

MODELOWANIE ROZKŁADÓW PRZEMIESZCZEŃ WALCOWEJ PRÓBKİ BULWY ZIEMNIAKA PRZY OBCIĄŻENIU OSIOWYM METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Roman Stopa

Instytut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Tadeusz Smolnicki

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wroclawska

Streszczenie. Przedstawiono wyniki pomiarów walcowej próbki pobranej z bulwy ziemniaka poddanej osiowemu ściskaniu. Wyznaczono podstawowe właściwości wytrzymałościowe materiału próbki, a następnie zbudowano model dyskretny procesu ściskania osiowego próbki. Zbudowany model poddano weryfikacji oraz wyznaczono warstwicę przemieszczeń z uwzględnieniem tarcia pomiędzy powierzchnią próbki i elementu obciążającego. Otrzymano dobrą zgodność wyników doświadczalnych oraz uzyskanych w oparciu o model MES. Badania wykazały, że wpływ tarcia na wartość uzyskanych wyników ma istotne znaczenie tylko w strefie styku próbki z elementami roboczymi urządzenia obciążającego.

Słowa kluczowe: Metoda Elementów Skończonych, bulwa ziemniaka, przemieszczenia

Wstęp

Materiały pochodzenia biologicznego ze względu na swoje właściwości stwarzają poważne problemy nie tylko podczas prowadzenia prac badawczych, ale również w trakcie rozważań teoretycznych. Brak spójnej i jednolitej teorii opisującej zachowanie się materiału biologicznego pod wpływem obciążenia utrudnia i wręcz uniemożliwia budowę modeli teoretycznych pozwalających na przeprowadzenie wiarygodnych obliczeń. Właściwości wytrzymałościowe produktów rolniczych, będące jednym z podstawowych parametrów określających np. ocenę stopnia odporności na uszkodzenia, warunki przechowywania czy stopień dojrzałości, wyznacza się najczęściej w próbie ściskania.

Istotnego znaczenia nabierają więc metody przybliżone oparte o zastosowanie obliczeń numerycznych. Wśród nich największą popularnością cieszy się metoda elementów skończonych. Z uwagi na specyfikę materiałów pochodzenia roślinnego, modelowanie ich metodą MES jest trudne i stosunkowo mało poznane. Metody modelowania i technologie badań opracowane dla materiałów konstrukcyjnych nie dają się wprost zastosować do badań surowców roślinnych. Materiały biologiczne mają budowę anizotropową, na ogół bardzo niskie wartości umownych modułów sprężystości oraz wysokie wartości stałej Poissona.

Jednym z pierwszych zastosowań metody elementów skończonych do budowy modelu dyskretnego dla owoców i warzyw były badania odpowiedzi na impulsy wzbudzenia zmierzające do określenia parametrów zależnych od własności akustycznych jabłek [Lu i in. 1997]. Lewis [2007] zbudował model dyskretny jabłka Golden Delicious wykorzystując skaner laserowy do precyzyjnego odwzorowania geometrii jabłka. Dintwa [2008] przeprowadził badania polegające na pomiarach powierzchni stłuczenia jabłek przy uderzeniu jabłek o nieodkształcalną płytę. Bardzo interesujące podejście do modelowania materiału biologicznego za pomocą metody elementów skończonych zaprezentował w swojej pracy Wu i Pitts [1999]. Punktem wyjścia było założenie, że właściwości wytrzymałościowe tkanki roślinnej zależą od właściwości i budowy pojedynczych komórek. Badania modelowe oparte o MES opisane są w pracy Stopy [2011] i dotyczą zapisu nacisków powierzchniowych korzeni marchwi.

Próba ściskania odgrywa bardzo ważną rolę przy wyznaczaniu podstawowych właściwości wytrzymałościowych materiałów biologicznych takich jak moduł sprężystości oraz stała Poissona [Gołacki 1994,], chociaż jej stosowanie z teoretycznego punktu widzenia stwarza poważne kłopoty. Wyniki uzyskane w próbie ściskania obarczone są błędami wynikającymi z tarcia, jakie powstaje w strefie styku badanej próbki z elementami urządzenia obciążającego [Dyląg i in. 2003].

Budowa modelu dyskretnego walcowej próbki materiału biologicznego poddanej próbie ściskania może posłużyć do optymalizacji parametrów próby przy wyznaczaniu właściwości wytrzymałościowych.

Cel badań

Celem badań było przeprowadzenia analizy numerycznej walcowej próbki bulwy ziemniaka poddanej osiowemu ściskaniu w warunkach obciążenia statycznego z uwzględnieniem tarcia pomiędzy powierzchnią próbki i elementem roboczym maszyny wytrzymałościowej.

Osiągnięcie celu badań wymagało przeprowadzenia badań w dwóch etapach:

1. Etap I obejmował badania eksperymentalne:
 - wyznaczenie stałej Poissona i modułu sprężystości podłużnej,
 - wyznaczenie przemieszczenia próbki w funkcji obciążenia.
2. Etap II obejmował badania numeryczne:
 - budowę dyskretnego, trójwymiarowego (3D) modelu próbki z uwzględnieniem właściwości tkanki roślinnej oraz przeprowadzenie jego weryfikacji w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych,
 - wyznaczenie warstwic przemieszczeń dla modelu dyskretnego,
 - wyznaczenie wpływu tarcia pomiędzy próbką bulwy ziemniaka i elementem roboczym maszyny wytrzymałościowej na warstwice przemieszczeń.

Metodyka i przedmiot badań

Przedmiotem badań była walcowa próbka pobrana z bulwy ziemniaka odmiany Gracja produkowanego dla odbiorcy McCaine, pochodzącego z plantacji firmy Agro-Tak Zagrodno. Do badań przeznaczono zdrowe bulwy o zbliżonych wymiarach. Próbki o średnicy

$\Phi=20$ mm i długości $l=40$ mm wycięto przy użyciu specjalnie przygotowanego przyrządu, zapewniającego jednakowy przekrój na całej długości próbki oraz zachowanie prostopadłości powierzchni bocznych w stosunku do osi próbki.

Obciążenie wymuszane było przy zastosowaniu maszyny wytrzymałościowej INSTRON 5566 z zastosowaniem głowicy o zakresie pomiarowym 1 kN. Prędkość przesuwu głowicy wynosiła $1,67 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. W trakcie pomiarów rejestrowano następujące wielkości:

- odkształcenie w kierunku poprzecznym ε_x i wzdłużnym ε_y środkowej strefy próbki przy zastosowaniu wideoekstensometru,
- przemieszczenie głowicy pomiarowej Δu_y i obciążenie próbki ΔF bezpośrednio ze wskazań programu Bluehill 2 obsługującego maszynę wytrzymałościową.

Wartości odkształceń ε_x i ε_y stanowiły podstawę do wyznaczenia podstawowych właściwości wytrzymałościowych (moduł sprężystości, stała Poissona) materiału z jakiego zbudowane były próbki, niezbędnych do budowy modelu dyskretnego ściskanej próbki, natomiast wartości uzyskane ze wskazań programu Bluehill 2 posłużyły do weryfikacji prawidłowej budowy modelu. Analizę numeryczną przeprowadzono przy użyciu programu obliczeniowego ABAQUS.

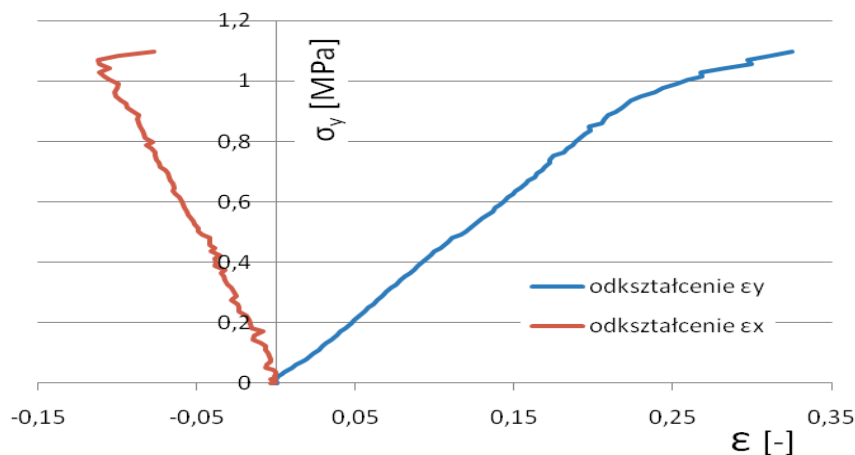
Przy budowie modelu dyskretnego przyjęto założenia uwzględniające właściwości tkanki roślinnej z których najważniejsze to: nieliniowość materiałowa, anizotropia właściwości wytrzymałościowych, duże odkształcenia. Uwzględniono również naprężenia kontaktowe oraz tarcie w strefie styku.

Wyniki i analiza badań

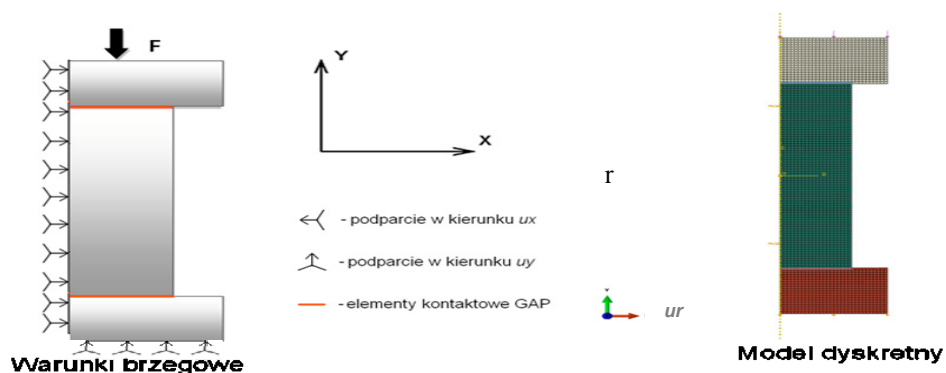
Zastosowanie wideoekstensometru do pomiarów przemieszczenia środkowej strefy ściskanej próbki pobranej z bulwy ziemniaka pozwoliły na wyznaczenie zależności naprężenia σ_y od odkształcenia ε_x i ε_y (rys. 1). Na ich podstawie obliczono wartości modułu sprężystości i stałej Poissona.

Po wykonaniu serii pomiarów składającej się z 10 powtórzeń oraz przeprowadzeniu analizy statystycznej przyjęto do budowy modelu geometrycznego następujące wielkości: stała Poissona $\nu=0,42$, moduł sprężystości materiału próbki $E=4,2$ MPa, współczynnik tarcia próbki o powierzchnię elementu obciążającego $\mu=0,04$.

Pierwszym etapem prac związanych z budową modelu dyskretnego ściskanej próbki bulwy ziemniaka było wykonanie modelu geometrycznego. Z uwagi na symetrię próbki zdecydowano się na przyjęcie biegunowego układu współrzędnych, co w praktyce oznaczało dwuwymiarowy stan odkształcenia (ε_y i ε_r). Integralną częścią modelu geometrycznego były modele elementów obciążających, z których element obciążający dolny (podpora) był nieruchomy, a element obciążający górny (stempel) mógł przemieszczać się w kierunku działania siły (rys. 2). Element obciążający górny i dolny wykonano ze stali o następujących właściwościach: moduł sprężystości $E=2,1E5$ MPa i ułamek Poissona $\nu=0,3$. Z uwagi na kształt próbki oraz elementów obciążających do budowy modelu dyskretnego zastosowano elementy skończone izoparametryczne, kołowsymetryczne o ośmiu węzłach.

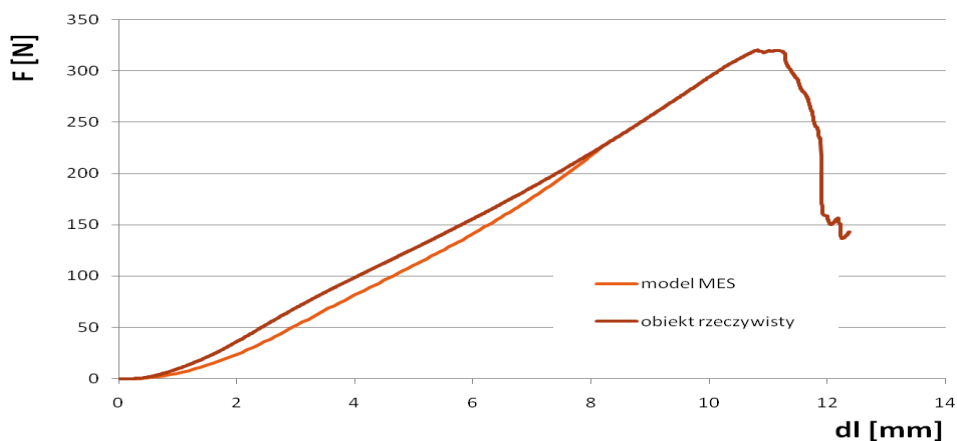


Rys. 1. Odkształcenie ϵ_x i ϵ_y walcowej próbki bulwy ziemniaka w funkcji obciążenia
 Fig. 1. Deformation ϵ_x and ϵ_y of a cylindrical potato tuber sample in the load function



Rys. 2. Warunki brzegowe oraz model dyskretny próbki poddanej ścisnaniu osiowemu
 Fig. 2. Boundary conditions and a model of a discrete sample under an axial compression

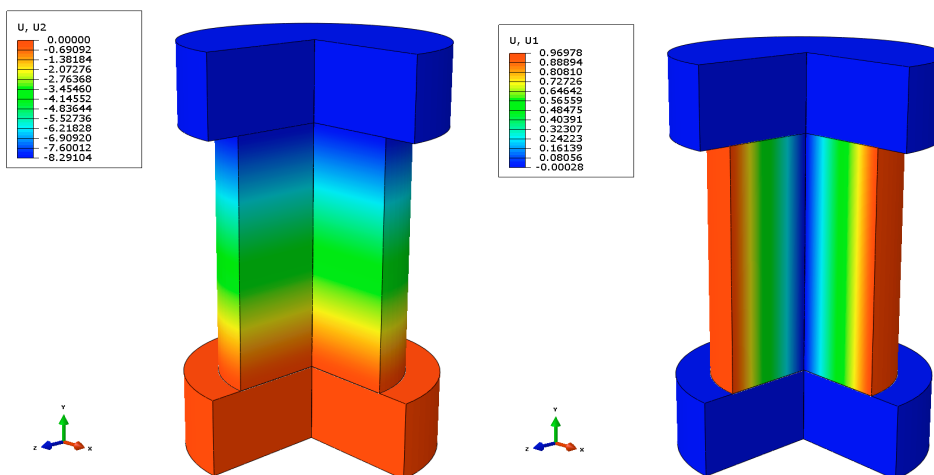
Weryfikację modelu przeprowadzono w oparciu o wykres obciążenia w funkcji przemieszczenia górnego elementu obciążającego (rys. 3). Dla obiektu rzeczywistego wykres otrzymano bezpośrednio korzystając z programu BlueHill, natomiast w przypadku modelu dyskretnego wyznaczono przemieszczenie wybranego węzła leżącego na powierzchni styku modelu stempla i próbki. Weryfikacja wykazała dobrą zgodność przebiegu ścisnienia próbki w przypadku obiektu rzeczywistego i modelu dyskretnego. Wartości wyznaczone dla modelu MES były nieznacznie niższe od wartości rzeczywistych (średnio o ok. 7%).



Rys. 3. Weryfikacja modelu dyskretnego
 Fig. 3. Verification of the discrete model

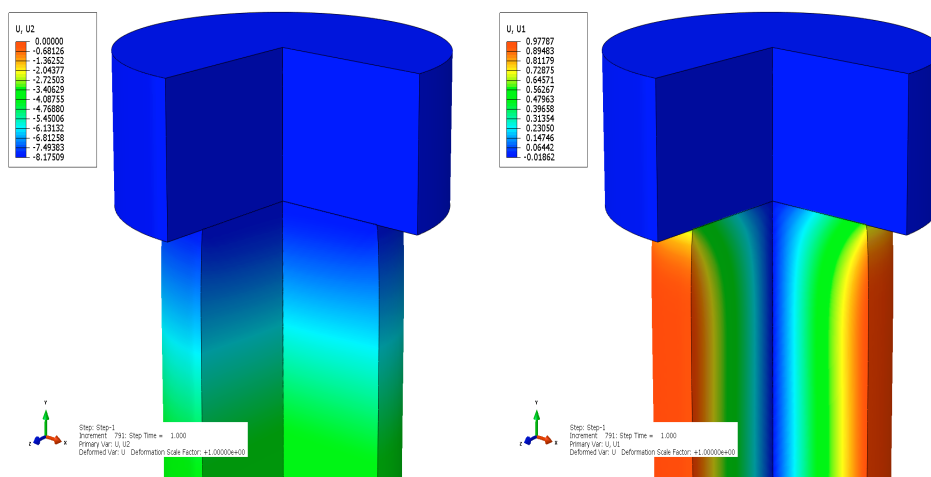
Analiza modelu MES

Przeszyczenia u_y i u_r dla modelu próbki przy obciążeniu $F=300$ N bez uwzględnienia tarcia pomiędzy próbką i powierzchniami elementów obciążających zostały przedstawione na rys. 4. Przeszyczenia u_y posiadają jednakowe wartości w płaszczyznach prostopadłych do osi próbki na całej długości, natomiast jednakowe wartości przeszczeń u_r rozłożone są na płaszczyznach koncentrycznie rozłożonych względem osi próbki.

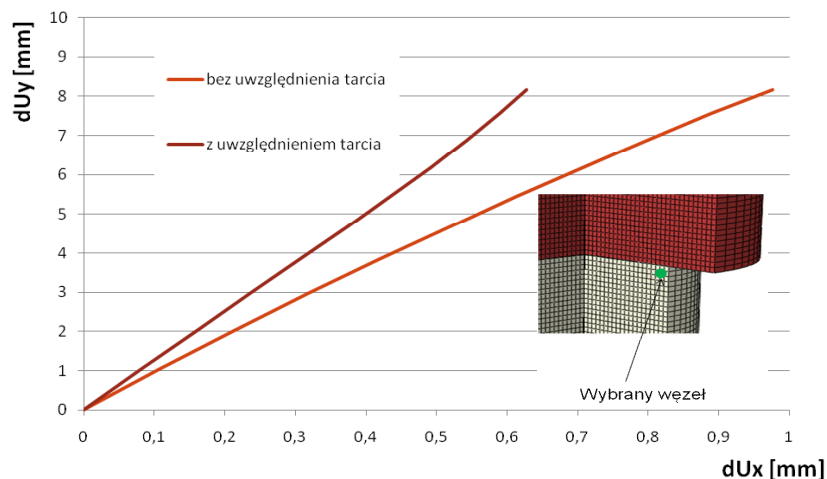


Rys. 4. Warstwice przeszczeń u_x i u_y bez uwzględnienia tarcia
 Fig. 4. Displacements contours u_x and u_y without considering friction

Uwzględnienie sił tarcia pojawiających się stycznie do powierzchni styku próbki z elementami roboczymi urządzenia obciążającego (rys. 5) powoduje wyraźne zaburzenie zarówno kształtu zdeformowanej próbki jak i rozkładu przemieszczeń u_y i u_r . Przy założonym współczynniku tarcia $\mu=0,4$ i maksymalnym obciążeniu ($F=300N$) zaburzenie to jest obserwowane na ok. 20% długości początkowej próbki przy każdej z podpór.



Rys. 5. Warstwy przemieszczeń u_x i u_r z uwzględnieniem tarcia
 Fig. 5. Displacements contours u_x and u_r including friction



Rys. 6. Wykres przemieszczeń u_y w funkcji u_x z i bez uwzględnienia tarcia
 Fig. 6. Graph of displacements u_y in the function u_x with and without considering the friction

Największa różnica wartości przemieszczenia promieniowego dla węzła położonego na zewnętrznej powierzchni modelu dyskretnego próbki w okolicach styku z elementem obciążającym (rys. 6) jest istotna i wynosi 0,4 mm co stanowi prawie 40% całego przemieszczenia u_r .

Wnioski

1. Przy wyznaczaniu właściwości wytrzymałościowych produktów pochodzenia biologicznego w próbie ściskania należy uwzględnić tarcie występujące w strefie styku próbki z elementem obciążającym i dokonać starań zmierzających do obniżenia współczynnika tarcia.
2. Próbka materiału pochodzenia biologicznego przeznaczona do wyznaczania właściwości wytrzymałościowych powinna mieć długość pozwalającą na wyeliminowanie wpływu zaburzeń pochodzących od podpory, a baza pomiarowa powinna być położona w okolicach środka próbki.
3. Przedstawiony model MES może służyć do wyznaczania podstawowych właściwości wytrzymałościowych materiału biologicznego na podstawie zależności obciążenia od przemieszczenia ruchomego elementu obciążającego.

Bibliografia

- Dintwa E., Van Zeebroeck M., Ramon H., Tijssens E.** 2008. Finite element analysis of the dynamic collision of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology* 49. s. 260-276.
- Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z.** 2003. Wytrzymałość materiałów. WNT. Warszawa.
- Gołacki K.** 1994. Usage of criterion of strain failure in case of carrot roots *Int. Agrophysics*. 8. s. 497-499.
- Lewis R., Yoxall A., Marshall M.B., Canty L.A.** 2008. Characterizing pressure and bruising in apple fruit. Department of Mechanical Engineering, The University of Sheffield, Mappin Street, Sheffield S1 3JD, United Kingdom. *Wear*. 264 s. 37-46.
- Lu R., Abbott J.A.** 1997. Finite element modeling of transient responses of apples to impulse excitation. *Trans. ASAE* 40(5). s. 395-1409.
- Stopa R.** 2010. Modelowanie deformacji korzenia marchwi w warunkach obciążeń skupionych metodą elementów skończonych. Monografie XCIII. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. ISSN 1898-1151.
- Wu N., Pitts M.J.** 1999. Development and validation of a finite element model of an apple fruit cell. *Postharvest Biology and Technology* 16. s. 1-8.

MODELLING DISPLACEMENTS DISTRIBUTIONS OF A CYLINDER SAMPLE OF A POTATO TUBER AT AN AXIAL LOAD USING A FINE ELEMENTS METHOD

Abstract. The measurements results of the cylinder sample of a potato tuber subjected to an axial compression were presented. Basic strength properties of the sample material were determined and a discrete model of the axial compression process of the sample was formed. The model was verified and a displacement contour line was determined including friction between the sample's surface and the loading element. Good compliance of the experimental results and the results obtained on the basis of the FEM. The research proved that the influence of friction on the value of the obtained results has a considerable meaning not only in the contact zone of the sample with working elements of a loading device.

Key words: Fine Elements Method, potato tuber, displacements

Adres do korespondencji:

Roman Stopa; e-mail: roman.stopa@up.wroc.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
ul. Chelmońskiego 37/41
51-630 Wrocław