

ZASTOSOWANIE METODY INTERFEROMETRII PLAMKOWEJ DO POMIARU PRZEMIESZCZEŃ PRZEKROJU POPRZECZNEGO KORZENIA MARCHWI

Roman Stopa, Leszek Romański

Streszczenie. W pracy zaprezentowano wyniki badań przemieszczeń przekroju poprzecznego korzenia marchwi za pomocą metody interferometrii plamkowej. Przedstawiono opis stanowiska obciążającego oraz metodykę pomiarów przemieszczeń materiałów pochodzenia biologicznego. Wyznaczono mapy przemieszczeń powierzchni przekroju poprzecznego korzenia marchwi w jego płaszczyźnie oraz w kierunku do niej prostopadłym. Na ich podstawie wykonano wykresy przemieszczeń i odkształceń przekroju poprzecznego w kierunku działania siły

Słowa kluczowe: korzeń marchwi, własności wytrzymałościowe, interferometria plamkowa, przemieszczenie, ESPI

WSTĘP

W okresie szybkiego rozwoju techniki rolniczej dotyczącej zbioru, przechowywania oraz przetwórstwa płodów rolnych dużego znaczenia nabierają prace związane z wyznaczaniem ich własności wytrzymałościowych. Szczególnie odnosi się to do korzeni warzyw, dla których badania własności mechanicznych prowadzone są od niedawna.

Wielu badaczy prowadzi prace zmierzające do połączenia własności mechanicznych materiałów roślinnych z ich budową komórkową. W odniesieniu do buraków cukrowych takie badania podjęła Bzowska-Bakalarz [1998]. Molendowski w swojej pracy [1999] mającej na celu określenie charakterystyki mechanicznej w procesie ściskania kolb kukurydzy zastosował teorię Hertza do opracowania wyników pomiarów. Arnolds i Roberts [1966] wykorzystywali do wyznaczania naprężeń stykowych dla ziarna pszenicy metodę elastooptyczną.

W odniesieniu do korzeni marchwi wyznaczane są zwykle stałe materiałowe dla poszczególnych warstw, z jakich są one zbudowane przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej Instron. Inny kierunek badań to doświadczenia przeprowadzane na całych korzeniach. Otrzymane w ten sposób wyniki trudne są do jednoznacznej interpretacji nie tylko ze względu na anizotropię własności materiału pochodzenia biologicznego, ale również ze względu na warstwową budowę korzeni warzyw.

Gołacki, Szot i Kęsik [1987] badali własności mechaniczne korzeni marchwi w zależności od cech odmianowych, czynników agrotechnicznych i okresu przechowywania. Gołacki i Szot [1987] ustalili, że wartości modułu sprężystości podłużnej E dla kory i rdzenia są zbliżone. Gołacki i Obroślak [1998] wyznaczyli wartości współczynnika Poissona korzeni marchwi przy wykorzystaniu metody opisanej przez Hughesa i Segelinda [1972].

Badania modelowe przy wykorzystaniu metody elastoptycznej oraz analiza maksymalnych wartości naprężeń stykowych dla korzeni marchwi z uwzględnieniem ich warstwowej budowy zostały przedstawione przez autora niniejszego opracowania w pracach [Stopa 2002a, Stopa 2002b].

Wszystkie te badania były zwykle prowadzone przy obciążeniach $F > 50$ N. Jednak w trakcie zbioru, transportu i przechowywania warzyw występują obciążenia o dużo mniejszych wartościach jednostkowych. Ze względu na sposób oddziaływania na powierzchnię korzenia marchwi mogą one powodować poważne uszkodzenia w wyniku lokalnego przekroczenia wartości dopuszczalnych. Tradycyjne metody badawcze nie pozwalają na uzyskanie wiarygodnych wyników w zakresie małych przyrostów obciążenia ($\Delta F = 1$ N), często mniejszych od błędu pomiarowego. Tą szansę daje metoda interferometrii plamkowej wspomaganie numerycznie – ESPI.

Celem badań było wyznaczenie przemieszczeń w kierunkach osi x , y i z przekroju poprzecznego korzeni marchwi dla sił występujących w trakcie przechowywania tych korzeni przy zastosowaniu metody interferometrii plamkowej (ESPI) oraz określenie wpływu warstwowej budowy korzenia marchwi na rozkład przemieszczeń w jego przekroju poprzecznym.

MATERIAŁ I METODY

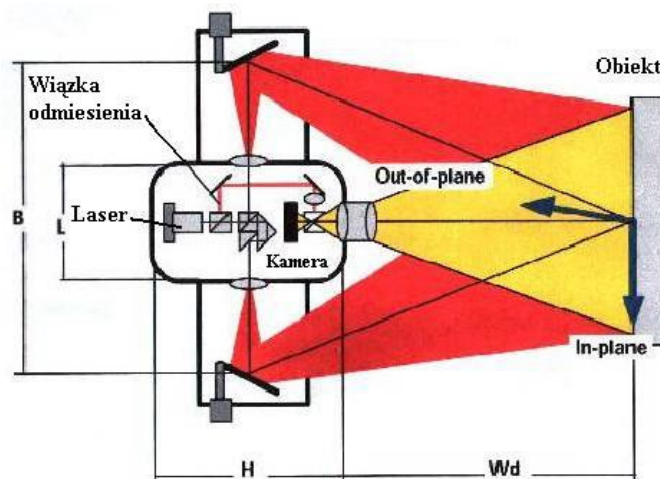
Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych przy zastosowaniu specjalnie zaprojektowanego stanowiska pomiarowego (rys. 1) umożliwiającego wyznaczenie przemieszczeń na powierzchni przekroju poprzecznego korzenia marchwi dla różnych wartości obciążenia oraz dla różnych kształtów powierzchni styku głowicy wymuszającej i powierzchni marchwi.

Ze względu na założone małe przyrosty obciążeń pomiary wykonano metodą interferometrii plamkowej, której czułość zapewniała osiągnięcie wiarygodnych wyników. Dodatkową zaletą tej metody jest bezkontaktowy pomiar na całej powierzchni badanego obiektu. Podstawowym elementem układu było urządzenie do pomiaru przemieszczeń metodą interferometrii plamkowej (3DESPI system). Zbudowane jest ono (rys. 2) ze źródła światła spójnego (dwie diody laserowe o mocy 50 mW) służącego do oświetlenia badanego obiektu oraz układu optycznego służącego do kierowania wiązką światła. Za pomocą układu optycznego wiązka światła uległa wstępnie rozdzieleniu na wiązkę przedmiotową i wiązkę odniesienia, a następnie wiązka przedmiotowa ulega podziałowi na cztery wzajemnie do siebie prostopadłe. Wiązki te po odbiciu od powierzchni luster kierujących je na badany obiekt i rozproszeniu na powierzchni tego obiektu trafiały do obiektywu kamery cyfrowej o dużej rozdzielczości, której oś optyczna była prostopadła do badanej powierzchni.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe do badań przemieszczeń metodą interferometrii plamkowej (ESPI): 1 – ramka, 2 – kamera rejestrująca, 3 – badany materiał, 4 – stół do badań holograficznych, 5 – komputer

Fig. 1. Measuring stand to investigations of carrot root displacement using the method of electronical speckle pattern interferometry (ESPI): 1 – frame, 2 – recording camera, 3 – examined sample, 4 – table to holographic investigations, 5 – computer

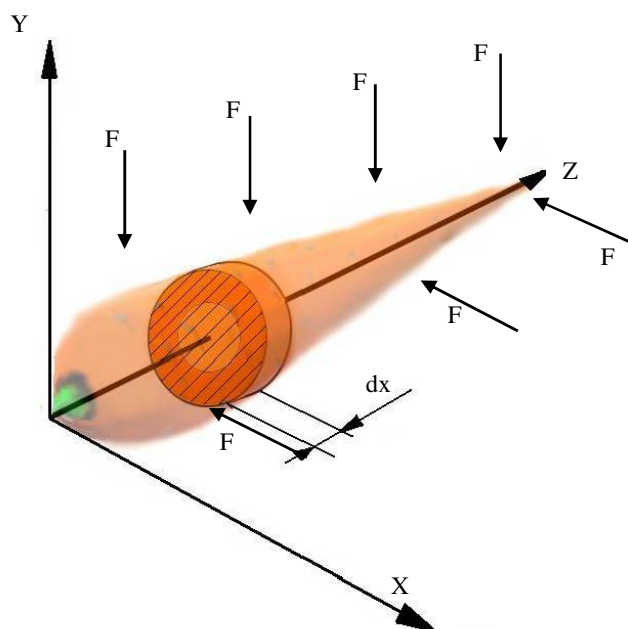


Rys. 2. Schemat układu optycznego głowicy pomiarowej do badań metodą interferometrii plamkowej (ESPI)

Fig. 2. Draft of optical system of measuring head using to the investigations by speckle pattern interferometry method (ESPI)

Głowica pomiarowa zastała sztywno zamocowana do ramki urządzenia wymuszającego obciążenie na specjalnym wysięgniku (rys. 1). Długość wysięgnika związana z odległością obiektywu kamery od badanego obiektu warunkowała dokładność pomiarów. Do pomiarów przemieszczeń przekroju poprzecznego korzenia marchwi przyjęto odległość $W_d = 450$ mm. Urządzenie obciążające zbudowane było ze sztywnej ramki wykonanej z prętów stalowych o przekroju $40 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ oraz związanego z nią układu dwóch szczęk, z których jedna była nieruchoma, a druga miała możliwość przesuwania się w kierunku pionowym (rys. 1). Ze względu na wysoką czułość układu pomiarowego szczęk przesuwana musiała być zabezpieczona przed obrotem oraz przed przenoszeniem drgań układu na badany obiekt. Uzyskano to dzięki systemowi trzech prowadnic ułożonych w górnej poprzeczce ramki za pomocą tulei wykonanych z teflonu. Szczęki wykonano w ten sposób, aby możliwe była zmiana kształtu powierzchni bezpośrednio oddziałującej na badany obiekt.

Układ obciążający wraz z wysięgnikiem oraz zamontowaną na nim głowicą pomiarową umieszczono na stole służącym do badań holograficznych, będącym kolejnym ogniwem w procesie izolacji badanego obiektu przed wpływem zewnętrznych zakłóceń.



Rys. 3. Sposób pobrania próbki do badań
Fig. 3. The method of taking the samples

Obiektem badań był korzenie marchwi odmiany 'Karotan' wyprodukowane w Będkowie w województwie dolnośląskim. Wycięto z nich fragment ograniczony dwiema płaszczyznami prostopadłymi do jego osi podłużnej zgodnie ze schematem przedstawionym na

rysunku 3. W tym celu zbudowano specjalny przyrząd zapewniający zachowanie stałej grubości plastra oraz równoległości jego powierzchni bocznych. Odległość między płaszczyznami wynosiła 15 mm, co stanowiło ok. 5% długości całego korzenia. Do badań pilotażowych próbkę wycięto ze środkowej części korzenia, dbając o to kształt był możliwie najbardziej zbliżony do walca, a powierzchnia boczna była gładka i równa. W celu zabezpieczenia próbki przed jej obrotem w przestrzeni pomiędzy szczękami, fragment powierzchni walcową próbki ukształtowano tak, aby uzyskać styk powierzchniowy z nieruchomą szczęką. Bezpośrednio przed przystąpieniem do pomiarów badaną powierzchnię pokryto cienką warstwą białej matowej farby w celu poprawy efektu optycznego. W trakcie pomiarów wstępnych upewniono się, że wpływ pokrycia badanej powierzchni farbą na wartość przemieszczeń jest mały i można nie brać go pod uwagę.

Przed przystąpieniem do pomiarów przemieszczeń wyznaczono podstawowe własności wytrzymałościowe poszczególnych warstw badanego korzenia marchwi w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach (uwzględniając anizotropię własności). Umowny moduł sprężystości podłużnej E wyznaczono w próbie ściskania walca o średnicy 8 mm przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Instron, natomiast ułamek Poissona metodą Hughesa i Segerlinda [1972], porównując umowne moduły sprężystości uzyskane w próbie ściskania swobodnego i nieswobodnego walca o średnicy 8 mm [Stopa 2003]. Pomiary te przeprowadzono dla próbek wyciętych z tego samego korzenia, co badany obiekt, a także w takich samych warunkach i takim samym czasie, co badania zasadnicze.

Badany obiekt obciążono wstępnie siłą $F = 20$ N, co stanowi ok. 7% obciążenia krytycznego, przy którym następuje jego zniszczenie. Zakładając, że w procesie przechowywania obciążenie jest rozmieszczone równomiernie wzdłuż całej długości korzenia, można przyjąć, iż ciężar ten odpowiada rzeczywistemu obciążeniu całego korzenia wynoszącemu ok. 200 N. Jest, więc to obciążenie, które może występować w dolnych warstwach kopca lub silosu.

Po ustabilizowaniu się obrazu holograficznego zarejestrowano go i następnie zwiększono obciążenie o wartość $\Delta F = 2$ N. Z uwagi na przyjętą metodę badawczą była to maksymalna wartość siły, powyżej której przemieszczenia były zbyt duże. Z drugiej strony jest to siła, która odpowiada ok. 10% obciążenia wstępnego.

Po upływie 30 s koniecznych na stabilizację nowego obrazu plamek dokonano ponownej rejestracji. W wyniku interferencji obu obrazów holograficznych otrzymano układ prążków zamieniony następnie na sygnał cyfrowy, który podlegał dalszemu przetworzeniu za pomocą komputera przy zastosowaniu specjalnego oprogramowania.

Badania prowadzono, stosując pięć różnych kształtów powierzchni styku głowicy wymuszającej i powierzchni marchwi: płaską, walcową o promieniu $R = 28$ mm, walcową o promieniu $R = 18$ mm, płaskownik o grubości $g = 7$ mm i płaskownik o grubości $g = 3$ mm.

W wyniku elektronicznego przetworzenia optycznego obrazu holograficznego otrzymano mapy przemieszczeń w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach: w kierunku osi pionowej Y , w kierunku osi poziomej X oraz w kierunku Z prostopadłym do płaszczyzny badanego przekroju.

WYNIKI BADAŃ

Zestawienie średnich wartości umownych modułów sprężystości podłużnej E oraz współczynników Poissona ν przedstawiono w tabeli 1. Wyznaczenie wartości E i ν oraz przeprowadzenie analizy błędów wykonano zgodnie z metodyką szczegółowo opisaną w pracy Stopy [2002a]. Graniczna wartość całkowitego błędu wyznaczona metodą różniczki zupełnej wynosiła $u_E, u_\nu = 0,0135$.

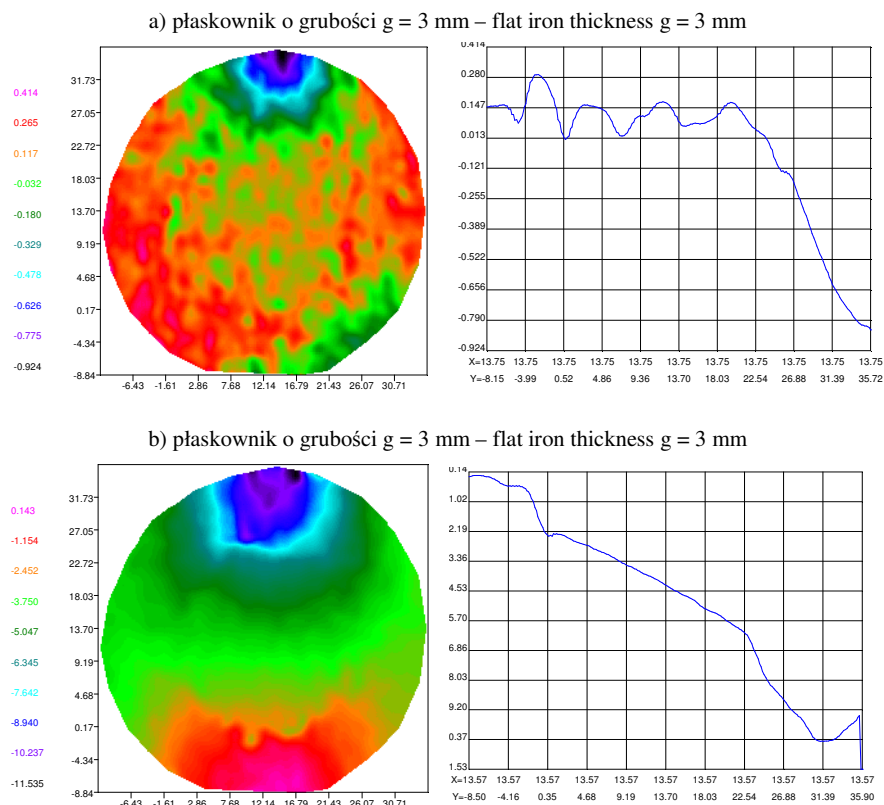
Tabela 1. Średnie wartości umownych modułów sprężystości E [MPa] oraz stałych Poissona, ν [-]: K – warstwa kory, R – warstwa rdzenia, x, y, z – kierunki pobrania próbek
Table 1. Average values of conventional modulus of elasticity E [MPa] and Poisson's stability ν [-]: K – the layer of bark, R – the layer of core, x, y, z – directions of samples taking

	Miejsce i kierunek pobrania próbki Place and direction of samples taking					
	K _x	K _y	K _z	R _x	R _y	R _z
Moduł E , MPa Modulus E	3,705	2,712	3,796	3,499	3,072	3,885
Stała Poissona ν [-] Poisson's ratio ν	0,489	0,493	0,495	0,485	0,494	0,486

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono mapy przemieszczeń przekroju poprzecznego korzenia marchwi w kierunku osi Y oraz wykresy przemieszczeń w kierunku osi pionowej próbki wykonane dla pięciu kształtów powierzchni styku głowicy wymuszającej z powierzchnią próbki. Przedstawione mapy przemieszczeń pozwalają nie tylko na wyznaczenie wartości przemieszczeń w poszczególnych punktach przekroju, ale również na ocenę sposobu oddziaływania głowicy obciążającej na rozkład przemieszczeń przekroju poprzecznego. Każdej barwie pojawiającej się na powierzchni mapy przemieszczeń odpowiada określona, jednakowa wartość przemieszczenia.

Rysunek 4a przedstawia mapę przemieszczeń przy oddziaływaniu płaskownika o grubości $g = 3$ mm na powierzchnię badanej próbki. W miejscu przyłożenia siły przemieszczenia w kierunku osi Y mają wartości maksymalne. Wyraźnie widoczny jest lokalny zakres oddziaływania, którego strefa kończy się w okolicach połączenia rdzenia z korą. Na przeważającej części powierzchni przekroju przemieszczenia są równe zeru. Potwierdza to wykres przemieszczeń wykonany wzdłuż osi pionowej próbki.

Nieco odmienny obraz przemieszczeń na powierzchni badanego przekroju powstaje przy obciążeniu badanej próbki płaskownikiem o grubości $g = 7$ mm. Przemieszczeniu ulega cała powierzchnia przekroju (zerowe przemieszczenia widoczne są jedynie w okolicach dolnej, nieruchomej szczęki). W okolicach poziomej osi symetrii przekroju wartości przemieszczeń mają stałą wartość. W miarę zbliżania się do punktu przyłożenia siły, linie o stałych wartościach przemieszczeń ulegały zakrzywieniu. Wyraźnie widoczne jest oddziaływanie ostrych krawędzi płaskownika zawężających strefę maksymalnych wartości przemieszczeń do bezpośrednich okolic punktu przyłożenia siły. Na wykresie przemieszczeń pojawiają się wyraźne zaburzenia przebiegu wykresu w okolicach połączenia rdzenia z korą.

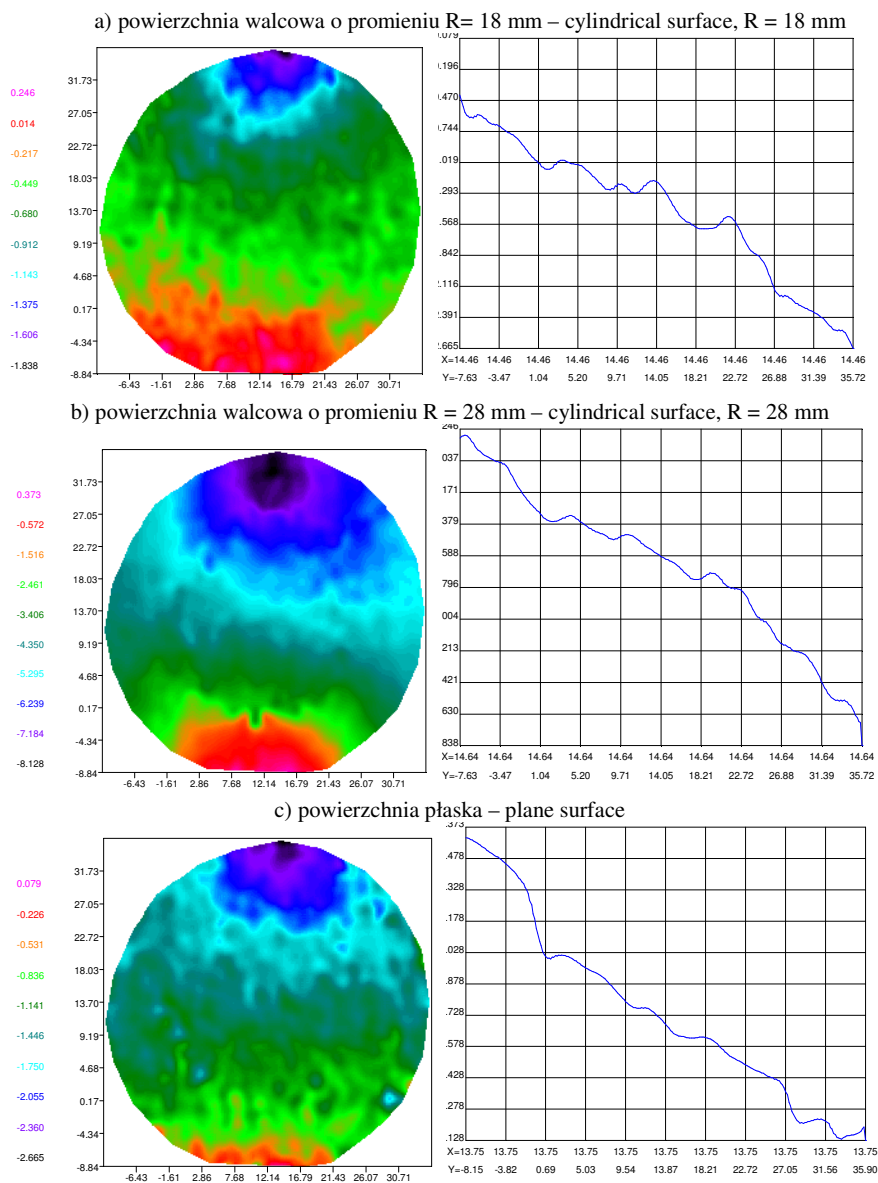


Rys. 4. Mapy przemieszczeń przekroju poprzecznego korzenia marchwi w kierunku osi Y oraz wykresy przemieszczeń w kierunku osi pionowej próbki dla głowicy wymuszającej w kształcie płaskownika

Fig. 4. Displacement's maps of carrot's root cross section in direction of Y axis as well as the graphs of displacement in direction of vertical axis of sample for loaded head in shape of flat iron

Rysunek 5 przedstawia mapy przemieszczeń przekroju poprzecznego korzenia marchwi przy współpracy powierzchni próbki z powierzchniami walcową o promieniach $R = 18$ mm i $R = 28$ mm oraz z powierzchnią płaską. W miarę zwiększania się promienia powierzchni styku zmianie ulega kształt linii o stałych wartościach przemieszczeń. Linie te układają się w kierunkach prostokątnych do kierunku działania siły. Jednocześnie stają się coraz bardziej widoczne zaburzenia przebiegu przemieszczeń w miejsca styku kory z rdzeniem. Szczególnie dobrze jest to widoczne na wykresach przemieszczeń.

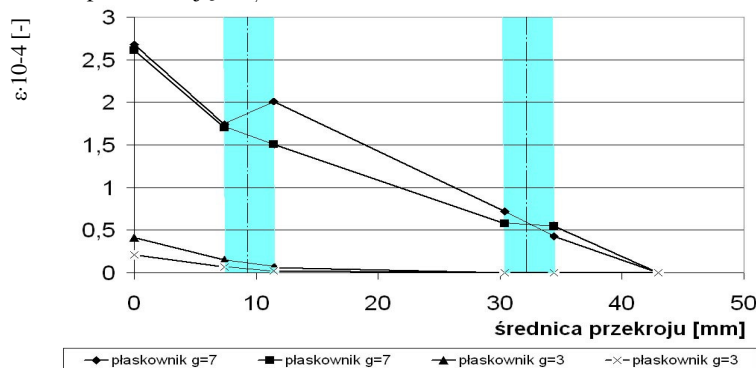
Korzystając z wykresów przemieszczeń, wykonano wykresy odkształceń ϵ_y wzdłuż osi pionowej przekroju poprzecznego (rys. 6a i rys. 6b). Pomijano strefy położone w najbliższym sąsiedztwie połączenia rdzenia z korą. Przyjęto również liniowy przebieg



Rys. 5. Mapy przemieszczeń przekroju poprzecznego korzenia marchwi w kierunku osi Y, oraz wykresy przemieszczeń w kierunku osi pionowej próbki dla głowicy wymuszającej w kształcie płaskownika

Fig. 5. Displacement's maps of carrot's root cross section in direction of Y axis as well as the graphs of displacement in direction of vertical axis of sample for different shape of loaded head

odkształceń w poszczególnych warstwach przekroju poprzecznego korzenia marchwi. Przyjęcie takiego założenia było możliwe ze względu na bardzo małe wartości odkształceń, nieprzekraczające $\varepsilon_y = 2,7 \cdot 10^{-4}$.



Rys. 6. Rozkłady odkształceń ε_y przekroju poprzecznego korzenia marchwi wzdłuż pionowej osi symetrii

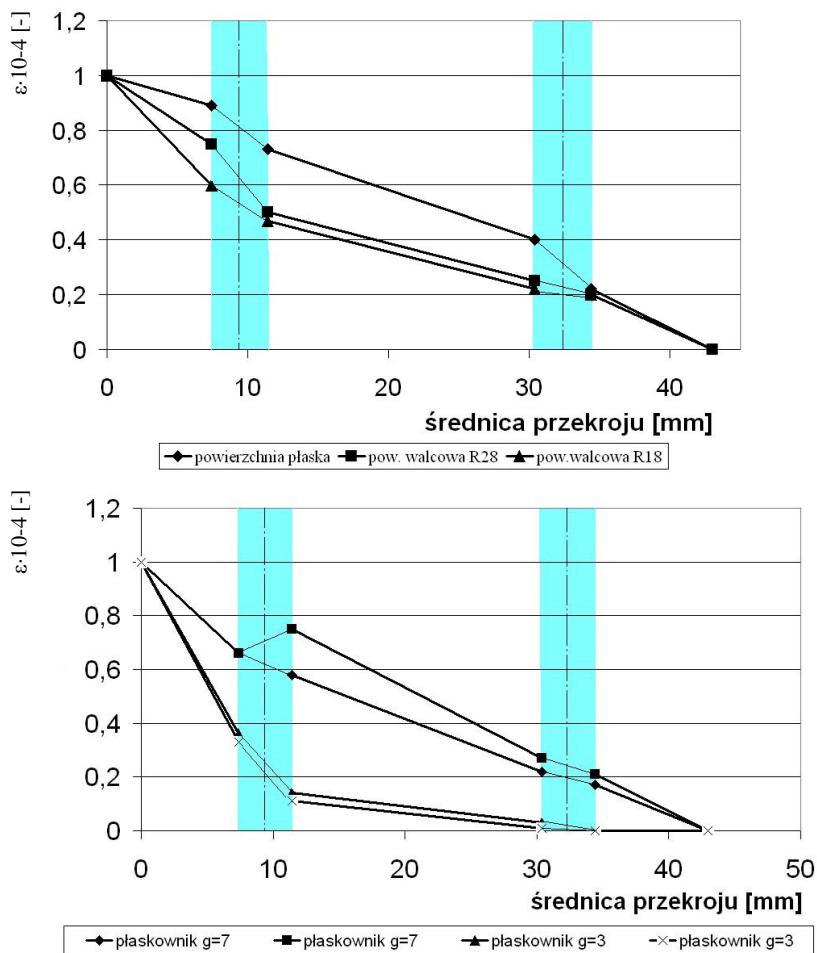
Fig. 6. Distribution of deformations ε_y of carrot's root cross section along perpendicular axis of symmetry

Ze względu na rozbieżności dotyczące maksymalnych wartości odkształceń ε_y dla poszczególnych kształtów elementów roboczych głowicy obciążającej, wynikających z trudnych do uniknięcia różnic w wartościach siły obciążającej, wykonano rozkłady odkształceń ε_y odniesione do ich wartości maksymalnych $\varepsilon_{y \max}$ wzdłuż osi pionowej przekroju (rys. 7). Na obu wykresach pominięto zaburzenia w przebiegu odkształceń ε_y w okolicach styku rdzenia z korą. Na podstawie wykresów przemieszczeń ustalono szerokość tej strefy na $\Delta l = 4$ mm.

Po analizie wykresu odkształceń względnych $\varepsilon_y/\varepsilon_{y \max}$ w funkcji średnicy przekroju poprzecznego (rys. 7) można zauważyć, że kąt nachylenia prostych w warstwie kory położonej w pobliżu punktu przyłożenia siły oraz w okolicy punktu podparcia, a także w warstwie rdzenia ulega zmianie.

W przypadku oddziaływania płaskiej powierzchni części roboczej głowicy obciążającej na badaną próbkę kąt pochylenia prostych w obu częściach kory jest zbliżony. W miarę zmniejszania się powierzchni styku części roboczej głowicy obciążającej z powierzchnią próbki (począwszy od powierzchni walcowej o promieniu $R = 8$ mm, poprzez powierzchnię walcową o promieniu $R = 18$ mm, płaskownik o grubości $g = 7$ mm do płaskownika o grubości $g = 3$ mm) kąt nachylenia odcinka w części korowej położonej w pobliżu punktu przyłożenia siły ulega zwiększeniu. Świadczy to o powiększającym się znaczeniu lokalnych przemieszczeń. Wyraźną barierą na drodze dalszego rozprzestrzeniania się przemieszczeń są okolice miejsca połączenia rdzenia z korą.

W części kory położonej w okolicach punktu podparcia, kąt pochylenia odcinków prostych praktycznie nie zależy od kształtu głowicy obciążającej. Jedyny wyjątek stanowi przypadek obciążania głowicą w kształcie płaskownika o grubości $g = 3$ mm, gdzie ze względu na lokalny zakres działania siły oraz niewielką wartość odkształcenia ε_y , wartości $\varepsilon_y/\varepsilon_{y \max}$ są równe zeru.



Rys. 7. Rozkłady odkształceń względnych $\varepsilon_y/\varepsilon_{y_{max}}$ przekroju poprzecznego korzenia marchwi wzdłuż pionowej osi symetrii

Fig. 7. Distribution of relative deformations $\varepsilon_y/\varepsilon_{y_{max}}$ of carrot's root cross section along perpendicular axis of symmetry

W części rdzeniowej odcinki prostych położone są w przybliżeniu równoległe do siebie. W miarę zmniejszania się powierzchni styku głowicy obciążającej z powierzchnią próbki wartości $\varepsilon_y/\varepsilon_{y_{max}}$ ulegają zmniejszeniu.

Kształt odcinków prostych na wykresie przedstawionym na rysunku 7 wskazuje to, że w badanym zakresie obciążeń istotne znaczenie dla rozkładu przemieszczeń mają strefy położone w okolicach połączenia rdzenia i kory. Stanowią one naturalną barierę dla rozprzestrzeniania się przemieszczeń, niezależnie od kształtu głowicy obciążającej.

WNIOSKI

1. Wpływ kształtu części roboczej głowicy obciążającej na wartość przemieszczeń ma istotne znaczenie jedynie w warstwie kory w sąsiedztwie punktu przyłożenia siły w badanym zakresie obciążeń. W warstwie rdzenia oraz w warstwie kory położonej w okolicach punktu podparcia wpływ ten jest prawie niewidoczny.

2. Wraz ze zmniejszaniem się powierzchni styku głowicy obciążającej – poprzez przejście od powierzchni płaskiej, przez powierzchnie walcowe o promieniach $R_1 = 28$ mm i $R_2 = 18$ mm aż do płaskowników o grubościach $g_1 = 7$ mm i $g_2 = 3$ mm – zmiany wartości odkształceń względnych w warstwie kory stają się coraz bardziej dynamiczne.

3. W badanym zakresie obciążeń, przy zwiększeniu obciążenia o $\Delta F = 2$ N maksymalne wartości przemieszczeń w kierunku osi Y uzyskane dla różnych kształtów głowicy obciążającej wahały się w przedziale od $0,957$ μm do $11,53$ μm .

4. W badanym zakresie obciążeń i przemieszczeń, pomimo zbliżonych wartości umownego współczynnika sprężystości E oraz stałej Poissona ν dla warstwy rdzenia i kory wyznaczonych w kierunku osi y , nie można pominąć warstwowej budowy korzenia marchwi. Strefa połączenia rdzenia z korą spełnia rolę naturalnej bariery na drodze rozprzestrzeniania się przemieszczeń przekroju poprzecznego korzenia marchwi.

PIŚMIENNICTWO

- Arnolds T., Roberts A., 1966. Stress distribution in loudet with grains. *J. Agric. Eng. Res.* 11, 38–43.
- Bzowska-Bakalarz M., 1998. Wytrzymałość mechaniczna korzeni buraków cukrowych. *Zesz. Prob. Post. Nauk Roln.* 454, 207–212.
- Gołacki K., Kęsik T., Szot B., 1987. Badanie zmienności właściwości korzeni marchwi w zależności od cech odmianowych, czynników agrotechnicznych i okresu przechowywania. *Zesz. Prob. Post. Nauk Roln.* 316, 182–189.
- Gołacki K., Obroślak R., 1998. Wyznaczanie współczynnika Poissona korzeni marchwi. *Zesz. Prob. Post. Nauk Roln.* 454, 221–229.
- Hughes H., Segerlind L. J., 1972. A rapid mechanical method for determining Poissons ratio in biological materials. *ASAE, St. Joseph, Minnessota* 49085, 72–310.
- Molendowski F., 1999. Ocena istotności zmian wartości naprężenia niszczącego próbkę rdzenia kolby kukurydzy w próbie promieniowego ściskania. *Zesz. Nauk. A.R. Wrocław, Inż. Roln.* 5/99, 191–198.
- Stopa R., 2002a. Maksymalne naprężenia stykowe dla korzeni marchwi wyznaczone w próbie promieniowego ściskania. *Inż. Roln.* 5(38), 377–385.
- Stopa R., 2002b. Elastooptyczne badania dwuwarstwowego modelu korzenia marchwi w próbie ściskania promieniowego. *Inż. Roln.* 5(38), 385–395.
- Szot B., Gołacki K., 1978. Ocena właściwości mechanicznych korzeni marchwi na podstawie podstawowych parametrów wytrzymałościowych. *Zesz. Prob. Post. Nauk Roln.* 321, 58–64.

**APPLICATION OF SPECKLE PATTERN INTERFEROMETRY METHOD
IN MEASURING OF DISPLACEMENT OF CARROT'S ROOT
CROSS-SECTION**

Abstract. Results of investigations on displacement of carrot's root cross section using electronical speckle pattern interferometry method (ESPI) were introduced. Methodology of measurements of displacement of biological materials and description of test stand was presented. Maps of displacement of carrot's root cross-section in its plane as well as in the transverse direction were determined. The graphs of displacement, deformation and relative deformations of cross-section in direction of loaded force were determined on the base of the maps of displacements.

Keywords: carrot root, strength properties, speckle pattern interferometry, displacement, deformation ESPI

*Roman Stopa, Leszek Romański, Instytut Inżynierii Rolniczej Akademii Rolniczej we Wrocławiu,
51-630 Wrocław, ul. Chelmońskiego 37/41, tel. (+48 71) 320 57 25,
e-mail: roman.stopa@cci.com.pl,*