

**Prof. dr hab. inż. Tadeusz Smolnicki**  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Konstrukcji Badań Maszyn i Pojazdów

**RECENZJA**  
rozprawy doktorskiej  
**mgr inż. Moniki Słupskiej**

pt.:

**„Modelowanie mechanicznych uszkodzeń jabłek metodą elementów skończonych w oparciu o mikromechaniczne właściwości tkanek”**

Podstawę recenzji stanowi Uchwała Rada Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu z dnia 27 czerwca br.

Własności mechaniczne owoców są istotnymi czynnikami wpływającymi na ich odporność podczas zbioru, transportu i przechowywania na obciążenia mechaniczne, a jednocześnie stanowią istotne parametry niezbędne do projektowania maszyn do ich przetwarzania oraz do doboru ich nastaw. Własności te są także niezbędne do przeprowadzania analiz numerycznych statycznych i dynamicznych zachowywania się owoców pod działaniem wymuszeń kinetycznych lub kinematycznych.

Ze względu na złożoną budowę tkanek pochodzenia biologicznego, zmianę ich własności w czasie oraz znaczny rozrzut własności pomiędzy poszczególnymi owocami wyznaczenie ich własności mechanicznych jest związane z wieloma problemami badawczymi związanymi z pozyskaniem próbek, przeprowadzeniem pomiarów oraz interpretacją ich wyników. Prawidłowa identyfikacja tych własności jest warunkiem koniecznym do budowy modeli skończenie elementowych całego owocu. Takie modele, zwalidowane doświadczalnie są cennym narzędziem do dalszych prac badawczych ale mogą także znaleźć zastosowanie aplikacyjne.

Temu właśnie zagadnieniu poświęcona jest recenzowana dysertacja, w której Autorka przedstawia własną kompleksową metodykę budowy modeli dyskretnych owocu na przykładzie jabłka odmiany Chopin. Procedura ta obejmuje badania fizykochemiczne oraz badania wytrzymałościowe parenchymy i epidermy na różnych etapach dojrzewania.

Tematyka dysertacji i postawione w niej cele posiadają duże znaczenie aplikacyjne jak również są aktualne i istotne, o czym świadczy duża liczba publikacji poświęconej badaniom własności mechanicznych owoców.

Przedstawiona do recenzji praca składa się ze streszczeń w języku polskim i angielskim, 12 rozdziałów, wykazów literatury i źródeł internetowych oraz spisów rysunków i tabel. Zasadnicza część pracy liczy 82 strony.

## **Zakres rozprawy**

W krótkim wstępie Autorka uzasadniła podjęcie tematyki pracy oraz przedstawiła potrzebę budowy dobrze zwalidowanych modeli wykorzystujących metodę elementów skończonych.

Rozdział 2 dysertacji stanowi przegląd dotychczasowego stanu wiedzy i został podzielony na trzy podrozdziały. W pierwszym opisano budowę komórkową, strukturę, skład i własności jej poszczególnych warstw oraz jej wpływ na parametry biochemiczne jabłek na ich własności wytrzymałościowe. Podrozdział ten opisuje złożoność struktury i wielość czynników mających ostatecznie wpływ na wytrzymałość mechaniczną jabłek.

W kolejnym podrozdziale opisano znane metody badania własności mechanicznych poszczególnych tkanek biologicznych owocu. Metody te autorka podzieliła na niszczące i nieniszczące. Ze względu na mnogość metod oraz dużą liczbę publikacji przegląd zaprezentowany jest w sposób bardzo syntetyczny. Ostatni podrozdział opisuje modelowanie numeryczne owoców. Podkreślono przydatność metody elementów skończonych do wyznaczania wytrzymałości, sztywności oraz odporności na uszkodzenia owocu, ale także do wspomagania metod pomiarowych np. wykorzystujących emisję akustyczną. Zwrócono uwagę na to, że wiele opisywanych w literaturze modeli nie zostało prawidłowo zwalidowanych.

Dokonany przegląd metod badawczych oraz modeli numerycznych umożliwił sformułowanie w rozdziale 3 problemu badawczego: potrzeby doświadczalnego wyznaczenia zestawu właściwości mechanicznych tkanki parenchymy jabłka w poszczególnych stadiach dojrzałości do budowy prawidłowych modeli dyskretnych jabłek.

Sformułowano także dwie hipotezy badawcze. Pierwsza dotyczy większej adekwatności modeli dyskretnych jabłka ze sprężysto-plastycznym modelem materiału w stosunku do modeli z materiałem sprężystym. Druga dotyczy możliwości wyznaczenia wartości niszczących tkanek parenchymy na podstawie porównania obrazów mikrotomograficznych oraz warstw naprężeń zredukowanych uzyskanych na drodze MES.

W rozdziale 4 sformułowano główny cel pracy: budowę i walidację adekwatnych modeli dyskretnych jabłek umożliwiających wyznaczenia wartości naprężeń powodujących uszkodzenie owoców na poszczególnych etapach ich dojrzałości; oraz niezbędne do jego osiągnięcia cele cząstkowe:

- wyznaczenie własności fizykochemicznych,
- wyznaczenie własności wytrzymałościowych parenchymy i epidermy,
- wyznaczenie na podstawie tych badań parametrów modelu materiału sprężystego i sprężysto-plastycznego,
- doświadczalne wyznaczenie charakterystyk siła-ugięcie, powierzchnia styku-siła,
- wyznaczenie stref uszkodzeń jabłek przy różnych wartościach obciążeń przy pomocy mikrotomografii,



- wyznaczenie wartości naprężeń niszczących parenchymę na podstawie porównania wyników z modeli dyskretnych i obrazów mikrotomograficznych.

Do osiągnięcia powyższych celów zastosowano różne metody badawcze, które zestawiono i krótko Autorka dysertacji opisała w rozdziale 5. Podano metody wyznaczenia podstawowych własności fizyko-chemicznych oraz pomiaru geometrii.

Metody wyznaczania własności wytrzymałościowych przedstawiono szerzej w podrozdziale 5.3. Opisano próbę ściskania parenchymy, z której wyznaczono charakterystykę odkształcenie-naprężenie, moduł sprężystości i liczbę Poissona, próbę rozciągania epidermy, z której wyznaczono odkształcenie-naprężenie i moduł sprężystości oraz próbę ściskania całych jabłek, z której wyznaczono charakterystyki przemieszczenie-siła oraz przemieszczenie-powierzchnia styku. Przedstawiono sposób modyfikacji charakterystyki przemieszczenie-siła polegający na usunięciu nieciągłości wywołanych lokalnymi dekohezjami tkanki parenchymy.

Syntetycznie przedstawiono metodę wyznaczenia zakresu uszkodzeń owoców na podstawie obrazów mikrotomograficznych, budowę modeli MES i ich walidację oraz metodykę wyznaczenia naprężeń niszczących na podstawie tych danych.

Obszerniejszy opis wyników badań doświadczalnych przedstawionych w rozdziale 5 zamieszczono dopiero w rozdziale 6. W tabelach zestawiono uzyskane wartości średnie oraz odchylenia standardowe dla owoców na etapie dojrzałości zbiorczej, konsumpcyjnej oraz fizjologicznej, a na wykresach uzyskane charakterystyki. Zamieszczono obrazy mikrotomograficzne przy obciążeniu równym 20, 50 i 80 procent siły niszczącej. Skomentowano uzyskane różnice dla jabłek na różnych etapach dojrzałości.

Zbudowanym modelom MES poświęcony jest rozdział 7. Podano sposób budowy modelu oraz zastosowane własności materiałowe tkanek wyznaczone przez Autorkę w przeprowadzonych wcześniej badaniach doświadczalnych. W przypadku modelu materiału sprężysto-plastycznego zastosowano wygładzenie charakterystyk na etapie zniszczenia próbki. Zadanie rozwiązywano w zakresie statycznym przy pomocy procedur przyrostowych. Opisano sposób aplikacji warunków brzegowych oraz modelowania styku. Do dyskretyzacji zastosowano elementy objętościowe niższego rzędu typu HEXA, PENTA i TETRA.

Przeprowadzono walidację modeli MES sprężystego i sprężysto-plastycznego (rozdział 8) zarówno przy zastosowaniu uzyskanych z badań doświadczalnych charakterystyk przemieszczenie-siła, jak i charakterystyk obciążenie-powierzchnia styku. Wyznaczono średnie odchylenia dla obydwu modeli numerycznych. Wykazano lepsze dopasowanie modelu sprężysto-plastycznego w stosunku do modelu sprężystego.

W rozdziale 9 przedstawiono zestawienie obrazów mikrotomograficznych z warstwicami naprężeń uzyskanymi na drodze MES. Wyznaczono wartości naprężeń uzyskane z modelu materiału sprężystego i sprężysto-plastycznego odpowiadających granicy strefy uszkodzenia jabłka. Uzyskane wartości zostały porównane z wartościami uzyskanymi z próby ściskania wycinka parenchymy.



Wyniki przeprowadzonych badań zostały poddane przez Autorkę dyskusji. W rozdziale 10 omówiono właściwości fizykochemiczne jabłek odmiany Chopin na tle innych odmian jabłek jesiennych, ze szczególnym uwzględnieniem indeksu Streifa oraz kwasowości. Stwierdzono najwyższą wytrzymałość parenchymy na etapie dojrzałości konsumpcyjnej ale z badań wynika, że jest ona porównywalna z wytrzymałością na etapie dojrzałości zbiorczej. Autorka dopatruje się przyczyny w tym, że na etapie dojrzałości konsumpcyjnej jabłko posiada większą gęstość i większy moduł sprężystości. Na podstawie przeprowadzonych prób stwierdzono, że zachowanie pokryteczne parenchymy, już po wystąpieniu pierwszych uszkodzeń lepiej oddaje model sprężysto-plastyczny materiału. W odniesieniu do modeli dyskretnych Autorka podkreśliła konieczność uwzględniania różnych charakterystyk wytrzymałościowych na różnych etapach dojrzenia oraz konieczność wieloparametrycznej walidacji modeli. Wyniki badań zostały podsumowane w rozdziale 11 a wnioski sformułowano w rozdziale 12.

Bibliografia rozprawy liczy 144 pozycje dotyczące opisywanych zagadnień. Zdecydowaną większość pozycji stanowią publikacje naukowe o zasięgu międzynarodowym z ostatnich kilku lat.

### **Charakterystyka rozprawy**

Praca mgr inż. Moniki Słupskiej dotyczy problematyki modelowania uszkodzeń owoców metodą elementów skończonych z uwzględnieniem mikromechanicznych własności tkanek. Jako obiekt badań przyjęto jabłko odmiany Chopin. Na podstawie szerokiej analizy literatury Autorka stwierdziła, że dotychczasowe modele nie w pełni odpowiadają potrzebom badawczym oraz zastosowaniom aplikacyjnym ze względu na brak uwzględnienia zmian charakterystyk wytrzymałościowych na kolejnych etapach dojrzenia owocu. Zwróciła także uwagę, że wiele z tych modeli zostało słabo zwalidowanych lub nie zostało zwalidowane. Wybór tematu dysertacji jest jak najbardziej właściwy.

Mgr inż. Monika Słupska zdefiniowała problem badawczy: potrzeba wyznaczenia metodami doświadczalnymi zestawu właściwości tkanki parenchymy, stanowiących dane umożliwiające budowę adekwatnych modeli dyskretnych jabłek, na różnych etapach dojrzenia. Problem badawczy został postawiony prawidłowo. Wynikają z niego dwie postawione przez Autorkę dysertacji hipotezy badawcze. Pierwsza dotycząca wyższości modelu sprężysto-plastycznego materiału nad modelem sprężystym oraz druga o możliwości wyznaczenia wartości naprężeń na podstawie porównania obrazów mikrotomograficznych oraz warstwic naprężeń z modelu skończoneelementowego. Z tak sformułowanego problemu badawczego oraz postawionych hipotez wynikł cel główny pracy: budowa i walidacja adekwatnych modeli dyskretnych jabłek, umożliwiających wyznaczenie naprężeń powodujących uszkodzenia owoców na poszczególnych etapach ich dojrzałości oraz wymienione w zakresie rozprawy cele cząstkowe.

Rozwiązanie tego problemu wymagało dużej wiedzy nie tylko z zakresu dyscypliny rolnictwo i ogrodnictwo, ale także z zakresu mechaniki oraz obliczeń numerycznych.



Z tak postawionych celów wynikała potrzeba przeprowadzenia szeroko zakrojonych badań wytrzymałościowych. Badania dotyczyły zarówno poszczególnych tkanek: próba ściskania parenchymy i próba rozciągania epidermy, ale także badania ściskania całych jabłek. Wyznaczone charakterystyki posłużyły do wyznaczenia modułu sprężystości i liczby Poissona do modelu sprężystego oraz charakterystyk odkształcenie-napężenie do modelu sprężysto-plastycznego. Analizowano także rozmiar powierzchni styku owocu z elementem wymuszającym ściskanie i rozkład nacisków. Dodatkowo wyznaczono zakres uszkodzeń owoców na podstawie obrazów mikrotomograficznych. Wszystkie te badania zrealizowano dla trzech etapów dojrzewania owocu: dojrzałości zbiorczej, dojrzałości konsumpcyjnej oraz dojrzałości fizjologicznej.

Dodatkowo wyznaczono podstawowe właściwości fizykochemiczne badanych jabłek, co stanowi uzupełnienie, ale oprócz pomiarów geometrii nie jest bezpośrednio niezbędne do budowy modeli MES i ich walidacji.

Na podstawie zgromadzonych danych zbudowano modele do obliczeń metodą elementów skończonych całego jabłka. Dobór elementów skończonych oraz jakość dyskretyzacji jest właściwa i odpowiada współczesnemu poziomowi budowy modeli tego typu obiektów. Zaproponowane modele konstytutywne materiału są w mojej ocenie prawidłowe. Autorka przeprowadziła obliczenia w zakresie nieliniowym, co wymagało starannego doboru parametrów analizy przyrostowej.

Model został następnie zwalidowany na dwa sposoby. Przeprowadzoną walidację na podstawie wykresu siły w funkcji przemieszczenia oraz na podstawie wielkości powierzchni styku uważam za poprawną i wystarczającą, a uzyskaną zgodność za bardzo dobrą. Trochę większe różnice zanotowano, przy wyznaczeniu naprężeń na podstawie obrazów z mikrotomografii. Należy wszakże zauważyć, że istnieje problem z doбором właściwej hipotezy wyteżeniowej przy naprężeniach wieloosiowych.

Opisany wcześniej zakres pracy jest obszerny i spójny. Widoczne jest kompleksowe podejście do zagadnienia i metodyczne rozwiązywanie poszczególnych zagadnień cząstkowych.

Stwierdzam, że zrealizowany przez Doktorantkę w rozprawie doktorskiej zakres pracy, jej wkład w rozwój wiedzy o modelowaniu numerycznym owoców mają istotne znaczenie.

### **Podstawowe osiągnięcia Doktoranta w rozprawie**

Do podstawowych osiągnięć Autorki i oryginalnych aspektów pracy można zaliczyć:

- dokonanie szerokiego i bardzo systematycznego przeglądu istniejącego stanu wiedzy w zakresie budowy modeli MES owoców,
- dokonanie krytycznej analizy dotychczas budowanych modeli, ze względu na ich niekompleksowość, słabą walidację lub jej brak,
- właściwe sformułowanie problemu badawczego, hipotez i celu pracy oraz wynikających z tego celów cząstkowych,

- przeprowadzenie licznych badań doświadczalnych i wyznaczenie na ich podstawie parametrów i charakterystyk do równań konstytutywnych,
- budowa oryginalnych modeli MES jabłka odmiany Chopin i przeprowadzenie zaawansowanych symulacji numerycznych w celu wyznaczenia pola przemieszczeń i pola naprężeń w próbie ściskania całego owocu, i ich rzetelne zwalidowanie,
- porównanie obrazów mikrotomograficznych uszkodzonego jabłka i warstw naprężeń z modelu MES w celu wyznaczenie wartości naprężenia niszczącego.

### **Uwagi krytyczne i pytania do dyskusji**

- Czy zastosowanie w modelu sprężysto-plastycznym modułu sprężystości dla części sprężystej wyznaczonego na podstawie danych testowych do wystąpienia pierwszych nieciągłości nie dałoby lepszej zgodności z badaniami empirycznymi?
- Nie podano czy w symulacji ściskania całych jabłek (str. 59) zastosowano sterowanie przyrostem siły, czy przyrostem przemieszczenia?
- Nie podano ile warstw elementów skończonych zastosowano w modelu MES do modelowania epidermy.
- Autorka jako naprężenia niszczące w modelu MES przyjęła wartość naprężeń wg hipotezy Hubera-Misesa. Czy lepszej zgodności nie dałyby maksymalne naprężenia główne?
- W jaki sposób poradzono sobie z różnicami geometrii pomiędzy badanymi jabłkami? Czy geometria była skanowana? Czy też posłużono się jedynie podstawowymi wymiarami?
- Nie sformułowano kierunków dalszych badań jakie Autorka chciałaby w przyszłości realizować i jakie uważa za celowe.

Stwierdzono także niedociągnięcia głównie dotyczące terminologii oraz precyzji sformułowań:

- Brak opisu wzorów w rozdziale 2.3.
- We wzorze (5) na obliczanie stałej Poissona powinien być przed ilorazem znak minus (str. 34).
- W tabeli 11 (str. 55) nieprawidłowe są jednostki przy gęstości.
- MES nie jest metodą dokładną (str. 27). Jest metodą przybliżoną, ale wyniki są dokładniejsze niż metody mechaniki klasycznej.
- Autorka używa nieprawidłowego zwrotu „w oparciu o” między innymi w tytule dysertacji. Powinno być „na podstawie”;
- Modele numeryczne się „buduje”, a nie „projektuje” (str. 23),
- Na stronie 23 Autorka podaje „w każdym elemencie skończonym wyznaczane są równania ruchu”, co jest prawdziwe tylko w przypadku obliczeń dynamicznych,
- Przymiotnik złożony „sprężysto-plastyczny” powinien być pisany z łącznikiem.
- Odwołania do rysunków i rozdziałów pisane wielkimi literami.
- Brak spisu ważniejszych oznaczeń.



Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny lub nie są niedociągnięciami dużej wagi. Nie obniżają one mojej bardzo pozytywnej oceny recenzowanej pracy.

### **Ocena redakcyjna rozprawy**

Dysertacja zredagowana jest poprawnie, w sposób zrozumiały, z właściwą systematyką rozwiązywanych zagadnień. Praca charakteryzuje się właściwą strukturą. Autorka przyjęła schemat odrębnego przedstawienia zastosowanych metod, uzyskanych wyników oraz ich dyskusji, co jest poprawne, ale utrudnia percepcję pracy. Na wyróżnienie zasługuje poziom edytorski tekstu oraz staranność wykonania rysunków.

Pozostałe uwagi jak np. drobne potknięcia stylistyczne i inne zaznaczyłem w przekazanym mi egzemplarzu pracy i dlatego ich tutaj nie przytaczam.

### **Wnioski końcowe**

Praca dotyczyła modelowania mechanicznych uszkodzeń jabłek przy pomocy metody elementów skończonych z uwzględnieniem mikromechanicznych właściwości tkanek. W tym celu Kandydatka zbudowała oryginalny model objętościowy jabłka oraz przeprowadziła zaawansowane obliczenia numeryczne. Do wyznaczenia charakterystyk materiałowych przeprowadziła badania doświadczalne jabłek w różnych etapach dojrzewania.

Treść zawarta w pracy odpowiada tytułowi pracy, choć jej zakres jest bardziej obszerny, bo obejmuje także badania fizykochemiczne. Układ tematyczny pracy jest logiczny. Nie ustrzeżono się jednak pewnych błędów językowych i redakcyjnych, z których kilka przytoczyłem powyżej.

W podsumowaniu niniejszej opinii o recenzowanej rozprawie doktorskiej stwierdzam, że postawiony problem badawczy został rozwiązany, a hipotezy zostały w sposób wystarczający udowodnione. Podstawowe cele naukowe rozprawy zostały osiągnięte. Autorka samodzielnie rozwiązała zagadnienie budowy modeli numerycznych jabłek. Wymagało to wysokich umiejętności merytorycznych oraz dużego nakładu pracy.

Na pochwałę zasługuje zastosowanie dwóch metod walidacji modeli numerycznych oraz kompleksowość modelowania związana z uwzględnieniem zmian właściwości mechanicznych tkanek jabłka podczas dojrzewania. Uzyskane wyniki mają wartość poznawczą i bardzo dużą użyteczność. Wymienione powyżej uwagi krytyczne nie umniejszają w sposób istotny wartości merytorycznej rozprawy i w dużej mierze mają charakter dyskusyjny.

Praca jest poprawna pod względem merytorycznym, a w przedstawionych analizach Doktorantka wykazała duży zasób wiedzy nie tylko z zakresu rolnictwa i ogrodnictwa ale także z mechaniki, a kierunki rozważań świadczą o umiejętności oryginalnego i samodzielnego rozwiązywania problemów badawczych. Autorka wykazała się dobrą znajomością metod numerycznych w obszarze modelowania wytrzymałościowego. Przedstawiona praca wykazuje dobre przygotowanie pani mgr inż. Moniki Słupskiej do samodzielnej pracy naukowej.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana praca jest oryginalna, wartościowa i przedstawia nowe osiągnięcia badawcze o znacznych walorach poznawczych, a zatem spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim.

Z uwagi na wysoki poziom merytoryczny pracy, obszerny zakres badań oraz jej interdyscyplinarność uważam, że praca kwalifikuje się do wyróżnienia, zastrzegając podjęcie ostatecznej decyzji po pomyślnej obronie.

Podsumowując podane wyżej oceny uważam, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania obowiązującej Ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych stawiane rozprawom na stopień doktora i dlatego **stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Moniki Słupskiej do publicznej obrony.**



Wrocław, dnia 26 sierpnia 2023r.

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Smolnicki