

## WYZNACZENIE CECH REOLOGICZNYCH WARZYW I OWOCÓW NA PODSTAWIE NAKŁADÓW PRACY ODKSZTAŁCENIA

*Jerzy Bohdziewicz, Gabriel Czachor, Paskalis Grzemski*  
*Instytut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu*

**Streszczenie.** Badano właściwości mechaniczne owoców śliwy i jadalnych części warzyw. Przeprowadzono próbę doraźną i test pełzania śliwek, rzepy, kalarepy, cebuli oraz rzodkiewki. Na podstawie nakładów pracy odkształcenia obliczono chwilowe wartości współczynnika  $E_C$  oraz naprężenia  $\sigma_{obl}$ . Określano podatność na pełzanie tkanek badanych obiektów poprzez obliczenie liczby dni do podwojenia wartości odkształcenia  $\varepsilon$ , na podstawie równania Mac Leoda. Porównując cechy mechaniczne owoców śliwy z właściwościami warzyw stwierdzono istotne różnice wartości wskaźnika  $W_P$  nakładów pracy odkształcenia, a także wartości współczynnika  $E_C$ . Uzyskane wyniki pozwalają na określenie podatności na odkształcenia tkanek badanych owoców. Stwierdzono, że przed długotrwałym przechowywaniem materiałów roślinnych niezbędne jest wyznaczenie anizotropii ich cech mechanicznych.

**Słowa kluczowe:** wytrzymałość, pełzanie, warzywa, owoce

### Wstęp

Materiały pochodzenia roślinnego znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach gospodarki, najczęściej są surowcem konsumpcyjnym do bezpośredniego spożycia, lub po uprzednim przetworzeniu. Występują w różnych postaciach fizycznych – jako ciała stałe (drewno, słoma), jako ciecze (tłuszcze, soki roślinne) oraz najczęściej jako struktury wielofazowe o różnym stopniu uplastycznienia i kruchości. Ze względu na znaczne zróżnicowanie strukturalne tkanek materiałów roślinnych do wyznaczenia cech fizycznych takich struktur niezbędne jest stosowanie odpowiednich metod badań. Najczęściej wyznaczane są cechy reologiczne lub mechaniczne, w tym podatność na obróbkę technologiczną (Maw i in., 1996).

W przypadku tworzyw otrzymywanych w procesach technologicznych (tzw. materiałów inżynierskich) na podstawie pomiarów właściwości fizycznych otrzymuje się powtarzalny, jednoznaczny zapis liczbowy wyrażony w jednostkach standardowych, zrozumiały dla użytkownika. Nie jest jednak możliwe uzyskanie takich wyników podczas badań

właściwości materiału roślinnego, ze względu na przemiany biofizyczne i biochemiczne zachodzące w wypreparowanych tkankach. Brak powtarzalności wyników może być skutkiem zróżnicowania właściwości fizycznych tkanek, nawet w obrębie jednego gatunku rośliny. Jest to efekt modyfikacji genetycznych stosowanych przez hodowców, umożliwiających uzyskanie nowych odmian. Duży wpływ mają także uwarunkowania glebowe i powietrza, stopień nasłonecznienia, terminowość i rodzaje stosowanych zabiegów agrotechnicznych, termin zbioru wynikający ze stopnia dojrzałości rośliny, czas składowania, (Kolowca 2003; Kolowca i in., 2006, 2012). Najczęściej, w warunkach laboratoryjnych wyznaczana jest wytrzymałość mechaniczna tkanki roślinnej, (ASAE Standard, 1995, Blahovec, 1991, 1994). Symulowane są obciążenia, jakie mogą pojawić się w procesach technologicznych. Dotyczy to zarówno wielkości obciążenia, jak i dynamiki ich zmian. Dla ułatwienia interpretacji i oceny przydatności do celów praktycznych wyniki pomiarów cech materiałów roślinnych powinny zawierać dodatkowo omówienie stosowanej metodyki i warunków pomiaru.

## Cel, zakres i metoda badań

Celem pracy było wyznaczenie cech mechanicznych obiektów badań na podstawie próby doraźnej w postaci testu ściskania dla trzech wzajemnie prostopadłych kierunków przyłożenia obciążenia, po trzy powtórzenia dla każdego kierunku. Przeprowadzono także testy pełzania do oszacowania czasu składowania, przy obciążeniu ustalonym na poziomie 40% siły odpowiadającej uśrednionej wytrzymałości doraźnej, wyznaczonej na podstawie testów ściskania.

W przypadku owoców oraz niektórych gatunków warzyw badanie wypreparowanych próbek tkanek nie jest właściwą symulacją rzeczywistych warunków obciążenia, szczególnie podczas ich transportu i przechowywania. Dlatego też przyjęto pomiar nakładów pracy odkształcenia podczas ściskania nienaruszonych obiektów badań. Jako miarę odporności materiału na obciążenie ściskające przyjęto wartość pozornego współczynnika sprężystości  $E_C$ , traktowanego jako współczynnik określający zależność  $\sigma - \varepsilon$ , (Bohdziewicz i Czachor, 2010). Do obliczeń wartości tego współczynnika opracowano wcześniej metodę pomiaru obiektów o kształcie kulistym, (Bohdziewicz, 2006 a, b, 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;

$\xi$  – współczynnik uwzględniający rozmiary elipsoidy obiektu badań;

$\varepsilon$  – odkształcenie względne w kierunku działającego obciążenia;

$d\lambda$  – przemieszczenie.

Zastosowana metoda obliczeń umożliwia także wyznaczenie cech reologicznych badanego materiału, dzięki temu na podstawie testu pełzania możliwe jest oszacowanie czasu składowania w zadanych warunkach.

Do oceny zmian zachodzących w materiale poddanym długotrwałemu obciążeniu wykorzystano równanie Mac Leoda (1955):

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 \left( \frac{t}{b} \right)^m \quad (2)$$

gdzie:

$t$  – czas trwania testu;

$b, m$  – stałe charakteryzujące właściwości materiału.

Stale  $b, m$  można wyznaczyć po przekształceniu równania (1) do postaci:

$$\lg \varepsilon_1 = \lg \frac{\varepsilon_0}{b^m} + m \lg t \quad (3)$$

Przyjmując, że  $x = \lg \frac{\varepsilon_0}{b^m}$  można obliczyć stałą  $b$ :

$$b = \sqrt[m]{\frac{\varepsilon_0}{10^x}} \quad (4)$$

Przy wyznaczaniu wartości współczynnika  $m$  zastosowano metodę najmniejszych kwadratów.

Wyznaczenie czasu teoretycznego odkształcenia próbki do wartości odkształcenia odpowiadającego wytrzymałości doraźnej polega na ekstrapolacji przebiegu zależności  $\varepsilon(t)$  w wybranym przedziale czasowym:

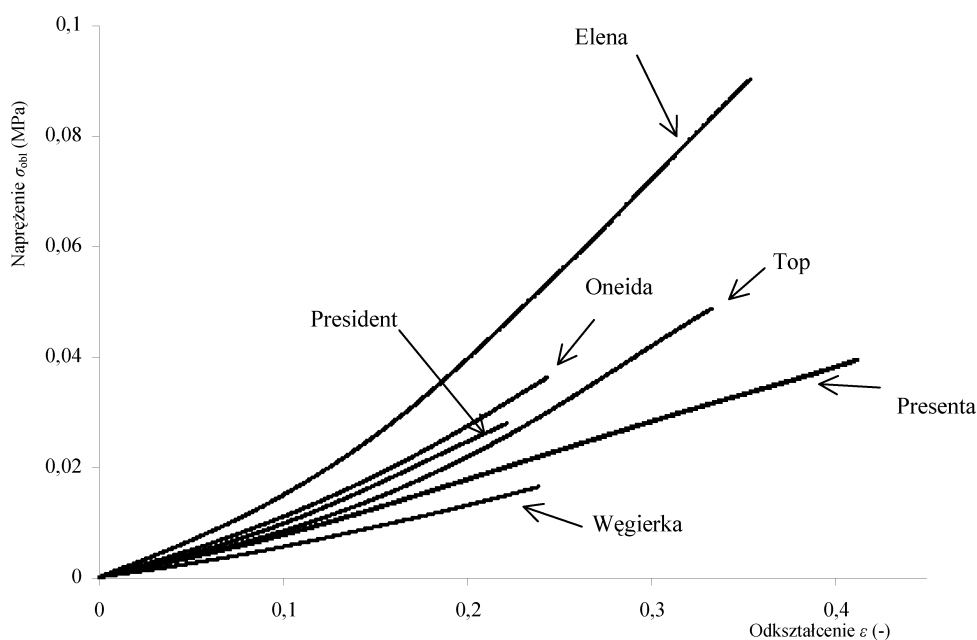
$$t = b m \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}} \quad (5)$$

Obiektem badań były owoce wybranych odmian śliwy oraz części jadalne rzepy, rzodkiewki, kalarepy i cebuli, selekcionowane pod względem rozmiarów oraz terminu zbioru. Przed rozpoczęciem testów wytrzymałościowych i reologicznych wyznaczano gęstość oraz wilgotność badanego materiału (Grzemski i Bohdziewicz, 2012).

Badania realizowano w Laboratorium Agrofizyki Instytutu Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Wykorzystano maszynę wytrzymałościową typu Instron 5566 z głowicą tensometryczną 2525 – 806, o zakresie do 1 kN. Przeprowadzono test ściskania w kierunku równoległym do osi podłużnej owocu lub warzywa oraz w kierunkach do niego prostopadłych. Prędkość deformacji podczas próby doraźnej oraz w początkowej fazie testu pełzania wynosiła  $5 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{sek}^{-1}$ .

## Wyniki

Pomiary siły i przemieszczenia głowicy podczas testu ściskania umożliwiają obliczenie na podstawie równania (1) nakładów pracy odkształcenia, a na tej podstawie także wartości pozornego współczynnika sprężystości  $E_C$ . Pozwala to wyznaczyć chwilowe wartości naprężenia  $\sigma_{obl}$ . Przykładowe zestawienie przebiegów  $\sigma_{obl} - \varepsilon$  przy obciążeniu w kierunku promieniowym badanych odmian śliwek pokazano na rysunku 1.



Rysunek 1. Przykładowe zestawienie przebiegów  $\sigma_{obl} - \varepsilon$ , test wytrzymałościowy wybranych odmian śliwek

Figure 1. Exemplary list of courses  $\sigma_{obl} - \varepsilon$ , strength test of the selected plums

Ze względu na zróżnicowanie wagowe i wymiarowe owoców poszczególnych odmian śliwek do porównania nakładów pracy odkształcenia w próbie doraźnej wykorzystano wskaźnik  $W_p$  uwzględniający masę badanych próbek.

$$W_p = \frac{W}{m} \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (6)$$

gdzie:

- $W$  – praca odkształcenia,
- $m$  – masa owocu.

Średnie wartości mierzonych i obliczonych cech fizycznych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

*Wartości średnie wybranych cech fizycznych badanych owoców zmierzone podczas próby wytrzymałościowej*

Table 1

*Average values of the selected physical properties of the investigated fruit measured during the strength test*

Parametr	Odmiany owoców śliwy					
	Elena (SD)	Oneida (SD)	Presenta (SD)	President (SD)	Top (SD)	Węgierka (SD)
Masa (g)	23,9 (0,22)	41,3 (1,76)	22,1 (0,88)	61,1 (1,58)	31,0 (2,3)	13,8 (1,91)
Wilgotność (%)	81,1 (0,2)	85,3 (1,24)	86 (0,82)	87,7 (0,47)	86,7 (0,47)	83,7 (0,47)
Gęstość (kg·m <sup>-3</sup> )	902 (12,1)	942 (39,9)	910 (21,6)	1198 (23,4)	890 (16,1)	877 (41,6)
$W_p$ (J·kg <sup>-1</sup> )	13,3 (4,2)	7,23 (2,84)	10,5 (4,71)	3,6 (0,73)	7,1 (1,69)	4,7 (1,61)
$E_c$ (MPa)	0,23 (0,02)	0,15 (0,02)	0,17 (0,05)	0,14 (0,02)	0,09 (0,01)	0,11 (0,04)

SD – odchylenie standardowe

Na podstawie przeprowadzonej jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA stwierdzono, że średnia wartość współczynnika  $E_c$  nie jest zależna od kierunku przyłożenia obciążenia. Jak można także zauważyć na rysunku 1 chwilową wartość współczynnika  $E_c$  jako tangensa kąta nachylenia poszczególnych linii zwiększa się ze wzrostem odkształcenia.

Próba doraźna wykazała, że wytrzymałość tkanek przy osiowym przyłożeniu obciążenia jest inna niż dla kierunku promieniowego. Wzrasta też ze zwiększeniem rozmiarów obiektu badań. Dlatego do porównania cech mechanicznych różnych materiałów roślinnych przyjęto jednakową wartość odkształcenia w kierunku działającego obciążenia na poziomie  $\varepsilon = 0,05$ , rozumianą jako relację przemieszczenia głowicy do wymiarów próbki. Ograniczenie do wartości  $\varepsilon = 0,05$  wynikało z możliwości przekroczenia wytrzymałości doraźnej tkanek warzyw.

Średnie wartości mierzonych i obliczonych cech fizycznych badanych owoców i warzyw zestawiono w tabeli 2.

Wyniki zamieszczone w tabeli 2 pozwalają na stwierdzenie, że przy porównywalnej gęstości wymagane nakłady pracy odkształcenia w przeliczeniu na jednostkę masy warzyw różnią się o kilka rzędów wielkości w porównaniu z owocami śliw. Występują także wyraźne różnice wartości współczynnika  $E_c$ . Wyniki te świadczą o wielokrotnie większej podatności na odkształcenia tkanek badanych owoców, w porównaniu z tkankami warzyw.

Zachowanie się tkanek roślinnych w warunkach długotrwałego obciążenia określano na podstawie testu pełzania. W tym wypadku wartości obciążenia ustalono na poziomie 40% siły niszczącej.

Przyjęto hipotezę wytężeniową, że uszkodzenia tkanek obiektów roślinnych o kształcie kulistym są konsekwencją przekroczenia dopuszczalnego odkształcenia na skutek naprężeń rozciągających. Dlatego też przy aproksymowaniu przebiegu zmian odkształcenia na podstawie równania (5) przyjęto wartość  $\varepsilon_1 = 2 \cdot \varepsilon_0$ .

Tabela 2

Wartości średnie wybranych cech fizycznych badanych owoców i warzyw na poziomie odkształcenia  $\varepsilon = 0,05$

Table 2

Average values of the selected physical properties of the investigated fruit and vegetables on the level of strain  $\varepsilon = 0,05$

Parametr	Badany materiał				
	Śliwka (SD)	Rzepa (SD)	Kalarepa (SD)	Cebula (SD)	Rzodkiewka (SD)
Masa (g)	24 (0,22)	255 (62,6)	362 (31,9)	149 (20,2)	163 (3,3)
Wilgotność (%)	81,1 (0,2)	93,2 (1,41)	91,7 (0,47)	90,2 (0,54)	94,8 (0,29)
Gęstość ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	902 (12,1)	966 (28,9)	1066 (36,1)	984 (48,9)	1036 (20,6)
$W_p$ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0,006(0,001)	1,53 (0,77)	1,74 (0,17)	3,87 (0,39)	1,03 (0,12)
$E_c$ (MPa)	0,12 (0,02)	1,02 (0,25)	1,68 (0,25)	0,75 (0,08)	0,84 (0,13)

SD – odchylenie standardowe

Wyniki obliczeń szacowanego czasu składowania owoców wybranych odmian śliwek przy uwzględnieniu kierunku przyłożenia obciążenia zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 3

Oszacowanie czasu składowania owoców śliwy w zadanych warunkach obciążenia

Table 3

Estimation of the storage time of plum fruit in the set load conditions

Kierunek	Parametr	Odmiany owoców śliwy					
		Elena	Oneida	Presenta	President	Top	Węgierka
Axial	$m$ (-)	0,035	0,051	0,038	0,072	0,054	0,061
	$b$ (-)	5,44	5,32	3,42	7,89	5,43	6,34
	$t$ (dni)	> 365	53	> 365	2	22	7
Radial	$m$ (-)	0,037	0,087	0,029	0,046	0,043	0,041
	$b$ (-)	7,16	6,21	2,41	6,58	11,1	4,82
	$t$ (dni)	> 365	1	> 365	1	> 365	> 365

Wyniki przedstawione w tabeli 3 wykazują, że przy zadanym poziomie obciążenia może wystąpić przekroczenie dopuszczalnego odkształcenia, co prowadzi do wewnętrznych uszkodzeń tkanek. Istotne znaczenie ma także kierunek przyłożonego obciążenia.

Zauważalny jest szacunkowo krótki czas składowania śliwek odmiany President. Występuje tutaj wyraźny związek z właściwościami wytrzymałościowymi, gdyż na podstawie rysunku 1 można stwierdzić, że przebieg zależności  $\sigma_{obl} - \varepsilon$  dla tej odmiany jest najkrótszy.

Analogicznie, czasy składowania śliwek odmiany Elena i Presenta są najdłuższe, gdyż są najbardziej podatne na odkształcenia (rysunek 1).

Wyniki obliczeń szacowanego czasu składowania wybranych gatunków warzyw przy uwzględnieniu kierunku przyłożenia obciążenia zamieszczono w tabeli 4.

Tabela 4

*Oszacowanie czasu składowania wybranych gatunków warzyw w zadanych warunkach obciążenia*

Table 4

*Estimation of the storage time of the selected vegetable species in the set load conditions*

Kierunek	Parametr	Badany materiał			
		Rzepa	Kalarepa	Cebula	Rzodkiewka
Axial	<i>m</i> (-)	0,048	0,056	0,073	0,036
	<i>b</i> (-)	3,94	4,79	3,69	3,94
	<i>t</i> (dni)	94	13	1	> 365
Radial	<i>m</i> (-)	0,037	0,057	0,051	0,021
	<i>b</i> (-)	5,39	5,88	4,41	3,01
	<i>t</i> (dni)	> 365	13	56	> 365

Z zestawienia wyników pokazanych w tabeli 4 wynika, że tkanki warzyw są odporne na długotrwałe składowanie. Wyjątek stanowi cebula, której składowanie przy obciążeniu w kierunku osiowym na poziomie 40% siły niszczącej może doprowadzić do zmian w strukturze wewnętrznej tkanek w stosunkowo krótkim czasie. Jest to konsekwencja obserwowanej anizotropii właściwości mechanicznych tego warzywa (Bohdziewicz, 2006b).

## Wnioski

1. Zachowanie się tkanki roślinnej ma ścisły związek z jej właściwościami mechanicznymi, a w szczególności z wytrzymałością doraźną zależną od kierunku przyłożenia obciążenia. Występuje wielokrotnie większa podatność na uszkodzenia owoców śliw w porównaniu ze zgrubieniami jadalnymi wybranych gatunków warzyw.
2. Anizotropia cech mechanicznych ma wpływ na przebieg pełzania struktur tkankowych podczas przechowywania warzyw lub owoców. W konsekwencji obciążenie przy składowaniu plonów na poziomie 40 % siły odpowiadającej wytrzymałości doraźnej może spowodować przekroczenie dopuszczalnego odkształcenia już po upływie kilku dni.

## Literatura

- ASAE Standard, (1995). *Compression test of food materials of convex shape*, ASAE S 386.3 MAR, 554-559.
- Blahovec, J. (1991). Compression of a spherical fleshy fruit between two plates – A mathematical model. *Zemledelska Technika*, 37, 383-389.

- Blahovec, J. (1994). Elastic and strength properties of round agricultural products. *Int. Agrophysics*, 8, 543-546.
- Bohdziewicz, J. (2006a). Właściwości mechaniczne warzyw o kształcie kulistym. *Inżynieria Rolnicza*, 5(80), 49-57.
- Bohdziewicz, J. (2006b). Niejednorodność cech mechanicznych cebuli, *Inżynieria Rolnicza*, 5(80), 59-66.
- Bohdziewicz, J. (2008). Ocena możliwości wyznaczenia współczynnika sprężystości warzyw o kształcie kulistym. *Inżynieria Rolnicza*, 4(102), 133-139.
- Bohdziewicz, J.; Czachor, G. (2010). Wpływ obciążenia na przebieg odkształceń warzyw o kształcie kulistym. *Inżynieria Rolnicza*, 1(119), 85-91.
- Grzemski, P.; Bohdziewicz, J. (2012). Właściwości reologiczne owoców wybranych odmian śliwy. *Inżynieria Rolnicza*, 2(137)T.2, 45-55.
- Kolowca, J. (2003). Ocena właściwości reologicznych wysoko uwodnionych materiałów roślinnych. *Inżynieria Rolnicza*, 11(33), 97-103.
- Kolowca, J.; Krzysztofik, B.; Nawara, P. (2006). Wpływ czasu przechowywania na właściwości reologiczne bulw ziemniaka. *Acta Agrophysica*, 7(1), 99-104.
- Kolowca, J.; Złobecki, A. (2012). Właściwości reologiczne wysoko uwodnionych ciał stałych pochodzenia roślinnego. *Acta Agrophysica*, 19(4), 725-736.
- Maw B.W. i in. (1996). *Physical and mechanical properties of fresh and stored sweet onions*. *Trans. of ASAE* 39(2), 633-637.
- MacLeod, A.A. (1955). Design of Plastic Structures for Complex Static Stress Systems. *Industrial&Engineering Chemistry*, 47(7), 1319-1323.

## DETERMINATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF VEGETABLES AND FRUIT BASED ON WORK INPUTS OF STRAIN

**Abstract.** Mechanical properties of plum fruit and edible parts of vegetables were investigated. An interim test and creep test of plums, turnip, kohlrabi and radish were carried out. Based on the work inputs of strain, temporary values of coefficient  $E_C$  and stress  $\sigma_{obl}$  were calculated. Susceptibility to creeping of tissues of the investigated objects was determined through calculation of the number of days to doubling of the strain value  $\varepsilon$  based on MacLeod equation. When comparing mechanical properties of plum fruit with properties of vegetables, significant differences in the values of  $W_P$  index of the strain work inputs as well as values of coefficient  $E_C$  were reported. The obtained results allow determination of susceptibility to strain of tissues of the investigated fruit. It was found out that before long-lasting storage of plant materials, it is indispensable to determine anisotropy of their mechanical properties.

**Key words:** strength, creep, vegetable, fruit

### Adres do korespondencji:

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