

## **BADANIA ELASTOOPTYCZNYCH MODELI PRZEKROJU POPRZECZNEGO KORZENI MARCHWI O RÓŻNYCH WŁASNOŚCIACH WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH WARSTWY KORY I RDZENIA**

Roman Stopa, Leszek Romański

*Instytut Inżynierii Rolniczej, Akademia Rolnicza we Wrocławiu*

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki elastoptycznych badań dwuwarstwowego, płaskiego modelu przekroju poprzecznego korzenia marchwi wykonanego z elastomeru poliuretanowego. Pomiary wykonano w próbie promieniowego ściskania, przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Instron oraz polaryskopu elastoptycznego. Wyznaczono charakterystyczne obrazy izochrom dla różnych własności wytrzymałościowych warstwy rdzenia i kory

**Słowa kluczowe:** elastoptyka, korzeń marchwi, ściskanie, izochromy

### **Wstęp**

Badania modelowe obiektów rzeczywistych są jednym ze ważniejszych sposobów poznania wzajemnego oddziaływania elementów struktury wewnętrznej materiału roślinnego. Oprócz modeli matematycznych o różnym stopniu złożoności formuł coraz częściej budowane są modele fizyczne oparte o prawa podobieństwa modelowego. Spośród wielu metod badawczych na szczególną uwagę zasługuje metoda elastoptyczna, pozwalająca na ciągłą obserwację procesów zachodzących w badanym obiekcie w miarę zmian warunków obciążenia [Jakubowicz, Orłoś 1997].

W odniesieniu do materiału pochodzenia biologicznego metoda elastoptyczna nie jest zbyt często stosowana ze względu na trudności w odpowiednim doborze materiałów modelowych. Modele najczęściej były wykonywane z żywicy epoksydowej głównie ze względu na dobre własności optyczne i łatwość obróbki mechanicznej. Takie modele dobrze sprawdzały się w odniesieniu do materiałów o stosunkowo wysokich modułach Younga takich jak ziarna pszenicy czy nasiona bobiku. W pracy [Arnold, Roberts 1966] autorzy analizowali naprężenia stykowe jednowarstwowego modelu ziarna pszenicy przy kontakcie z płaską powierzchnią. Podobne badania prowadzone były w odniesieniu do modeli nasion bobiku [Stopa, Romański 2002] oraz ziarna pszenicy [Stopa, Romański 2001]. Analiza zachowania się dwuwarstwowego modelu korzenia marchwi wykonanego z żywicy epoksydowej została przedstawiona przez autora niniejszego opracowania w pracy [Stopa 2002]. Ze względu na dużą różnicę we własnościach wytrzymałościowych zastosowanego materiału modelowego i obiektu rzeczywistego wyniki badań nie w pełni odzwierciedlały zachodzące w nim zjawiska.

Pojawienie się możliwości wykonania modeli z elastomeru poliuretanowego pozwalającego na lepsze odzwierciedlenie obiektu rzeczywistego może dostarczyć nowych informacji o badanym obiekcie.

## Cel badań

Celem badań było:

1. Wyznaczenie charakterystycznych obrazów izochrom w modelach korzeni marchwi dla jednakowych własności wytrzymałościowych warstwy kory i rdzenia (współczynnik  $E_k / E_r = 1$ )
2. Określenie wpływu kształtu przekroju poprzecznego na obraz izochrom z punktu widzenia własności wytrzymałościowych kory i rdzenia.
3. Określenie wpływu zmiany własności wytrzymałościowych warstwy kory i rdzenia na obrazy izochrom modeli przekroju poprzecznego korzenia marchwi (współczynnik  $E_k / E_r = 0,5-2,0$ )

## Metodyka i przedmiot badań

Podstawowym celem budowy modelu było poznanie wpływu własności wytrzymałościowych poszczególnych warstw przekroju poprzecznego korzenia marchwi na obraz izochrom w warstwie kory i rdzenia.

Przyjęto następujące założenia dotyczące budowy modelu:

- kształt modelu w postaci plastra wycięto z korzenia marchwi dwiema równoległymi płaszczyznami odległymi od siebie o wartość  $dz = 13$  mm, prostopadłymi do osi podłużnej,
- dwuwarstwowy model przekroju poprzecznego korzenia marchwi złożony z warstwy kory i rdzenia
- wymiary warstwy rdzenia i kory określono na podstawie obiektów rzeczywistych. Skala wymiarów liniowych wynosiła  $k_l = 2$ ,
- własności materiałów modelowych dobrano w taki sposób, aby wartość stosunku modułów sprężystości kory i rdzenia uzyskać w stopniu zbliżonym do obiektów rzeczywistych,
- wartości odkształceń modelu były zbliżone do odkształceń obiektu rzeczywistego (maksymalnie do 4 mm),
- pominięto niejednorodność i anizotropię własności obiektu modelowanego
- płaski stan naprężenia

Po analizie dostępnych materiałów modelowych, zdecydowano się na wykonanie modelu z elastomeru poliuretanowego, który z jednej strony spełniał wszystkie założenia dotyczące budowy modelu, a jednocześnie wykazywał efekt dwójłomności wymuszonej, niezbędny w badaniach elastoptycznych.

Na podstawie uśrednionych wymiarów przekroju poprzecznego rzeczywistych korzeni przyjęto wymiar średnicy zewnętrznej modelu  $D_z = 100$  mm, natomiast średnicy rdzenia  $D_r = 53$  mm. Przyjęcie grubości modelu wynoszącego  $dz = 13$  mm zapewniało zarówno zachowanie płaskiego stanu naprężenia jak i wystarczającą czułość optyczną.

Założono następujące własności wytrzymałościowe materiałów modelowych: moduł Younga kory i moduł Younga rdzenia  $E_k = E_r = 2,24; 3,38; 4,48$  MPa

Do badań wybrano następujące kształty przekroju poprzecznego korzeni marchwi: uproszczony – kołowy kształt rdzenia i zewnętrznej warstwy kory, oraz gwiaździsty [Kołota 1994].

Stanowisko pomiarowe do przeprowadzania badań składało się z liniowego polaryskopu elastooptycznego wyposażonego w połowę źródła światła umieszczonego w przestrzeni pomiarowej maszyny wytrzymałościowej Instron 5566. Opisane zostało ono w pracy [Stopa, Romański 2002a]. Model obciążono w taki sposób, aby kierunek działania siły był prostopadły do osi optycznej polaryskopu.

W trakcie badań rejestrowano obrazy izochrom połówkowych i całkowitych w części korowej i rdzeniowej korzenia w całkowitej ciemni za pomocą aparatu cyfrowego. Pomiaru wykonywano dla różnych wartości obciążeń w przedziale od 0 do 50 N w stałych odstępach czasu. Zapewniało to wyeliminowanie wpływu zjawiska relaksacji naprężeń na rozkład izochrom.

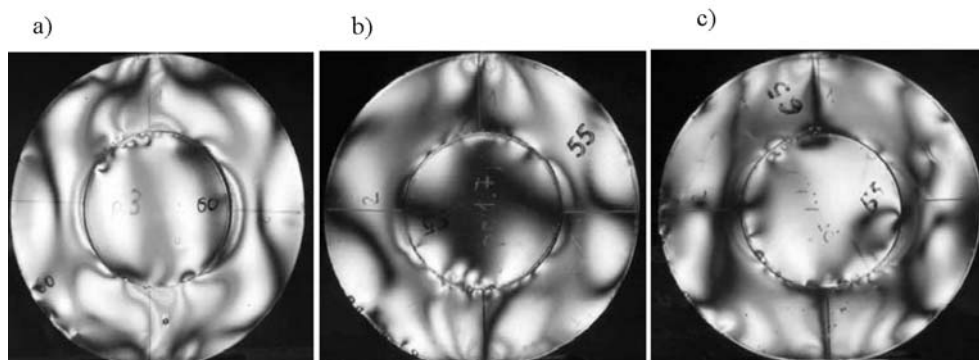
## Wyniki badań i ich analiza

Własności wytrzymałościowe warstwy kory i rdzenia mają bardzo istotny wpływ na zachowanie się rzeczywistych korzeni marchwi pod wpływem obciążenia. Korzenie o wysokich własnościach wytrzymałościowych, wynikających najczęściej z budowy ścian komórkowych, ulegają niewielkim odkształceniom pod wpływem obciążeń zewnętrznych. Komórki w mniejszym stopniu ulegają zniszczeniu, a więc powstaje mniej obszarów, od których mogłyby się rozpoczynać procesy gnilne.

Przedstawione powyżej przesłanki były przyczyną podziału prac modelowych w aspekcie wpływu własności wytrzymałościowych na obraz izochrom na dwa etapy. W pierwszym z nich założono, że własności rdzenia i kory są takie same. Badaniom poddano modele elastooptyczne dwóch, różniących się w istotny sposób kształtów przekroju poprzecznego (okrągły i gwiaździsty) o trzech różnych własnościach wytrzymałościowych. Moduł Younga warstwy kory i rdzenia wynosił dla poszczególnych modeli odpowiednio:  $E_{k1} = E_{r1} = 2,24$  MPa,  $E_{k2} = E_{r2} = 3,48$  MPa,  $E_{k3} = E_{r3} = 4,48$  MPa

W drugim etapie badań pozostawiono tylko kształt okrągły przekroju poprzecznego (kształt okrągły), dla którego zmieniano własności wytrzymałościowe poszczególnych warstw.

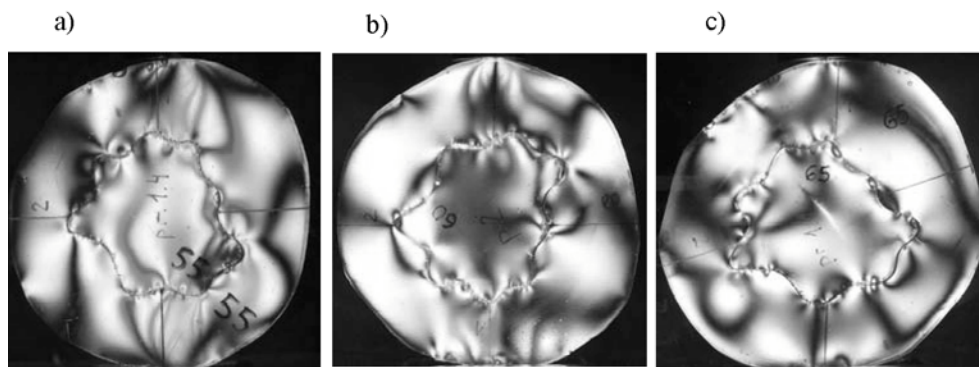
Na rysunku 1 przedstawiono obrazy izochrom całkowitych otrzymane dla modeli elastooptycznych korzenia marchwi o kształcie okrągłym, przy założeniu jednakowych własności wytrzymałościowych warstwy rdzenia i kory. Wartość obciążenia wynosiła  $F = 5$  N. Dla modelu o najniższym module Younga ( $E_{k1} = E_{r1} = 2,24$  MPa, rys. 1a) widać wyraźne oddziaływanie kory na rdzeń. W warstwie kory występuje złożony stan naprężenia, w którym można wyróżnić strefy ściskania i rozciągania, a także zginania. Izochromy narastają w miejscu styku kory z elementem obciążającym oraz w miejscu styku kory z rdzeniem. Natomiast w rdzeniu panuje stan jednoosiowego ściskania. Maksymalne rzędy izochrom w warstwie kory to  $m = 6$ , a w rdzeniu  $m = 1,5$ . Towarzyszy temu wyraźne ugięcie modelu. W tym przypadku trudno mówić o lokalnym oddziaływaniu obciążenia zewnętrznego.



Rys. 1. Obrazy izochrom dla modelu o kształcie kołowym przy  $F=5N$ : a)  $E_{k1}=E_{r1}=2,24$  MPa, b)  $E_{k2}=E_{r2}=3,48$  MPa, c)  $E_{k3}=E_{r3}=4,48$  MPa

Fig. 1. Images of isochromatic lines for circular model at  $F=5N$ : a)  $E_{k1}=E_{r1}=2.24$  MPa, b)  $E_{k2}=E_{r2}=3.48$  MPa, c)  $E_{k3}=E_{r3}=4.48$  MPa

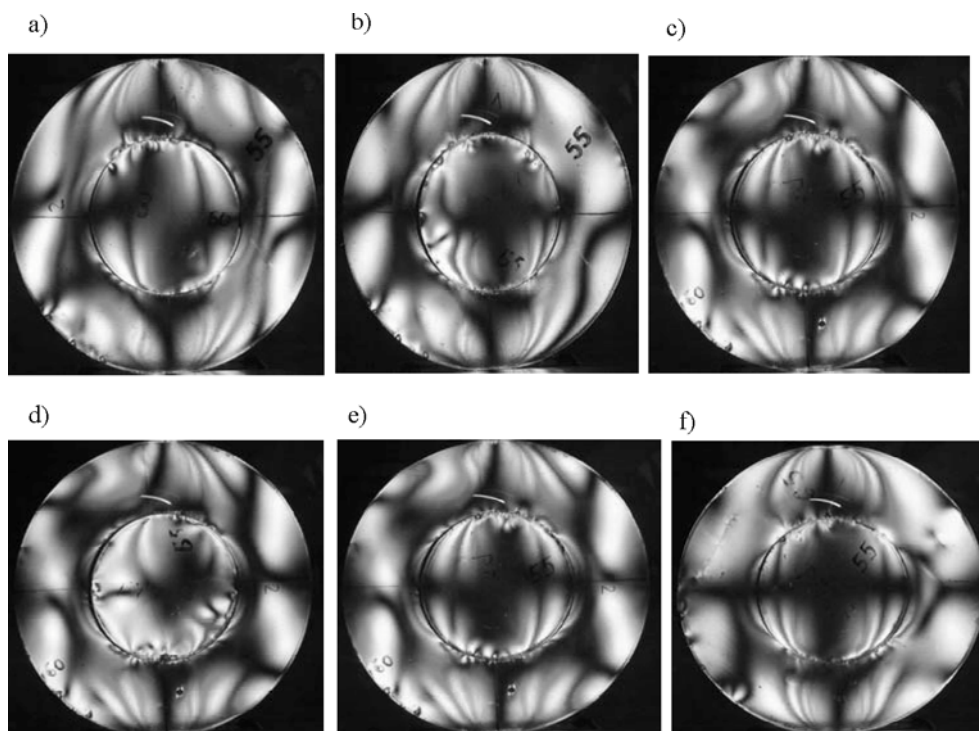
W przypadku większej sztywności modelu ( $E_{k2}=E_{r2}=3,48$  MPa, rys 1b) obraz izochrom w warstwie kory ulega zmianie. Izochromy narastają tylko w punkcie styku kory z elementem obciążającym, a maksymalny rząd izochromy wynosi  $m=4$ . W rdzeniu widoczne są już tylko izochromy resztkowe ( $m=0,5$ ) co świadczy o niewielkim oddziaływaniu kory na rdzeń. Ugięcie modelu jest wyraźnie mniejsze. Przy największej sztywności ( $E_{k3}=E_{r3}=4,48$  MPa, rys.1c) praktycznie całe obciążenie przenoszone jest przez warstwę kory.



Rys. 2. Obrazy izochrom dla modelu o kształcie gwieżdzistym przy  $F=5N$ : a)  $E_{k1}=E_{r1}=2,24$  MPa, b)  $E_{k2}=E_{r2}=3,48$  MPa, c)  $E_{k3}=E_{r3}=4,48$  MPa

Fig. 2. Images of isochromatic lines for star shaped model at  $F=5N$ : a)  $E_{k1}=E_{r1}=2.24$  MPa, b)  $E_{k2}=E_{r2}=3.48$  MPa, c)  $E_{k3}=E_{r3}=4.48$  MPa

Dla gwiazdźistego kształtu przekroju poprzecznego (rys. 2) wpływ własności wytrzymałościowych na obraz izochrom jest zbliżony do tego, jaki miał miejsce w przypadku kształtu okrągłego. W przypadku modelu o najniższym module Younga ( $E_k = E_r = 2,24$  MPa, rys. 2a) obciążenie przenoszone jest w dużym stopniu przez rdzeń modelu. Ze względu na kształt połączenia rdzenia z korą powierzchnia przekroju poprzecznego podzielona jest w wyraźny sposób na dwa obszary. Pierwszy z nich położony, w okolicach osi pionowej modelu przenosi prawie całe obciążenie zewnętrzne, Natomiast pozostałe fragmenty zarówno kory jak i rdzenia praktycznie są nieobciążone. Przy większej sztywności modelu ( $E_k = E_r = 3,48$  MPa, rys. 2b) obciążenie zewnętrzne działa lokalnie tylko na warstwę kory. W rdzeniu pojawiają się lokalne spiętrzenia naprężeń wynikające z jego kształtu. Dalsze zwiększenie modułu Younga ( $E_k = E_r = 4,48$  MPa, rys. 2c) powoduje powstanie izochrom o rzędach ułamkowych jedynie w okolicach styku modelu z elementem obciążającym oraz izochrom szcztąkowych na granicy rdzenia i kory.



Rys. 3. Obrazy izochrom dla modelu kołowego dla różnych własności wytrzymałościowych rdzenia i kory przy  $F=15$  N: a)  $E_k=2,24$  MPa,  $E_r=4,48$  MPa; b)  $E_k=2,24$  MPa,  $E_r=3,48$  MPa; c)  $E_k=3,48$  MPa,  $E_r=2,24$  MPa d)  $E_k=3,48$  MPa,  $E_r=4,48$  MPa, e)  $E_k=4,48$  MPa,  $E_r=3,48$  MPa, f)  $E_k=4,48$  MPa,  $E_r=2,24$  MPa

Fig. 3. Images of isochromatic lines for circular model for different strength properties of core and bark at  $F=15$  N: a)  $E_k=2.24$  MPa,  $E_r=4.48$  MPa; b)  $E_k=2.24$  MPa,  $E_r=3.48$  MPa; c)  $E_k=3.48$  MPa,  $E_r=2.24$  MPa d)  $E_k=3.48$  MPa,  $E_r=4.48$  MPa, e)  $E_k=4.48$  MPa,  $E_r=3.48$  MPa, f)  $E_k=4.48$  MPa,  $E_r=2.24$  MPa

Zakładając, że wzrost naprężeń w określonych strefach przekroju poprzecznego powoduje większe prawdopodobieństwo zniszczenia tkanki, należy stwierdzić, że bardziej odporne na działanie obciążenia są korzenie o wyższych własnościach naprężeń krytycznych. Ponadto połączenie kształtowe rdzenia z warstwą kory (kształt gwiazdasty) powoduje zawężenie strefy występowania naprężeń oraz pojawienie się miejsc koncentracji naprężeń. Może to spowodować lokalne przekroczenie wartości dopuszczalnych bardzo niebezpiecznych ze względu na możliwość rozpoczęcia procesów gnilnych.

Na rysunku 3 przedstawiono obrazy izochrom dla modeli korzeni marchwi o przekroju okrągłym dla różnych kombinacji własności wytrzymałościowych warstwy kory i rdzenia. W przypadku niskich wartości modułu Younga kory,  $E_k=2,24$  MPa (rys. 3a i 3b), obraz izochrom nie zależy w istotny sposób od własności rdzenia. Izochromy są silnie zagęszczone wzdłuż osi pionowej modelu głównie w warstwie kory. W obu przypadkach maksymalny rząd izochromy wynosi  $m=9$ . Jedyna różnica pojawia się w obrazie izochrom w rdzeniu. Dla rdzenia o niższych własnościach wytrzymałościowych występuje nieco wyższy rząd izochromy przy niezmiennym układzie prążków

Inaczej wygląda obraz izochrom w przypadku modelu o module Younga warstwy kory wynoszącym  $E_k=4,48$  MPa (rys. 3e i 3f). Można powiedzieć, że rdzeń o niskich własnościach wytrzymałościowych nie odgrywa znaczącej roli w przenoszeniu obciążenia. Zwiększenie sztywności rdzenia powoduje lepsze rozłożenie obciążenia na poszczególne elementy składowe modelu. Koncentracja naprężeń w tym przypadku jest wyraźnie mniejsza.

## Wnioski

1. Przy jednakowych własnościach wytrzymałościowych warstwy kory i rdzenia dla wartości modułów Younga  $E_{k1}=E_{r1}=2,24$  MPa, występuje dwukierunkowe, niesymetryczne ściskanie warstwy kory wzdłuż osi pionowej modelu. Zwiększenie modułu Younga w badanym zakresie obciążeń ( $E_{k2}=E_{r2}=3,48$  MPa,  $E_{k3}=E_{r3}=4,48$  MPa) powoduje zwiększenie asymetrii rozkładu naprężeń ścisających aż do ściskania jednokierunkowego.
2. Z punktu widzenia własności wytrzymałościowych kształt przekroju poprzecznego nie ma istotnego wpływu na sposób przenoszenia obciążenia przez korzeń marchwi.
3. W przypadku modeli o jednakowych własnościach wytrzymałościowych warstwy kory przy obciążeniu  $F=15$ N, położenie stref naprężeń ścisających i zginających oraz miejsc koncentracji naprężeń zależy w istotny sposób od własności rdzenia.

## Bibliografia

- Arnold P., Roberts A. 1966. Stress distribution in loaded wheat grains, J. Agric. Enging. Res.2. s. 39-43.
- Jakubowicz A., Orłóś Z. 1997. Wytrzymałość materiałów. WNT Warszawa. ISBN 83-204-2029-6
- Romański L., Stopa R. 2001. Zastosowanie metody elastoptycznej do badania procesu zgniatania ziarna pszenicy, Problemy Inżynierii Rolniczej Nr 3, s. 21-28.
- Stopa R. 2002. Elastoptyczne badania dwuwarstwowego modelu korzenia marchwi w próbie ściskania promieniowego, Inżynieria Rolnicza 5(38), s. 172-178.
- Stopa R., Romański L. 2002. Analiza zmian mikrostruktury nasiona bobiku w procesie zgniatania pomiędzy równoległymi płytami, Problemy Inżynierii Rolniczej 38/4. s.56-63.

## **TESTS OF ELASTOOPTIC MODELS OF CARROT ROOT CROSS-SECTION WITH DIFFERENT STRENGTH PROPERTIES OF BARK AND CORE LAYER**

**Summary.** The paper presents the results of elastooptic tests of two-layer, flat cross-section model of carrot root made from polyurethane elastomer. Tests were conducted by means of radial compression using testing machine Instron and elastooptic polariscope. Characteristic images of isochromatic lines were set out for different strength properties of core and bark layers

**Key words:** elastooptics, carrot root, compression, isochromatic lines

**Adres do korespondencji:**

Roman Stopa; e-mail: stopa@imr.ar.wroc.pl  
Instytut Inżynierii Rolniczej  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu  
ul. Chelmońskiego 37/42  
51-630 Wrocław