Prof. dr hab. Andrzej Radowicz
Katedra Mechaniki
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Politechnika Świętokrzyska
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25 314 Kielce

Kielce, 27 listopada 2020r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Autor: mgr inż. Mikołaj Bilski
Tytuł rozprawy: Badania współczynnika Poissona mikroskopowych modeli materiałów za pomocą symulacji komputerowych

Promotor: Prof. dr hab. Tomasz Stręk
Promotor pomocniczy : dr inż. Jakub K. Grabski

Recenzja wykonana na polecenie Prof. dr hab. inż. Olafa Ciszaka, Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, pismem DIM.63.221.2020 z dn. 30 września 2020r. Rozprawę wraz z dokumentami otrzymałem dn. 6 października 2020.

1. **Ogólna charakterystyka rozprawy**

Przedstawiona do recenzji praca doktorska dotyczy zagadnień związanych z analizą właściwości mechanicznych metamateriałów, modelowanych poprzez strukturę wewnętrzną układu wielu cząsteczek. Cząsteczki te o postulowanej geometrii i przyjętych fizycznych cechach z użyciem odpowiednich symulacji komputerowych tworzą rozważane *continuum* metamaterialne o specjalnych nowatorskich właściwościach.
Na ogół w zależności od gustu lub możliwości badacza dokonuje się wyboru narzędzi modelowania. Mogą to być ścisłe metody analityczne, mogą być czysto eksperymentalne bądź metody obliczeń statystycznych. Oczywiście, w wielu pracach uzyskuje się wyniki z użyciem jednocześnie kilku tych metod. Istotą użytych narzędzi w tej pracy są zastosowane numeryczne obliczenia jako symulacje komputerowe z użyciem metody Monte Carlo.
Praca doktorska mieści się w cyklu prac badawczych nad projektowaniem metamateriałów z ich specyficznymi właściwościami, konsekwentnie realizowanych od szeregu lat w Politechnice Poznańskiej oraz w Instytucie Fizyki Molekularnej, Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu. Dotychczas ukazało się kilkadziesiąt publikacji prezentujących wyniki tych badań, wśród których znajduje się również kilka doktoranta. Projektowane na podstawie obliczeń bądź badań doświadczalnych metamateriały mogą wykazywać oczekiwane jak również odkrywane specyficzne właściwości cieplne, elektromagnetyczne, optyczne i mechaniczne. Prezentowana praca dotyczy poszukiwań metamateriałów o określonej wewnętrznej strukturze i oczekiwanych *mechanicznych właściwościach* również auksetycznych. Rozważania prowadzone są w oparciu o mechanikę ciała stałego, natomiast zasadniczymi narzędziami w pracy w rozwiązywaniu problemów są wyspecjalizowane metody obliczeń numerycznych. Na podstawie mojego rozeznania w rozpatrywanej tematyce i literaturze z nią związanej, jestem przekonany, że podjęte w tej pracy doktorskiej badania są ważne z poznawczego punktu widzenia, lecz również jej wyniki mogą w pewnej perspektywie znaleźć praktyczne inżynierskie zastosowania w opracowywaniu receptur technologicznych. Auksetyki jako znaczący obszar badań własności mechanicznych realizowanych przez

doktoranta w tej pracy, znajdują ze względów praktycznych coraz większe zastosowania. Ponieważ są one materiałami powstającymi sztucznie, ich projektowanie jak i wykorzystanie stanowi wysoce intelektualne inżynierskie wyzwanie. Bez wątpienia prace nad badaniem tego rodzajów materiałów wymagają szerokiej interdyscyplinarnej wiedzy.
Rozprawa doktorska została przedstawiona w postaci zwartej na 132 stronach w postaci 6 rozdziałów, poprzedzonych streszczeniem w języku polskim i angielskim i zakończona spisem literatury oraz dodatkiem z wykazem ilustracyjnym 46 topologii struktur binarnych złożonych z tzw. twardych dysków, będących postulowanymi modelami cząsteczek.

Rozdział 1. Wprowadzenie

W rozdziale tym Doktorant przedstawia kolejno:
- zasadnicze ogólne schematy modeli mikroskopowych zespołu wielu cząsteczek , podlegających symulacjom komputerowym prowadzącym do uzyskania fenomenologicznego kontinuum o poszukiwanych właściwościach. Głównym zamierzonym celem badań tak formułowanych jest wyznaczenie właściwości mechanicznych, szczegółowym zaś współczynnika Poissona zwłaszcza w zakresie wartości ujemnych,
- przegląd istniejących materiałów auksetycznych z ich możliwymi zastosowaniami,
- definicję modelu oddziaływań cząsteczek w postaci tzw. potencjału twardego oraz odpowiadające tym oddziaływaniom modele cząsteczek 3D, 2D, 1D jak i ich kompozycje w postaci cyklicznych multimetrów. Tak zdefiniowany twardy potencjał uniemożliwia analizę modelowanych struktur poprzez prowadzenie obliczeń analitycznych. Szansę na taką analizę dają jedynie metody symulacji komputerowych,
- motywację podjęcia badań wynikającą z zainteresowania Doktoranta oraz 3 precyzyjnie sformułowane zasadnicze cele tej pracy, nazywane przez Autora hipotezami badawczymi.

Uwagi do Rozdziału 1

Pozytywnie oceniam przedstawioną przez Doktoranta na str.19 ocenę podziału zakresu badań realizowanych przez wielu autorów nad modelami auksetyków oraz umiejscowienie w nim własnego obszaru zainteresowań. Świadczy to o dobrej znajomości przez Autora wiedzy i oczytaniu literaturowym w rozpatrywanej tematyce. Pozytywnie oceniam logicznie sformułowane cele badawcze oraz wysiłek Doktoranta w umotywowaniu podjęcia badań nad modelami 2D. Argumentacja o łatwiejszej symulacji w 2D (chociaż wcale nie łatwej) niż w 3D jest oczywista, ale geometryczna pozorna sofistyka przestrzeni 2D wcale nie jest nie fizyczna. Jako przykład może służyć powierzchnia walcowa, a w konkretnym przykładzie struktura białkowa tworząca mikrotubulę w komórce. Jest nią powierzchnia wydrążonego walca, złożona z dimerów białkowych a więc polimerowych, jest ona poddawana obecnie badaniom eksperymentalnym, również na właściwości mechaniczne. Innym przykładem, może być powszechnie stosowana heteroepitaksja, technika nakładania bardzo cienkich, jedno – dwuatomowych warstw z innego materiału niż materiał podłoża. Oczywiście, wielce interesujące byłyby struktury 3D, zapowiadane przez Doktoranta w dalszych badaniach. Natomiast uważam, że stosowana przez Autora nazwa „cząstka" jest niepoprawna. Nazwa ta odnosi się do cząstek elementarnych, natomiast tutaj mamy struktury molekularne czyli cząsteczkowe.

Rozdział 2. Zastosowane metody obliczeniowe

W rozdziale II Autor przedstawia kolejno:
- pewne podstawowe pojęcia liniowego ośrodka sprężystego wraz z analizą wymiarową niezbędną do wyznaczenia odkształcenia, energii swobodnej oraz stałych materiałowych dla ośrodka 2D,
- w dalszej części tego rozdziału Doktorant wystarczająco dokładnie ale bez zbędnych szczegółów omawia zastosowane w pracy narzędzia symulacyjne metod Monte Carlo pod kątem badania właściwości mechanicznych układów wielocząsteczkowych. Metody te charakteryzują się postępowaniem umożliwiającym znalezienie przybliżonego rozwiązania zagadnienia fizycznego z użyciem techniki pobierania próby. Ze względu na postawione Przez Doktoranta cele badawcze w pracy doktorskiej oraz wykazane doświadczenie używania tych metod we wcześniejszych publikowanych pracach ich zastosowanie było ze wszech miar uzasadnione.
Ponadto, udział Doktoranta w latach 2011 - 2022 w grantach obliczeniowych umożliwiający dostęp do superkomputerów Poznańskiego Centrum Superkomputerowo – Sieciowego oraz oprogramowania COMSOL Multiphysics na Politechnice Poznańskiej dał Autorowi szansę na wyznaczenie właściwości mechanicznych modelowanych układów HCH, HCM i HD z dużą dokładnością.

Uwagi do Rozdziału 2

Bardzo pozytywnie oceniam zwarty, a jednocześnie przejrzysty opis statystyki termodynamicznej omawianych układów, zarówno przez omówienie zespołów kanonicznych izochoro-termicznych jaki izobaro-termicznych, a także umiejętne określenie stałych sprężystych ośrodka o symetrii heksagonalnej w wymiarach 2D. Chciałbym jednak, aby Doktorant przekonał mnie o poprawności zależności (2.46) na stronie str.40. Chodzi mi o sens pierwszego członu w nawiasie. Ponadto, zapis tensorów podatności we wzorach (2.57a), (2.57b) oraz (2.59) ze względów formalnych jest niepoprawny. W zapisie wskaźnikowym tensorów, jednakowe wskaźniki literowe mogą się pojawić co najwyżej dwukrotnie. Ponadto, powtarzane wskaźniki wymagają sumowania. Co innego jest poprawnie napisać np. S_{1111}. Wyjście z tego jest jedno – napisać wyjaśnienie obok tych wyrażeń – nie sumować lub że S_{mmmm} lub S_{mmnn} są liczbami (skalarami). Ta uwaga jest jednak drugorzędna.

Rozdział 3 Układy twardych heksamerów cyklicznych

Rozdział ten, jako pierwszy z trzech, zawiera istotne dla pracy doktorskiej merytoryczne wyniki badań. Rozdział 1 zawierał zasadniczo dyskusję geometryczno-mechanicznych modeli postulowanych cząsteczek wraz ze zdefiniowanym potencjałem ich oddziaływań, a z których Doktorant projektuje strukturę materiału w przestrzeni 2D, natomiast Rozdział 2 omawia zastosowane narzędzia obliczeniowe statystyki, użyte w celu przeprowadzenia symulacji komputerowych w uzyskaniu oczekiwanych jego właściwości mechanicznych. Natomiast w omawianym rozdziale 3 Doktorant prezentuje uzyskane w niewątpliwie pracochłonnym wysiłku rezultaty wielu szczegółowych obliczeń.
Tak więc, kolejno:
- we wstępnej części tego rozdziału Autor szczegółowo i precyzyjnie definiuje 2D cząsteczkę nazywaną twardym heksamerem cyklicznym (w skrócie HCH) wraz z jej parametrem anizotropii oraz modelowy dla oddziaływań potencjał twardy jako graniczny przypadek potencjału odwrotnie-potęgowego,

- następnie omawia szczegóły opisujące przeprowadzane symulacje. Statystyczna metoda symulacji MC na wyznaczanie parametrów fenomenologicznych oparta jest zasadniczo na obliczeniach w zespołach kanonicznych izobaryczno-izotermicznych i izochoryczno-izotermicznych. Odpowiednio przez Autora wykorzystane, stosowane powszechnie metody symulacji oraz znane z literatury gotowe formuły np. na energie wewnętrzną oraz inne pozwoliły Doktorantowi otrzymać zarówno obrazy struktur 2D złożone z zamodelowanych cząsteczek (konkretnie cztery izotropowe fazy) nazywanych przez Niego: chiralną, prostą, prosto/rotacyjną i płynową, oraz wartości energii swobodnej w tych fazach. Przeprowadzono obliczenia zależności parametrów stanu termodynamicznego, np. ciśnienia zredukowanego i zredukowanej gęstości . Wyniki te, precyzyjnie zilustrowano w tabelach i na wykresach. Wykresy procesów termodynamicznych, które opisywane analitycznie nazywają się równaniami stanu, przedstawiają się precyzyjnie i przekonująco. Na wykresach tych oraz w tabelach wyników wyraźnie pojawiają się cechy przejść fazowych I rodzaju w postaci skokowo zmieniających parametrów stanu jak: gęstość i energia swobodna,
- w dalszej części opracowanych wyników, pokazane są wykresy obliczeń dotyczących zależności stałych materiałowych, takich jak moduły objętościowy i ścinania oraz współczynnik Poissona w zależności od tzw. objętości zredukowanej, zdefiniowanej na potrzeby obliczeniowe jako będącą odwrotnością gęstości zredukowanej, czyli stosunku gęstości numerycznej rozważanego układu do gęstości numerycznej układu najgęściej upakowanego. Te ostatnie wykresy wskazują obszary gdzie liczba Poissona przyjmuje wartości ujemne, czyli w jakich okolicznościach materiał staje się auksetykiem. Powyższe wyniki również były jednocześnie analizowane w odniesieniu do struktur modelowych cząsteczek poprzez parametr anizotropii. Pojawia się tutaj, moim zdaniem, interesujący obszar dalszego działania. Znając bowiem modelowe kształty cząsteczek spełniających wraz z innymi zależnościami warunki auksetyczności , można poszukiwać odpowiednich rzeczywistych, fizycznych cząsteczek. Byłby to istotny krok do tworzenia realnych inżynierskich receptur na technologiczne wykonanie materiałów auksetycznych,
- bardzo interesujące są dalsze rozważania Doktoranta w wykorzystaniu powyższych obliczeń do tworzenia kompozytów składających się z warstwy heksamerów cyklicznych, spełniających warunki auksetyczności, nałożonej na nieauksetyczne materiały 3D. Obliczenia przeprowadzone zostały dla dwóch modeli kompozytów z użyciem metody elementu skończonego wykorzystując oprogramowanie COMSOL Multiphysics. Przedstawione modelowe rezultaty pokazują jak wytworzone kompozyty, z których jeden z materiałów jest auksetyczny mogą odpowiadać mniejszymi odkształceniami na zadane obciążenia niż w przypadku bez warstwy auksetycznej,
- rozdział III zawiera ponadto dodatkowe rozważania , tym razem z użyciem potencjału odwrotnie-potęgowego w oddziaływaniu heksamerów cyklicznych. Są to tzw. miękkie heksamery, które różnią się od twardych heksamerów nie tylko postacią potencjału oddziaływań cząsteczek ale i zależnością procesów w nich zachodzących od temperatury. Obliczenia, podobne jak dla heksamerów twardych, przeprowadzono w celu uzyskania właściwych struktur, wyznaczenia przebiegów procesów fazowych oraz analizę współczynnika Poissona ze względu na jego wartości ujemne. Interesujący jest zauważalny fakt, że potencjał miękki wraz ze wzrostem wykładnika potęgowego daje w konsekwencji zbieżność charakterystyk fazowych otrzymanych dla potencjału twardego. Fakt ten potwierdza sensowność i poprawność rozwiązań modelowych
- rozdział kończy zwarte, logiczne i precyzyjne podsumowanie analiz i wyników.

Uwagi do Rozdziału 3

Odnosząc się do zawartych w tym rozdziale wyników, stwierdzam ich przekonującą wiarygodność z podkreśleniem pomysłowości i pracowitości jaką wykazał się Doktorant aby je uzyskać. Zaprezentowane wyniki w tabelach, bądź na wykresach są poprawnie opisane, a przedstawiona analiza jest logiczna. Niemniej, chciałbym aby Autor odniósł się do moich następujących uwag:
- str.57, założenie, że $\lambda_{rot}=\lambda_{tr}$ formalnie jest niepoprawne. Chodzi Autorowi zapewne o ich równe wartości liczbowe, ale wymiary współczynników są inne,
- str.68 i 69, co Autor rozumie przez „przejście fazowe wyższego rzędu"
oraz str.92, „ przejścia fazowego wyższego rodzaju". Znamy przecież przemiany fazowe pierwszego i drugiego rodzaju. Ponadto, z przemianą fazową pierwszego rodzaju, poza skokową zmianą energii wewnętrznej i gęstości oraz typu topnienia, parowania, zmianami struktury krystalicznej itd. związane jest ciepło utajone, odpowiedzialne energetycznie za te zmiany. Jak w rozważanym modelu przemian Autor rozumie ten proces?
- str.89, wiersz góra 1, obciążenie nie jest siłą lecz gęstością powierzchniową siły,
- str.93, używanie sformułowania „struktury mogą przyjmować bardzo małe (sięgające -1)wartości PR" , pojęcie małej wartości liczby kojarzone jest raczej z jej wartością bliską zero.

Rozdział 4 Metoda modyfikacji współczynnika Poissona kryształów

Jest to kolejny rozdział zawierający oryginale wyniki badań Doktoranta. Istotą pomysłu przez Niego zaproponowanego, jest modyfikacja właściwości pierwotnego materiału nie wykazującego cech auksetycznych, poprzez wprowadzenie do niego warstw auksetycznych. Ze względu na przyjęty w tej pracy model geometryczny ośrodka 2D, badaniom poddano struktury pasmowe, zarówno matrycy jak i auksetyka. Przeprowadzenie symulacji, z uwzględnieniem struktur oraz właściwości cząsteczek obu materiałów, pozwala otrzymać kompozyty, których średnia wartość liczby Poissona może przyjmować wartości zarówno dodatnie jak i ujemne. Interesujący jest otrzymany rezultat, z którego wynika, jak składowe tensora podatności sprężystej za pomocą których oblicza się liczbę Poissona, są zależne od kierunku obciążenia względem struktury krystalicznej sieci cząsteczek. To znaczy, że również wartość i znak liczby Poissona (która w pracy przedstawiona jest analityczne wzory (4.3) i (4.5)), również zależy od orientacyjnego kąta między kierunkiem naprężenia a bazowym kierunkiem sieci.

Uwaga do rozdziału 4

Godnym podkreślenia jest fakt, że Doktorant jako pomysłodawca rozważanego powyżej modelu kompozytu jest współautorem publikacji zawierającej pierwsze w tym temacie wyniki, a materiał w tym rozdziale, oparty na wspomnianej publikacji został znacząco rozszerzony. W podsumowaniu wyników Doktorant dodatkowo informuje, że metoda badań przedstawiona w tym rozdziale została zastosowana również w strukturach 3D w szerszej grupie badawczej, a wyniki pracy wraz z udziałem Doktoranta jako współautora zostały opublikowane.

Rozdział 5 Układy izotropowe o ekstremalnie dużych wartościach współczynnika Poissona

W tym rozdziale Autor, zajął się problemem pewnym sensie przeciwnym niż w poprzednich rozważaniach, a mianowicie rozważał struktury 2D dla których współczynnik Poissona jest dodatni i to o możliwie największych wartościach. Jego oryginalny model struktury, składa się z układu binarnych twardych dysków wypełniających płaszczyznę w obszarze zależnym od ich ilości. Istotną rolę odgrywają inkluzje, których wielkość zależy od ilości dysków różnych wymiarów ją otaczających. Rozmaitość struktur Autor definiuje i opisuje stosowną nomenklaturą. Stosując postępowanie symulacyjne jak poprzednio, z użyciem metody Monte Carlo w izobarycznym zespole kanonicznym otrzymał dla poszczególnych struktur odpowiednie składowe tensora podatności, a w konsekwencji wartości współczynników Poissona. Rozpoznał w ten sposób określoną liczbę struktur dla których wartość liczby Poissona przyjmowała największą dopuszczalną termodynamicznie wartość +1. Wyniki badań, jak poprzednio zostały opisane i zilustrowane na wykresach. Rozdział kończy Podsumowanie z precyzyjnymi i bardzo dojrzałymi naukowo komentarzami.

Rozdział 6 Wnioski

Ten ostatni dwu-stronicowy rozdział rozprawy doktorskiej zawiera najistotniejsze omówienie rezultatów naukowo-poznawczych i ewentualnie praktycznych w uzyskiwaniu oczekiwanych właściwości nowych metamateriałów. Wnioski są zwarte, logiczne i wyczerpują omówienie całości pracy.

2. Uwagi dotyczące całości rozprawy

Pewne uwagi dotyczące zauważonych nieścisłości w pracy zawarłem w bardziej szczegółowych komentarzach po każdym z rozdziałów. Mają one jednak charakter drugorzędny, natomiast obecnie chciałbym przedstawić dwie sprawy ogólne i dyskusyjne. Według mnie:

- zabrakło we wnioskach końcowych pewnego krytycznego odniesienia się Doktoranta do *ograniczeń* zastosowanych metod symulacyjnych oraz przyjętych modeli fizyczno-topologicznych wpływających na jakość otrzymywanych wyników. Taka zaprezentowana dyskusja Autora byłaby do pewnego stopnia świadectwem świadomego umiejscowienia własnych osiągnięć na tle ogólnej wiedzy
- zabrakło mi również odniesienia się Autora do praktycznej użyteczności otrzymanych rezultatów. Mam tutaj na uwadze nie powszechnie oczekiwania, i słusznie, materiałów auksetyczne na konstrukcje lub części maszyn, ale również metamateriały z auksetycznością subtelnie wpływające swoimi mechanicznymi właściwościami na inne w tym cieplne elektromagnetyczne itp. Znane są przecież powszechnie osiągnięcia badawcze realizowane w Instytucie Mechaniki Stosowanej w zakresie piezoelektryków. Byłoby wielce ciekawym wyzwaniem, zarówno naukowym jak i praktycznym otrzymanie auksetycznych piezoelektryków.

Przedstawione uwagi zasadniczo nie są krytyczne. Mogą stanowić, być może, inspiracją dla Doktoranta w dalszych badaniach.

Przedstawioną do recenzji pracę doktorską mgr inż. Mikołaja Bilskiego pt. *Badania współczynnika Poissona mikroskopowych modeli materiałów za pomocą symulacji komputerowych* oceniam pozytywnie i bardzo wysoko.

Taką ocenę podjąłem gdyż:

1. oceniana rozprawa dotyczy ważnych i aktualnie realizowanych w różnych ośrodkach naukowych i laboratoriach badań związanych z projektowaniem nowych struktur kompozytowych i metamateriałowych, w tym tak jak dokonano to w rozprawie, nad ich właściwościami mechanicznymi
2. sformułowane cele badawcze w pracy są konsekwentnie realizowane, a sensowność ich podjęcia została potwierdzona uzyskanymi wynikami
3. użyte narzędzia i metody symulacyjne są na wysokim poziomie techniki obliczeniowej, a dostęp Doktoranta do Poznańskiego Centrum Superkomputerowo - Sieciowego gwarantował uzyskanie obliczeń właściwości mechanicznych modelowanych metamateriałów z wysoką precyzją
4. Doktorant wykazał się samodzielnością naukową w modelowaniu pomysłów badawczych jak i doboru narzędzi obliczeniowych
5. rozprawa napisana jest jasno i precyzyjnie z użyciem prawidłowej terminologii, wyciągane prawidłowe wnioski są potwierdzeniem wysokiej dyscypliny logicznego wyrażania myśli i komunikatywności. Edytorsko rozprawa napisana jest nienagannie
6. Doktorant wykazał się szeroką znajomością obszarów wiedzy oraz umiejętnością jej poszukiwania i wykorzystania w literaturze naukowej i technicznej,
7. zauważalny jest emocjonalny stosunek Doktoranta do realizowanych badań, prezentuje pomysły naukowe, które dalej realizuje i chciałby realizować w przyszłości

Mając powyższe uwagi na względzie przedkładam wniosek do Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Mikołaja Bilskiego.

Powyższy wniosek, zgodnie z *Regulaminem wyróżnień rozpraw doktorskich prowadzonych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej,* motywuję następująco:

1a. Przedstawiona praca wyróżnia się poziomem zastosowanych metod obliczeniowych jak i wartością uzyskanych wyników. Według mojej opinii poziom naukowy rozprawy znacząco przewyższa średni poziom zauważonych przeze mnie innych rozpraw zarówno jakością, zakresem jak i prezentacją badań. Jeśli chodzi o znaczenie tematyki naukowej i technicznej w której Doktorant realizował badania, to chcę podkreślić, że w ostatnim dziesięcioleciu liczba publikacji sięga setek rocznie. Tak więc ranga podjętych badań jest istotna i znacząca dla wiedzy o mechanicznych właściwościach nowych materiałów.
1b. W przedstawionej pracy Autor wykazał się znaczącą pomysłowością oryginalnych modeli auksetyków. Jego autorstwa jest model kompozytowy warstw auksetycznych wstawianych w strukturę kryształów, modyfikującą właściwości całego kryształu. Prezentowane to było w rozdziale 4 rozprawy i w publikacji. Doktorant jest też autorem całkowicie oryginalnego pomysłu symulacji strukturalnych modeli wykazujących maksymalną wartość współczynnika Poissona, zaprezentował to w 5 rozdziale. Jest też autorem całego szeregu programów obliczeniowych, które zostały wykorzystane w pracy doktorskiej i w badaniach opublikowanych w renomowanych czasopismach.
1c. Widoczne są znaczące walory udoskonalonych przez Doktoranta metod symulacyjnych jak również pomysły na uzyskiwanie oczekiwanych właściwości mechanicznych nowych materiałów.

2. Doktorant jest autorem jednej publikacji, oraz współautorem czterech, przy czym w jednej z nich jest pomysłodawcą modelu, oraz autorem obliczeń.

Na podstawie przeprowadzonej oceny i przedstawionych uzasadnień wyrażam opinię, że rozprawa doktorska pt. *Badania współczynnika Poissona mikroskopowych modeli materiałów za pomocą symulacji komputerowych,* której autorem jest mgr inż. Mikołaj Bilski spełnia ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Autora do publicznej jej obrony.