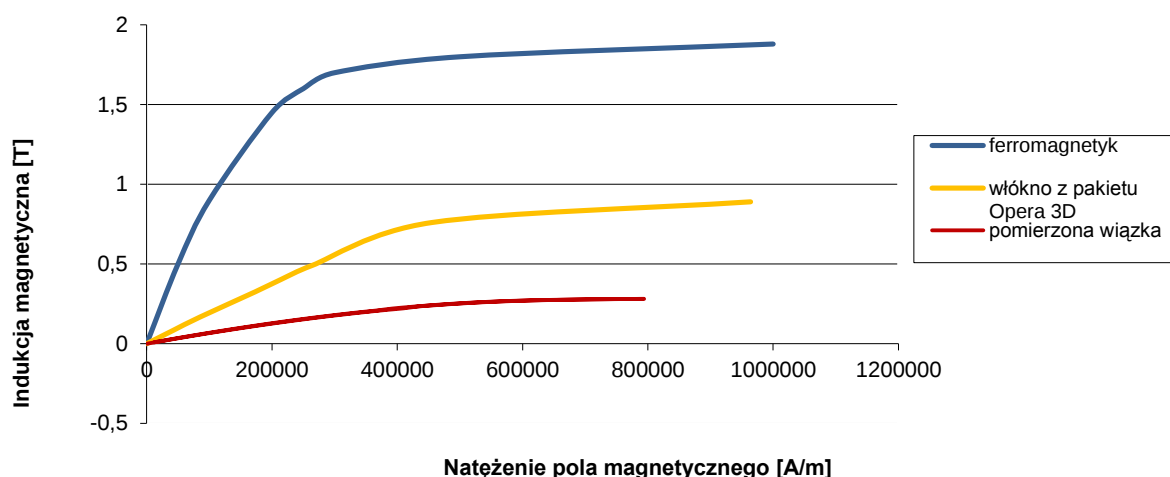
Rys. 6.10. Wycinki mikrowłókna zamodelowane w pakiecie Opera 3D:
a, b) pojedynczy segment stanowiący jedną dziesiętą część dwudziestocentymetrowego mikrowłókna;
c) połączenie pięciu segmentów stanowiących jedną dziesiętą część 20-centymetrowego mikrowłókna;

Na rysunku 6.10c widać, jak połączono w ciąg, kilka 20-mikrometrowych segmentów. Z powyższych czynności wyniknął szereg wniosków. Obserwowano zmiany wartości przenikalności magnetycznej w różnych wariantach łączenia ze sobą segmentów. Cała analiza była oparta o próby reprezentatywne. Wyniki porównywano tak długo, aż były one powtarzalne i spójne. Poniższa tabela (Tabl. 6.1) zestawia wszystkie wnioski dotyczące zmian wartości przenikalności μ_r w wyniku różnych rozkładów ziaren i konfiguracji połączeń segmentów.

Tabl. 6.1. Zmiany wartości przenikalności magnetycznej w różnych segmentach mikrowłókna magnetycznego

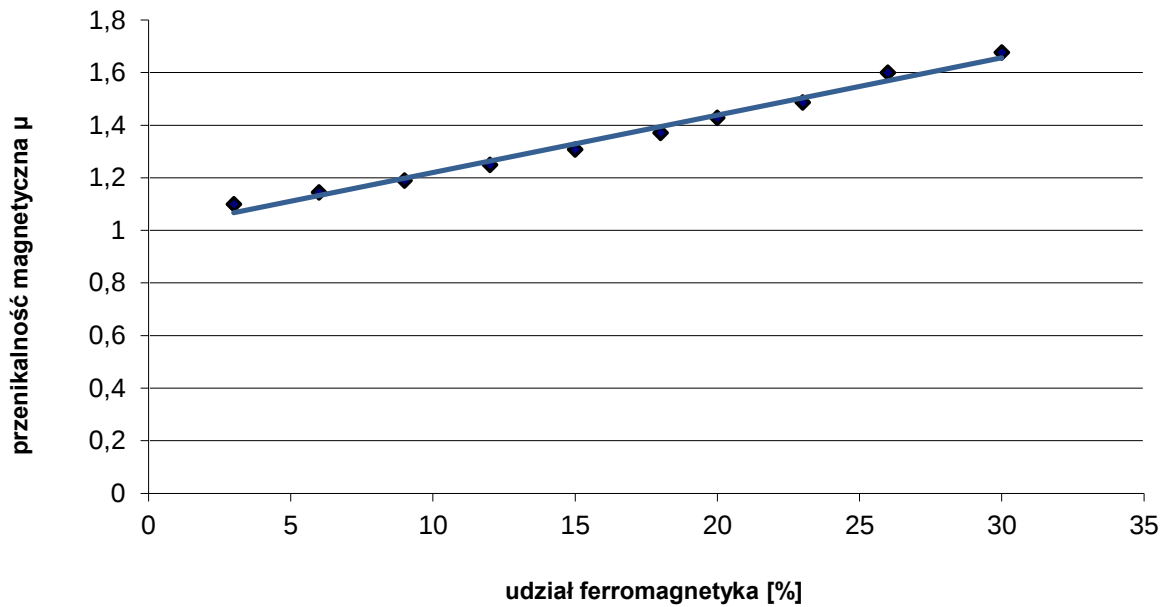
	Rodzaj analizy	Zmiana przenikalności magnetycznej μ_r
1.	Wielokrotna generacja ziaren (rozkład nierównomierny)	Wartość μ_r nie zmieniła się
2.	Łączenie w ciąg kilku segmentów składowych (pięć segmentów z różnie wylosowanym rozkładem nierównomiernym)	Wartość μ_r nieznacznie zmalała względem wartości pojedynczego segmentu składowego
3.	Łączenie w ciąg kilku segmentów składowych (pięć segmentów z takim samym rozkładem nierównomiernym)	Wartość μ_r nie zmieniła się względem powyższego przypadku
4.	Wygenerowanie jednego segmentu 5-ciokrotnie dłuższego niż w przypadku pierwszym	Wartość μ_r nieznacznie wzrosła
5.	Różnorodna generacja ziaren (rozkład równomierny, nierównomierny, w skupiskach)	Największa przenikalność magnetyczna występuje w przypadku rozkładu nierównomiernego, a najmniejsza dla rozkładu w skupiskach

Dla przypadku mikrowłókna o zagęszczeniu procentowym 23% wykreślono krzywe magnesowania B/H w różnych przypadkach (Rys. 6.11). Najwyższa krzywa, jest to krzywa uzyskana dla samego proszku ferromagnetyka (ferryt baru), który w późniejszych etapach wytwarzania mikrowłókien jest implementowany do ich wnętrza. Środkowa krzywa jest krzywą uzyskaną w pakiecie OPERA 3D dla pojedynczego włókna (wyniki analizy komputerowej autorki, otrzymane dla tego samego mikrowłókna, co wyniki pomiarowe opisane poniżej). Natomiast krzywa położona najniżej jest krzywą wykreśloną na drodze pomiarowej dla całej wiązki (wiązka składała się z pojedynczych włókien o zbliżonych parametrach) mikrowłókien magnetycznych (badania wykonane przez Politechnikę Częstochowską na zlecenie Katedry Włókien Sztucznych Politechniki Łódzkiej).



Rys. 6.11. Krzywe magnesowania mikrowłókien magnetycznych oraz ziaren ferromagnetyka

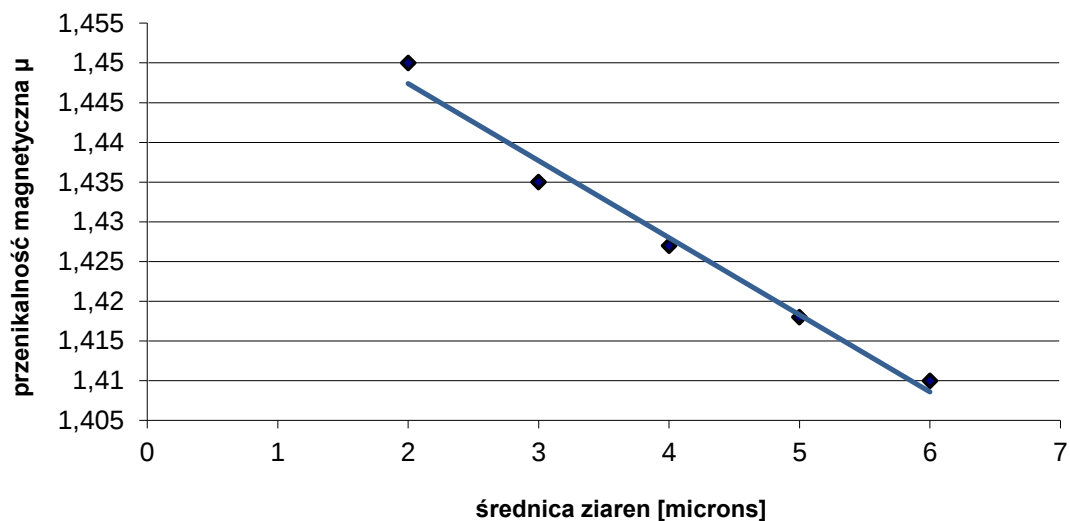
W celu określenia granicznych wartości rozmiarów ziaren ferromagnetycznych dokonano analizy porównawczej modeli komputerowych z ziarnami ferromagnetycznymi o kształcie kuli. Parametrem, jaki decyduje o znaczeniu i funkcjonalności mikrowłókien magnetycznych jest przenikalność magnetyczna całego włókna, jako materiału magnetycznego. Wiadomo, że czym większa procentowa zawartość magnetyka we wnętrzu włókna, tym lepsze parametry magnetyczne takiego materiału. W przypadku mikrowłókien magnetycznych można zaobserwować podobną tendencję, co pokazano na rysunku 6.12. Na wykresie widać, że analiza została zakończona w chwili, gdy procentowy udział magnetyka we włóknie wyniósł 30%. Ograniczenie to wynika z dwóch powodów. Po pierwsze, technologicznie nie jest możliwe wykonanie mikrowłókna na bazie celulozy z ferromagnetykiem, który stanowi więcej niż 30% całej objętości włókna. Przekroczenie tej wartości skutkuje obniżeniem własności fizyko - mechanicznych materiału. Włókno przestaje być elastyczne oraz zaczyna być łamliwe i kruche. Drugim powodem, dla którego przerwano poniższą analizę przy wypełnieniu 30% jest fakt, iż istnieją pewne utrudnienia w generowaniu, w pakiecie OPERA 3D, dużej ilości kuli, które się nie stykają i nie zachodzą na siebie. Jeśli nie zastosujemy się do tego założenia, wówczas platforma nie poradzi sobie z utworzeniem siatki elementów skończonych.



Rys. 6.12. Zależność wartości przenikalności magnetycznej μ_r od zagęszczenia procentowego ferromagnetyka w mikrowłóknie

Zbadano także wpływ zmiany rozmiaru ziaren na wartość przenikalności magnetycznej. Analiza została wykonana w pakiecie OPERA 3D dla włókna o wypełnieniu magnetycznym 23% dla następujących przypadków:

- Dla ziaren o średnicy z przedziału 2-5 μm : $\mu=1,487$
- Dla równych ziaren o średnicy 2 μm : $\mu=1,45$
- Dla równych ziaren o średnicy 3 μm : $\mu=1,435$
- Dla równych ziaren o średnicy 4 μm : $\mu=1,427$
- Dla równych ziaren o średnicy 5 μm : $\mu=1,412$
- Dla równych ziaren o średnicy 6 μm : $\mu=1,41$



Rys. 6.13. Zależność wartości przenikalności magnetycznej od wielkości ziaren ferromagnetyka w mikrowłóknie magnetycznym

Z powyższej analizy wynika, iż im większe ziarna, tym gorsze właściwości magnetyczne mikrowłókien. Najlepsze wyniki uzyskuje się dla ziaren o różnym rozmiarze – z przedziału 2-5 μm . Spowodowane jest to tym, że mikrokule o różnym rozmiarze najlepiej układają się w całej długości włókna, nie tworząc między sobą pustych przestrzeni powietrznych, które pogarszają właściwości magnetyczne materiału.

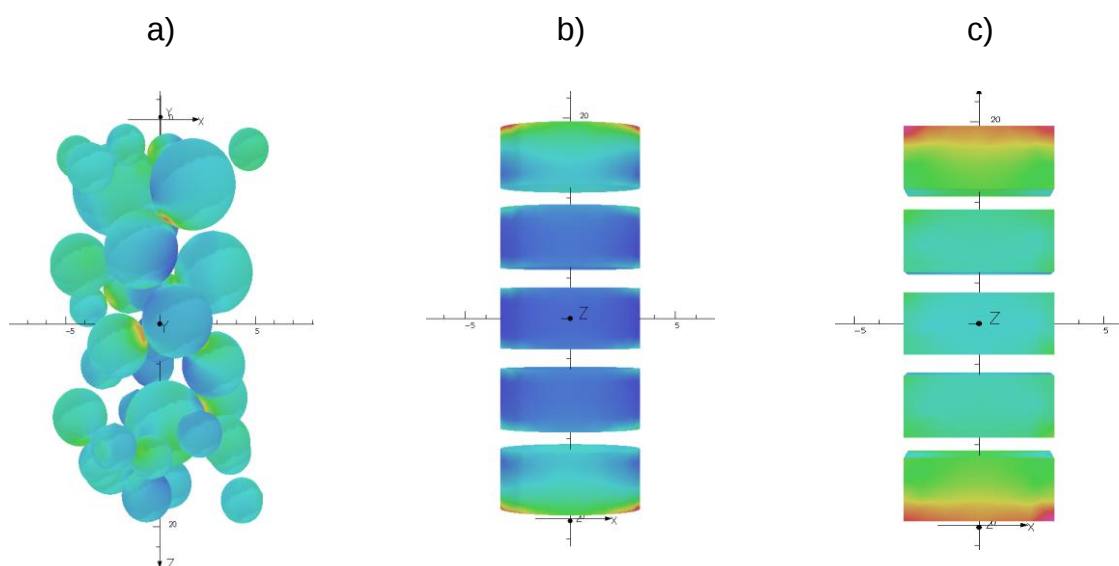
6.3. Modele homogenizowane

Homogenizacja jest to postępowanie zmierzające do uśrednienia własności materiałów, tak aby pozwalało to na traktowanie materiału niejednorodnego jako jednorodny (Wiak et al., 2010).

Modele homogenizowane zostały utworzone w celu uproszczenia budowy modeli komputerowych wiązek mikrowłókien magnetycznych, co w konsekwencji prowadzi do znacznego zmniejszenia wymiaru zadania (liczby równań). Jak już wspomniano wcześniej, ze względu na skomplikowany i niepowtarzalny kształt ziaren ferromagnetyka, będącego we wnętrzu włókien, budowa modeli komputerowych dla całych wiązek włókien była bardzo uciążliwa, wręcz niemożliwa. W związku z tym modele homogenizowane miały za zadanie przyspieszyć proces prowadzenia obliczeń Metodą Elementu Skończonego. Początkowo uproszczono kształt ziaren do kształtu kuli, a następnie stworzono model homogenizowany zastępujący pojedyncze włókno wraz z wypełniającym je magnetykiem.

Powyższe stwierdzenie mogło stać się prawdziwe, tylko wtedy gdy modele homogenizowane zostały opracowane precyzyjnie. Dlatego analiza porównawcza została przeprowadzona, dla wycinka włókna o długości 20 μm oraz średnicy 12 μm , w trzech przypadkach:

- Włókno wypełnione ziarnami (kulami) o średnicach (2-5) μm ;
- Włókno wypełnione walcami o równej wysokości, rozmieszczone w równym odstępach;
- Włókno wypełnione prostopadłościanami o równej wysokości, rozmieszczone w równym odstępach.



Rys. 6.14. Odzworowanie ziaren ferromagnetycznych przy pomocy następujących kształtów:
a) kuli, b) walców, c) prostopadłościanów

Powyższy rysunek przybliży jedynie obraz kształtu wypełnień włókna. Nie pokazuje całego włókna, ani nie odzwierciedla wartości indukcji magnetycznej.

Dla różnych przypadków wypełnienia mikrowłókien został zbadany wpływ zmiany zagęszczenia procentowego na wartość przenikalności magnetycznej.

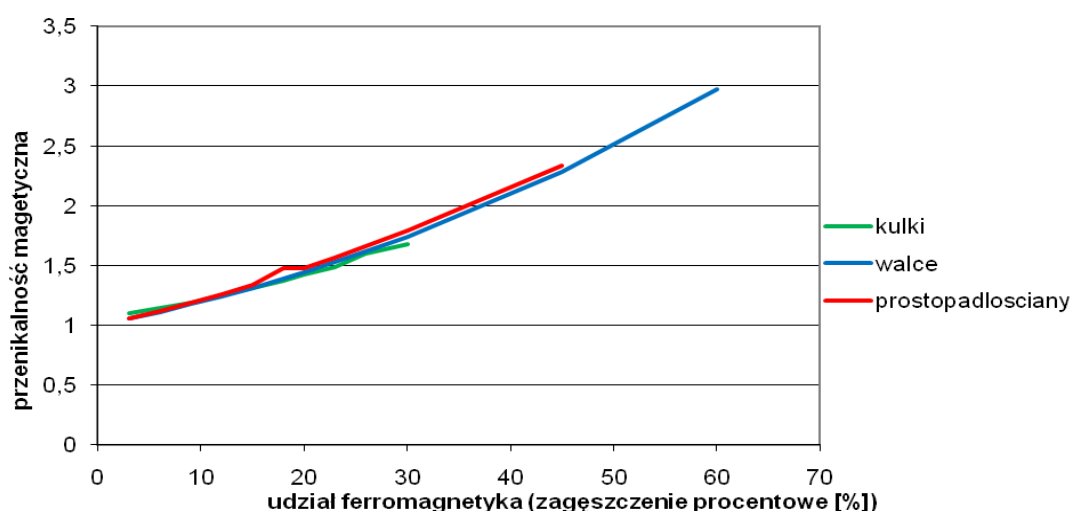
Tabl. 6.2. Zależność wartości przenikalności magnetycznej od zagęszczenia procentowego ferromagnetyka w mikrowłóknie

Zagęszczenie	3%	6%	6%	12%	15%	18%	20%	23%	26%	30%	45%
μ_r (kule)	1,10	1,15	1,19	1,25	1,31	1,37	1,43	1,49	1,60	1,68	-
μ_r (walce)	1,05	1,11	1,18	1,24	1,31	1,39	1,45	1,53	1,61	1,74	2,29
μ_r (prostopadłościany)	1,06	1,12	1,19	1,26	1,34	1,47	1,47	1,56	1,66	1,79	2,34

Tabl. 6.3. Odchylenie procentowe wyniku wartości μ względem kul dla uproszczonych modeli homogenizowanych z ferromagnetykiem w kształcie walców oraz prostopadłościanów

Zagęszczenie	3%	6%	6%	12%	15%	18%	20%	23%	26%	30%	45%
Odchylenie wyniku dla walców	4,3%	2,9%	1,3%	0,6%	0,4%	1,5%	1,2%	2,6%	0,9%	3,6%	-
Odchylenie dla prostopadłościanów	3,6%	2,1%	0,3%	0,8%	2,2%	7,4%	3,2%	5,0%	3,6%	6,7%	-

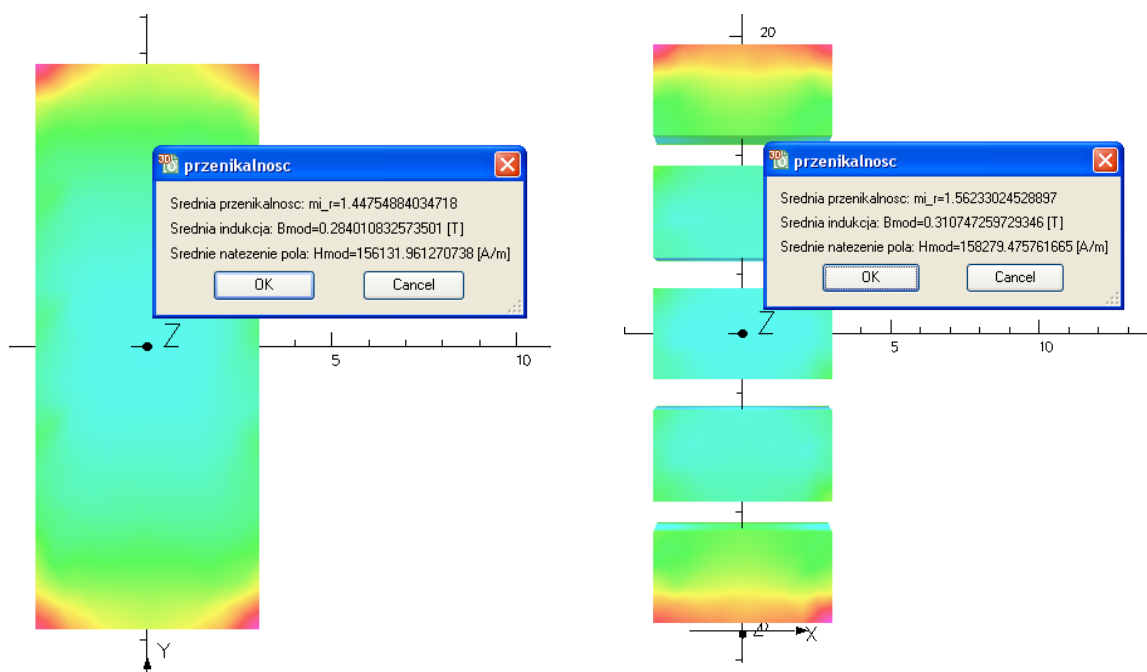
Powyższe tabele dowodzą, iż wartości przenikalności magnetycznej μ_r dla różnych - zastępczych kształtów wypełnień ferromagnetycznych - nie różnią się znacznie. Odchylenia wartości μ_r dla przypadku walców i prostopadłościanów względem wartości μ_r dla kul wahają się w przedziale (0.3 - 7.4)%. Jako punkt odniesienia wybrano kule, gdyż ten kształt jest najbardziej zbliżony (choć i tak uproszczony) do rzeczywistego kształtu proszków ferromagnetycznych.



Rys. 6.15. Zmiana wartości przenikalności magnetycznej pod wpływem zwiększania udziału proszku magnetycznego we włóknie dla różnych przypadków kształtu ferromagnetyka

Kompleksowa analiza, która została podsumowana na rysunku 6.15, wykazała, że uproszczenie kształtu ziaren, które i tak przyjmują przypadkowe formy, do kształtu

prostokątnianu, czy walca nie powoduje dużych odchyłek w wynikach wartości przenikalności magnetycznej.



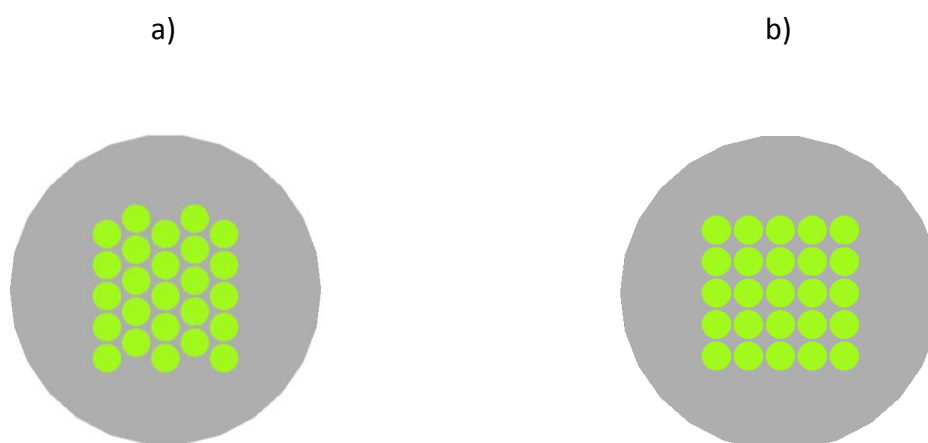
Rys. 6.16. Modele homogenizowane mikrowłókien magnetycznych z ferromagnetykiem uproszczonym do kształtu prostokątnianu

Na podstawie powyższych stwierdzeń zostały opracowane modele homogenizowane mikro- i nanowłókien magnetycznych o kształcie walca, którym zastąpiono całe włókno. Utworzone w ten sposób zastępcze modele, a dokładniej ich charakterystyki magnesowania, posłużyły opracowaniu wiązek włókien magnetycznych.

6.4. Modelowanie wiązek mikro- i nanowłókien magnetycznych w oparciu o język skryptowy pakietu OPERA 3D

W niniejszym podrozdziale zostało opisane, w jaki sposób utworzono skrypty comi, służące do budowy modeli komputerowych całych wiązek mikrowłókien magnetycznych. Takie wiązki powstawały w oparciu o modele homogenizowane, dlatego proces tworzenia ich był bardzo sprawny.

Wiązkę włókien można było tworzyć w sposób rzędowy lub ortocykliczny (Rys. 6.17), poprzez wprowadzenie zadanych wielkości, takich jak: długość włókien, ich promień oraz ilość włókien we wiązce w kierunku X i Y.



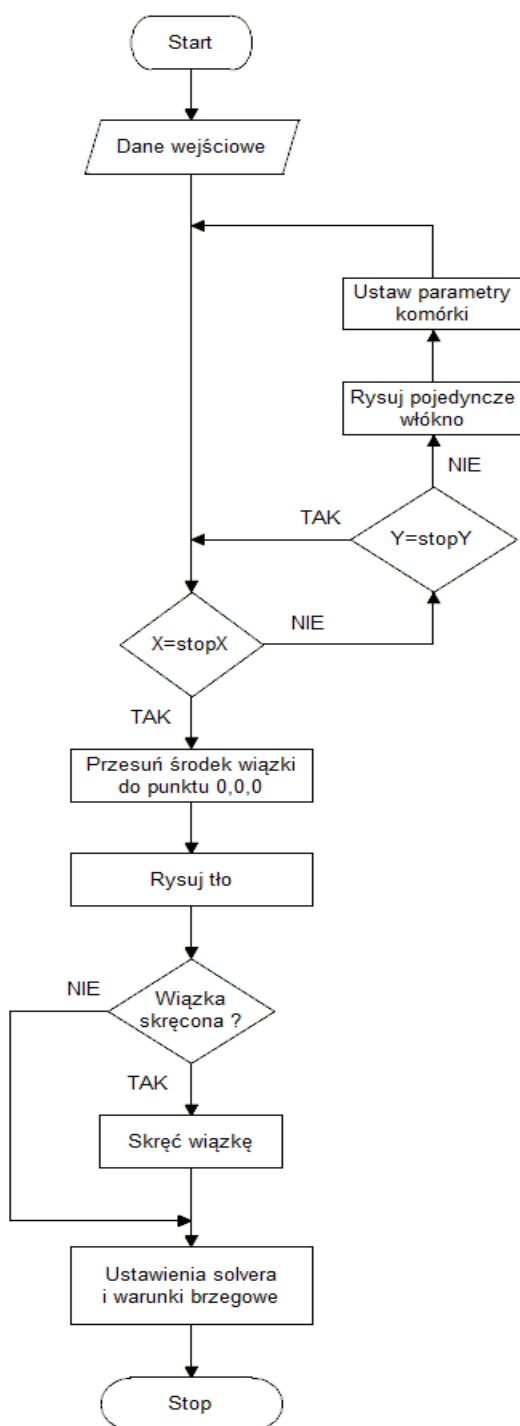
Rys. 6.17. Ułożenie włókien w wiązce: a) ortocykliczne, b) rzędowe

Należało dokonać porównania położenia włókien względem siebie, w celu sprawdzenia, jaki wpływ na właściwości magnetyczne ma „bliskość” ułożenia włókien we wiązce. Można było przypuszczać, iż układ ortocykliczny wpłynie na poprawę tych własności, gdyż przestrzenie powietrzne między włóknami są mniejsze.

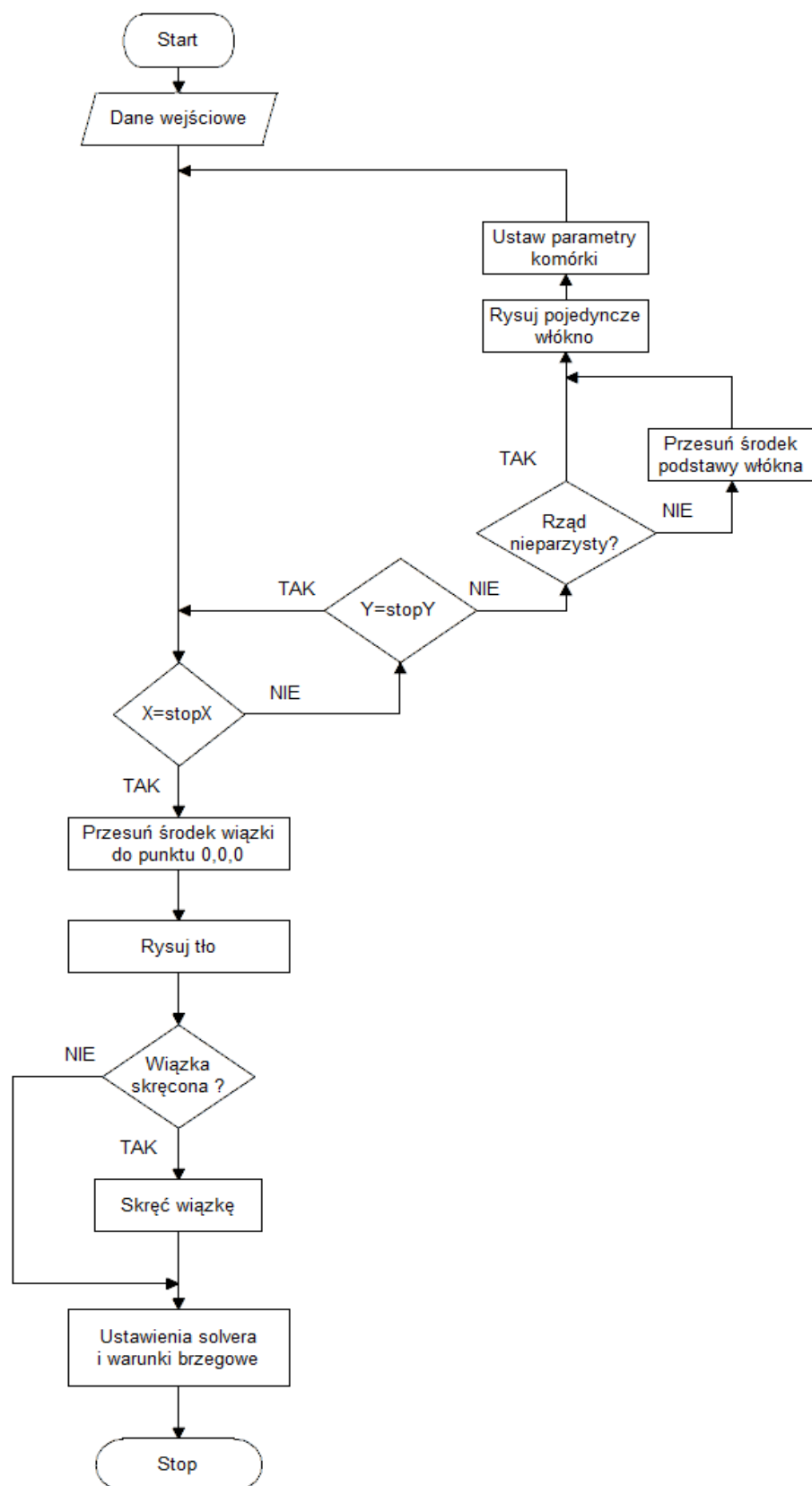
Wiązki włókien magnetycznych generowane były przy pomocy opracowanych w ramach przygotowywanej rozprawy skryptów wsadowych napisanych w języku pakietu OPERA 3D. Skrypty te korzystają z pętli oraz instrukcji warunkowych, wykorzystywanych

do określenia, czy generowana wiązka miała być skręcona, a w przypadku wiązki ortocyklicznej – do przesunięcia parzystych rzędów włókien.

Algorytmy zasady działania generatora wiązek włókien dla obu przypadków ułożenia włókien względem siebie znajdują się poniżej na rysunkach 6.18 i 6.19.

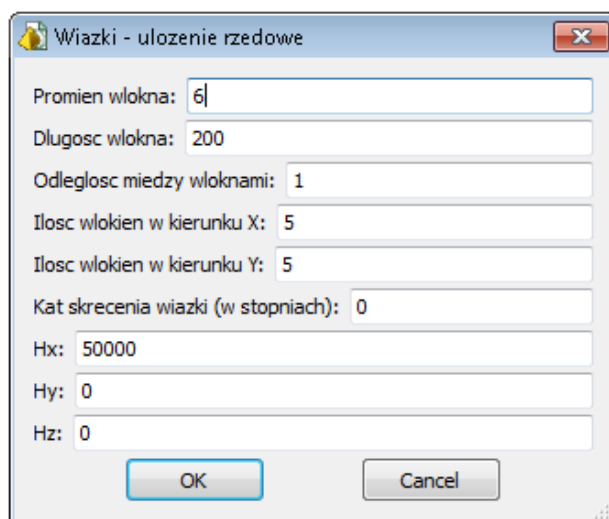


Rys. 6.18. Algorytm generowania wiązki włókien magnetycznych o ułożeniu rzędownym



Rys. 6.19. Algorytm generowania wiązki włókien magnetycznych o ułożeniu ortocyklicznym

Po uruchomieniu skryptów pojawia się okno dialogowe, służące do wprowadzenia parametrów wiązek włókien: promienia pojedynczego włókna, długości włókna, liczby rzędów i kolumn włókien we wiązce, odstępów pomiędzy włóknami i kąta skręcenia wiązki oraz wartości natężenia składowych natężenia pola magnetycznego (Rys. 6.20).

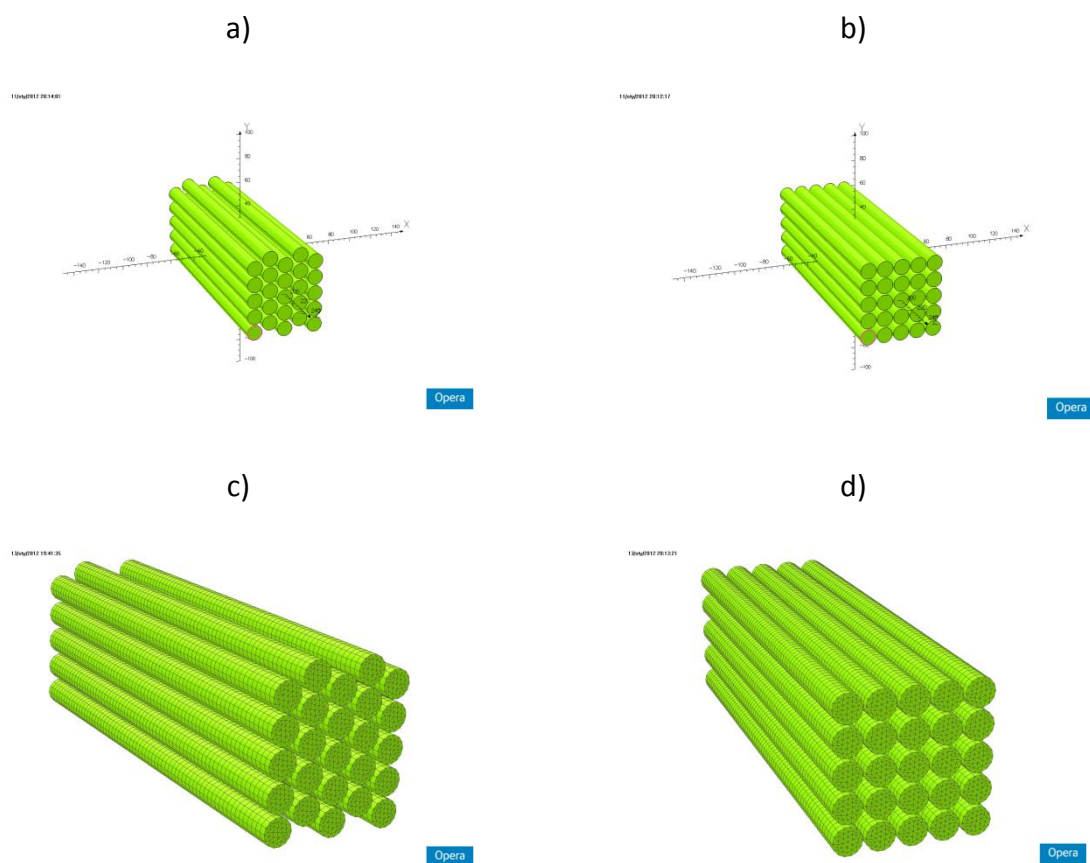


Rys. 6.20. Interfejs do generowania wiązek włókien w OPERA 3D

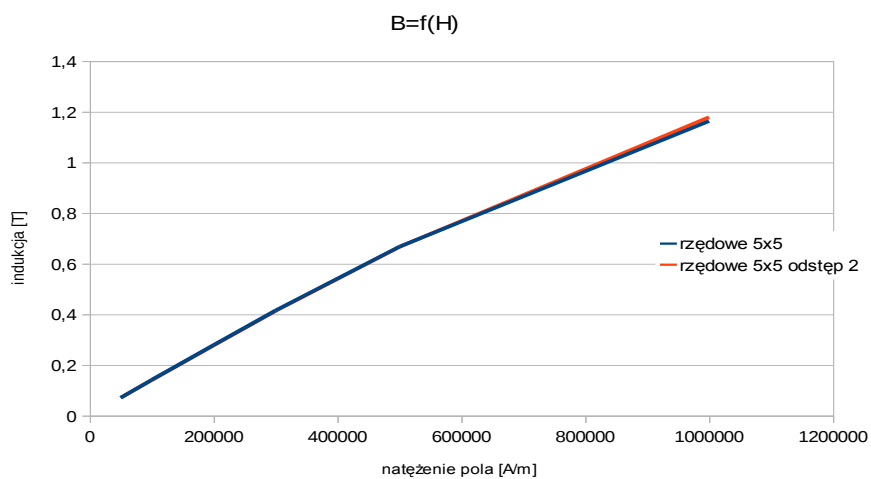
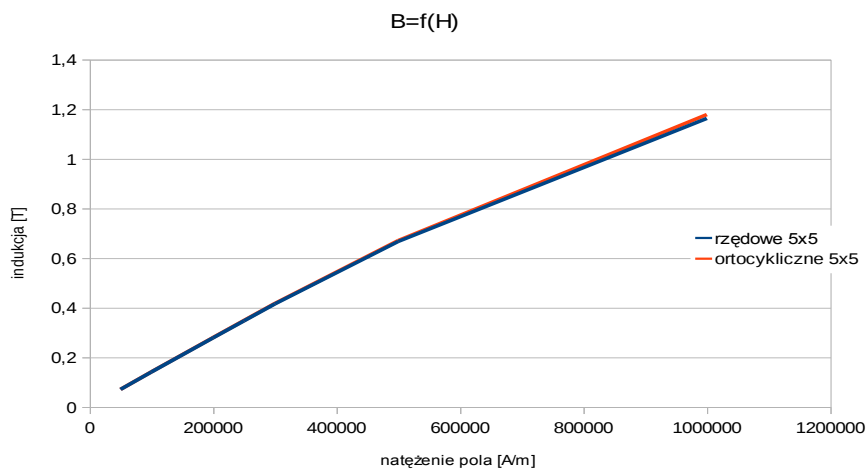
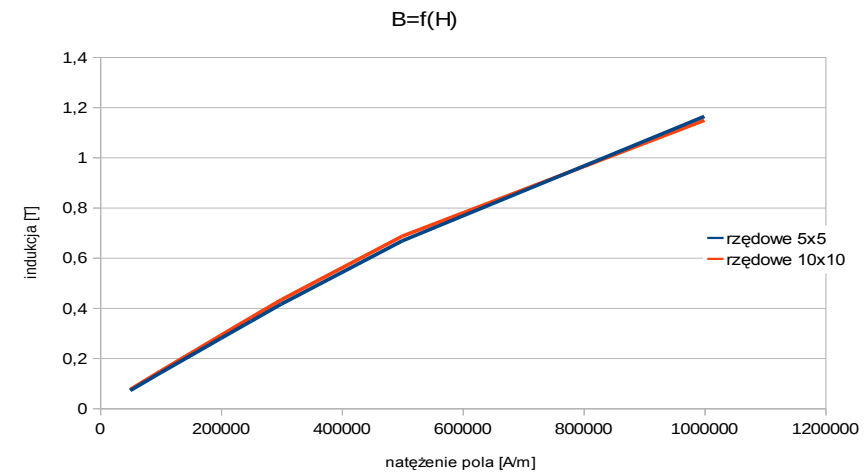
Po wprowadzeniu danych wejściowych program generował kolejne kolumny i rzędy włókien, przy czym w skrypcie do generowania wiązek z ułożeniem ortocyklicznym następowało przesunięcie środka podstaw pierwszego włókna z kolumny. Dodatkowo w pętli, dla każdego tworzonego włókna ustawiane były parametry komórek: etykiety materiału i komórki, priorytet komórki oraz maksymalny rozmiar elementu siatki w komórce i preferowany rodzaj elementu.

Po wygenerowaniu wiązki program przesuwał środek wiązki do początku układu współrzędnych. W tym celu na podstawie wymiarów włókien, odległości pomiędzy nimi oraz ich liczby w rzędach i kolumnach obliczane są współrzędne wektora przesunięcia. Kolejne kroki to narysowanie tła (background'u) – obszaru powietrza, w którym wiązka jest zamknięta, a następnie skręcenie wiązki włókien. Skręcenie następowało w zależności od podanego na początku kąta skręcenia, tj. wykonywane jest wówczas, gdy wartość tego kąta jest różna od 0.

Własności magnetyczne poszczególnych włókien w wiązce pobrane zostały z modeli homogenizowanych opracowanych dla pojedynczego włókna. Na poniższym rysunku (Rys. 6.21) przedstawiono wiązki w dwóch konfiguracjach ułożenia włókien względem siebie: ortocyklicznym i rzędownym.



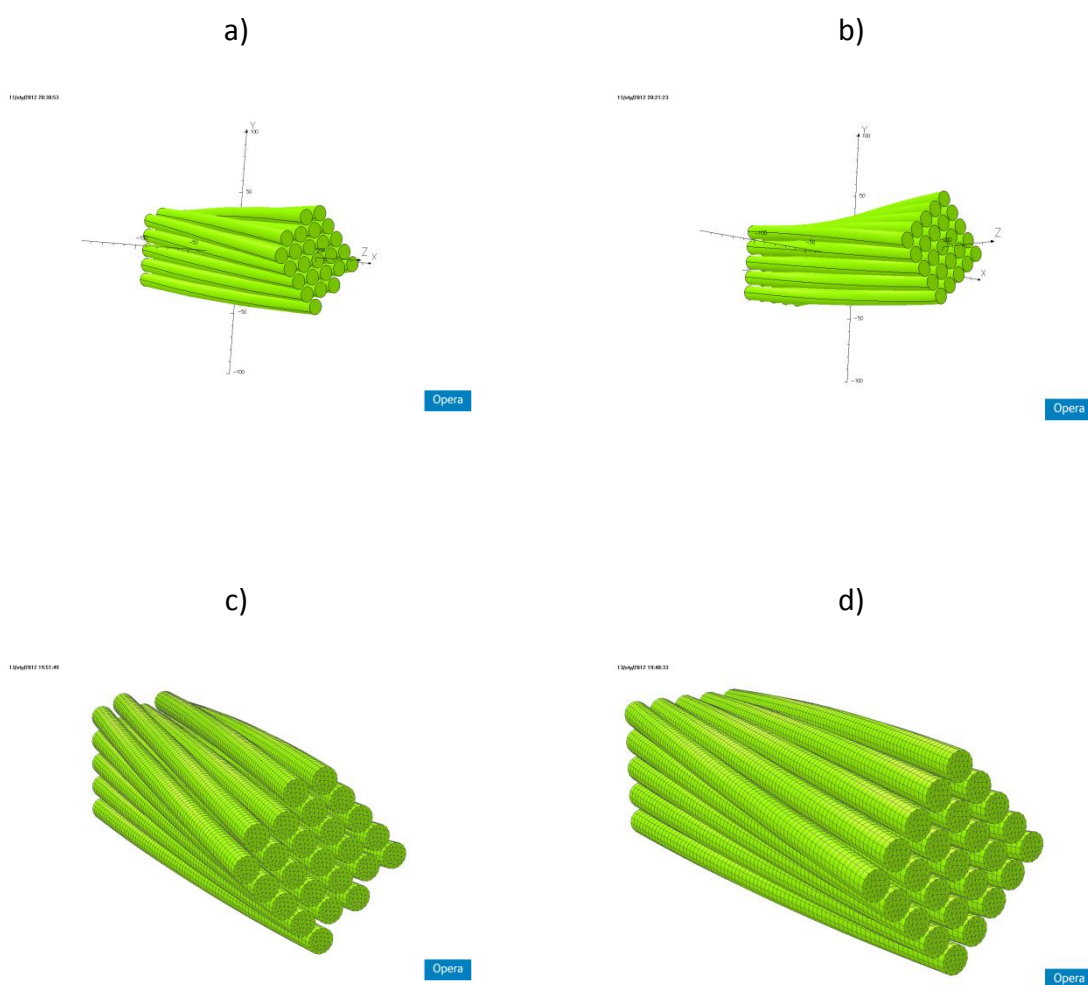
Rys. 6.21. Wycinek wiązki włókien magnetycznych:
a,c) o ułożeniu ortocyklicznym - bez siatki i z siatką elementów skończonych;
b,d) o ułożeniu rzędownym - bez siatki i z siatką elementów;



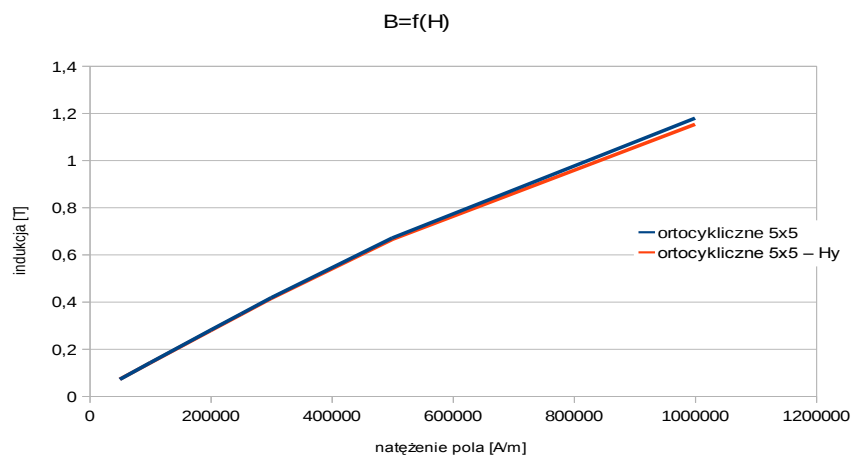
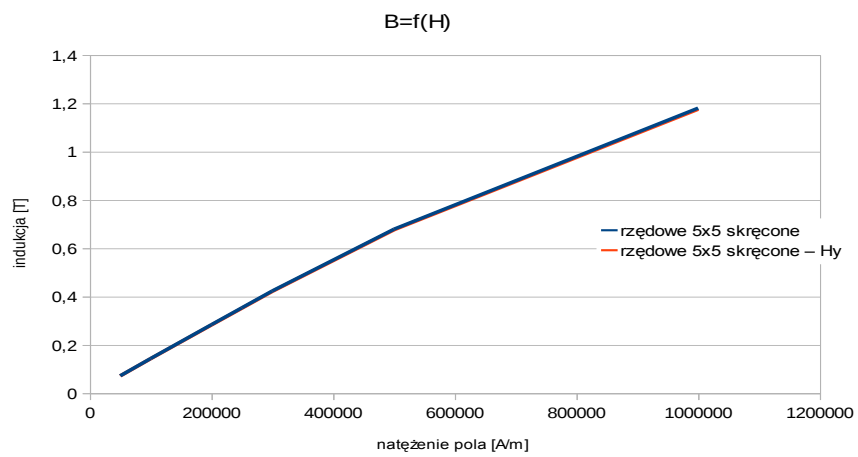
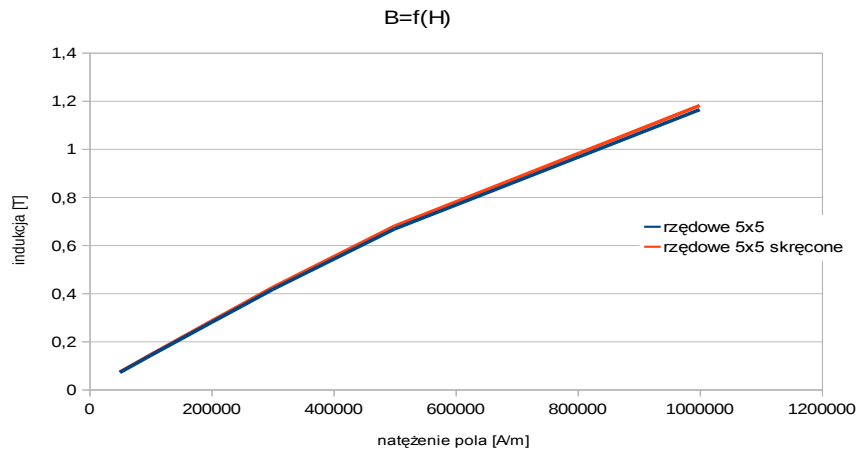
Rys. 6.22. Zależność indukcji magnetycznej w funkcji natężenia pola dla różnych wiązek włókien magnetycznych

Takie zmiany jak: ilość włókien we wiązce, ułożenie włókien względem siebie, czy odległość między włóknami regulowana w zakresie 1-2 μm , nie mają wielkiego wpływu na zmianę przebiegu charakterystyki $B = f(H)$, co przedstawiono na powyższych wykresach (Rys. 6.22).

W kolejnym etapie budowy modeli komputerowych wygenerowano wiązkę włókien magnetycznych splecionych ze sobą. W tym celu należało do wygenerowanych pojedynczych włókien dodatkowo wprowadzić skręcanie, czyli tzw. oplatanie się włókien (Rys. 6.23).

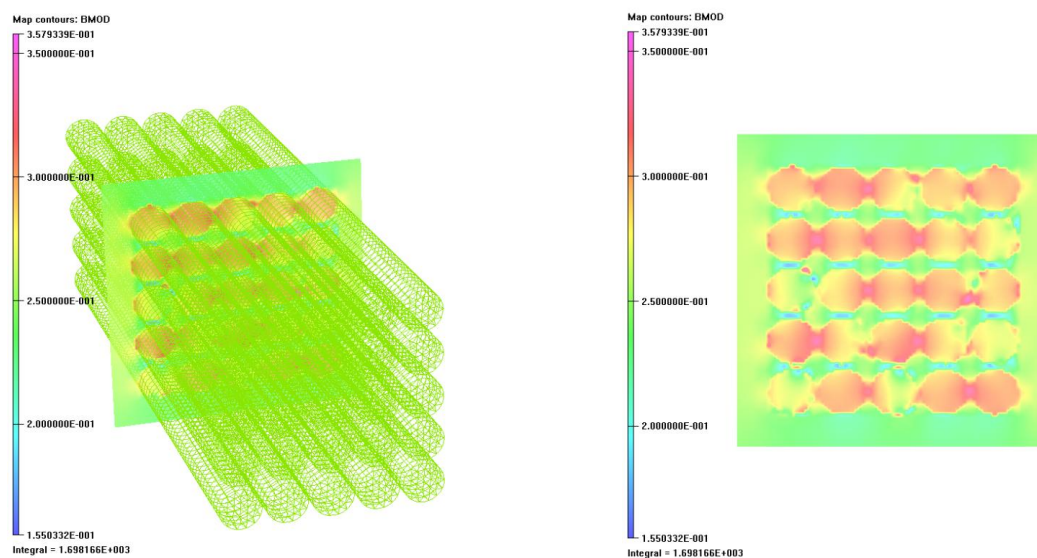


Rys. 6.23. Wycinek wiązki włókien magnetycznych skręconych:
a,c) o ułożeniu ortocyklicznym - bez siatki i z siatką elementów skończonych;
b,d) o ułożeniu rzędownym - bez siatki i z siatką elementów;

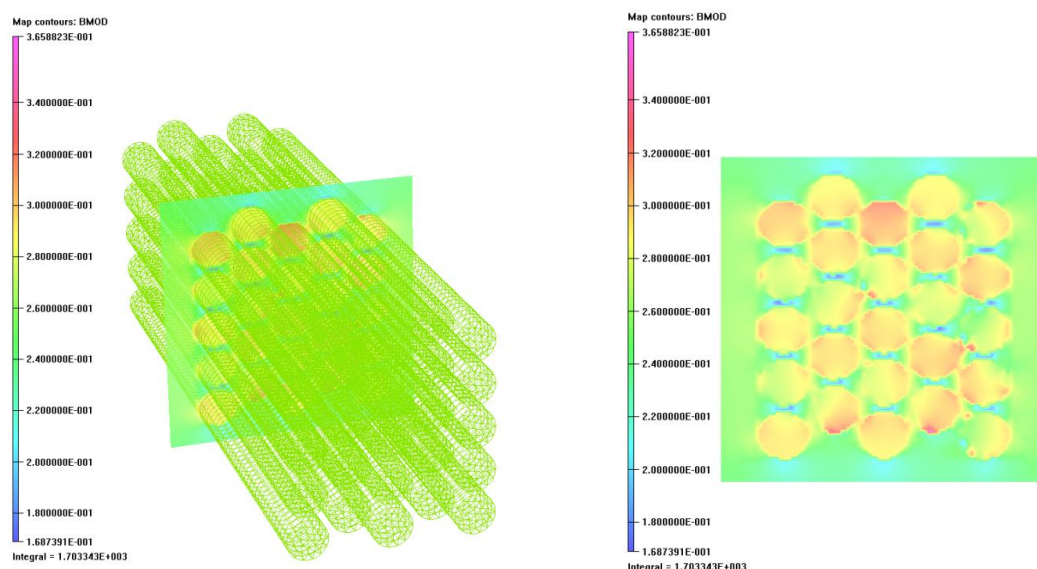


Rys. 6.24. Zależność indukcji magnetycznej w funkcji natężenia pola dla różnych skręconych wiązek włókien magnetycznych

Na rysunku 6.24 pokazano, że na zmianę parametrów magnetycznych nie mają wpływu takie czynniki jak, to czy włókna we wiązce układają się równoległe, czy też są ze sobą splecione (skręcone). Ponadto do ciekawych wniosków doprowadziła analiza kierunku przykładania zewnętrznego pola magnetycznego. Dowiedziono bowiem, że materiał jest izotropowy, a nie jak zakładano na początku anizotropowy, gdyż bez względu, z której strony zostanie przyłożone pole, charakterystyka $B = f(H)$ nie zmienia się.



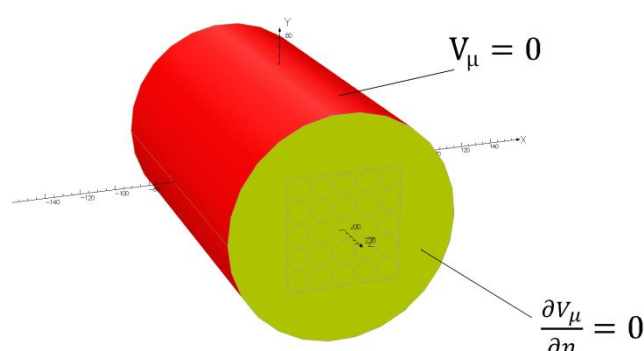
Rys. 6.25. Rozkład indukcji magnetycznej dla wiązki włókien ułożonych rzędowo



Rys. 6.26. Rozkład indukcji magnetycznej dla wiązki włókien ułożonych ortocyklicznie

Z powyższego rysunku można odczytać, że wartości modułu indukcji magnetycznej dla obu rodzajów ułożenia włókien we wiązce są zbliżone.

Komputerowe modele mikro- i nanowłókien magnetycznych zdefiniowano wykorzystując do tego celu skalarny potencjał magnetyczny V_μ , dla którego przyjęto warunki brzegowe Neumana i Dirichleta, opisane równaniami (3.25) i (3.26). Warunki te przypisano powierzchniom zewnętrznym tła, co przedstawiono na rysunku 6.27. Do obliczeń wykorzystano solver TOSCA Magnetic, umożliwiający wykonywanie obliczeń rozkładów pola magnetostatycznego.



Rys. 6.27. Model wiązki włókien magnetycznych z warunkami brzegowymi

W tabeli 6.4 przedstawiono liczby elementów wygenerowanych w Metodzie Elementu Skończonego dla poszczególnych modeli wiązek mikrowłókien. Były to elementy liniowe (*lin.*) oraz kwadratowe (*kw.*).

Tabl. 6.4. Siatki podziałowe dla poszczególnych modeli wiązek mikrowłókien

liczba elementów	ortocykliczne	ortocykliczne skręcone	rzędowe	rzędowe skręcone	rzędowe odstęp 2	rzędowe 10x10
całkowita	307510	1342914	225656	1325476	248972	909056
czworościany	139514 <i>lin.</i> 14834 <i>kw.</i>	734948 <i>lin.</i> 483966 <i>kw.</i>	-	742376 <i>lin.</i> 46582 <i>kw.</i>	-	-
sześciościany	1608 <i>lin.</i>	-	-	-	-	-
graniastosłupy	55677 <i>lin.</i> 92326 <i>kw.</i>	1680 <i>lin.</i> 75760 <i>kw.</i>	121002 <i>lin.</i> 104654 <i>kw.</i>	5520 <i>lin.</i> 67120 <i>kw.</i>	141035 <i>lin.</i> 107937 <i>kw.</i>	507391 <i>lin.</i> 401665 <i>kw.</i>
ostrosłupy	3551 <i>lin.</i>	46560 <i>lin.</i>	-	44640 <i>kw.</i>	-	-

Czasy obliczeń dla wiązek włókien, zbudowanych w oparciu o modele homogenizowane, wahały się w granicach od 2 do 17 minut, w zależności od gęstości siatki i natężenia zewnętrznego pola magnetycznego. W przypadku prowadzenia obliczeń dla modeli komputerowych składających się z kilku milionów elementów skończonych czasy obliczeń były znacznie dłuższe. Pomimo tego, iż w obliczeniach wykorzystywano wieloprocessorowe serwery Klasy IBM Blade, czasy obliczeń dla każdej struktury włókna liczone w godzinach.

Porównawcza analiza polowa została oparta o charakterystyki magnesowania ferromagnetyka, wypełniającego mikrowłókna magnetyczne, przekazane z Katedry Włókien Sztucznych Politechniki Łódzkiej. Przenikalność magnetyczna materiału była niska, $\mu_r = (1,8 - 8)$. Dalsze uśrednianie tej przenikalności dla pojedynczych włókien, a później dla wiązek, doprowadziło do tego, że materiał stawał się niemagnetyczny. Nie można było zaobserwować anizotropii oraz nieliniowości, które tak naprawdę były początkowo zakładane.

7. Podsumowanie

W ramach przygotowanej rozprawy zostały zbudowane zaawansowane modele numeryczne (komputerowe) pojedynczych włókien, jak również całych wiązek. Do budowy modeli komputerowych wykorzystano środowisko programistyczne MATLAB oraz pakiet obliczeniowy OPERA 3D. Dzięki takiemu podejściu była możliwa generacja trójwymiarowych modeli włókien z uwzględnieniem wewnętrznego rozkładu ziaren. W tym celu wykorzystano generatory liczb pseudolosowych, które umożliwiły budowę modeli polowych pojedynczych włókien z wybranym rozkładem ziaren ferromagnetycznych, stanowiąc dane wejściowe dla modeli strukturalnych definiowanych z wykorzystaniem pakietu OPERA 3D. W oparciu o wewnętrzny język skryptowy pakietu OPERA 3D, zbudowano programy komputerowe do generowania modeli wiązek mikrowłókien z uwzględnieniem różnego ułożenia włókien w wiązce.

Kompleksowej analizie własności magnetycznych złożonych struktur mikrowłókien dokonano łącząc techniki komputerowe z technikami mikroskopowymi; takimi jak metoda świetlna (optyczna) i metoda elektronowa.

Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej modeli polowych pojedynczych włókien określono wpływ zmiany różnych wielkości fizycznych (kształt i rozmiar ziaren, procentowe wypełnienie ferromagnetyka we włóknie, sposób rozłożenia ziaren wzdłuż włókna, czy też ułożenie włókien względem siebie w wiązce) na parametry magnetyczne tych włókien. Wyznaczono również graniczne wielkości ziaren ferromagnetyka oraz jego maksymalną zawartość objętościową we włóknie.

Opracowane modele polowe stanowiły podstawę do zdefiniowania modeli homogenizowanych mikrowłókien magnetycznych. Przeprowadzono analizę porównawczą wpływu kształtu zastępczych brył reprezentujących pojedyncze ziarna na właściwości magnetyczne włókien. Na podstawie opracowanych w pracy modeli wyznaczono zastępczą charakterystykę magnesowania pojedynczego włókna, którą wykorzystano do obliczenia zastępczej charakterystyki magnesowania wiązki włókien.

Analiza polowa została poprzedzona badaniami mikroskopowymi, na podstawie których stwierdzono, jaki kształt i rozkład mają ziarna ferromagnetyczne we włóknie. W tym

celu zastosowano mikroskop optyczny o dużej rozdzielczości, służący do wstępnych obserwacji powierzchniowych. Wykorzystano również obrazy ze skaningowego mikroskopu elektronowego uzyskane w ramach ścisłej współpracy z Katedrą Włókien Sztucznych Politechniki Łódzkiej.

Przedstawione w pracy metody badawcze oraz opracowane model komputerowe mikrowłókien pozwoliły na określenie zastępczych charakterystyk magnetycznych mikro – i nanowłókien, co w konsekwencji daje możliwości przeprowadzenia wstępnej analizy parametrów materiałów tekstronicznych, w celu uniknięcia konieczności budowy kosztownych modeli fizycznych tych materiałów.

Z punktu widzenia modelowania komputerowego należy rozważyć podjęcie kolejnych badań, które mogłyby znacznie przyspieszyć procesy obliczeniowe. Wykonano już szereg badań związanych z wykorzystaniem Metody Sieci Reluktancyjnych (MSR), co zostało zaprezentowane w publikacjach autorki (Firyh-Nowacka, 2009), (Wiak et al., 2010). Zastosowanie MRS wymagać będzie wykorzystania modeli homogenizowanych do przejścia między modelami MES a MSR. Należy oczekiwać, iż w wyniku połączenia obydwu metod proces budowy modeli komputerowych mikro- i nanowłókien magnetycznych zostanie znacznie usprawniony.

Bibliografia

- [1] Antal M., Zawilak J.: *Badania symulacyjne nagrzewania się silnika indukcyjnego z uszkodzoną klatką wirnika*, SME 2005, pp. 56-63
- [2] Bastos J.P.A., Sadowski N.: *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*, Marcel Dekker Inc., USA, 2003
- [3] Bendkowska W.: *Tekstylnia inteligentne – przegląd zastosowań, część 2: Tekstylnia elektroprzewodzące i tekstylnia zintegrowane z mikrosystemami elektronicznymi*, Przegląd Włókienniczy, 2002, Nr 9, s. 16-19
- [4] Bianchi N.: *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*, CRC Press Taylor&Francis Group, 2005
- [5] Biecek P.: *Przewodnik po pakiecie R*, Oficyna Wydawnicza GIS, Wrocław, 2008
- [6] Boczkowska A., Leonowicz M.: *Intelligent Materials for Intelligent Textiles*, Fibres & Textiles In East. Europe, 2006, 14 (54), pp. 13-17
- [7] Bolkowski S. (red.): *Komputerowe metody analizy pola elektromagnetycznego*, WNT, Warszawa, 1993
- [8] Chou S.Y., Krauss P.R., Renstrom P.J.: *Imprint Lithography with 25-Nanometer Resolution*, Science, 1996, 272 (5258), pp. 85-87
- [9] Cichoń C.: *Metody obliczeniowe. Wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2005
- [10] Correia A., Pérez M., Sáenz J.J., Serena P.A.: *Nanotechnology applications: a driving force for R&D investment*, Physica Status Solid, 2007, 204 (6), pp. 1611–1622
- [11] Coyle S., Wu Y., Lau K.T., De Rossi D., Wallace G., Diamond D.: *Smart Nanotextiles: A Review of Materials and Applications*, MRS Bulletin, 2007, 31, pp. 434-441
- [12] Dabhade V.V., Rama Mohan T.R., Ramakrishnan P.: *Nanocrystalline titanium powders by high energy attrition milling*, Powder Technology, 2007, 171 (3), pp. 177-183
- [13] Dhondt, G.: *The Finite Element Method for Three-dimensional Thermomechanical Applications*, John Wiley & Sons, Ltd., 2004

- [14] Di Barba P., Savini A., Wiak S.: *Field Models in Electricity and Magnetism*, Springer, 2008
- [15] Dobrowolska K., Dyczka W., Jakuszenkow H.: *Matematyka dla studentów studiów technicznych, cz. 2*, HELPMATH, Łódź, 1997
- [16] Ducker R., Garcia A., Zhang J., Chen T., Zauscher S.: *Polymeric and biomacromolecular brush nanostructures: progress in synthesis, patterning and characterization*, Soft Matter, 2008, 4, pp. 1774-1786
- [17] Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M.: *Feynmana wykłady z fizyki. Elektryczność i magnetyzm, elektrodynamika. Tom 2.1*, PWN, Warszawa, 2007
- [18] Firych-Nowacka A.: *Integrated 3-D Computer Structural Models of Magnetic Microfibres*, OWD 2009, Wisła, 2009
- [19] Furlani E.P.: *Permanent Magnet and Electromechanical Devices*, Academic Press, USA, 2001
- [20] Gniotek K., Frydrych I.: *Mechatronika, tom 2. Systemy tekstroniczne w mechatronice, rozdz. 10*, s. 425-488, EXIT, Łódź, 2010
- [21] Gniotek K., Stępień Z., Zięba J.: *Tekstronika – nowy obszar wiedzy*, Przegląd Włókienniczy, 2003, Nr 2, s.17-18
- [22] Golovanov C., Marechal Y., Meunier G.: *3D Edge Element Based Formulation Coupled to Electric Circuits*, IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34 (5), pp. 3162-3165
- [23] Goss J., Szubska I.: *Inteligentne Wyroby Włókiennicze*, Katedra Technologii i Budowy Wyrobów Dziewiarskich Politechniki Łódzkiej, 2009
- [24] Hata T., Nakayama H.: *An organic catalytic CVD: Principle, apparatus and applications*, Thin Solid Films, 2008, 516 (5), pp. 558-563
- [25] Ikesue A.: *Polycrystalline Nd:YAG ceramics lasers*, Optical Materials, 2002, 19 (1), pp. 183-187
- [26] Jiang A.Q., Li G.H., Zhang L.D.: *Dielectric study in nanocrystalline $\text{Bi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ prepared by chemical coprecipitation*, Journal of Applied Physics, 1998, 83 (9), pp. 4878-4883

- [27] Kacprzak T., Hausman S., Januszkiewicz Ł.: *Ubranie strażackie nowej generacji z tekstronicznym systemem monitorowania parametrów fizjologicznych*, Instytut Elektroniki Politechniki Łódzkiej, 2009
- [28] Kaltenbacher M.: *Numerical Simulation of Mechatronic Sensors and Actuators*, Springer, 2007
- [29] Kaszuwara W., Leonowicz M., Rubacha M., Kulpiński P., Łaskiewicz B., Pawlik P.: *Kompozytowe włókna magnetyczne o właściwościach magnetycznych*, Kompozyty, 2004, 4(9)
- [30] Kelsall R.W., Hamley I.W., Geoghegan M.: *Nanotechnologie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2008
- [31] Kołaciński Z.: *Mechatronika, tom 1. Multifunkcjonalne nanosystemy dla dziedzin priorytetowych*, rozdz. 5, s. 137-162, EXIT, Łódź, 2009
- [32] Kołaciński Z.: *Mechatronika, tom 1. Podstawy Mikro- Nanotechnologii*, rozdz. 3, s. 81-106, EXIT, Łódź, 2009
- [33] Krakowski M.: *Elektrotechnika teoretyczna. Pole elektromagnetyczne*, PWN, Warszawa, 1995
- [34] Kruis F.E., Fissan H., Peled A.: *Synthesis of nanoparticles in the gas phase for electronic, optical and magnetic applications - a review*, Journal of Aerosol Science, 1998, 29 (5-6), pp. 511-535
- [35] Kuczyński A.: *Podstawy teorii pola elektromagnetycznego, cz. I*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2000
- [36] Liu G.R., Quek S.S.: *The Finite Element Method*, Elsevier Science Ltd., Oxford, 2003
- [37] Łaskiewicz B.: *Micro- and Nano- cellulosic fibres*, Mol. Cryst.Liq., 2000, 353 (271)
- [38] Mangat M.M.: *Technical Textile: A Promising Future*, Course, 2009
- [39] Mecheels S., Schroth B., Breckenfelder Ch.: *Smart Clothes*, Intelligent Textile Products Using Innovative Microtechnology, Hohenstein Institutes, 2005
- [40] Menard E., Meitl M.A., Sun Y., et al.: *Micro- and Nanopatterning Techniques for Organic Electronic and Optoelectronic Systems*, American Chemical Society, 2007, 107 (4), pp. 1117–1160
- [41] Moler, C.B.: *Numerical Computing with MATLAB*, SIAM 2004, pp. 336

- [42] Morris M.A., Morris D.G.: *Nanocrystalline twinned structures of the intermetallic Al_3Fe produced by ball milling and hot deformation*, Materials Science and Engineering: A, 1991, 136, pp. 59-70
- [43] Mrozek B., Mrozek Z.: *MATLAB i Simulink, wydanie II*, Helion, Gliwice, 2004
- [44] Norstebo C.A.: *Intelligent Textiles. Soft Products*, Norwegian University of Science and Technology, 2003
- [45] Nowak L.: *In Iterative Procedure for 3D Modelling of Electromagnetic Actuators*, IEEE Transactions of Magnetics, 31 (3), 1995, pp.1428-1431
- [46] Owen S. J., Saigal S.: *Formation of pyramid elements for hexahedra to tetrahedra transitions*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., vol. 190, pp. 4505-4518, 2001
- [47] Pratap R.: *MATLAB 7 dla inżynierów i naukowców*, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, 2007
- [48] Prucker O., Schimmel M., Tovar G., Knoll W., Rühle J.: *Microstructuring of Molecularly Thin Polymer Layers by Photolithography*, Advanced Materials, 1998, 10 (14), pp. 1073–1077
- [49] Rawers J.C.: *Warm compaction of attrition milled nanostructured iron powders*, Nanostructured Materials, 1999, 11 (8), pp. 1055-1060
- [50] Rubacha M., Zięba J.: *Magnetic Cellulose Fibres and Treir Application in Textronics*, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, 2007, 15 (5-6), pp. 101-104
- [51] Rubacha M., Zięba J.: *Magnetic Textile Elements*, IMTEX, 2007
- [52] Rubacha M., Zięba J.: *Obtaining And Evaluation Of Mechanical – Magnetic Properties Of Magnetically Active Textile Materials*, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, 2006, 14 (5), pp. 49-53
- [53] Rusiski E.: *Metoda elementów skoczonych*, System COSMOS/M, Warszawa WKŁ, 1994
- [54] Sawieliew I.W., *Wykłady z fizyki, tom 2. Elektryczność i magnetyzm. Fale. Optyka*, PWN, Warszawa, 1998
- [55] Sikora J.: *Numeryczne metody rozwiązywania zagadnień brzegowych*, Politechnika Lubelska, Lublin, 2011
- [56] Sikora J.: *Podstawy Metody Elementów Skończonych: Zagadnienia Potencjalne*, Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa, 2008

- [57] Sikora R.: *Teoria pola elektromagnetycznego*, WNT, Warszawa, 1985
- [58] Simonis F., Schilthuisen S.: *Nanotechnology innovation opportunities for tomorrow's Demence*, TNO Science and Industry, 2006
- [59] Skoczkowski T.: *Modelowanie i symulacja sprzężonych zjawisk polowych w urządzeniach elektrotermicznych*, Instytut Naukowo-Badawczy ZTUREK, Warszawa, 2000
- [60] Sobczyk M.: *Statystyka*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2008
- [61] Stringfellow G.B.: *Organometallic Vapor-Phase Epitaxy. Theory and Practice*, wydanie II, Academic Press, Oxford, 1999
- [62] Sybilska W., Frydrych I.: *Perspektywy i kierunki rozwoju odzieży inteligentnej*, Przegląd Włókienniczy, Nr 2, s. 5-53, 2007
- [63] Turowski J.: *Elektrodynamika techniczna*, WNT, Warszawa, 1993
- [64] Vector Fields: *Opera 3-d. Reference Manual, ver.13*, ERA Technology Limited, Oxford, 2009
- [65] Wiak S. (red.): *Mechatronika, tom 1*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Łódź, 2009
- [66] Wiak S. (red.): *Mechatronika, tom 2*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Łódź, 2010
- [67] Wiak S., Firyh-Nowacka A., Smolka K.: *Computer models of 3D magnetic microfibres used in textile actuators*, COMPEL, 29 (5), 2010, pp. 1159-1171
- [68] Wiak S., Firyh-Nowacka A., Smolka K.: *Magnetic Microfibres Modelling Methods*, COMPEL, 29 (4), 2010, pp. 950-956
- [69] Wiak S., Smółka K.: *Modelling and Optimization of Intelligent Electrostatic Comb Accelerometer*, Springer 2005, pp.99-104
- [70] Wiak S., Welfle H.: *Silniki tarczowe w napędach lekkich pojazdów elektrycznych*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2001
- [71] Wiak S., Zwoliński G.: *Wybrane zagadnienia obliczeniowe z elektrodynamiki technicznej*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 1997
- [72] Wiśniewski A.: *Nanotechnology for body protection*, WITU, 2007, 102, pp. 7-17
- [73] www.pg.gda.pl (stan na XII.2011)

- [74] Zalewski A., Cegiela R.: *MATLAB - obliczenia numeryczne i ich zastosowania*, Wydawnictwo Nakom, Poznań, 1997
- [75] Zgainski F.X., Coulomb J.L., Marechal Y., Claeysen F., Brunotte X.: *A New Family of Finite Elements: The Pyramidal Elements*, IEEE Transactions On Magnetics, vol 32, no 3, pp. 1393-1396, 1996
- [76] Zienkiewicz O. C., Taylor R. L.: *The Finite Element Method*, vol. 1: The Basis, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000
- [77] Zięba J.: *Textile magnetic core*, Industrial Simulation Conference, Holand, 2007, pp. 442-446

Spis tabel

TABL. 4.1. ZDJĘCIA MIKROWŁÓKIEN MAGNETYCZNYCH WYKONANE MIKROSKOPEM OPTYCZNYM	61
TABL. 5.1. PRZYKŁADY GENERACJI MIKROWŁÓKNA WRAZ Z MODELAMI MES	74
TABL. 6.1. ZMIANY WARTOŚCI PRZENIKALNOŚCI MAGNETYCZNEJ W RÓŻNYCH SEGMENTACH MIKROWŁÓKNA MAGNETYCZNEGO	91
TABL. 6.2. ZALEŻNOŚĆ WARTOŚCI PRZENIKALNOŚCI MAGNETYCZNEJ OD ZAGĘSZCZENIA PROCENTOWEGO FERROMAGNETYKA W MIKROWŁÓKNIE	96
TABL. 6.3. ODCHYLENIE PROCENTOWE WYNIKU WARTOŚCI μ WZGLĘDEM KUL DLA UPROSZCZONYCH MODELI HOMOGENIZOWANYCH Z FERROMAGNETYKIEM W KSZTAŁCIE WALCÓW ORAZ PROSTOPADŁOŚCIANÓW	97
TABL. 6.4. SIATKI PODZIAŁOWE DLA POSZCZEGÓLNYCH MODELI WIĄZEK MIKROWŁÓKIEN	108

Spis rysunków

RYS. 2.1. KLASYFIKACJA NANOSTRUKTUR: A) NANOCZĄSTKI, B) NANOWŁÓKNA, C) NANOWARSTWY (KELSALL ET AL., 2008)	12
RYS. 2.2. PRZEKRÓJ PRZESZCIEŁA O RÓŻNYCH ROZMIARACH (10^{-10} – 10^0) M (BOOKER, BOYSEN, 2005)	13
RYS. 2.3. NANOTECHNOLOGIE- KLUCZOWE OBSZARY ZASTOSOWAŃ (CORREIA ET AL., 2007).....	20
RYS. 2.4. OBSZAR TEKSTRONIKI (GNIOTEK, FRYDRYCH, 2010)	24
RYS. 2.5. GAŁĘZIE WYKORZYSTANIA TEKSTYLÓW TECHNICZNYCH I WYSOKOWYDAJNOŚCIOWYCH (MAGNAT, 2009)	26
RYS. 2.6. KOSZULKA „LIFESHIRT” (MECHEELS ET AL., 2005).....	27
RYS. 2.7. SYSTEM POZYCJONOWANIA I LOKALIZACJI (BENDKOWSKA, 2002)	27
RYS. 2.8. ŁĄCZNOŚĆ, MOBILNOŚĆ I INTELIGENTNE OTOCZENIE CZŁOWIEKA (SIMONIS, SCHILTHUISEN, 2006) ..	28
RYS. 2.9. UNIKATOWY STRÓJ STRAŻACKI Z SYSTEMEM ZDALNEGO MONITOROWANIA PARAMETRÓW FIZJOLOGICZNYCH CZŁOWIEKA (KACPRZAK ET AL., 2009)	29
RYS. 2.10. ODZIEŻ CHRONIĄCA PRZED CHEMIKALIAMI (MECHEELS ET. AL., 2005)	30
RYS. 2.11. KŁAWIATURA QWERTY Z TKANINY SOFTSWITCH (GNIOTEK, FRYDRYCH, 2010)	31
RYS. 2.12. PRZEŁĄCZNIKI Z TKANINY SOFTSWICH UMIESZCZONE NA RĘKAWIE KURTKI (GNIOTEK, FRYDRYCH, 2010)	31
RYS. 2.13. PRZEŁĄCZNIKI Z TKANINY SOFTSWICH - PILOT TV NA PODUSZCE (GNIOTEK, FRYDRYCH, 2010)	31
RYS. 2.14. PRZEŁĄCZNIKI Z TKANINY SOFTSWICH W WYPOSAŻENIU WNĘTRZ (GNIOTEK, FRYDRYCH, 2010)	31
RYS. 2.15. SENSORY CIŚNIENIA MONTOWANE W DYWANACH (GNIOTEK, FRYDRYCH, 2010)	32
RYS. 2.16. A) BLUZA MONITORUJĄCA RUCH PRZEDRAMIENIA, B) OPASKA MONITORUJĄCA RUCH KOLANA (COYLE ET AL., 2007)	32
RYS. 2.17. KOSZULKA MONITORUJĄCA PULS SPORTOWCA (GNIOTEK, FRYDRYCH, 2010)	33
RYS. 2.18. SCHEMAT KURTKI Z WBUDOWANYM ODTWARZACZEM MP3 (SYBILSKA, FRYDRYCH, 2007)	34
RYS. 2.19. WŁÓKNO MAGNETYCZNE (RUBACHA, ZIĘBA, 2006)	35
RYS. 2.20. MIKROWŁÓKNA WYPEŁNIONE GRANULATEM MAGNETYCZNYCH (KATEDRA WŁÓKIEN SZTUCZNYCH PŁ).....	36
RYS. 2.21. PROCES WYTWARZANIA MODYFIKOWANYCH WŁÓKIEN CELULOZOWYCH (RUBACHA, ZIĘBA, 2007) ..	37
RYS. 2.22. WYGLĄD TEKSTYLNEJ CEWKI MAGNETYCZNEJ Z TEKSTYLNĄ RDZENIEM (RUBACHA, ZIĘBA, 2006) ..	38
RYS. 2.23. TEKSTYLNA CEWKA TOROIDALNA I JEJ FRAGMENT (RUBACHA, ZIĘBA, 2006)	39
RYS. 2.24. WŁÓKNINA MAGNETYCZNA (GNIOTEK, FRYDRYCH, 2010)	39
RYS. 2.25. HISTEREZY MAGNESOWANIA: A) FERRYTU BARU (TWARDEGO MAGNETYKA), B) WŁÓKIEN ZAWIERAJĄCYCH 23% OBJ. FERRYTU BARU (ZIĘBA, 2007).....	41
RYS. 2.26. ZALEŻNOŚĆ WYTRZYMAŁOŚCI WŁÓKIEN OD UDZIAŁU FERRYTU (RUBACHA, ZIĘBA, 2006)	42
RYS. 2.27. ZALEŻNOŚĆ MODUŁU POCZĄTKOWEGO WŁÓKIEN OD UDZIAŁU FERRYTU (RUBACHA, ZIĘBA, 2006) ..	42

RYS. 2.28. ZALEŻNOŚĆ WYDŁUŻENIA PRZY ZERWANIU WŁÓKIEN OD UDZIAŁU FERRYTU (RUBACHA, ZIĘBA, 2006)	42
RYS. 3.1. ROZKŁAD LINII POLA W: A) DIAMAGNETYKU, B) PARAMAGNETYKU, C) FERROMAGNETYKU	50
RYS. 3.2. KRZYWA MAGNESOWANIA	51
RYS. 3.3. STRUKTURA KRystaliczna MATERIAŁÓW O ANIZOTROPOWEJ NATURZE MAGNESOWANIA (KELSALL ET AL., 2008)	53
RYS. 3.4. PĘTLA HISTEREZY (FURLANI, 2001)	54
RYS. 3.5. PRZYKŁADY PĘTLI HISTEREZY: 1- MAGNETYKÓW TWARDYCH, 2- MAGNETYKÓW MIĘKKICH (KRAKOWSKI, 1995)	55
RYS. 4.1. TWORZENIE OBRAZU: A) RZUTOWANEGO, B) POWIĘKSZONEGO PRZEZ SOCZEWKI, C) SKANINGOWEGO (KELSALL ET AL., 2008)	57
RYS. 4.2. SCHEMAT UKŁADU OPTYCZNEGO MIKROSKOPU ŚWIETLNEGO (WWW.PG.GDA.PL)	58
RYS. 4.3. UPROSZCZONY SCHEMAT BUDOWY SKANINGOWEGO MIKROSKOPU ELEKTRONOWEGO (SEM) (KELSALL ET AL., 2008)	59
RYS. 4.4. WIDOK PODŁUŻNY I POPRZECZNY WŁÓKIEN MAGNETYCZNYCH (RUBACHA, ZIĘBA, 2006)	64
RYS. 5.1. ROZKŁAD PROSTOKĄTNY (DOBROWOLSKA ET AL., 1997)	66
RYS. 5.2. ROZKŁAD NORMALNY (DOBROWOLSKA ET AL., 1997)	67
RYS. 5.3. ALGORYTM TWORZENIA MODELI KOMPUTEROWYCH MIKRO- I NANOWŁÓKIEN MAGNETYCZNYCH ..	68
RYS. 5.4. ALGORYTM ZASADY DZIAŁANIA APLIKACJI GENERUJĄCEJ POJEDYNCZE WŁÓKNO MAGNETYCZNE	70
RYS. 5.5. INTERFEJS GENERATORA MIKROWŁÓKIEN MAGNETYCZNYCH OPRACOWANY NA PLATFORMIE MATLAB	71
RYS. 5.6. LOSOWANIE RÓWNOMIERNE ROZKŁADU ZIAREN FERROMAGNETYCZNYCH WE WŁÓKNIE: A) INTERFEJS, B) WYNIK LOSOWANIA, C) WIDOK Z GÓRY, D) WIDOK Z BOKU	72
RYS. 5.7. LOSOWANIE NIERÓWNOMIERNE ROZKŁADU ZIAREN FERROMAGNETYCZNYCH WE WŁÓKNIE	73
RYS. 5.8. LOSOWANIE WEDŁUG SKUPISK ROZKŁADU ZIAREN FERROMAGNETYCZNYCH WE WŁÓKNIE: A) INTERFEJS, B) WYNIK LOSOWANIA, C) POŁOŻENIE I PROMIENI WYLOSOWANYCH SKUPISK, D) POJEDYNCZE SKUPISKO	73
RYS. 6.1. CZWOROŚCIENNY ELEMENT SIATKI Z OZNACZONYMI WĘZŁAMI	77
RYS. 6.2. ELEMENTY CZWOROŚCIENNE: A) LINIOWY, B) KWADRATOWY; ELEMENTY SZEŚCIOŚCIENNE: C) LINIOWY, D) KWADRATOWY; ELEMENTY PIĘCIOŚCIENNE: E) LINIOWY, F) KWADRATOWY; ELEMENTY OSTROSŁUPOWE: G) LINIOWY, H) KWADRATOWY (RUSISKI, 1994)	78
RYS. 6.3. ELEMENT SZEŚCIOŚCIENNY 8-WĘZŁOWY W LOKALNYM UKŁADZIE WSPÓŁRZĘDNYCH Ξ , H, Z (ZIENKIEWICZ, 2000), (SIKORA, 2008)	79
RYS. 6.4. ELEMENTY CZWOROŚCIENNE: A) ELEMENT 4-WĘZŁOWY, B) ELEMENT 10-WĘZŁOWY (ZIENKIEWICZ, 2000)	80
RYS. 6.5. ELEMENT PIĘCIOŚCIENNY 6-WĘZŁOWY (DHONDT, 2004)	81

RYS. 6.6. SIATKA PODZIAŁOWA Z ELEMENTAMI TYPU PYRAMID: A) POWIERZCHNIOWA; B) ODPOWIADAJĄCA JEJ SIATKA OBJĘTOŚCIOWA	82
RYS. 6.7. 5-WĘZŁOWY ELEMENTY TYPU PYRAMID W LOKALNYM UKŁADZIE WSPÓŁRZĘDNYCH (ZGAINSKI ET AL., 1996)	83
RYS. 6.8. PRZYBLIŻONE WIDOKI MIKROWŁÓKNA MAGNETYCZNEGO: A) ZIARNA FERROMAGNETYKA, B) WŁÓKNO Z NANIESIONĄ SIATKĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH	88
RYS. 6.9. ETAPY ANALIZY MODELI POŁOWYCH MIKROWŁÓKIEN MAGNETYCZNYCH	89
RYS. 6.10. WYCINKI MIKROWŁÓKNA ZAMODELOWANE W PAKIECIE OPERA 3D: A, B) POJEDYNCZY SEGMENT STANOWIĄCY JEDNĄ DZIESIĘCIOTYSIĘCZNĄ CZĘŚĆ DWUDZIEŚTO- CENTYMETROWEGO MIKROWŁÓKNA; C) POŁĄCZENIE PIĘCIU SEGMENTÓW STANOWIĄCYCH JEDNĄ DZIESIĘCIOTYSIĘCZNĄ CZĘŚĆ 20-CENTYMETROWEGO MIKROWŁÓKNA;	90
RYS. 6.11. KRZYWE MAGNESOWANIA MIKROWŁÓKIEN MAGNETYCZNYCH ORAZ ZIAREN FERROMAGNETYKA .	92
RYS. 6.12. ZALEŻNOŚĆ WARTOŚCI PRZENIKALNOŚCI MAGNETYCZNEJ μ_R OD ZAGĘSZCZENIA PROCENTOWEGO FERROMAGNETYKA W MIKROWŁÓKNIE	93
RYS. 6.13. ZALEŻNOŚĆ WARTOŚCI PRZENIKALNOŚCI MAGNETYCZNEJ OD WIELKOŚCI ZIAREN FERROMAGNETYKA W MIKROWŁÓKNIE MAGNETYCZNYM	94
RYS. 6.14. ODWZOROWANIE ZIAREN FERROMAGNETYCZNYCH PRZY POMOCY NASTĘPUJĄCYCH KSZTAŁTÓW: A) KULI, B) WALCÓW, C) PROSTOPADŁOŚCIANÓW	96
RYS. 6.15. ZMIANA WARTOŚCI PRZENIKALNOŚCI MAGNETYCZNEJ POD WPŁYWEM ZWIĘKSZANIA UDZIAŁU PROSZKU MAGNETYCZNEGO WE WŁÓKNIE DLA RÓŻNYCH PRZYPADKÓW KSZTAŁTU FERROMAGNETYKA	97
RYS. 6.16. MODELE HOMOGENIZOWANE MIKROWŁÓKIEN MAGNETYCZNYCH Z FERROMAGNETYKIEM UPROSZCZONYM DO KSZTAŁTU PROSTOPADŁOŚCIANU	98
RYS. 6.17. UŁOŻENIE WŁÓKIEN W WIĄZCE: A) ORTOCYKLICZNE, B) RZĘDOWE	99
RYS. 6.18. ALGORYTM GENEROWANIA WIĄZKI WŁÓKIEN MAGNETYCZNYCH O UŁOŻENIU RZĘDOWYM	100
RYS. 6.19. ALGORYTM GENEROWANIA WIĄZKI WŁÓKIEN MAGNETYCZNYCH O UŁOŻENIU ORTOCYKLICZNYM	101
RYS. 6.20. INTERFEJS DO GENEROWANIA WIĄZEK WŁÓKIEN W OPERA 3D	102
RYS. 6.21. WYCINEK WIĄZKI WŁÓKIEN MAGNETYCZNYCH: A,C) O UŁOŻENIU ORTOCYKLICZNYM - BEZ SIATKI I Z SIATKĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH; B,D) O UŁOŻENIU RZĘDOWYM - BEZ SIATKI I Z SIATKĄ ELEMENTÓW;	103
RYS. 6.22. ZALEŻNOŚĆ INDUKCJI MAGNETYCZNEJ W FUNKCJI NATĘŻENIA POLA DLA RÓŻNYCH WIĄZEK WŁÓKIEN MAGNETYCZNYCH	104
RYS. 6.23. WYCINEK WIĄZKI WŁÓKIEN MAGNETYCZNYCH SKRĘCONYCH: A,C) O UŁOŻENIU ORTOCYKLICZNYM - BEZ SIATKI I Z SIATKĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH; B,D) O UŁOŻENIU RZĘDOWYM - BEZ SIATKI I Z SIATKĄ ELEMENTÓW;	105
RYS. 6.24. ZALEŻNOŚĆ INDUKCJI MAGNETYCZNEJ W FUNKCJI NATĘŻENIA POLA DLA RÓŻNYCH SKRĘCONYCH WIĄZEK WŁÓKIEN MAGNETYCZNYCH	106

RYS. 6.25. ROZKŁAD INDUKCJI MAGNETYCZNEJ DLA WIĄZKI WŁÓKIEN UŁOŻONYCH RZĘDOWO.....	107
RYS. 6.26. ROZKŁAD INDUKCJI MAGNETYCZNEJ DLA WIĄZKI WŁÓKIEN UŁOŻONYCH ORTOCYKLICZNIE	107
RYS. 6.27. MODEL WIĄZKI WŁÓKIEN MAGNETYCZNYCH Z WARUNKAMI BRZEGOWYMI.....	108

Dodatek (kody programów)

- Plik do obsługi interfejsu, służącego do generowania pojedynczych włókien w MATLAB'ie „sterowanie”:

```
clear dane
global dane
tytul='microfibre data';
zapytania={'Microfibre length','Microfibre radius','Minimum radius of
ferromagnetic grains',...
'Maximum radius of ferromagnetic grains','Concentration [%]','Number
of segments',...
'Kind of view (0- no view)','Name of file (nothing- run to
bracket)','Sampling type (uniform,nonuniform,[domains])',...
'Maximum number of iteration'};
domyslnie={'0.1','8e-3','1.5e-3','2.5e-3','3','1','2','
','domains','25000'};

% Typ losowania (rown,[nrown],skup) : uni - rownomierny, nuni -
% nierownomierny, dom - losowanie w skupiskach

ilosc_linii=1;
odpowiedz=inputdlg(zapytania,tytul,ilosc_linii,domyslnie);
[w_dl,w_pr,s_prmin,s_prmax,zag,segm,widok,plik,typ_losow,maks_iter
]=deal(odpowiedz{:});

dane.maks_iter=str2double(maks_iter);

dane.w_dl=str2double(w_dl);
dane.w_pr=str2double(w_pr);
dane.s_prmin=str2double(s_prmin);
dane.s_prmax=str2double(s_prmax);
dane.zag=str2double(zag);
dane.segm=str2double(segm);
dane.widok=str2double(widok);
dane.plik='';
dane.typ_losow=typ_losow;

if(strcmp(dane.typ_losow,'domains'))
    tytul='Domains data';
    zapytania={'Number of domains','Minimum radius of
domain','Maximum radius of domain','Domains drawing: false/true'};
    domyslnie={'3','0.001','0.01','true'};
    odpowiedz=inputdlg(zapytania,tytul,ilosc_linii,domyslnie);
    [il_skup,pr_skup_min,pr_skup_maks,rysuj_skup]=deal(odpowiedz{:});
    dane.skupiska.ilosc=str2double(il_skup); % ilosc skupisk
    dane.skupiska.Rmin=str2double(pr_skup_min); % minimalny,
    podstawowy promień skupiska
    dane.skupiska.Rmaks=str2double(pr_skup_maks); % maksymalny,
    podstawowy promień skupiska
    dane.skupiska.rysuj=strcmp(rysuj_skup,'true'); % czy rysować
    linie w skupiskach
elseif(strcmp(dane.typ_losow,'uniform'))
```

```

        tytul='Division data';
        zapytania={'Division (according to height)', 'Division (according
to radius)', 'Space factor', 'Automatically divide'};
        domyslnie={'6', '4', '1', 'true'};
        odpowiedz=inputdlg(zapytania,tytul,ilosc_linii,domyslnie);
        [podz_z,podz_d,wspol_odstepu,dopasuj_skup]=deal(odpowiedz{:});
        dane.podzial.dopasuj=strcmp(dopasuj_skup,'true'); % dopasowanie
automatyczne do średniego promienia ziarna
        dane.podzial.wspol_odstepu=str2double(wspol_odstepu); % oddalenie
kulek dla automatycznego promienia
        if(dane.podzial.dopasuj==1)

dane.podzial.Z=ceil(dane.w_dl/((dane.s_prmax+dane.s_prmin)*dane.podzi
al.wspol_odstepu));
        dane.podzial.D=ceil(4*
dane.w_pr/((dane.s_prmax+dane.s_prmin)*dane.podzial.wspol_odstepu)/2)
;
        else
                dane.podzial.Z=str2double(podz_z); % % podział po wysokości
                dane.podzial.D=str2double(podz_d); % podział po promieniu
        end
end
dane=wlokno(dane);

rysuj(dane);
hold on
if strcmp(dane.typ_losow,'domains')
        if dane.skupiska.rysuj==1
                rysuj_skupiska(dane);
        end
end
hold off
disp(' ');
comi(dane)
disp(' ');
wyswietl_komunikaty

```

- Dane wyjściowe wczytywane do OPERY 3D (przypadek dla zagęszczenia 23%, losowanie równomierne):

Zagęszczenie przyjęte = 23 %

Zagęszczenie aktualne = 23.325 %

Ilość kulek = 40

Ilość losowań = 955

Elapsed time is 0.459540 seconds.

```

CYLINDER Name=wlokno X0=0 Y0=0 Z0=0 X1=0 Y1=0 Z1=0.02 -TUBE MAJORRADIUS=0.006
MINORRADIUS=0.006 TOPRADIUS=0.006 SIDES=2
THREED OPTION=SETVIEW SIZE=0
FILTER COMMAND=CURSORHIDE

```

FILTER TYPE=BODY

SELECT OPTION=CURSORHIDE PROPERTY=UniqueName LABEL=wlokno

SPHERE	Name=ziarno	X0=0.00025649	Y0=0.0021541	Z0=0.0097876	RADIUS=0.0024252
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=0.00012697	Y0=-0.0016672	Z0=0.0026205	RADIUS=0.0023369
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.0021803	Y0=0.00078956	Z0=0.014535	RADIUS=0.0022321
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.0024062	Y0=0.0031894	Z0=0.0012626	RADIUS=0.0010868
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=0.0024121	Y0=-0.0029153	Z0=0.011578	RADIUS=0.0015676
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.0031889	Y0=-0.00069346	Z0=0.0067624	RADIUS=0.0015118
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=0.0019172	Y0=-0.000533	Z0=0.015936	RADIUS=0.0021922
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=0.0031817	Y0=-0.00081481	Z0=0.0084997	RADIUS=0.0014801
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.00011905	Y0=0.0039716	Z0=0.0054016	RADIUS=0.0014097
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=0.0027811	Y0=0.0014924	Z0=0.0044821	RADIUS=0.0010746
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=0.0027553	Y0=-0.002939	Z0=0.0060842	RADIUS=0.0016879
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=0.00078973	Y0=-0.0008113	Z0=0.012555	RADIUS=0.0012405
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=0.0030073	Y0=0.00095965	Z0=0.012568	RADIUS=0.0014461
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.0014161	Y0=-0.0044181	Z0=0.015348	RADIUS=0.0012789
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.0031141	Y0=-0.0014907	Z0=0.018253	RADIUS=0.0010739
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.0018532	Y0=-0.0030915	Z0=0.006079	RADIUS=0.001022
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.00093169	Y0=-0.0034892	Z0=0.018369	RADIUS=0.0013927
MATERIALLABEL='ziarno'					

SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.00096627	Y0=0.0039489	Z0=0.018717	RADIUS=0.0010223
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.00072803	Y0=-0.0024043	Z0=0.010153	RADIUS=0.0016873
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.0015728	Y0=0.0040661	Z0=0.016022	RADIUS=0.0010194
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=0.0036619	Y0=-0.0023368	Z0=0.0015206	RADIUS=0.0012895
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=0.0022582	Y0=0.0035354	Z0=0.0168	RADIUS=0.0010325
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=0.0015856	Y0=0.0025377	Z0=0.0013154	RADIUS=0.0013115
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.0032893	Y0=0.00027736	Z0=0.0037212	RADIUS=0.0016014
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.002357	Y0=0.0024805	Z0=0.017789	RADIUS=0.0010646
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.000679	Y0=-0.0036741	Z0=0.012807	RADIUS=0.0011154
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.0022697	Y0=0.0029094	Z0=0.0063919	RADIUS=0.0010396
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=0.0010741	Y0=0.0039242	Z0=0.013743	RADIUS=0.001217
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.00082621	Y0=0.0016012	Z0=0.018887	RADIUS=0.0010057
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=0.00048044	Y0=-0.00099464	Z0=0.018934	RADIUS=0.0010604
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.0040205	Y0=-0.0022098	Z0=0.0094289	RADIUS=0.0013148
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=0.0007072	Y0=0.0048357	Z0=0.016499	RADIUS=0.0010052
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=0.0024606	Y0=0.0020283	Z0=0.018759	RADIUS=0.0011896
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.0034824	Y0=-0.0025119	Z0=0.0042403	RADIUS=0.0012218
MATERIALLABEL='ziarno'					
SPHERE	Name=ziarno	X0=-0.0015117	Y0=0.0045634	Z0=0.0028526	RADIUS=0.0010188
MATERIALLABEL='ziarno'					

```

SPHERE   Name=ziarno   X0=-0.0026322   Y0=0.0040636   Z0=0.011379   RADIUS=0.0010411
MATERIALLABEL='ziarno'

SPHERE   Name=ziarno   X0=-0.0040933   Y0=0.00042046   Z0=0.0093938   RADIUS=0.0011278
MATERIALLABEL='ziarno'

SPHERE   Name=ziarno   X0=-3.819e-005   Y0=1.355e-005   Z0=0.0062991   RADIUS=0.0015817
MATERIALLABEL='ziarno'

SPHERE   Name=ziarno   X0=-0.0030608   Y0=-0.0012133   Z0=0.018152   RADIUS=0.0015518
MATERIALLABEL='ziarno'

SPHERE   Name=ziarno   X0=-0.0040438   Y0=-0.0020819   Z0=0.013061   RADIUS=0.0012959
MATERIALLABEL='ziarno'

PICK OPTION=ADD

PICK PROPERTY=Name LABEL=wlokno

PICK PROPERTY=Name LABEL=ziarno

TRANSFORM OPTION=COPY KEEP=NO TYPE=DISPLACE DU=0 DV=0 DW=0.02 COUNT=9999

```

- Plik do losowania równomiernego: losuj_rown

```

function [x,y,z,r]=losuj_rown(dane)

w_dl=dane.w_dl;
w_pr=dane.w_pr;
s_prmin=dane.s_prmin;
s_prmax=dane.s_prmax;
podz_z=dane.podzial.Z;
podz_d=dane.podzial.D;

z=(w_dl/podz_z)*(0.5+floor(podz_z*rand()));
r=s_prmin+rand()*(s_prmax-s_prmin);

wsp=zeros(podz_d);
for ind_x=1:podz_d
    for ind_y=1:podz_d
        wsp_x=2*w_pr*(ind_x-0.5)/podz_d-w_pr;
        wsp_y=2*w_pr*(ind_y-0.5)/podz_d-w_pr;
        if sqrt(wsp_x^2+wsp_y^2)+r>=w_pr
            wsp(ind_x,ind_y)=0;
        else
            wsp(ind_x,ind_y)=1;
        end
    end
end
ile=sum(sum(wsp));
if(ile==0) % brak możliwości wyboru współrzędnych
    r=0;
    x=0;
    y=0;
    return
end
pozycja=ceil(rand()*ile);
ind=1;
for ind_x=1:podz_d

```

```

        for ind_y=1:podz_d
            if wsp(ind_x,ind_y)==1
                if (ind==pozycja)
                    x=2*w_pr*(ind_x-0.5)/podz_d-w_pr;
                    y=2*w_pr*(ind_y-0.5)/podz_d-w_pr;
                    return
                end
                ind=ind+1;
            end
        end
    end
end

```

- Plik do losowania nierównomiernego: losuj_nrown

```

function [x,y,z,r]=losuj_nrown(dane)

w_dl=dane.w_dl;
w_pr=dane.w_pr;
s_prmin=dane.s_prmin;
s_prmax=dane.s_prmax;

% I sposób
r=s_prmin+rand()*(s_prmax-s_prmin);

kat=rand()*2*pi();
pr=rand()*(w_pr-r);

x=pr*cos(kat);
y=pr*sin(kat);

z=r+rand()*(w_dl-2*r);

% II sposób
% while true
%     x=(rand()*2-1);
%     y=(rand()*2-1);
%     if ((x)^2+(y)^2)<=1
%         break
%     end
% end
% z=s_pr+rand()*(w_dl-2*s_pr);

```

- Plik do losowania w skupiskach: losuj_skupiska

```

function [x,y,z,r,nr_skupiska]=losuj_skup(dane)

ilosc=dane.skupiska.ilosc;
w_dl=dane.w_dl;
w_pr=dane.w_pr;
s_prmin=dane.s_prmin;
s_prmax=dane.s_prmax;

r=s_prmin+rand()*(s_prmax-s_prmin);

```

```

nr_skupiska=ceil(rand()*ilosc);

skupisko.x=dane.skupiska.wsp(nr_skupiska,1);
skupisko.y=dane.skupiska.wsp(nr_skupiska,2);
skupisko.z=dane.skupiska.wsp(nr_skupiska,3);
skupisko.R=dane.skupiska.wsp(nr_skupiska,4);

z=randnz(r,w_dl-r,skupisko.z,skupisko.R);

kat=asind(abs(skupisko.y)/sqrt(skupisko.x^2+skupisko.y^2));
if(skupisko.x>=0 && skupisko.y>=0)
    d=0;
elseif(skupisko.x<=0 && skupisko.y>=0)
    d=90;
elseif(skupisko.x<=0 && skupisko.y<=0)
    d=180;
elseif(skupisko.x>=0 && skupisko.y<=0)
    d=270;
end
kat=kat+d;
pr=randnz(0,w_pr-r,sqrt(skupisko.x^2+skupisko.y^2),skupisko.R);
if(skupisko.R<pr)
    kat=randnz(0,360,kat,asind(skupisko.R/pr));
else
    kat=randnz(0,360,kat,45);
end
x=pr*cosd(kat);
y=pr*sind(kat);

```

- **randnz**

```

function w=randnz(zmin,zmax,z,r)
ind=0;
w=zmin-1;
while ~(w>=zmin && w<=zmax)
    ind=ind+1;
    if ind>1000
        disp('Przekroczona liczba iteracji w randz')
        w=0;
        break
    end
    w=z+randn()*r;
end

```

- **Plik do rysowania włókna: rysuj**

```

function rysuj(dane)

w_dl=dane.w_dl;
w_pr=dane.w_pr;
widok=dane.widok;
wsp_ziaren=dane.wsp_ziaren;

```

```

if(widok~=0)
    w_tran=0.2;
    s_tran=0.6;
    [X,Y,Z] = cylinder(w_pr);
    surf(X,Y,Z*w_dl, 'FaceAlpha',w_tran);
    hold on

    for(ind=1:size(wsp_ziaren,1))
        [X,Y,Z] = sphere();
        x=wsp_ziaren(ind,1);
        y=wsp_ziaren(ind,2);
        z=wsp_ziaren(ind,3);
        r=wsp_ziaren(ind,4);
        surf(X*r+x,Y*r+y,Z*r+z, 'FaceAlpha',s_tran);
    end

    hold off
    axis square;
    %hidden off
    %hidden on;

    switch(widok)
    case 1
        axis([-w_dl/2 w_dl/2 -w_dl/2 w_dl/2 0 w_dl]);
    case 2
        axis([-w_dl/2 w_dl/2 -w_dl/2 w_dl/2 0 w_dl]);
        shading flat;
    case 3
        view([0,0,1]);
        axis([-w_pr w_pr -w_pr w_pr]);
    case 4
        view([0,0,1]);
        axis([-w_pr w_pr -w_pr w_pr]);
        shading flat;
    end
end
hold off

```

- Plik do rysowania ziaren w skupiskach: rysuj_skupiska

```

function rysuj_skupiska(dane)
hold on
if(dane.skupiska.rysuj==1)
    for(ind=1:size(dane.wsp_ziaren,1))
        x1=dane.wsp_ziaren(ind,1);
        y1=dane.wsp_ziaren(ind,2);
        z1=dane.wsp_ziaren(ind,3);
        nr=dane.skupiska.indeksy(ind);
        x2=dane.skupiska.wsp(nr,1);
        y2=dane.skupiska.wsp(nr,2);
        z2=dane.skupiska.wsp(nr,3);
        plot3([x1,x2],[y1,y2],[z1,z2]);
    end
end
hold off

```

- Plik do generowania skryptów comi dla OPERA 3D: comi

```
function comi(dane);
global hplik

w_dl=dane.w_dl;
w_pr=dane.w_pr;
segm=dane.segm;
plik=dane.plik;
wsp_ziaren=dane.wsp_ziaren;

if(length(plik)==0)
    format compact
    hplik=0;
else
    disp(['Dane zostały zapisane w pliku: ',plik])
    hplik = fopen(plik, 'w');
end

pr=num2str(w_pr);
dl=num2str(w_dl);

dln(strcat('CYLINDER Name=wlokno X0=0 Y0=0 Z0=0 X1=0 Y1=0 Z1=',dl,' -
TUBE MAJORRADIUS=',pr,' MINORRADIUS=',pr,' TOPRADIUS=',pr,'
SIDES=2'));
dln('THREED OPTION=SETVIEW SIZE=0');
dln('FILTER COMMAND=CURSORHIDE');
dln('FILTER TYPE=BODY');
dln('SELECT OPTION=CURSORHIDE PROPERTY=UniqueName LABEL=wlokno');

for(ind=1:size(wsp_ziaren,1))
    x=num2str(wsp_ziaren(ind,1));
    y=num2str(wsp_ziaren(ind,2));
    z=num2str(wsp_ziaren(ind,3));
    r=num2str(wsp_ziaren(ind,4));
    dln(strcat('SPHERE Name=ziarno', ' X0=',x,' Y0=',y,' Z0=',z,'
RADIUS=',r));
end
% dln('FILTER TYPE=CELL');
% dln('PICK OPTION=GUIUPDATE');
% dln('PICK OPTION=ADD, | PICK PROPERTY=Name LABEL=kula | PICK
OPTION=GUIUPDATE');
% dln('CELldata OPTION=MODIFY MATERIALLABEL=kula POTENTIAL=Automatic
ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=100');
dln('PICK OPTION=ADD ');
dln('PICK PROPERTY=Name LABEL=wlokno ');
dln('PICK PROPERTY=Name LABEL=ziarno ');
segm=num2str(segm-1);
dln(strcat('TRANSFORM OPTION=COPY KEEP=NO TYPE=DISPLACE DU=0 DV=0
DW=',dl,' COUNT=',segm));

if(hplik>0)
    fclose(hplik);
end
```

- dln

```
function dln(str)
global hplik

if(hplik==0)
    disp(str)
else
    fprintf(hplik, '%s\n', str);
end
```

- Plik do rysowania ziaren: sfera

```
function [X,Y,Z]=sfera()
[X,Y,Z]=sphere();
x=[];y=[];z=[];
[m,n]=size(X);
for(ind=1:n*m)
    x=[x;X(ind)];y=[y;Y(ind)];z=[z;Z(ind)];
end

X=[ 0; 0; 1;-1; 0; 0];
Y=[ 0; 0; 0; 0; 1; -1];
Z=[ 1;-1; 0; 0; 0; 0];

for(i=1:length(x))
    log=true;
    for(j=1:length(X))
        if((X(j)==x(i)) & (Y(j)==y(i)) & (Z(j)==z(i)))
            log=false;
            break;
        end
    end
    if(log)
        X=[X;x(i)];Y=[Y;y(i)];Z=[Z;z(i)];
    end
end
```

- warunek

```
function wyn=warunek(x1,y1,z1,r1,x2,y2,z2,r2,X,Y,Z)

if((x1==x2 && y1==y2 && z1==z2) || (r1==0))
    wyn=true;
else

    % X1=x1+X*r;
    % Y1=y1+Y*r;
    % Z1=z1+Z*r;

    X2=x2+X*r2;
```

```

Y2=y2+Y*r2;
Z2=z2+Z*r2;

% plot3(X1,Y1,Z1,'r.')
% hold on
% plot3(X2,Y2,Z2,'b.')
% hold off
for ind=1:length(X)
    if ((x1-X2(ind))^2+(y1-Y2(ind))^2+(z1-Z2(ind))^2<=r1^2)
        wyn=true;
        return;
    end
end
wyn=false;
end

```

- Plik do rysowania włókna: wlokno

```

function [dane]=wlokno(dane)
global komunikaty
komunikaty.uwagi='';
w_dl=dane.w_dl;
w_pr=dane.w_pr;
zag=dane.zag;
segm=dane.segm;

tic();

w_dl=w_dl/segm;

w_obj=pi()*w_pr^2*w_dl;
w_obj=4/3*pi()/w_obj*100;

s_ile=0;
s_obj=0;
st=0;
rand_ile=0;

wsp_ziaren=[];
wsp_skupisk=[];
dane.skupiska.indeksy=[];

[X,Y,Z]=sfera();
s_obj=0;

if strcmp(dane.typ_losow,'domains')
    for ind=1:dane.skupiska.ilosc
        [xa,ya,za,ra]=losuj_nrown(dane);

wsp_skupisk=[wsp_skupisk;[xa,ya,za,dane.skupiska.Rmin+rand()*(dane.skupiska.Rmaks-dane.skupiska.Rmin)]];
    end
    dane.skupiska.wsp=wsp_skupisk;
    % dla rysunku:
    if dane.skupiska.rysuj==1
        dane.wsp_ziaren=wsp_skupisk;
    end
end

```

```

        rysuj(dane);
        title('Położenie wylosowanych skupisk.');
```

disp('Naciśnij dowolny przycisk.');

```

        pause
    end
end

while true
    rand_ile=rand_ile+1;
    switch dane.typ_losow
        case 'domains'
            [xa,ya,za,ra,nr]=losuj_skup(dane);
        case 'uniform'
            [xa,ya,za,ra]=losuj_rown(dane);
        otherwise %'nonuniform'
            [xa,ya,za,ra]=losuj_nrown(dane);
    end
    nachodza_sie=0;
    for ind=1:size(wsp_ziaren,1)
        xspr=wsp_ziaren(ind,1);yspr=wsp_ziaren(ind,2);
        zspr=wsp_ziaren(ind,3);rspr=wsp_ziaren(ind,4);
        if(warunek(xspr,yspr,zspr,rspr,xa,ya,za,ra,X,Y,Z)==true)
            nachodza_sie=1;
            break
        end
        if(warunek(xa,ya,za,ra,xspr,yspr,zspr,rspr,X,Y,Z)==true)
            nachodza_sie=1;
            break
        end
    end
end
% Komunikaty
clc
komunikaty.zag=zag;
komunikaty.st=st;
komunikaty.s_ile=s_ile;
komunikaty.rand_ile=rand_ile;
komunikaty.maks_iter=dane.maks_iter;
wyswietl_komunikaty;

if(nachodza_sie==0)
    wsp_ziaren=[wsp_ziaren;[xa,ya,za,ra]];
    if strcmp(dane.typ_losow,'domains')
        dane.skupiska.indeksy=[dane.skupiska.indeksy;nr];
    end
    s_ile=s_ile+1;
    s_obj=s_obj+ra.^3;
    st=s_obj*w_obj;

    if(st>=zag)
        break
    end
end
if (dane.maks_iter<rand_ile)
    disp('Uwaga: Przekroczona liczba iteracji.')
```

disp('Naciśnij jakiś przycisk.')

```

    disp(' ')
    pause
    break
end

```

```

        end

    end

    toc();

    dane.wsp_ziaren=wsp_ziaren;

```

- **wyświetl_komunikaty**

```

function wyswietl_komunikaty()
global komunikaty
    disp(['Zageszczenie przyjęte = ', num2str(komunikaty.zag), '
%' ])
    disp(['Zageszczenie aktualne = ', num2str(komunikaty.st), '
%' ])
    disp(['Ilosc kulek    = ', num2str(komunikaty.s_ile)])
    disp(['Ilosc losowan = ', num2str(komunikaty.rand_ile), ' /
', num2str(komunikaty.maks_iter)])
    if (~strcmp(komunikaty.uwagi, ''))
        disp(['Uwagi: ', komunikaty.uwagi])
    end
end

```

Dane wyjściowe do funkcji:

```

Zageszczenie przyjęte = 3 %
Zageszczenie aktualne = 2.9681 %
Ilosc kulek    = 18
Ilosc losowan = 47 / 25000
>> dane
dane =
    maks_iter: 25000
    w_dl: 0.1000
    w_pr: 0.0080
    s_prmin: 0.0015
    s_prmax: 0.0025
    zag: 3
    segm: 1
    widok: 2
    plik: ''
    typ_losow: 'domains'
    skupiska: [1x1 struct]
    wsp_ziaren: [19x4 double]

```

- Obliczanie mi zastępczego (pojedyncze włókno)

```

VOLUME ACTION=REMOVE, | VOLUME LABEL=ALL_MATERIALVOLUMES
VOLUME ACTION=REMOVE, | VOLUME LABEL=ALL_USERVOLUMES
VOLUME ACTION=ADD, | VOLUME LABEL=WLOKNO

```

```

VOLUME ACTION=ADD, | VOLUME LABEL=ZIARNO
/++ VOLUME ACTION=ADD, | VOLUME LABEL=air
VOLUME ACTION=INTEGRATE COMP=Bmod ADAPT=NO
$constant #intBmod integral
$constant #objetosc volume
VOLUME ACTION=INTEGRATE COMP=Hmod ADAPT=NO
$constant #intHmod integral
$constant #c1 #intBmod/#objetosc
$constant #c2 #intHmod/#objetosc
$parameter #mi_r #c1/(#c2*mu0)
$dialog start 'przenikalnosc'
$displayline 'Srednia przenikalnosc: mi_r=%real(#mi_r)'
$displayline 'Srednia indukcja: Bmod=%real(#c1) [T]'
$displayline 'Srednie natezenie pola: Hmod=%real(#c2) [A/m]'
$dialog stop

```

- Generowanie wiązki 1-twist

```

PICK OPTION=ALL TYPE=BODY
DELETE REGULARISE=YES EXTERNAL=NO

$DIALOG ACTION=start TITLE='Wiazki - ułożenie rzędowe'
$ask #R 'Promień włókna:'
$ask #H 'Długość włókna:'
$ask #odleglosc 'Odległość między włókniami:'
$ask #ilosc_wlokien_X 'Ilość włókien w kierunku X:'
$ask #ilosc_wlokien_Y 'Ilość włókien w kierunku Y:'
$ask #kat_skrecenia 'Kąt skręcenia wiązki (w stopniach):'
$ask #Hx 'Hx: '
$ask #Hy 'Hy: '
$ask #Hz 'Hz: '
$DIALOG stop

$constant #przesuniecie #odleglosc+2*#R
$parameter #stopX (#ilosc_wlokien_X-1)*#przesuniecie
$parameter #stopY (#ilosc_wlokien_Y-1)*#przesuniecie
/++ numer włókna
$constant #NR 1

$do #X 0 #stopX #przesuniecie
$do #Y 0 #stopY #przesuniecie
  CYLINDER Name='Cylinder-%int(#NR)' X0=%real(#X) Y0=%real(#Y) Z0=0 X1=%real(#X)
Y1=%real(#Y) Z1=%real(#H) -TUBE SHAPECONTROL=SIMPLE MAJORRADIUS=%real(#R)
MINORRADIUS=%real(#R) TOPRADIUS=%real(#R) SIDES=2 MATERIALLABEL='włókno'
  PICK OPTION=ADD PROPERTY=Name LABEL='Cylinder-%int(#NR)'

```

```

CELLDATA OPTION=MODIFY MATERIALLABEL='wlokno' POTENTIAL=Default
ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=100 SIZE=%real(#R/2) VOLUMELABEL='wlokno-%int(#NR)'
ELEMSHAPEPREF=HEXORPRISM
PICK OPTION=RESET PROPERTY=Name LABEL='Cylinder-%int(#NR)'
$constant #NR #NR+1
$end do
$end do

/++ przesuwanie srodka wiazki do p.0,0,0
$constant #nX mod(#ilosc_wlokien_X;2)
$constant #nY mod(#ilosc_wlokien_Y;2)
$constant #wektor_X ((#ilosc_wlokien_X-1)/2)*#przesuniecie*(-1)
$constant #wektor_Y ((#ilosc_wlokien_Y-1)/2)*#przesuniecie*(-1)
PICK OPTION=ALL TYPE=BODY
TRANSFORM OPTION=APPLY KEEP=NO TYPE=DISPLACE DU=%real(#wektor_X)
DV=%real(#wektor_Y) DW=0

/++ background
$constant #r1 #ilosc_wlokien_X*#przesuniecie
$constant #r2 #ilosc_wlokien_Y*#przesuniecie
CYLINDER Name='Background' X0=0 Y0=0 Z0=0 X1=0 Y1=0 Z1=%real(#H) -TUBE
SHAPECONTROL=SIMPLE MAJORRADIUS=%real(#r1) MINORRADIUS=%real(#r2)
TOPRADIUS=%real(#r1) SIDES=2
PICK OPTION=ADD PROPERTY=Name LABEL='Background'
CELLDATA OPTION=MODIFY MATERIALLABEL='Air' POTENTIAL=Default
ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=1 SIZE=%real(#R) VOLUMELABEL='Background'
ELEMSHAPEPREF=HEXORPRISM
PICK OPTION=RESET PROPERTY=Name LABEL='Background'

/++ dodatkowy background
$constant #bokX (2*#R+#odleglosc)*#ilosc_wlokien_X
$constant #bokY (2*#R+#odleglosc)*#ilosc_wlokien_Y
BLOCK Name='Background-wewn.' X0=%real(-#bokX/2) Y0=%real(-#bokY/2) Z0=0
X1=%real(#bokX/2) Y1=%real(#bokY/2) Z1=%real(#H)
PICK OPTION=ADD PROPERTY=Name LABEL='Background-wewn.'
CELLDATA OPTION=MODIFY MATERIALLABEL='Air' POTENTIAL=Default
ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=10 SIZE=%real(#R) VOLUMELABEL='Background-wewn.'
ELEMSHAPEPREF=HEXORPRISM
PICK OPTION=RESET PROPERTY=Name LABEL='Background-wewn.'

/++ skrecanie i podzial
$if #kat_skrecania ne 0
PICK OPTION=ALL TYPE=BODY
/++ PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=Name LABEL='Background'
TWIST KEEP=NO U1=0 V1=0 W1=0 ANGLE1=0 U2=0 V2=0 W2=%real(#H)
ANGLE2=%real(#kat_skrecania) CONTINUITY=0

```

```

$constant #liczb_segment 20
$constant #grub_segmn #H/#liczb_segment
CYLINDER Name='powierzchnie_tnace' X0=0 Y0=0 Z0=%real(#grub_segmn) X1=0 Y1=0
Z1=%real(#grub_segmn) -TUBE SHAPECONTROL=SIMPLE MAJORRADIUS=%real(#r1)
MINORRADIUS=%real(#r2) TOPRADIUS=%real(#r1) SIDES=2
PICK OPTION=ADD PROPERTY=Name LABEL='powierzchnie_tnace'
TRANSFORM OPTION=COPY KEEP=NO TYPE=DISPLACE DU=0 DV=0
DW=%real(#grub_segmn) COUNT=%real(#liczb_segment-2)
PICK PROPERTY=MaterialLabel LABEL=wlokno
CELLDATA OPTION=MODIFY MATERIALLABEL='wlokno' POTENTIAL=Default
ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=100 SIZE=3 ELEMSHAPEPREF=TETRAHEDRAL
PICK OPTION=RESET
$end if

```

```

ANALYSISDATA OPTION=SET PROGRAM=TOSCAMAGN LINEAR=NO NLITERTYPE=NEWTON
NITERATIONS=21 TOLERANCE=1.0E-03 HX=%real(#Hx) HY=%real(#Hy) HZ=%real(#Hz)
RHS=ADAPTIVE POTENTIALCUT=YES
PICK OPTION=TOGGLE TYPE=FACE UNIQUEBODYNAME='Background' IDENTIFIER=A.00001
PICK OPTION=TOGGLE TYPE=FACE UNIQUEBODYNAME='Background' IDENTIFIER=A.00002
FACEDATA OPTION=MODIFY BOUNDARYLABEL='bc-bok' ELEMENTTYPE=Linear
FORMETHOD=NONE BACKMETHOD=NONE
PICK OPTION=RESET

```

```

PICK OPTION=TOGGLE TYPE=FACE UNIQUEBODYNAME='Background' IDENTIFIER=A.00004
PICK OPTION=TOGGLE TYPE=FACE UNIQUEBODYNAME='Background' IDENTIFIER=A.00003
FACEDATA OPTION=MODIFY BOUNDARYLABEL='bc-podstawy' LEVEL=100
ELEMENTTYPE=Linear FORMETHOD=NONE BACKMETHOD=NONE

```

```

BOUNDARY PICK 'bc-podstawy'
BOUNDARY OPTION=MODIFY CONDITION=NORMMAGN
BOUNDARY UNPICK 'bc-podstawy'
BOUNDARY PICK 'bc-bok'
BOUNDARY OPTION=MODIFY CONDITION=TANGMAGN
BOUNDARY UNPICK 'bc-bok'

```

- Rysowanie wiązki 2- twist

```

PICK OPTION=ALL TYPE=BODY
DELETE REGULARISE=YES EXTERNAL=NO

```

```

$DIALOG ACTION=start TITLE='Wiazki - ułożenie ortocykliczne'
$ask #R 'Promien wlokna:'
$ask #H 'Dlugosc wlokna:'
$ask #odleglosc 'Odleglosc miedzy wloknami:'
$ask #ilosc_wlokien_X 'Ilosc wlokien w kierunku X:'
$ask #ilosc_wlokien_Y 'Ilosc wlokien w kierunku Y:'

```

```

$ask #kat_skrecenia 'Kat skrecenia wiazki (w stopniach):'
$ask #Hx 'Hx: '
$ask #Hy 'Hy: '
$ask #Hz 'Hz: '
$DIALOG stop

/++ przesuniecie srodkow dla wsp Y
$constant #Y0 #R+#odleglosc/2
/++ pryesuniecie srodkow dla wsp X
$constant #X0 sqrt((2*#R+#odleglosc)**2-(#Y0)**2)

$constant #przesuniecieX #odleglosc+#X0
$constant #przesuniecieY #odleglosc+2*#R

$parameter #stopX (#ilosc_wlokien_X-1)*#przesuniecieX
$parameter #stopY (#ilosc_wlokien_Y-1)*#przesuniecieY
$constant #N 1
$constant #G 1

/++ numer wlokn
$constant #NR 1

$do #X 0 #stopX #przesuniecieX
  $do #Y 0 #stopY #przesuniecieY
    $constant #G mod(#N;2)
/++ rzad nieparzysty
  $if #G eq 1
    CYLINDER Name='Cylinder-%int(#NR)' X0=%real(#X) Y0=%real(#Y) Z0=0 X1=%real(#X)
Y1=%real(#Y) Z1=%real(#H) -TUBE SHAPECONTROL=SIMPLE MAJORRADIUS=%real(#R)
MINORRADIUS=%real(#R) TOPRADIUS=%real(#R) SIDES=2
PICK OPTION=ADD PROPERTY=Name LABEL='Cylinder-%int(#NR)'
CELLDATA OPTION=MODIFY MATERIALLABEL='wlokno' POTENTIAL=Default
ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=100 SIZE=%real(#R/2) VOLUMELABEL='wlokno-%int(#NR)'
ELEMSHAPEPREF=HEXORPRISM
PICK OPTION=RESET PROPERTY=Name LABEL='Cylinder-%int(#NR)'

  $end if
/++ rzad parzysty
  $if #G eq 0
    CYLINDER Name='Cylinder-%int(#NR)' X0=%real(#X) Y0=%real(#Y+#Y0) Z0=0
X1=%real(#X) Y1=%real(#Y+#Y0) Z1=%real(#H) -TUBE SHAPECONTROL=SIMPLE
MAJORRADIUS=%real(#R) MINORRADIUS=%real(#R) TOPRADIUS=%real(#R) SIDES=2
MATERIALLABEL='wlokno'
PICK OPTION=ADD PROPERTY=Name LABEL='Cylinder-%int(#NR)'

```

```

CELLDATA      OPTION=MODIFY          MATERIALLABEL='wlokno'      POTENTIAL=Default
ELEMENTTYPE=Linear  LEVEL=100      SIZE=%real(#R/2)  VOLUMELABEL='wlokno-%int(#NR)'
ELEMSHAPEPREF=HEXORPRISM
PICK OPTION=RESET PROPERTY=Name LABEL='Cylinder-%int(#NR)'
    $end if
$constant #NR #NR+1
$end do

/++ dodatkowy background
$constant #wspX0 #X-#R-#odleglosc
$constant #wspX1 #X+#R+#odleglosc
$constant #wspY0 0-#R-#odleglosc
$constant #wspY1 (2*#R+#odleglosc)*(#ilosc_wlokien_Y-1)+#R+#odleglosc
    $if #G eq 1
BLOCK      Name='Background-wewn.'  X0=%real(#wspX0)      Y0=%real(#wspY0)      Z0=0
X1=%real(#wspX1) Y1=%real(#wspY1) Z1=%real(#H)
    $end if
    $if #G eq 0
BLOCK      Name='Background-wewn.'  X0=%real(#wspX0)      Y0=%real(#wspY0+#Y0)      Z0=0
X1=%real(#wspX1) Y1=%real(#wspY1+#Y0) Z1=%real(#H)
    $end if
$constant #N #N+1
$end do

/++ dodatkowy background - sumowanie i ustawienia
PICK OPTION=ADD PROPERTY=Name LABEL='Background-wewn.'
COMBINE OPERATION=UNION +REGULAR
PICK OPTION=ADD PROPERTY=Name LABEL='Background-wewn.'
CELLDATA      OPTION=MODIFY          MATERIALLABEL='Air'      POTENTIAL=Default
ELEMENTTYPE=Linear  LEVEL=10      SIZE=%real(#R)  VOLUMELABEL='Background-wewn.'
ELEMSHAPEPREF=HEXORPRISM
PICK OPTION=RESET PROPERTY=Name LABEL='Background-wewn.'

/++ przesuwanie srodka wiazki do p.0,0,0
$constant #wektor_X #stopX/2
$constant                                                    #Ysr
(%int(#ilosc_wlokien_X/2)+1)*#stopY+%int(#ilosc_wlokien_X/2)*(#stopY+2*#Y0)
$constant #wektor_Y #Ysr/#ilosc_wlokien_X/2
PICK OPTION=ALL TYPE=BODY
TRANSFORM OPTION=APPLY KEEP=NO TYPE=DISPLACE DU=%real(-#wektor_X) DV=%real(-
#wektor_Y) DW=0

/++ background
/++ $constant #r1 #ilosc_wlokien_X*#przesuniecieX
$constant #r2 #ilosc_wlokien_Y*#przesuniecieY
$constant #r2 #r1

```

```

CYLINDER Name='Background' X0=0 Y0=0 Z0=0 X1=0 Y1=0 Z1=%real(#H) -TUBE
SHAPECONTROL=SIMPLE MAJORRADIUS=%real(#r1) MINORRADIUS=%real(#r2)
TOPRADIUS=%real(#r1) SIDES=2
PICK OPTION=ADD PROPERTY=Name LABEL='Background'
CELLDATA OPTION=MODIFY MATERIALLABEL='Air' POTENTIAL=Default
ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=1 SIZE=%real(#R) VOLUME LABEL='Background'
ELEM SHAPEPREF=HEXORPRISM
PICK OPTION=RESET PROPERTY=Name LABEL='Background'

```

/++ skrecanie i podzial

\$if #kat_skrezenia ne 0

PICK OPTION=ALL TYPE=BODY

/++ PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=Name LABEL='Background'

```

TWIST KEEP=NO U1=0 V1=0 W1=0 ANGLE1=0 U2=0 V2=0 W2=%real(#H)
ANGLE2=%real(#kat_skrezenia) CONTINUITY=0

```

\$constant #liczb_segment 20

\$constant #grub_segm #H/#liczb_segment

```

CYLINDER Name='powierzchnie_tnace' X0=0 Y0=0 Z0=%real(#grub_segm) X1=0 Y1=0
Z1=%real(#grub_segm) -TUBE SHAPECONTROL=SIMPLE MAJORRADIUS=%real(#r1)
MINORRADIUS=%real(#r2) TOPRADIUS=%real(#r1) SIDES=2

```

PICK OPTION=ADD PROPERTY=Name LABEL='powierzchnie_tnace'

```

TRANSFORM OPTION=COPY KEEP=NO TYPE=DISPLACE DU=0 DV=0
DW=%real(#grub_segm) COUNT=%real(#liczb_segment-2)

```

PICK PROPERTY=MaterialLabel LABEL=wlokno

```

CELLDATA OPTION=MODIFY MATERIALLABEL='wlokno' POTENTIAL=Default
ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=100 SIZE=3 ELEM SHAPEPREF=TETRAHEDRAL

```

PICK OPTION=RESET

\$end if

```

ANALYSISDATA OPTION=SET PROGRAM=TOSCAMAGN LINEAR=NO NLITER TYPE=NEWTON
ITERATIONS=21 TOLERANCE=1.0E-03 HX=%real(#Hx) HY=%real(#Hy) HZ=%real(#Hz)
RHS=ADAPTIVE POTENTIALCUT=YES

```

PICK OPTION=TOGGLE TYPE=FACE UNIQUEBODYNAME='Background' IDENTIFIER=A.00001

PICK OPTION=TOGGLE TYPE=FACE UNIQUEBODYNAME='Background' IDENTIFIER=A.00002

```

FACEDATA OPTION=MODIFY BOUNDARYLABEL='bc-bok' ELEMENTTYPE=Linear
FORMETHOD=NONE BACKMETHOD=NONE

```

PICK OPTION=RESET

PICK OPTION=TOGGLE TYPE=FACE UNIQUEBODYNAME='Background' IDENTIFIER=A.00004

PICK OPTION=TOGGLE TYPE=FACE UNIQUEBODYNAME='Background' IDENTIFIER=A.00003

```

FACEDATA OPTION=MODIFY BOUNDARYLABEL='bc-podstawy' LEVEL=100
ELEMENTTYPE=Linear FORMETHOD=NONE BACKMETHOD=NONE

```

BOUNDARY PICK 'bc-podstawy'

BOUNDARY OPTION=MODIFY CONDITION=NORMMAGN

BOUNDARY UNPICK 'bc-podstawy'
BOUNDARY PICK 'bc-bok'
BOUNDARY OPTION=MODIFY CONDITION=TANGMAGN
BOUNDARY UNPICK 'bc-bok'

