

Jerzy Bohdziewicz  
Instytut Inżynierii Rolniczej  
Akademia Rolnicza we Wrocławiu

## WPŁYW ZRÓŻNICOWANIA MORFOLOGICZNEGO NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE BOCZNYCH PĘDÓW KAPUSTY BRUKSELSKIEJ

### Streszczenie

Niejednorodność morfologiczna i nieciągłość struktury bocznych pędów kapusty brukselskiej, jest przyczyną niejednorodnego przebiegu odkształcenia, w zadanych warunkach obciążenia. Obliczono wartości nakładów energetycznych oraz umownego współczynnika sprężystości, na podstawie przebiegów siła – przemieszczenie, podczas testów ściskania i histerezy odkształceń. Analizowano także przebieg kumulacji i rozproszenia energii sprężystej, na podstawie testów reologicznych. Stwierdzono, że wytrzymałość i poziom nakładów energetycznych w kierunku osiowym, są kilkakrotnie mniejsze niż w kierunku do niego prostopadłym. Stała wartość średnia pozornego współczynnika sprężystości świadczy o tym, że anizotropia właściwości mechanicznych bocznych pędów kapusty brukselskiej ma charakter pozorny i jest konsekwencją przebiegu zjawiska konsolidacji.

**Słowa kluczowe:** kapusta brukselska, sprężystość, histereza, właściwości reologiczne

### Wprowadzenie

Podczas transportu i składowania, boczne pędy kapusty brukselskiej (*Brassica oleracea L. var. gemmifera*) narażone są zarówno na oddziaływanie obciążeń o charakterze statycznym, jak i czasowo zmiennym. Na podstawie wyznaczonych charakterystyk siła-przemieszczenie możliwe jest obliczenie nakładów energii mechanicznej, związanych z odkształceniem postaciowym i objętościowym. Kuliasty lub owalny kształt pędów uniemożliwia przeprowadzenie bezpośrednich obliczeń naprężeń wewnętrznych, ze względu na niejednakowe rozmiary pola przekroju poprzecznego oraz niejednorodność struktury obiektu badań. Pomimo stosunkowo zwartej konstrukcji sferycznie ułożonych liści, nie można mówić o dekohezji wewnątrz strukturalnej, jako zjawisku charakterystycznym dla wytrzymałości granicznej materiału. Uniemożliwia to wykorzystanie metod obliczeniowych wielkości naprężeń wewnętrznych i modułów sprężystości brył

o przekrojach owalnych, na podstawie teorii naprężeń kontaktowych Hertza i Boussinesqa [Baryeh 2000; Blahovec 1991; Blahovec 2001; Rao i Rizvi 1995].

Specyficzna budowa zgrubienia jadalnego może być przyczyną niejednakowych odkształceń, zależnie od kierunku przyłożenia obciążenia. Układ autonomicznych liści, sferycznie wyrastających ze skróconej łodygi, może ulegać przemieszczeniom zarówno w kierunku oddziaływania sił zewnętrznych, jak i w kierunku do niego prostopadłym. Aby w pełni scharakteryzować przydatność bocznych pędów kapusty brukselskiej jako surowca spożywczego, konieczne jest, poza określeniem kształtu i rozmiarów, także wyznaczenie innych cech fizycznych, a w szczególności właściwości mechanicznych i reologicznych. Badania tekstury z wykorzystaniem penetratora (zagadnienie naprężeń kontaktowych Boussinesqa), wykluczają możliwość oceny zróżnicowania oporów mechanicznych, związanego z orientacją przestrzenną obiektu badań [Blahovec 1994; 2001].

Celem pracy było wyznaczenie położenia tzw. biologicznego punktu ustąpienia (bioyield point) oraz maksymalnej siły  $F_{max}$  w przebiegu zależności siła – przemieszczenie oraz obliczenie pozornego współczynnika sprężystości, na podstawie obliczeń nakładów energetycznych przy odkształceniu pędów, ściskanych między równoległymi płytami. Dodatkowym celem było ustalenie zdolności kumulacji energii sprężystej, podczas obciążeń cyklicznych histerezy odkształceń, oraz obliczenie wartości parametrów, charakteryzujących umowną sprężystość i lepkość dynamiczną, w zadanych warunkach realizacji testów pełzania i relaksacji naprężeń.

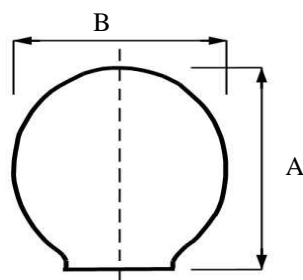
## **Materiał i metody**

Badano pędy boczne kapusty brukselskiej odmiany Maczuga, selekcyjonowane pod względem rozmiarów w trzech kierunkach, i kształtu (kuliste i stożkowe).

Materiał zbierano ręcznie z jednego pola i przechowywano przez 3 do 5 dni w suchym, przewiewnym pomieszczeniu. Do badań wybierano pędy boczne o średnicach w przedziale 20 do 40 mm (pomiar w trzech wzajemnie prostopadłych do siebie kierunkach). W odniesieniu do każdego egzemplarza zastosowano standardowe metody wyznaczania gęstości oraz wilgotności materiału (metoda suszarkowa). Gęstość zawierała się w przedziale od 810 do 1180 kg/m<sup>3</sup>, wartość średnia dla 250 pomiarów wynosiła 1002 kg/m<sup>3</sup>. Zawartość suchej substancji w stosunku do masy całkowitej mieściła się w zakresie od 15% do 22% (wartość średnia 18%).

Przeprowadzono test wytrzymałościowy i histerezy odkształceń w warunkach quasi-statycznych, na maszynie wytrzymałościowej typu Instron 5566. Wykorzystano

głowicę tensometryczną 2525–806 o zakresie do 1 kN, przemieszczaną z prędkością 2 mm/min. Na podstawie relacji siła - przemieszczenie obliczano wielkość nakładów energetycznych aż do momentu pojawienia się tzw. punktu ustąpienia (bioyield point), wykorzystano przy tym metodę całkowania numerycznego. Na podstawie równania Clapeyrona obliczano energię właściwą jako sumaryczny nakład pracy, przypadający na jednostkę objętości. Aby skorygować błędy powstałe przy obliczaniu objętości, uzyskany wynik dzielono przez masę obiektu badań. Do obliczeń pozornego modułu sprężystości, przyjęto hipotezę energetyczną Beltramiego dla jednoosiowego stanu naprężenia. Jednocześnie wyznaczano największą wartość siły  $F_{max}$ , definiowaną jako granicę wytrzymałości biologicznej [Blahovec 2001]. Badania przeprowadzono w kierunku osi podłużnej rośliny oraz w kierunku do niego prostopadłym (rys.1).



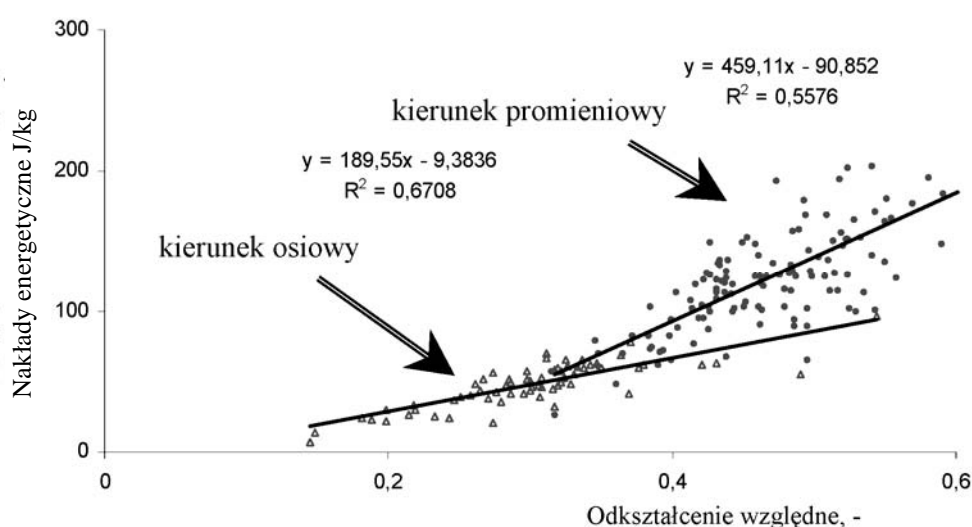
Rys. 1. Schematyczne oznaczenie kierunków odkształcenia podczas ściskania pędu bocznego kapusty brukselskiej : A – osiowy, B – promieniowy

Fig.1. The signature of deformation directions during the compression of Brussels sprouts: A- axial, B - radial

Przeprowadzono także obliczenia nakładów energetycznych dla trzech pętli histerezy odkształceń, wstępne obciążenie było ustalone na poziomie 50% średniej wartości siły  $F_{max}$ . Na podstawie uzyskanych wyników porównano pracę odkształcenia całkowitego w fazie ściskania oraz zdolność kumulacji energii sprężystej w fazie nawrotu. Stosunek zakumulowanej energii sprężystej do sumarycznej pracy związanej z odkształceniem, określano jako stopień elastyczności materiału. Ustalony poziom naprężenia wstępnego, równy 50% średniej wartości  $F_{max}$ , wykorzystano również podczas realizacji testów reologicznych. Badano zjawisko pełzania w czasie 1300 sekund. Reakcję materiału na zadane warunki obciążenia charakteryzowano wartością współczynników umownej sprężystości oraz pozornej lepkości, jako parametrów modelu Burgersa [Datta, Morrow 1983]. Obserwowano także zjawisko relaksacji naprężeń, jego przebieg opisano wartością parametrów adaptacji modelu Maxwella jako analogii modelu Burgersa dla pełzania [Jeong i in. 1997].

## Wyniki badań

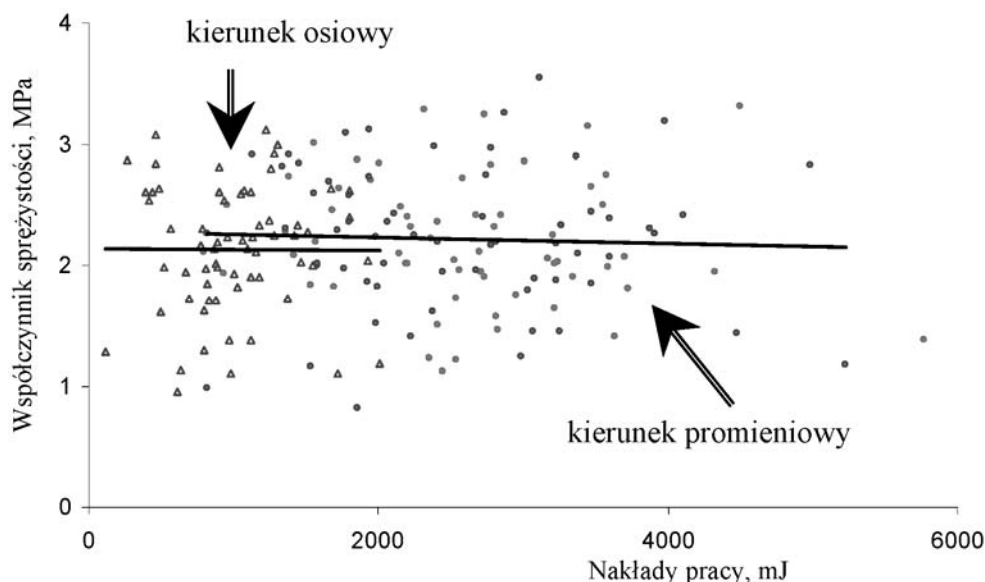
Zestawienie obliczeń nakładów pracy, przeliczonych na jednostkę masy, dla obu kierunków ściskania, pokazano na rysunku 2. Nakłady energetyczne podczas ściskania w kierunku osiowym są zdecydowanie mniejsze niż w kierunku poprzecznym. Wynika to m.in. z możliwości wzajemnych przemieszczeń względem siebie liści, tworzących pęd boczny kapusty brukselskiej oraz przebiegu zjawiska konsolidacji. Kształt badanego surowca nie miał w tym wypadku istotnego znaczenia.



Rys. 2. Nakłady energetyczne przeliczone na jednostkę masy, w zestawieniu z wartością odkształcenia względnego. Test wytrzymałościowy

Fig. 2. Energy outlays counted on the mass unit in confrontation with the strain value. The stress-test

Na rysunku 3 przedstawiono wartości pozornego współczynnika sprężystości oraz pracy odkształcenia. Z zestawienia tego wynika, że wartość średnia tego współczynnika, dla obu kierunków obciążenia, jest jednakowa. Na tej podstawie można stwierdzić, że nie występuje zróżnicowanie oporów mechanicznych, brak jest także jednoznacznej korelacji z wielkością nakładów energetycznych. Z uwagi na znaczny rozrzut uzyskanych wyników można wnioskować, że przebieg zjawisk zachodzących podczas ściskania obiektu badań, ma charakter stochastyczny.

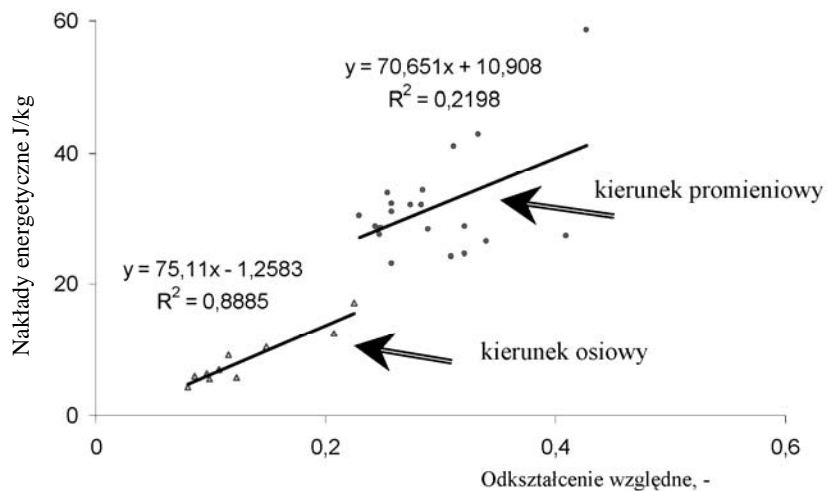


Rys. 3. Zestawienie pozornego współczynnika sprężystości oraz pracy odkształcenia, test wytrzymałościowy

Fig. 3. Composition of the apparent coefficient of elasticity and deformation energy. The stress-test

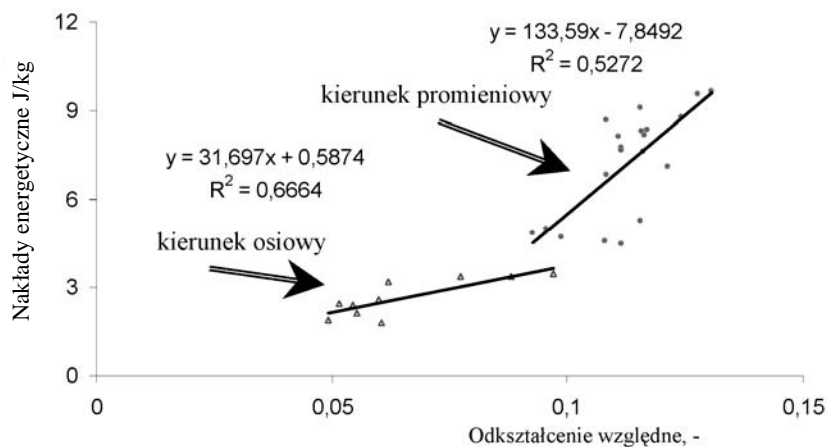
Rysunek 4 przedstawia zależność pomiędzy wielkością nakładów energetycznych a uzyskanym odkształceniem, obserwowaną w fazie ściskania pętli histerezy odkształceń. Z zapisu równań prostych aproksymacji wynika, że kierunek obciążenia nie ma istotnego znaczenia. Występują jednak różnice zdolności kumulacji energii sprężystej, obserwowane w fazie nawrotu sprężystego (rys. 5). Ten sam materiał w niejednakowy sposób powraca do kształtu pierwotnego, można przypuszczać, że decyduje o tym ułożenie liści i sposób ich wzajemnego przemieszczania się względem siebie.

Zestawienie średnich wartości pozornego współczynnika sprężystości, w przebiegu pierwszej i trzeciej pętli histerezy, przedstawiono na rysunku 6. Można zauważyć brak jakichkolwiek zależności pomiędzy wartościami oporów mechanicznych a kierunkiem obciążenia. Zauważalne natomiast jest zróżnicowanie nakładów energetycznych, jak i poziomu kumulowanej energii sprężystej (rys. 7). Z porównania obu rysunków wynika, iż anizotropia właściwości mechanicznych bocznych pędów kapusty brukselskiej ma charakter pozorny i jest konsekwencją niejednakowych przebiegów zjawiska konsolidacji.



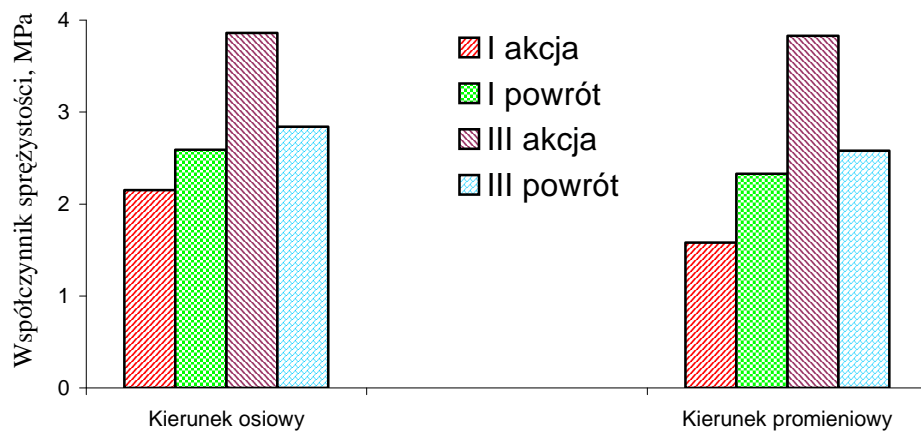
Rys. 4. Relacje pomiędzy odkształceniem a poziomem energii w przeliczeniu na jednostkę masy. Faza ściskania pierwszej pętli histerezy odkształceń

Fig. 4. Accounts among the deformation and energy level in the count on the mass unit. Phase of the compression in the first hysteresis loop

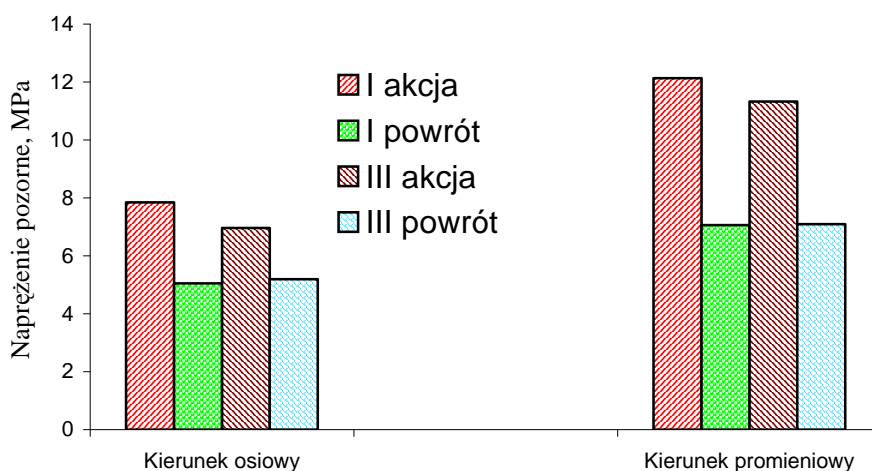


Rys. 5. Relacje pomiędzy odkształceniem a poziomem energii w przeliczeniu na jednostkę masy. Faza nawrotu sprężystego pierwszej pętli histerezy odkształceń

Fig. 5. Accounts among the deformation and energy level in the count on the mass unit. Phase of the elastic return in the first hysteresis loop



Rys. 6. Zestawienie średnich wartości pozornego współczynnika sprężystości, w przebiegu pierwszej i trzeciej pętli histerezy odkształceń  
 Fig. 6. Composition of mean values of the apparent coefficient of elasticity in course of the first and third hysteresis loop



Rys. 7. Porównanie obliczonych średnich wartości pozornego napężenia, przebiegi pierwszej i trzeciej pętli histerezy odkształceń  
 Fig. 7. Comparison of calculated mean values of the apparent stress, courses of the first and third hysteresis loops

Podobny wniosek można wysnuć na podstawie porównania średnich wartości parametrów, charakterystycznych dla modelu Burgersa, zestawionych w tabeli 1. Pewne zróżnicowanie intensywności dyssypacji nagromadzonej energii, obserwowane podczas testu relaksacji naprężeń, może być konsekwencją zróżnicowania morfologicznego w przekroju podłużnym i poprzecznym obiektu badań. Miarą tego są wartości współczynników pozornej lepkości dynamicznej, różne dla obu kierunków orientacji przestrzennej.

*Tabela 1. Zestawienie średnich wartości współczynników sprężystości i lepkości pozornej jako parametrów modelu Burgersa. Test pełzania i relaksacji naprężeń*

*Table 1. Composition of mean values of the coefficients of elasticity and the apparent viscosity as parameters of the Burgers model. The creep and relaxation tests*

Parametry modelu Burgersa	Test pełzania		Test relaksacji naprężeń	
	kierunek osiowy	kierunek promieniowy	kierunek osiowy	kierunek promieniowy
Współczynnik sprężystości E	8,5 MPa	10,3 MPa	6,3 MPa	4,1 MPa
Współczynnik lepkości $\eta$	0,11 GPa·s	0,11 GPa·s	0,37 GPa·s	0,28 GPa·s
Współczynnik lepkości $\eta_a$	3,9 GPa·s	4,8 GPa·s	6,1 GPa·s	2,9 GPa·s

## Wnioski

1. Niejednorodność morfologiczna i nieciągłość struktury, jest przyczyną zróżnicowania nakładów energetycznych oraz niejednakowego przebiegu odkształcenia, podczas testu ściskania bocznych pędów kapusty brukselskiej. Wytrzymałość mechaniczna w kierunku osi podłużnej jest kilkakrotnie mniejsza niż w kierunku do niego poprzecznym. Stwierdzono także istotne różnice zdolności kumulacji energii sprężystej oraz przebiegu jej dyssypacji, zależnie od kierunku przyłożenia obciążenia.
2. Średnia wartość pozornego współczynnika sprężystości (jako miary oporu mechanicznego) jest jednakowa, niezależnie od poziomu nakładów energetycznych i kierunku obciążenia. Brak jakichkolwiek wzajemnych korelacji świadczy o tym, że anizotropia właściwości mechanicznych bocznych pędów kapusty brukselskiej ma charakter pozorny i jest konsekwencją przebiegu zjawiska konsolidacji.



## **Bibliografia**

- Baryeh E.A. 2000. Strength properties of avocado pear. *J. agric. Engng. Res.* 76, s. 389-397
- Blahovec J. 1991. Stlacovani duzniateho plodu s tuhou slupkou mezi dvema deskami – matematicky model. *Zem. Techn.* 37(7), s. 383-389.
- Blahovec J. 1994. Elastic and strength properties of round agricultural products. *Int. Agrophysics* 8, s. 543-546.
- Blahovec J. 2001. Static mechanic and texture of fruits and vegetables. *Research in Agricultural Engineering* 47(4), s. 144-169.
- Datta A., Morrow C. T. 1983. Graphical and computational analysis of creep curves. *Trans. of ASAE* 26(6), s. 1870-1874.
- Jeong H.S. et al. 1997. Stress relaxation characteristics of some vegetables, *Journal of Horticulture Science* 39(2), s. 122-126.
- Rao M.A., Rizvi S.S.H. 1995. *Engineering properties of foods*. Marcel Dekter Inc. New York.

## **EFFECTS OF MORPHOLOGICAL DIVERSIFICATION ON THE MECHANICAL PROPRIETIES OF BRUSSELS SPROUTS**

### **Summary**

The morphological inhomogeneity and discreteness of Brussels sprouts structure is at the bottom of not alike course of deformation in given load conditions. It was counted values energy and the conventional coefficient of the elasticity on base the force - dislocation courses during the compression and hysteresis tests. Course of the accumulation and dispersion of the stored energy on base rheological tests, were analyzed too. It was found that the strength and energy level toward axial were several times less than toward normal to him. The constant mean value of the apparent coefficient of elasticity testifies hereof that the anisotropy of mechanical properties of Brussels sprouts has an apparent character and it is a consequence of the consolidation phenomenon.

**Key words:** Brussels sprouts, elasticity, hysteresis, rheological properties