

## BADANIE PROCESÓW PĘKANIA TKANEK RDZENIA WEWNĘTRZNEGO I ZEWNĘTRZNEGO BULWY ZIEMNIAKA\*

*J. Haman<sup>1</sup>, K. Konstankiewicz<sup>2</sup>, A. Zdunek<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Boya-Żeleńskiego 4/72, 00-621 Warszawa

<sup>2</sup>Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego, Polska Akademia Nauk  
ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201, 20-290 Lublin 27

**S t r e s z c z e n i e.** W badaniach procesów pęknięcia tkanki bulwy ziemniaka zastosowano metodę pasywnej emisji akustycznej. Jednoczesna rejestracja liczby zliczeń sygnału emisji akustycznej i zależności odkształcenie - naprężenie pozwoliła określić trzy etapy procesu pęknięcia dwóch typów tkanek: rdzenia wewnętrznego i rdzenia zewnętrznego. Naprężenia, przy których rozpoczynają się poszczególne etapy mają wyższe wartości w przypadku pęknięcia rdzenia wewnętrznego. Jednak wartości te unormowanie względem wytrzymałości próbki są takie same dla obu typów tkanek i badanych odmian: Bila i Triada. Badania przeprowadzone dla dwóch odmian ziemniaka wykazały, że tkanka rdzenia wewnętrznego posiada wyższą wytrzymałość i aktywność akustyczną w porównaniu z rdzeniem zewnętrznym.

**S ł o w a k l u c z o w e:** pęknięcie, tkanka bulwy ziemniaka

### WSTĘP

Własności mechaniczne materiałów biologicznych produkowanych przez rolnictwo są od dawna przedmiotem zainteresowania nauki i znalazły swój początek w pracach empirycznych [1,2,4,5]. Jest to zrozumiałe, gdyż rosnący poziom mechanizacji prac w rolnictwie i przetwórstwie żywności wymagał tego rodzaju wiedzy doraźnie niezbędnej konstruktorom coraz bardziej agresywnie działających maszyn i urządzeń, które powodowały straty wynikłe z uszkodzeń mechanicznych, a sięgające niejednokrotnie kilkudziesięciu procent produkowanego jako plon surowca lub materiału wchodzącego do procesu produkcyjnego [6].

Oczywiste jest, że badania empiryczne pociągnęły za sobą próby interpretacji teoretycznej i w konsekwencji próby tworzenia modeli matematycznych procesów zachodzących w materiałach biologicznych. Wynika to nie tylko z zainteresowania uczonych przebiegiem tych, mało dotychczas poznanych, zjawisk lecz również z przyczyn praktycznych. Posiadanie dobrego modelu teoretycznego pozwala uniknąć

---

\*Praca finansowana przez Komitet Badań Naukowych, Nr. 5P 06F 003 10.

licznych, bardzo nieraz kosztownych i ze względu na cykle biologiczne czasochłonnych, badań empirycznych [6,10-12].

Wszystkie, lub prawie wszystkie roślinne surowce biologiczne produkowane przez rolnictwo stanowią materiały o bardziej lub mniej zróżnicowanej strukturze komórkowej, przy czym w odniesieniu do rozmieszczenia, kształtu i wymiarów komórek jest to materiał stochastyczny [6]. Poniższe rozważania odnoszą się do materiałów zawierających komórki, w których sprężysta ściana komórkowa otacza zawartość składającą się, ogólnie biorąc i nie wchodząc w szczegóły budowy anatomicznej protoplastu, z cieczy i gazu. Ściana komórki nie jest szczelna, lecz zawiera cytoplazmatyczne nici łączące protoplasty. Nici te nazywane są plazmodesmami. Powodują one, że system cytoplazmatyczny tkanki ma charakter ciągły, gdyż w środku plazmodesmy znajduje się kanalik będący przedłużeniem siateczki śródplazmatycznej obu sąsiednich protoplastów. Podobne połączenia występują pomiędzy wnętrzem komórki, a przestworami (przestrzeniami) międzykomórkowymi powstającymi tam, gdzie pektynowe lamelle spajające komórki uległy rozpuszczeniu i komórki odsunęły się od siebie. Przestwory międzykomórkowe mają natomiast połączenia z przestrzenią zewnętrzną, a więc tworzą drogi przenikania gazów i cieczy na zewnątrz ośrodka. Można więc założyć następujący ogólny charakter odkształcenia.

Pod wpływem sił zewnętrznych oddziałujących na obiekt występują w całej jego objętości gradienty naprężeń powodujące wzrost ciśnienia wewnątrzkomórkowego i procesy filtracyjne. Polegają one na zmianach objętości wakuoli i przemieszczaniu się treści komórek stosownie do gradientu ciśnienia pomiędzy sąsiednimi komórkami, lub też z komórki do przestworów międzykomórkowych, a stąd na zewnątrz materiału. Prędkość filtracji zależy od gradientu ciśnienia i przepuszczalności ściany komórkowej, a więc przede wszystkim od geometrii komórki i plazmodesmatów, od ściśliwości i od lepkości płynno-gazowej treści komórkowej. Jednocześnie spełnione są następujące warunki: 1) ze względu na wypełnienie komórki cieczą i gazem ciśnienie w komórce ma charakter hydrostatyczny, 2) ze względu na bardzo małe przekroje i małe prędkości wszystkie przepływy mają charakter laminarny, 3) błona komórkowa ze względu na swoją strukturę zachowuje się jak ośrodek liniowo sprężysty aż do chwili zniszczenia (pęknięcia).

Przedstawione wyżej procesy pozwalają na stworzenie jakościowego obrazu odkształcenia, którego charakter wynika z procesu laminarnej filtracji, a więc zasadniczo zależy od prędkości narastania naprężenia. Jeśli prędkość ta jest dostatecznie mała to procesy filtracyjne prowadzą do stopniowego usuwania zawartości komórki na zewnątrz, przy czym odkształcenia sprężyste ścian komórkowych są niewielkie, a naprężenia w tych ścianach nie osiągają wartości granicznych powodujących ich zniszczenie. Objętość wszystkich komórek zmniejsza się równomiernie, tak więc następuje odkształcenie objętościowe wynikające z filtracji i sprężania części gazowej całego ośrodka bez uszkodzenia komórek. Jednak w miarę zwiększania prędkości narastania gradientów naprężeń procesy filtracyjne przebiegają zbyt wolno i ciśnienie wewnątrz komórki

narasta do granicy wytrzymałości ściany komórkowej, która ulega rozerwaniu, zaś cała zawartość komórki wydostaje się, poprzez przestrzenie międzykomórkowe na zewnątrz materiału poddanego obciążeniu.

Maksymalne naprężenie w ścianie komórkowej wywołane ciśnieniem wewnątrz komórki może się zmieniać zależnie od kształtu komórki (którego skrajne przypadki to kula lub walec) w granicach :

$$\frac{p\rho}{g} \geq \sigma \geq \frac{p\rho}{2g} \quad (1)$$

gdzie:  $\sigma$  - naprężenie w ścianie komórkowej,  $\rho$  - promień krzywizny ściany komórkowej,  $g$  - grubość ściany komórkowej,  $p$  - ciśnienie w komórce.

Tak więc, zakładając stałą wartość wytrzymałości na rozrywanie ściany komórkowej, jej zniszczenie zależy od pochodnej po czasie gradientu ciśnienia, od kształtu komórki, grubości ściany komórkowej i warunków filtracji.

Pęknięta i opróżniona z treści wewnętrznej komórka ulega spłaszczeniu wskutek oddziaływania ciśnienia zewnętrznego. Tworzy się w tym miejscu spłaszczona nieciągłość w formie szczeliny, w końcach której promienie krzywizny są bardzo małe, a więc naprężenia odpowiednio wzrastają.

Pęknięta komórka pozostaje początkowo w otoczeniu komórek nieuszkodzonych tworząc front powstałej szczeliny. Ciśnienie w komórkach powoduje, iż charakteryzują się one znaczną intensywnością energii rozumianej jako iloczyn energii zawartej w elemencie objętości i odległości tego elementu od wierzchołka szczeliny. Taka sytuacja sprzyja propagacji szczeliny tzn. stwarza warunki dalszego pęknięcia materiału. Propagacja pęknięcia może przebiegać poprzez kolejne ściany komórkowe lub pomiędzy komórkami przez pektynowe lamelle. Należy przepuszczać, że jest to proces stochastyczny zależny od właściwości mechanicznych i rozkładu naprężeń w elementach znajdujących się w najbliższym sąsiedztwie czoła szczeliny [5,6,12].

W procesie pęknięcia, opisanym powyżej, następują zmiany stanu (rozkładu) energii. Zmiany te polegają na wyemitowaniu pewnej porcji energii w procesie pęknięcia. Wyemitowana energia zamieniana jest na pracę mechaniczną związaną z przebudową ośrodka, na ciepło oraz część energii emitowana jest w postaci fal sprężystych. Propagujące w materiale fale sprężyste powstałe w wyniku uwolnienia zmagazynowanej w materiale energii nazywane są sygnałem emisji akustycznej (w skrócie sygnałem EA) [7,8,13,14]. Metoda emisji akustycznej pozwala na rejestrację z wysoką czułością sygnałów EA, które materiał sam generuje w wyniku zmian jego struktury, np. pod wpływem działania siły zewnętrznej. Jest to więc metoda pasywna. Dodatkową zaletą tej metody jest to, że sygnał jest rejestrowany podczas procesu odkształcenia.

Tkanka miękkiszowa bulwy ziemniaka składa się z wielu różnego rodzaju tkanek (Rys. 1): warstwy korkowej, warstwy kory pierwotnej, pierścienia wiązek przewodzących, rdzenia zewnętrznego oraz rdzenia wewnętrznego. Spełniają one określone funkcje zarówno fizjologiczne jak i mechaniczne. Można więc podejrzewać, że każda z tych

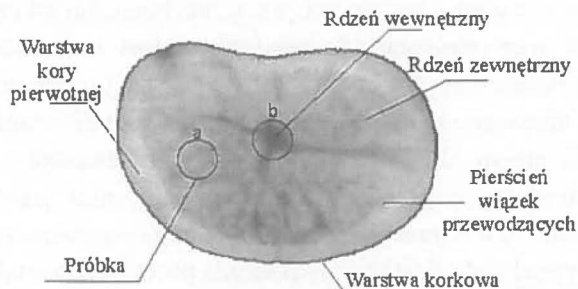
tkanek będzie wykazywała różne właściwości mechaniczne. Hipoteza ta znajduje potwierdzenie w założeniach wielu modeli opisujących właściwości mechaniczne komórkowych tkanek roślinnych [4,10-12]. Modele te oparte są na hipotezie, że właściwości mechaniczne tkanek roślinnych determinowane są przez budowę strukturalną oraz przez ciśnienie wewnątrz- komórkowe. Jednak, jak dotychczas nie zbadano wpływu miejsca pobrania próbki, a więc i rodzaju tkanki bulwy ziemniaka na jej właściwości mechaniczne.

Celem pracy jest zbadanie procesów pęknięcia dwóch typów tkanek bulwy ziemniaka (rdzenia zewnętrznego i rdzenia wewnętrznego) przy użyciu metody emisji akustycznej. Badania przeprowadzono dla dwóch odmian ziemniaka: Biła i Triada.

### MATERIAŁ I METODY

W celu zbadania wpływu typu tkanki bulwy ziemniaka na jej właściwości mechaniczne wykonano pomiary parametrów mechanicznych oraz ich parametrów sygnału emisji akustycznej charakteryzujących dwa typy tkanki bulwy ziemniaka (rdzeń zewnętrzny i rdzeń wewnętrzny). W eksperymencie użyto dwóch odmian ziemniaka: Triada i Biła pochodzących ze zbiorów 1998 Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin w Jadwisinie. Badania przeprowadzono na 40 próbkach z każdej odmiany pobieranych z obszarów rdzenia zewnętrznego i rdzenia wewnętrznego (miejsca oznaczone jako a i b na Rys. 1, odpowiednio). Próbki miały kształt walca o wysokości 5 mm i średnicy 5 mm. Wielkość próbki wybrano tak by umożliwiało pobranie jak najbardziej jednorodnego materiału, co jest szczególnie trudne w przypadku rdzenia wewnętrznego, który zajmuje niewielką objętość w stosunku do całej objętości bulwy.

Swobodnie stojące próbki były poddawane jednoosiowemu ścisnieniu między szczękami maszyny wytrzymałościowej Lloyd LRX wzdłuż osi głównej. Ścisnienie przeprowadzono ze stałą prędkością 20 mm/min do momentu spadku naprężenia o 10%. Jednocześnie z zależnością odkształcenie - naprężenie rejestrowano deskryptory sygnału emisji akustycznej. Szczegółowy opis metody emisji akustycznej oraz sposoby analizy sygnału EA opisano szczegółowo w następujących pracach [7,8,13,14].



**Rys. 1.** Przekrój poprzeczny bulwy ziemniaka i sposób pobrania próbek: a) rdzeń zewnętrzny, b) rdzeń wewnętrzny.

**Fig. 1.** The cross section of potato tissue tuber: a) the sample of outer core, b) the sample of inner core.

## WYNIKI I DYSKUSJA

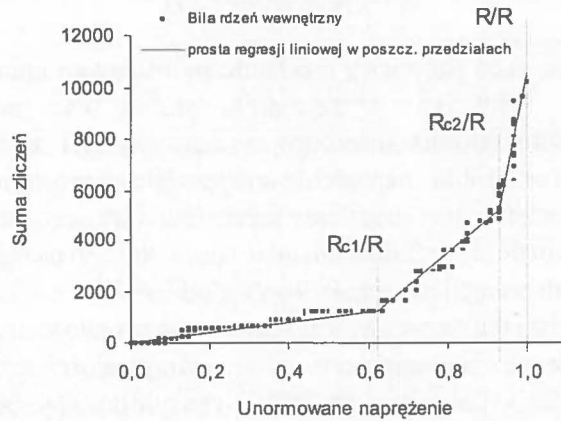
W eksperymencie, jako parametry mechaniczne badanych odmian, wybrano dwie najczęściej używane wielkości: wytrzymałość próbki oraz moduł odkształcenia osiowego. Moduł odkształcenia osiowego wyznaczany był z nachylenia krzywej odkształcenie wzdłuż osi próbki - naprężenie w przedziale jej prostoliniowego przebiegu; dla każdej próbki parametr ten wyznaczano z przedziału wartości naprężenia od 0,25 MPa do 1,25 MPa. Wytrzymałość zdefiniowano jako stan, w którym następował nagły spadek naprężenia próbki lub osiągnięcie przez krzywą odkształcenie - naprężenie plato. W materiałoznawstwie stan ten nazywany jest stanem wytrzymałości materiału. Dla tkanek roślinnych przyjmuje się, że osiągnięcie stanu wytrzymałości jest skutkiem między innymi procesów pęknięcia struktury, a ich skala jest na tyle duża by spowodować wyraźną zmianę nachylenia krzywej naprężenie - odkształcenie [1,11,12]. Wytrzymałość próbki oznaczono jako R. Średnie wartości uzyskanych parametrów z 40 powtórzeń dla każdej serii pomiarowej zaprezentowano w Tabeli 1.

**Tabela 1.** Parametry mechaniczne tkanek bulwy ziemniaka rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego  
**Table 1.** Mechanical parameters of outer core and inner core of potato parenchyma

Odmiana i miejsce pobrania próbki		Wytrzymałość R (MPa)	Odch. stand.	Moduł odkształcenia osiowego (MPa)	Odch. stand.
Bila	Rdzeń zewnętrzny	1,58	0,12	3,5	0,19
	Rdzeń wewnętrzny	2,05	0,26	3,73	0,27
Triada	Rdzeń zewnętrzny	1,72	0,11	3,81	0,17
	Rdzeń wewnętrzny	2,24	0,3	4,41	0,6

Z porównania uzyskanych wartości można zauważyć wyraźnie, że dla obu odmian wytrzymałość próbek jest większa w przypadku próbek pobranych z rdzenia wewnętrznego. Wytrzymałość tkanki rdzenia wewnętrznego jest o około 30 % większa w porównaniu do wytrzymałości tkanki rdzenia zewnętrznego w przypadku obu badanych odmian. Średnie wartości wytrzymałości uzyskane dla rdzenia wewnętrznego obarczone są większym odchyleniem standardowym niż wyniki uzyskane dla rdzenia zewnętrznego. Powodem tego mogą być trudności z pobraniem próbki (nawet o tak niewielkich wymiarach jak te użyte w doświadczeniu), która zawierałaby tylko rdzeń wewnętrzny bulwy ziemniaka. Kształt rdzenia wewnętrznego jest bardzo nieregularny, stąd próbki pobierane z tego obszaru zawsze zawierały pewien procent tkanki rdzenia zewnętrznego, inny dla różnych próbek. Podobnie jak w przypadku wytrzymałości, również średni moduł odkształcenia osiowego tkanki rdzenia wewnętrznego jest większy niż parametr ten uzyskany dla rdzenia zewnętrznego. Różnice te nie są jednak duże, szczególnie dla próbek odmiany Bila.

Pomiary sygnału emisji akustycznej w funkcji wielkości mechanicznych (odkształcenia próbki lub jej naprężenia) wskazują na to, że proces pęknięcia struktury komórkowej tkanki ziemniaka zachodzi w kilku etapach. Na Rys. 2 przedstawiono



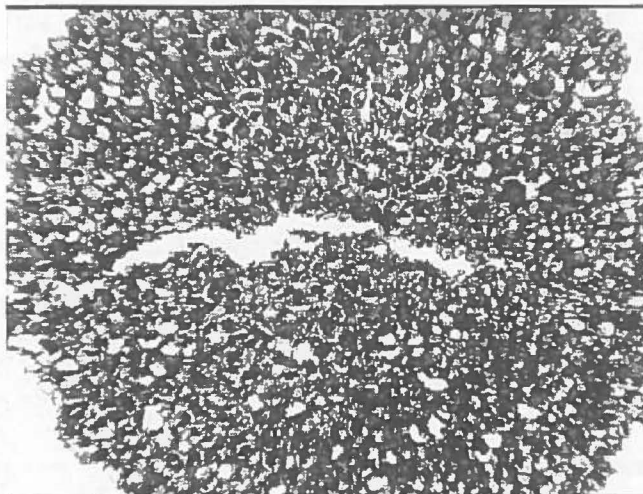
**Rys. 2.** Zależność sumy zliczeń od unormowanego napężenia oraz etapy propagacji pęknięć dla tkanki bulwy ziemniaka, punkty są danymi eksperymentalnymi.

**Fig. 2.** The dependence of count sum on normalised stress and stages of crack propagation for potato tissue tuber, the points are experimental data.

zależność sumy zliczeń sygnału EA od unormowanego napężenia (stosunek aktualnego napężenia do wytrzymałości próbki). Już przy niewielkich odkształceniach można zaobserwować pierwsze zdarzenia EA, które rozpoczynają proces pęknięcia. W pierwszym etapie wzrost napężenia próbki (lub odkształcenia) powoduje stosunkowo powolny wzrost sumy zliczeń, aż do osiągnięcia napężenia  $R_{c1}$ . Obserwowany w tym etapie niewielki wzrost świadczy o dość powolnej propagacji pęknięć tkanki roślinnej. Może również świadczyć o powstawaniu źródeł emitujących fale o niskich amplitudach, niezależnie w kilku punktach. Wskazują na to wyniki obserwacji mikroskopowych tkanki bulwy ziemniaka po jej odkształceniu. Z obserwacji tych można wnioskować, że szczelina pęknięcia (taka jak na Rys. 3) jest wynikiem łączenia się mniejszych szczelin znajdujących się na drodze rozwoju szczeliny. Przykład takiej konfiguracji szczelin pokazuje zdjęcie z mikroskopu elektronowego na Rys. 4. Dalsza propagacja pęknięcia będzie miała charakter stochastyczny zależny od rozkładu naprężeń i parametrów elementów strukturalnych (np. wytrzymałości) tkanki w otoczeniu źródła pęknięcia. Dla niewielkich odkształceń lokalne pęknięcia (np. ściany komórkowej) nie musi powodować pęknięcia sąsiednich elementów strukturalnych [5,12]. Dlatego przy małych odkształceniach lokalne spiętrzenia naprężeń powodują pęknięcie tylko niewielkiej liczby elementów strukturalnych, np. ścian komórkowych, co daje niską aktywność akustyczną.

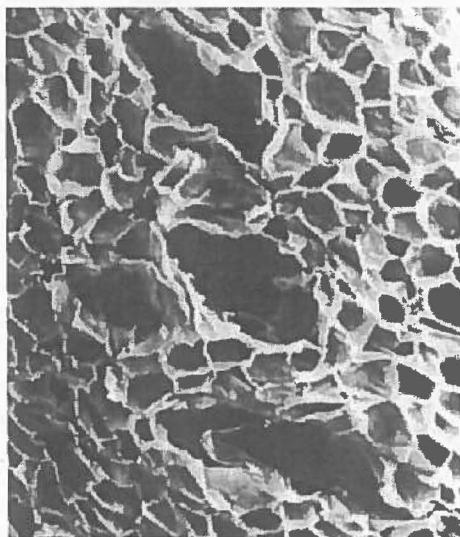
Zwiększając dalej odkształcenie tkanki roślinnej rozpoczyna się drugi etap rozwoju pęknięć, granica pomiędzy nimi jest często bardzo niewyraźna. Przyczyną jest niejednorodna struktura oraz statystyczny rozkład naprężeń w tkance roślinnej, który determinuje procesy odkształceń w tym materiale. Drugi etap rozwoju pęknięć charakteryzuje się wzrostem sumy zliczeń w przedziale naprężeń od  $R_{c1}$  do  $R_{c2}$  (większe nachylenie krzywej suma zliczeń - unormowane napężenie próbki na Rys. 2). W etapie tym następuje nasilenie procesów pęknięcia bez zmiany nachylenia krzywej napężenie –

odkształcenie. Świadczy to o tym, że “osłabienie mechaniczne” całej próbki w tym procesie jest niewielkie. Osiągnięcie przez próbkę naprężenia  $R_{c2}$  rozpoczyna trzeci etap, w którym suma zliczeń sygnału EA gwałtownie rośnie. Następuje wówczas lawinowa propagacja pęknięć, które łącząc się tworzą szczelinę o dużych wymiarach, porównywalnych z wymiarami próbki Rys. 3. Proces ten prowadzi do osiągnięcia stanu wytrzymałości R i spadku naprężenia próbki spowodowany utratą spójności. Niektóre



Rys. 3. Całkowite zniszczenie tkanki ziemniaka pod wpływem jej odkształcenia.

Fig. 3. The total potato tissue damage as a result of deformation.



Rys. 4. Pęknięcia tkanki bulwy ziemniaka, obraz z mikroskopu elektronowego.

Fig. 4. Cracks of potato tissue, the image obtained by using an electron microscopy.

krzywe uzyskiwane w doświadczeniu osiągają plateau przy naprężeniach bliskich momentowi zniszczenia tkanki roślinnej. W tym przypadku mamy do czynienia z sytuacją, w której wzrost naprężenia wynikający ze wzrostu odkształcenia kompensuje spadek naprężenia próbki wynikający z pęknięcia struktury.

Uzyskane w doświadczeniu wartości naprężenia  $R_{c1}$  i  $R_{c2}$  zamieszczono w Tabeli 2. Wartości te, podobnie jak w przypadku wytrzymałości R, mają wyższe wartości dla rdzenia wewnętrznego w przypadku obu badanych odmian. Zauważono również, że uzyskane wartości  $R_{c1}$  i  $R_{c2}$  unormowane względem wartości wytrzymałości R próbki mają w przybliżeniu takie same wartości

niezależnie od odmiany i od miejsca pobrania próbki. Mimo jednakowych wartości unormowanych naprężeń  $R_{c1}/R$  i  $R_{c2}/R$  dla obu odmian i obu typów tkanki istnieją różnice w sumach zliczeń. Różnice odmianowe są niewielkie, jednak wyraźnie można zauważyć, że odmiana Triada wykazuje wyższą aktywność akustyczną. Dla obu badanych odmian istnieją natomiast wyraźne różnice w sumie zliczeń uzyskanych dla badanych typów tkanek. Sumy zliczeń  $\Sigma N_{Rc1}$ ,  $\Sigma N_{Rc2}$ , są około trzykrotnie wyższe dla rdzenia wewnętrznego w porównaniu z rdzeniem zewnętrznym. Natomiast suma zliczeń  $\Sigma N_R$  w przybliżeniu - dwukrotnie. Wyższe odchylenia standardowe sum zliczeń rejestrowanych dla próbek rdzenia wewnętrznego można tłumaczyć podobnie jak w przypadku omawianych wyżej parametrów mechanicznych.

Wyniki zamieszczone w Tabeli 2 pozwalają na sporządzenie schematycznych zależności sumy zliczeń od unormowanego naprężenia dla tkanek rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego dwóch odmian ziemniaka: Bila i Triada (Rys. 5).

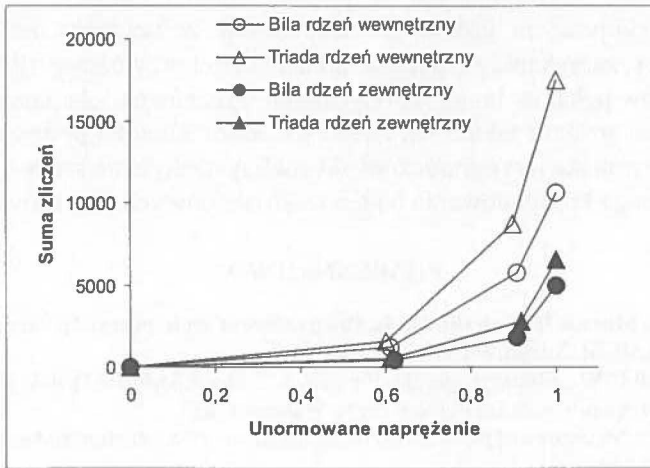
**T a b e l a 2.** Suma zliczeń  $\Sigma N$  przy wartościach naprężenia:  $R_{c1}$ ,  $R_{c2}$ ,  $R$ . W nawiasach odchylenia standardowe

**T a b l e 2.** Count sum  $\Sigma N$  at stress values:  $R_{c1}$ ,  $R_{c2}$ ,  $R$ . There are standard deviations in brackets

Odmiana i miejsce pobrania próbki	$R_{c1}$ (MPa)	$R_{c1}/R$	$\Sigma N_{Rc1}$	$R_{c2}$ (MPa)	$R_{c2}/R$	$\Sigma N_{Rc2}$	$\Sigma N_R$
Bila	Rdzeń zewnętrzny	0,98 (0,08)	460 (120)	1,43 (0,11)	0,91	1790 (330)	5000 (780)
	Rdzeń wewnętrzny	1,25 (0,09)	1200 (310)	1,86 (0,09)	0,91	5700 (1000)	10600 (1700)
	Rdzeń zewnętrzny	1,05 (0,09)	540 (140)	1,58 (0,13)	0,92	2800 (830)	6500 (1380)
	Rdzeń wewnętrzny	1,34 (0,1)	1600 (400)	2,02 (0,11)	0,9	8700 (1500)	17500 (3400)

Na Rys. 5 wyraźnie widoczne są różnice w zależności sumy zliczeń - unormowane naprężenie dla dwóch badanych typów tkanek. Parametry mechaniczne zamieszczone w Tabeli 1 również wykazują istotne różnice dla rozpatrywanych tkanek. Przyczyn uzyskanych różnic w parametrach zarówno mechanicznych jak i emisji akustycznej można poszukiwać w odmiennej budowie strukturalnej rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego. Zawartość suchej masy w rdzeniu wewnętrznym jest o około 7% mniejsza niż w rdzeniu zewnętrznym [3]. Inaczej mówiąc, rdzeń wewnętrzny jest bardziej uwodniony. Jednocześnie wiadomo, że szkieletem konstrukcyjnym tkanki roślinnej jest (w uproszczeniu) układ cienkościennych komórek wypełnionych cieczą i połączonych między sobą pektynowymi lamellami. Większa wytrzymałość rdzenia wewnętrznego wskazuje na wyższą (w porównaniu z rdzeniem zewnętrznym) wytrzymałość szkieletu: ściany komórkowe - pektynowe lamelle, mimo wyższej procentowej zawartości wody. Oznacza to wyższą średnią wytrzymałość ścian komórkowych na rozciąganie lub/i wyższą średnią wytrzymałość na ścinanie w obszarze pektynowych lamelli rdzenia wewnętrznego w porównaniu z rdzeniem zewnętrznym.





**Rys. 5.** Etapy propagacji pęknięć dla rdzeni: wewnętrznego i zewnętrznego tkanki bulwy ziemniaka, odmian Bila i Triada.

**Fig. 5.** Stages of crack's propagation for cores: inner and outer of potato tissue tuber, variety Bila and Triada.

Wyższa średnia wytrzymałość na rozciąganie ścian komórkowych powoduje, że amplituda sygnału emisji akustycznej powstającego w momencie pęknięcia ma wyższą wartość [7]. W rezultacie wyższa jest również liczba zliczeń (oraz liczba zdarzeń). Podobna sytuacja będzie w przypadku procesów ścinania lub odklejania się komórek od siebie. Im wyższa siła ścinająca w warstwie pektynowych lamelli lub siła potrzebna na odklejanie się komórek od siebie tym wyższa wartość energii emitowanej w tym procesie. Wyższa jest więc również aktywność akustyczna, tak jak to zaobserwowano w prezentowanym doświadczeniu.

## WNIOSKI

- Przeprowadzony eksperyment pozwolił na sformułowanie następujących wniosków:
- Tkanka bulwy ziemniaka nie może być traktowana jako jednorodna; istnieją wyraźne różnice we właściwościach mechanicznych rdzenia wewnętrznego i rdzenia zewnętrznego.
  - Pękanie tkanki bulwy ziemniaka przebiega w trzech etapach o różnym przyroście liczby zliczeń sygnałów emisji akustycznej w funkcji napężenia.
  - Lokalne naprężenia powodujące pękanie tkanki rdzenia wewnętrznego bulwy ziemniaka mają wyższą wartość w porównaniu z tkanką rdzenia zewnętrznego.

Przedstawione wyniki badań pokazują, że metoda emisji akustycznej dostarcza nowych informacji na temat właściwości mechanicznych tkanek roślinnych. Uzupełnia wyniki w postaci krzywych napężenie - odkształcenie o informację na temat występowania i intensyfikacji procesów pęknięcia. Dane te mogą być bardzo użyteczne w pracach mających na celu ograniczenie strat produkcji roślinnej spowodowanej mechanicznymi uszkodzeniami wewnętrznymi i zewnętrznymi. Wyniki uzyskiwane przy pomocy metody emisji akustycznej mogą być również wykorzystane w pracach nad mechaniką pęknięcia komórkowych ośrodków rolniczych.

Badanie zjawisk występujących w poszczególnych etapach procesów pęknięcia metodami mikroskopowymi jest niezmiernie trudne ze względu na: zlokalizowanie źródła sygnału EA, zamykanie się pęknięć po ustąpieniu przyłożonej siły, stochastyczny charakter procesów pęknięcia, braku teoretycznych wskazówek lokalizacji pęknięć (brak mechaniki pęknięcia struktur takich jak tkanki roślinne). Dlatego powyższy opis etapów pęknięcia tkanki ziemniaka jest ograniczony do analizy nachylenia krzywej suma zliczeń - naprężenie i wymaga kontynuowania badań mikroskopowych procesów pęknięcia.

## PIŚMIENNICTWO

1. **Dal Fabbro I.M., Murase H., Segerlind L.J.:** Strain failure of apple, pear and potato tissue. ASAE Paper No. 80-3048. ASAE, St. Joseph, MI 49085, 1980.
2. **Finney E.E., Hall C.W.:** Elastic properties of potatoes. Trans. ASAE, 10(1), 4-8, 1967.
3. **Gabriel W.:** Biology of Potato (in Polish). PWN, Warsaw 1985.
4. **Gao Q., Pitt R.E.:** Mechanics of parenchyma tissue based on cell orientation and microstructure. Trans. ASAE 34(1), 232-238, 1991.
5. **Haman J., Konstankiewicz K.:** Destruction processes in the cellular medium of plant, 1. Damage of the liquid filled cellular body theoretical approach. Int. Agrophysics, 14, 1, 2000, (in press).
6. **Haman J., Konstankiewicz K.:** Procesy zniszczenia w komórkowym ośrodku roślinnym. Acta Agrophysica, 24, 67-86, 1999.
7. **Konstankiewicz K., Zdunek A.:** Metoda emisji akustycznej w badaniu procesów pęknięcia tkanek roślinnych. Acta Agrophysica, 24, 87-95, 1999.
8. **Malecki I., Ranachowski J.:** Acoustic emission, sources, methods, applications (in Polish). Biuro PASCAL, Warsaw, 1994.
9. **Mc Laughlin N.B., Pitt R.E.:** Failure characteristic of apple tissue under cyclic loading. Trans. ASAE, V. 27(1), 311-319, 1984.
10. **Nilson S.B., Hertz C.H., Falk S.:** On the relation between turgor pressure and tissue rigidity II. Physiologia Plantarum, 11: 818-837, 1958.
11. **Pitt R.E., Chen H.L.:** Time-Dependent aspects of the strength and rheology of vegetative tissue. Trans. ASAE, 26 (4), 1275-1280, 1983.
12. **Pitt R.E.:** Models for the rheology and statistical strength of uniform stressed vegetative tissue. Trans. ASAE, 25 (6), 1776-1784, 1982.
13. **Ranachowski Z.:** Methods of the Measurement and Analysis of the Acoustic Emission Signal (in Polish). IFTR Reports, 1/1997, IFTR, Warsaw 1997.
14. **Zdunek A., Konstankiewicz K.:** Acoustic Emission as a Method for Detection of Plant Tissue Fractures Caused by External Forces. Int. Agrophysics, 11, 223-227, 1997.

## AN INVESTIGATION OF CRACKING OF POTATO TUBER INNER CORE AND OUSTER CORE

*J. Haman<sup>1</sup>, K. Konstankiewicz<sup>2</sup>, A. Zdunek<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Boya-Żeleńskiego 4/72, 00-621 Warszawa

<sup>2</sup>Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences  
Doświadczalna 4, P.O. Box 201, 20-290 Lublin 27

## SUMMARY

The method of acoustic emission was applied to investigation a cracking processes of potato tissue tuber. Simultaneously recording of acoustic emission count sum and stress – strain curve allows obtaining three cracking stages for tissues: inner core and outer core. The stresses that begin following stages are higher values

for inner core tissue cracking. These values normalised to strength of the samples are the same for both types of tissues and varieties: Bila and Triada. The investigations done for two varieties of potato tissue show that inner core tissue has higher strength and acoustic activity in relation to outer core tissue.

**K e y w o r d s:** cracking, potato tuber tissue

