

Prof. dr hab. inż. Paweł Kłosowski
Katedra Mechaniki Budowli
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Gdańsk, dnia 20 czerwca 2022r.

Opinia

o pracy doktorskiej pt. „Zintegrowany model konstytutywny drewna” napisanej przez mgr. inż. Piotra Grobelnego, dla Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Lądowa i Transport” Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania jest pismo prof. dr hab. inż. Michała Kędzierskiego Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Lądowa i Transport” Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie z dnia 12 maja 2022r. i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Grobelnego pt. „Zintegrowany model konstytutywny drewna”.

2. Omówienie pracy

Opiniowana praca zawiera 188 stron, 218 rysunków i wykresów, 4 tabele i 166 pozycji bibliografii. Składa się z dwu streszczeń (angielskiego i polskiego), spisu oznaczeń, ośmiu rozdziałów i spisu cytowanej literatury. Praca jest napisana w języku polskim.

Po streszczeniach w języku polskim i angielskim i spisie treści w pracy pojawia się spis niektórych oznaczeń. Potem następuje krótki wstęp do rozprawy podkreślający rolę drewna jako materiału w budownictwie.

Drugi rozdział zawiera omówienie budowy drewna, podstawowych czynników fizycznych wpływających na cechy mechaniczne drewna oraz modeli przyjmowanych w analizie mechanicznej pracy drewna. Na podstawie literatury scharakteryzowano składniki drewna. Podkreślono, że drewno w badaniach mechanicznych wykazuje charakter anizotropowy, najbardziej zbliżony ortotropowego, a modelowanie można przeprowadzać w zakresie sprężystym, z uwzględnieniem zjawisk plastycznych, a nawet czynników reologicznych. Omówiono też z powołaniem się na literaturę czynniki, które mogą zmieniać cechy mechaniczne drewna.

W trzecim rozdziale pracy omówiono aktualny stan wiedzy na temat modeli konstytutywnych stosowanych w analizie i obliczeniach konstrukcji drewnianych. Na podstawie literatury stwierdzono, że do analizy drewna stosuje się głównie model ortotropowy, w którym kierunki ortotropii są zgodne z kierunkiem włókien, kierunkiem promieniowym i stycznym do włókien. Ustalono, że obliczenia odbywają się głównie w zakresie sprężystym, ale stosowane są też modele lepkosprężyste, a także uwzględniające deformacje plastyczne. Rozdział kończy teza pracy, w myśl której Autor podejmuje się zbudowania ogólnego modelu konstytutywnego dla drewna pozwalającego na uwzględnienie efekty sprężyste i lepkoplastyczne oraz zmianę jego parametrów pod wpływem czynników zewnętrznych.

W następnym krótkim rozdziale Autor przedstawia plan pracy.

W kolejnym piątym rozdziale Autor formułuje postać tensora konstytutywnego dla ciała ortotropowego, z uwzględnieniem granicy plastyczności, którą określa na podstawie jednej z hipotez wytrzymałościowych. Pod uwagę brane są: hipoteza Hubera-Misesa-Henky'ego, Hilla i Hu-Marina. Autor porównuje kształt granicy plastyczności dla drewna w różnych warunkach, przy uwzględnieniu różnych hipotez wytrzymałościowych. Stosuje do tego dane zawarte w Tabeli 5.1, nie podając niestety pochodzenia tych danych.

W rozdziale szóstym we wprowadzonych wcześniej zależności konstytutywnych Autor proponuje uwzględnić efekty lepkie. Proponuje model liniowy jednowymiarowy model składający się z jednego elementu standardowego modelu lepkosprężystego, dwóch połączonych szeregowo modeli Kelvina-Voigta oraz także połączonego szeregowo elementu plastycznego. Wyprowadza jednowymiarowe równania tego modelu dla przypadku płynięcia i relaksacji posługując się transformacją Laplace'a. Następnie proponuje wprowadzenie tak otrzymanych związków do poszczególnych wyrazów macierzy konstytutywnej ciała ortotropowego wyprowadzonych w rozdziale poprzednim. Przedstawia postać macierzy sprężystości w jednowymiarowym stanie naprężeń, płaskim stanie naprężenia oraz przypadku trójwymiarowym. Zaproponowane podejście umożliwia uwzględnienie odkształceń w zakresie sprężystym, lepkosprężystym i lepkoplastycznym.

Rozdział siódmy poświęcony jest weryfikacji zaproponowanego modelu konstytutywnego. Podstawą tej weryfikacji są badania reologiczne drewna przedstawione w pracy [115]. Rozpatrzone zostaną dwa zagadnienia: tarcza poddana równomiernemu stałemu obciążeniu na krawędzi oraz pręt poddany działaniu stałej siły rozciągającej (z uwzględnieniem różnych wariantów kierunku włókien). Oba przykłady są rozwiązywane metodą analityczną. Autor porównuje rozkłady naprężeń i odkształceń w zależności, czy użyto podejście sprężysto

lepkoplastyczne, lepkosprężyste, czy sprężyste. Porównywane są krzywe uzyskane dla parametrów wyznaczonych dla różnych wilgotności drewna oraz dla różnych czasów trwania obciążenia. W ostatnim etapie, który ma stanowić weryfikację metody porównano wyniki uzyskane dla tarczy przy użyciu zależności konstytutywnych w wariacie przestrzennym, płaskim i jednowymiarowym. Stwierdzono dobrą zgodność wyników i na tej podstawie uznano poprawność zastosowanego podejścia.

W podsumowującym pracę rozdziale ósmym Autor jeszcze raz powraca do wyników uzyskanych w rozdziale siódmym. Porównuje wyniki poszczególnych przykładów i przedstawia je na tle dostępnej literatury. Stwierdza, że co do charakteru otrzymane funkcje są podobne do tych, które można znaleźć w literaturze. Proponuje też stworzenie bazy parametrów właściwości drewna uwzględniających gatunki drewna, warunki fizyczne i czynniki wpływające na jego trwałość. Na zakończenie wyszczególnia elementy stanowiące jego zdaniem oryginalny wkład w rozwój badań właściwości drewna.

Całość wieńczy bibliografia zawierająca 169 pozycji, z czego 166 stanowią pozycje bibliograficzne, a trzy to wykaz użytych programów komputerowych.

3. Ogólna ocena pracy

Tematyka modelowania konstytutywnego drewna podjęta w rozprawie jest w chwili obecnej bardzo popularna i w literaturze zarówno krajowej jak i zagranicznej można znaleźć wiele prac na ten temat. Trzeba podkreślić, że zadanie, które Autor postawił przed sobą jest wyjątkowo złożone i jego zakres znacznie wykracza poza typowy zakres rozpraw doktorskich. Pełne jego zrealizowanie wymaga wykonania kilku podstawowych kroków, którymi są:

- a) podanie przyjętych założeń i ograniczeń co do stosowalności modelu,
- b) wyprowadzenie równań modelu z wyraźnym zdefiniowaniem parametrów materiałowych, które trzeba wyznaczyć. (w tym liczby parametrów w każdym wariacie),
- c) weryfikację modelu pod względem spełnienia podstawowych aksjomatów mechaniki,
- d) przedstawienie metodologii badań laboratoryjnych pozwalających na wyznaczenie parametrów modelu,
- e) podanie przynajmniej jednego kompletnego zestawu parametrów materiałowych,
- f) przedstawienie propozycji weryfikacji modelu obejmującej badania laboratoryjne, statystykę badań laboratoryjnych, obliczenia analityczne bądź numeryczne z użyciem

modelu konstytutywnego, porównanie ilościowe i jakościowe wyników laboratoryjnych z analitycznymi bądź numerycznymi,

Taki zakres badań znacznie przekracza ramy rozprawy doktorskiej i nic dziwnego, że Autor go nie zrealizował. Można przyjąć, że wykonano prace ujęte w punkcie b) powyższej listy. Częściowo także w punkcie a). Nie można się zgodzić, że przedstawiono poprawną weryfikację modelu. Pozostałych elementów z powyższej listy w zasadzie brak. Dlatego tytuł rozprawy trzeba uznać na przyjęty na wyrost.

Ideą budowy modelu jest połączenie ortotropowego modelu dla ciała trójwymiarowego z jednowymiarowym modelem reologicznym zastosowanym indywidualnie do każdego elementu macierzy konstytutywnej ortotropowego ciała trójwymiarowego.

Poprawność takiego podejścia należy zweryfikować poprzez zbadanie uzyskanych równań z aksjomatami mechaniki. Można też spróbować pokazać, że dla pewnej klasy problemów takie modelowanie pozwala dobrze odwzorować rzeczywiste zachowanie się drewna. Do tego potrzebne jest porównanie wyników obliczeń analitycznych, bądź numerycznych z wynikami prób laboratoryjnych (bądź z przykładami zachowania się rzeczywistych konstrukcji). Porównanie musi obejmować aspekt jakościowy, ale też koniecznie ilościowy.

W pracy można znaleźć bogatą bibliografią dotyczącą właściwości drewna. Autor wykazał się znajomością zapisywania zależności różniczkowych i rozwiązywania ich przy użyciu transformacji Laplace'a. Dobrą ideą jest również wykorzystanie rezultatów badań laboratoryjnych z innej pracy (praca [115]) w celu wzbogacenia przedstawionych tam wyników o próbę modelowania konstytutywnego. Zakładam, że Autor nie miał możliwości (lub czasu) w celu przeprowadzenia własnych badań laboratoryjnych.

Reasumując praca prezentuje dobry poziom teoretyczny jak i pokazuje umiejętność zastosowania odpowiednich narzędzi analitycznych do rozwiązania postawionego zadania.

4. Uwagi krytyczne

4.1. Uwagi ogólne

- a) Największą wadą pracy jest sposób w jaki spróbowano dokonać weryfikacji zbudowanego modelu konstytutywnego. Zaproponowano dwa zadania (oba dotyczą pełzania!). Wykonano obliczenia w kilku wariantach, ale nigdzie nie odniesiono się do wyników laboratoryjnych. Przetawiona analiza z użyciem podejścia 3D, 2D i 1D może dowodzić jedynie wewnętrznej niesprzeczności proponowanego modelu. To, że uzyskane wyniki mają charakter podobny do tego, jaki uzyskali autorzy innych prac nie

jest wystarczającym dowodem poprawności budowy modelu. Ten aspekt rozprawy przed jej potencjalną publikacją wymagał będzie w przyszłości uzupełnienia.

- b) Zaproponowany w pracy model konstytutywny nawet w ujęciu jednowymiarowym zawiera znaczną liczbę parametrów materiałowych, które trzeba wyznaczyć. W pracy nigdzie nie ma kompletnego zestawienia parametrów modelu. Znaczna liczba parametrów powoduje duże trudności w trakcie identyfikacji. Można by więc zapytać, dlaczego nie przyjęto prostszego modelu lepkosprężystego (np. tylko model standardowy) wzbogaconego o element plastyczny?
- c) Podstawowe dane dotyczące parametrów zaczerpnięto z pracy [115]. W pracy tej zaprezentowano badania pełzania belek drewnianych poddanych zginaniu, przy czym belki zawsze były wycinane wzdłuż włókien. Te dane zebrane są w tablicach 5.1-5.3. Skąd Autor uzyskał dane dotyczące innych kierunków ortotropii? Dane do rys. 7.3-7.11 są niedostępne, a nie mogą pochodzić z rozprawy [115].
- d) Uzasadnieniem przyjęcia lepkosprężystych lub lepkoplastycznych związków konstytutywnych jest stwierdzenie wpływu czynników reologicznych na zachowanie się drewna. Natomiast w przykładach z rozdziału 7 nie można znaleźć wykresów zmiany naprężeń lub odkształceń w czasie. Mimo, że pokazywane są rozkłady naprężeń lub odkształceń dla siedmiu, stu dni czy 10 lat. Jaki jest więc wpływ zjawisk reologicznych na zmianę właściwości drewna?
- e) Tabele 5.1 i 7.3 mają kluczowe znaczenie dla pracy. Pochodzenie pierwszej nie jest wiadome, a wartości w drugiej w znacznej części nie zgadzają się z tabelą 7.2 (pomijam tu sprawę przestawienia kolumn w tabeli 7.3).
- f) Zgodnie z rys. 7.10 - 7.15 wartości współczynników Poissona ν_{ij} nie ulegają zmianie w czasie. Zmianie, zgodnie z rys. 7.7 - 7.9, ulegają moduły Younga E_{ij} . Można sprawdzić na podstawie wartości z wykresów, że dla wartości modułów Younga w czasie nie są spełnione zależności $\nu_{ij} = \nu_{ji} \frac{E_j}{E_i}$, które są konieczne do zapewnienia symetrii macierzy sprężystości. Dlaczego wszystkie wartości współczynników Poissona na rys. 7.10 - 7.15 są ujemne?

Jak już wspomniano wcześniej modelowanie konstytutywne jest wyjątkowo trudnym tematem i dlatego trudno oczekiwać, aby człowiek rozpoczynający karierę naukową, posiadający ograniczony czas na wykonanie badań i napisanie rozprawy był w stanie spełnić wszystkie wymagania modelowania. Pomimo wielu niejasności, które mam nadzieję zostaną

wyjaśnione, wykazał się on dużą wiedzą teoretyczną, swobodą prowadzenia analizy matematycznej i umiejętnością zaaplikowania tej wiedzy do modelowania konstrukcji drewnianych. Dlatego recenzent liczy, że w czasie prezentacji rozprawy przed Radą Dyscypliny postara się on wyrazić swoje zdanie i skomentuje głębiej uzyskane wyniki.

4.2. Uwagi szczegółowe

- a) Redakcja pracy pozostawia dużo do życzenia. Szczególnie rażące jest niestosowanie zasad ortografii do pisowni niektórych nazwisk obcych (np. powinno być Kelvina-Voigta, a nie Kevin'a-Voight'a). Powszechnie stosowanym sposobem opisu modeli reologicznych jest pisownia: sprężysto lepkoplastyczny, lepkoplastyczny (patrz [110], [132]). Czterokrotnie razy powtórzono błąd w pisowni „w tym punkcje” (str. 115, 116, 118, 119)
- b) Jeśli Autor zdecydował się na umieszczenie spisu oznaczeń, to powinien on być bardziej obszerny i ścisły Np. co znaczą oznaczenia σ stan naprężeń [MPa], w porównaniu z σ_{ij} tensor naprężeń? Podobnie w przypadku ϵ i ϵ_{ij} .
- c) Pewne fragmenty pracy powtarzają się np. drugie zdanie rozdziału 2.1 (str. 14) powtarza się w 6-7 linii na str. 15. Rys. 2.1 jest identyczny jak rys. 6.4. Drugi paragraf rozdziału 4 zaczyna się zdaniem takim samym jak piąty paragraf rozdziału 5.
- d) Prezentacja wszystkich wykresów w rozdziale 6, a szczególnie w rozdziale 7, jest nieczytelna. Użyta czcionka do opisu jest zbyt mała, poszczególne wykresy funkcji są nie do rozróżnienia (np. na rys. 7.32 i 7.33 powinno być 9 krzywych, a z trudem można wyróżnić 6 i tak trudno zgadnąć, o które funkcje z legendy chodzi). Tłumaczenie się ograniczeniami programu Mathcad jest nie na miejscu. Albo należało edytować ręcznie opisy, albo użyć innego programu do ich tworzenia.
- e) W równaniu (6.121) wszystkie składniki, w tym $\tilde{C}(t, w)$ są funkcją czasu t . Aby więc otrzymać równanie na $\sigma(t, w)$ trzeba zastosować regułę różniczkowania iloczynu. W równaniu (6.122) różniczkowane są tylko wektory odkształceń.
- f) Stwierdzenie rozpoczynające rozdział 7, że proponowany model ma zastosowanie dla każdego rodzaju drewna jest zbyt odważne, gdyż Autor niczym nie potwierdza tej tezy. Podobnie ma się rzecz z drugim paragrafem na str. 93. Bardzo często projektuje się masywne elementy konstrukcyjne wymagające analizy trójwymiarowej (np. konstrukcje z bali drewnianych).
- g) Nie mogę zgodzić się ze stwierdzeniem, że „Analiza odkształceń w płaskim stanie naprężeń w porównaniu z odkształceniami w prostych próbach ściskania lub

rozciągania jednokierunkowego pozwoli zweryfikować tezę pracy” (str.93). W pracy przedstawiono tylko analizy stanu pełzania (a nie rozciągania lub ściskania). Dodatkowo model weryfikowano tylko przez porównanie wzajemne wyników uzyskanych z użyciem tego modelu.

- h) W zadaniach dotyczących tarczy i pręta obciążenie jest przyłożone w sposób stały (funkcja Heaviside’a na rys. 7.18 i 7.19), natomiast rys. 7.16 i 7.17 sugerują, że rozpatrywany jest jednostajny przyrost obciążenia.
- i) Skąd bierze się złożona postać wykresów na rys. 7.20?

4.3. Ważniejsze uwagi redakcyjne

- a) W pracy nie istnieje równanie (3.73), do którego Autor odwołuje się dwukrotnie na str. 43.
- b) Równanie (5.4) daje się uzyskać z (5.2) pod warunkiem założenia, że $\pi_{ij} = \pi_{ji}$, a ten warunek Autor wprowadza dopiero w równaniach (5.10) - (5.12).
- c) Na str. 68 pojawiają się niewyjaśnione parametry α_1 i α_2 .
- d) Na rys. 6.2 odkształcenie plastyczne ε_p jest funkcją czasu t . Gdyby tak było, byłoby odkształceniem lepkiem. Ten sam błąd pojawia się w równaniach (6.27) i (6.33) – (6.35), (6.119) (6.121). Dodatkowo w równaniu (6.33) i (6.121) brak znaku różniczkowania po czasie (kropki) nad drugim składnikiem. Dlaczego indeks p raz ma położenie dolne (str. 68 w tekście i rys. 6.2, (6.1)), a potem ma położenie górne (6.27) i (6.33) – (6.35)?
- e) Na str. 78 i 86 pojawiają się wielkości E_{oL} i E_{oR} (E_{oR}), które są zdefiniowane jako moduły Young’a „ i -tego ciała modelu lepko-sprężysto-plastycznego”. Wskaźnik i w tych zmiennych nie występuje, więc definicja jest błędna. Poniżej są definicje właściwe dla E_{iL} i E_{iR} (E_{iR}).
- f) Zdanie „Ze względu na złożoność przestrzennego stanu naprężeń czy odkształceń, rozwiązania najczęściej przedstawia się w płaskim stanie naprężeń lub odkształceń” jest tezą wątpliwą. Takie stany z powodzeniem analizuje się przy użyciu metody elementów skończonych.
- g) Równania (7.7) do (7.9) niczym się nie różnią więc nie mogą opisywać różnych wielkości. Błąd wynika z niefortunnych oznaczeń.
- h) Równania (7.73) do (7.76) nie są opisane ze względu na kierunki włókien.
- i) Dlaczego wykresach w rozdziale 7 nie podano dokładnej lokalizacji prezentowanego wykresu (np. rys. 7.20 brak wartości rzędnej x i z).

- j) Pozycje literatury [78] i [81] są podane z błędami, a pozycje [145] i [147] w sposób niepełny.
- k) Dlaczego w pozycjach literatury [161] – [166] nie podano tytułów norm?

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Recenzowana praca podejmuje się trudnego zadania teoretycznego i zaproponowany model stanowi na pewno element podnoszący stan wiedzy w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport. Zaproponowany model na pewno nie jest jednak uniwersalnym. Wobec wskazanych usterek podejścia można go co najwyżej nazwać przybliżonym modelem zachowania drewna z uwzględnieniem efektów reologicznych. To na pewno stanowi osiągnięcie Autora. Tym niemniej konieczna jest dalsza praca nad jego walidacją i określeniem zagadnień, do których może być zastosowany. Jednak uzyskane już wyniki zawarte w rozprawie upoważniają Autora do poddania rozprawy ocenie. Reasumując stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Poz. 1789 z dnia 27 września 2017) i rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. Poz. 261 z dnia 30 stycznia 2018r.) i dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Piotra Grobelnego do publicznej obrony pracy.

Prof. dr hab. inż. Paweł Kłosowski

