

WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE WARZYW UPRAWIANYCH POD OSŁONAMI

Jerzy Bohdziewicz, Paskalis Grzemski

Institut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. Przeprowadzono test histerezy odkształceń do obserwacji zmian chwilowych zmian wartości współczynnika E_C wybranych gatunków warzyw dla różnych kierunków przyłożonego obciążenia. Wartości tego współczynnika wynoszą odpowiednio 2 MPa dla kalarepy, 1 MPa w odniesieniu do cebuli i rzepy oraz 0,5 MPa dla rzodkiewki. Zaobserwowano zmiany wartości E_C w wyniku konsolidacji materiału. Obliczono wartości parametrów modeli reologicznych, wyznaczonych na podstawie testów pełzania i relaksacji naprężeń. Testy reologiczne wykazały istotne zróżnicowanie wartości parametrów modeli reologicznych rzodkiewki w porównaniu z pozostałymi badanymi warzywami.

Słowa kluczowe: warzywa, histereza, pełzanie, relaksacja naprężeń

Wstęp

Uprawa warzyw pod osłonami umożliwia wydłużenie sezonu wegetacji, zapewniając rynkową podaż warzyw także w miesiącach wiosennych. Wyróżnikiem takich warzyw jest ich nietrwałość, wynikająca z dużej zawartości wody w tkankach. Z punktu widzenia plantatora istotne jest poznanie odporności tkanek na uszkodzenia mechaniczne, powstałe podczas zbioru i transportu [Herold i inni 1998]. Do jej określenia niezbędne jest wyznaczenie wytrzymałości doraźnej i zmian właściwości materiału przy cyklicznych obciążeniach. Dodatkowo na podstawie testów pełzania i relaksacji naprężeń można uzyskać informacje pozwalające na wyznaczenie warunków składowania plonów [Bohdziewicz, Czachor 2010].

Jako miarę odporności materiału na obciążenie ściskające przyjęto wartość pozornego współczynnika sprężystości E_C , traktowanego jako współczynnik określający zależność $\sigma - \varepsilon$. Do obliczeń wartości tego współczynnika opracowano metodę pomiaru obiektów o kształcie kulistym [Bohdziewicz 2006a, b, 2007, 2008]. Formuła obliczeń ma postać:

$$E_C = \frac{\xi \cdot \int_0^{\lambda} F_{(\lambda)} \cdot d\lambda}{\varepsilon^2} \quad (1)$$

gdzie:

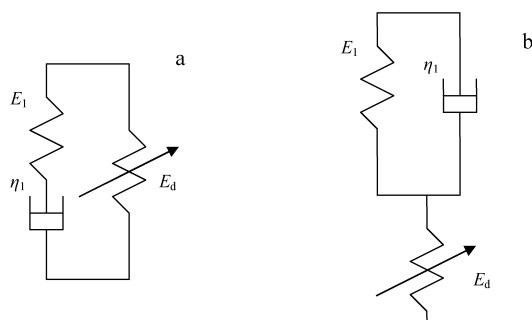
$F_{(\lambda)}$ – siła;

ξ – współczynnik uwzględniający rozmiary elipsoidy próbki;

\mathcal{E} – odkształcenie w kierunku działającego obciążenia;

$d\lambda$ – przemieszczenie.

Aby opisać przebieg zanikania naprężeń lub płynięcia materiału pod stałym obciążeniem przyjęto empiryczne modele reologiczne, pokazane schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Modele reologiczne opisujące przebiegi relaksacji naprężeń (a) oraz pełzania (b)
 Fig. 1. Rheological models describing courses of stress relaxation (a) and creeping (b)

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów [Bohdziewicz 2007] stwierdzono, że najlepsze dopasowanie do przebiegu zależności $\sigma(t)$ ma równanie zapisane w postaci:

$$\sigma(t) = a \cdot e^{-b \cdot t} + c \cdot [(1 + d \cdot t^e)^{-1}] \quad (2)$$

Analogicznie do opisanego przebiegu $\mathcal{E}(t)$ można wykorzystać formułę:

$$\varepsilon(t) = a \cdot (1 - e^{-b \cdot t}) + c \cdot [1 - (1 + d \cdot t^e)^{-1}] \quad (3)$$

gdzie:

a, b, c, d, e – współczynniki równań,

t – czas realizacji eksperymentu.

Cel i obiekt badań

Przeprowadzono badania polegające na ścisaniu warzyw między dwiema sztywnymi płytami. Celem było wyznaczenie podstawie testu histerezy odkształceń zmian wartości umownego współczynnika sprężystości E_C przy obciążeniu cyklicznym, oraz cech reologicznych materiału wyznaczonych w testach pełzania i relaksacji naprężeń. Obiektem badań były warzywa z upraw pod osłonami, pozyskane w kwietniu 2011 roku. Były to: kalarepa odmiany Korist F1, rzodkiewka odmiany Krakowianka, cebula odmiany Wolska, rzepa odmiany Śnieżna Kula. Do każdego z przeprowadzanych testów wybrano po 5 egzemplarzy badanych roślin, selekcionowanych pod względem kształtów i rozmiarów.

Metodyka badań

Przed rozpoczęciem testów wyznaczano gęstość materiału, ważąc poszczególne egzemplarze i mierząc ich średnice w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach. Po zakończeniu badań na podstawie standardowej metody wyznaczano wilgotność materiału. Wyniki pomiarów cech fizycznych badanych roślin zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości średnie wybranych cech fizycznych badanego materiału
Table 1. Average values of selected physical properties of the investigated material

Materiał	Gęstość [kg·m ⁻³]	Zawartość suchej substancji [%]	Obciążenie [N]
Cebula	913 ± 40	7	80
Kalarepa	1019 ± 29	5	300
Rzepa	1008 ± 36	5	200
Rzodkiewka	916 ± 35	5	150

Źródło: badania własne autorów

Badania realizowano w Laboratorium Agrofizyki Instytutu Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Przeprowadzono test ściskania w kierunku osiowym i promieniowym z prędkością 3 mm·min⁻¹ (5·10⁻⁵ m·s⁻¹) przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej typu Instron 5566 z głowicą tensometryczną o zakresie do 1 kN. Aby nie dopuścić do znacznych odkształceń próbek testy realizowano przy obciążeniu nieprzekraczającym 40% siły odpowiadającej wytrzymałości doraźnej, wyznaczonej na podstawie przeprowadzonych testów ściskania.

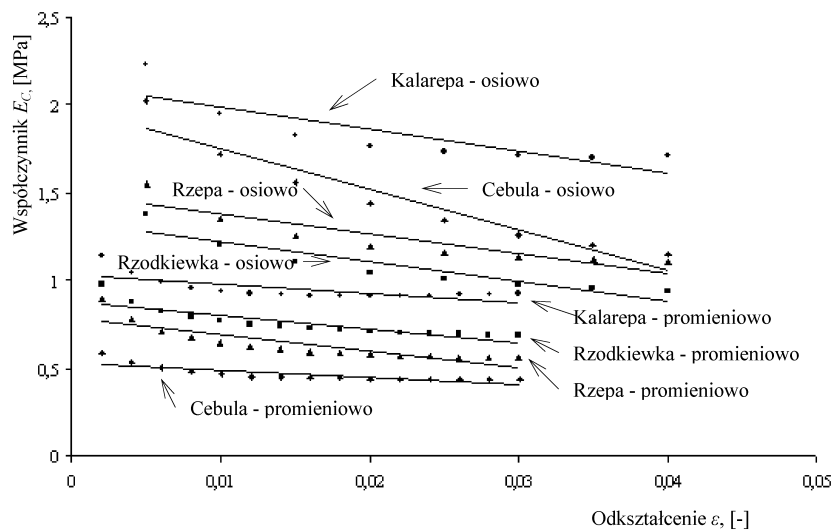
Wyniki badań

Na rysunku 2 pokazano przebiegi zmian wartości pozornego współczynnika sprężystości E_C w zależności od odkształcenia ε dla kierunku osiowego i promieniowego.

Zauważalne jest, że przy odkształceniu w kierunku promieniowym wartości współczynnika E_C są dwukrotnie mniejsze niż w kierunku osiowym. W przypadku cebuli jest to blisko trzykrotna różnica, wynikająca z niejednorodności morfologicznej badanego materiału [Bohdziewicz 2006 b, Cakir i in. 2001].

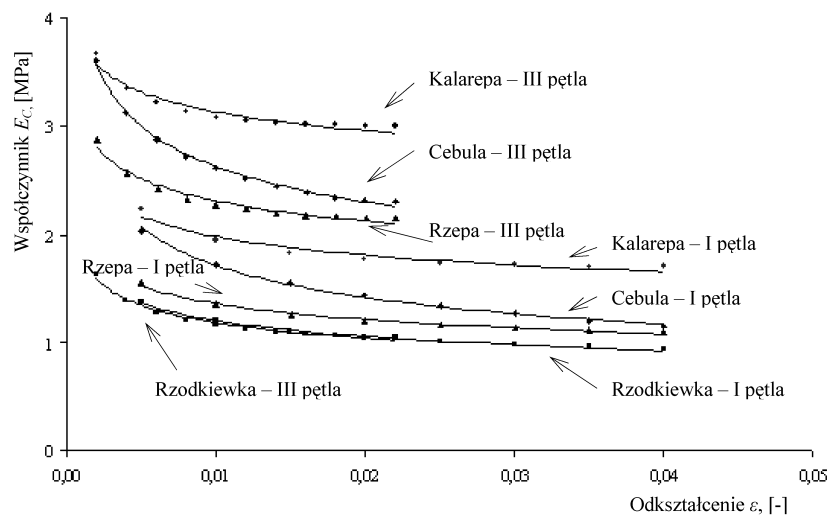
Analizowano także zmiany wartości współczynnika E_C w warunkach obciążenia cyklicznego. Zależności $E_C = f(\varepsilon)$ dla pierwszej i trzeciej pętli histerezy, przy obciążeniu w kierunku osiowym, pokazano na rysunku 3.

Można zauważyć zmiany wartości współczynnika E_C , typowe dla zjawiska pozornego umocnienia w wyniku konsolidacji materiału o właściwościach ośrodka wielofazowego. Wyjątek stanowi rzodkiewka, której tkanki zachowują się w sposób charakterystyczny dla materiałów elastycznych.



Źródło: badania własne

Rys. 2. Zmiany średnich wartości współczynnika E_C w zależności od odkształcenia ε
 Fig. 2. Fluctuations of the coefficient E_C average values depending on deformation ε



Źródło: badania własne

Rys. 3. Zmiany średnich wartości współczynnika E_C w zależności od odkształcenia ε
 Fig. 3. Fluctuations of the coefficient E_C average values depending on deformation ε

Na podstawie obliczeń zakumulowanej energii sprężystej podczas testu histerezy stwierdzono, że traktowane jako cechy materiałowe wartości pozornego współczynnika sprężystości E_C wynoszą odpowiednio 2 MPa dla kalarepy, 1 MPa w odniesieniu do cebuli i rzepy oraz 0,5 MPa dla rzodkiewki. Dla porównania wartości tego współczynnika w przypadku warzyw z upraw polowych zawierają się w przedziale od 1,5 do 4 MPa, kilkakrotnie większa jest też ich wytrzymałość doraźna σ_{max} . [Bohdziewicz 2006b, 2007, 2008].

Wyniki testu relaksacji naprężeń umożliwiają ocenę przebiegu dyssypacji energii sprężystej po wstępnej deformacji materiału. W tabeli 2 zestawiono średnie wartości parametrów modeli reologicznych obliczonych na podstawie równania (2).

Tabela 2. Średnie wartości parametrów modelu empirycznego; test relaksacji naprężeń w czasie 800 sekund

Table 2. Average values of empiric model parameters; stress relaxation test in 800 seconds

Materiał	Kierunek	Parametry modelu				
		E_l [MPa]	η_l [GPa·s]	E_d [MPa]	Parametr d [-]	Parametr e [-]
Cebula	osiowy	0,3	3,1	0,9	116	0,44
Cebula	promieniowy	0,3	14,3	0,3	62	0,53
Kalarepa	osiowy	0,8	4,6	1,7	192	0,41
Kalarepa	promieniowy	0,9	4,8	0,6	90	0,51
Rzepa	osiowy	0,7	30,2	0,5	71	0,54
Rzepa	promieniowy	0,6	9,5	0,5	75	0,51
Rzodkiewka	osiowy	0,2	1,4	1,2	41	0,11
Rzodkiewka	promieniowy	0,2	0,5	1,1	22	0,09

Źródło: obliczenia własne

Parametry E_l oraz η_l opisują właściwości materiału, wyznaczone na podstawie przebiegu intensywności zanikania naprężeń bezpośrednio po osiągnięciu założonego poziomu wstępnego naprężenia. Z przebiegiem relaksacji naprężeń w dłuższym wymiarze czasowym wiążą się dane zamieszczone w trzech ostatnich kolumnach tabeli 2. Zauważalna jest zmiana wartości współczynnika lepkości dynamicznej η_l próbek cebuli i rzepy w zależności od kierunku przyłożenia obciążenia. W odniesieniu do rzodkiewki charakterystyczne są niewielkie wartości współczynnika lepkości dynamicznej η_l oraz parametru e jako wykładnika potęgowego określającego intensywność czasowo zależnych zmian wartości nieliniowego współczynnika sprężystości E_d materiału rzodkiewki. Dla porównania rzodkiewkę z upraw gruntowych charakteryzują: blisko dziesięciokrotnie większe wartości obu współczynników sprężystości, współczynnik η_l rzędu 3 GPa·s oraz parametr e równy 0,67 [Bohdziewicz 2007].

Wyniki badań w postaci testu pełzania umożliwiły wyznaczenie przebiegu plastycznego płynięcia materiału pod stałym obciążeniem. Zestawienie średnich wartości parametrów modelu reologicznego, obliczonych na podstawie równania (3), zamieszczono w tabeli 3. W tym przypadku parametry E_l oraz η_l opisują przebieg zjawiska plastycznego płynięcia tkanek w jego początkowej fazie. Analogicznie jak w tabeli 2 przebieg obserwowanego zjawiska w dłuższym wymiarze czasowym opisują dane, zamieszczone w trzech ostatnich kolumnach tabeli 3.

Tabela 3. Średnie wartości parametrów modelu empirycznego; test pełzania w czasie 800 sekund
 Table 3. Average values of empiric model parameters; uniaxial creep experiment in 800 seconds

Materiał	Kierunek	Parametry modelu				
		E_l [MPa]	η_l [GPa·s]	E_d [MPa]	Parametr d [-]	Parametr e [-]
Cebula	osiowy axis	4,4	1,3	0,4	0,7	0,07
Cebula, onion	promieniowy	4,3	1,3	0,2	1,1	0,07
Kalarepa, kohlrabi	osiowy	9,0	5,1	0,6	0,5	0,04
Kalarepa, kohlrabi	promieniowy	7,7	4,1	0,6	0,7	0,04
Rzepa, turnip	osiowy	11,9	4,1	0,3	0,3	0,04
Rzepa, turnip	promieniowy	9,9	3,3	0,2	0,5	0,03
Rzodkiewka, small radish	osiowy	17,5	4,3	0,4	0,6	0,04
Rzodkiewka, small radish	promieniowy	33,3	10,9	0,3	0,5	0,02

Źródło: obliczenia własne autorów

Widoczna jest podobna odpowiedź na zadane obciążenie w przypadku trzech gatunków warzyw, niezależnie od kierunku przyłożenia siły. Nieco inne zachowanie charakteryzuje rzodkiewkę. Można zauważyć, że materiał ten jest w mniejszym stopniu podatny na plastyczne płynięcie niż na przykład cebula.

Podsumowanie

1. Na podstawie obliczeń zakumulowanej energii sprężystej podczas testu histerezy stwierdzono, że wartości pozornego współczynnika sprężystości E_C wynoszą odpowiednio 2 MPa dla kalarepy, 1 MPa w odniesieniu do cebuli i rzepy oraz 0,5 MPa dla rzodkiewki. Występują zmiany wartości współczynnika E_C , typowe dla zjawiska pozornego umocnienia w wyniku konsolidacji materiału o właściwościach ośrodka wielofazowego, za wyjątkiem rzodkiewki, której tkanki zachowują się w sposób charakterystyczny dla materiałów elastycznych.
2. Na podstawie testu relaksacji naprężeń stwierdzono zmianę wartości współczynnika lepkości dynamicznej modelu reologicznego rzepy i cebuli, zależnie od kierunku przyłożenia obciążenia. Testy reologiczne wykazały istotne zróżnicowanie wartości parametrów modeli reologicznych rzodkiewki w porównaniu z pozostałymi badanymi warzywami.

Bibliografia

- Bohdziewicz J.** 2006. Właściwości mechaniczne warzyw o kształcie kulistym. Inżynieria Rolnicza. Nr 5(80). Kraków. s. 49-57.
- Bohdziewicz J.** 2006. Niejednorodność cech mechanicznych cebuli. Inżynieria Rolnicza. Nr 5(80). Kraków. s. 59-66.

- Bohdziewicz J.** 2007. Modelowanie przebiegu odkształcenia tkanek parenchymy warzyw w warunkach quasi-statystycznych zmian obciążenia. Rozprawa habilitacyjna. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (557). ISSN 1897-208X.
- Bohdziewicz J.** 2008. Ocena możliwości wyznaczenia współczynnika sprężystości warzyw o kształcie kulistym. Inżynieria Rolnicza. Nr 4(102). Kraków. s. 133-139.
- Bohdziewicz J. Czachor G.** 2010. Wpływ obciążenia na przebieg odkształceń warzyw o kształcie kulistym Inżynieria Rolnicza Nr 1(119) s. 85-91.
- Cakir E. et al.** 2001. Dimensional analysis of mechanical behavior of some onion varieties. Journal of Biological Sciences 1(10). pp. 925-928.
- Herold et al.** 1998. Mechanical load and its effect on bulb onions due to harvest and post-harvest handling. Journal of Agricultural Engineering Research (71). pp. 373-383.

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF VEGETABLES CULTIVATED UNDER COVERS

Abstract. Hysteresis test of deformations was conducted for observation of the E_C coefficient temporal value fluctuations of selected vegetable species for various directions of the applied load. Values of this coefficient are respectively 2 MPa for kohlrabi, 1 MPa for onion and turnip and 0.5 MPa for radish. Because of material consolidation, value fluctuations for E_C were noticed. Parameters values of rheological models, determined on the basis of the uniaxial creep test and the stress relaxation test were calculated. Rheological tests proved considerable variety of parameters values of radish rheological models in comparison with remaining investigated vegetables.

Key words: vegetables, hysteresis, creeping, stress relaxation

Adres do korespondencji:

Jerzy Bohdziewicz; e-mail: jerzy.bohdziewicz@up.wroc.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej
Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu
ul. Chelmońskiego 37/41
51-630 Wrocław