

Gabriel Czachor  
Instytut Inżynierii Rolniczej  
Akademia Rolnicza we Wrocławiu

## DYNAMIKA PROCESÓW ZACHODZĄCYCH W ŚCISKANEJ TKANKANCIE BURAKA ĆWIKŁOWEGO

### Streszczenie

Celem badań była analiza chwilowych stanów próbek buraka ćwikłowego, poddanych testowi jednoosiowego ściskania. Skutki quasi-statycznego ściskania rejestrowano i następnie przetwarzano do postaci: naprężenie, umowny moduł sprężystości, odkształcenie poprzeczne, pochodna funkcji naprężenie-odkształcenie, masa wyciskanej cieczy, wszystko w funkcji odkształcenia. Po przetransformowaniu tych parametrów na wartości względne, zestawiono je na wspólnym, dla każdej próbki wykresie. Zmiany tych wartości konfrontowano z obrazem próbki. Na tej podstawie określono współrzędne punktów charakterystycznych i w oparciu o nie wydzielono trzy etapy deformacji próbki: konsolidacja tkanek, elastoplastyczna reakcja ścianek tkanek oraz plastyczna reakcja ujednorodnionej tkanki.

**Słowa kluczowe:** burak ćwikłowy, deformacja, dynamika, etapy

### Wstęp

Ograniczenie strat części jadalnych warzyw (bulw, korzeni) w trakcie ich zbioru, przechowywania i przetwarzania, wymaga poznania podatności tego surowca na uszkodzenia już we wczesnej fazie ich rozwoju, w szczególności istotne jest poznanie skutków propagacji mikropęknięć. Dlatego wiele uwagi poświęca się badaniom struktury wielofazowego ośrodka o budowie komórkowej [Hamann i in. 1999a; Konstankiewicz i in.1999], oraz tworzeniu modeli matematycznych, opisujących relacje zachodzące pomiędzy naprężeniem a osiowym odkształceniem próbki [Peleg 1984; Blahovec1985; Masi i in. 1997; Zahary i in.2000].

Stosowane równania matematyczne są próbą idealizacji rzeczywistego przebiegu zależności  $\sigma=f(\varepsilon)$ , przy czym wartości współczynników tych równań, wyznaczone empirycznie, często nie mają sensu fizycznego, np., przyjmując wartości ujemne

[Zahary i in. 2000]. Przyjęte dla modeli matematycznych założenie, że wartość naprężenia jest wprost proporcjonalna do zmieniającej się siły i odwrotnie proporcjonalna do stałej wartości powierzchni przekroju jest źródłem istotnych rozbieżności, ponieważ próbki warzyw poddane testom jednoosiowego ściskania podlegają znaczącym odkształceniom osiowym, dochodzącym, do 40%, którym towarzyszą duże, do 30% odkształcenia poprzeczne [Czachor 2004; Czachor 2005]. W konsekwencji, tak przyjęte założenia utrudniają analizę aktualnego stanu próbki w trakcie jej ściskania.

### **Cel badań**

Celem badań była analiza chwilowych stanów próbek realizowana poprzez rejestrację skutków jednoosiowego ściskania, ich przetworzenie i jako wynik, wyznaczenie na wykresie  $\sigma = f(\varepsilon)$  współrzędnych punktów charakterystycznych. Tym samym, celem było określenie umownych przedziałów przemian stanu badanych próbek. Przyjęto przy tym następujące założenie robocze – procesy zachodzące w testowanych próbkach: ich deformacja przestrzenna, filtracja cieczy, efuzja gazów i cieczy prowadzą do kolejnych przemian stanu obiektu a etapy tych przemian można opisać w oparciu o analizę zarejestrowanych skutków deformacji tkanki.

### **Material i metody badań**

Badania realizowano etapami. W pierwszym, jednocześnie rejestrowano następujące sygnały diagnostyczne: dane uzyskiwane w teście jednoosiowego ściskania (siła  $F$ , odkształcenie osiowe  $\Delta l$  oraz czas  $\tau$ ); dane z przyrządu do pomiaru odkształcenia poprzecznego (przyrost średnicy  $\Delta d$ ); rejestrowano także obraz deformowanej próbki oraz warzono ilości wydzielanej cieczy.

W drugim etapie uzyskane dane synchronizowano a następnie przetwarzano do postaci:  $Y_i = f(\varepsilon)$ , gdzie  $Y_i = \sigma(d)$ ,  $E_c(d, l)$ ,  $\varepsilon_p$ ,  $\mu_c$ ,  $d\sigma/d\varepsilon$ ; przy czym funkcje  $\sigma(d)$ ,  $E_c(d, l) = f(\varepsilon)$  są złożonymi, uwzględniającymi zmienność wymiarów testowanej próbki. Zastosowane symbole oznaczają:  $E_c$  - umowny moduł (współczynnik) sprężystości, definiowany jako iloraz naprężenia zastępczego do odkształcenia osiowego,  $\varepsilon_p$  - odkształcenie poprzeczne,  $\mu_c$  - względna masa cieczy wyciśniętej na powierzchnię próbki,  $d\sigma/d\varepsilon$  - pochodna funkcji  $\sigma(d) = f(\varepsilon)$ .

W następnym etapie zestawiono na wykresie, jednym dla każdej badanej próbki, względne wartości funkcji  $Y_i/Y_{\max} = f(\varepsilon)$ . Umożliwiło to wyznaczenie współrzędnych punktów charakterystycznych, a na tej podstawie wyznaczenie umownych przedziałów przemian stanów próbki. Zmiany ilościowe konfrontowano z aktualnym obrazem deformowanej próbki.

Obiektami badań były próbki o wymiarach  $\varnothing 14 \times 21$  mm, wycięte z korzeni buraka ćwikłowego odmiany Czerwona Kula. Przy wyborze obiektu badań kierowano się jego znaczeniem gospodarczym oraz czytelnością skutków deformacji, głównie intensywnym wyciekaniem barwnego soku.

Test ściskania realizowano na maszynie Instron 5566, przy prędkości roboczej belki 1 mm/min. Odształcenia poprzeczne próbek rejestrowano przy pomocy przyrządu, będącego oryginalną konstrukcją opisaną jako wynalazek [Czachor 2006]. Do rejestracji wykorzystano oscyloskop firmy Tektronix TDS 5104 B. Zastosowane czujniki zapewniają ciągły pomiar odształcenia poprzecznego z dokładnością 0,01mm. Obraz deformowanych próbek zapisywano kamerą cyfrową DCR-VX 2000E. Masę badanych próbek oraz masę wyciskanej cieczy ważono na wadze elektronicznej WPA 60/C z dokładnością 1 mg. Stężenie tak pozyskanego roztworu badano na refraktometrze RL 3. Wszystkie opisane badania wykonano dla serii próbek, co najmniej 10 powtórzeń. Ilość wyciskanej cieczy w funkcji czasu wyznaczono według następującego wzoru:

$$\mu_c(\tau) = \frac{1}{m_o} \sum_{i=1}^i m_i \quad [\%] \quad (1)$$

gdzie:

- $\mu_c(\tau)$  – względna masa cieczy wyciśniętej na powierzchnię próbki w zadanym przedziale czasowym;
- $m_o$  – masa początkowa próbki;
- $m_i$  – masa wyciśniętej cieczy w czasie  $\Delta\tau = \tau(i) - \tau(i-1)$ , gdzie  $i$  – kolejny pomiar,  $\Delta\tau$  – krok czasowy.

Ubytek masy próbki bilansowano według następującej zależności:

$$\Delta\mu(\tau) = \mu_c(\tau) + \mu_r(\tau) \quad [\%] \quad (2)$$

gdzie:

- $\Delta\mu$  – względny ubytek masy próbki w czasie;
- $\mu_r(\tau)$  – względna masa wyparowanej cieczy.

Odształcenie poprzeczne określono następującym wzorem:

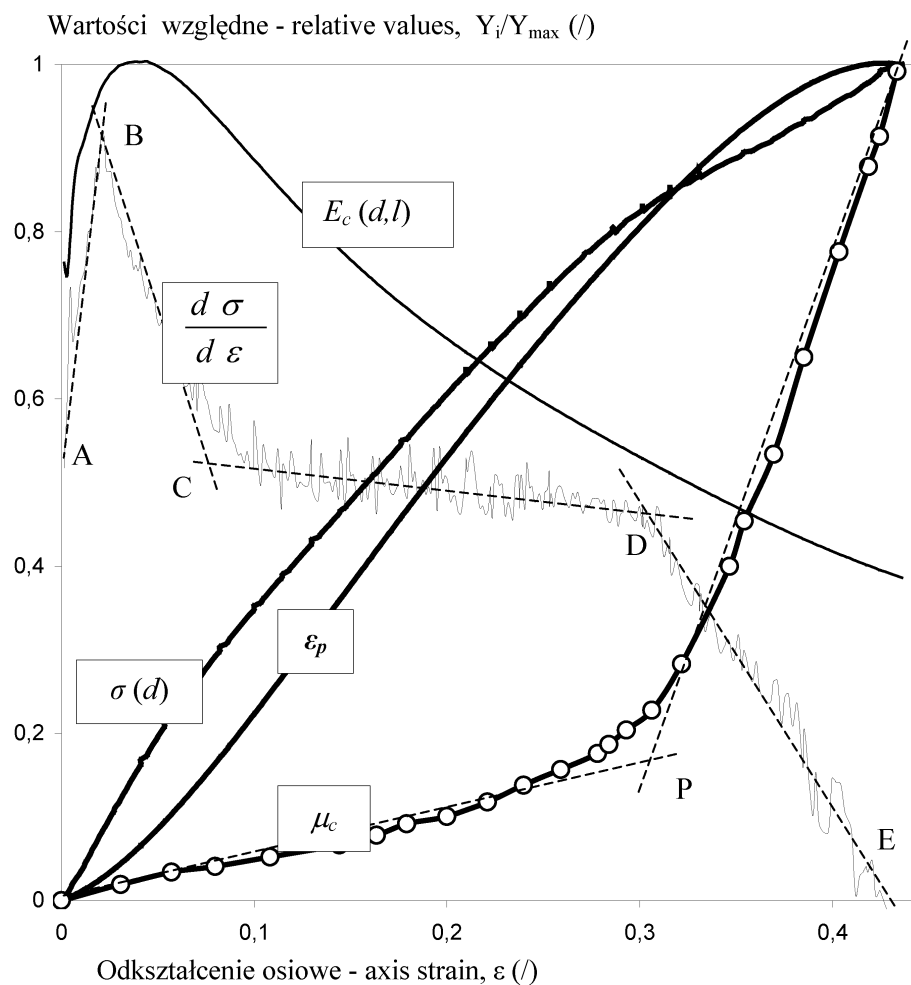
$$\varepsilon_p = \frac{d_i - d_o}{d_o} \quad [/\] \quad (3)$$

gdzie:

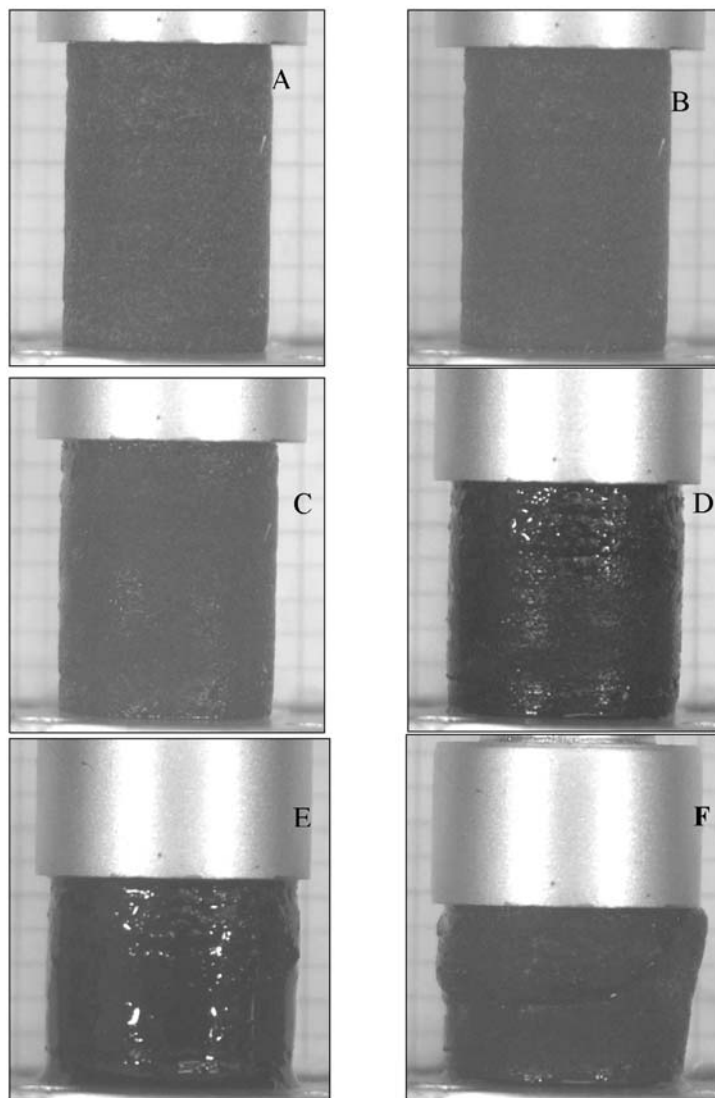
- $d_i$  – chwilowa, zmierzona wartości średnicy próbki;
- $d_o$  – średnica początkowa.

## Wyniki badań

Syntetyczne wyniki badań przedstawiono jako zależności  $Y_i/Y_{max}=f(\varepsilon)$ , gdzie:  $Y_i = \sigma(d)$ ,  $E_c(d,l)$ ,  $\mu_c(\tau)$ ,  $\varepsilon_p$ ,  $d\sigma/d\varepsilon$ . Na rysunku 1 przedstawiono typowe dla buraka ćwikłowego przebiegi  $Y_i/Y_{max}=f(\varepsilon)$ , natomiast na rysunku 2, sekwencję zdjęć próbki buraka ćwikłowego odpowiadającą (w czasie) położeniom punktów charakterystycznych. W tabeli 1 zestawiono wartości cech badanych próbek buraka ćwikłowego oraz współrzędne punktów charakterystycznych, odniesione do osi  $\varepsilon$ .



Rys. 1. Dynamika zmian stanu próbki buraka ćwikłowego  
 Fig. 1. Dynamics of state changes in red beet samples



Rys. 2. Charakterystyczne stany ściskanej próbki buraka ćwikłowego: A - start, B-stan odpowiadający maksymalnej wartości  $E_c(d,l)$ , C - cała powierzchnia próbki pokryta kropelkami cieczy, D - próg płynięcia, E-pękanie próbki ( $\delta_{max}$ ), F - stan złomu

Fig. 2. Characteristic states of the compressed red beet sample: A - start, B - state equivalent to the maximum values of  $E_c(d,l)$ , C - the all surface coated with drops of fluid (water), D - plastic flow limit, E - cracking of sample ( $\delta_{max}$ ), F - scrap state

Stwierdzono, że dla wszystkich badanych próbek zakres zmian  $d\sigma/d\varepsilon = f(\varepsilon)$  oraz  $\mu_c = f(\varepsilon)$  pozwala wyznaczyć położenie następujących punktów charakterystycznych: A, B, C, D, P (rys. 1). W konsekwencji przebieg  $d\sigma/d\varepsilon = f(\varepsilon)$  można podzielić na cztery umowne przedziały: A-B, B-C, C-D, D- $\sigma_{\max}$ . W przypadku zmian względnej masy cieczy wyciśniętej na powierzchnię próbki  $\mu_c = f(\varepsilon)$ , uwidacznia się prawidłowość polegająca na tym, że proces wyciskania cieczy przebiega w dwóch etapach, wolno do punktu P i intensywnie po jego przekroczeniu. Analiza współrzędnych następujących punktów: D – odnoszącego się do zmian  $d\sigma/d\varepsilon = f(\varepsilon)$  oraz P, wskazuje, że można je traktować jako jedną, wspólną dla obu przebiegów punkt współrzędną, średnia wartość wskaźnika  $(\varepsilon^{(P)} - \varepsilon^{(D)}) / \varepsilon^{(\sigma_{\max})}$  wynosi 3,6% (tab. 1).

Tabela. 1. Cechy badanych próbek oraz współrzędne punktów charakterystycznych  
Table 1. Features of investigated samples and co-ordinates of characteristic points

Cechy		Współrzędne punktów [l]	
$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	1060 ± 80	$\varepsilon^{(B)}$	0,036 ± 0,005
s.m. %	13,1 ± 0,5	$\varepsilon^{(C)}$	0,106 ± 0,02
$\mu_c^{(\sigma_{\max})}$ %	19,6 ± 0,6	$\varepsilon^{(D)}$	0,251 ± 0,05
$\mu_c^{(P)}$ %	3,7 ± 0,3	$\varepsilon^{(\sigma_{\max})}$	0,421 ± 0,06
$\sigma_{\max}$ MPa	1,3 ± 0,2	$\varepsilon^{(P)}$	0,266 ± 0,06
$E_c(d,l)$ MPa	1,9 ± 0,3	$\frac{\varepsilon^{(P)} - \varepsilon^{(D)}}{\varepsilon^{(\sigma_{\max})}}$	3,6 %

Z analizy rysunku 1 wynika, że wyraźnym zmianom podlegają następujące charakterystyki:  $E_c(d,l)$ ,  $\mu_c$ ,  $d\sigma/d\varepsilon = f(\varepsilon)$ . Zmiany  $\sigma(d)$ ,  $\varepsilon_p = f(\varepsilon)$  nie są tak czytelne. Szczególnie istotna jest pewna synchronizacja występująca pomiędzy zmianami  $E_c(d,l) = f(\varepsilon)$ ;  $d\sigma/d\varepsilon = f(\varepsilon)$ .

W pierwszym przypadku jest to miara oporu stawianego przez próbkę podczas jej obciążania w zadanym przedziale czasowym a w drugim, miara intensywności oporu w danym momencie. Dla wszystkich analizowanych próbek stwierdzono prawidłowość polegająca na tym, że umowny moduł (współczynnik) sprężystości  $E_c(d,l)$  osiąga maksymalną wartość w połowie odcinka BC, co z małym błędem, pozwala traktować punkt  $E_c(d,l)_{\max}$  jako punkt najintensywniejszego oporu.

Wysokie uwodnienie korzenia buraka ćwikłowego (zawartość suchej masy-13,1%, tab. 1) oraz jego charakterystyczna budowa (koncentryczny układ cienkościennego miękiszu przełożonego warstwami drewna wtórnego) są przyczynami specyficznej reakcji próbki w kierunku poprzecznym do działającej siły. Następuje wyraźne spowolnienie tempa wzrostu wartości odkształcenia poprzecznego  $\varepsilon_p$  w fazie końcowej, powyżej punktu P, związane z intensywnym wyciekaniem cieczy. W efekcie zmiana  $\varepsilon_p = f(\varepsilon)$  nie jest liniowa (wartość  $r^2 < 0,8$ ), zasadne jest opisanie tych zmian np. wielomianem trzeciego stopnia.

Zestawienie zmienności analizowanych sygnałów pozwala przedstawić proces jednoosiowego ściskania próbek, wyciętych z korzeni buraka ćwikłowego, jako kolejno po sobie następujące etapy przemian ich stanu.

*Konsolidacja tkanki*, etap ograniczony odcinkiem A-C, przy czym na odcinku A-B, następuje dopasowanie powierzchni czołowych próbki do ściskających ich płyt a na odcinku B-C, wypieranie fazy gazowej i wody wolnej. Następują bardzo dynamiczne zmiany  $d\sigma/d\varepsilon$ , szczególnie po przekroczeniu punktu B, którym towarzyszy pocenie się kolejnych fragmentów powierzchni próbki, począwszy od styku z płytami maszyny aż do jej części środkowej (rys. 2). W punkcie C tkanka staje się układem dwufazowym. Tempo wzrostu  $\varepsilon_p$  wskazuje, że zagęszczanie tkanki postępuje głównie w kierunku osiowym. Konsolidacja tkanek trwa do wartości odkształcenia  $\varepsilon^{(C)} = 10\%$ .

*Elasto-plastyczna* reakcja ścianek tkanek, ograniczona odcinkiem C-D, dla którego  $d\sigma/d\varepsilon = \text{const}$ . Rejestruje się stały przyrost ilości wyciskanej cieczy na powierzchnię próbki, co prowadzi do nieodwracalnych zmian jej objętości. Obserwacja powierzchni próbki wskazuje, że proces wyciskania zachodzi etapami, począwszy od styku z płytami aż do jej środka, przy czym im bliżej punktu D tym reakcja tkanki staje się bardziej jednorodna, ciecz pojawia się jednocześnie na całej powierzchni. Punkt D staje się progiem płynięcia (yield threshold). Różnice pomiędzy współzrędnymi  $\varepsilon^{(P)}$  a  $\varepsilon^{(D)}$  wynosi 3,6%.

*Plastyczna* reakcja ujednorodnionej tkanki zachodzi po przekroczeniu punktu D. Wyraża się wyraźnym osłabieniem stawianego oporu, dynamika  $d\sigma/d\varepsilon$  maleje, przy jednoczesnym istotnym zwiększaniu ilości wydzielanej cieczy. Wartość współzrędnej punktu charakterystycznego P, odniesionej do względnej masy cieczy,  $\mu_c^{(P)}$  wynosi 3,4%, zaś wartości względnej masy cieczy  $\mu_c^{(\sigma_{\max})}$  wyznaczone przy  $\delta_{\max}$  wynosi 18,4% (tabela 1). Stężenia roztworów uzyskanych z następujących etapów: do punktu P i powyżej niego zawierały się w przedziale 1,8-2,1%, znacznie odbiegały od wartości odpowiadających stanowi homogenizacji tkanek.

Znaczący wzrost ilości wydzielanej cieczy po przekroczeniu punktu płynięcia P, przy stałym ich stężeniu może być skutkiem intensywnej propagacji mikropęknięć w ściskanej tkance.

### **Podsumowanie**

Zastosowana metoda oparta na jednoczesnym rejestrowaniu skutków jednoosiowego ściskania próbek wyciętych z korzeni buraka ćwikłowego, ich przetwarzaniu do postaci: wartości chwilowe odniesione do maksymalnych, wszystko w funkcji odkształcenia osiowego oraz zestawienie tych zmian na jednym wykresie, pozwoliła analizować chwilowe stany próbki. W konsekwencji, metoda ta potwierdziła etapowość procesów zachodzących w deformowanych tkankach, oraz określiła moment, od którego następuje intensywna propagacja mikropęknięć.

Wykazano, że do identyfikacji tego momentu, to znaczy do wyznaczenia współrzędnych punktu płynięcia (yield threshold) wystarczy informacja zawarta w przebiegu naprężenie–odkształcenie.

### **Bibliografia**

Blahovec J. 1985. Jednoduchý model procesu stlačování a mechanického poškození družnin. *Zemědělska Technika*, 31, 349-364.

Czachor G. 2004. Zjawiska zachodzące w tkankach wybranych warzyw poddanych jednoosiowemu ściskaniu. III Zjazd Naukowy PTA, Dąbrowica 27-29.09.

Czachor G. 2005. Dynamika procesów zachodzących w ściskanych tkankach wybranych warzyw. Konferencja Naukowa PTA „Agrofizyka w badaniach surowców i produktów rolniczych”, Krynica, 21-23.06.

Czachor G. 2006. Przyrząd do pomiaru odkształceń próbek, zwłaszcza z materiałów o budowie komórkowej. Zgłoszenie patentowe P-378385, Biuletyn Urzędu Patentowego, 13.

Hamann J., Konstankiewicz K., Zdunek A. 1999a. Badanie procesów pęknięcia rdzenia wewnętrznego i zewnętrznego bulwy ziemniaka. *Acta Agrophysica*, 24, s. 97-107.

Hamann J., Konstankiewicz K. 1999b. Procesy zniszczenia w komórkowym ośrodku roślinnym. *Acta Agrophysica* 24, s. 67-86.



Konstankiewicz K., Zdunek A. 1999. Metoda emisji akustycznej w badaniach procesów pęknięcia tkanek roślinnych. *Acta Agrophysica* 24, s. 87-95.

Masi P. i in. 1997. Mathematical modeling of the compressive stress-strain relationship of foods submitted to large deformations. *Journal of Texture Studies*, 36, s. 212-215.

Peleg M. 1984. Application of nonlinear phenomenological models to solid food materials. *Journal of Texture Studies*, 15, s. 1-22.

Zachary A. Henry i in. 2000. New Model for Elastic Behaviour of Cellular Material. *Journal Agric. Engng Res.*, 76, s. 399-408.

## **THE DYNAMICS OF PROCESSES IN SQUEEZED TISSUES OF RED BEET**

### **Summary**

The aim of the investigation was the analysis of instantaneous states of red beet samples, while testing uniaxial compression. Effects of the quasi-static compression were recorded and converted next to the form: strength-stress, apparent coefficient of elasticity, transverse strain, derivative of the function strength-strain, mass of the extrusion water, everything as a function of strain. Changes of these values were compared with the sample picture as well. On the basis of co-ordinates of characteristic points there were separated 3 stages of sample deformation: consolidation of the tissue, elasto-plastic reaction of tissue walls and plastic reaction of the homogenizing tissue.

**Key words:** red beet, deformation, dynamics, stages