

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

Przedmiotem niniejszej recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Pawła Stabli, zatytułowana „**Experimental-numerical analysis of the mosaic pattern influence on the strength of filament-wound CFRP composite structures**”. Przewód doktorski jest prowadzony przez Radę Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Recenzja została napisana na podstawie zlecenia i pisma nr 7W10/D/23/2023 z dnia 9 marca 2023.

Rozprawa doktorska skupia się na teoretycznych i eksperymentalnych badaniach pól mechanicznych cylindrycznych próbek kompozytowych wykonanych metodą nawijania, dla różnych obciążeń zewnętrznych. Badanie cylindrycznych próbek jest szczególnie istotne dla przemysłu rur oraz zbiorników ciśnieniowych, który jest szeroko stosowany w przemyśle samochodowym i lotniczym. Temat ten przyciąga uwagę naukowców z różnych jednostek badawczych na całym świecie i opiera się na interdyscyplinarnych badaniach z dziedzin technicznych, matematycznych i informatycznych, a także na zaawansowanych eksperymentach.

Na początek chciałbym przedstawić ogólny stan wiedzy dotyczący tematu poruszanego w niniejszej rozprawie oraz miejsce, jakie zajmują wyniki przedstawione w niej. Teoretyczne badania są prowadzone zgodnie z klasyczną teorią laminatów [38,43]. Laminaty są rozważane jako uśrednione struktury kompozytów włóknistych, co można uznać za pierwszy poziom homogenizacji, gdy mikrostruktura materiału włóknistego z jednokierunkowo ułożonymi włóknami jest rozpatrywana jako jednorodny anizotropowy materiał w skali mezo. Kolejny poziom homogenizacji anizotropowych laminatów prowadzi do cylindrycznej powłoki. W teorii homogenizacji iteracyjnej, podobnie jak w przypadku laminatu utworzonego z jednokierunkowo ułożonych włókien, pole sprężyste i odpowiednie tensory naprężenia i odkształcenia są uśredniane dwuetapowo. W niniejszej rozprawie wykorzystana została właśnie taka koncepcja homogenizacji, oparta na pracach [38,43,60].

Pierwszy etap wyznaczania efektywnych właściwości materiału kompozytowego o jednokierunkowo ułożonych włóknach (Rysunek 63, str. 71), polega na wyznaczeniu udziału objętościowego włókien  $\phi$  w materiale kompozytowym. W teorii losowych włóknistych materiałów kompozytowych  $\phi$  jest rozważane jako pierwszy moment losowego ułożenia, który wskazuje na prawdopodobieństwo trafienia punktu do fazy włóknistej. Pierwszy moment pozwala na oszacowanie efektywnych własności wzdłuż włókien, jednak wartości  $\phi$  nie wystarczają do oszacowania efektywnych własności w kierunku prostopadłym do ich ułożenia, między innymi poprzecznej anizotropii. Do obliczenia momentów wyższych rzędów losowych struktur konieczne jest poznanie współrzędnych środków włókien w ustalonej siećce. Momenty te można znaleźć za pomocą zaawansowanych połączeń MES i analitycznych metod renormalizacji [S. Gluzman, V. Mityushev, W. Nawalaniec, Computational Analysis of Structured Media, Academic Press, Elsevier, Amsterdam, 2018], [P. Drygaś, S. Gluzman, V. Mityushev, W. Nawalaniec, Applied Analysis of Composite Media. Analytical and Computational Results for Materials Scientists and Engineers, Elsevier, Duxford, 2020], [Czaplinski, T., Drygas, P., Gluzman, S., Mityushev, V., Nawalaniec, W., & Zietek, G. (2018). Elastic properties of a

unidirectional composite reinforced with hexagonal array of fibers. Arch. Mech, 70, 1-33]. W przedstawionych powyżej pracach prezentowane są zaawansowane symulacje komputerowe dotyczące wyznaczenia efektywnych właściwości kompozytów o regularnym heksagonalnym i losowym ułożeniu włókien.

Asymptotyczne uśrednienie w skali mezo jest wadliwe ze względu na pominięcie sprężystego oddziaływania sąsiednich włókien należących do warstw o różnych kierunkach. Wyniki badań pól mechanicznych sprężystych kompozytów włóknistych z uwzględnieniem różnokierunkowości ułożenia włókien, realizowane za pomocą zaawansowanych metod homogenizacji, są przedstawione w pracach [AG Kolpakov, SI Rakin, IV Andrianov, Boundary Layers in the Vicinity of the Prepreg Interface in Layered Composites and the Homogenized Delamination Criterion, International Journal of Solids and Structures, 267, 112166, 2023], [AG Kolpakov, SI Rakin, Local stresses in the reinforced plate with orthogonal systems of fibers. The homogenized strength criterion, Computers & Structures, 275, 106922, 2023]. W pracy [64] i innych późniejszych artykułach, cytowanych w rozprawie, metoda laminatów została zmodyfikowana w celu zastosowania jej do struktur nawijanych wedle wzorów mozaikowych. Dalszy rozwój tej metody w kombinacji z MES prowadzi do uzyskania bardziej precyzyjnego wyznaczenia koncentracji naprężenia [84], patrz Rysunek 18, str. 34. W swojej rozprawie Pan mgr. inż. Paweł Stabla zastosował zmodyfikowaną metodę laminatów z wykorzystaniem MES. W celu oszacowania gęstości energii odkształcenia plastycznego w kompozytach warstwowych, po obliczeniu tensora naprężenia i odkształcenia, zastosowano kryteria pęknięcia Tsai-Hilla i Hashina oraz Cuntze i Krolla, które są modyfikacjami kryterium Hubera-Misesa-Hencky'ego. Wzór (3.20) oraz inne wzory przedstawione w Podrozdziale 3.3 można traktować jako empiryczne modyfikacje wzorów Hubera-Misesa-Hencky'ego, przeznaczone do zastosowania w kompozytach warstwowych. Należy podkreślić, że w omawianych modyfikacjach nie uwzględniono krzywizny powierzchni walca (butli). Zgodnie z teorią, w rozpatrywanym przypadku powłok warstwowych, gdy krzywizna powierzchni jest niezerowa, w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni podziału warstw mogą powstawać istotne naprężenia, patrz artykuły [Awrejcewicz, J., Papkova, I. V., Krysko-jr, V. A., Ruchan, M. V., & Krysko, A. V. Analysis of chaotic parametric vibrations of flexible multi-layer shells. Dynamical Systems–Applications, 687-694], [Krysko Jr, V. A., Awrejcewicz, J., Zhigalov, M. V., & Krysko, V. A. (2020). On the mathematical modeling of symmetric/ asymmetric multi-layer orthotropic shells. International Journal of Non-Linear echanics, 120, 103425], [Shmatko, T., Kurpa, L., & Awrejcewicz, J. (2022). Dynamic analysis of functionally graded sandwich shells resting on elastic foundations. Acta Mechanica, 233(5), 1895-1910].

Struktura pracy jest następująca: w Rozdziałach 1-2 autor wprowadza czytelnika w tematykę rozprawy, przedstawiając podstawy technologii nawijania oraz opisując podstawowe parametry geometryczne przeplotów występujących w materiale kompozytowym, zgodnie z wzorami mozaikowymi. Rysunek 10 na stronie 18 przedstawia schemat nawijania w zależności od kąta. Rozważany proces może być modelowany za pomocą teorii grup cyklicznych i acyklicznych obrotów okręgu [Z. Nitecki, Differentiable Dynamics. An Introduction to the Orbit Structure of Diffeomorphisms, Cambridge, Mass.-London, 1971], [Ciepliński, K. (2004). Some remarks on iteration groups on the circle. Demonstratio Mathematica, 37(2), 363-372]. Najprostszym zastosowaniem tej teorii jest twierdzenie o geometrycznej ergodyczności trajektorii nawijania, które może być przydatne do oszacowania obszarów koncentracji naprężenia. Klasyfikacja typów nawijania, wprowadzona na podstawie liczby cykli oraz ich opóźnienia, jest zaprezentowana na Rysunkach 9-10, str. 18.

Rozdział 3 przedstawia podstawy mechaniki laminatów sprężystych, w tym tensory naprężenia i odkształcenia, podstawowe stałe i równania liniowej teorii sprężystości laminatów, a także kryteria pęknięcia laminatów, takie jak Tsai-Hill i Hashin, Cuntze i Krolla.

W Rozdziale 4 przedstawiono wyniki teoretycznych i eksperymentalnych badań rur oraz zbiorników wytwarzanych metodą nawijania. W Tabeli 4 na stronach 29-30 zestawiono rezultaty badań różnych autorów, dotyczące wyznaczania pól sprężystych dla różnych kombinacji fizycznych i geometrycznych parametrów materiału, między innymi, kątów nachylenia kierunku ułożenia włókien, typów struktury mozaikowej oraz zewnętrznych warunków obciążenia. Autor rozprawy szczegółowo opisuje struktury mozaikowe będące przedmiotem przedstawionych badań oraz analizuje pola lokalnych koncentracji naprężenia uzyskane za pomocą MES. Na przykład, Rysunek 18, str. 34 przedstawia lokalne pola naprężenia, przedstawione w pracy [84].

W Rozdziale 5 autor przedstawia cele i zakres rozprawy oraz krótko opisuje metodologię badań. Rozdział 6 zawiera szczegółowy opis badań własnych autora pracy, obejmujący zarówno symulacje komputerowe, jak i wyniki eksperymentów. Podrozdział 6.1 zawiera opis i analizę numerycznych obliczeń mechanicznych pól próbki w warunkach obciążenia ściskającego. Warto zwrócić uwagę na autorski kod dotyczący etapu wstępnego przetwarzania i przygotowania danych do ich dalszego wykorzystania w standardowych modelach pakietu Abaqus. Pomimo stosowania wbudowanych generatorów siatek w modelach Abaqusa do obliczeń metodą elementów skończonych, przed ich rozpoczęciem należy w odpowiedni sposób przygotować i wprowadzić dane, co wymaga długiej i żmudnej pracy. Zaprojektowany zgodnie z zasadami UX interfejs autorskiej aplikacji jest user-friendly. Umożliwia on użytkownikowi łatwe wprowadzenie danych niezbędnych do obliczeń z prostego interfejsu, przedstawionego na Rysunku 26, str. 45. Użytkownik wybiera i zatwierdza poprzez kliknięcie liczbę taśm, ich szerokość, kąty nachylenia ułożenia włókien w warstwach oraz inne parametry modelu. Ogólny schemat obliczeniowy został przedstawiony na Rysunku 31, str. 48. W dalszych symulacjach komputerowych wykorzystano stałe sprężyste określone w pracach [123, 124], przedstawione w Tabeli 5, str. 49.

Moim zdaniem, wyniki badań teoretycznych i eksperymentalnych rur oraz zbiorników wytwarzanych metodą nawijania, przedstawione w Podrozdziale 6.1.3, stanowią najważniejsze osiągnięcie rozprawy. Pewnego rodzaju podsumowaniem tych badań są wykresy przedstawione na Rysunkach 35-38, str. 51-53, prezentujące zależność odkształceń od siły ściskania dla różnych struktur mozaikowych. Warto byłoby w tym miejscu rozważyć zamieszczenie wykresu zależności odkształceń od naprężenia normalnego do powierzchni zamiast siły, aby uzyskać bezpośrednie skojarzenie z prawem Hooke'a.

We wnioskach autor podkreśla zgodność wyników obliczeń z rezultatami eksperymentów. Jednak moim zdaniem, realizacja symulacji komputerowych dotyczących strefy znaczących odkształceń wymaga istotnej modyfikacji modelu. Mianowicie, analizując przebieg krzywych wyznaczonych eksperymentalnie i teoretycznie, zestawionych na Rysunku 37, str. 52, widać znaczną różnicę w ich przebiegu w otoczeniu punktu odkształcenia 20 mm. Na krzywej wyznaczonej eksperymentalnie obserwujemy ostry spadek wartości siły, podczas gdy na krzywej wyznaczonej teoretycznie obserwuje się łagodny spadek jej wartości, co wskazuje na przejście materiału w stan plastyczny. Głębsza analiza może prowadzić do wniosku, że skok na wykresie bazującym na danych eksperymentalnych może wskazywać na konieczność zastosowania bardziej zaawansowanego modelu matematycznego, ponieważ przebieg krzywej teoretycznej przypomina krzywe dla materiałów jednorodnych, natomiast materiał będący przedmiotem badań istotnie różni się budową i właściwościami od materiału jednorodnego. Jako hipotezę badawczą można wskazać na efekt losowego skokowego przejścia w stan

plastyczny materiału włókien/wiązek włókien. Wyniki obliczeń pól mechanicznych oraz symulacje pól naprężenia/odkształcenia w próbkach w zależności od parametrów zewnętrznego obciążenia, są przedstawione na Rysunkach 43-46, str. 55-57 oraz szczegółowo przeanalizowane. W dalszej części rozprawy omówione są technologia przygotowania próbek oraz stanowisko i przebieg eksperymentów do zbadania mechanicznych właściwości przy różnych zewnętrznych obciążeniach próbek. Zdjęcia mikrostruktury badanych materiałów, przedstawione na Rysunkach 63 (str. 71), 75 (str. 81) i 76 (str. 82) mogą posłużyć do dalszych badań, po udoskonaleniu metody homogenizacji w przejściu od skali mikro do mezo, uwzględniającej geometrię ułożenia włókien w warstwach. Dodatkowo przeprowadzono akustyczne badania próbek, których wyniki są przedstawione na Rysunkach 78 (str. 84), 79 (str. 85), 80 (str. 86) oraz innych.

Rozdział 7 rozprawy stanowi jej podsumowanie. Autor podkreśla istotny wpływ różnych typów struktur mozaikowych na właściwości końcowego produktu. Między innymi, omówiony został wpływ parametrów geometrii próbki, stopnia pokrycia oraz przeplatania taśm oraz metod nawijania typu zig-zag na koncentrację naprężenia. Autor wskazuje również na możliwość rozszerzenia opracowanej metody badawczej na bardziej skomplikowane struktury, otrzymane w wyniku nawijania włókien oraz na konieczność zastosowania bardziej zaawansowanych modeli matematycznych w części badań teoretycznych i symulacji komputerowych.

Bibliografia rozprawy liczy 142 pozycje, liczba rysunków na liście wynosi 97.

Wszystkie teoretyczne wyniki pracy są poprawne. Nie znalazłem w niej żadnych istotnych uchybień, natomiast mam kilka ogólnych uwag krytycznych.

1. Model w zakresie aproksymacji warstw jednokierunkowo ułożonych włókien oraz anizotropowych laminatów został dobrze opisany. W recenzji wskazałem kilka, moim zdaniem istotnych publikacji z zakresu zaawansowanego matematycznego modelowania rozważanych struktur. Kontynuując w przyszłości ten temat badawczy, po zapoznaniu się ze wskazaną literaturą, można polepszyć model materiałów włóknistych na etapie wprowadzenia homogenizacji krocząc od włókien przez warstwy do gotowego produktu.
2. W rozprawie nie wskazano różnic między warstwami a powłokami. Jest to odrębna kwestia, która w recenzji wcześniej została już krótko omówiona. W ostatnich latach zanotowano znaczący postęp w matematycznych badaniach powłok wielowarstwowych, mogłoby być to uwzględnione w niniejszej pracy.
3. Na Rysunku 92 (str. 97) przedstawione są zdjęcia struktur z pęknięciami, które wskazują na możliwość zbudowania bardziej zaawansowanego matematycznego modelu, poszerzając go o teorię mechaniki pęknięcia z wykorzystaniem współczynników intensywności naprężenia.
4. W tekście pojawiają się niejasności odnośnie do stopnia automatyzacji wykorzystania napisanych przez autora pracy skryptów Python. Warto byłoby wyjaśnić, czy zgodnie ze schematem przedstawionym na Rysunku 31, str. 48 cały proces obliczeniowy przebiega automatycznie, czy na którymś etapie wymaga ręcznego sterowania. Czy schemat jest kompletny? W jaki sposób odbywa się obsługa wyjątków? Jakie wyjątki zostały uwzględnione? Czy została przeprowadzona analiza parametrów procesu modelowania ze wskazaniem na parametry/grupę parametrów, które powodują trudności w interpretacji wyników obliczeń?
5. Występują również drobne błędy w bibliografii, między innymi opisy pozycji [17], [60] są niekompletne.

Podane powyżej uwagi krytyczne nie pomniejszają wartości pracy. Uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Pawła Stabli jest zgodna z aktualnym kierunkiem teoretycznych i eksperymentalnych badań cylindrycznych próbek kompozytowych wykonanych metodą nawijania, które mają istotne

znaczenie aplikacyjne. Podstawowym celem pracy doktorskiej było badanie teoretyczne i eksperymentalne wpływu wzorów mozaikowych na wytrzymałość kompozytowych części cylindrycznych kompozytowych zbiorników ciśnieniowych. Praca ta zawiera także ambitne próby wszechstronnego badania metodami matematycznego modelowania i symulacji komputerowych rur wytwarzanych metodą nawijania.

Uważam, że praca jest merytorycznie poprawna i zawiera nowe wartościowe wyniki naukowe związane z badaniami rur oraz zbiorników wysokociśnieniowych wytwarzanych metodą nawijania. Rozprawa jest interdyscyplinarna, stanowi ona wszechstronne opracowanie problemu naukowo-inżynierskiego z zakresu materiałów kompozytowych, prowadzone zarówno na poziomach teoretycznym jak i eksperymentalnym, z zastosowaniem zaawansowanych narzędzi informatycznych. Podsumowując, uważam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki ustawowe. Tym samym wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Pawła Stabli do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

*Mietuszeu*