

## HISTEREZA ODKSZTAŁCENÍ MIĄŻSZU WYBRANYCH WARZYW

*Jerzy Bohdziewicz*

Instytut Inżynierii Rolniczej, Akademia Rolnicza ul. Chelmońskiego 37/41, 51-630 Wrocław  
e-mail: bohdziewicz@imr.ar.wroc.pl

**Streszczenie.** Przebieg odkształcenia tkanki mięsistej, poddanej cyklicznym osiowym obciążeniom, może być charakteryzowany stopniem elastyczności i umownym współczynnikiem sprężystości  $E_C$ . Przedstawiono wyniki obliczeń naprężenia doraźnego, wyznaczonego w próbie wytrzymałościowej oraz wybrane właściwości fizyczne mięsistej ośmiu gatunków warzyw. Na podstawie testu histerezy  $\sigma$ - $\epsilon$  stwierdzono, że występują zbliżone możliwości kumulacji energii sprężystej przez badany materiał. Umowny współczynnik  $E_C$  jest miarą oporu mechanicznego na zadane obciążenie, umożliwia obliczenie nakładów energetycznych przy realizacji wybranych procesów technologicznych.

**Słowa kluczowe:** warzywa, histereza, moduł sprężystości

### WSTĘP

Do scharakteryzowania sprężystego lub lepkiego zachowania się tkanki roślinnej pod wpływem osiowego obciążenia, wykorzystuje się modele wyrażające zależności, pomiędzy naprężeniem a zmianą wymiarów w kierunku działania siły. Pierwsze próby matematycznego zapisu procesów, zachodzących w testowanych próbkach warzyw, podjęto w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku [1,8,9,10]. Przyjęto założenie, że oddziaływanie sił zewnętrznych powoduje odkształcenia tkanki, skutkujące deformacją przestrzenną komórek, efuzją (effusion) gazów i cieczy z przestrzeni międzykomórkowych oraz (w końcowej fazie realizowanego testu) z komórek. Podejmowano też próby wyznaczenia wzajemnych powiązań pomiędzy wartościami naprężenia, odkształcenia i modułu sprężystości (obliczanego metodą sieciowej) a mikrostrukturą badanego materiału [1,2,6,10]. Wykorzystywano zapis w postaci funkcji liniowych (zapis prawa Hooke'a) i nieliniowych:  $\sigma_{(\epsilon)} = a \cdot \epsilon^b + c \cdot \epsilon^d$  oraz  $\sigma = m \cdot E^n$ , gdzie wartości parametrów  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $m$ ,  $n$  wyznaczano empirycznie. Należy jednak podkreślić, że tak obliczany moduł w rzeczywistości określa

zdolność materiału do odkształcenia jednocześnie sprężystego i plastycznego. Może więc być traktowany jako miara oporu materiału na zadane naprężenie podczas testu wytrzymałościowego, jednakże niemożliwe jest wyznaczenie zmian właściwości materiału, zachodzących przy cyklicznym obciążaniu próbek. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest niewłaściwa interpretacja pracy odkształcenia ciała, traktowanego ogólnie jako materiał idealnie sprężysty. W warunkach rzeczywistych energia, wydatkowana podczas ściskania tkanki roślinnej, jest nie tylko sumą energii sprężystej (kumulowanej) i plastycznej, pochłanianych przez konstrukcję szkieletową. Należy także uwzględnić pracę na pokonanie tarcia oraz energię traconą przy przepływie cieczy i gazów. Jest to skutek jednoczesnego występowania wielu zjawisk fizycznych, m.in. filtracji, efuzji, konsolidacji, dyssypacji energii. Przyjęcie modułu, obliczanego np. metodą siecznej, skutkuje niespełnieniem jednego z postulatów Pelega [7], dotyczącego przydatności modelu do opisanego dowolnego przebiegu zależności siła-odkształcenie.

Proponowana metoda polega na przeprowadzeniu testu histerezy w celu wyznaczenia procentowego udziału energii sprężystej, a w dalszej kolejności obliczeniu wartości skutecznej umownego modułu sprężystości w fazie ściskania i nawrotu. Moduł ten można przyjąć jako miarę zdolności kumulowania energii sprężystej przez strukturę szkieletową tkanki mięszonej. Dotychczasowe badania prowadzone przez autora [4,5], pozwoliły na wyznaczenie parametrów opisujących właściwości mechaniczne tkanki korzenia buraka ćwikłowego.

Celem pracy było wyznaczenie właściwości mechanicznych w postaci naprężenia doraźnego  $\sigma_{\max}$ , modułu sprężystości  $E_C$  oraz stopnia elastyczności, charakteryzujących zachowanie się tkanki mięszonej wybranych warzyw, podczas próby wytrzymałościowej oraz w warunkach cyklicznego obciążania. W tym przypadku  $\sigma_{\max}$  odpowiada maksymalnej wartości siły podczas ściskania próbki. Moduł  $E_C$  jest umownym współczynnikiem, charakteryzującym zależność pomiędzy naprężeniem i przemieszczeniem, wyznaczonymi na podstawie obliczeń energii pochłoniętej przez próbkę. Jako stopień elastyczności przyjęto stosunek pracy odkształcenia sprężystego do pracy odkształcenia całkowitego, w przebiegu testu histerezy.

## MATERIAŁ I METODY

Obiektem badań były: bulwy ziemniaka odmiany Bryza; zgrubienia rzodkiewki Sopol Lodu i rzodkwi Murzynka; korzenie chrzanu Czeski, selera Makar, pietruszki Berlinka, marchwi Joba i buraka ćwikłowego Opolski. W oparciu o standardową metodę suszarkowo-wagową wyznaczono zawartość suchej substancji w stosunku

do masy całkowitej materiału. Do badań pobierano próbki walcowe, o średnicy 8 mm i wysokości  $10,5 \pm 0,5$  mm.

Badania realizowano na maszynie wytrzymałościowej typu Instron 5566 z głowicą o zakresie do 1 kN. Przeprowadzono testy ściskania osiowego oraz histerezy odkształceń, przy prędkości przemieszczenia  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Do pomiarów wybrano po 10 egzemplarzy wybranych warzyw, z każdego pobrano po pięć próbek do wyznaczenia wartości  $F_{\max}$  (charakteryzującej wytrzymałość biologiczną materiału) oraz dwie próbki do realizacji trzech pętli histerezy odkształceń, obciążenie na poziomie 50% wartości  $F_{\max}$ . Na podstawie uzyskanych wyników obliczano umowny moduł  $E_C$ . Dla celów porównawczych dodatkowo wyznaczano wartości modułów: siecznego  $E_S$  oraz stycznego  $E_T$ , traktowanych jako współczynniki.

Moduły sprężystości obliczano:

- moduł sieczny  $E_S$  na podstawie prawa Hooke'a

$$E_S = \sigma \cdot \varepsilon^{-1} \quad (1)$$

- moduł styczny  $E_T$  jako współczynnik kierunkowy prostej aproksymującej przebieg funkcji  $\sigma = f(\varepsilon)$
- moduł  $E_C$  jako umowny współczynnik sprężystości dla stanu, w którym energię wydatkowaną na odkształcenie próbki, potraktowano jako iloczyn zastępczego naprężenia i rzeczywistego przemieszczenia.

## WYNIKI I DISKUSJA

Zestawienie średnich wartości wybranych cech fizycznych tkanki warzyw, zamieszczono w tabeli 1, wyniki obliczeń modułów sprężystości oraz stopnia elastyczności przedstawia tabela 2. Występuje istotna zależność pomiędzy zawartością suchej substancji a ubytkiem masy podczas testów, jednakże brak jest takiej korelacji w odniesieniu do naprężenia doraźnego (tab. 1). Doświadczenia prowadzone przez innych badaczy [3], wykazały podobne zależności, jednakże dotyczyły jedynie tkanki rzodkiewki i ziemniaka. Na podstawie badań własnych stwierdzono, że ubytek płynów zależy nie tylko od aktualnego stanu badanego materiału, ale także od innych czynników, takich jak kształt i proporcje wymiarów próbki oraz czas realizacji testu. Zróżnicowanie w budowie tkanki poszczególnych gatunków warzyw [11], uwidacznia się we wzajemnej proporcji obliczonych wartości umownych współczynników  $E_C$ ,  $E_S$ ,  $E_T$ , podczas realizacji testu wytrzymałościowego. Jeżeli na skutek przyrostu siły występowałoby proporcjonalne odkształcenie, to wartości modułów

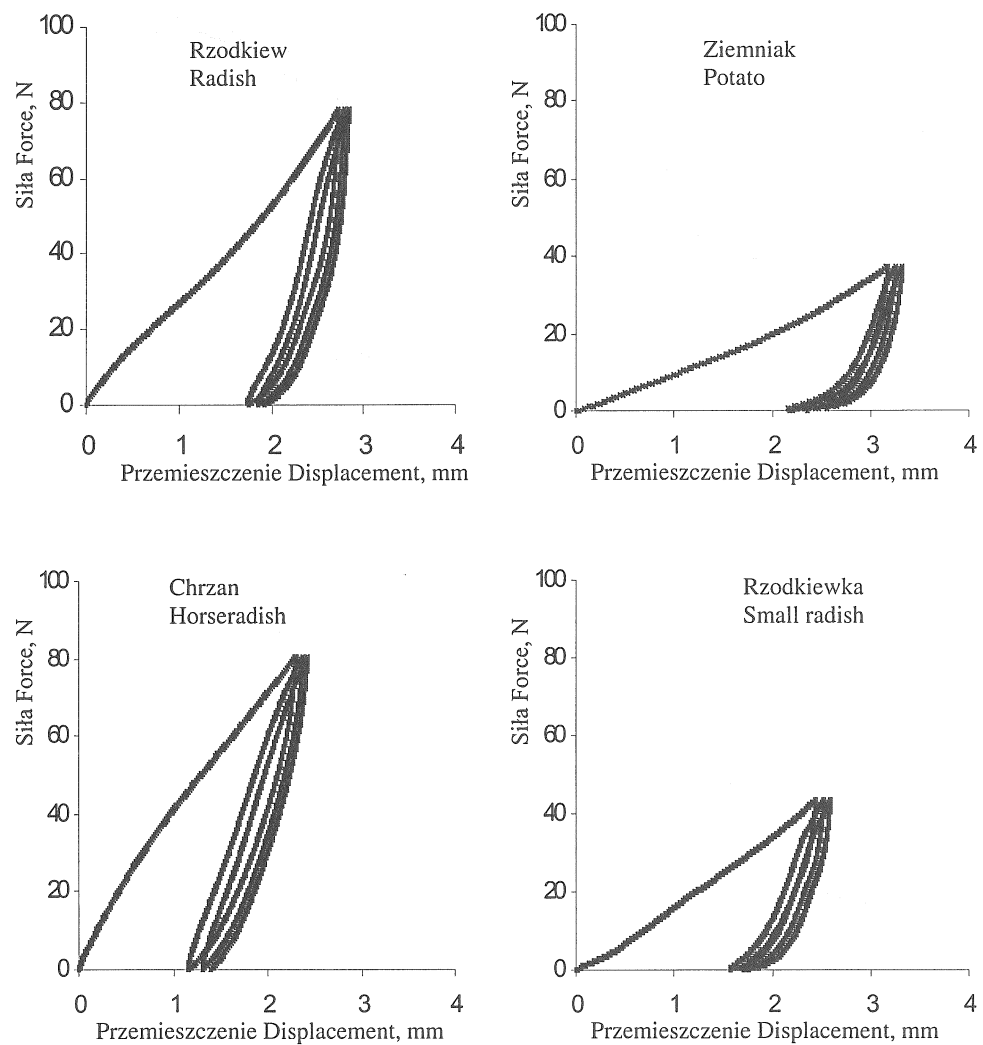
byłyby jednakowe. Teoretyczny przebieg zależności  $\sigma$ - $\varepsilon$  opisuje prosta, przechodząca przez punkt początkowy i końcowy wykresu naprężenie-odkształcenie, jej współczynnik kierunkowy oznaczono jako moduł  $E_S$ . Umowny moduł  $E_C$  odzwierciedla zależność naprężenia i odkształcenia w czasie trwania testu, jego wartość mniejsza lub większa od  $E_S$  świadczy, że rzeczywisty przebieg jest usytuowany poniżej lub powyżej wspomnianej prostej (rys. 1). Analogiczne znaczenie ma moduł  $E_T$ . Jak wynika z zestawienia wartości modułów w tabeli 2, tkanka chrzanu ma inne właściwości mechaniczne w porównaniu z pozostałymi warzywami.

**Tabela 1.** Zestawienie średnich wartości wybranych właściwości fizycznych tkanki warzyw  
**Table 1.** Mean values of the selected physical properties of vegetable tissues

Właściwości fizyczne Physical properties	Obiekt badań Material under investigation								
	Ziemi- niak Potato	Rzod- kiewka Small radish	Seler Celery	Pietru- szka Parsley	Mar- chew Carrot	Burak ćwikł. Red beet	Chrzan Horse radish	Rzod- kiew Radish	
Gęstość Density ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1100	920	900	900	980	1050	940	1040	
Wytrzymałość doraźna Max. stress (MPa)	1,31	1,43	1,51	1,60	1,69	2,16	2,22	3,43	
Zawartość suchej substancji Dry substance (%)	20	5	12	18	11	15	30	12	
Ubytek masy Mass decrement (%)	Test ściskania Com- pression	4	7	3	5	8	4	4	5
	Test histerezy Hysteresis	6	10	6	7	12	9	5	14

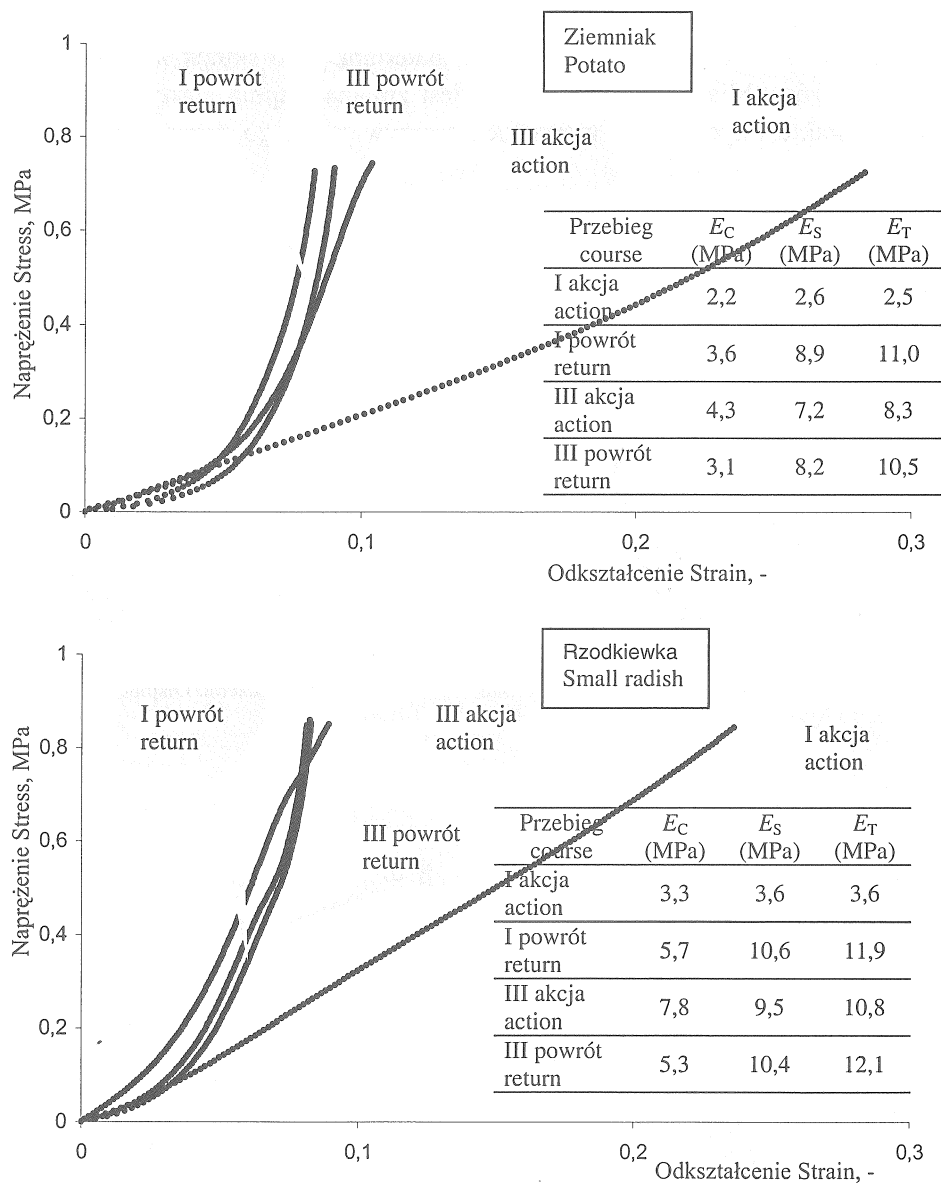
Przykładowe przebiegi zależności pomiędzy siłą i przemieszczeniem w przebiegu pierwszej i trzeciej pętli histerezy, pokazano na rysunku 1. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono sposób wyznaczania wartości  $E_C$ ,  $E_S$ ,  $E_T$ , podczas ściskania i w fazie nawrotu sprężystego. Jak można zaobserwować na podstawie porównania wartości  $E_S$  lub  $E_T$  w trzeciej pętli, uzyskane wyniki są jedynie teoretyczną miarą oporu mechanicznego materiału. Umowny współczynnik  $E_C$  odzwierciedla rzeczywisty przebieg zależności  $\sigma$ - $\varepsilon$ , w fazie nawrotu pozwala określić zdolność do kumulowania energii sprężystej, czyli potencjalną możliwość wykonania pracy.

Porównanie wartości modułów odpowiednio w pierwszej i w trzeciej pętli histerezy, wykazuje pozorne umocnienie materiału, jako skutek zjawiska efuzji cieczy i gazów. Miarą tego umocnienia jest zmiana stopnia elastyczności, przy czym charakterystyczna dla wszystkich warzyw jest jego wartość rzędu 60% w przebiegu trzeciej pętli.



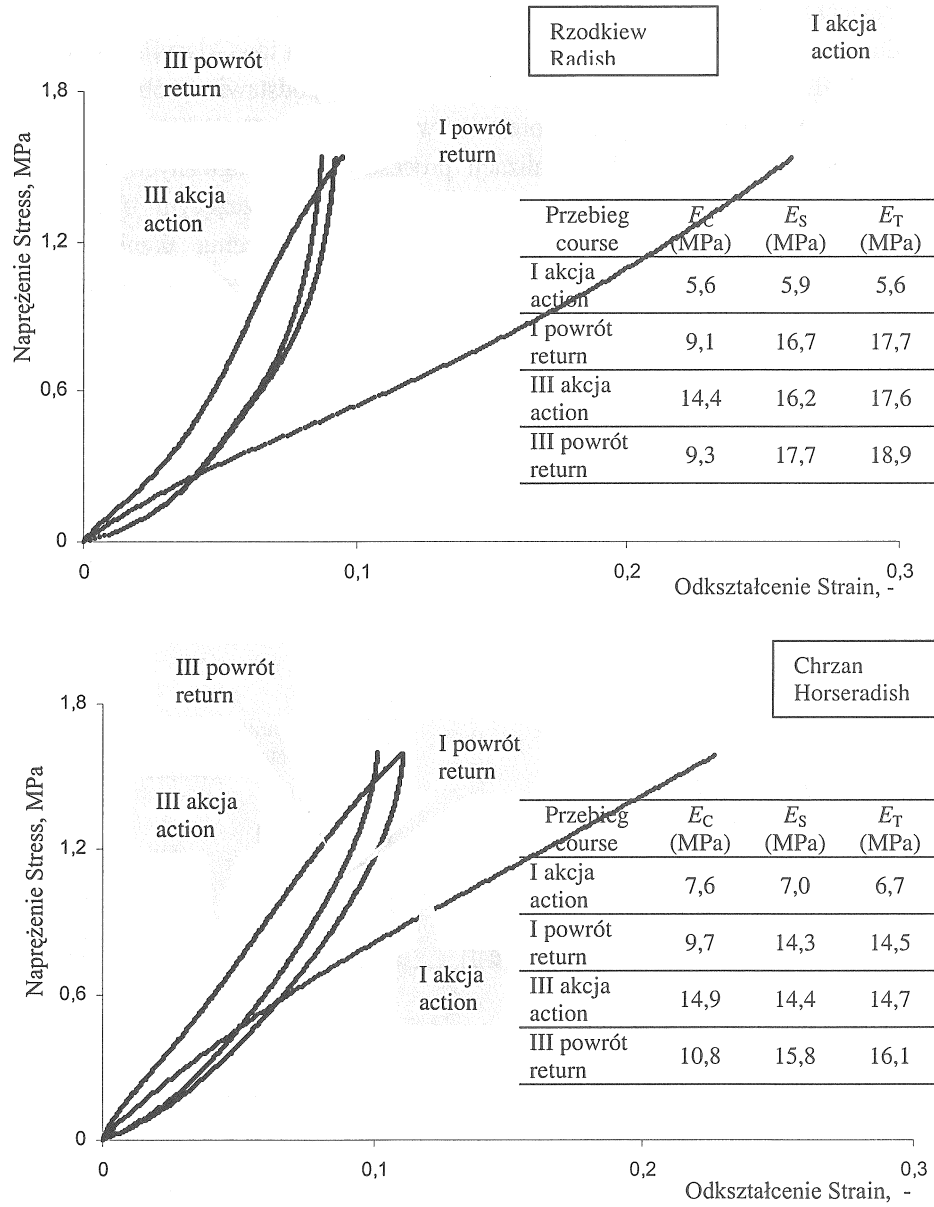
Rys. 1. Przykładowy przebieg histerezy próbek mięszu wybranych warzyw

Fig. 1. An example hysteresis of flesh samples of selected vegetables



Rys. 2. Zależności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem w przebiegu pierwszej i trzeciej pętli histerezy

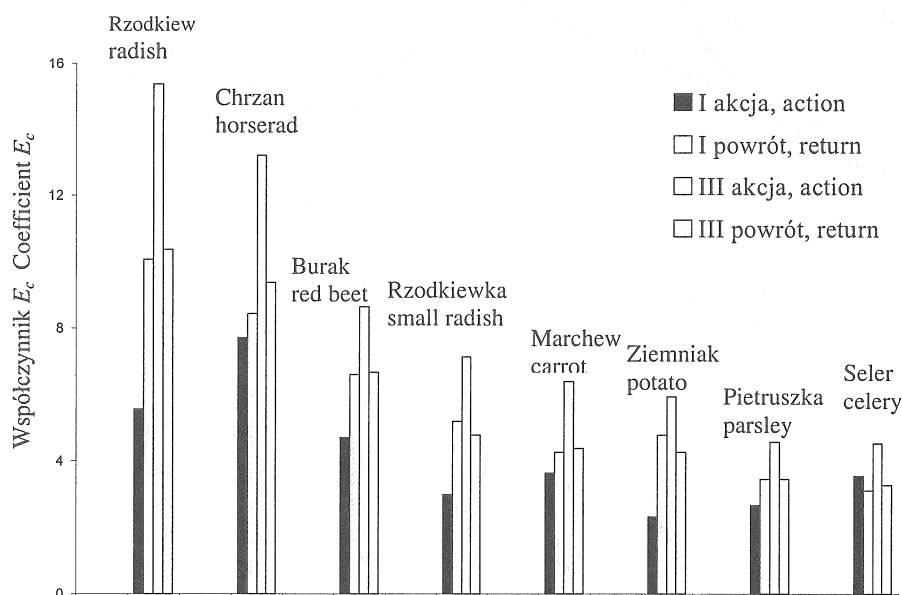
Fig. 2. The stress-strain relation in the course of the first and third hysteresis loops



Rys. 3. Zależności pomiędzy napężeniem i odkształceniem w przebiegu pierwszej i trzeciej pętli histerezy

Fig. 3. The stress-strain relation in the course of the first and third hysteresis loops

Przyjęcie wartości współczynnika  $E_C$  w fazie nawrotu, jako wskaźnika sprężystości struktury szkieletowej badanej tkanki, pozwala na inną klasyfikację warzyw pod względem właściwości mechanicznych, niż na podstawie próby wytrzymałościowej (oznaczenie czarnym kolorem na wykresie, rys. 4). Fakt ten może mieć istotne znaczenie w przypadku realizacji procesów technologicznych, w których surowiec roślinny jest poddawany wielokrotnym nieniszczącym obciążeniom. W takim przypadku wywołanie odpowiedniego odkształcenia tkanki wymaga większego nakładu energetycznego, niż wynika to z obliczeń uwzględniających jedynie wartość  $E_C$ , wyznaczonego na podstawie testu wytrzymałościowego.



Rys. 4. Porównanie średnich wartości współczynnika  $E_C$  w przebiegu pierwszej i trzeciej pętli histerezy mięszu warzyw

Fig. 4. Comparison of coefficient  $E_C$  mean values of vegetable's flesh in course of the first and third hysteresis loops

Analogiczne obliczenia nakładów energetycznych, w których brane są pod uwagę wartości modułów  $E_S$  oraz  $E_T$ , skutkują wielokrotnym zawyżeniem wyników [5], pojawiają się też wątpliwości, co do poprawności ich interpretacji.



## WNIOSKI

1. Zbliżone wartości stopnia elastyczności mięszu warzyw, w trzeciej pętli histerezy, świadczą o podobieństwie procesów pozornego umocnienia materiału, jako skutku obecności zjawisk m.in. filtracji i konsolidacji, podczas testu. Zjawiska te są także przyczyną występowania różnic, pomiędzy wartościami umownego współczynnika sprężystości  $E_C$ , wyznaczonymi podczas testu wytrzymałościowego oraz w warunkach cyklicznego obciążenia.

2. Wyznaczenie umownego współczynnika sprężystości  $E_C$  na podstawie testu histerezy, umożliwi obliczenie nakładów energetycznych, niezbędnych do realizacji wybranych procesów technologicznych. Wartość tego modułu, wyznaczona w fazie sprężystego powrotu, może być uznana jako stała materiałowa, charakteryzująca surowiec. Obliczenia z wykorzystaniem umownych modułów  $E_S$  oraz  $E_T$ , mają tylko znaczenie szacunkowe i nie pozwalają na poprawną interpretację zmian właściwości materiałowych, podczas cyklicznych obciążeń.

## PIŚMIENNICTWO

1. **Blahovec J.:** Jednoduchý model procesu stlačování a mechanického poškození dužnin. Zemědělska Technika, 31(6), 349-364, 1985.
2. **Blahovec J.:** Strength and elasticity of some plant materials. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference, Rostock, 60-66, 1989.
3. **Blahovec J., Patočka K.:** Liquid expression from compressed fleshy products. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference, Rostock, 67-73, 1989.
4. **Bohdziewicz J.:** Właściwości mechaniczne i reologiczne wybranych odmian buraka ćwikłowego. Acta Agrophysica, 45, 17-29, 2001.
5. **Bohdziewicz J.:** Zmienność cech mechanicznych mięszu buraka ćwikłowego w warunkach cyklicznego obciążenia. Inżynieria Rolnicza, 5(38), 213-219, 2002.
6. **Bzowska-Bakalarz M.:** Conventional coefficient of elasticity for sugar beet roots. Int. Agrophysics, 12(3), 193-198, 1996.
7. **Peleg M.:** Considerations of a general rheological model for the mechanical behaviour of viscoelastic solid food materials. Journal of Texture Studies, 7, 243-255, 1976.
8. **Peleg M.:** Application of nonlinear phenomenological rheological models to solid food materials. Journal of Texture Studies, 15, 1-22, 1984.
9. **Pitt R.E.:** Models for the rheology and statistical strength of uniformly stressed vegetation tissue. Trans. of ASAE, 25(6), 1776-1784, 1982.
10. **Sitkei G.:** Mechanics of agricultural materials. Akademiai Kiado, Budapest, 1987.
11. **Tołpa J., Radomski J., Czerwiński W.:** Botanika. PWN, Warszawa, 1974.

## HYSTERESIS OF THE SELECTED VEGETABLE FLESH SAMPLES

*Jerzy Bohdziewicz*

Institute of Agricultural Engineering, University of Agriculture  
ul. Chelmońskiego 37/41, 51-630 Wrocław  
e-mail: bohdziewicz@imr.ar.wroc.pl

**Abstract.** Properties of the cyclically loaded plant tissue may be described by a degree of elasticity and conventional coefficient of direct elasticity  $E_C$ . This paper presents calculations of the breaking stress in the strength test together with some selected physical properties of eight vegetable species. On the basis of hysteresis  $\sigma$ - $\epsilon$ , it was confirmed that the potential for energy accumulation was similar in the material tested. The conventional coefficient  $E_C$  characterized the actual value of the deformation resistance and enabled calculations of energy expended during the selected technological processes.

**Key words:** vegetables, hysteresis, elastic modulus