

FOTOGRAFIA PLAMKOWA W BADANIACH ODKSZTAŁCALNOŚCI KORZENIA MARCHWI

Monika Andruszkiewicz, Ludomir J. Jankowski

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wroclawska

Roman Stopa

Instytut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki próby zastosowania metody fotografii plamkowej do pomiarów przemieszczeń przekroju poprzecznego korzenia marchwi. Badania prowadzono na obiektach rzeczywistych. Omówiono podstawy metody pomiarowej, sposób przygotowania próbek oraz podano przykładowe wyniki pomiarów. Przeprowadzone badania wykazały przydatność fotografii plamkowej do analizy odkształcalności tkanki roślinnej, w tym w aspekcie wyznaczania stałych materiałowych.

Słowa kluczowe: fotografia plamkowa, korzeń marchwi, przemieszczenia

Wstęp

W wyniku szybkiego rozwoju techniki rolniczej w zakresie przechowalnictwa, zbioru i przetwórstwa warzyw, dużego znaczenia nabierają prace związane z wyznaczaniem ich właściwości wytrzymałościowych. Szczególnie odnosi się to do korzeni warzyw, dla których badania właściwości mechanicznych prowadzone są od niedawna. W odniesieniu do korzeni marchwi dla poszczególnych warstw komórkowych, z których zbudowany jest korzeń, zostały wyznaczone stałe materiałowe. Przeprowadza się również doświadczenia na całym korzeniu. Jednak interpretacja otrzymanych wyników sprawia wiele trudności. W znacznej mierze spowodowane jest to anizotropowym charakterem materiału pochodzenia biologicznego (w tym, warstwową budową korzeni warzyw), jak i stosowaniem różnych procedur badawczych (np. sposobu obciążania próbek). Także sposób pomiaru wielkości umożliwiających wyznaczenie np. ułamka Poissona, czy modułu sprężystości podłużnej Younga, odgrywa istotną rolę w uzyskiwaniu bardziej wiarygodnych wyników badań doświadczalnych.

Precyzyjne wyznaczanie właściwości materiałów pochodzenia roślinnego staje się obecnie nie tylko potrzebą przemysłu przetwórczego, czy przechowalnictwa, ale może dostarczyć wiarygodnych danych niezbędnych do weryfikacji tworzonych modeli matematycznych i numerycznych (np. z wykorzystaniem metody elementów skończonych). Sprzyja temu ciągły rozwój metod pomiarowych, a w szczególności bezdotykowych, optycznych metod pomiaru przemieszczeń. Przykładowo, rozwój metod pomiarowych opartych na wykorzystaniu światła spójnego, wraz z cyfrową obróbką obrazów, umożliwił wyznaczenie przemieszczeń przekroju poprzecznego korzenia marchwi za pomocą metody

elektronicznej interferencji obrazów plamkowych (ang. – ESPI) [Stopa, Romański 2003]. Jednak bardzo wysoka czułość tej metody pomiaru nastęca spore trudności w realizacji eksperymentów, stąd w niniejszej pracy podjęto próbę zastosowania fotografii plamkowej w świetle spójnym (np. Erf 1974) do badania przemieszczeń rzeczywistych obiektów pochodzenia roślinnego.

Cel pracy

Celem pracy było opracowanie metodyki pomiaru przemieszczeń przekroju poprzecznego korzenia marchwi za pomocą fotografii plamkowej w świetle spójnym.

Metoda pomiaru przemieszczeń

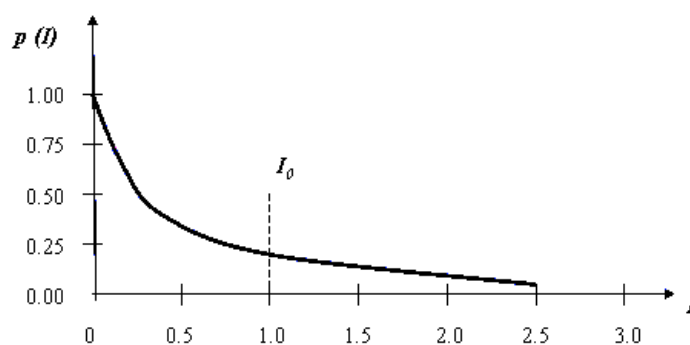
Fotografia plamkowa, to optyczna, bezdotykowa metoda pomiaru przemieszczeń, wykorzystująca – w przypadku stosowania światła spójnego – tzw. efekt plamkowania. Jest on rezultatem interferencji promieni wiązki światła laserowego, odbitych od powierzchni obiektu dyfuzyjnego lub przechodzących przez ośrodek transmisyjny o silnych fluktuacjach współczynnika załamania światła. Rozkład natężenia światła w obrazie plamkowym (Francon, 1978) jest opisany funkcją gęstości prawdopodobieństwa występowania plamki o natężeniu I (rys. 1.):

$$p(I) = \exp(-I/I_0) / I_0 \quad \text{dla } I > 0; \quad \text{i } 0 \quad \text{dla } I \leq 0 \quad (1)$$

gdzie:

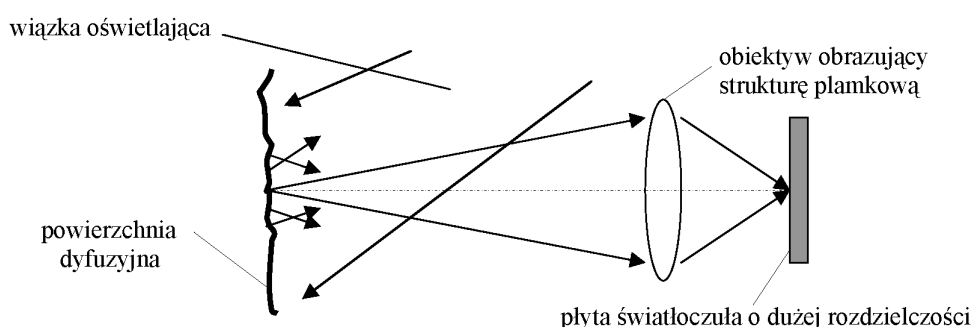
I_0 – średnie natężenie światła w obrazie plamkowym, natomiast faza interferujących promieni ma rozkład jednostajny w przedziale $-\pi \leq \varphi < \pi$:

$$p(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \quad (2)$$



Rys. 1. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa natężenia światła w obrazie plamkowym
Fig. 1. Distribution of light intensity probability density in the speckle image

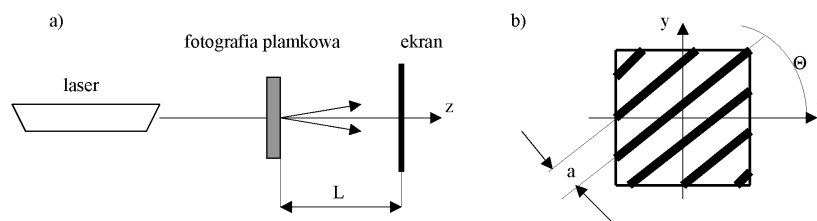
Tak więc, w obrazie plamkowym najbardziej prawdopodobne jest występowanie ciemnych plamek. Pociąga to za sobą konieczność zapewnienia odpowiedniego kontrastu obrazu plamek obserwowanych na tle badanego obiektu. Pomiar przemieszczeń w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku obserwacji obiektu odbywa się na drodze rejestracji obrazów plamek (skorelowanych z obserwowaną powierzchnią) dla dwóch różnych stanów tego obiektu, np. przed i po zadaniu określonego obciążenia, przemieszczenia, itp. Układ do rejestracji fotografii plamkowej obiektów dyfuzyjnych (tzw. plamkogramów), pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Schemat rejestracji plamkogramu

Fig. 2. Specklegram registration scheme

W wyniku dwuekspozycyjnej rejestracji różniących się obrazów plamkowych powstaje losowa siatka dyfrakcyjna, która zawiera informacje o przemieszczeniach wywołanych zmianą stanu powierzchni obiektu, a ściślej – o składowych wektora przemieszczenia leżących w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku obserwacji badanego przedmiotu. Najczęściej układ rejestrujący jest tak orientowany, aby płaszczyzna rejestracji była równoległa do charakterystycznej płaszczyzny obiektu (np. do oświetlanej wiązki światła spójnego płaszczyzny próbki). Tak zarejestrowany plamkogram jest następnie poddawany analizie, która polega na jego prześwietlaniu wiązką światła spójnego. W wyniku dyfrakcji promieni światła spójnego powstają obrazy interferencyjne, które stanowią podstawę analizy ilościowej. Stosując wiązkę światła o niewielkiej średnicy (rys. 3), uzyskuje się informację o charakterze quasi-punktowym (analiza punktowa plamkogramu), przy czym w wyniku ugięcia światła obserwuje się charakterystyczne obrazy równoległych i równoodległych prążków interferencyjnych.



Rys. 3. Analiza punktowa plamkogramu: a) schemat układu do analizy, b) obraz prążków na ekranie
 Fig. 3. Point-by-point analysis of the specklegram: a) optical set-up, b) interference patterns on the screen

Wartość wektora przemieszczenia \vec{d} leżącego w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku obserwacji wynosi:

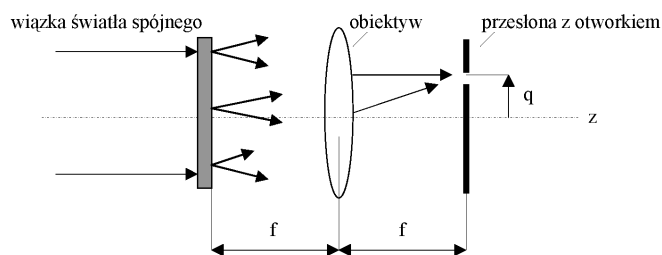
$$\left| \vec{d} \right| = \frac{\lambda \cdot \sqrt{4 \cdot L^2 + a^2}}{2 \cdot M \cdot a} \cong \frac{\lambda \cdot L}{M \cdot a} \quad (3)$$

gdzie:

- a – odległość międzyprążkowa (obserwowana np. na ekranie),
- M – powiększenie obrazu struktury plamkowej, natomiast kierunek tego wektora jest prostopadły do prążków obserwowanych na ekranie. Wartości składowych w kierunkach osi kartezjańskiego układu współrzędnych określają wzory:

$$u_x = \left| \vec{d} \right| \cdot \cos \Theta \cong \frac{\lambda \cdot L}{M \cdot a} \cdot \cos \Theta, \quad u_y = \left| \vec{d} \right| \cdot \sin \Theta \cong \frac{\lambda \cdot L}{M \cdot a} \cdot \sin \Theta \quad (4)$$

W przypadku oświetlenia całego plamkogramu, w układzie analizującym jak na rys. 4 (analiza polowa plamkogramu), można uzyskać informacje o składowych wektora \vec{d} leżących na kierunkach zadanych przez przesłony z otworem względem osi optycznej układu.

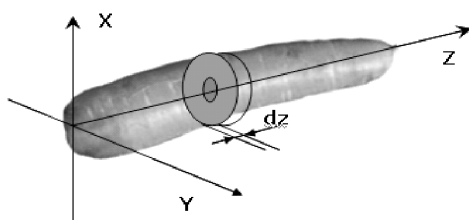


Rys. 4. Analiza polowa plamkogramu - schemat układu
 Fig. 4. Full-field analysis of the specklegram – optical set-up

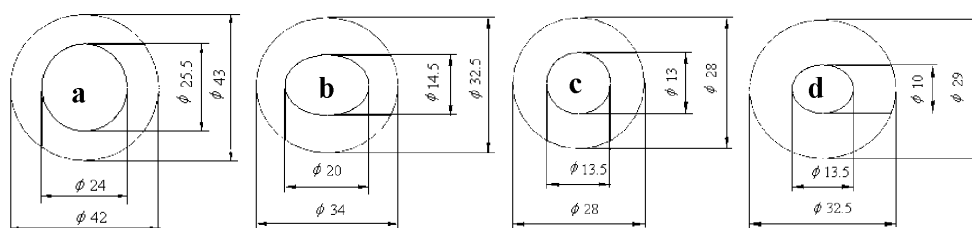
W praktyce, najczęściej stosowana jest punktowa metoda analizy plamkogramów.

Przedmiot i metodyka badań

Przedmiotem badań były próbki pobrane z korzeni marchwi czterech gatunków: *Perfekcja* i *Selecta* (gatunki o rdzeniu okrągłym), *Amager* (rdzeń lekko gwiaździsty) i *Nantejska* (rdzeń czworokątny). Próbki wycinano z korzenia marchwi w sposób pokazany na rys. 5, tj. były one ograniczone dwoma płaszczyznami prostopadłymi do osi podłużnej, oddalonymi o jednostkową odległość dz . Odległość dz ustalono w ten sposób, aby nie zaburzyć płaskiego (tarczowego) stanu naprężenia, a jednocześnie w trakcie obciążania nie doprowadzić do deplanacji przekroju poprzecznego. Wymiary próbek podano na rys. 6.



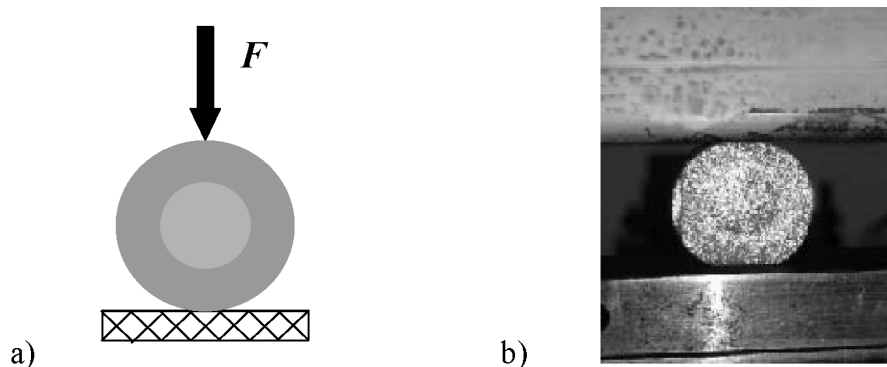
Rys. 5. Sposób pobrania próbek z korzenia marchwi
Fig. 5. Sample of carrot root preparation



Rys. 6. Wymiary próbek: a) *Nantejska* ($t = 11$ mm), b) *Perfekcja* ($t = 15$ mm), c) *Amager* ($t = 9$ mm), d) *Selecta* ($t = 9$ mm)

Fig. 6. Carrot's root samples dimensions: a) *Nantejska* ($t = 11$ mm), b) *Perfekcja* ($t = 15$ mm), c) *Amager* ($t = 9$ mm), d) *Selecta* ($t = 9$ mm).

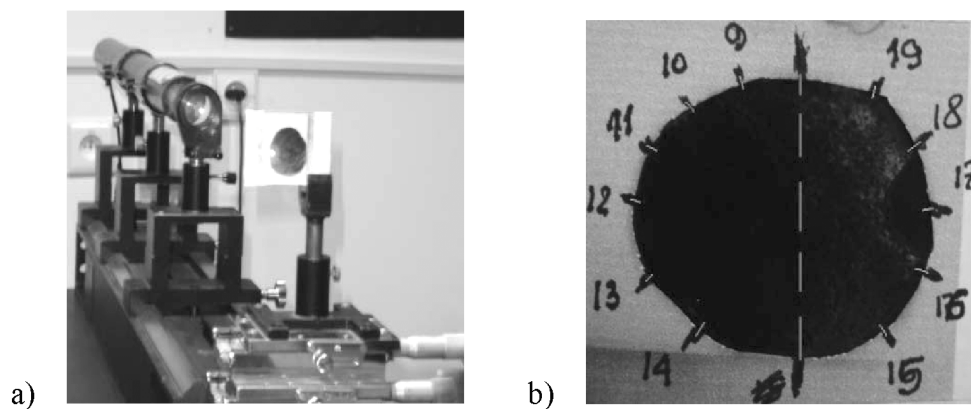
Próbki poddawano obciążeniu statycznemu, w schemacie ściskania kołowej tarczy wzdłuż średnicy (rys. 7). W celu zapewnienia odpowiedniego kontrastu obrazu plamek na tle badanego obiektu, przeprowadzono próbne rejestracje plamkogramu na próbkach: - bez pokrycia środkiem zwiększającym kontrast, - pokrytych białą farbą akrylową oraz na próbkach pokrytych pyłem aluminiowym. Pozytywne rezultaty uzyskano jedynie w tym ostatnim przypadku.



Rys. 7. Sposób obciążania próbek: a) schemat obciążenia, b) widok próbki w przyrządzie do realizacji obciążenia

Fig. 7. Sample's loading: a) loading scheme, b) view of the sample in the loading device

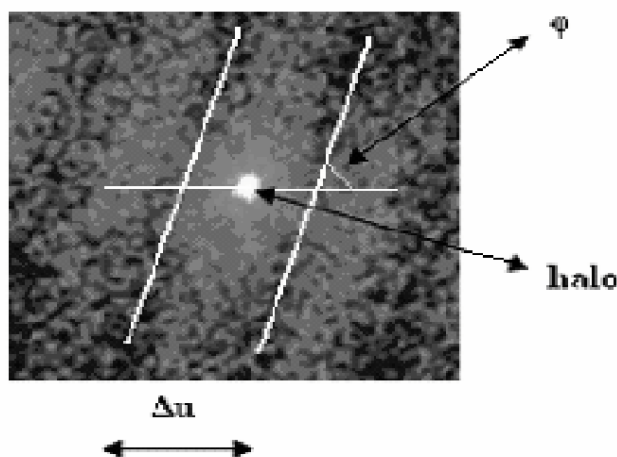
Podczas pomiarów próbki poddawano wstępnemu obciążeniu (50N), rejestrowano na płytce obraz struktury plamkowej, po czym zwiększano obciążenie (o max. 5 N) i rejestrowano drugi obraz struktury plamkowej. Uzyskane w ten sposób plamkogramy poddawano analizie punktowej (rys. 8) w punktach położonych na obwodzie próbek oraz w przekroju leżącym na kierunku działania obciążenia.



Rys. 8. Punktowa analiza plamkogramu: a) widok stanowiska, b) widok plamkogramu

Fig. 8. Specklegram's point-by-point analysis: a) optical set-up, b) specklegram view

Podstawą do analizy ilościowej były obrazy prążków interferencyjnych zarejestrowane cyfrową techniką fotograficzną. Przykładowy obraz prążków pokazano na rys. 9.

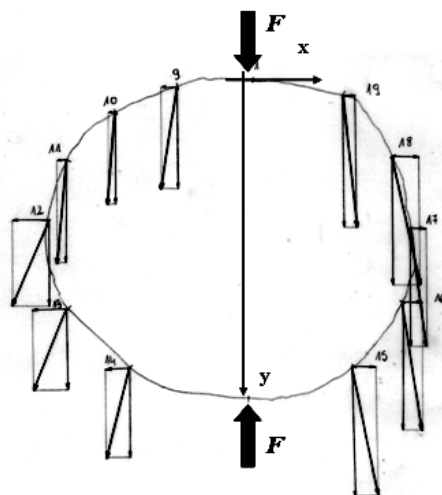


Rys. 9. Przykładowy obraz prążków interferencyjnych
Fig. 9. Example of the interference patterns picture

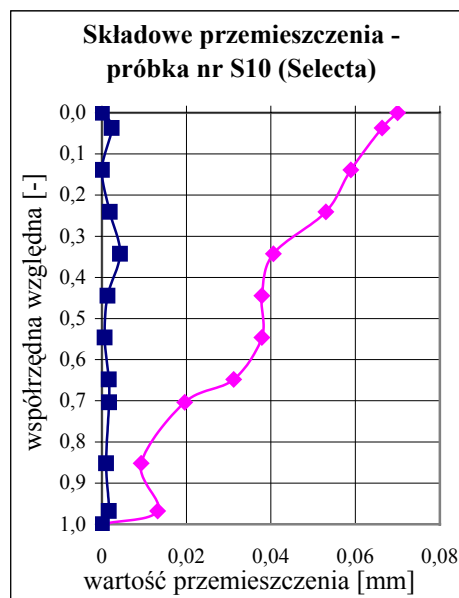
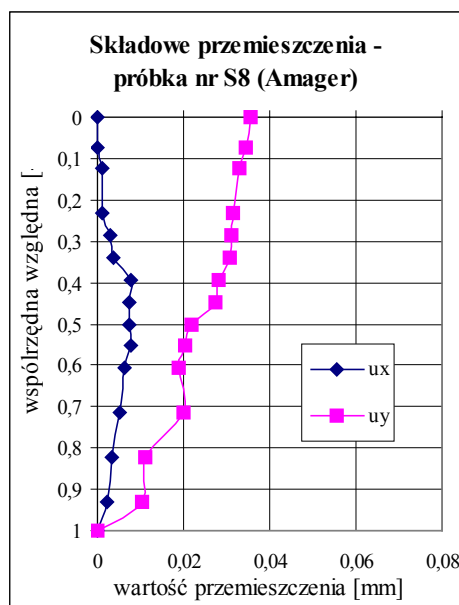
Wyniki badań

Zgodnie z celem pracy, zarejestrowane plamkogramy poddano analizie w celu wyznaczenia wartości przemieszczeń. Wartość wektora przemieszczenia \vec{d} , danego punktu próbki marchwi, obliczono na podstawie wzoru (1), (dla długości fali światła $\lambda = 632.8nm$), natomiast składowe u_x i u_y - na podstawie wzorów (4). Przykładowy diagram przedstawiający graficznie wartości wektora i jego składowych, dla próbki (S10) pobranej z korzenia marchwi z gatunku *Selecta*, pokazano na rys. 10.

Wykresy składowych u_x i u_y w przekrojach położonych na kierunku działania siły F , dla próbek A8 i S10, pokazano na rys. 11.



Rys. 10. Przeszczenia punktów na obwodzie przekroju korzenia marchwi (*Selecta*)
 Fig. 10. Displacements of the cross-section points of the carrot root (*Selecta*)



Rys. 11. Wykresy składowych u_x i u_y w przekrojach próbek A8 i S10
 Fig.11. Distributions of the u_x and u_y in the cross-sections of A8 and S10 samples

W celu bezpośredniego porównania odkształcalności różnych gatunków marchwi można wykorzystać wykresy pokazane na rys. 11. Należy jednak uwzględnić ewentualne różnice w przyrostach obciążenia realizowanych pomiędzy ekspozycjami (podczas rejestracji plamkogramu). Biorąc pod uwagę zakres obciążenia wstępnego (w omawianym przypadku 50 N) oraz niewielką wartość przyrostów obciążenia (próbka nr *A8* – 2 N, próbka nr *S10* – 1 N), można założyć liniową zależność między obciążeniem, a przemieszczeniami. Ostatecznie, wartości przemieszczenia u_y próbki nr *S10* są faktycznie dwukrotnie większe niż pokazane na wykresie.

Podsumowanie

Powyższe, przykładowe wyniki pomiarów, pozwalają np. ocenić wpływ rzeczywistego (odbiegającego od teoretycznie kołowego) kształtu przekroju na jego deformację, w określonym stanie obciążenia – rys. 10. Natomiast analiza wykresów pokazanych na rys. 11 wskazuje (po uwzględnieniu różnic wartości obciążenia) na różne właściwości mechaniczne materiału biologicznego (różne gatunki marchwi). Daje to podstawy do stwierdzenia, że przedstawiona metodyka pomiaru przemieszczeń w próbkach korzeni marchwi, z wykorzystaniem fotografii plamkowej w świetle spójnym, może z powodzeniem służyć do wyznaczania właściwości materiałowych obiektów biologicznych. Przyjmując kołową tarczę ścisną wzdłuż średnicy lub cięciwy jako model przekroju poprzecznego korzenia marchwi, i pomijając różnice właściwości kory i rdzenia (ze względu na ich zbliżone wartości), uzyskane wyniki pomiarów przemieszczeń mogą posłużyć do wyznaczenia „umownych”: modułu Younga i ułamka Poissona, bowiem wartości przemieszczenia poszczególnych punktów takiej tarczy (a więc w przybliżeniu przekroju korzenia marchwi) są funkcją nie tylko parametrów geometrycznych (średnica, współrzędne punktów przyłożenia obciążenia, grubość tarczy), ale także wartości obciążenia i stałych materiałowych [np. Demidov, 1979].

Bibliografia

- Demidov S.P.** 1979. Teoria uprugosti. Vysshaja szkoła. Moskwa.
- Erf R.K.** 1978. Speckle metrology, Academic Press, New York, London, San Francisco.
- Francon M.** 1978. La granularite laser (speckle) et ses applications en optique, Masson, Paris, New York, Barcelone. Milan.
- Stopa R., Romański L.** 2003. Zastosowanie metody interferometrii plamkowej do pomiaru przemieszczeń przekroju poprzecznego korzenia marchwi. Scientiarum Polonorum Tech. Agr. Inż. Rol. 2(1). s. 43- 54.

APPLICATION OF THE SPECKLE PHOTOGRAPHY IN THE CARROT ROOTS DEFORMABILITY INVESTIGATIONS

Abstract. The carrot roots cross sections displacement measurements using speckle photography are presented. Real objects (carrot roots samples) were investigated. Basic information of the measurement method, preparation of the samples and examples of measurement results are shown. Presented experiment showed usefulness of the speckle photography method for deformability determination of the biological tissues, including determination of the material's constants.

Key words: speckle photography, carrot roots, displacements

Ades do korespondencji:

Roman Stopa; e-mail: stopa@imr.ar.wroc.pl
Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn
Politechnika Wrocławska
ul. Chełmońskiego 37/41
51-630 Wrocław