

## WPLYW WIELOKROTNEGO OBCIĄŻANIA KORZENIA MARCHWI NA WARTOŚĆ NACISKÓW POWIERZCHNIOWYCH

*Roman Stopa, Bogdan Stępień, Piotr Komarnicki, Małgorzata Porczyk  
Instytut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu*

**Streszczenie.** Przedstawiono wyniki pomiarów nacisków powierzchniowych korzeni marchwi przy sześciokrotnym obciążaniu próbki o dwóch wielkościach średnic dla trzech wartości i trzech prędkości wymuszenia siły promieniowej. Obciążenia generowano przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej Instron 5566 wyposażonej w głowicę roboczą o płaskiej powierzchni. W rezultacie otrzymano 540 obserwacji, z czego 270 przypadało na każdą średnicę próbki, a po 180 na prędkość i wartość wymuszanego obciążenia. Do każdej wartości poszczególnych parametrów obliczano wartość średnią, odchylenie standardowe, błąd standardowy i 95% przedział ufności dla wartości średniej. Przeprowadzono wieloczynnikową analizę wariancji w celu określenia wpływu średnicy próbki oraz wielkości i prędkości generowania obciążenia na wartość nacisków powierzchniowych. Otrzymane wyniki porównano z wartościami teoretycznymi obliczonymi w oparciu o wzory Hertz'a. W trakcie procesu sześciokrotnego obciążania próbki, wartości nacisków powierzchniowych uległy redukcji w czterech pierwszych cyklach, po których następowała ich wyraźna stabilizacja. Wartości nacisków powierzchniowych, obliczone w oparciu o wzory Hertz'a, są wyraźnie wyższe od wartości otrzymanych na drodze doświadczalnej.

**Słowa kluczowe:** naciski powierzchniowe, korzeń marchwi, ściskanie, wielokrotne obciążanie, wzory Hertz'a

### Wstęp

Warzywa i owoce w trakcie zbioru, przeładunku, transportu, sortowania i innych zabiegów niezbędnych do uzyskania wyrobu końcowego poddane są różnorodnym obciążeniom statycznym, dynamicznym i udarowym. Duże znaczenie dla odpowiedniej jakości surowca mają uszkodzenia powstałe w wyniku działania wielokrotnie powtarzających się obciążeń ściskających. W procesie ściskania materiałów pochodzenia biologicznego następują nieodwracalne zmiany w budowie struktury wewnętrznej, polegające najczęściej na uszkodzeniu tkanek, mające wpływ na ich właściwości wytrzymałościowe. Właściwości mecha-

niczne tkanek zbudowanych z komórek podstawowych zależą od zewnętrznego obciążenia [Bajema i in. 1998; Pitt, Chen, 1983; Zdunek 2001] oraz specyficznych właściwości tkanek jak np. ciśnienie turgoru, które ulega zmianie pod wpływem obciążenia [Konstankiewicz, Zdunek 2001; Murase i in. 1980; Pitt 1982; Pitt, Chen 1983].

W początkowej fazie obciążania po wyparciu gazów i wypełnieniu przestrzeni komórkowych rozpoczyna się proces migracji cieczy powodującej odkształcenia ścian komórkowych [Blachowec 1985]. Powstaje rodzaj umocnienia materiału, będący skutkiem przeniesienia obciążenia przez składniki tkanki roślinnej o wyższej wytrzymałości, jakimi są ściany komórkowe [Konstankiewicz i in. 1996, 1998; Lippert 1995]. Zniszczenie ścian komórkowych i wypływ cieczy na zewnątrz komórek rozpoczynają proces prowadzący do powstania zjawisk o charakterze nieodwracalnym powodujących zniszczenie materiału. Każde kolejne obciążenie stwarza sytuację, w której zmieniają się parametry początkowe procesu ściskania.

Poznanie wpływu ilości cykli obciążania na wartość nacisków powierzchniowych ma ważne znaczenie praktyczne pozwalające na rozwiązywanie problemów związanych np. z oceną stopnia odporności surowca rolniczego na uszkodzenia związane z wielokrotnym obciążaniem oraz z określeniem jakości przechowalniczej po zabiegach mających na celu pozyskanie surowca rolniczego.

Ze uwagi na charakterystyczny kształt produktów rolniczych znaczący wpływ na rodzaj i wielkość uszkodzenia mają obciążenia kontaktowe polegające na działaniu siły skupionej na małą powierzchnię. Problem zagadnień kontaktowych w stosunku do materiałów pochodzenia biologicznego najpełniej został opisany w odniesieniu do jabłek. Najczęściej prowadzone są badania doświadczalne zmierzające do pomiaru zmian pola powierzchni styku jabłka z elementem roboczym maszyny wytrzymałościowej pod działaniem sił zewnętrznych [Herold i in. 2001; Rabelo i in. 2001; Lewis i in. 2008]. Często do wyznaczenia nacisków powierzchniowych wykorzystywane są wzory Hertza, chociaż zostały one wyprowadzone przy założeniach wykluczających zastosowanie ich do obiektów pochodzenia biologicznego. Mimo tych ograniczeń badania niektórych autorów wykazały, że zastosowanie teorii sprężystości może w wielu przypadkach prowadzić do budowy godnych zaufania wskaźników opisujących współpracę między najważniejszymi zmiennymi, takimi jak nacisk powierzchniowy i czas kontaktu, chociaż błędy w ocenach powierzchni kontaktu mogą sięgać 20% [Siyami i in. 1988]. Ze względów praktycznych należy sprawdzić pod względem ilościowym przydatność wzorów Hertz'a do obliczania nacisków powierzchniowych powstających w procesie przetwórstwa owoców i warzyw. Rabelo [2001] zastosował metodę Hertza do analizy zagadnień kontaktowych dla pomarańczy, jednak otrzymane wyniki wskazały wyraźnie na ograniczenia stosowania tej teorii w odniesieniu do tak złożonych materiałów jak miąższ owoców.

## Cel badań

Celem badań było wyznaczenie zmian wartości nacisków powierzchniowych korzenia marchwi w zależności od wartości obciążenia maksymalnego, prędkości wymuszenia obciążenia oraz średnicy próbki podczas sześciu cykli ściskania promieniowego oraz porównanie wartości nacisków powierzchniowych wyznaczonych w próbie ściskania z wartościami teoretycznymi obliczonymi w oparciu o wzory Hertza.

## Metodyka i przedmiot badań

Pomiary przeprowadzono w Instytucie Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Do badań wykorzystano maszynę wytrzymałościową INSTRON 5566 wyposażoną w głowice tensometryczną o zakresie pomiarowym do 1 kN. Maszyna stale współpracowała z komputerem stacjonarnym na którym zainstalowano program Bluehill pozwalający na sterowanie przebiegiem testu oraz rejestrację i opracowanie wyników badań.

Do badań przeznaczono starannie wyselekcjonowane korzenie marchwi odmiany *Karotka* pochodzące z gospodarstwa rolnego w Ramiszowie pod Wrocławiem. W czasie trwania pomiarów surowiec przechowywano w warunkach zapewniających mały ubytek wilgoci. Próbkę przeznaczoną do testów pobierano za pomocą przyrządu zapewniającego powtarzalność wymiarów oraz zachowanie równoległości przekrojów poprzecznych [Stopa 2010]. Korzenie ze względu na średnicę podzielono na dwie grupy. Pierwsza zawierała marchew o średnicy  $\varphi_1$  mieszczącej się w przedziale od 25 do 30 mm, natomiast druga o średnicy  $\varphi_1$  z przedziału od 35 do 40 mm. Z każdego korzenia marchwi wycięto 6 próbek w postaci plastrów o grubości 10 mm ze środkowej strefy. Jedna z próbek przeznaczona była do wyznaczenia granicznych wartości obciążenia promieniowego, natomiast pozostałe zostały wykorzystane w teście wielokrotnego obciążania przy różnych wartościach siły początkowej. Test ściskania przeprowadzono do momentu osiągnięcia granicy wytrzymałości biologicznej, co pozwoliło na wyznaczenie wartości siły niszczącej  $F_{\max}$  będącej podstawą do obliczenia wartości maksymalnego obciążenia próbki  $F_{10}=10\%F_{\max}$ ,  $F_{20}=20\%F_{\max}$  oraz  $F_{30}=30\%F_{\max}$ .

Test wielokrotnego obciążania przeprowadzono pomiędzy dwiema płaskimi płytami przy zastosowaniu przyrządu pozwalającego na pomiar powierzchni styku próbki z podporą [Stopa 2010]. Pomiar powierzchni styku przeprowadzono za pomocą programu Irys Laboratorium. Pomiary przeprowadzono przy trzech wartościach obciążenia maksymalnego  $F_{010}=41\text{ N}$ ,  $F_{020}=83\text{ N}$  i  $F_{030}=102\text{ N}$ , przy trzech wartościach prędkości zadawania obciążenia  $v_1 = 1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $v_2 = 2,5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $v_3 = 5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  dla sześciu cykli obciążenia w 5 powtórzeniach.

Wyniki pomiaru pola powierzchni styku próbki z podłożem pozwoliły na obliczenie średnich wartości nacisków powierzchniowych  $p_{\text{sr}}$ :

$$p_{\text{sr}} = \frac{F}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

gdzie:

- $F$  – siła obciążająca [N],
- $A$  – pole powierzchni styku [ $\text{mm}^2$ ].

Przyjmując eliptyczny rozkład nacisków wzdłuż powierzchni styku, wartości nacisków maksymalnych  $p_{\text{sr max}}$  można wyznaczyć ze wzoru:

$$p_{\text{sr max}} = p_{\text{sr}} \cdot \frac{4}{\pi} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

Według teorii Hertza wartość maksymalnych teoretycznych nacisków powierzchniowych  $p_{H \max}$  obliczono ze wzoru:

$$p_{H \max} = \sqrt{\frac{F'}{R \cdot k \cdot \pi}} \quad [\text{Mpa}] \quad (3)$$

gdzie :

- $F' = F/l$  – siła docisku przypadająca na jednostkę długości obszaru styku [N/mm],  
 $R$  – promień ściskanej próbki [mm].

$$k = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad [-] \quad (4)$$

gdzie :

- $\nu_1, \nu_2$  – stała Poissona odpowiednio: dla stali  $\nu_1 = 0,3$  i badanego materiału  $\nu_2 = 0,46$   
 $E_1, E_2$  – moduł sprężystości wzdłużnej odpowiednio dla stali  $E_1 = 2,1 \cdot 10^5$  [MPa]  
 i badanego materiału  $E_2 = 12$  [MPa]

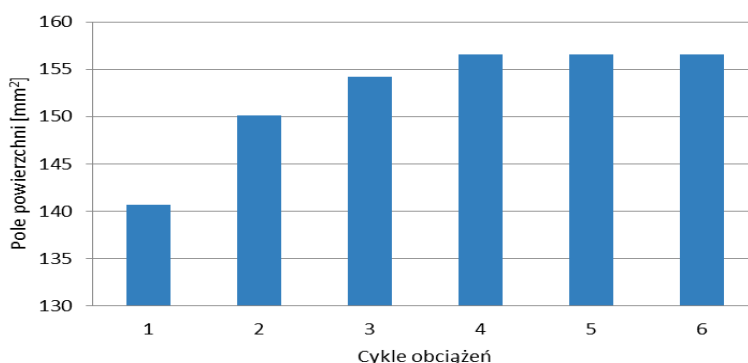
Wyniki pomiarów poddano obróbce statystycznej za pomocą programu Statistica. Analizie poddano 540 obserwacji z czego 270 przypadało na każdą średnicę próbki, a po 180 na prędkość i wartość wymuszanego obciążenia. Do każdej wartości poszczególnych cech obliczano wartość średnią, odchylenie standardowe, błąd standardowy i 95% przedział ufności dla wartości średniej. W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wyniki analizy statystycznej obejmującej wyznaczenie nacisków powierzchniowych dla próbek o średnicy  $\varphi_2$ , prędkości generowania obciążenia  $v_1$  oraz obciążenia  $F_{20}$ .

W celu sprawdzenia wpływu średnicy próbki, wartości i prędkości generowania obciążenia na moduł sprężystości posłużono się analizą wariancji dla czynników głównych. Hipotezę o jednorodności wariancji w poszczególnych grupach dla każdej cechy poddano testowi Levene'a. Po wykonaniu testów przyjęto, że założenie o jednorodności wariancji jest spełnione dla wybranych zmiennych (wartości  $p$  dla zmiennych jest dużo większa od 5%, co wskazuje na brak przesłanek do odrzucenia hipotezy zerowej mówiącej o jednorodnej wariancji w poszczególnych grupach danej zmiennej). Następnie przeprowadzono analizę wariancji wieloczynnikowej. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zarówno wartość, średnica próbki jak i prędkość generowania obciążenia wpływają istotnie na wartość nacisków powierzchniowych (dla zmiennych wartość  $p$  jest dużo mniejsza od 5%, co pozwala odrzucić hipotezę zerową mówiącą o braku wpływu danej cechy na badaną wielkość).

Na całkowity błąd doświadczalnego wyznaczania nacisków powierzchniowych składały się błędy związane z kształtem próbek, z pomiarem siły nacisku oraz wyznaczeniem pola powierzchni styku próbki korzenia marchwi z podłożem. Ze względu na bardzo staranne przygotowanie próbek do badań, błąd kształtu jako błąd systematyczny można pominąć. Pomiar siły dokonano za pomocą głowicy pomiarowej o zakresie 1 kN i błędzie  $\Delta F = 1$  N. Program Irys Laboratorium pozwala na pomiar pola powierzchni styku z błędem wynoszącym  $\Delta A = 0,1$  mm<sup>2</sup>. Graniczna wartość całkowitego błędu wyznaczonego metodą różniczki zupełnej wynosiła  $u_\sigma = 0,013$ .

## Wyniki badań i ich analiza

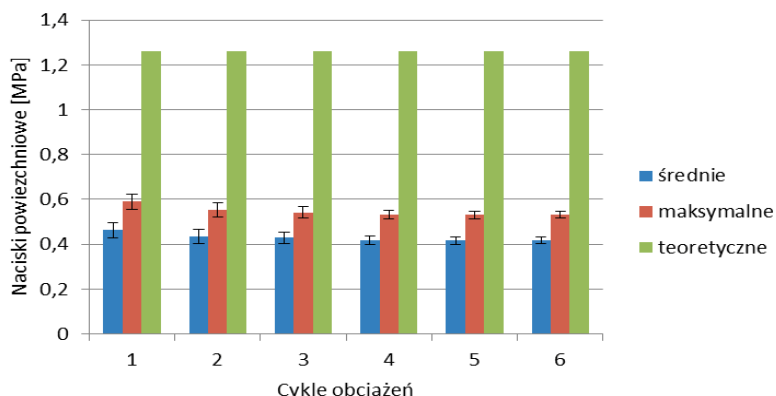
Test cyklicznego obciążania próbki korzenia marchwi realizowany był za pomocą maszyny wytrzymałościowej Instron 5566. Dzięki zastosowaniu oprogramowania Bluehill możliwe było ustawienie w sposób powtarzalny w kolejnych cyklach prędkości przesuwu głowicy oraz wartości obciążenia maksymalnego. Po przeprowadzeniu wstępnych pomiarów zdecydowano się na przyjęciu sześciu cykli.



Źródło: badania własne

Rys. 1. Pole powierzchni styku próbki z elementem obciążającym w kolejnych cyklach obciążenia ( $v_1$ ,  $F_{20}$ ,  $\varphi_2$ )

Fig. 1. The surface area of contact of the sample with a load bearing structure in the following cycles load ( $v_1$ ,  $F_{10}$ ,  $\varphi_1$ )



Źródło: badania własne

Rys. 2. Naciski powierzchniowe  $p_{srmax}$ ,  $p_{sr}$  i  $p_{Hmax}$  w kolejnych cyklach obciążenia ( $v_1$ ,  $F_{20}$ ,  $\varphi_2$ )

Fig. 2. Surface compressions  $p_{srmax}$ ,  $p_{sr}$  i  $p_{Hmax}$  in the following cycles of loading ( $v_1$ ,  $F_{20}$ ,  $\varphi_2$ )

Tabela 1. Wyniki analizy statystycznej ( $v_1$ ,  $F_{20}$ ,  $\varphi_2$ )Table 1. The results of the statistical analysis ( $v_1$ ,  $F_{20}$ ,  $\varphi_2$ )

| Czynnik                                              | Wartość | N | Wartość średnia | Odchylenie standardowe | Błąd standardowy | 95% przedział ufności |       |
|------------------------------------------------------|---------|---|-----------------|------------------------|------------------|-----------------------|-------|
| Średnie maksymalne naciski powierzchniowe $p_{smax}$ | 1 cykl  | 5 | 0,591           | 0,0081                 | 0,003            | 0,582                 | 0,590 |
|                                                      | 2 cykl  | 5 | 0,553           | 0,0070                 | 0,004            | 0,543                 | 0,563 |
|                                                      | 3 cykl  | 5 | 0,542           | 0,0052                 | 0,004            | 0,531                 | 0,553 |
|                                                      | 4 cykl  | 5 | 0,533           | 0,0057                 | 0,003            | 0,525                 | 0,541 |
|                                                      | 5 cykl  | 5 | 0,531           | 0,0035                 | 0,003            | 0,522                 | 0,540 |
|                                                      | 6 cykl  | 5 | 0,532           | 0,0022                 | 0,002            | 0,524                 | 0,540 |

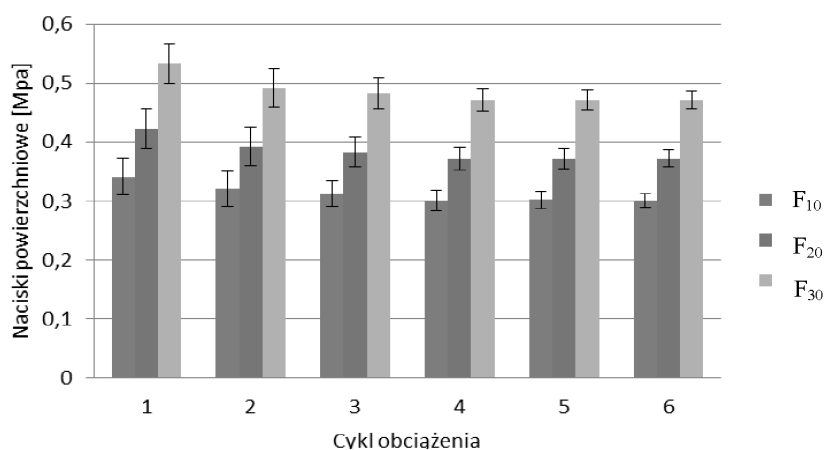
Źródło: badania własne

Wartości nacisków powierzchniowych ulegają wyraźnemu zmniejszeniu w kolejnych cyklach obciążenia (rys. 2, tab. 1). Maksymalne naciski powierzchniowe obliczone z uwzględnieniem eliptycznego rozkładu wzdłuż powierzchni styku próbki z podłożem zmniejszają się od 0,46 MPa w pierwszym cyklu obciążenia do 0,41 MPa w czwartym, co stanowi 11% wartości początkowej. Największa zmiana nacisków powierzchniowych nastąpiła w pierwszym cyklu obciążenia i wynosiła 6,7%. W następnych cyklach obciążenia wartości nacisków powierzchniowych nie ulegają znaczącym zmianom. W rozwiązaniu teoretycznym opartym o wzory Hertza nie ma możliwości uwzględnienia cyklicznych zmian obciążenia, a wartości nacisków mają stałą wartość, zawyżoną w stosunku do wartości doświadczalnych ponad dwukrotnie.

Wartości nacisków powierzchniowych dla próbek korzeni marchwi o średnicy  $\varphi_1$  przy prędkości obciążania  $v_2$  dla trzech wielkości siły promieniowej  $F_{10}$ ,  $F_{20}$  i  $F_{30}$  w kolejnych cyklach obciążenia przedstawione są na rysunku 3. Wielkość siły promieniowej wpływa w sposób oczywisty na wartość nacisków powierzchniowych, natomiast nie ma istotnego wpływu na zmianę wartości nacisków powierzchniowych w kolejnych cyklach obciążenia. Dla trzech przyjętych wartości siły promieniowej zmiana nacisków powierzchniowych (przy prędkości obciążania  $v_1$ , obciążeniu i średnicy próbki  $\varphi_2$ ) wynosiła ok 12% po sześciu cyklach obciążenia, przy czym największy spadek nacisków nastąpił po pierwszym cyklu i wynosił 7%.

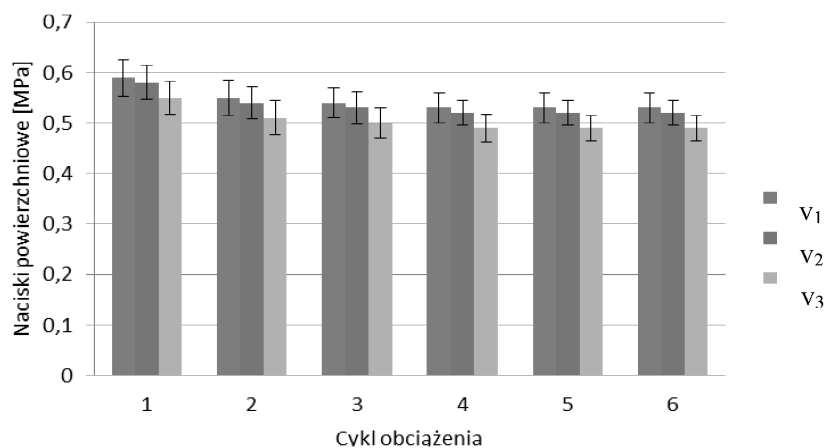
Wpływ prędkości wymuszania maksymalnej siły promieniowej na wartość nacisków powierzchniowych w kolejnych cyklach obciążenia dla próbki o średnicy  $\varphi_1$  przedstawiono na rysunku 4. W miarę wzrostu prędkości obciążania z  $v_1$  do  $v_3$  wartość nacisków w pierwszym cyklu obciążenia zmienia się od 0,59 MPa do 0,55 MPa, a więc o 6,8%. Tendencja ta utrzymuje się również w pozostałych cyklach obciążenia. Od prędkości wymuszania obciążenia nie zależy natomiast zmiana wartości nacisków powierzchniowych w kolejnych cyklach obciążenia i dla trzech wybranych prędkości (przy obciążeniu  $F_{20}$  i średnicy próbki  $\varphi_1$ ) wynosi 11% po sześciu cyklach.

Naciski powierzchniowe zależą w istotny sposób od średnicy próbki. W badanym zakresie średnic  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  różnica wartości nacisków powierzchniowych (przy prędkości wymuszania obciążenia  $v_3$  i sile promieniowej  $F_{20}$ ) wynosił 33% (rys. 5). Wielkość średnicy próbki nie ma wpływu na zmianę wartości nacisków powierzchniowych w kolejnych cyklach obciążenia. Dla średnic próbek  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  zmniejszenie nacisków powierzchniowych po sześciu cyklach obciążenia wynosi 14%.



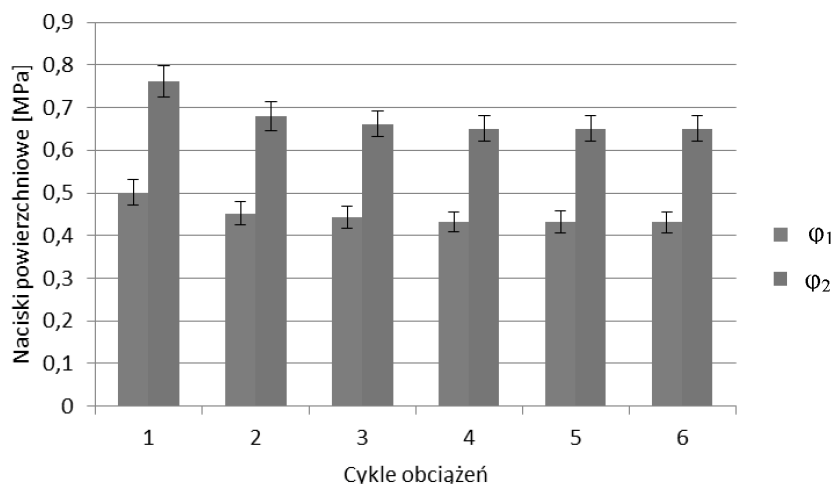
Źródło: badania własne

Rys. 3. Naciski powierzchniowe  $p_{srmax}$  w poszczególnych cyklach obciążenia ( $v_2$ ,  $\varphi_1$ )  
 Fig. 3. Surface compressions  $p_{srmax}$  in the following cycles of loading ( $v_2$ ,  $\varphi_1$ )



Źródło: badania własne

Rys. 4. Naciski powierzchniowe  $p_{srmax}$  w poszczególnych cyklach obciążenia ( $F_{20}$ ,  $\varphi_1$ )  
 Fig. 4. Surface compressions  $p_{srmax}$  in the following cycles of loading ( $F_{20}$ ,  $\varphi_1$ )



Źródło: badania własne

Rys. 5. Naciski powierzchniowe  $p_{srmax}$  w kolejnych cyklach obciążenia ( $v_3$ ,  $F_{20}$ )

Fig. 5. Surface pressure  $p_{srmax}$  in the following cycles of loading ( $v_3$ ,  $F_{20}$ )

## Wnioski:

1. Przy wielokrotnym obciążaniu próbek korzenia marchwi, niezależnie od wielkości siły promieniowej, prędkości wymuszania obciążenia oraz średnicy próbek naciski powierzchniowe ulegają w istotnym stopniu zmniejszeniu (od 11 do 14%) jedynie w czterech pierwszych cyklach obciążenia, przy czym największa zmiana (od 6 do 7%) następuje w pierwszym cyklu.
2. Wielkość siły promieniowej, prędkość wymuszania obciążenia oraz średnica próbek wpływała w istotny sposób ( $p < 0,05$ ) na wartość nacisków powierzchniowych w kolejnych cyklach obciążenia.
3. Obliczanie wartości nacisków powierzchniowych w oparciu o wzory Hertz'a prowadzi do uzyskania wartości dwukrotnie zawyżonych w stosunku do doświadczalnych.

## Bibliografia

- Bajema R. W., Hyde G. M., Baritelle A. L.** (1998): Temperature and strain rate effects on the dynamic failure properties of potato tissue. *Trans. ASAE*, 41(3), 733-740.
- Blahovec J.** (1985b): Resistance of potatoes and similar fleshy vegetable products to mechanical damage. *Papers of the 3<sup>rd</sup> International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Praha*, 57-64.
- Herold B., Geyer M., Studman C.J.** (2001): Fruit contact pressure distributions—equipment. *Comput. Electron. Agric.*, 32, 167-179.

- Konstankiewicz K., Pukos A., Zdunek A.** (1996): Teorie odkształceń materiałów biologicznych w świetle relaksacji naprężeń. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 443, 353-363.
- Konstankiewicz K., Pukos A.** (1998): Metodyczne aspekty w badaniach nad nową mechaniką rolniczych. Inżynieria Rolnicza, 2(3), 5-20.
- Konstankiewicz K., Zdunek A.** (2001): Influence of turgor and cell size on the cracking of potato tissue. Int. Agrophysics, 15, 27-30.
- Lewis R., Yoxall A., Marshall M.B., Canty L.A.** (2008): Characterizing pressure and bruising in apple fruit. Department of Mechanical Engineering, The University of Sheffield, Mappin Street, Sheffield S1 3JD, United Kingdom, Wear, 264 37-46.
- Lippert F.** (1995): Methode zur induktion der Rissbildung bei Sprossknollen von Kohlrabi (*Brassica oleracea* var. *gongylodes* L.). Gartenbauwissenschaft, 60(4), 187-190.
- Murase H., Merva G.E., DeBaerdmaeker J.G., Segerlind L.J.** (1980a): Importance of the water potential concept in studying physical properties of plant materials. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Godólló, 35, 55-63.
- Pitt R.E.** (1982): Models for the rheology and statistical strength of uniformly stressed vegetation tissue. Transactions of the ASAE, 25(6), 1776-1784.
- Pitt R.E., Chen H.L.** (1983): Time-dependent aspects of the strength and rheology of vegetative tissue. Transactions of the ASAE, 26(4), 1275-1280.
- Rabelo G.F., Fabbro I.M., Linares A.W.** (2001): Contact stress area measurement of spherical fruit, Proceedings of Sensors in Horticulture, III, 195-200.
- Siyami S., Brown G.K., Burgess G.J., Gerrish J.B., Tennes B.R., Burton C.L., Zapp R.H.** (1988): Apple impact bruise prediction models. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 41, 1038-1046.
- Stopa R.** (2010): Modelowanie deformacji korzenia marchwi w warunkach obciążeń skupionych metodą elementów skończonych. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.
- Zdunek A., Konstankiewicz K., Gancarz M.** (2001): Failure and acoustic emission of potato tuber tissue of selected varieties in compression tests at various strain rates. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Agricultural Engineering, 4, 2.

## INFLUENCE OF MULTIPLE LOADING OF CARROT ROOT ON THE VALUE OF SURFACE COMPRESSION

**Abstract.** The research results of surface pressure measurements on a carrot root at six-time loading of a two- dimensions sample for three values and three velocities of forcing radial force have been presented. The loads were generated during the use of Instron 5566 testing machine equipped with a flat surface working head. As a result, 540 observations were obtained, out of which 270 for each dimension of a sample, and 180 for velocity and the value of forced load. For each value of particular parameters, a mean value, a standard deviation, standard error and 95% confidence interval for a mean value were calculated. A multi -factorial analysis of variance was carried out in order to determine the influence of the sample diameter and seize and velocity of generating load on the value of surface compression. Obtained results were compared with theoretic values calculated on the ground of Hertz theory. In the course of six-times sample loading, the values of surface compressions were reduced in four first cycles after which clear stabilization occurred. Surface pressure values, calculated on the ground of Hertz theory are clealry higher than values obtained by experiments.

**Key words:** surface compression, carrot root, compression, multiple loading, Hertz theory

**Adres do korespondencji:**

Roman Stopa; e-mail: roman.stopa@up.wroc.pl  
Instytut Inżynierii Rolniczej  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu  
ul. Chelmońskiego 37/41  
51-630 Wrocław