

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

Kielce, 13 czerwca 2019r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Autor: mgr inż. Eligiusz Idczak

Tytuł rozprawy: Optymalizacja topologiczna dwufazowych metamateriałów auksetycznych

Promotor: dr hab. Tomasz Stręk, prof. nadzw. Politechniki Poznańskiej

Recenzja wykonana na polecenie Prof. dr hab. inż. Olafa Ciszaka, Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej, pismem DM.63.260.2019 z dn.15 kwietnia 2019. Rozprawę i dokumenty otrzymałem 26 kwietnia 2019.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska dotyczy zagadnień związanych z projektowaniem inżynierskim konstrukcji, ewentualnie części maszyn wykonanych z materiałów o specjalnych nowatorskich właściwościach.

Poszukiwanie materiałów o odpowiednich właściwościach w celu budowy z nich urządzeń pracujących dla rozmaitych celów, często również w ekstremalnych warunkach, było – historycznie rzecz biorąc – podstawowym zadaniem działalności technicznej człowieka. Jednakże, przez długi okres czasu korzystano w tym celu jedynie z tzw. zasobów naturalnych jak i również kompozycji tych materiałów, np. w postaci stopów metali. Później wynaleziono materiały o właściwościach, które uzyskuje się na podstawie rozważań teoretycznych i badań doświadczalnych w oparciu o skomplikowane receptury technologiczne. Od pewnego już czasu, uzyskuje się materiały, które ze względu na ich właściwości nazwano metamateriałami. Początkowo, owe specyficzne właściwości dotyczyły zjawisk elektromagnetycznych i optycznych w tych materiałach, a następnie podjęto prace dotyczące właściwości mechanicznych.

Tego typu metamateriały, projektowane na podstawie rozważań teoretycznych i badań doświadczalnych wykazywać mogą oczekiwane specyficzne właściwości cieplne, elektromagnetyczne, optyczne i mechaniczne. Niniejsza praca dotyczy poszukiwań metamateriałów kompozytowych oraz o określonej geometrii i właściwościach mechanicznych, spełniających zadane konstrukcyjne warunki zarówno statyczne jak i dynamiczne. Oczywiście praca ta nie dotyczy badań z *inżynierii materiałowej*, lecz jest przyczynkiem badawczym w dziedzinie *inżynieria mechaniczna*, z zakresu mechaniki. Wiedzą podstawową, stanowiącą merytoryczną bazę rozważań jest mechanika ciała stałego, natomiast zasadniczym narzędziem pracy w rozwiązywaniu problemów w rozprawie są wyspecjalizowane metody obliczeń numerycznych. Podjęta w rozprawie tematyka badawcza jest ważna z praktycznego, lecz również poznawczego punktu widzenia.

Recenzowana praca składa się z dziewięciu rozdziałów , streszczenia wraz z jego tłumaczeniem na język angielski i spisu literatury przedstawionych na 118 stronach zwartego opracowania.

1. Streszczenie str.4 – 5

W tym jednostronicowym opracowaniu (również w języku angielskim) przedstawił Doktorant opis metod obliczeniowych stanowiących narzędzia pracy oraz celów badawczych swojej pracy doktorskiej. Celem zasadniczym w rozprawie było poszukiwanie geometrycznych struktur tak zbudowanych, aby wykazywały właściwości auksetyczne o możliwie dużej w sensie wartości bezwzględnej , ujemnej wartości współczynnika Poissona. Ze względu na przedstawione cele dla takich geometrycznych struktur, dla rozwiązania zadania, zaproponowano metodę optymalizacji topologicznej, natomiast jako narzędzi obliczeniowych użyto MES wraz ze schematami interpolacji SIMP oraz RAMP a także algorytmu MMA. Te wyspecjalizowane metody obliczeń symulacyjnych zostały przeprowadzone za pomocą oprogramowania COMSOL Multiphysics.

Uwagi

- * w^7 –*materiałami o realnych właściwościach* – raczej o określonych bądź zadanych wartościach stałych materiałowych
- * $w^{13,14}$ – zdanie trywialne
- * $w_{7,6}$ – winno być: ..udziale.., ..z różnymi

2. Wstęp str.6 - 13

W części wstępnej pierwszego rozdziału Autor dokonuje opisu optymalizacji na poziomie jej definicji, a następnie przedstawia bardziej szczegółową charakterystykę optymalizacji topologicznej. Rozważa przegląd jej odmian służących w zastosowaniu do analiz rozmaitych struktur materialnych, wykazując w tym opisie dobrą znajomość zagadnienia, również poprzez fakt orientowania się w jej ograniczeniach (str.37). W dalszej części rozdziału Doktorant uzasadnia motywy, które skłoniły Go do podjęcia badań oraz formułuje tezę i cele pracy. Rozdział kończy szczegółowy opis treści następnych rozdziałów rozprawy.

Uwagi

* zasadniczą moją wątpliwość budzi sformułowanie tezy rozprawy. Teza bowiem w sensie logiczno-matematycznym jest założeniem w formie twierdzenia, które może dotyczyć istnienia nieznanego lub nie w pełni rozpoznanego zjawiska i które należy udowodnić. Oczywiście nie ma potrzeby udowadniać rzeczy oczywistych. Tymczasem, wobec faktu istniejących już rozwiązań (prezentowanych również w tej pracy) Autora (jako współautora), w publikacjach (na pewno recenzowanych) dotyczących niektórych auksetycznych struktur warstwowych, takie sformułowanie tezy brzmi naiwnie i nieprzekonująco. Wg. mnie treści tekstu dotyczące sformułowania tezy winny uzupełniać cele pracy, które wystarczająco uzasadniają podjęte badania w pracy doktorskiej.

* str8 w^9 – chodzi prawdopodobnie o *wymiary* przekrojów poprzecznych...

* str9 w_{15} – liczbą..., w_{12} – ... oparty jest *na*...,

* str11 w^2 - ...*ich*..., w_{10} - ...sformułowanie ..*niskiego współczynnika Poissona*... przymiotnik niski nie dotyczy liczb

* str12 w_8 – winno być maksymalizacji wartości liczby Poissona.

3. Rozdział drugi str.14 - 29

Rozdział drugi Doktorant rozpoczyna od opisu materiałów auksetycznych, podając zasadnicze zależności określające różne stałe materiałowe jako ich związki z liczbami Poissona dla struktur dwu- i trzywymiarowych. W następnej części tego rozdziału przedstawiony jest opis zastosowania auksetyków w znanych Autorowi urządzeniach technicznych. W kolejnym podrozdziale Doktorant przedstawia przykłady struktur o ujemnym współczynniku Poissona. Dość szczegółowa analiza wyznaczania tego współczynnika w zależności od geometrii struktury jest o tyle ważna, że niektóre z wymienionych struktur poddane są w dalszej części pracy dogłębnym rozważaniom i obliczeniom numerycznym. Rozdział ten kończy przegląd zastosowań optymalizacji

topologicznej do projektowania struktur kompozytowych i metamateriałowych w znanej Doktorantowi literaturze. W niektórych z tych publikacji Doktorant uczestniczy jako współautor.

4. Rozdział trzeci str.30 – 43

We wstępie do tego rozdziału Autor przedstawia podstawowe związki fizyczne i równania ruchu dla liniowego izotropowego ośrodka sprężystego, którym to modelem kontinuum posługuje się w dalszych rozważaniach. Zasadniczą treścią rozdziału jest przedstawienie adaptacji Metody Elementów Skończonych wraz ze schematami SIMP i RAMP do obliczeń efektywnego współczynnika Poissona. Rozdział kończy krótkie przedstawienie idei algorytmu obliczeń MMA. Przedstawienie tych metod nie stanowi istotnej wartości samej pracy doktorskiej, gdyż jest jedynie opisem rutynowych narzędzi obliczeniowych. Nie mniej jest ono o tyle ważne, że informuje czytelnika o schematach prowadzonych dalszych obliczeń, a ponadto świadczy, że Doktorant ma dobre doświadczenie i znajomość tych narzędzi oraz rutynę w prowadzeniu prac obliczeniowych, co już jest pozytywną wartością Autora jako naukowca.

Uwagi

* w nawiązaniu do ostatniego zdania napisanego powyżej muszę jednak stwierdzić, że styl i przejrzystość formułowania tekstu nie jest mocną stroną Autora. Kładę to na karb braku doświadczenia w pisaniu opracowań naukowych, gdyż rzeczywiście w dorobku Doktoranta nie znajduję żadnej **samodzielnej** publikacji w renomowanym czasopiśmie. To świadczy, że Autor nie miał satysfakcji odczuć merytoryczną krytykę recenzentów, uczącą jasnego i poprawnego wyrażania na piśmie swoich myśli.

* str.31 wyrażenie (3.2.5) jest błędnie zapisane (patrz praca dokt. M. Nienartowicz)

* str.38 w⁴ styl – materiały opisujemy liniową teorią sprężystości

* w⁷ - \mathbf{D} jest macierzą (tensorem) sztywności (stiffness tensor). Macierzą sprężystości (compliance tensor) lub zgodności jest macierz odwrotna \mathbf{D}^{-1} , w związku $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}^{-1} \boldsymbol{\sigma}$ (patrz J. F. Nye Własności fizyczne kryształów w ujęciu tensorowym i macierzowym – jest to formalna terminologia, oraz praca dokt. M. Nienartowicz)

* w₃ - \mathbf{F} to jest gęstość siły (wym. N/m^3), a nie siła masowa. Nie można mówić: *zwykle się pomija*. Gęstość siły, czasem również będąca zależną od czasu i położenia, albo w zagadnieniu jest, albo jej nie ma. Pomijana bywa tylko zazwyczaj gęstość sił ciężkości, gdy wymiary np. konstrukcji, zwłaszcza w kierunku pionowym są niezbyt duże. Również ρ to jest gęstość masy.

* str.31 - równanie (3.2.2) powstaje nie tylko po uwzględnieniu związku konstytutywnego (3.1.1) lecz również geometrycznego (3.1.2)

* w_4 - co oznacza sformułowanie *sposób odkształcenia geometrii*. Czy chodzi tutaj o warunki brzegowe? (sposób zamocowania, wartość i miejsce przykładanego obciążenia?)

* str.32 - wzór (3.3.2) - \mathbf{K} to zdefiniowana macierz sztywności dla pojedynczego elementu skończonego, zatem winna różnić się symbolicznie od \mathbf{K} w (3.3.1). Również ε w (3,3,3) i (3.3.7) jest inne symbolicznie niż w (3.1.2).

$w_{9,8,7}$ - ta część tekstu opisu macierzy \mathbf{B} jest bełkotliwa

* str.33 - w^9 - nie można wstawić *równania do równania*

w_4 - sama metoda MES nie usuwa żadnych *elementów nieistotnych*, mogą natomiast pojawić się pewne niedokładności związane z przybliżaniem rzeczywistej geometrii liniami prostymi będącymi brzegami elementów skończonych - czy o to Autorowi chodzi?

* str.36 $w_{5,4}$ oraz str.38 $w_{11,10}$ - obydwie zapisane sformułowania informują, że za pomocą procedur SIMP i RAMP można uzyskać wartość modułu Younga poprzez jawnie wypisane wyrażenia odpowiednio (3.4.1) oraz (3.4.3). Ta deklaracja w tych sformułowaniach, że za pomocą tak wyznaczonego modułu Younga następuje obliczenie efektywnego współczynnika Poissona nie materializuje się w tej rozprawie w postaci jawnego wyrażenia przedstawiającego tę relację. Nie objaśnia bowiem tego tekst podrozdziału 3.6 definiujący efektywny współczynnik Poissona, a następne rozdziały monografii podają już wyniki obliczeń.

w_2 - satysfakcjonujący

* str.37 - w^1 - co Autor ma na myśli przez *zbieżne rozwiązanie*?

w_{11} - wyrażona zgodnie ze wzorem - styl

* str.38 - wzór (3.5.3) - dlaczego moduł Younga wyznaczany dla elementu skończonego jest ujemny? We wzorze jest błąd i w miejscu po znaku równości = winno być E_0 ?

- wzór (3.5.4) - czym jest n ? ilość węzłów czy elementów skończonych, nie zdefiniowano tej liczby.

* str.40 - opis prowadzonych obliczeń na tej stronie jest wysoce niestaranny, Autor posługuje się raczej slangiem niż precyzyjnym językiem inżynierskim.

$w^{5,6}$ - λ_1 - **wektor**? mnożników Lagrange'a - wówczas równanie (3.5.5) traci swój skalarny, a więc i fizyczny sens

wzór (3.5.7) przekształcony do postaci oznacza, że $B_e \equiv -1$, nic więcej!

w_6 - *przekształcenia powyższych wzorów* jakich wzorów?

* str.41 - podrozdział 3.6 jest praktycznie dosłownym tłumaczeniem tekstu części publikacji, której doktorant jest współautorem.

w_{14} - G_I jest krawędzią równoległą, nie prostopadłą do...

w_{6,7} – styl tego tekstu jest niepoprawny. Jak równanie może być funkcją?
Ponadto, równanie (3.3.2) definiuje macierz sztywności, czy ta macierz jest funkcją celu?

- niekonsekwencja w użyciu symbolu S , który w (3.6.5) jest zbiorem oraz w (3.6.6)- całka po S – ale i liczbą mnożoną przez A_f

- błędna numeracja równań (3.5.8) winno być (3.6.7) oraz (3.5.9) winno być (3.6.8).

- niekonsekwencja w używaniu symboli na funkcje kształtu. We wzorach (3.3.5) i (3.3.6) jest to N , podczas gdy w na stronie 42 to $\phi_i(x)$, natomiast N to liczba węzłów.

5. Rozdział czwarty str. 44 – 54

W dotychczasowych rozdziałach Doktorant przeprowadzał dyskusje o możliwym modelowaniu kompozytowych oraz strukturalnych metamateriałów auksetycznych oraz metodach obliczeniowych w projektowaniu ich właściwości. Od tego czwartego rozdziału Autor zamieszcza wyniki obliczeń numerycznych, głównie na wyznaczenie ujemnego efektywnego współczynnika Poissona dla proponowanych płaskich struktur i określonych liczbowo ich właściwości oraz przeprowadza dyskusję tych wyników. Rozważania tego rozdziału Autor rozpoczyna od przedstawienia modelu kompozytu składającego się z dwóch materiałów o różnych modułach Younga i różnych dodatnich współczynnikach Poissona rozłożonych w prostokątnej płycie o zadanych wymiarach i odpowiednio obciążonej. Optymalizacja topologiczna umożliwiła znalezienie takiego rozkładu tych dwóch materiałów, iż w wyniku powstaje materiał auksetyczny z możliwie największym co do wartości bezwzględnej ale ujemnym oraz z możliwie dużym dodatnim współczynnikiem Poissona. Autor nazywa to minimalizacją oraz maksymalizacją efektywnego współczynnika Poissona. Wyniki te są zaprezentowane w postaci wykresów wraz ze szczegółowymi objaśnieniami oraz w postaci tabel. Ponadto Doktorant w tym rozdziale przedstawia dodatkowo wyniki obliczeń z uwzględnieniem wpływu siatki elementów skończonych na wyniki optymalizacji. Wyniki te również zaprezentowane są w postaci wykresów struktur oraz tabeli. Rozważania rozdziału kończą obliczenia optymalizacyjne struktury z dwiema równymi liczbami Poissona.

Uwagi.

* Uwaga dotycząca nomenklatury. W tym rozdziale i w wielu innych miejscach rozprawy Autor używa przymiotników określających wartość liczby Poissona jak: niska, mała, najmniejsza itd. Są to wg. mnie terminy nieprecyzyjne, gdyż, jak zaznaczyłem wcześniej np. nazwą niska nie określa się liczby. Pojęcia: liczba mała, najmniejsza są stosowane w matematyce, np. w analizie określającej

wielkości epsilonowe. Jednak mówienie, że liczba Poissona o względnie dużej wartości bezwzględnej, ale ujemnej jest mała, jest nieprecyzyjne. Współczynnik lub inaczej liczba Poissona jest z definicji w liniowej teorii sprężystości, współczynnikiem proporcjonalności między podłużnym, a poprzecznym odkształceniem. Mała liczba Poissona oznaczałoby zatem słaby efekt w tej geometryczno-fizycznej relacji.

* niestaranne oznaczanie wymiarów wielkości h , czasem jest w m , a czasem bezwymiarowe,

* str.45 $w^4 - F$ nie jest siłą lecz obciążeniem ciągłym, gęstością liniową siły

* uwaga dotycząca wartości poznawczej i oryginalności wyników w podrozdziałach 4.2.1 i 4.2.2. Przedstawione w tych podrozdziałach wyniki są niewątpliwie oryginalne i wartościowe poznawczo. Ponieważ jednak, wobec faktu, że były opublikowane w renomowanym czasopiśmie, gdzie Doktorant był współautorem (trzech autorów), trudno mi jest ocenić Jego wkład w osiągnięcia, gdyż nigdzie w rozprawie tego wkładu nie określono.

* str.52 -numeracja rysunków jest taka sama

* jak Doktorant interpretuje uzyskane rozkłady drugiego materiału w osnowie (rysunki 4.2.3.2 -4.2.4.1 str. 52, 53 i 54), gdyż nie widzę zbieżności rozkładów przy zwiększaniu ilości elementów skończonych.

6. Rozdział piąty str. 55 – 76

W tym rozdziale Doktorant analizuje rozkład dwufazowego materiału w konstrukcji nazywanej pojedynczą komórką plastra miodu. Konstrukcja ta rozpatrywana jest w dwóch wersjach: sześciokątnej wypukłej oraz sześciokątnej wklęsłej. Ta ostatnia komórka, zwana re-entrant, ze względu na kształt, wykazuje podczas deformacji typowy efekt auksetyczny z przypisaną jej efektywną ujemną liczbą Poissona. Zastosowana dotychczasowa optymalizacja topologiczna pozwoliła Doktorantowi na uzyskanie w objętości konstrukcji takiego rozkładu dwufazowego materiału, iż w jego wyniku obie komórki wykazują efekt auksetyczny. Poszukiwanie możliwie największego co do wartości bezwzględnej, ale ujemnego współczynnika Poissona metodą optymalizacji topologicznej w schemacie interpolacyjnym SIMP, daje wyniki zilustrowane wykresami oraz tabelą z obliczonymi efektywnymi współczynnikami Poissona dla różnych materiałów. Wyniki te były już publikowane w pracy, której współautorem jest Doktorant. Interesujące poznawczo samodzielne wyniki zaprezentował Autor w podrozdziale 5.2.2 dla plastra miodu typu re-entrant. Przeprowadził On, przy tych samych założeniach materiałowych jak poprzednio, poszukiwania ekstremalnego, ujemnego współczynnika Poissona. Rezultaty obliczeń struktury rozkładu obu materiałów w osnowie konstrukcji przedstawił w postaci wykresów oraz w tabeli. Dodatkowo przedstawił wykresy z obliczeń dotyczących postaci odkształceń

jednoznacznie przekonujących o właściwościach auksetycznych struktury z efektywną liczbą Poissona większą co do wartości bezwzględnej od tej dla materiału jednorodnego. W podrozdziale 5.2.3 Doktorant zaprezentował wyniki dwufazowej optymalizacji topologicznej typu re-entrant w celu poszukania struktury nie auksetycznej z maksymalnym dodatnim współczynnikiem Poissona. Jak poprzednio, wyniki struktury oraz deformacji zostały zilustrowane na wykresach i tabeli. Wyniki te ukazały się wcześniej w publikacji w której Doktorant występuje jako współautor. Dotychczasowe obliczenia optymalizacyjne przeprowadzono Metodą Elementów Skończonych w połączeniu z metodą SIMP. W podrozdziale 5.2.4 Doktorant przeprowadził szereg oryginalnych obliczeń z użyciem metody interpolacji RAMP. Wyniki tych obliczeń wykonanych dla podobnych struktur jak w metodzie SIMP zostały zilustrowane na wykresach i w tabeli porównawczej 5.2.4.1. Porównanie wyników obliczeń struktury dwufazowej i ekstremalnej wartości liczby Poissona dla wyjściowych faz z równymi współczynnikami, przedstawiono w 5.2.5. Rozdział piąty kończą obliczenia optymalizacyjne z wprowadzonym parametrem regularyzacji dla trzech parametrów ograniczających.

Uwagi,

- * str.55 w^{11,12} – styl, zdanie bez sensu
- * str. 55 w_{6,5} – styl
- * str. 75 brak dyskusji o wynikach obliczeń dla różnych parametrów regularyzacji ,a przecież parametr p_{reg} ma znaczenie fizyczne i wymiar.

7. Rozdział szósty str.76 – 84

Rozdział szósty zawiera przedstawienie bardziej złożonej konstrukcji niż rozważane poprzednio w postaci wypukłego lub wklęsłego plastra miodu. Jest to struktura typu chiralnego, należąca do metamateriałów o właściwościach auksetycznych. Struktura rodzaju anty-tetra-chiralnego jest przedstawiona w postaci modelu geometrycznego komórki wraz z warunkami brzegowymi. Obliczenia numeryczne topologii rozkładu dwóch materiałów w domenie konstrukcji w celu uzyskania ekstremalnego, ujemnego współczynnika Poissona prowadzono dla dwóch grubości konstrukcji. Ponadto, przeprowadzono obliczenia w celu uzyskania obrazu tak otrzymanej struktury po deformacji. Interesujące wyniki tych obliczeń przedstawiono w postaci wykresów oraz tabel. Zazaczyć należy, że wyniki te były już publikowane, gdzie Doktorant jest współautorem (dwóch autorów). Samodzielnie doktorant przeprowadził obliczenia optymalizacji rozkładu dwóch różnych materiałów, ale o tych samych współczynnikach Poissona. Rezultat jest również interesujący w tym, że otrzymana wartość efektywnego ujemnego współczynnika Poissona jest co do

wartości bezwzględnej większa, od efektywnego współczynnika otrzymanego w przypadku rozkładu dwóch materiałów o różnych liczbach Poissona.

Uwagi.

* str.77 – opis warunków brzegowych odnosi się do układu współrzędnych (x,y) należało go na rysunku modelu zaznaczyć, gdyż tak zapisane warunki są niejasne. Ponadto, przyłożona jest nie siła, a obciążenie ciągłe liniowe.

8. Rozdział siódmy str. 85 – 99

Dotychczasowe obliczenia Autora były związane z wyznaczeniem odpowiedniego rozkładu dwóch materiałów w modelowych strukturach w celu uzyskania ekstremalnego ujemnego lub dodatniego efektywnego współczynnika Poissona. Szczególnie interesujące są wyniki dla ujemnych wartości tego parametru, gdyż dotyczą auksetyków, metamateriałów dających nadzieję na nowe zastosowania techniczne. W technice obliczeniowej, z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych, służącej m.in. powyższym obliczeniom stosowanym przez Doktoranta, opracowane są sposoby do przyspieszania podejmowania decyzji określających czy dany element skończony znajduje się we właściwej fazie materiałowej. W schemacie interpolacyjnym SIMP (zresztą w RAMP również) wykorzystywany jest współczynnik penalizacji, który ma duży wpływ na wyniki optymalizacji kompozytu. W rozdziale siódmym Doktorant przeprowadza obliczenia metodą optymalizacji topologicznej, efektywnego ekstremalnego ujemnego współczynnika Poissona z uwzględnieniem szeregu wartości parametru penalizacji. Do obliczeń wykorzystana jest dyskusja, przeprowadzona przez Autora na stronach 38 – 40, zwłaszcza zaś zależność (3.5.3). Obliczenia dokonano dla tych samych, co poprzednio domen obliczeniowych, tj, dla kwadratu, struktury anty – tetra – chiralnej oraz dla wypukłego plastra miodu. Wyniki są zaprezentowane jak poprzednio w postaci graficznej oraz na wykresach.

Uwagi

* zasadniczą uwagę mam do niewystarczającego omówienia uzyskanych interesujących wyników. Doktorant odnosi się do swoich rezultatów jedno – dwuzdaniowymi komentarzami, wymieniając jedynie liczbowe wyniki, które i tak są łatwe do odczytania z podpisów pod rysunkami. Zupełnie jednak, niezrozumiałym jest brak jakiegokolwiek komentarza, zwłaszcza pod rysunkami, odnośnie zaprezentowanych barwnych wyników, w których – jak się można tylko domyślać – przedstawiono, podobnie jak w rozdziale piątym, rezultaty obliczeń odkształceń modelowych struktur.

- * str.85 , rys. 7.1.1 – początek skali pionowej, na wartości modułów Younga nie może rozpoczynać się od wartości 10^7
- * str.86 w¹⁴ – *Moduły Younga...*
- * str.95 w₂ - *parametru..*

9. Rozdział ósmy str.100 – 106

Ze względów praktycznych, ważną rzeczą jest oszacowanie dynamicznej interakcji między analizowanymi przez Autora, modelowymi składnikami, a ewentualną konstrukcją do której są one przymocowane. Jednym z podstawowych elementów badań dynamicznych jest wyznaczenie częstotliwości oraz postaci drgań własnych modelowych składników, które obciążone harmonicznie , mogą prowadzić do rezonansów. Z tych właśnie względów, Doktorant w rozdziale ósmym przeprowadza obliczenia numeryczne na wartości częstotliwości własnych modelowych struktur auksetycznych, z wyznaczonymi uprzednio ujemnymi współczynnikami Poissona oraz analizę numeryczną ich odkształcenia kształtu. Wyniki obliczeń częstotliwości własnych struktur auksetycznych zawarte są w tabelach, z jednoczesnym porównaniem obliczeń częstotliwości własnych struktur jednofazowych. Wyniki obliczeń postaci odkształceń własnych dla określonych pierwszych ośmiu częstotliwości własnych są przedstawione na barwnych obrazach struktur. Odcienie kolorów (jak należy się domyślać) odnoszą się do skal określonych w rozdziale piątym.

Uwaga

* pytanie - jak wygląda, zwłaszcza dla struktury plastra miodu i struktury anty - tetra – chiralnej symetryczność obciążenia, bowiem rozważając $\frac{1}{4}$ modelu wyrzuca się wszelkie postaci drgań własnych, które nie są symetryczne.

10. Rozdział dziewiąty str.107 – 108

W rozdziale tym zawarte jest omówienie otrzymanych wyników w całej rozprawie doktorskiej, dotyczących obliczeń rozkładu struktur dwufazowych, prowadzących do uzyskania metamateriałów auksetycznych.

Uwaga

* Przedstawione wnioski są spłycone i Doktorant nie wykorzystał możliwości zaprezentowania analizy otrzymanych interesujących wyników fizycznych
 *. str.107 w⁵ – *jakich nie wykazują..*

- * str. 108 w^9 – styl pisania niedopuszczalny - wpływ na co?
- w^{11} – styl – zmiana *ta* – jaka zmiana?
- w_8 - *zwiększenia wyniku* – jakiego wyniku?
- w_6 - styl! – *a także nie została struktura 0-1* - ??
- $w_{2,1}$ - styl! – o jakie wartości chodzi?

Uwagi krytyczne i dyskusyjne

W przedstawionej powyżej ocenie zawarłem szereg uwag mających rozmaity charakter w sensie ich merytorycznego znaczenia. Uwagi dotyczące stylistyki bądź mankamentów redakcyjnych w rozprawie są oczywiście drugorzędne. Pozostałe uwagi wymagałyby odniesienia się do nich Autora.

W reasumpcji za zasadnicze mankamenty rozprawy uważam:

1. Niewystarczającą dyskusję Autora odnośnie ewentualnego możliwego praktycznego znaczenia otrzymanych wyników obliczeń. W motywacji podjęcia i celu pracy (str.10) Doktorant pisze, że: *„Implementacja metod dwufazowej optymalizacji topologicznej pozwala na minimalizację wartości efektywnego PR aż do wartości ujemnych. Prowadzi to do możliwości szerszego niż obecnie zastosowania auksetyków w różnych dziedzinach przemysłu.* Mając do dyspozycji **dla rozważanych modeli struktur** interesujące i wartościowe przecież **oryginalne wyniki** Doktorant nie wykazał się w dyskusji typową inżynierską pomysłowością i polotem, które w połączeniu z Jego dotychczasowym doświadczeniem zawodowym winny pozwolić Mu te zastosowania pokazać. Krótki przegląd **znanych** zastosowań (podrozdział 2.2) tej dyskusji nie wyczerpuje. Zabrakło wniosków dotyczących możliwości zastosowań analizowanych metamateriałów do praktyki inżynierskiej.

2. Niewystarczającą dyskusję Autora odnośnie poznawczych wartości otrzymanych wyników. W spisie literatury w monografii nie zauważyłem jednej, bardzo ważnej i związanej tematyką rozprawy publikacji: J. J. Rushchitsky – Auxetic linearly elastic isotropic materials: restrictions on elastic moduli, Arch. Appl. Mech., str.517 – 522, (2015). Geneza tej pracy jest o tyle interesująca, że powstała ona w wyniku pobytu Prof. Rushchitskiego na jednej z naszych poznańskich konferencji na temat auksetyków. W tej pracy autor jednoznacznie wykazuje, że w materiałach w których współczynnik Poissona osiąga wartości minus jeden, oraz co do wartości bezwzględnej większe niż jeden, ale ujemne, niektóre inne stałe materiałowe jak np. moduł Younga również wykazują wartości ujemne. Pojawia się natychmiast pytanie związane z wynikami otrzymanymi w ocenianej pracy Doktoranta. Czy w konsekwencji ujemnego, mniejszego od minus jeden **efektywnego współczynnika Poissona,**

dla rozważanych w pracy modeli również wartości **efektywnego modułu Younga** przyjmują wartości ujemne. To pytanie wydaje się być ważne, gdyż wiąże się z nim dalsze pytania odnośnie statycznych i dynamicznych deformacji rozważanych modeli struktur konstrukcyjnych.

3. Brak wyjaśnienia odnośnie osobistego wkładu pracy Doktoranta jako współautora w prezentowanych w monografii niektórych wynikach wziętych z publikacji.

Wartości użytkowe oraz osiągnięcia oryginalne w rozprawie

Tematyka podjętych badań przez Doktoranta i przedstawionych w rozprawie dotyczy ważnych, aktualnie szeroko realizowanych poszukiwań materiałów dla zastosowań praktycznych. Najnowsze trendy badawcze, związane są z takim kreowaniem właściwości materiałów aby ich masa, właściwości fizyczne, łatwość technologii oraz koszty wytwarzania w zastosowaniach technicznych, często ekstremalnych, były optymalne. Wymaga to od badaczy dogłębnej znajomości podstaw wiedzy, a w obliczeniach stosowania najnowszych metod. Uważam, że oceniana praca wpisuje się do tego rozwijanego obszaru badań w kształtowaniu właściwości metamateriałów auksetycznych, poprzez nowatorskie pomysły modeli dwufazowych struktur, poprzez opracowanie na odpowiednim poziomie narzędzi obliczeniowych służących do ich kreowania i do otrzymania wartościowych oryginalnych wyników. Do szczególnie wartościowych i oryginalnych wyników Doktoranta zaliczyłbym przedstawienie analizy porównawczej z użyciem parametru penalizacji w optymalizacji topologicznej na uzyskanie ekstremalnych współczynników Poissona. Analiza ta, wydaje się być użyteczna dla nowych do pomyślenia modeli wielofazowych struktur i to również do oceny innych obok współczynnika Poissona efektywnych stałych materiałowych.

Końcowa ocena pracy

Na podstawie przeprowadzonej przeze mnie analizy treści rozprawy, określonych w niej celów badań, zastosowanych właściwych metod do ich rozwiązania i uzyskanych wyników stwierdzam, że **ogólna ocena pracy jest pozytywna.**

Takie stanowisko podjąłem gdyż:

1. poddana ocenie rozprawa dotyczy ważnych i aktualnie realizowanych w różnych ośrodkach naukowych badań związanych z projektowaniem nowych struktur kompozytowych i metamateriałowych

2. sformułowanie przez Doktoranta celów badawczych, przeprowadzenie obliczeń numerycznych i przedstawienie wyników przeprowadzono poprawnie pod względem metodologicznym
3. uzyskane w pracy doktorskiej rezultaty są wartościowe, gdyż mogą posłużyć do wykorzystania w praktyce technicznej
4. stosowany w rozprawie pomysł modelowania struktury materiałowej z użyciem narzędzi obliczeniowych, może być rozszerzony na modelowanie właściwości materiałów w zakresie pól sprzężonych
5. Doktorant trakcie realizacji pracy wykazał się przygotowaniem do samodzielnego modelowania i doboru stosowania właściwych metod obliczeniowych
6. wykazał się znajomością obszarów wiedzy niezbędnej do prowadzenia badań naukowych i umiejętnością korzystania z literatury naukowej i technicznej
7. Doktorant jako współautor uczestniczył w publikowaniu i publicznym prezentowaniu wyników swojej pracy naukowej.

Na podstawie przeprowadzonej oceny i przedstawionych uzasadnień wyrażam opinię, że rozprawa doktorska pt. *Optymalizacja topologiczna dwufazowych metamateriałów auksetycznych*, której Autorem jest mgr inż. Eligiusz Idczak spełnia ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim (art.13 ust. 1 ustawy z dn. 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (t.j. Dz. U. z 2017r. poz. 1789)) i wnoszę o dopuszczenie Autora do publicznej obrony.

