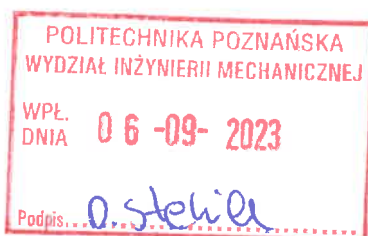


PROF. DR HAB. INŻ. JAROSŁAW JĘDRYSIAK
Katedra Mechaniki Konstrukcji
Politechnika Łódzka
al. Politechniki 6
93-590 Łódź



lipiec-sierpień 2023 r.

O P I N I A

o rozprawie doktorskiej mgr. inż. Jakuba Michalskiego pt. „Odporność na przebicie płyty warstwowej z rdzeniem auksetycznym”

Podstawa przygotowania opinii: pismo dr. hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP, Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, z dnia 4.07.2023 r.

Przedstawiona ocena rozprawy doktorskiej składa się z opisu zawartości pracy, uwag, wskazania elementów oryginalnych oraz oceny końcowej.

1. Opis pracy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr. Jakuba Michalskiego, zatytułowana „*Odporność na przebicie płyty warstwowej z rdzeniem auksetycznym*”, została przedstawiona do obrony na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej w bieżącym roku. Praca ta liczy 113 stron, obejmuje dziewięć rozdziałów, spis literatury oraz rozpoczynające pracę streszczenia w języku polskim i angielskim.

W pierwszej części **Wstępu** Autor przedstawił w skrócie zastosowania płyt warstwowych, czym charakteryzują się struktury auksetyczne i w jakich przypadkach mogą wykazywać swoje zalety. Wskazał na trudności badań fizycznych tego rodzaju struktur w zagadnieniach o silnie dynamicznym charakterze, jak np. uderzenia, przebicia. Następnie zaznaczył, że w związku z tymi trudnościami stosuje się symulacje numeryczne, najczęściej wykorzystujące metodę elementów skończonych. Została ona zastosowana w pracy do obliczeń w zakresie dynamiki nieliniowej przy użyciu algorytmu jawnego całkowania równań ruchu po czasie. Obliczenia dynamiczne „przeprowadzono w programie Abaqus 2022, w ramach grantu obliczeniowego nr 577 w Poznańskim Centrum Superkomputerowo-Sieciowym (PCSS)”. Wymiary jednej z komórek jednostkowych wyznaczono natomiast z analizy statycznej w programie COMSOL.

W rozdziale tym Doktorant przedstawił również motywację oraz cel i tezę pracy. Motywacją jest badanie właściwości istniejących struktur i opracowywanie nowych z wykorzystaniem materiałów auksetycznych w celu określenia zakresu ich zastosowań. Przedmiotem rozprawy jest zagadnienie przebicia płyty trójwarstwowej z rdzeniem auksetycznym.

Następnie Autor wskazał cele pracy. Po pierwsze - jest to zbadanie odporności na przebicie płyt warstwowych z rdzeniem auksetycznym w postaci struktur, które dotychczas nie były badane w takich zagadnieniach. Kolejnym celem jest porównanie wyników dla wybranych typów rdzenia auksetycznych z wynikami dla ich nieauksetycznych odpowiedników. Następnym celem to dobór parametrów geometrycznych wybranego typu struktury auksetycznej rdzenia płyty tak, by zwiększyć odporność na przebicie. Ostatnim celem jest potwierdzenie uzyskanych informacji przez przeprowadzenie uproszczonych testów fizycznych.

Tezę rozprawy stanowi stwierdzenie Autora, że „płyty warstwowe z rdzeniem w postaci struktury auksetycznej mają zwiększoną odporność na uderzenia z przebicciem w stosunku do płyt z rdzeniem nieauksetycznym” oraz poprzez dobór parametrów geometrycznych struktur można zmienić efektywny współczynnik Poissona i zwiększyć odporność płyty warstwowej na przebiccie.

W dalszej części *Wstępu* przedstawiona została w skrócie zawartość kolejnych rozdziałów.

Brakuje natomiast spisu oznaczeń, a przynajmniej ważniejszych z nich.

W *Rozdziale 2.* Doktorant omówił płyty warstwowe, ich budowę i typy, a także podstawy ich mechaniki. Wskazał także obszary zastosowań takich konstrukcji.

Rozdział 3. zawiera przegląd materiałów i struktur auksetycznych. Autor przedstawił charakterystyczne cechy auksetyków, w tym ich właściwości mechaniczne. Opisał podstawowe formy struktur auksetycznych i ich główne zastosowania. Na końcu rozdziału przedstawił wyniki dotychczasowych badań auksetyków dla obciążeń dynamicznych, w tym dla wybuchów i uderzeń.

W kolejnym rozdziale, tj. w *Rozdziale 4.*, Doktorant przedstawił metody numeryczne zastosowane w pracy, w tym metodę elementów skończonych i jej użycie w dynamice, oraz algorytm jawnego całkowania równań ruchu po czasie. Opisał także model materiałowy Johnsona-Cooka, wykorzystany w analizach dynamicznych.

W *Rozdziale 5.* Autor pokazał wstępne analizy przebiccia w płytach homogenicznych z różnym współczynnikiem Poissona.

Rozdział 6. zawiera opis i wyniki symulacji dla płyt z rdzeniem w postaci struktury anty-tetra-chiralnej. Wyniki te zostały porównane z wynikami obliczeń dla płyt z rdzeniem w postaci plastra miodu. W obliczeniach Autor uwzględnił różną liczbę komórek jednostkowych, różne warunki przebiccia, na przykład przypadek pocisku pod kątem innym niż prosty lub przypadek uderzenia w punkcie przesuniętym względem środka płyty. Wykluczył też wpływ różnicy w masach struktury auksetycznej i nieauksetycznej.

W *Rozdziale 7.* Autor opisał wyniki dla płyt z rdzeniem w postaci tzw. struktury „4-star”. Porównał je z nieauksetycznymi odpowiednikami. Wykluczył znaczący wpływ różnicy mas, wykonując symulacje zakładające wyrównaną masę struktur. Dobrał też parametry geometryczne struktury „4-star” tak, by zredukować współczynnik Poissona. Na koniec rozdziału przedstawił symulację jednego z testów fizycznych, opisanych w rozdziale kolejnym, niestety jednak dla materiału innego niż w eksperymentach.

Rozdział 8. zawiera opis testów fizycznych, które przeprowadzono dla próbek otrzymanych z żywicy techniką przyrostową. Wyniki tych badań potwierdziły zależności zaobserwowane w analizach numerycznych.

Podsumowanie otrzymanych wyników i wnioski Doktorant przedstawił w *Rozdziale 9.*

W rozdziale zatytułowanym *Literatura* umieścił zestawienie prac związanych z tematem rozprawy (pozycje literatury nie są numerowane; uszeregowane są alfabetycznie względem wyróżników [Nazwisko Rok publikacji]).

2. Uwagi krytyczne

2.1. Uwagi krytyczne dotyczące usterek redakcyjnych pracy

Uwagi krytyczne odnoszą się głównie do usterek redakcyjnych pracy.

2.1.1. Usterki edycyjne

Można tu wymienić, np.:

- str. 7 - wiersz 6 poniżej tytułu „STRESZCZENIE” - jest: „...będącej...”;
 - str. 16 - wiersze 2-3 poniżej wzoru (2.2.6) - jest: „...odpowiadająca jest płyta ...”;
 - str. 20 - podpis pod Rys. 2.4.1 - jest: „...poprzez.rozciąganie ...”;
 - str. 24 - wiersz 1 od góry - jest: „...o...”;
 - str. 24 - wiersz 2 od dołu - jest: „...bardzie...”;
 - str. 29 - wiersz 9 od dołu - jest: „...ich nieauksetycznej odpowiedniki ...”;
 - str. 42 - wiersz 2 powyżej Rys. 5.1.2 - jest: „...i początkowej zostały ...”;
 - str. 46 - wiersz 6 od góry - jest: „...które jest ma znaczenie...”;
 - str. 55 - wiersz 3 poniżej Rys. 6.2.7 - jest: „...odkształcenia plastycznej.”;
 - str. 55 - wiersz 5 od dołu - jest: „Pierwszych z nich...”;
 - str. 77 - wiersz 6 poniżej tytułu podrozdz. 7.1 - jest: „...swoje nieauksetycznej odpowiedniki...”;
 - str. 87 - wiersz 2 od dołu - jest: „...miały nadane przemieszczeń...”;
 - str. 91-92 - wiersze 1-2 od dołu i 1 od góry – powtórzony akapit;
 - str. 92 - wiersz 2 od góry - jest: „...tą samą płytę...”;
 - str. 99 - wiersz 2 poniżej tytułu podrozdz. 8.2 - jest: „...ściskanie na maszynie...”;
 - str. 100 - wiersz 4 od dołu - jest: „...nie mający wpływu...”;
 - str. 102 - wiersz 6 poniżej tytułu podrozdz. 8.3 - jest: „...najbliższe opisywanym wcześniej symulacji...”;
 - str. 104 - wiersze 2-3 poniżej Rys. 8.3.4 - jest: „...płyta auksetyczna przebiła się jedynie przez pierwsze dwie warstwy struktury, zatrzymując się przed trzecią.” – zdanie nie jest poprawne;
 - str. 105 - wiersze 3-4 od dołu – powinny być razem;
- i inne podobne; a także błędy interpunkcyjne i stylistyczne.

2.1.2. Inne usterki redakcyjne

Można tu wskazać, np.:

- Podane są nazwiska badaczy, lecz bez cytowań odpowiednich prac, które też mogłyby być umieszczone w rozdziale *Literatura*, np. str. 16, str. 22, str. 30.
- Cytowana jest na str. 28 pozycja literatury [Imbalzano2014], której nie ma w spisie literatury.
- Praca [Imbalzano2018] z rozdziału *Literatura* nie jest cytowana w tekście.
- Przydałyby się odpowiednie rysunki poglądowe: str. 17, powyżej wzoru (2.2.13) – ilustracja oznaczeń parametrów płyty warstwowej; str. 30, powyżej zdania „Zakładane jest ciągłe trójwymiarowe ciało sprężyste...” – ilustracja takiego obiektu; str. 94, powyżej akapitu z komentarzem, wiersze 1-3 od dołu - rysunek z wykresami dla 3 płyt.
- W jakich jednostkach są wymiary na Rys. 7.1.1?
- Jaka jest wartość minimalna na osi pionowej na: Rys. 7.2.5 oraz Rys. 7.2.8?
- Skąd wartość „ $h_2=6.5\text{ mm}$ ” na str. 90, wiersz 2 od góry, i czy na pewno?

Oraz o większym znaczeniu, np.:

- W języku polskim stosuje się przecinek jako symbol dziesiątyny w zapisie liczb z częścią ułamkową dziesiątną, czego Autor niestety nie przestrzega.
- Brak listy oznaczeń, która mogłaby się pojawić na zakończenie *Wstępu*. W pracy występują oznaczenia, które nie zawsze są zdefiniowane, np.:
 - str. 32 - wzór (4.1.1.9) – co oznacza symbol *W*?

2.2. Uwagi krytyczne o charakterze merytorycznym

- Brak jest informacji dlaczego Autor przyjął takie liczby elementów skończonych w poszczególnych symulacjach numerycznych.
- Szkoda, że nie udało się uzyskać danych materiałowych dla materiału, z którego zostały wydrukowane próbki do badań fizycznych. Porównanie wyników tych badań z wynikami odpowiedniej symulacji numerycznej dla danych materiałowych materiału próbek byłoby cennym uzupełnieniem pracy.

3. Elementy oryginalne pracy

Najważniejsze oryginalne elementy i wyniki przedstawione w rozprawie:

- 1° Badania numeryczne metodą elementów skończonych przebiecia w *warstwowych płytach homogenicznych o różnym współczynniku Poissona rdzenia* wykazały znaczny wpływ tego parametru na odporność na przebiecie, tj. wraz ze zmniejszaniem tego współczynnika zwiększa się odporność płyty na przebiecie.
- 2° W przypadku *płyt z rdzeniem anty-tetra-chiralnym* wykazana została ich większa odporność na przebiecie w stosunku do ich odpowiedników z rdzeniem nieauksetycznym, zarówno przy przebieciu: pod kątem prostym do płyty, pod kątem innym niż prosty, jak i z przesunięciem punktu przebiecia względem środka płyty.
- 3° Symulacje metodą elementów skończonych, przeprowadzone dla płyt z rdzeniem „4-star”, wykazały ich znacząco wyższą odporność na przebiecie w stosunku do odpowiedników z rdzeniem nieauksetycznym w postaci siatki z prostokątami w połączeniach.
- 4° Dla płyt z rdzeniem „4-star” pokazana została możliwość redukcji efektywnego współczynnika Poissona, poprzez zmianę parametrów geometrycznych struktury „4-star”.
- 5° Przeprowadzone przez Autora testy fizyczne dla płyt warstwowych z rdzeniem „4-star” oraz z rdzeniem nieauksetycznym potwierdziły zwiększoną odporność płyt auksetycznych na przebiecie (pociskiem, bijakiem).
- 6° Otrzymane wyniki symulacji numerycznych i testów fizycznych pozwoliły Doktorantowi potwierdzić postawioną w rozprawie tezę, że płyty warstwowe z rdzeniem auksetycznym mogą stanowić lepszą ochronę przed przebieciem niż płyty z rdzeniem nieauksetycznym.

4. Ocena końcowa rozprawy

Podsumowując uwagi przedstawione w poprzednich częściach opinii uważam, że rozprawa doktorska, przygotowana przez mgr. inż. Jakuba Michalskiego, stanowi oryginalny wkład w rozwój inżynierii mechanicznej.

Uwagi krytyczne zawarte w części 2. recenzji nie mają zasadniczego wpływu na końcową ocenę pracy, którą oceniam bardzo pozytywnie.

W związku z powyższym uważam, że praca doktorska spełnia wymagania stawiane przez *Ustawę o stopniach i tytule naukowym* i składam wniosek o przyjęcie rozprawy oraz dopuszczenie mgr. inż. Jakuba Michalskiego do publicznej obrony.

Jarosław Jedrysiak