Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie

ACTA AGROPHYSICA

55

Artur Zdunek, Krystyna Konstankiewicz

EMISJA AKUSTYCZNA W BADANIU PROCESÓW PĘKANIA TKANEK ROŚLINNYCH

Monografia

Lublin 2001

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny - prof. dr hab. Jan Gliński, czł. koresp. PAN

Z-cy Redaktora Naczelnego:
prof. dr hab. Ryszard T. Walczak, czł. koresp. PAN - fizyka środowiska
prof. dr hab. Bogusław Szot - fizyka materiałów roślinnych
prof. dr hab. Ryszard Dębicki - gleboznawstwo

Rada Redakcyjna
prof. dr hab. J. Haman, czł. rzecz. PAN - przewodniczący

prof. dr hab. T. Brandyk
prof. dr hab. I. Dechnik
prof. dr hab. D. Drozd
prof. dr hab. F. Dubert
prof. dr hab. J. Fornal
prof. dr hab. E. Kamiński
prof. dr hab. A. Kędziora
prof. dr hab. T. Kęsik
prof. dr hab. Cz. Koźmiński
prof. dr hab. J. Laskowski
prof. dr hab. P.P. Lewicki
prof. dr hab. S. Nawrocki, czł. rzecz. PAN
prof. dr hab. E. Niedźwiecki
prof. dr hab. J. Sielewiesiuk
prof. dr hab. W. Stępniewski
prof. dr hab. Z. Ślipek
prof. dr hab. S. Zawadzki, czł. rzecz. PAN

Redaktor tomu
dr Artur Zdunek

Opiniował do druku
doc. dr hab. Józef Horabik

Adres redakcji

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201
20-290 Lublin 27, tel. (0-81) 744-50-61, e-mail: editor@demeter.ipan.lublin.pl
http: //www.ipan.lublin.pl

Publikacja indeksowana przez
Polish Scientific Journals Contents - Agric. & Biol. Sci. w sieci Internet
pod adresem http://saturn.ci.uw.edu.pl/psjc/ lub http://ciuw.warman.net.pl/alf/psjc

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2001

Wykonanie niniejszej pracy było możliwe dzięki projektom badawczym KBN: 5 P06 F00310 w latach 1996-1998, 7 T07 A02514 w roku 1998, 5 P06 F01317 w latach 1999-2001

ISSN 1234 - 4125

Wydanie I. Nakład 120 egz. Ark. wyd. 7,3
Skład komputerowy: dr Artur Zdunek
Druk: Zakład Usług Poligraficznych TEKST s.c., ul. Wspólna 19, 20-344 Lublin

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ 5

1. WSTĘP 7

2. PRZEGLĄD LITERATURY 10

2.1 Badania właściwości mechanicznych tkanek roślinnych o dużej zawartości wody 10
2.1.1 Testy dynamiczne 10
2.1.2 Testy quasi-statyczne 11
2.1.3 Wytrzymałość i stan krytyczny tkanki roślinnej 12
2.1.4 Wpływ turgoru na wytrzymałość tkanki roślinnej 13
2.1.5 Wpływ prędkości deformacji na wytrzymałość tkanki roślinnej 14

2.2 Właściwości mechaniczne elementów strukturalnych tkanki roślinnej 15
2.2.1 Komórki parenchymy 16
2.2.2 Pektynowe lamelle 17
2.2.3 Przestrzenie międzykomórkowe 17

2.3 Modele mechaniczne tkanek roślinnych 18
2.3.1 Główne kierunki badań modelowych 18
2.3.2 Model mechaniczny komórki roślinnej 19
2.3.3 Model oddziaływań międzykomórkowych 24
2.3.4 Pękanie konglomeratu komórek - model rozwoju pęknięcia w tkance roślinnej . 27

3. METODA EMISJI AKUSTYCZNEJ 30

3.1 Emisja akustyczna – podstawowe pojęcia 30
3.1.1 Definicja i klasyfikacja emisji akustycznej 30
3.1.2 Pomiary i analiza sygnału emisji akustycznej 31

3.2 Emisja akustyczna w tkankach roślinnych 35

4. CEL PRACY, HIPOTEZY BADAWCZE 38

5. OBIEKT BADAŃ 39

5.1 Uzasadnienie wyboru obiektu badań 39

5.2 Charakterystyka materiału badawczego 40

6. METODYKA BADAŃ 41

6.1 Procedury przygotowywania próbek 41
6.1.1 Metoda pobierania próbek 41
6.1.2 Zmiana tugoru tkanki bulwy ziemniaka 43

6.2 Procedury pomiarowe i aparatura 45
6.2.1 Testy z różnymi prędkościami przemieszczenia głowicy ściskającej 45
6.2.2 Testy ściskania tkanek o różnym turgorze 46
6.2.3 Pomiar parametrów struktury tkanek bulwy ziemniaka 46
6.2.4 Aparatura do pomiaru sygnału EA w tkankach roślinnych 47
6.2.5 Pomiar zależności naprężenie-odkształcenie i sygnału EA 49

6.3 Analiza statystyczna wyników 52

7. WYNIKI I DYSKUSJA 54

7.1 Rozkłady parametrów struktury komórkowej tkanek bulwy ziemniaka 54

7.2 Wyniki pomiaru sygnału EA w tkance bulwy ziemniaka 57

7.3 Wpływ prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej na procesy pękania tkanki roślinnej 60
7.3.1 Wpływ prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej na stan krytyczny tkanki bulwy ziemniaka 60
7.3.2 Wpływ prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej na wytrzymałość tkanki bulwy ziemniaka 66

7.4 Wpływ turgoru na procesy pękania tkanki roślinnej 76
7.4.1 Wpływ turgoru na stan krytyczny tkanki bulwy ziemniaka 76
7.4.2 Wpływ turgoru na wytrzymałość tkanki bulwy ziemniaka 80

8. WNIOSKI 86

9. PIŚMIENNICTWO 88

10. STRESZCZENIE 94

11. SUMMARY 95

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

EA - emisja akustyczna;
ε - odkształcenie [%];
ε_c - odkształcenie krytyczne [%];
ε_m - odkształcenie niszczące [%];
σ - naprężenie [MPa];
R_c - naprężenie krytyczne [MPa];
R - naprężenie niszczące [MPa];
p_0 - ciśnienie turgorowe gdy nie działają na tkankę siły zewnętrzne [MPa];
p - ciśnienie turgorowe odkształcanej tkanki roślinnej [MPa];
c_z - osmotyczność roztworu zewnętrznego [mOsmol/kg];
c_k - osmotyczność soku komórkowego [mOsmol/kg];
V - prędkość przemieszczenia głowicy ściskającej [mm/min];
l - wysokość próbki [mm];
l_0 - wysokość początkowa próbki [mm];
dN_{zl}/dt - tempo zliczeń [s^{-1}];
ΣN_{zl} - suma zliczeń;
Nc_{zl}- całkowita suma zliczeń;
$L_{V(k+1)-V(k)}$ - półprzedział ufności różnicy średnich dla kolejnych prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej odkształcania, gdzie k=1, 2, ..., 5;
$L_{p(k+1)-p(k)}$ - półprzedział ufności różnicy średnich dla kolejnych turgorów, gdzie k=1, 2....., 6;
$L_{zew-wew}$ - półprzedział ufności różnicy średnich rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego przy ustalonej prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej lub turgorze, gdzie *zew* – rdzeń zewnętrzny, *wew* – rdzeń wewnętrzny;
L_{odm} - półprzedział ufności różnicy średnich dwu odmian przy ustalonym turgorze.

1. WSTĘP

Materiał roślinny bywa często poddawany działaniom sił zewnętrznych podczas całego procesu produkcyjnego, co prowadzi do powstania zewnętrznych i wewnętrznych uszkodzeń. W konsekwencji powoduje to ogromne straty produkcji roślinnej i ogólne obniżenie jakości plonu [8, 87]. O ile materiał uszkodzony zewnętrznie łatwo jest wyeliminować w procesie sortowania, o tyle uszkodzenia wewnętrzne widoczne są dopiero w procesie obróbki przemysłowej lub u konsumenta. Poznanie praw rządzących procesami zniszczenia tkanek roślinnych jest więc niezwykle istotne z ekonomicznego punktu widzenia. Wiedza na temat warunków powstawania uszkodzeń może ułatwić taką organizację procesu produkcyjnego, włączając w to odpowiednią konstrukcję urządzeń oddziałujących na materiał roślinny, by ograniczyć straty i podnieść jakość produktu finalnego [39].

Od wielu lat prowadzone są intensywnie eksperymentalne prace nad poznaniem właściwości mechanicznych materiałów roślinnych. Obejmują one swoim zakresem takie zagadnienia jak: wpływ charakteru oddziaływań i cech fizyko – chemicznych badanego materiału na jego właściwości mechaniczne [21, 48, 87]. W wielu pracach podkreśla się również wagę poznania warunków mechanicznych powstawania uszkodzeń tkanki roślinnej pod wpływem zewnętrznych mechanicznych oddziaływań [38, 39, 70]. Liczne badania wykazały, że na wytrzymałość tkanki roślinnej mają wpływ między innymi takie parametry jak: turgor tkanki i prędkość elementów odkształcających badany materiał [4, 30, 50]. Wyniki dotychczasowych badań są jednak niejednoznaczne. Wymagają więc kontynuacji, również poprzez rozwój nowych metod umożliwiających efektywne badanie procesów niszczenia pod wpływem zewnętrznych oddziaływań.

Procesy niszczenia tkanki roślinnej są ściśle związane z właściwościami mechanicznymi i procesami zachodzącymi na poziomie komórkowym. Badania wykazały, że procesy zmiany zabarwienia tkanki (np. ciemna plamistość pouszkodzeniowa bulw ziemniaka) może być skutkiem rozerwania błon komórkowych [17, 80]. Wykazano również, że wytrzymałość tkanki roślinnej jest związana z powstawaniem makropęknięć struktury komórkowej [36, 63]. Procesy niszczenia tkanki roślinnej zachodzą więc na poziomie komórkowym i dlatego w badaniach tych zjawisk powinno się uwzględniać mikrostrukturę tkanek roślinnych i właściwości mechaniczne ich poszczególnych elementów

strukturalnych [39, 48, 67]. Rozwinięcie w ostatnich latach technik mikroskopowych i komputerowych umożliwiło stosunkowo łatwe uzyskiwanie obrazów struktury komórkowej oraz ich analizę ilościową [39, 67]. Natomiast pewnych informacji na temat właściwości mechanicznych poszczególnych elementów strukturalnych tworzących tkankę roślinną dostarczają nauki biologiczne, w których mechanika odgrywa również istotną rolę [27, 63, 74]. Wiedza ta jest często wykorzystywana do interpretacji wyników testów mechanicznych uzyskiwanych dla tkanek roślinnych pochodzenia rolniczego [39, 63, 65, 70, 71].

Równolegle z badaniami eksperymentalnymi prowadzone są prace teoretyczne nad modelem opisującym właściwości mechaniczne materiałów roślinnych. Podejmowano liczne próby stworzenia takiego modelu, jednak żaden z nich nie został jak dotychczas powszechnie zaakceptowany [22, 63, 65]. Bardzo interesującym podejściem do tego zagadnienia jest przyjęcie założenia, że właściwości mechaniczne tkanki roślinnej mogą być reprezentowane przez właściwości pojedynczej komórki [26, 65, 70, 71, 72]. Model taki umożliwia interpretację uzyskiwanych eksperymentalnie zależności dla próbek na podstawie procesów zachodzących na poziomie komórkowych. Wyniki modelu w postaci zależności naprężenie-odkształcenie dla elementów tworzących tkankę są również bardzo cenne w badaniach procesów pękania: ich powstawania i rozwoju.

Mimo bogatej literatury dotyczącej właściwości mechanicznych tkanek roślinnych wiedza na temat procesów pękania nadal jest niepełna. Jedną z przyczyn jest niedostateczne rozwinięcie technik pomiarowych, które umożliwiałyby śledzenie procesu rozwoju pęknięć w ściskanej tkance roślinnej. Stan taki bardzo utrudnia interpretację wyników obecnie otrzymywanych w testach mechanicznych, które jak sugeruje się w wielu pracach, zależą również od procesów mikropękania badanej tkanki [30, 38]. Należy również podkreślić, że nie opracowano dotychczas modelu pękania, którą można by było zastosować do materiałów takich jak tkanka roślinna. Stopień złożoności strukturalnej tych materiałów jest nieporównywalnie większy niż to ma miejsce w materiałach, których dotyczą rozważania inżynierskie i dla których z powodzeniem stosuje się teorie na bazie mechaniki ośrodków ciągłych i modeli reologicznych [38].

Wydaje się oczywistym, że w tak niejednorodnych strukturach jak materiał roślinny proces pękania musi się rozwijać stopniowo, mając swe źródło w najsłabszym elemencie struktury lub tam gdzie nastąpiło lokalne spiętrzenie naprężeń i dalej w wyniku osłabienia struktury propagować w materiale powodując w rezultacie osiągnięcie granicy wytrzymałości. Powyższą hipotezę

potwierdziły badania tkanek roślinnych z wykorzystaniem metody emisji akustycznej [37, 46, 85]. Zastosowanie metody emisji akustycznej pokazuje, że procesy pękania struktury komórkowej zachodzą już przy pewnym odkształceniu i naprężeniu (nazwane naprężeniem i odkształceniem krytycznym) o wartościach niższych niż te osiągane w punkcie wytrzymałości, a metoda emisji akustycznej zastosowana wraz z testem mechanicznym daje informacje na temat początku procesu pękania oraz jego rozwoju w ściskanej tkance roślinnej [37, 46, 85].

W pracy przedstawiono osiągnięcia, prezentowane w literaturze światowej, w zakresie badania właściwości mechanicznych ze szczególnym uwzględnieniem procesów niszczenia tkanek roślinnych o dużej zawartości wody, do których zaliczana jest także tkanka bulwy ziemniaka. Opisano również wybrane modele mechaniczne komórki roślinnej oraz model rozwoju pęknięcia w tkance roślinnej.

Szczególną uwagę zwrócono na prezentację metody emisji akustycznej – definicje, metody rejestracji i analizy sygnału EA oraz jej oryginalne zastosowania do badań uszkodzeń struktury komórkowej tkanek roślinnych.

Przedstawiono własne stanowisko badawcze, w którym wykorzystano metodę emisji akustycznej do badania procesów pękania ściskanej tkanki roślinnej. Wykazano, że jednoczesna rejestracja zależności naprężenie-odkształcenie i sygnału emisji akustycznej umożliwiają określenie warunków, przy których rozpoczyna się proces pękania struktury komórkowej oraz jego rozwoju aż do osiągnięcia granicy wytrzymałości badanej próbki. Opracowana metoda i stanowisko badawcze do wykrywania, rejestracji i analizy pęknięć nadaje się do szerokiej klasy ośrodków roślinnych.

Do badań wybrano tkanki bulwy ziemniaka, które zbudowane są z komórek o cechach typowych dla tkanek roślinnych pochodzenia rolniczego o dużej zawartości wody oraz zbliżonych do rozważanych w pracach teoretycznych. Eksperymenty przeprowadzono dla dwóch odmian ziemniaka. Opisano procedurę pobierania próbek do badań oraz zmiany ich turgoru. Przedstawiono również metodę uzyskiwania parametrów opisujących strukturę komórkową oraz dokonano porównania wielkości komórek z wynikami testów mechanicznych dla rdzenia wewnętrznego i zewnętrznego bulwy ziemniaka. Przedstawiono wyniki testów jednoosiowego ściskania tkanek bulwy ziemniaka przy różnych prędkościach przemieszczenia głowicy ściskającej oraz różnym turgorze próbek.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1 Badania właściwości mechanicznych tkanek roślinnych o dużej zawartości wody

Badania właściwości mechanicznych tkanek roślinnych o dużej zawartości wody, tj. owoców i warzyw, można podzielić ze względu na charakter oddziaływań zewnętrznych na testy quasi-statyczne oraz testy dynamiczne (udarowe) [6, 29].

- Procesy dynamiczne charakteryzują się zauważalną propagacją naprężenia w materiale (*ang. pressure wave* lub *shock wave*).
- Procesy quasi–statyczne zachodzą wówczas, gdy naprężenie rozkłada się równomiernie w całej próbce po zadaniu odkształcenia.

Wynik uzyskiwany w obu przypadkach może mieć charakter zależności naprężenie – odkształcenie [5, 63]. Jednym ze wspólnych celów badań właściwości mechanicznych warzyw i owoców jest poznanie natury powstawania procesów zniszczenia pod wpływem zewnętrznych oddziaływań oraz ich opis. Pomijając zagadnienia związane z charakterem tych oddziaływań skutki działania na tkankę roślinną sił zewnętrznych są podobne. Siły zewnętrzne występujące podczas zbioru, transportu i przechowywania mogą wywoływać pęknięcia struktury komórkowej i związane z tym straty ekonomiczne.

2.1.1 Testy dynamiczne

W dynamicznych testach mechanicznych badany materiał poddawany jest oddziaływaniom o charakterze uderzenia. Istnieje bardzo wiele rozwiązań konstrukcyjnych aparatów do symulacji oddziaływań udarowych. Opis niektórych z nich znajduje się w następujących pracach [6, 19, 29, 31, 58, 56, 87].

W testach dynamicznych bada się procesy zniszczenia tkanki roślinnej w zależności od parametrów oddziaływania (prędkości, energii, powierzchni kontaktu, itp.) jak i od cech badanego materiału (turgoru, odmiany, itp.) [9, 14, 19, 58, 56, 87]. Dla całych bulw ziemniaka wyróżnia się generalnie dwa rodzaje uszkodzeń: zewnętrzne i wewnętrzne [33, 87]. Do pierwszych z nich zaliczane są między innymi: obtarcia (*ang. skinning*), pęknięcia (*ang. cracks*), roztrzaskania (*ang. shatter*), rozcięcia (*ang. cuts*), oraz zadrapania (*ang. scrapes*) [7]. Wewnętrzne uszkodzenia bulwy ziemniaka to: pęknięcia, roztrzaskania,

zmiażdżenia (*ang. crushing*) oraz ciemna plamistość pouszkodzeniowa (*ang. blackspot*) [24, 68, 73, 87].

Większości powyższych typów uszkodzeń towarzyszy zmiana zabarwienia tkanki, które jest wynikiem rozerwania wewnątrzkomórkowej plasmalemmy [80]. W przypadku tkanki bulwy ziemniaka, dochodzi wówczas do enzymatycznego i nieenzymatycznego utleniania substancji fenolowych przez enzymy polifenylooksydazowe tworząc melaninowy pigment [17]. Proces ten można wykorzystać do identyfikacji pęknięć tkanki bulwy ziemniaka. Jednak zniszczenie ściany komórkowej nie musi oznaczać rozerwania plasmalemmy [80]. W takim wypadku nie następuje zmiana zabarwienia tkanki. Procesami niszczenia, które nie prowadzą do zmiany zabarwienia są: pęknięcia ścian komórkowych bez zniszczenia błony plazmatycznej oraz pękanie międzykomórkowe [18].

W przypadku bulw ziemniaka klasyfikację uszkodzeń wykonuje się najczęściej po pewnym czasie od powstania uszkodzenia (zależnym od temperatury otoczenia) na podstawie obserwacji bulwy po jej przecięciu lub obraniu [20]. Klasyfikacje te podawane są w skali kilkustopniowej, a ich kryteria mają charakter opisowy [7]. Przypisanie odpowiednich wag do poszczególnych typów zniszczenia pozwala na ilościowe opisanie podatności bulwy ziemniaka na uszkodzenia [32, 49, 57]. Parametr ten stosowany jest do oceny jakości produkowanych bulw ziemniaka i zależy od wielu czynników. Badania na ten temat obejmują cztery główne kierunki [87]:

- Ustalenie różnic odmianowych [82].
- Wpływu temperatury bulw w czasie zbioru i sposobu zbioru [55].
- Wpływu nawożenia mineralnego [34].
- Określenie współzależności między składem chemicznym bulw, budową anatomiczną perydermy i mechaniczną wytrzymałością ścian komórkowych [43, 48].

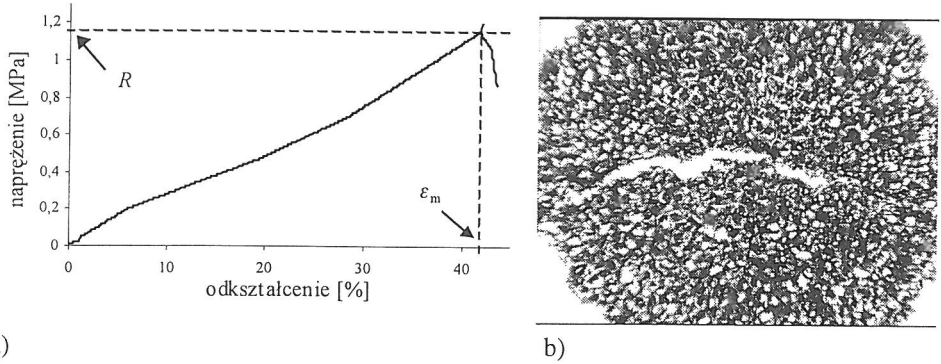
2.1.2 Testy quasi-statyczne

Testy quasi-statyczne wykonywane są przy użyciu maszyn wytrzymałościowych. [1, 13, 29, 46]. Badana próbka ma najczęściej kształt walca o różnych wymiarach i ściskana jest wzdłuż jego osi. W szczególnych przypadkach próbkę ściska się również promieniowo [29]. Ściskanie walcowej próbki eliminuje wpływ kształtu badanego materiału roślinnego na otrzymywane rezultaty [6]. Szczególnymi przypadkami testów quasi-statycznych są testy polegające na wbijaniu bolca w głąb miąższu całego owocu lub warzywa [62].

Wynikiem testu quasi - statycznego jest zależność siły reakcji badanej próbki od czasu lub odkształcenia. Obecnie stosowane techniki pomiarowe umożliwiają prowadzenie dowolnych testów dla tego typu materiałów np.: relaksacji, pełzania, ściskania bądź rozciągania z wybraną (lub zmienną) prędkością. Analiza zależności naprężenie - odkształcenie umożliwia uzyskanie zespołu parametrów opisujących właściwości mechaniczne badanego materiału. Niektóre z nich to: moduł sprężystości (dla ciała idealnie sprężystego nazywany modułem Younga), współczynnik Poissona, wytrzymałość, czas relaksacji [13, 29, 35, 46].

2.1.3 Wytrzymałość i stan krytyczny tkanki roślinnej

Zarówno w przypadku mechanicznych testów dynamicznych jak i quasi-statycznych odkształcanie tkanki roślinnej powoduje w ogólności wzrost naprężenia badanej próbki. *Wartość graniczną, przy której dalsze odkształcanie nie powoduje wzrostu naprężenia określa się jako wytrzymałość (ang. failure lub compressive strength) i opisywana jest przez naprężenie niszczące (ang. failure strees) oraz odkształcenie niszczące (ang. failure strain) zmierzone w tym punkcie* (Rys. 1a) [3, 13, 30, 46, 70].



Rys. 1. a) Przykładowa krzywa naprężenie σ - odkształcenie ε. R - naprężenie niszczące, ε_m – odkształcenie niszczące. b) Makropęknięcie próbki bulwy ziemniaka – zdjęcie wykonane po osiągnięciu przez próbkę granicy wytrzymałości.

Fig. 1. a) Stress σ - strain ε curve. R – failure stress, ε_m - failure strain. b) Macro-crack of potato tuber tissue – image made after sample failure.

Osiągnięcie przez badaną próbkę granicy wytrzymałości jest wynikiem pęknięcia o wymiarze porównywalnym z wymiarami próbki Rys. 1b [13, 46]. Liczne badania mikroskopowe dowodzą, że tkanka roślinna jest materiałem

wysoce niejednorodnym [39, 67]. Niejednorodny jest również rozkład naprężeń w ściskanej próbce. Istnieje więc możliwość powstania mikropeknięcia przy mniejszych wartościach naprężenia i odkształcenia niż te w granicy wytrzymałości badanej próbki [36, 39, 72]. Wprowadzono więc pojęcie *stanu krytycznego*, przy którym rozpoczyna się proces pękania struktury komórkowej tkanki roślinnej [46].

Przeprowadzone testy ściskania tkanki bulw ziemniaka wykazały, że wczesne fazy powstawania pęknięć mogą nie zmieniać nachylenia krzywej naprężenie-odkształcenie [85]. Dlatego wyznaczenie początku procesu pękania struktury komórkowej, jedynie w teście mechanicznym, jest bardzo trudne. Możliwości wyznaczenia warunków mechanicznych, w których rozpoczyna się proces pękania ściskanego materiału daje zastosowanie uzupełnionej tradycyjnym testem mechanicznym metody emisji akustycznej. Wykazano, że metoda ta może być również stosowana do badania materiałów roślinnych [46, 85]. Metoda poprzez stałe monitorowanie procesu odkształcenia umożliwia określenie, z pewnym przybliżeniem, *naprężenia krytycznego* R_c oraz *odkształcenia krytycznego* ε_c próbki, przy których rozpoczynają się procesy pękania tkanki. Szczegółowy opis pasywnej emisji akustycznej przedstawiono w Rozdziale 3 niniejszej pracy.

2.1.4 Wpływ turgoru na wytrzymałość tkanki roślinnej

Najważniejszymi elementami budowy komórki, ze względu na jej cechy mechaniczne, są ściany komórkowe i cytoplazma, która zawiera około 90% soków komórkowych. Cytoplasma otoczona jest półprzepuszczalną błoną nazywaną plasmalemmą, która separuje ją od ścian komórkowych [81]. Plasmalemma jest półprzepuszczalna dla osmotycznie czynnych substancji, natomiast ściana komórkowa jest prawie całkowicie przepuszczalna dla wody i rozpuszczonych w niej związków [42]. Sok komórkowy będący roztworem cukrów, kwasów organicznych, aminokwasów i soli posiada pewne stężenie substancji osmotycznie czynnych, z czym związane jest powstanie *ciśnienia osmotycznego* O_k obniżającego potencjał wody [25]. Wartość tego obniżenia nazwano *potencjałem osmotycznym* ψ_s i np. dla bulw ziemniaka w stanie naturalnym wynosi od -1 do - 0.5 MPa [25].

Komórka roślinna może pobierać wodę z otoczenia, a ilość wody, która może dostać się do wnętrza jest tym większa im większe jest ciśnienie osmotyczne soku komórkowego. *Stan naprężenia ścian komórkowych będący wynikiem nagromadzenia w komórce dużej ilości wody nazywany jest turgorem komórki,*

a ciśnienie wywierane przez ściany komórkowe na cytoplazmę i wakuole – ciśnieniem turgorowym [25]. Przyjmuje się, że ciśnienie turgorowe ma zawsze wartość dodatnią. Między ciśnieniem osmotycznym O_k i ciśnieniem turgorowym p_0 zachodzi następująca zależność:

$$O_k = p_0 + S\,, \tag{1}$$

gdzie:
O_k - ciśnienie osmotyczne soku wewnątrzkomórkowego równe co do wartości potencjałowi osmotycznemu ψ_s ze znakiem minus, p_0 - ciśnienie turgorowe, S-siła ssąca komórki równa co do wartości potencjałowi wody ψ komórki ze znakiem minus.

Często w badaniach za miernik turgoru przyjmuje się potencjał wodny tkanki roślinnej ψ, który jest sumą ciśnienia turgorowego p_0 i potencjału osmotycznego ψ_s [64]:

$$\psi = p_0 + \psi_s \leq 0\,. \tag{2}$$

Wyniki badań eksperymentalnych nie dają jednoznacznej odpowiedzi na pytanie jak turgor tkanki roślinnej wpływa na jej wytrzymałość. De Baerdemaeker i inni wykazali, że przy testach quasi – statycznych wzrost turgoru zmniejsza wytrzymałość na ściskanie natomiast zwiększa wytrzymałość na rozciąganie tkanki bulwy ziemniaka [16]. Natomiast Lin i Pitt stwierdzili, że naprężenie niszczące i odkształcenie niszczące w granicy wytrzymałości bulw ziemniaków i jabłek maleje wraz ze wzrostem turgoru [50]. Podobny wynik otrzymali Haman i inni dla bulw ziemniaka odmiany Panda [37]. Gołacki przeprowadzając quasi – statyczne pomiary dla korzeni marchwi wykazał, że odwodnienie tkanki (spadek turgoru) powoduje wzrost odkształcenia niszczącego, natomiast naprężenie niszczące nie zmienia się istotnie [30]. Podobny wynik uzyskali Bajema i inni w testach dynamicznych dla odwadnianych w naturalny sposób bulw ziemniaka [3, 5].

2.1.5 Wpływ prędkości deformacji na wytrzymałość tkanki roślinnej

Tkanka roślinna jest materiałem reologicznym, tzn. zachodzi następująca zależność: naprężenie – odkształcenie – czas [63]. W związku z tym właściwości mechaniczne, w tym również wytrzymałość, zależą od prędkości jej deformacji.

Dane literaturowe na temat wpływu prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej na wytrzymałość tkanki roślinnej nie są jednoznaczne. Miles i Rehkugler podają że wzrost prędkości powoduje wzrost przyłożonej siły

potrzebnej do osiągnięcia granicy wytrzymałości na ścinanie tkanki jabłek [61]. Odmienne wyniki uzyskał Dal Fabro i inni – wzrost prędkości powoduje spadek wytrzymałości tkanki jabłka i ziemniaka [15]. Natomiast Chen i Sun wykazali, że wyższym prędkościom deformacji towarzyszy spadek odkształcenia niszczącego, jednak naprężenie niszczące tkanki nie zmienia się lub rośnie w zależności od odmiany jabłka [13]. Bardzo podobne rezultaty uzyskał Gołacki dla korzeni marchwi, który zauważył dodatkowo, że odkształcenie niszczące maleje wraz ze wzrostem prędkości ale tylko dla niskich potencjałów wodnych < -1,4 MPa [30]. Podobny wynik uzyskał Pitt i Chen dla jabłek [70].

2.2 Właściwości mechaniczne elementów strukturalnych tkanki roślinnej

Osiągnięcie przez tkankę roślinną granicy wytrzymałości jest ściśle związane z procesami niszczenia jej struktury komórkowej. Najnowsze tendencje w badaniach materiałów pochodzenia biologicznego wiążą skutki mechanicznego oddziaływania z właściwościami mechanicznymi poszczególnych elementów strukturalnych [38, 70, 72].

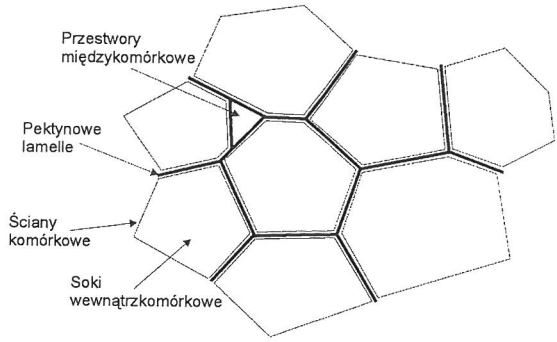
Haman i Konstankiewicz wyróżniają dwa główne typy materiałów roślinnych pochodzenie rolniczego [39]:

- Rośliny, których komórki są w czasie zbioru i późniejszych procesów wypełnione cieczą, lub cieczą i gazem (np.: rośliny korzeniowe, owoce, jagody). Materiały te często nazywane są materiałami o dużej zawartości wody.
- Rośliny, w których procesy biologiczne są bardziej zaawansowane, a komórki w znacznej części pozbawione wody, i w których zostały niemal zakończone procesy życiowe. Należą do nich np.: ziarna zbóż i dojrzałe nasiona różnych roślin.

Bulwy ziemniaka, jako obiekt badawczy niniejszej pracy, należą do pierwszej grupy wymienionych typów materiałów roślinnych.

W ogólności tkanka roślinna składa się z trzech podstawowych komponentów [42, 63] (Rys. 2):

- komórek parenchymy o cienkich ścianach i wypełnionych cieczą (sokiem) wewnątrzkomórkową,
- międzykomórkowych pektynowych lamelli, które są elementem łączącym komórki między sobą,
- międzykomórkowych przestworów, zawierających ciecz lub gaz.



Rys. 2. Schemat budowy tkanki roślinnej.
Fig. 2. Scheme of parenchyma tissue.

2.2.1 Komórki parenchymy

Ściany komórkowe zbudowane są z celulozowych cienkich mikrofibrylli, które są bardzo sztywne w kierunku ich osi, natomiast wykazują niewielki opór na zginanie [27, 63, 74]. Mikrofibrylle są przypadkowo osadzone w pektynowej matrycy o cechach materiału plastycznego. Przeprowadzone testy mechaniczne wykazały, że ściany komórkowe posiadają cechy materiału sprężysto – plastycznego, w których zachodzą zjawiska relaksacji i pełzania [51, 59, 75].

Sama komórka roślinna ma najczęściej kształt wielościanu, w którym zgromadzone soki wewnątrzkomórkowe wytwarzają pewne ciśnienie [65, 74]. Kiedy tak zbudowana tkanka roślinna jest ściskana, każda jej komórka przejmuje część zewnętrznego obciążenia. Nilson i inni podają, że zachodzą wówczas następujące procesy [65]:

- Komórki zmieniają swój kształt. Ze względu na to, że ściany komórkowe stawiają mały opór na zginanie, komórki stają się bardziej płaskie.
- Ciecz wewnątrzkomórkowa jest w przybliżeniu nieściśliwa, więc naprężenie ścian komórkowych wzrasta z powodu wzrostu stosunku powierzchni ścian komórkowych do jej objętości.
- Wzrasta turgor komórek z powodu wzrostu naprężenia ścian komórkowych.
- Następuje wypływ poza komórkę płynów wewnątrzkomórkowych z prędkością zależną od przepuszczalności plasmalemmy.

Powyższe procesy zachodzące w komórkach roślinnych tłumaczą niektóre wyniki badań właściwości mechanicznych tkanek roślinnych. Wzrost prędkości deformacji próbki tkanki roślinnej powoduje wzrost kąta nachylenia krzywej naprężenie – odkształcenie [61, 65]. Przyjmując, że błony komórkowe posiadają

określoną przepuszczalność, przy większej prędkości deformacji płyny wewnątrzkomórkowe mają mniej czasu na wypłynięcie z komórki. Z tym procesem związane jest również zjawisko relaksacji. Jeżeli odkształcimy komórkę roślinną do pewnej wartości wówczas ciśnienie wewnątrzkomórkowe będzie się powoli stabilizować poprzez wypływ cieczy poza komórkę [22]. Podobnie, w przypadku działania siły o stałej wartości na konglomerat komórek, zachodzić będzie zjawisko pełzania, którego przyczyną jest migracja cieczy między komórkami i poza komórki [23]. Z wypływaniem cieczy poza komórkę możemy również wiązać zjawisko nieodwracalności odkształcenia, natomiast sprężystość konglomeratu komórek jest wynikiem sprężystości ścian komórkowych [23].

2.2.2 Pektynowe lamelle

Pektynowe lamelle są elementem strukturalnym tkanki roślinnej spajającym komórki między sobą. Pektyny są materiałem plastycznym i amorficznym, który wykazuje wyższy opór na ścinanie niż na rozciąganie [63]. W związku z tym, że lamelle są materiałem plastycznym, mają one duży wpływ na reologiczne cechy całej tkanki. Pozwalają komórkom na powolną zmianę położenia i orientacji podczas działania sił zewnętrznych [72, 76].

Pektynowe lamelle posiadają podobnie jak ściany komórkowe pewną wytrzymałość [26, 61, 72]. Przekroczenie przez składowe sił tej wartości może spowodować powstanie płaszczyzny ścięcia i zmianę wzajemnego położenia komórek. Może również nastąpić odklejenie się wzajemne komórek w wyniku działania składowych sił prostopadłych do ścian komórkowych i skierowanych do wnętrza komórki.

2.2.3 Przestrzenie międzykomórkowe

Przestrzenie międzykomórkowe są obszarami tkanki, które powstają w wyniku braku połączenia komórek przez pektynowe lamelle (Rys. 2) [38]. W takiej przestrzeni może się znajdować gaz lub/i ciecz pozakomórkowa. Przestrzenie międzykomórkowe zawierające gaz umożliwiają komórkom zmianę wzajemnego położenia [72]. Duża ilość przestrzeni międzykomórkowych (np. w jabłkach) powoduje wypełnienie przez komórki przestrzeni międzykomórkowych i w konsekwencji niskie wartości współczynnika Poissona [12]. W odwrotnym przypadku, gdy przestrzeni międzykomórkowych jest niewiele (np. w bulwach ziemniaka) zmiana objętości próbki jest niewielka. Współczynnik Poissona może wynosić wówczas nawet 0,5 [23].

Mimo wielu badań nad wpływem przestrzeni międzykomórkowych na reologiczne właściwości tkanek roślinnych, wiedza na ten temat jest nadal bardzo skromna.

2.3 Modele mechaniczne tkanek roślinnych

2.3.1 Główne kierunki badań modelowych

Opisane powyżej badania empiryczne zachęciły do podejmowania licznych prób interpretacji teoretycznej otrzymywanych wyników.

W związku z tym, że tkanka roślinna wykazuje cechy materiału lepko-sprężystego, do opisu uzyskiwanych zależności naprężenie – odkształcenie wykorzystuje się modele reologiczne [22, 23, 29]. Jednak zakres stosowalności tych modeli, mimo swej popularności i łatwości w stosowaniu, jest ciągle dyskutowany. Ograniczeniem modeli reologicznych jest brak możliwości uwzględnienia budowy strukturalnej tkanek roślinnych i procesów fizycznych zachodzących wewnątrz materiału [38, 70]. Haman i Konstankiewicz stwierdzają, że: *„Wszystkie, lub prawie wszystkie roślinne surowce biologiczne produkowane przez rolnictwo stanowią materiały o bardziej lub mniej zróżnicowanej strukturze komórkowej..."*, natomiast w odniesieniu do adekwatności modeli reologicznych dla materiałów biologicznych: *„...model lepko sprężysty izotropowego ośrodka ciągłego może być dopuszczalny w przypadku rozważania dużych mas materiału np. zawartości zbiornika, czy pojemnika, nie pozwala natomiast na prawidłową interpretację zjawisk zachodzących w materiałach biologicznych w skali pojedynczego obiektu, czy komórki..."* [39].

Wiedza na temat właściwości mechanicznych poszczególnych elementów strukturalnych ośrodka roślinnego umożliwiła podjęcie próby opracowania modelu, który uwzględniałby budowę strukturalną oraz właściwości jej elementów składowych. Jeden z pierwszych modeli tego typu stworzyli Nilson i inni [65].

Nilson i inni stwierdzili, że właściwości mechaniczne całej tkanki mogą być reprezentowane przez zachowanie się pojedynczej komórki roślinnej i zaproponował model komórki o kształcie sfery. Modelowa komórka jest wypełniona nieściśliwą cieczą, a same ściany komórkowe są idealnie sprężyste i nieprzepuszczalne. Przyjęte założenia nie uwzględniają więc procesów migracji cieczy wewnątrzkomórkowej poza komórkę. Jednak uzyskany wynik w postaci

równania (3) poprawnie odzwierciedla zależność modułu Younga E od ciśnienia turgorowego p.

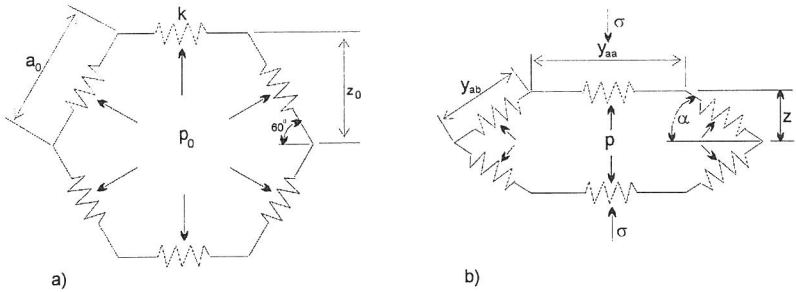
$$E=\left[1+\frac{7-5\mu}{20(1+\mu)}\right]3p+\frac{3(7-5\mu)D}{10(1+\mu)r_0}, \qquad (3)$$

gdzie:
μ - współczynniki Poissona, $D=K/(1-\mu)$, gdzie $K=E_c d$ – jest iloczynem modułu Younga ściany komórkowej E_c i stałej grubość ściany d, r_0 – promień komórki przy ciśnieniu turgorowym $p= 0$.

Wadą zaproponowanego modelu matematycznego jest nie uwzględnienie procesów wpływających na wytrzymałość ścian komórkowych i wypływaniem cieczy wewnątrzkomórkowej, przez co stosowanie modelu ogranicza się tylko do odkształceń sprężystych.

2.3.2 Model mechaniczny komórki roślinnej

Opracowany przez Pitta model matematyczny opisuje zależność naprężenie – odkształcenie dla ścian dwuwymiarowej komórki [70, 72]. Komórka zbudowana jest ze sprężystych ścian komórkowych, które otaczają nieściśliwą ciecz (Rys. 3a). Postępem w stosunku do poprzednio przedstawionego modelu Nilsona jest uwzględnienie wypływu cieczy wewnątrzkomórkowej poza komórkę podczas jej ściskania.



Rys. 3. Model komórki tkanki roślinnej przyjęty przez Pitta i Chena, a) przed ściskaniem, b) poddana zewnętrznym naprężeniem σ [70].

Fig. 3. Plant tissue cell mechanical model assumed by Pitt and Chen, a) before loading, b) subjected to external loading σ [70].

Komórka w stanie początkowym, kiedy nie działają na nią żadne siły zewnętrzne, ma kształt sześciokąta (Rys. 3a). Początkowe ciśnienie turgorowe

wynosi p_0, powierzchnia A_0, długość ściany komórkowej a_0, wysokość całkowita komórki $2z_0$, natomiast ściany komórkowe charakteryzuje stała sprężystości k. Odkształcenie komórki następuje w kierunku przyłożonej siły. Jeżeli wstępnie przyjmiemy, że ściany są nieprzepuszczalne, wówczas podczas odkształcania komórki zachowana będzie jej powierzchnia przekroju, nastąpi natomiast zmiana długości ścian komórkowych do y_{ab} oraz y_{aa} (Rys. 3b). Wysokość komórki zmniejszy się do $2z$, a ciśnienie turgorowe wzrośnie do p. Korzystając z zależności geometrycznych oraz zasady minimum energii odkształcenia autorzy modelu uzyskali następującą zależność [70]:

$$0 = z\left\{a + (3y_{ab} - 2a)\sqrt{1-\left(\frac{z}{y_{ab}}\right)^2}\right\} - \frac{A_0}{2}, \tag{4}$$

gdzie: $A_0 = \frac{3\sqrt{3}}{2}a_0^{\,2}$, $a = a_0\left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{p_0}{k}\right)$

Pozostałe parametry odkształconej komórki uzyskać można z następujących zależności:

$$\alpha = arc\cos\sqrt{1-\left(\frac{z}{y_{ab}}\right)^2}\quad , \tag{5}$$

$$y_{aa} = a + 2(y_{ab} - a)\cos\alpha\quad . \tag{6}$$

Znormalizowane siły F_{aa} i F_{ab} względem k, występujące w ścianach komórkowych można wyrazić wzorami:

$$\frac{F_{aa}}{k} = y_{aa} - a\quad , \tag{7}$$

$$\frac{F_{ab}}{k} = y_{ab} - a\quad . \tag{8}$$

Ciśnienie turgorowe działające wzdłuż pionowego kierunku z Rys. 3b ma wartość:

$$p = \frac{F_{aa}}{kz} \tag{9}$$

W celu wyznaczenia unormowanego naprężenia zewnętrznego σ/k powodującego odkształcanie komórki można skorzystać z warunku równowagi sił działających na poziomą ścianę komórkową oznaczoną na Rys. 3b przez indeks „*aa*". Wówczas wyrażenie na unormowane naprężenie dane jest wzorem:

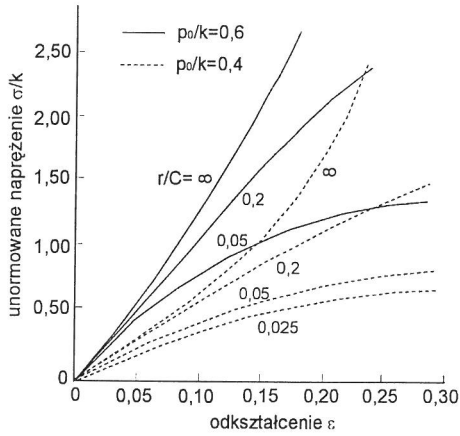
$$\frac{\sigma}{k} = \frac{p}{k}\left(a + \frac{F_{aa}}{k}\right) + 2\frac{F_{ab}}{k}[(\cot\alpha)(\cos\alpha) - \sin\alpha]. \tag{10}$$

Stała powierzchnia komórki w powyższych rozważaniach jest konsekwencją założenia nieprzepuszczalności ścian komórkowych. Zakładając, że zmiana (zmniejszenie) powierzchni komórki jest proporcjonalna do różnicy aktualnego ciśnienia turgorowego p i początkowego ciśnienia turgorowego p_0, ściskanie komórki ze stałą prędkością powoduje jednostajną zmianę powierzchni. Oznaczając aktualną powierzchnię przez A oraz przepuszczalność ścian komórkowych jako C, zmiana powierzchni w czasie dA/dt może być wyrażona wzorem [70]:

$$\frac{dA}{dt} = -\frac{C}{k}(2y_{aa} + 4y_{ab})(p - p_0) \quad . \tag{11}$$

Definiując odkształcenie względne komórki ε jako $\varepsilon = 1 - \frac{z}{z_0}$ i wykorzystując powyższe równania, dzięki metodom numerycznym, można wyznaczyć zależności od czasu interesujących nas wielkości: σ, ε, F_{aa}, F_{ab} oraz p.

Uzyskane zależności pozwalają na wyznaczenie podstawowej charakterystyki naprężenie – odkształcenie $\sigma(\varepsilon)$ dla pojedynczej wyidealizowanej komórki. Zależność ta dla różnych unormowanych początkowych ciśnień turgorowych p_0/k i różnych stosunków r/C, ($r = \frac{1}{z_0}\frac{dz}{dt}$ oznacza względną prędkość deformacji komórki), przedstawiona jest na Rys. 4.

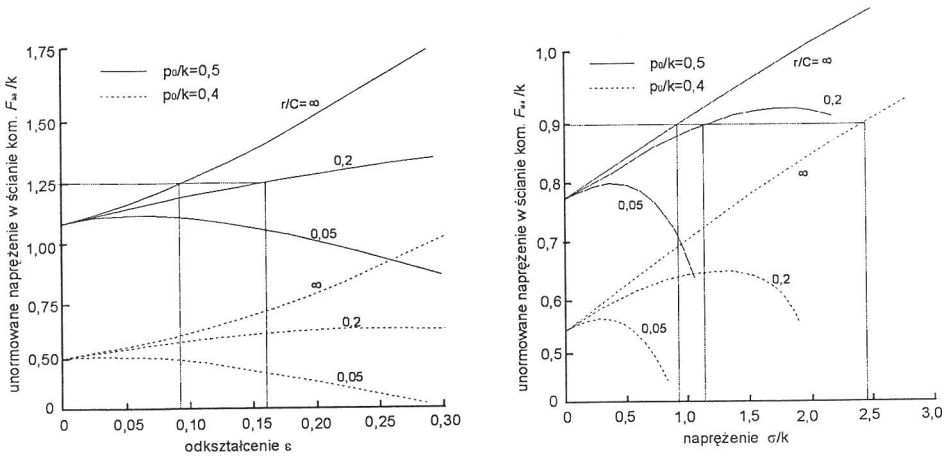


Rys. 4. Zależność unormowanego naprężenia od odkształcenia przy różnych początkowych ciśnieniach turgorowych p_0 oraz dla różnych stosunków *r/C*. [70].

Fig. 4. Normalized stress as a function of strain for different initial turgor pressures p_0 and for different *r/C* ratio [70].

Z analizy wykresu wynika, że zmniejszenie przepuszczalności ścian komórkowych *C* lub wzrost prędkości *r* powoduje wzrost sztywności komórki, zdefiniowanej jako nachylenie krzywych naprężenie-odkształcenie. Możemy również zaobserwować, że wyższemu początkowemu ciśnieniu turgorowemu p_0/k towarzyszy wyższa sztywność dla danego stosunku *r/C*. Autorzy modelu stwierdzili również, że przy ciśnieniu $p_0 = 0$ (nie pokazano na Rys. 4, [70]) początkowe nachylenie jest bliskie zero i wzrasta wraz ze wzrostem ciśnienia początkowego p_0.

Powyższy model pozwala również na jakościowy opis warunków mechanicznych powodujących pękanie ścian komórkowych. Zależność siły $F_{\alpha\alpha}/k$ od odkształcenia tkanki ε oraz od zadanego naprężenia σ pozwala ocenić wpływ początkowego ciśnienia turgorowego p_0, przepuszczalności ścian komórkowych *C* oraz prędkości *r* na stan naprężenia w ścianach komórkowych (Rys. 5a i b).



Rys. 5. Zależność unormowanego naprężenia w ścianie komórkowej F_{aa} w funkcji a) odkształcenia komórki ε, b) unormowanego naprężenia komórki σ/k [70].

Fig. 5. Normalized stress in cell wall F_{aa} as a function of a) cell strain ε, b) normalized cell stress σ/k [70].

Powyższe wykresy pokazują, że wyższa wartość ciśnienia p_0 powoduje wyższe naprężenie F_{aa} przy danym odkształceniu (Rys. 5a) lub naprężeniu (Rys. 5b). Wyższe naprężenie ścian komórkowych występuje również przy wyższym stosunku r/C.

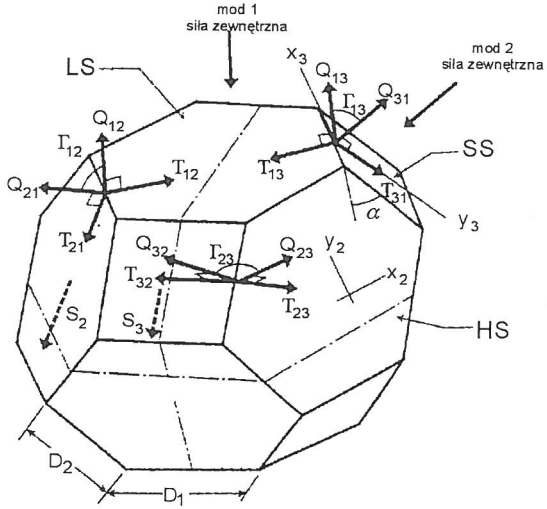
Dla stałej wartości wytrzymałości ścian komórkowych na rozciąganie F_c (np., niech tak jak na Rys. 5a $F_c = Faa/k = 1.25$) i przy ustalonej początkowej wartości p_0 odkształcenie, przy którym ściana pęka, wzrasta przy zmniejszaniu się stosunku r/C (np. przy mniejszej prędkości deformacji komórki). Podobną zależność obserwujemy na Rys. 5b. Przy stałej wartości wytrzymałości na rozciąganie F_c (np. $F_c = Faa/k = 0,9$) i stałej przepuszczalności C zadane naprężenie σ, przy którym osiągana jest granica wytrzymałości ściany komórkowej, wzrasta w miarę spadku prędkości deformacji komórki. Na Rys. 5b można również zaobserwować, że przy stałym stosunku r/C, (np. $r/C=\infty$) mniejsze początkowe ciśnienie p_0 zwiększa wartość naprężenia, przy którym ściana pęka.

Bardzo interesującym wynikiem prezentowanego modelu jest zobrazowanie efektu relaksacji. Dla niskich wartości stosunku r/C oraz przy niskim początkowym ciśnieniu turgorowym p_0 naprężenie w ścianach komórkowych maleje wraz ze wzrostem odkształcenia – nie może więc przekroczyć granicy

wytrzymałości (Rys. 5b). Zjawisko to autor modelu wiąże z wypływaniem cieczy wewnątrzkomórkowej poza komórkę. Konsekwencją tego procesu może być w pewnych warunkach zauważalny wzrost wytrzymałości tkanki.

2.3.3 Model oddziaływań międzykomórkowych

Poznanie procesów pękania międzykomórkowego wymaga znajomości rozkładu sił działających pomiędzy komórkami oraz ich zmiany w wyniku deformacji. Pierwsze prace w tym kierunku podjęli Gao i Pitt [26], którzy jako modelowy kształt komórki roślinnej przyjęli czternastościan foremny z 8-ma sześciokątami i 6-ma kwadratami (Rys. 6). Taki kształt komórki powoduje, że styka się ona z 14-ma sąsiadami. Przyjęto, że ściany modelowej komórki stanowią sprężyste nieprzepuszczalne membrany, a komórka wypełniona jest nieściśliwą cieczą. W przypadku braku ciśnienia turgorowego krawędzie komórki mają jednakową długość D_0, natomiast przy ciśnieniu P_i – długość D_i, przy czym komórka zachowuje swój pierwotny kształt.



Rys. 6. Model komórki tkanki roślinnej wraz z siłami: rozciągającymi T, odklejającymi Q i ścinającymi S [26].

Fig. 6. Plant tissue cell mechanical model with tension forces T, debonding forces Q and shear forces S [26].

Istnieją dwa możliwe sposoby odkształcania struktury, które autorzy modelu nazwali modami: mod 1 – kierunek zadawanej siły prostopadle do płaszczyzny sześciokąta oraz mod 2 – kierunek zadawanej siły prostopadle do płaszczyzny kwadratu (Rys. 6). Przyjęto również pewne uproszczenia co do procesu odkształcania. Ściskana komórka w modzie 1 lub 2 odkształca się w kierunku działania siły, przy czym ściany komórkowe pozostają płaskie, krawędzie prostopadłe do kierunku działania siły wydłużają się do tej samej długości D_1, a pozostałe krawędzie do D_2. Istnieją tylko trzy grupy ścian różniące się odkształceniem: ściana, do której przyłożona jest siła – LS, ściany sześciokątne – HS oraz ściany kwadratowe – SS. Rozwiązania modelu dla obu uwzględnionych modów są podobne [26].

Składowe sił, które działają prostopadle do ścian komórkowych (oznaczone na Rys. 6 przez Q) są odpowiedzialne za odklejanie się wzajemne komórek. Korzystając z zależności geometrycznych oraz z warunku równowagi sił na krawędziach komórki uzyskuje się równanie na Q_{ij}:

$$Q_{ij} = (T_{ji} - T_{ij}\cos\Gamma_{ij})/\sin\Gamma_{ij} \quad , \tag{12}$$

gdzie:
i, j = 1, 2, 3; i≠j , T - składowa siły tak jak na Rys. 6, Γ - kąt tak jak na Rys. 6.

Siły ścinające w pektynowych lamellach są wynikiem nachylenia ścian komórkowych względem działającej siły. Definiując średnie naprężenie ścinające na każdej powierzchni modelowej komórki, S_2 na powierzchni HS i S_3 na powierzchni SS, jako stosunek siły ścinającej i deformowanej powierzchni autorzy modelu uzyskują następujące zależności:

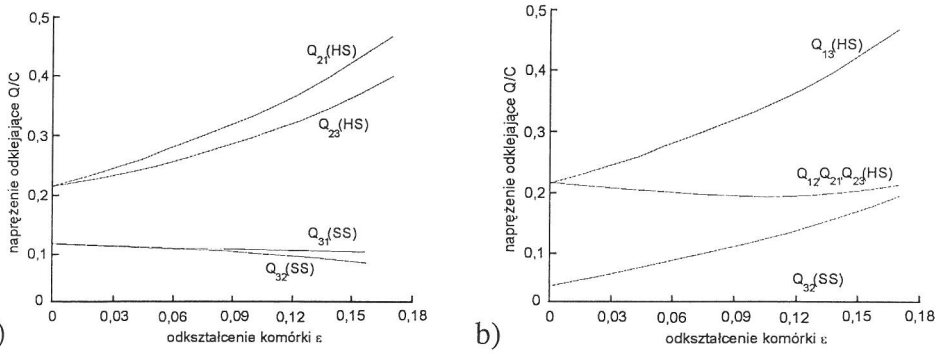
$$S_3 = \frac{1}{A_3}(PA_3 - 2Q_{31}D_1 - 2Q_{32}D_2)\tan\Gamma_{13} \quad , \tag{13}$$

$$S_2 = \frac{1}{A_2}(PA_2 - 2Q_{21}D_1 - 4Q_{23}D_2)\tan\Gamma_{12} \quad , \tag{14}$$

gdzie:
P – ciśnienie turgorowe, A_3 – zdeformowana powierzchnia SS, A_2 – zdeformowana powierzchnia HS.

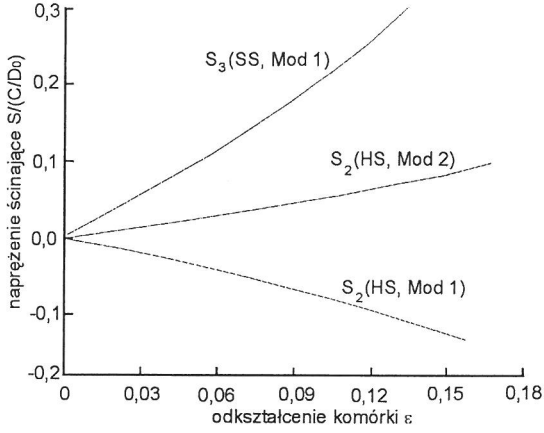
Procedury numeryczne rozwiązania powyższych równań wraz z dodatkowymi równaniami wynikającymi z rozkładu sił i geometrii komórki, opisane w pracy

[26], pozwalają na uzyskanie zależności poszczególnych naprężeń ścinających S i sił odklejających Q od odkształcenia (Rys. 7a i b oraz Rys. 8).



Rys. 7. Zależność siły odklejającej Q/C od odkształcenia komórki ε dla dwóch przypadków oddziaływania siły na komórkę a) dla modu 1, b) dla modu 2 [26].

Fig. 7. Debonding forces Q/C as a function of cell strain ε for two cases of loading a) mode 1, b) mode 2 [26].



Rys. 8. Zależność naprężenia ścinającego $S/(C/D_0)$ od odkształcenia komórki ε [26].

Fig. 8. Shear force $S/(C/D_0)$ as a function of cell strain ε [26].

Analiza powyższych krzywych pozwala ocenić jak orientacja komórek determinuje powstawanie pęknięć międzykomórkowych. Odkształcanie komórki powoduje wzrost składowych sił odpowiedzialnych za odklejanie się wzajemne komórek Q_{21} (HS), Q_{23} (HS) w modzie 1 oraz Q_{13} (HS) w modzie 2 (Rys. 7a i b). Wynik ten sugeruje, że w płaszczyznach HS istnieje największe prawdopodobieństwo odklejenia się sąsiadujących ze sobą komórek. Na Rys. 7a

i b można zauważyć, że istnieją płaszczyzny, w których odkształcenie powoduje spadek wartości sił odklejających: Q_{31} (SS), Q_{32} (SS) w modzie 1 oraz Q_{12}, Q_{21}, Q_{23} (HS) w modzie 2.

Największe naprężenie ścinające powstaje dla modu 1 w płaszczyźnie SS, przy czym w modzie 2 występuje tylko naprężenie ścinające w płaszczyźnie HS (Rys. 8). Naprężenie S_2 (HS) dla modu 1 maleje przy wzroście odkształcenia. Innymi słowy naprężenie S_2 przyjmuje przeciwny zwrot, przeciwstawiając się nagłemu wzrostowi składowej Q_{21} w płaszczyźnie HS (patrz Rys. 7a i Rys. 8).

2.3.4 Pękanie konglomeratu komórek - model rozwoju pęknięcia w tkance roślinnej

Obecna wiedza na temat procesów zachodzących w odkształcanej tkance roślinnej wskazuje na dwa główne procesy zniszczenia: pękanie błon komórkowych oraz pękanie międzykomórkowe. Wielu badaczy twierdzi, że ściany komórkowe oraz pektynowe połączenia między komórkami tworzą szkielet, który determinuje wytrzymałość całej tkanki [29, 30, 38, 63, 72]. Procesy pękania powodują mechaniczne „osłabienie" materiału i w konsekwencji osiągnięcie granicy wytrzymałości, w którym zniszczenie tkanki objawia się w postaci jej makropęknięć [13, 38]. Bardzo interesującym zagadnieniem, które podjęli Haman i Konstankiewicz jest problem propagacji pęknięć w takim materiale jak tkanka roślinna [39].

Punktem wyjścia rozważań na temat rozwoju pęknięcia w tkance roślinnej jest założenie, że front szczeliny stanowi pęknięta i opróżniona z treści komórka, która początkowo znajduje się w otoczeniu komórek nieuszkodzonych. Rozważania dotyczą często spotykanego w praktyce przypadku jednoosiowego stanu naprężeń, w którym odkształcenie próbki w kierunku prostopadłym do osi nie jest ograniczane. Szczelina może być reprezentowana przez elipsę o osiach 2a – oś dłuższa i 2b – oś krótsza (Rys. 9a). Szczelina znajduje się w przestrzeni poddanej odpowiednio zewnętrznym naprężeniom ściskającym σ_1 i σ_3 (gdzie $\sigma_1 >> \sigma_3$), a jej dłuższa oś nachylona jest w stosunku do większego naprężenia głównego σ_1 o kąt β (Rys. 9b).

Na Rys. 9b przedstawiony został rozkład interesujących nas naprężeń normalnych σ_x, σ_y i stycznych $\tau_{xy} = \tau_{yx}$. Na propagację szczeliny największy wpływ ma naprężenie σ_y, które można wyrazić wzorem:

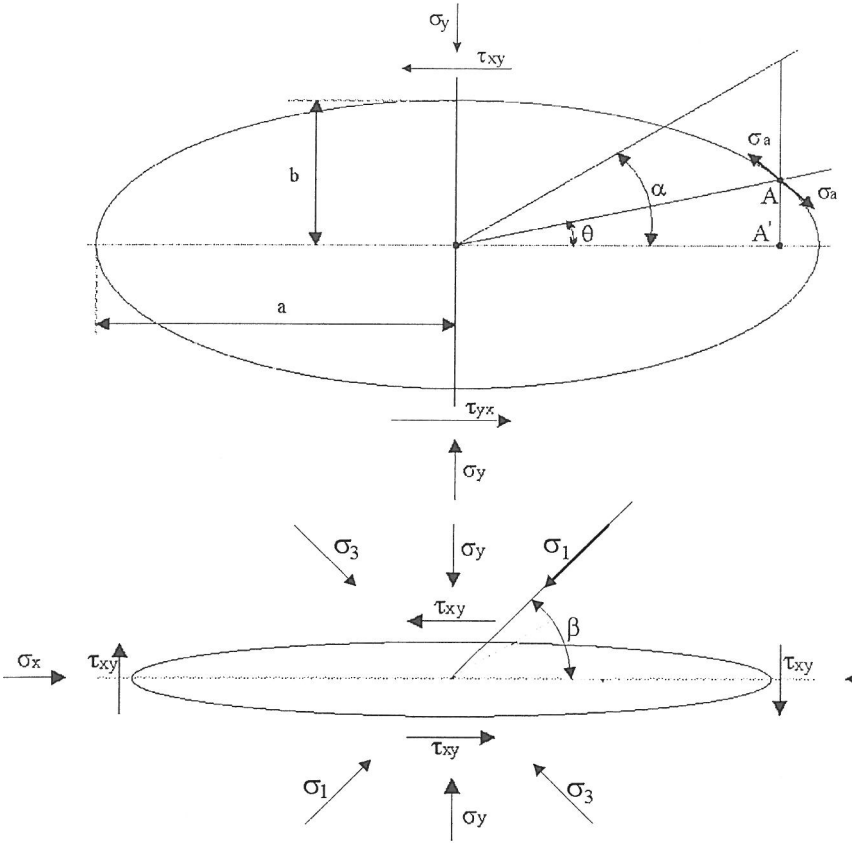
$$2\sigma_y = (\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta \quad , \qquad (15)$$

$$2\tau_{xy} = (\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta \quad . \qquad (16)$$

Ze względu na rozwój szczeliny interesuje nas naprężenie styczne w pewnym punkcie elipsy. Naprężenie to w punkcie *A* jest równe (Rys. 9a):

$$\sigma_a = \frac{\sigma_y\left[m(m+2)\cos^2\alpha - \sin^2\alpha\right] - \tau_{xy}\,2\left(1+m^2\right)\sin\alpha}{m^2\cos^2\alpha + \sin^2\alpha}, \qquad (17)$$

gdzie: m =b/a.



Rys. 9. a) Parametry szczeliny: σ_a – naprężenie rozciągające styczne do powierzchni w punkcie *A* b) Model pęknięcia znajdującego się we wnętrzu przestrzeni poddanej zewnętrznym naprężeniom σ_1 i σ_3, [39].

Fig. 9. a) Crack parameters: σ_a – stretching stress tangential to the surface in point *A*, b) model of crack within the space subjected to external loadings σ_1 i σ_3, [39].

W rzeczywistości m jest małe z powodu spłaszczenia szczeliny, dlatego największe wartości σ_a wystąpią przy małych wartościach kąta Θ. W takim przypadku α jest również małe, wówczas przyjmując, że $\sin\alpha \approx \alpha$ oraz $\cos\alpha \approx 1$ możemy uprościć równanie (17) do postaci:

$$\sigma_n = \frac{2(m\sigma_y - \tau_{xy}\alpha)}{m^2 + \alpha^2} \quad . \tag{18}$$

Ze względu na małe wartości mianownika w równaniu (18), σ_a może przyjmować duże wartości, przekraczające wartość naprężeń zewnętrznych. Ściany sąsiednich komórek będą więc poddane, oprócz naprężeń zewnętrznych, również naprężeniom spowodowanym powstaniem szczeliny, co sprzyja dalszemu rozwojowi szczeliny.

Dalsza propagacja szczeliny zależeć będzie przede wszystkim od wielkości sąsiadujących bezpośrednio ze szczeliną komórek. Naprężenie w ścianach σ, które występuje w wyniku istnienia ciśnienia turgorowego p, w skrajnych przypadkach kuli i walca, zawiera się odpowiednio w granicach:

$$\frac{p\rho}{g} \geq \sigma \geq \frac{p\rho}{2g} \quad , \tag{19}$$

gdzie: g – grubość ściany komórkowej, ρ - promień krzywizny ściany komórkowej.

Wyrażenie (19) sugeruje, że wyższe naprężenia powstają w komórkach dużych, przy tym samym ciśnieniu turgorowym, a więc i większe prawdopodobieństwo rozerwania ściany komórkowej. Tkanki roślinne są w dużym stopniu anatomicznie niejednorodne, więc proces pękania struktury komórkowej będzie zależał między innymi od rozkładu wielkości komórek [39].

3. METODA EMISJI AKUSTYCZNEJ

3.1 Emisja akustyczna – podstawowe pojęcia

3.1.1 Definicja i klasyfikacja emisji akustycznej

W każdym materiale istnieje pewien wstępny niejednorodny rozkład energii wewnętrznej. Rozkład ten może zostać zmieniony w wyniku działania bodźca zewnętrznego, np.: siły zewnętrznej, reakcji chemicznej, zmiany temperatury, itp. Może wówczas dojść do zapoczątkowania lokalnych procesów deformacyjnych i wyzwolenia pewnej porcji energii. Wyzwolona energia zostaje zużyta na wykonanie pracy mechanicznej, ciepło oraz mała jej część na wypromieniowanie w postaci fal sprężystych. Fale te nazywane są *sygnałem emisji akustycznej* (w skrócie sygnałem EA). Sygnał EA propaguje do powierzchni badanego materiału, gdzie może zostać zarejestrowany [52].

Ze względu na to, że powstanie sygnału EA jest zawsze związane z jego propagacją, terminem emisja akustyczna (w skrócie EA) określa się zjawisko tworzenia i propagacji fal sprężystych w wyniku nagłego uwolnienia zmagazynowanej energii w pewnym punkcie badanego ośrodka. Natomiast źródłem sygnału emisji akustycznej określa się miejsce lub element strukturalny emitujący sygnał EA [54].

Źródła sygnału EA można podzielić ze względu na procesy w nich zachodzące. Najważniejsze z nich to [52]:

- ruchy defektów sieci krystalicznej,
- przejścia pomiędzy stanami energetycznymi w atomach,
- powstawanie mikropęknięć i ich rozwój (propagacja),
- ruchy ośrodka i towarzyszące im tarcie,
- reakcje chemiczne i przejścia fazowe.

Sygnał emisji akustycznej powstający w wyniku wyżej wymienionych procesów ma różne amplitudy i częstotliwości. Najwyższe wartości mierzonych amplitud są wynikiem formowania się pęknięć, najniższe zaś przejść pomiędzy poziomami energetycznymi. Obecnie możliwy jest pomiar sygnału EA z wysoką czułością w bardzo szerokim zakresie częstotliwości i dla różnych źródeł: od około 10 Hz dla badań sejsmologicznych aż do 100 MHz dla emisji akustycznej w metalach i ceramikach.

3.1.2 Pomiary i analiza sygnału emisji akustycznej

Emisja akustyczna rozumiana jako zjawisko fizyczne wymaga analitycznego opisu fal sprężystych w dowolnym punkcie materiału w funkcji czasu. Wychodząc z założenia, że źródłem sygnału jest lokalna zmiana pola naprężeń w materiale, generacja sygnału EA może być przedstawiona za pomocą równania falowego [53]:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \eta) grad\ div\ u + \eta\ div\ grad\ u\ , \qquad (20)$$

gdzie:
ρ - gęstość ośrodka, u – wektor przemieszczeń, λ, η - stałe Lame'a, charakteryzujące ośrodek.

Równanie (20) jest słuszne dla ośrodka sprężystego i izotropowego. W rzeczywistości fala sprężysta propagując w ośrodku może podlegać wszystkim zjawiskom falowym, np.: dyfrakcji, interferencji i odbiciu. Zarejestrowany sygnał emisji akustycznej jest więc pochodną zjawisk falowych, którym jest poddawany sygnał EA na drodze od źródła do odbiornika. Z tych powodów przemieszczenie powierzchni ośrodka (rejestrowane przez odbiornik sygnału EA) jest funkcją źródła sygnału EA oraz funkcją propagacji sygnału EA przez ośrodek. Dla impulsowego źródła sygnału EA rejestrowany przez odbiornik wektor przemieszczenia można opisać równaniem [10]:

$$u_i(t') = G_{ij}(r', t'-t, r)\, f_j(t) \qquad , \qquad (21)$$

gdzie:
$G_{ij}(r', t'-t, r)$ – funkcja Greena dla przemieszczeń w kierunkach x_i' y_i' z_i' w punkcie r' i chwili t' dla przypadku, gdy źródłem tych przemieszczeń jest lokalne zaburzenie f_j pola naprężeń w punkcie r w chwili t.

Rozwiązania równań (20) i (21) zależą od przyjętych założeń co do właściwości ośrodka i jego geometrii oraz funkcji zmian amplitudy pola naprężeń f. Jednak nawet dla uproszczonej geometrii ośrodka, jakim jest nieograniczona płyta o skończonej grubości, analityczne rozwiązania są bardzo złożone. Szczegółowe rozważania na temat równań opisujących propagację sygnału EA w modelowych ośrodkach z podaniem bogatej bibliografii można znaleźć między innymi w pracach Ceranoglu i Pao oraz Witosa [11, 84].

Innym sposobem analizy sygnału emisji akustycznej jest wyodrębnienie pewnych charakterystycznych parametrów sygnału EA (deskryptorów) i badanie ich zmian w czasie oraz w funkcji innych parametrów zewnętrznych. W ten sposób można otrzymać pewne informacje o procesach zachodzących w źródle. Najczęściej stosowane deskryptory zamieszczono w Tabeli 1 [79].

Ograniczeniami co do stosowania poszczególnych deskryptorów są możliwości aparatury pomiarowej. We współczesnej aparaturze do pomiaru sygnału EA stosuje się 4 podstawowe tory pomiarowe, są to [52]:

I – zliczenie impulsów zdarzeń,
II – RMS (wartość skuteczna sygnału EA) i energia impulsów,
III – magnetofon pomiarowy,
IV – detektor szczytowy.

Największe wymagania stawiane są aparaturze III ze względu na wymaganą szerokość pasma przenoszenia oraz pojemności pamięci przy rejestracji spotykanych w praktyce zakresach częstotliwości sygnału EA. Zastosowanie aparatury III umożliwia analizę częstotliwościową oraz kształtu sygnału EA. Najczęściej jednak w zastosowaniach praktycznych stosuje się aparaturę I. Daje ona możliwość rejestrowania zliczeń i zdarzeń w wybranej jednostce czasu.

W celu wyznaczenia deskryptorów wymienionych w pierwszej grupie w Tabeli 1 czyni się pewne założenia co do kształtu sygnału EA. Podstawowym założeniem, popartym obserwacjami praktycznymi, jest przyjęcie sygnału generowanego przez impulsowe źródło EA w postaci tłumionej sinusoidy [79]. Fragment sygnału zawierający mierzalne wartości w obrębie tak określonego przebiegu nazywany jest *zdarzeniem EA* (Rys. 10) [40]. Wówczas, zdarzenie powstające w odbiorniku EA w postaci sygnału elektrycznego, ma postać [79]:

$$U_1(t) = A_m \exp(-\alpha_1 t)\sin(2\pi f_0 t) \quad , \tag{22}$$

gdzie:

A_m - maksymalna wartością napięcia rejestrowanego w zdarzeniu, f_0 - maksimum charakterystyki amplitudowo – częstotliwościowej układu przetwornik – środek, α_1 - dekrement tłumienia układu przetwornik – ośrodek, t - czas.

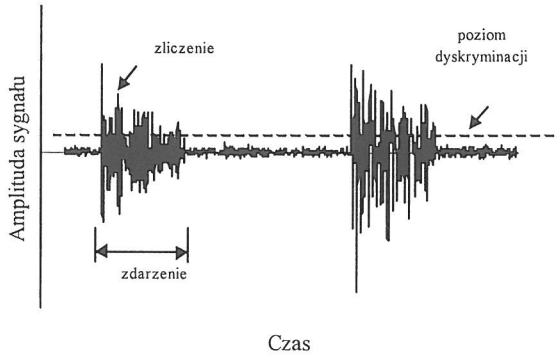
Tabela 1. Najczęściej używane deskryptory emisji akustycznej [79]
Table 1. Most often using acoustic emission descriptors [79]

1. Pochodne zmian w czasie
1.1 Tempo lub suma zliczeń
1.2 Tempo lub suma zdarzeń
1.3 Liczba przejść przez wybrany poziom amplitud
2. Pochodne przebiegów czasowych
2.1 Maksymalna amplituda (wierzchołek)
2.2 Średnia amplituda
2.3 Powierzchnia nad wartością średnią
2.4 Okres półtrwania
3. Pochodne energii
3.1 Wartość maksymalna RMS
3.2 Wartość średnia RMS
3.3 Suma RMS
3.4 Energia pojedynczego impulsu lub zdarzenia
4. Pochodne rozkładu częstotliwościowego
4.1 Częstotliwość maksymalnej intensywności w widmie mocy
4.2 Częstotliwość środkowa: granica podziału widma mocy na części o równej energii
4.3 Maksymalna intensywność lub wierzchołek o wybranych pasmach częstotliwości
4.4 Średnia częstotliwość w widmie amplitud
4.5 Szerokość pasma częstotliwości sygnałów przekraczających wybrany poziom
4.6 Energia w wybranych pasmach częstotliwości

Jeżeli dla amplitudy otrzymywanego sygnału ustalimy pewien próg, nazywany poziomem dyskryminacji, wówczas każde przejście amplitudy ponad ten poziom jest rejestrowane jako *zliczenie EA* (Rys. 10). Dla zdarzenia EA opisanego wzorem (22) zależność pomiędzy liczbą zliczeń w trakcie zdarzenia EA N_{zl} a poziomem dyskryminacji A_t dana jest wzorem [79]:

$$N_{zl} = \frac{f_0}{\alpha_1} \ln\left(\frac{A_m}{A_t}\right) \tag{23}$$

Sumy deskryptorów, odpowiednio: zliczeń i zdarzeń zapisywane w określonych przedziałach czasowych (bramkach czasowych) nazywane są *tempem zliczeń* dN_{zl}/dt *i tempem zdarzeń* dN_{zd}/dt [52].



Rys. 10. Sposób uzyskiwania deskryptorów (zliczenia i zdarzenia) sygnału emisji akustycznej.
Fig. 10. Obtaining of acoustic emission signal descriptors (counts and events).

Jak wspomniano wcześniej, częstotliwość sygnału emisji akustycznej zależy od charakteru źródła i może mieć zakres od kilku Hz do 100 MHz. Tak szeroki zakres częstotliwości i niewielka amplituda sygnału emisji akustycznej narzuca ogromne wymagania urządzeniom do rejestracji sygnału EA [79]. W celu poprawnego rejestrowania sygnału EA należy dobrać odpowiednie czujniki do charakteru źródła sygnału emisji akustycznej. Należy również zapewnić odpowiedni kontakt czujnika z badanym materiałem. Bardzo duże znaczenie na rejestrowany sygnał ma aparatura wzmacniająca i zapisująca. Musi się ona charakteryzować odpowiednią czułością w pełnym zakresie częstotliwości i jednocześnie nie może wprowadzać własnych szumów do rejestrowanego sygnału. W czasie pomiarów sygnału emisji akustycznej należy również zadbać o wyeliminowanie szumów pochodzących z otoczenia. W torze pomiarowym sygnału emisji akustycznej powinny znajdować się kolejno następujące elementy: czujnik EA, przedwzmacniacz, filtr, wzmacniacz oraz system rejestrujący.

Metoda emisji akustycznej znalazła zastosowania w wielu dziedzinach nauki i przemysłu, w których na przykład istotne jest poznanie przyczyn i monitorowanie procesów pękania. Prowadzone są prace nad zastosowaniem metody emisji akustycznej w badaniach mechanizmu mikropękania betonów, kompozytów, materiałów ceramicznych, itp. Najważniejsze dotychczasowe zastosowania metody emisji akustycznej to między innymi: w sejsmologii do ostrzegania przed trzęsieniami ziemi, monitorowanie zbiorników wysokociśnieniowych, badanie stopnia zmęczenia części samolotów, badanie szczelności kadłubów okrętów, itp.

W naukach agrofizycznych metodę emisji akustycznej po raz pierwszy zastosował Skrynicki do badania procesów zachodzących w glebie podczas jej deformacji [83]. Wykazał on, że suma zliczeń sygnału EA rejestrowana przez czujniki umieszczone w glebie zależy od masy przejeżdżającego pojazdu oraz od jego prędkości. Zaobserwował również, że zjawisko emisji akustycznej zachodzi podczas przemian fazowych wody glebowej. Maksimum stosunku przyrostu liczby zliczeń sygnału EA do zmiany temperatury pojawiają się przy temperaturze 0°C, następnie gwałtownie opada, jednak emisję akustyczną można obserwować aż do –8°C.

Prowadzone są również badania procesów pękania drewna na podstawie rejestracji zliczeń i zdarzeń przy różnych parametrach charakteryzujących próbki drewna. Otrzymano bardzo interesujące zależności tempa zliczeń np. od wilgotności, od jakości obrobionej powierzchni próbki oraz od długości skrawania. [77].

3.2 Emisja akustyczna w tkankach roślinnych

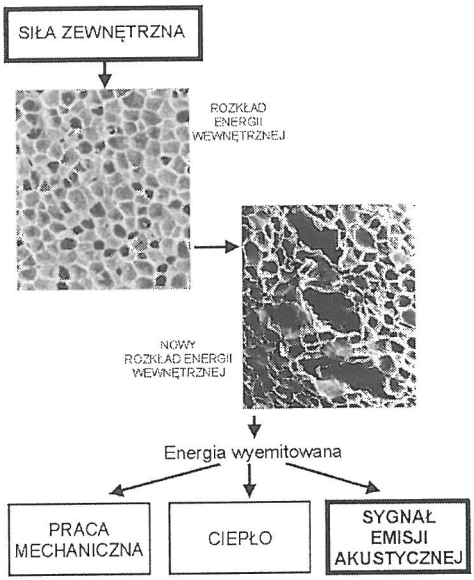
Pierwsze prace nad zastosowaniem metody emisji akustycznej do badania tkanek roślinnych podjęto w 1997 roku [85]. Wyniki eksperymentu z zastosowaniem rezonansowego czujnika sygnału EA i przetwornika analogowo-cyfrowego z częstotliwością próbkowania do 500 kHz pokazały, że istnieje możliwość rejestracji sygnału EA w ściskanej tkance bulwy ziemniaka. Zaobserwowano również, że sygnał EA posiada pewne charakterystyczne częstotliwości: 60 kHz, 75 kHz, 115 kHz oraz 135 kHz. Bardzo ważnym wnioskiem tych badań było stwierdzenie, że początek obserwacji sygnału EA pojawia się przy odkształceniu równym około 65% odkształcenia niszczącego [85]. Otrzymane wyniki stały się podstawą do dalszego rozwoju aparatury i metod badawczych.

W 1999 roku Konstankiewicz i Zdunek opublikowali pracę opisującą nowe rozwiązania techniczne i metodyczne oparte na analizie deskryptorów sygnału emisji akustycznej [46]. Zaproponowane rozwiązania, poprzez rejestrację tempa zliczeń dN_z/dt sygnału EA, umożliwiają w łatwy sposób określić moment, w którym rozpoczyna się rejestracja sygnału EA w ściskanej tkance roślinnej. Stałe monitorowanie procesu odkształcania pozwala przypisać temu momentowi pewne odkształcenie i naprężenie, które nazwano odpowiednio *naprężeniem krytycznym* R_c i *odkształceniem krytycznym* ε_c.

Dalsze badania wykazały, że zależność sumy zliczeń od naprężenia próbki tkanki bulwy ziemniaka odmiany Bila i Triada przebiega etapowo [36]. Wyróżniono trzy etapy, w których krzywa suma zliczeń-naprężenie różni się kątem nachylenia: od najmniejszego na początku procesu pękania do najwyższego nachylenia, tuż przed osiągnięciem przez próbkę granicy wytrzymałości. Zaobserwowano również, że podczas procesu pękania suma zliczeń jest wyższa dla rdzenia wewnętrznego niż dla rdzenia zewnętrznego odmian Bila i Triada [36].

Zastosowanie metody emisji akustycznej do badania tkanek roślinnych wymaga określenia możliwych źródeł sygnału EA. Wymagana jest więc szczegółowa wiedza na temat procesów zachodzących na poziomie mikrostrukturalnym odkształcanej tkanki.

Konstankiewicz i Zdunek przedstawili obraz procesów mogących stać się źródłem sygnału emisji akustycznej [46]. W tkance roślinnej istnieje pewien wstępny rozkład energii wewnętrznej. Jednym z jej składników jest energia zmagazynowana między innymi w naprężonych błonach komórkowych (w ścianie komórkowej i plasmalemmie) oraz w międzykomórkowych warstwach pektynowych lamelli. Działanie siły zewnętrznej zmienia wewnętrzny stan naprężenia oraz rozkład energii wewnętrznej. Jeżeli składowe działających sił będą miały wystarczająco dużą wartość, może wówczas rozpocząć się proces formowania pęknięcia i jego propagacji, które stają się źródłem sygnału emisji akustycznej. Proces tworzenia się sygnału emisji akustycznej w tkance roślinnej można przedstawić przy pomocy schematu tak jak na Rys. 11.



Rys. 11. Schemat powstawania sygnału emisji akustycznej w tkance bulwy ziemniaka [46].

Fig. 11. Scheme of acoustic emission signal creating in potato tuber tissue [46].

Przedstawiony powyżej obraz tworzenia się sygnału emisji akustycznej w ściskanej tkance roślinnej pozwala na sformułowanie następującej definicji: *początek formowania się pęknięcia próbki tkanki roślinnej identyfikowany jako początek rejestracji sygnału emisji akustycznej jest stanem krytycznym, który można opisać przez odkształcenie krytyczne* ε_c *i naprężenie krytyczne* R_c [46].

4. CEL PRACY, HIPOTEZY BADAWCZE

Powszechnie wyznaczana wytrzymałość jest końcowym etapem procesu rozwoju pęknięć, dlatego parametr ten zawiera tylko część informacji na temat procesu niszczenia w tkance roślinnej. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury dotyczącego zagadnień niszczenia tkanek roślinnych pod wpływem zewnętrznych oddziaływań stwierdzono, że brak jest prac dotyczących wyznaczania początkowych etapów procesów niszczenia struktury komórkowej tkanek roślinnych.

Badania nad właściwościami mechanicznymi tkanek roślinnych wykazały, że czynnikami wpływającymi na jej wytrzymałość są między innymi turgor oraz prędkość deformacji. Uzyskane wyniki nie są jednoznaczne, a prace teoretyczne sugerują, że na właściwości mechaniczne tkanki roślinnej mają także wpływ parametry jej mikrostruktury. Zależności takich, jak dotychczas, nie potwierdzono eksperymentalnie.

Pierwsze prace prowadzone przez autorów niniejszej rozprawy wykazały, że wczesne fazy pękania ściskanej tkanki roślinnej (stan krytyczny) mogą być wykrywane i badane przy pomocy metody emisji akustycznej.

Dotychczasowy stan wiedzy pozwala na sformułowanie następujących hipotez badawczych:

- Zastosowanie metody emisji akustycznej wraz z testem mechanicznym pozwala na określenie i badanie warunków mechanicznych, przy których rozpoczyna się proces pękania – stan krytyczny oraz przy których następuje zniszczenie próbki – granica wytrzymałości.
- Prędkość deformacji tkanki roślinnej wpływa na warunki mechaniczne, przy których osiągany jest stan krytyczny oraz granica wytrzymałości próbki.
- Turgor tkanki roślinnej wpływa na warunki mechaniczne, przy których osiągany jest stan krytyczny oraz granica wytrzymałości próbki.
- Wielkość komórek ma wpływ na procesy pękania tkanki roślinnej.

5. OBIEKT BADAŃ

5.1 Uzasadnienie wyboru obiektu badań

Jedną z powszechniej uprawianych roślin na świecie jest ziemniak (10 pozycja w powierzchni upraw), który w Polsce jest szczególnie popularny jako składnik naszej diety i surowiec przemysłowy. Tradycje i doświadczenia uprawy ziemniaka w naszym kraju są duże a całkowita produkcja stanowi około 15% światowej produkcji, tj. od 20 mln do 25 mln ton rocznie. Z całego plonu około 15% przeznacza się do bezpośredniej konsumpcji, 14% do sadzenia, 7% do przemysłu, około 50% na paszę i tylko 0,5% na przetwory spożywcze [87].

Lepsze zagospodarowanie wysokich plonów ziemniaka, nie tylko w Polsce, wiąże się przede wszystkim ze zwiększonym rozwojem przetwórstwa - wymaga to jednak surowca o wysokiej jakości. Badania nad cechami „dobrego" ziemniaka prowadzą od lat liczne ośrodki zagraniczne i krajowe, a wymagania określające warunki ich przydatności do odpowiednich kierunków zagospodarowania opublikowano w licznych pracach [2, 28, 86, 88].

Jedną z ważniejszych cech decydujących o wysokiej jakości ziemniaków jest ich podatność na uszkodzenia mechaniczne, zewnętrzne i wewnętrzne. W Stanach Zjednoczonych podaję się, że ograniczenie strat wywołanych uszkodzeniami bulw ziemniaka o 1% pozwoli oszczędzić około 7,5 miliona dolarów rocznie [8].

Problem strat, a w szczególności ciemnej plamistości pouszkodzeniowej związany jest między innymi z procesami pękania błon komórkowych [80]. Zbadanie zdolności bulw do ciemnej plamistości wymaga więc poznania ich zachowania się pod działaniem sił wywołujących uszkodzenia nie tylko w postaci makropęknięć ale również tych zachodzących na poziomie pojedynczej komórki.

Liczne obserwacje mikroskopowe pokazują, że komórki tkanki bulwy ziemniaka mają stosunkowo regularny kształt, który w swym przekroju jest wielokątem [39, 44, 63, 67]. Taki kształt komórek jest często spotykany w przyrodzie, również wśród tkanek roślinnych, np. tkanka jabłka, buraka, marchwi, itp.. Podobną geometrię komórki roślinnej do tej jaką posiada tkanka bulwy ziemniaka zakłada się w opisanych w pkt. 2.3.2 i 2.3.3 modelach mechanicznych. Dlatego, często wyniki testów mechanicznych z użyciem tkanki bulwy ziemniaka wykorzystuje się w celu weryfikacji tych modeli [60, 65, 70, 71, 72].

5.2 Charakterystyka materiału badawczego

Badania przeprowadzono dl bulw dwóch odmian ziemniaka ze zbiorów Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin w Jadwisinie:

- Danusia: odmiana średnio – późna, jadalna, przydatna do produkcji frytek o owalnych i dużych bulwach z płytkimi oczkami.
- Kuba: odmiana średnio – wczesna, skrobiowa, przydatna do produkcji chipsów.

Ziemniaki uprawiano na glebie kompleksu żytniego dobrego (klasa IV) przy nawożeniu: 100 kg N_2, 100 kg P_2O_5 i 140 kg K_2O/ha. Zbiór przeprowadzono na pod koniec września i na początku października 1999 roku w fazie pełnej dojrzałości zbiorczej.

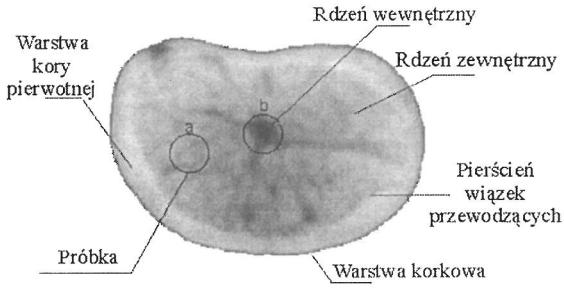
Do czasu przeprowadzenia badań (styczeń – luty 2000), opisanych w niniejszej pracy, bulwy przechowywane były w kontrolowanych warunkach, tzn. w temperaturze 6 °C i wilgotności względnej powietrza 90-95%.

6. METODYKA BADAŃ

6.1 Procedury przygotowywania próbek

6.1.1 Metoda pobierania próbek

Przed właściwymi testami, bulwy przeznaczone do badań przenoszono do warunków pokojowych na okres 24 h. Następnie ze środkowej części bulwy wycinano plaster o grubości około 2cm w kierunku prostopadłym do osi bulwy ziemniaka stolon - wierzchołek (Rys. 12).



Rys. 12. Przekrój poprzeczny bulwy ziemniaka, a) próbka rdzenia zewnętrznego, b) próbka rdzenia wewnętrznego.

Fig. 12. Cross section of potato tuber, a) sample of outer core, b) sample of inner core.

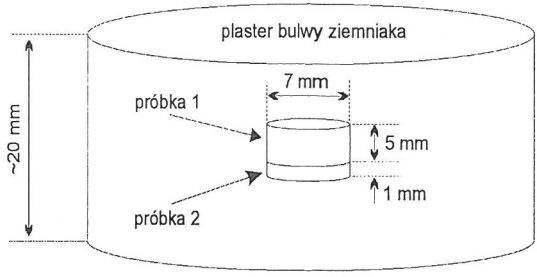
Na przekroju poprzecznym bulwy można łatwo odróżnić poszczególne typy tkanek. W eksperymencie wykorzystano naturalne zróżnicowanie tkanek pod względem wielkości komórek i wykonano badania dla rdzenia zewnętrznego (próbka „a" na Rys. 12) oraz rdzenia wewnętrznego obu odmian (próbka „b" na Rys. 12).

Próbki oznaczone na Rys. 12 jako „a" i „b" wycinano ruchem obrotowym przy pomocy specjalnego wykrojnika i wiertarki niskoobrotowej. Średnica otrzymywanych próbek wynosiła 7mm. Następnie z każdego walca, przy pomocy urządzenia wyposażonego w trzy równoległe ostrza (typu gilotyna) odcinano

dwie próbki o wysokościach 5 mm i 1 mm. W ten sposób z każdego walca otrzymywano próbki o następujących wymiarach (Rys. 13):

- o średnicy 7 mm i wysokości 5 mm
- o średnicy 7mm i wysokości 1mm.

Bezpośrednio po wycięciu próbki oznaczone jako „1" poddawano testowi ściskania, a próbki „2" wykorzystywano do pomiarów mikroskopowych. Procedura przygotowania próbek do obserwacji przy pomocy mikroskopu konfokalnego opisana została w pkt. 6.2.3 niniejszej pracy.



Rys. 13. Schemat pobieranie próbek tkanki bulwy ziemniaka do badań. Próbka 1 przeznaczona była do testów mechanicznych, próbka 2 do badań mikroskopowych.

Fig. 13. Scheme of potato tuber tissue sampling. Sample 1 for mechanical tests, Sample 2 for microscopic investigations.

Kryterium doboru wielkości próbek było zapewnienie możliwie dużej jednorodności ściskanej tkanki, czy to rdzenia zewnętrznego czy wewnętrznego. Pobranie jednorodnej tkanki jest szczególnie trudne w przypadku rdzenia wewnętrznego bulwy ziemniaka. Obszar ten ma bardzo nieregularny kształt, a wybór miejsca pobrania próbki jest wynikiem obserwacji tylko powierzchni przekroju bulwy. Dlatego, obecnie jedynym sposobem zwiększenia stopnia jednorodności próbek jest zmniejszenie ich wymiarów. Liczne testy mechaniczne, obserwacje przekrojów bulw ziemniaka oraz wcześniejsze analizy mikroskopowe obszarów rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego pozwoliły ocenić, że zaproponowana w pracy wielkość próbek zapewnia ich zróżnicowanie pod względem typu tkanki i wielkości komórek oraz umożliwia prawidłowe przeprowadzenie badań wytrzymałościowych wraz z rejestracją sygnału EA.

6.1.2 Zmiana tugoru tkanki bulwy ziemniaka

Zmiana ciśnienia turgorowego Δp jest proporcjonalna do różnicy *osmotyczności* (*ang. osmolality*) roztworów wewnątrz c_k i na zewnątrz komórek roślinnych c_z [21]:

$$\Delta p \approx c_k - c_z \quad , \tag{24}$$

przy czym osmotyczność jest stężeniem roztworów osmotycznie czynnych wyrażonych w jednostkach Osmol/kg.

Umieszczenie tkanki roślinnej w roztworze hipertonicznym o osmotyczności wyższej niż osmotyczność soków wewnątrzkomórkowych ($c_z > c_k$) powoduje oddanie wody przez tkankę do roztworu zewnętrznego i spadek ciśnienia turgorowego ($\Delta p < 0$) [76]. W przeciwnym przypadku, umieszczenie tkanki roślinnej w roztworze hipotonicznym o osmotyczności niższej niż osmotyczność soków wewnątrzkomórkowych ($c_k > c_z$) powoduje pobranie przez próbkę wody z roztworu i wzrost jej ciśnienia turgorowego ($\Delta p > 0$).

Opisane powyżej zjawisko wykorzystano do zmiany turgoru próbek pobranych z rdzenia zewnętrznego obydwu badanych bulw ziemniaka. Po 40 walcowych próbek, o średnicy dokładnie 7mm i wysokości 20mm każda (przed skróceniem do długości 5mm), umieszczano w jednym z roztworów mannitolu ($C_6H_{14}O_6$): 0.1 mola, 0.2 mola, 0.3 mola, 0.4 mola oraz 0.5 mola. Jedną serię próbek umieszczono również w wodzie destylowanej. Osmotyczność c_z roztworów mannitolu zmierzono przy pomocy Osmomatu 030-D (Automatic Cryoscopic Osmometer), w którym pomiar polega na określeniu temperatury krzepnięcia badanego roztworu. Otrzymane wartości umieszczono w Tabeli 2.

Przyjęto, że osmotyczność roztworu mannitolu c_z jest miarą turgoru tkanki uzyskanego w stanie równowagi. Powyższe uproszczenie można uzasadnić tym, że wszystkie badane bulwy ziemniaka przechowywane były w jednakowych warunkach przez taki sam okres czasu. Naturalna osmotyczność c_k, w obrębie bulw danej odmiany, w momencie rozpoczęcia badań powinna być więc podobna. Ze wzoru (24) wynika, że w przypadku gdy c_k = const., ciśnienie turgorowe p osiągane po procesie moczenia jest proporcjonalne do osmotyczności roztworu zewnętrznego (w naszym wypadku mannitolu) c_z. W zaproponowanej procedurze zmiany turgoru tkanki bulwy ziemniaka istnieje więc następująca prawidłowość: im wyższa osmotyczność roztworu zewnętrznego c_z tym niższy turgor osiągany przez tkankę w stanie równowagi.

W literaturze spotyka się różne czasy osiągania stanu równowagi w zależności od wymiarów próbek oraz od ich wstępnego przygotowania (np. wstępnego odwadniania w wirówkach lub moczenia w roztworach przy podciśnieniu) [21, 64, 70]. W pracach tych, w przypadku gdy nie stosowano żadnych dodatkowych wstępnych procedur, czas pozostawania walcowych próbek o wymiarach około 13mm X 13mm w roztworze wynosił od 20 do 24 h [64, 70]. W niniejszej pracy objętości próbek były mniejsze (7mm X 20mm). Przyjęto więc, że dla użytych w pracy próbek równowaga zostanie osiągnięta w czasie 20h ± 0.10 h.

W wyniku pobierania lub oddawania przez próbkę wody zmienia się jej średnica [21]. Z tego powodu, po 20 h moczenia w roztworze mannitolu mierzono przy pomocy suwmiarki średnice próbek, które w dalszej części badań posłużyły do wyznaczenia ich naprężenia (Tabela 2). Pomiar ten obarczony jest jednak dużym błędem wynikającym ze stosunkowo małej twardości próbek. Z tego powodu do wyznaczania naprężenia poszczególnych próbek użyto średnich wartości zmierzonych dla danej osmotyczności roztworu mannitolu (Tabela 2).

Następnie z poszczególnych walców wycinano próbki o wysokości 5 mm i natychmiast poddawano testowi mechanicznemu.

Tabela 2. Osmotyczność c_z i pole powierzchni podstawy próbek S_0 dla różnych stężeń mannitolu
Table 2. Osmolality c_z and area of sample cross section S_0 for different mannitol concentrations

Stężenie roztworu [mol]	Osmotyczność c_z [mOsmol/kg]	Średnie pole powierzchni podstawy próbki S_0 [mm^2]	Bezwzględny błąd pola powierzchni [mm^2]
0,0 (woda dest.)	0	44,18	0,28
0,1	86	41,02	0,50
Próbka świeża	X	38,48	0,63
0,2	167	38,34	0,78
0,3	249	34,20	0,78
0,4	334	31,30	1,13
0,5	416	28,30	1,54

6.2 Procedury pomiarowe i aparatura

6.2.1 Testy z różnymi prędkościami przemieszczenia głowicy ściskającej

Jednym z czynników, który wpływa na właściwości mechaniczne tkanek roślinnych jest prędkość ich deformacji, która w przypadku testu jednoosiowego ściskania jest równa prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej - *V*. Maszyna wytrzymałościowa (Lloyd LRX, zakres głowicy pomiarowej 500N) użyta w eksperymentach umożliwia przeprowadzanie testów ściskania w zakresie prędkości quasi-statycznych, tj. od 0,1 mm/min do 1000 mm/min.

Cyfrowy system rejestracji danych umożliwia zapis wyników z maksymalną częstością 250 Hz. W celu dokładnego odwzorowania badanych w pracy zależności przyjęto, że najkrótszy czas pomiaru może wynosić 2s. Przeprowadzone testy odkształcania z różnymi prędkościami pokazały, że dla próbek tkanki bulwy ziemniaka o wysokości 5 mm i testach do całkowitego ich zniszczenia, maksymalna prędkość przemieszczenia głowicy ściskającej może wówczas wynosić 50 mm/min.

Wszystkie badania wykonywane były w warunkach laboratoryjnych, w których po około 15 min widoczne były pierwsze zmiany w zabarwieniu próbki. Zdecydowano się więc na ograniczenie prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej do 0,5 mm/min, przy której dla próbek o wysokości 5 mm test ściskania trwał nie dłużej niż 10 min.

Przeprowadzono testy ściskania przy 5 wybranych prędkościach w zakresie od 0,5 mm/min do 50 mm/min:

- 0,5 mm/min,
- 1,5 mm/min,
- 5,0 mm/min,
- 15 mm/min,
- 50 mm/min.

Dla każdej prędkości wykonano po 40 powtórzeń. Testy przy różnych prędkościach przemieszczenia głowicy ściskającej wykonano dla próbek świeżych (bez zmiany turgoru) pobranych z rdzenia zewnętrznego i rdzenia wewnętrznego obu badanych odmian ziemniaka.

6.2.2 Testy ściskania tkanek o różnym turgorze

Testy ściskania przeprowadzano dla jednej wybranej prędkości V=5mm/min wzdłuż osi walcowej próbki tkanki ziemniaka. Testy wykonano dla sześciu wartości osmotyczności roztworu zewnętrznego c_z, w których umieszczone były próbki. Dla każdej wartości c_z wykonano 40 powtórzeń. Testy ściskania próbek o różnym turgorze przeprowadzono dla tkanki rdzenia zewnętrznego bulw obu badanych odmian ziemniaka.

6.2.3 Pomiar parametrów struktury tkanek bulwy ziemniaka

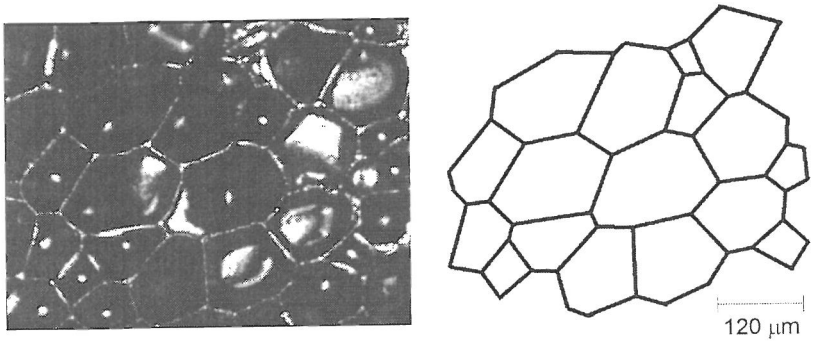
Próbki pobrane wg metody opisanej w pkt. 6.1.1 i oznaczone jako „2" użyto do badań mikroskopowych.

Próbka do badań mikroskopowych była wstępnie płukana w wodzie destylowanej z resztek skrobi na jej powierzchni, a nadmiar wody na powierzchni odsączano przy pomocy sączka [45]. Tak przygotowaną próbkę obserwowano przy pomocy mikroskopu konfokalnego wykorzystując obiektyw PLAN 10/0,25 [44, 69]. Z jednego plastra uzyskiwano około 10 – 15 obrazów struktury komórkowej nie pokrywających się wzajemnie (Tabela 3). Obrazy rejestrowano przy pomocy kamery CCD i zapisywano w pamięci komputera.

Uzyskane obrazy struktury komórkowej ze względu na jasne plamy będące np. dnem komórki lub odbiciem od powierzchni wody, która pozostała we wgłębieniach obserwowanej powierzchni, nie nadawały się bezpośrednio do automatycznej analizy. Dlatego należało je poddać odpowiedniej procedurze przygotowawczej [45]. W tym celu przy pomocy programu graficznego Corel Draw 8.0 każdy obraz opracowywano indywidualnie obrysowując widoczne ściany komórkowe. Otrzymywano w ten sposób układ przylegających wzajemnie wielokątów odwzorowujących strukturę komórkową (Rys. 14 a i b).

Tabela 3. Liczba obrazów mikroskopowych wykonana dla poszczególnych odmian i typów tkanek
Table 3. Number of microscopic images made for individual varieties and tissues

Odmiana	Liczba obrazów	
	rdzeń zewnętrzny	rdzeń wewnętrzny
Danusia	520	270
Kuba	570	300



a) b)

Rys. 14. a) Przykładowy obraz z mikroskopu konfokalnego struktury tkanki bulwy ziemniaka, b) ten sam obraz po „obrysowaniu" komórek.

Fig. 14. a) An example of potato tuber tissue image obtained by confocal microscope, b) the same image after cells outlining.

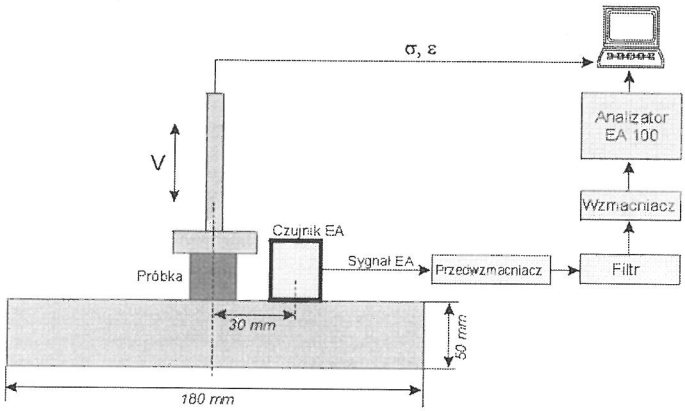
Tak „zbinaryzowane" obrazy struktury komórkowej tkanki bulwy ziemniaka (Rys. 14b) poddawano automatycznej analizie obrazu opartej na sekwencji przekształceń morfologicznych dostępnych w programie Aphelion. Celem analizy było otrzymanie parametrów opisujących wielkość dwuwymiarowych obiektów widocznych na Rys. 14b reprezentujących przekroje komórek. Podstawowymi wielkościami opisującymi takie dwu-wymiarowe komórki są *powierzchnia* i *obwód* [45, 67]. Program Aphelion umożliwia automatyczne wyznaczenie także innych wielkości jak np. *wydłużenia* (*ang. elongation*), które jest różnicą długości długiej i krótkiej osi najlepiej wpasowanej elipsy w dany obiekt dzieloną przez sumę tych długości. Wydłużenie przyjmuje wartość 0 dla koła, natomiast 1 dla elipsy długiej i wąskiej.

Pomiary parametrów struktury komórkowej wykonano dla świeżych tkanek (bez zmiany turgoru) rdzenia zewnętrznego i rdzenia wewnętrznego obu odmian bulwy ziemniaka.

6.2.4 Aparatura do pomiaru sygnału EA w tkankach roślinnych

Sygnał emisji akustycznej powstaje w tkance roślinnej poddanej działaniu sił zewnętrznych w wyniku pękania jej struktury. W praktyce warunki takie można wytworzyć poprzez ściskanie próbki w maszynie wytrzymałościowej (Rys. 15). Do przeprowadzenia eksperymentów użyto nowoczesnej, jednokolumnowej maszyny wytrzymałościowej Lloyd LRX. Wykonane testy wykazały, że w całym

zakresie prędkości zastosowana maszyna wytrzymałościowa nie powoduje zakłóceń rejestrowanego sygnału EA powstającego w ściskanym materiale.



Rys. 15. Schemat aparatury pomiarowej użytej w eksperymentach.

Fig. 15. Scheme of measurements apparatus used in experiments.

Do rejestracji sygnału emisji akustycznej użyto szerokopasmowego czujnika piezoelektrycznego typu WD o wysokiej czułości w zakresie częstości od 25 kHz do 1 MHz.

Ze względu na niewielkie wymiary, niemożliwe było przymocowanie czujnika EA bezpośrednio do próbki. Z tego powodu czujnik EA przymocowany był do dolnej szczęki maszyny wytrzymałościowej (Rys. 15). Na granicy próbka-szczęka (tkanka ziemniaka-stal) sygnał EA przechodzi od materiału o mniejszej gęstości do materiału o gęstości większej, wówczas tłumienie i zniekształcenie sygnału jest niewielkie. Na granicy próbka szczęka-maszyny wytrzymałościowej zastosowano smar silikonowy eliminujący ewentualne tarcie między tymi elementami. Dodatkowo zastosowanie smaru silikonowego, który jest dobrym przewodnikiem fal sprężystych, wyklucza uwięzienie powietrza miedzy próbką a szczęką, które mogłoby powodować całkowite odbicie lub tłumienie sygnału EA.

W rozwiązaniu zastosowanym podczas pomiarów, rejestrowana była fala powierzchniowa sygnału EA. W tym celu czujnik EA przymocowano do tej samej powierzchni szczęki maszyny wytrzymałościowej, na której umieszczana była próbka, tak jak na Rys. 15. Odległość pomiędzy próbką a czujnikiem EA była w każdym teście taka sama i wynosiła 30 mm. Takie umieszczenie czujnika w stosunku do próbki zwiększało czułość w porównaniu do konfiguracji, opisanej w pracy [46], w której rejestrowano falę objętościową sygnału EA – czujnik

umieszczony był pod szczęką w osi próbki. Porównanie przeprowadzono testem łamania wkładu ołówkowego [47].

W celu rejestracji sygnału emisji akustycznej zastosowano analizator EA 100 (Rys. 15). Sygnał emisji akustyczny po wyjściu z czujnika w postaci sygnału elektrycznego był wstępnie wzmacniany w przedwzmacniaczu (40 dB). Ze względu na małą amplitudę sygnału EA przedwzmacniacz połączono z czujnikiem przewodem o długości około 30 cm. W celu wyeliminowania zakłóceń właściwego sygnału odgłosami z otoczenia, w zestawie zastosowano filtr górno-przepustowy o częstotliwości granicznej 25 kHz. Następnie na drodze sygnału EA znajdował się wzmacniacz o regulowanym wzmocnieniu co 1 dB. Wszystkie testy wykonywane były przy wzmocnieniu 50 dB. Po wzmocnieniu sygnał EA przechodził przez układ dyskryminujący o regulowanym poziomie dyskryminacji od 0,1 V do 10 V. Wszystkie testy wykonywane były przy poziomie dyskryminacji 1V. Następnie układy elektroniczne wyznaczały tempo zliczeń, tempo zdarzeń, wartość skuteczną oraz wartość szczytową sygnału EA w wybranym przedziale czasowym: 1, 0.1, 0.01 oraz 0.004 s, który dobierano w zależności od czasu trwania pomiaru. Wyznaczane parametry sygnału EA były jednocześnie zapisywane w pamięci komputera.

6.2.5 Pomiar zależności naprężenie-odkształcenie i sygnału EA

Próbki o kształcie walca ściskano pomiędzy szczękami maszyny wytrzymałościowej wzdłuż ich osi z wybraną stałą prędkością. Wynik testu uzyskiwano w postaci zależności siły od czasu. Aktualne naprężenie próbki σ (*ang. stress*) określono jako stosunek aktualnej wartości siły F i początkowego pola powierzchni podstawy próbki S_0:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad . \tag{25}$$

Odkształcenia tkanki przekraczały 10% wysokości próbki. Z tego powodu odkształcenie względne ε (*ang. strain*) wyznaczano według zależności:

$$\varepsilon = \ln\frac{l}{l_0} \quad , \tag{26}$$

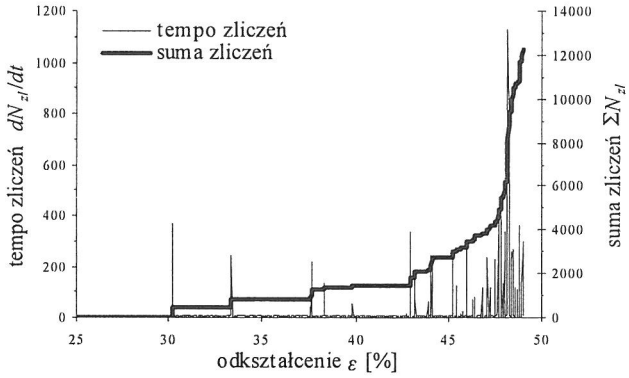
gdzie: l – aktualna wysokość próbki, l_0 - wysokość początkowa próbki.

Otrzymana zależność naprężenie-odkształcenie pozwalała wyznaczyć parametry R i ε_m opisujące wytrzymałość tkanki roślinnej jako punkt na krzywej

$\sigma(\varepsilon)$, w którym dalsze odkształcanie nie powodowało wzrostu naprężenia. Naprężenie niszczące R oraz odkształcenie niszczące ε_m opisują granicę wytrzymałości próbki na ściskanie.

Jako deskryptor charakteryzujący sygnał emisji akustycznej wybrano tempo zliczeń dN_{zl}/dt. Przeprowadzone testy wykazały, że pozostałe deskryptory (tj. tempo zdarzeń, wartość skuteczna oraz wartość szczytowa), które przy pomocy analizatora EA 100 można uzyskać, nie wnosiły na obecnym etapie prac nowych informacji do uzyskanych wyników. Tempo zliczeń jest deskryptorem bardzo często stosowanym w badaniach, w których istotne jest wykrycie i śledzenie procesu tworzącego sygnał EA [77, 83]. Z takim problemem związany jest również temat niniejszej pracy.

Bardzo użytecznym sposobem analizy sygnału emisji akustycznej, który wykorzystano przy analizie wyników w niniejszej pracy, jest przedstawienie poszczególnych deskryptorów w postaci zsumowanych kolejnych wartości z przedziałów czasowych (Rys. 16). Tak uzyskany deskryptor dla tempa zliczeń nazywa się *sumą zliczeń* - ΣN_{zl}.



Rys. 16. Przykładowy wynik pomiaru tempa zliczeń dN_{zl}/dt (linia cienka) oraz uzyskana suma zliczeń ΣN_{zl} (linia gruba) w funkcji odkształcenia dla rdzenia zewnętrznego odmiany Kuba, przy prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej V=5 mm/min.

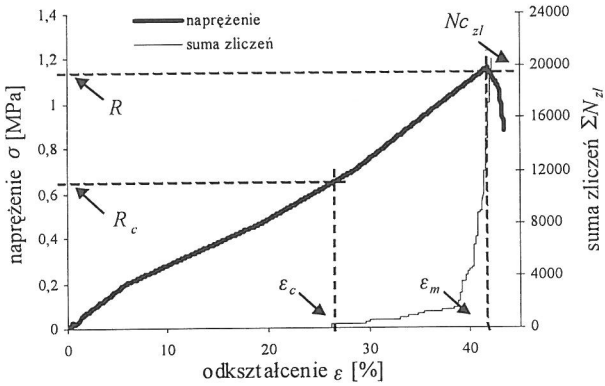
Fig. 16. An example of count rate dN_{zl}/dt measurement (thin line) and obtained count sum ΣN_{zl} (thick line) as a function of strain for outer core sample of Kuba variety, crosshead speed V=5mm/min.

Zastosowany w badaniach system pomiarowy umożliwia jednoczesną rejestrację zależności naprężenie-odkształcenie oraz zależności wybranego parametru sygnału EA od odkształcenia ε. Istnieje więc możliwość zbadania

korelacji pomiędzy parametrami mechanicznymi a deskryptorami sygnału emisji akustycznej.

Na Rys. 17 przestawiono przykładowe wyniki jednoczesnego pomiaru zależności sumy zliczeń ΣN_{zl} od odkształcenia ε oraz zależności naprężenia σ od odkształcenia ε. Takie przedstawienie wyników pozwala uzyskać następujące charakterystyczne wielkości opisujące początek (stan krytyczny) i koniec (granicę wytrzymałości) procesu pękania tkanek roślinnych (Rys. 17):

- parametry opisujące stan krytyczny: naprężenie krytyczne R_c, odkształcenie krytyczne ε_c,
- parametry opisujące wytrzymałość tkanki: naprężenie niszczące R, odkształcenie niszczące ε_m, całkowita suma zliczeń Nc_{zl},
- oraz: stosunek naprężenia krytycznego do naprężenia niszczącego R_c/R, stosunek odkształcenia krytycznego do odkształcenia niszczącego $\varepsilon_c/\varepsilon_m$.



Rys. 17. Przykładowe wyniki jednoczesnego pomiaru zależności naprężenie-odkształcenie (linia gruba) oraz zależności suma zliczeń-odkształcenie (linia cienka) uzyskane w teście ściskania próbki tkanki bulwy ziemniaka. Przedstawiono sposób wyznaczania wielkości użytych do opisu procesu pękania tkanki roślinnej: R_c, ε_c, R, ε_m, Nc_{zl}.

Fig. 17. Examples of simultaneous measurements stress-strain curve (thick line) and count sum – strain curve (thin line) obtained in compression test for sample of potato tuber tissue. The way of determination of values describing cracking processes of plant tissues: R_c, ε_c, R, ε_m, Nc_{zl}.

6.3 Analiza statystyczna wyników

Porównanie wyników uzyskanych w testach mechanicznych oparte zostało na analizie średnich wartości otrzymywanych z 40 powtórzeń przy danym parametrze doświadczenia. Analiza wyników wymagała przyjęcia statystycznej metody wnioskowania o różnicach pomiędzy analizowanymi średnimi. Analizę taką można wykonać stosując test t-Studenta dla różnicy dwóch średnich rozkładów normalnych. Przeprowadzona analiza wyników przy pomocy testu normalności Kołmogorowa-Smirnowa wykazała, że statystyka D_{max} będąca maksymalną różnicą pomiędzy rozkładem wartości uzyskanych w eksperymencie a przyjętym rozkładem normalnym, jest nieistotna (D_{max} jest istotne gdy prawdopodobieństwo wyznaczane metodą Lillieforsa $\leq 0{,}01$) dla wszystkich serii pomiarowych i hipoteza o normalności rozkładów wartości: R_c, ε_c, R, ε_m oraz Nc_{zl} nie może być odrzucona.

Takie same jakościowo wyniki jak w teście t-Studenta można uzyskać prostszą metodą, a mianowicie analizy półprzedziałów ufności L dla różnicy dwóch średnich dla rozkładów normalnych [66].

Dla prób o liczebności n_1 i n_2 oraz odpowiednich sumach kwadratów odchyleń $n_1S_1^2$ i $n_2S_2^2$. Półprzedział ufności L dla różnicy dwóch średnich rozkładów normalnych wyrażony jest wzorem [66]:

$$L = t_\alpha \sqrt{\frac{n_1 S_1^{\,2} + n_2 S_2^{\,2}}{n_1 + n_2 - 2}\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)} \quad , \tag{27}$$

gdzie: t_α - wartość z tablic t-Studenta przy $n_1 + n_2 - 2$ stopniach swobody i poziomie ufności α.

W niniejszej pracy liczebność każdej serii pomiarowej wynosiła $n_1 = n_2 = 40$. Uwzględniając zależność $nS^2 = (n-1)\sigma_S^2$, gdzie σ_S jest odchyleniem standardowych oraz przy poziomie ufności $\alpha = 0.05$ (odczytanym z tablic rozkładów zmiennej t), półprzedział ufności różnicy dwóch średnich rozkładów normalnych ma postać:

$$L = 1{,}99\sqrt{\frac{\sigma_{S1}^{\,2} + \sigma_{S2}^{\,2}}{40}} \quad , \tag{28}$$

gdzie: σ_{S1} i σ_{S2} są odchyleniami standardowymi porównywanych średnich.
Wówczas różnica średnich y_2 i y_1 dwóch badanych populacji zawiera się w granicach [66]:

$$\overline{y}_2 - \overline{y}_1 - L < y_2 - y_1 < \overline{y}_2 - \overline{y}_1 + L\,, \tag{29}$$

gdzie: $\overline{y}_1$ i $\overline{y}_2$ są średnimi badanych prób.

Dolna granica półprzedziału (29) o wartości ujemnej oznacza, że nie stwierdzono istotnej różnicy między średnimi prób przy obranym poziomie ufności. W przeciwnym wypadku możemy stwierdzić z ryzykiem błędu 5%, że istnieje istotna różnica pomiędzy średnimi.

Dla potrzeb pracy przyjęto następującą terminologię dotyczącą odpowiednich półprzedziałów ufności różnic średnich:

- $L_{V(k+1)-V(k)}$ – półprzedział ufności różnicy średnich dla kolejnych prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej, gdzie k=1, 2, ..., 5
- $L_{p(k+1)-p(k)}$ – półprzedział ufności różnicy średnich dla kolejnych turgorów, gdzie k=1, 2....., 6
- $L_{zew\text{-}wew}$ – półprzedział ufności różnicy średnich rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego przy ustalonej prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej lub turgorze, gdzie *zew* – rdzeń zewnętrzny, *wew* – rdzeń wewnętrzny
- L_{odm} - półprzedział ufności różnicy średnich dwu odmian przy ustalonym turgorze

W dalszej części pracy, w tabelach wyników istotne różnice pomiędzy średnimi, uzyskane przy pomocy nierówności (29), oznaczono znakiem „*" przy odpowiedniej wartości półprzedziału ufności *L*.

7. WYNIKI I DYSKUSJA

7.1 Rozkłady parametrów struktury komórkowej tkanek bulwy ziemniaka

Parametry struktury tkanek bulw ziemniaka wyznaczono według procedury opisanej w pkt. 6.2.3. Celem tej części badań było znalezienie odpowiedzi na pytanie: czy istnieją różnice w wielkościach komórek rdzenia zewnętrznego i rdzenia wewnętrznego bulwy ziemniaka oraz czy wielkość komórek wpływa na właściwości mechaniczne tych materiałów ? Analiz dokonano dla dwu odmian ziemniaka: Kuba i Danusia.

Na Rys. 18 i Rys. 19 przedstawiono odpowiednio, rozkłady powierzchni oraz obwodu komórek uzyskanych dla przekrojów tkanek badanych odmian zarówno dla rdzenia zewnętrznego jak i wewnętrznego. Na podstawie *centralnego twierdzenia granicznego* oraz kształtu rozkładów stwierdzono, że uzyskane rozkłady statystyczne wielkości opisujących wymiary komórek są normalne. Średnie rozkładów wraz z odchyleniem standardowym oraz półprzedziałami ufności umieszczono w Tabeli 4 oraz Tabeli 5.

Otrzymane wyniki potwierdzają wcześniejsze przypuszczenie (Rozdział 6 niniejszej pracy) o różnych wielkościach parametrów strukturalnych tkanek rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego bulwy ziemniaka. W przypadku obu badanych odmian prezentowane rozkłady dla rdzenia wewnętrznego są przesunięte w stronę mniejszych powierzchni i obwodów w stosunku do rdzenia zewnętrznego Rys. 18 i Rys. 19. Szczególnie widoczne jest to dla odmiany Kuba, gdzie dodatkowo szerokość rozkładu dla rdzenia wewnętrznego jest wyraźnie mniejsza w porównaniu z pozostałymi rozkładami. Oznacza to również, że budowa komórkowa rdzenia wewnętrznego odmiany Kuba jest bardziej jednorodna w porównaniu do pozostałych badanych grup komórek.

Porównanie otrzymanych rozkładów pod kątem różnic odmianowych pokazuje, że ogólnie tkanki odmiany Kuba zbudowane są z mniejszych komórek niż tkanki odmiany Danusia. Różnica ta występuje zarówno dla rdzenia zewnętrznego jak i wewnętrznego.

Uzyskane średnie pomiarów powierzchni, obwodu i wydłużenia komórek wraz z odpowiednią liczebnością komórek podano odpowiednio w Tabeli 4, Tabeli 5 i Tabeli 6.

Tabela 4. Średnia powierzchnia komórek badanych tkanek

Table 4. Average cell area of investigated tissues

Odmiana	typ tkanki	liczba komórek	średnia powierzchnia [μm^2]	odch. stand.	półprzedział ufności (α=0,05)
Kuba	rdzeń zewnętrzny	4910	16191	8029	224
	rdzeń wewnętrzny	4440	10571	5280	155
Danusia	rdzeń zewnętrzny	2820	21946	10256	379
	rdzeń wewnętrzny	3720	16947	9038	290

Tabela 5. Średni obwód komórek badanych tkanek

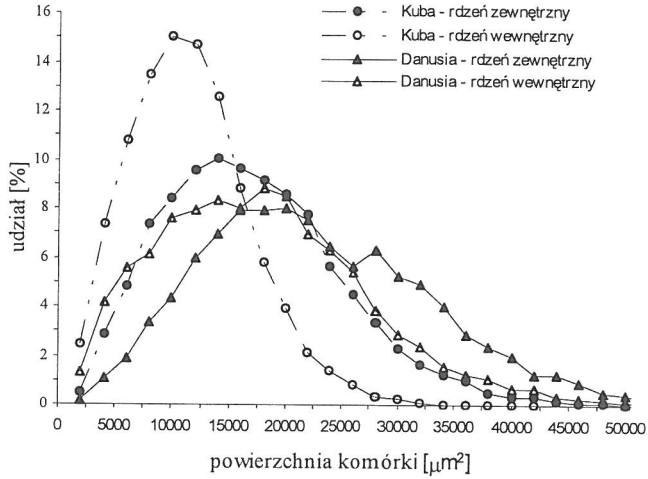
Table 5. Average cell perimeter of investigated tissues

Odmiana	typ tkanki	liczba komórek	średni obwód [μm]	odch. stand.	półprzedział ufności (α=0,05)
Kuba	rdzeń zewnętrzny	4910	610	153	4
	rdzeń wewnętrzny	4440	488	126	4
Danusia	rdzeń zewnętrzny	2820	715	169	6
	rdzeń wewnętrzny	3720	617	169	5

Tabela 6. Średnie wydłużenie komórek badanych tkanek

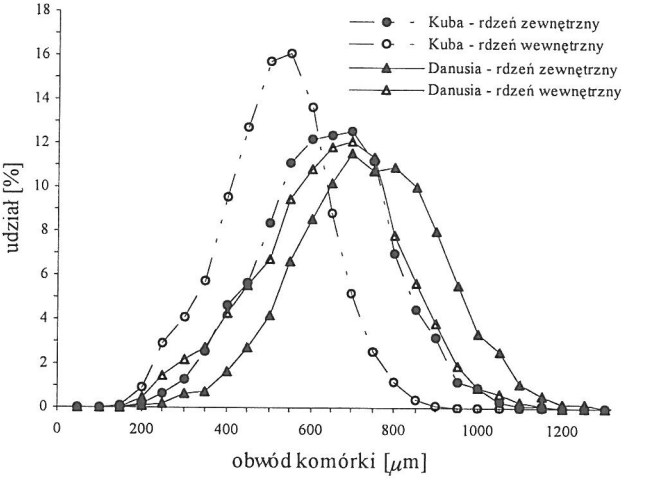
Table 6. Average cell elongation of investigated tissues

Odmiana	typ tkanki	liczba komórek	średnie wydłużenie	odch. stand.	półprzedział ufności (α=0,05)
Kuba	rdzeń zewnętrzny	4910	0,330	0,166	0,005
	rdzeń wewnętrzny	4440	0,318	0,160	0,005
Danusia	rdzeń zewnętrzny	2820	0,316	0,157	0,006
	rdzeń wewnętrzny	3720	0,305	0,161	0,005



Rys. 18. Rozkład pola powierzchni przekrojów komórek rdzenia zewnętrznego i rdzenia wewnętrznego badanych odmian bulw ziemniaka.

Fig. 18. Distribution of cell area of outer core and inner core of potato tuber tissue.

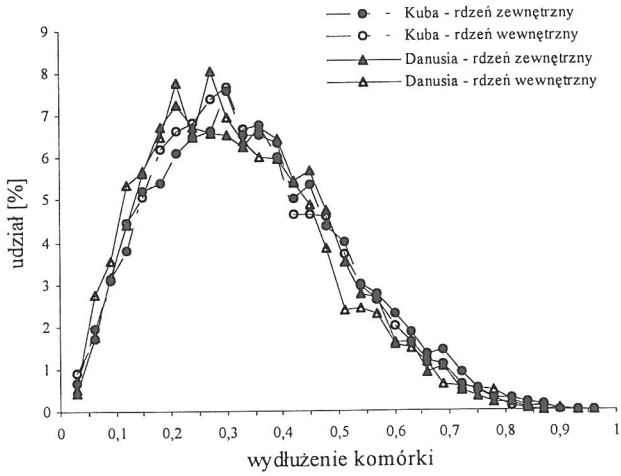


Rys. 19. Rozkład obwodów przekrojów komórek rdzenia zewnętrznego i rdzenia wewnętrznego badanych odmian bulw ziemniaka.

Fig. 19. Distribution of cell perimeter of outer core and inner core of potato tuber tissue.

Na Rys. 20 przedstawiono rozkład parametru kształtu komórek – wydłużenia. Rozkłady dla obu badanych odmian oraz ich typów tkanek pokrywają się

w całym zakresie zmienności tego parametru. Maksimum rozkładów przypada przy wydłużeniu około 0,3, co odpowiada pośredniemu kształtowi między kołem a długą i cienką elipsą.



Rys. 20. Rozkład wydłużenia komórek rdzenia zewnętrznego i rdzenia wewnętrznego badanych odmian bulw ziemniaka.

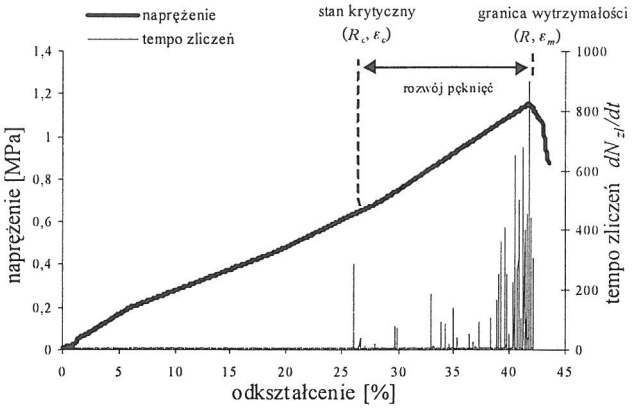
Fig. 20. Distribution of cell elongation of outer core and inner core of potato tuber tissue.

7.2 Wyniki pomiaru sygnału EA w tkance bulwy ziemniaka

Pomiary sygnału emisji akustycznej w ściskanej tkance bulwy ziemniaka wybranych odmian potwierdziły hipotezę, że pękanie struktury komórkowej zachodzi przy odkształceniach i naprężeniach niższych niż granica wytrzymałości próbki. Na Rys. 21 przedstawiono przykładowy pomiar sygnału emisji akustycznej (tempa zliczeń) w funkcji odkształcenia wraz z odpowiadającym mu przebiegiem zależności naprężenie - odkształcenie zarejestrowanymi jednocześnie w prezentowanym eksperymencie.

Otrzymane zależności sygnału emisji akustycznej od odkształcenia (lub naprężenia) potwierdzają hipotezę o stopniowym rozwoju procesów pękania w tkance roślinnej [38, 46, 85]. Stan krytyczny ściskanej tkanki ziemniaka zdefiniowany wcześniej jako moment, w którym rozpoczyna się rejestracja sygnału emisji akustycznej, jest związany ze zmianami struktury i oznacza moment rozpoczęcia procesu pękania struktury komórkowej. Dalszy przebieg

sygnału EA niesie informację o rozwoju pękania w tkance, aż do osiągnięcia granicy wytrzymałości. Identyfikowane przy pomocy metody emisji akustycznej naprężenie krytyczne i odkształcenie krytyczne zależy w dużej mierze od czułości aparatury, i może się zdarzyć, że procesy pękania struktury komórkowej mogą zachodzić przed osiągnięciem przez próbkę tak zdefiniowanego stanu krytycznego. Przyczyną nie zarejestrowania sygnału EA może być bardzo powolne powstawanie pęknięcia i/lub mała amplituda powstającej fali sprężystej (mniejsza od poziomu dyskryminacji). Nie zostaną zarejestrowane również te sygnały, które mają niską amplitudę i zostaną wytłumienie na drodze do odbiornika.



Rys. 21. Rozwój pęknięć identyfikowany przy pomocy metody emisji akustycznej. Przykładowy jednoczesny pomiar zależności naprężenie – odkształcenie (linia gruba) oraz tempa zliczeń – odkształcenie (linia cienka) uzyskany dla tkanki bulwy ziemniaka odmiany Kuba.

Fig. 21. Crack propagation obtained by acoustic emission. An example of simultaneous measurements stress-strain curve (thick line) and count rate-strain dependence (thin line) obtained for potato tuber tissue Kuba variety.

Po osiągnięciu przez próbkę stanu krytycznego, dalsze odkształcanie powoduje powolny wzrost sumy zliczeń. Na Rys. 21 efekt ten jest widoczny w postaci małych wartości tempa zliczeń. Wynik ten świadczy o dość powolnej propagacji pęknięć w tej części procesu. Według równania (23), małe tempo zliczeń może być również skutkiem powstawania źródeł emitujących fale o niskich amplitudach, niezależnie w kilku punktach. Taki sposób rozwoju pęknięcia potwierdzają wyniki obserwacji mikroskopowych zniszczonej tkanki

bulwy ziemniaka po jej odkształceniu [36]. Obserwacje te pokazują, że pęknięcie tkanki może być wynikiem łączenia się mniejszych szczelin znajdujących się w kierunku jego propagacji. W podobnych badaniach korzeni marchwi zauważono, że proces zniszczenia struktury komórkowej zachodzi w postaci wielu niezależnych pęcherzyków [29].

Rozwój pęknięć w tkankach roślinnych w postaci łączenia się lokalnych mikropęknięć w szczelinę wiąże się z niejednorodną budową i niejednorodnym rozkładem naprężeń. Propagacja pęknięcia w tkance roślinnej ma charakter stochastyczny i zależy od rozkładu naprężeń oraz parametrów wytrzymałościowych elementów strukturalnych tkanki w bezpośrednim otoczeniu źródła pęknięcia. Dla niewielkich odkształceń lokalne pęknięcie (np. ściany komórkowej) nie musi powodować lawinowego pękania ścian sąsiednich [39]. W pierwszej kolejności będą pękać elementy najsłabsze lub elementy w których powstało duże spiętrzenie naprężeń. Nałożenie się tych przyczyn powoduje, że w początkowej fazie rozwoju pęknięć może mieć ono lokalny i słaby charakter. Otrzymujemy wówczas bardzo przypadkowe i niskie tempa zliczeń sygnału emisji akustycznej, tak jak dla odmiany Kuba na Rys. 21. Podobne wyniki uzyskano także dla drugiej z badanych odmian ziemniaka - Danusi.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że tej początkowej fazie pękania nie towarzyszy zauważalna zmiana nachylenia krzywej naprężenie-odkształcenie, dla wszystkich otrzymanych charakterystyk.

Wzrost naprężenia próbki jest związany ze wzrostem naprężenia w jej elementach strukturalnych, co może powodować pękanie kolejnych coraz wytrzymalszych elementów. Ponieważ, amplituda sygnału EA jest proporcjonalna do naprężenia elementu w momencie pęknięcia, zarejestrowane tempo zliczeń w wyniku pojedynczego zdarzenia jest wówczas stosunkowo wysokie [52]. Wysoki ogólny stan naprężeń jest również przyczyną większej liczby mikropeknięć przy jednostkowym wzroście odkształcenia, co również zwiększa tempo zliczeń (Rys. 21).

Mikropęknięcia poszczególnych elementów strukturalnych łączą się ze sobą tworząc makroszczelinę, która osłabia na tyle tkankę ziemniaka, że następuje zmiana nachylenia krzywej naprężenie-odkształcenie lub nawet jej gwałtowny spadek. Osiągana jest wówczas granica wytrzymałości próbki na ściskanie, poprzedzona wysoką aktywnością akustyczną (objawiającą się wysokimi tempami zliczeń i zagęszczeniem pików, tak jak na Rys. 21).

Opisane powyżej cechy sygnału EA obserwowano we wszystkich przeprowadzonych testach dla tkanek bulwy ziemniaka. Można więc stwierdzić, że:

- Jednoczesne pomiary zależności naprężenie-odkształcenie i sygnału emisji akustycznej powstającego w ściskanej tkance bulwy ziemniaka umożliwiają określenie warunków, przy których rozpoczyna się proces pękania struktury komórkowej.
- Istnieje charakterystyczny wzrost aktywności akustycznej tuż przed osiągnięciem granicy wytrzymałości próbki tkanki bulwy ziemniaka.
- Parametrem sygnału EA charakteryzującym procesy pękania, które prowadzą do osiągnięcia granicy wytrzymałości tkanki bulwy ziemniaka, może być całkowita suma zliczeń Nc_{zl}, będąca sumą wszystkich zliczeń w danym teście.

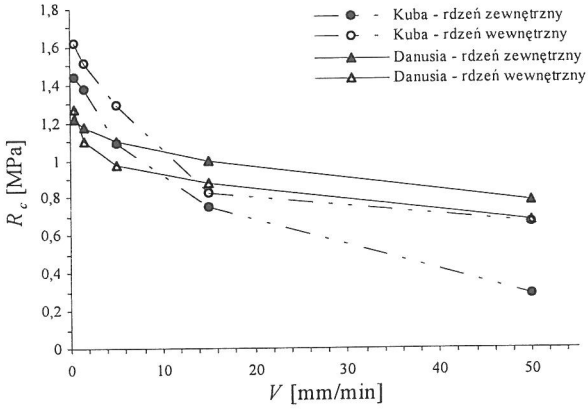
Dokładna analiza wykresów, takich jak na Rys. 21, może przyczynić się do szczegółowego opisu procesu rozwoju pęknięcia w tkance roślinnej pomiędzy stanem krytycznym, a granicą wytrzymałości.

7.3 Wpływ prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej na procesy pękania tkanki roślinnej

7.3.1 Wpływ prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej na stan krytyczny tkanki bulwy ziemniaka

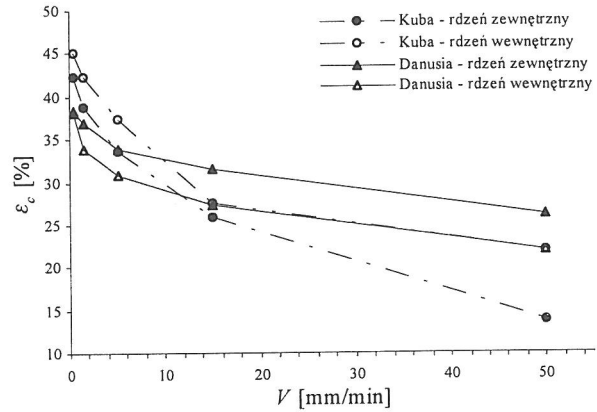
Stan krytyczny tkanki roślinnej, w którym rozpoczyna się proces pękania jej struktury, opisywany jest przez naprężenie krytyczne R_c i odkształcenie krytyczne ε_c ściskanej próbki, które uzyskano według procedury opisanej w Rozdziale 6. Uzyskane zależności R_c i ε_c od prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej przedstawione zostały odpowiednio na Rys. 22 i Rys. 23 dla rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego dwóch badanych odmian. Poszczególne punkty na wykresach są wartościami średnimi, natomiast odchylenia standardowe wraz z testami istotności różnicy średnich zamieszczono w Tabeli 7 oraz Tabeli 8.

Na Rys. 22 i Rys. 23 przedstawiono wyniki dla rdzenia zewnętrznego i rdzenia wewnętrznego odmian Kuba i Danusia. Wpływ prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej na stan krytyczny jest silniejszy dla odmiany Kuba. Dla rdzenia zewnętrznego tej odmiany przy skrajnych prędkościach (0,5 mm/min – 50 mm/min) różnica naprężenia krytycznego R_c wynosi ponad 1 MPa, podczas gdy dla odmiany Danusia około 0,5 MPa. Natomiast dla odkształcenia krytycznego ε_c o około 30 % dla Kuby i około 12 % dla Danusi.



Rys. 22. Zależności naprężenia krytycznego R_c od prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej V dla rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego badanych odmian ziemniaka.

Fig. 22. Critical stress R_c dependence on crosshead speed V for outer and inner core of investigated potato varieties.



Rys. 23. Zależności odkształcenia krytycznego ε_c od prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej V dla rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego badanych odmian ziemniaka.

Fig. 23. Critical strain ε_c dependence on crosshead speed V for outer and inner core of investigated potato varieties.

Analiza półprzedziału ufności różnicy średnich dla kolejnych prędkości $L_{V(k+1)-V(k)}$ wykazała, że kolejne średnie różnią się istotne od siebie z wyjątkiem

średnich R_c rdzenia zewnętrznego odmiany Danusia, dla których zmiany w funkcji prędkości są niewielkie (Tabela 7).

Krzywe na Rys. 22 oraz Rys. 23 są podobne dla wszystkich serii pomiarowych. Wyższe prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej powodują spadek zarówno naprężenia jak i odkształcenia, przy którym rozpoczyna się proces pękania ściskanej próbki. Spadek wartości R_c i ε_c następuje gwałtowniej w dolnym zakresie przedziału badanych prędkości, natomiast kształt krzywych wskazuje, że mogą one mieć asymptotę przy prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej równej 0 mm/min.

Tabela 7. Naprężenie krytyczne R_c dla rdzenia zewnętrznego i rdzenia wewnętrznego dwóch badanych odmian dla różnych prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej *V*. „*" oznacza istotną różnicę średnich

Table 7. Critical stress R_c for outer and inner core of investigated potato varieties at different crosshead speeds *V*. "*" means significant difference of mean values

Danusia

prędkość przem. głowicy ściskającej *V*[mm/min]	rdzeń zewnętrzny			rdzeń wewnętrzny			
	wartość średnia R_c [MPa]	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	wartość średnia R_c [MPa]	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	$L_{zew-wew}$
0,5	1,22	*0,14*	0,07	1,28	*0,20*	0,10 *	0,08
1,5	1,18	*0,18*	0,11	1,10	*0,23*	0,10 *	0,09
5	1,10	*0,28*	0,11	0,98	*0,22*	0,10	0,11 *
15	0,99	*0,23*	0,10 *	0,88	*0,24*	0,10 *	0,10 *
50	0,78	*0,23*		0,68	*0,23*		0,10

Kuba

prędkość przem. głowicy ściskającej *V*[mm/min]	rdzeń zewnętrzny			rdzeń wewnętrzny			
	wartość średnia R_c [MPa]	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	wartość średnia R_c [MPa]	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	$L_{zew-wew}$
0,5	1,44	*0,29*	0,13	1,62	*0,23*	0,09 *	0,12 *
1,5	1,37	*0,30*	0,16 *	1,41	*0,18*	0,09 *	0,11 *
5	1,09	*0,41*	0,19 *	1,29	*0,20*	0,15 *	0,14 *
15	0,75	*0,45*	0,15 *	0,83	*0,42*	0,19	0,19
50	0,28	*0,17*		0,67	*0,44*		0,15 *

Tabela 8. Odkształcenie krytyczne ε_c dla rdzenia zewnętrznego i rdzenia wewnętrznego dwóch badanych odmian dla różnych prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej V. „*" oznacza istotną różnicę średnich

Table 8. Critical strain ε_c for outer and inner core of investigated potato varieties at different crosshead speeds V. "*" means significant difference of mean values

Danusia

prędkość przem. głowicy ściskającej V[mm/min]	rdzeń zewnętrzny			rdzeń wewnętrzny			
	wartość średnia ε_c [%]	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	wartość średnia ε_c [%]	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	$L_{zew-wew}$
0,5	38,3	*3,1*	1,5 *	38,1	*4,4*	2,2 *	1,7
1,5	36,8	*3,5*	2,3 *	33,9	*5,5*	2,4 *	2,1 *
5	33,8	*6,6*	2,6	30,9	*5,2*	2,4 *	2,6 *
15	31,5	*5,2*	2,8 *	27,3	*5,8*	3,0 *	2,5 *
50	26,1	*7,2*		21,9	*7,4*		3,3 *

Kuba

prędkość przem. głowicy ściskającej V[mm/min]	rdzeń zewnętrzny			rdzeń wewnętrzny			
	wartość średnia ε_c [%]	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	wartość średnia ε_c [%]	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	$L_{zew-wew}$
0,5	42,2	*5,8*	2,4 *	45,1	*3,2*	1,7 *	2,1 *
1,5	38,7	*5,0*	3,3 *	42,2	*4,2*	1,7 *	2,1 *
5	33,6	*9,2*	4,6 *	37,3	*3,3*	3,2 *	3,1 *
15	25,9	*11,6*	4,0 *	27,6	*9,5*	4,4 *	4,7
50	13,6	*4,8*		22,0	*10,2*		3,6 *

Opisaną powyżej zależność można interpretować przy pomocy modelu pojedynczej komórki przedstawionego w pkt. 2.3.2 [70, 72]. Przyjmijmy na początku, że ściany komórkowe są nieprzepuszczalne. Wówczas odkształcanie komórki, z racji wzrostu stosunku powierzchni ścian do objętości komórki, powoduje wzrost naprężeń rozciągających w ścianach komórki. W takim wypadku istnieje możliwość rozerwania ściany komórkowej przy odpowiednio dużym odkształceniu komórki. Jeżeli przyjmiemy teraz pewną stałą przepuszczalność ściany komórkowej to ciecz będzie mogła wypływać poza

komórkę, co spowoduje, że przy jednostkowym wzroście odkształcenia lub/i naprężenia całej komórki, jej ściany będą rozciągane w mniejszym stopniu niż w przypadku braku przepływu cieczy. W tej sytuacji, naprężenie ścian komórkowych będzie zależeć również od prędkości jej deformacji; np. mniejsza prędkość daje więcej czasu cieczy na migrację poza komórkę i w konsekwencji mniejszy wzrost naprężenia w ścianach komórkowych przy jednostkowym wzroście odkształcenia komórki.

Ściany wyidealizowanej komórki posiadają pewną wytrzymałość na rozciąganie niezależną od ich przepuszczalności i prędkości deformacji. Osiągnięcie tego stanu zależy więc od prędkości i przy bardzo niskiej jego wartości komórka może zostać niemal całkowicie opróżniona z cieczy i spłaszczyć się bez pęknięcia jej ścian. Mamy wówczas sytuację obserwowaną w prezentowanym eksperymencie, gdzie wielkości opisujące moment rozpoczęcia się procesu pękania (stan krytyczny) szybko rosną przy niskich prędkościach.

Pękanie struktury komórkowej może również rozpocząć się w warstwach pektynowych lamelli łączących komórki między sobą. Obecna wiedza na temat tego zjawiska, uwzględniając również prace teoretyczne, nie dostarcza jednak wystarczających informacji na temat stanu naprężeń w warstwach międzykomórkowych w zależności od prędkości deformacji, nawet prostych układów, np. dwóch połączonych komórek. Trudne jest więc włączenie do interpretacji powyższych wyników zjawisk międzykomórkowych.

Porównując różnice w wynikach między rdzeniem zewnętrznym i rdzeniem wewnętrznym można zauważyć, że w przypadku odmiany Kuba zarówno naprężenie krytyczne R_c jak i odkształcenie krytyczne ε_c mają większe wartości dla rdzenia wewnętrznego. Odwrotną sytuację obserwujemy dla odmiany Danusia – naprężenie krytyczne R_c i odkształcenie krytyczne ε_c rdzenia zewnętrznego są w całym badanym przedziale prędkości wyższe w porównaniu do rdzenia wewnętrznego. Należy tu podkreślić, że różnica odpowiednich średnich, dokonana przy pomocy półprzedziału ufności $L_{zew\text{-}wew}$, jest istotna dla większości badanych prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej (Tabele 7 i 8).

Pomiary parametrów budowy komórkowej przedstawione w pkt. 7.1 pokazały, że ogólnie tkanki rdzenia wewnętrznego zbudowane są z mniejszych komórek niż tkanki rdzenia zewnętrznego (Rys. 18 i Rys. 19 oraz Tabela 4 i Tabela 5). Jednak porównanie wartości naprężenia i odkształcenia krytycznego z rozkładami wielkości komórek wykazuje brak jednoznacznej korelacji między nimi w badanym przedziale prędkości. Wydaje się oczywistym, że pękanie struktury komórkowej rozpoczyna się od pęknięcia elementu najsłabszego

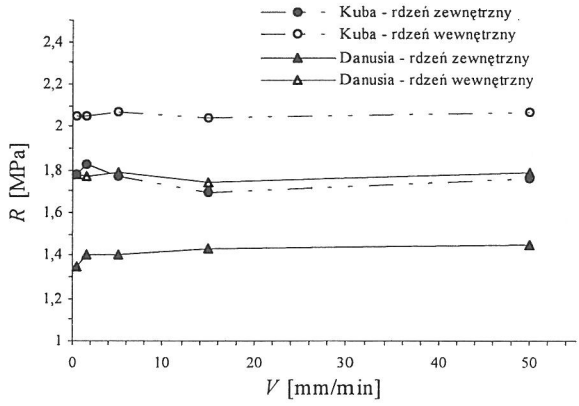
mechanicznie lub od miejsca o wyjątkowo wysokim spiętrzeniu naprężeń. Według nierówności (19) naprężenia ścian komórkowych jest wprost proporcjonalnie do wielkości komórki, ciśnienia wewnątrzkomórkowego oraz odwrotnie proporcjonalnie do grubości ścian komórkowych [39]. Przy założeniu równych ciśnień wewnątrzkomórkowych i grubości ścian komórkowych w pierwszej kolejności powinny więc pękać ściany dużych komórek. W prezentowanym eksperymencie prawidłowość taką zaobserwowano dla odmiany Kuba, dla której wartości R_c i ε_c są niższe dla tkanki o większych komórkach czyli tkanki rdzenia zewnętrznego. Dla odmiany Danusia zależność ta jest jednak odwrotna.

Podsumowując badania wpływu prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej na stan krytyczny tkanki bulwy ziemniaka można stwierdzić, że:

- Naprężenie krytyczne R_c i odkształcenie krytyczne ε_c tkanki bulwy ziemniaka przyjmuje wyższe wartości przy mniejszych prędkościach przemieszczenia głowicy ściskającej, a otrzymane zależności mają charakter asymptotyczny przy prędkościach najniższych.
- Zgodność uzyskanych zależności naprężenia krytycznego R_c i odkształcenia krytycznego ε_c od prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej z przewidywaniami modelu pojedynczej komórki roślinnej (opisanym w pkt. 2.3.2) pokazuje, że jednym z procesów niszczenia tkanek roślinnych i źródłem sygnału EA jest pękanie ścian komórkowych.
- Nie stwierdzono jednoznacznego wpływu wielkości komórek na naprężenie krytyczne R_c i odkształcenie krytyczne ε_c w badanym przedziale prędkości przemieszczeń głowicy ściskającej dla badanych odmian ziemniaka.

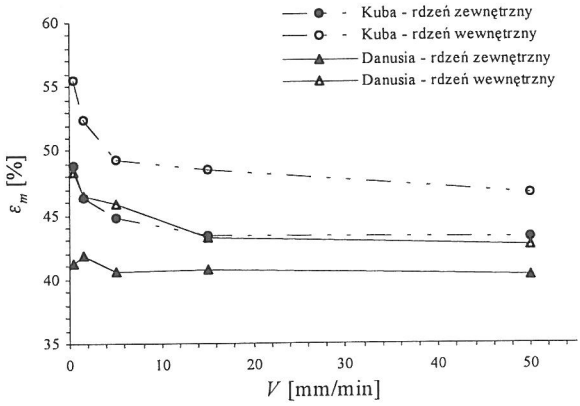
7.3.2 Wpływ prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej na wytrzymałość tkanki bulwy ziemniaka

Wielkości mechaniczne opisujące wytrzymałość bulwy ziemniaka (naprężenie niszczące R i odkształcenie niszczące ε_m) w zależności od prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej przedstawione zostały na Rys. 24 i Rys. 25. Punkty na wykresach są wartościami średnimi. Analiza półprzedziału ufności różnicy średnich dla kolejnych prędkości $L_{V(k+1)-V(k)}$ wykazała, że w badanym przedziale, prędkość przemieszczenia głowicy ściskającej nie wpływa na naprężenie niszczące R w przypadku wszystkich serii pomiarowych (Tabela 9). Inaczej jest w przypadku odkształcenia niszczącego ε_m, którego wartości maleją wraz ze wzrostem prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej w zakresie do około 5 mm/min (Rys. 25, Tabela 10). Przy prędkościach większych od 5 mm/min odkształcenie niszczące zmienia się nieznacznie. Podobnie jak w przypadku wielkości krytycznych opisanych w poprzednim punkcie, najmniejsze zmiany ε_m występują dla rdzenia zewnętrznego odmiany Danusia.



Rys. 24. Zależności naprężenia niszczącego R od prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej V dla rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego badanych odmian ziemniaka.

Fig 24. Failure stress R dependence on crosshead speed V for outer and inner core of investigated potato varieties.



Rys. 25. Zależności odkształcenia niszczącego ε_m od prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej V dla rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego badanych odmian ziemniaka.

Fig. 25. Failure strain ε_m dependence on crosshead speeds V for outer and inner core of investigated potato varieties.

Przedstawione zależności naprężenia niszczącego R i odkształcenia niszczącego ε_m są zgodne z niektórymi wynikami badań opisanych w przeglądzie literatury niniejszej pracy [13, 30, 70]. Autorzy ci wykonywali pomiary na różnych materiałach lecz w podobnych zakresach prędkości. Przedstawione na Rys. 24 i Rys. 25 wyniki potwierdzają wcześniejsze obserwacje, że prędkość przemieszczenia głowicy ściskającej wpływa na wartość odkształcenia w granicy wytrzymałości, nie zmienia zaś wytrzymałości.

Stan krytyczny (opisywany przez R_c oraz ε_c) i granica wytrzymałości (opisywana przez R oraz ε_m) tkanki roślinnej opisują początek i koniec procesu jej pękania. Na Rys. 26 oraz Rys. 27 przedstawiono odpowiednio stosunki R_c/R oraz $\varepsilon_c/\varepsilon_m$ w funkcji prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej. Wartości R_c/R oraz $\varepsilon_c/\varepsilon_m$ są miarą różnicy pomiędzy wytrzymałością i stanem krytycznym. Porównując oba grafy łatwo jest zaobserwować, że mimo opisywanego wcześniej różnego zachowania się naprężenia niszczącego R i odkształcenia niszczącego ε_m, zależności R_c/R i $\varepsilon_c/\varepsilon_m$ w funkcji prędkości mają bardzo podobny charakter. Przy niskich prędkościach stan krytyczny zbliża się do granicy wytrzymałości, tzn. dla bardzo powolnych odkształceń $R_c/R \rightarrow 1$ oraz $\varepsilon_c/\varepsilon_m \rightarrow 1$.

Tabela 9. Naprężenie niszczące *R* dla rdzenia zewnętrznego i rdzenia wewnętrznego dwóch badanych odmian ziemniaka dla różnych prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej *V*. „*" oznacza istotną różnicę średnich

Table 9. Failure stress *R* for outer and inner core of investigated potato varieties at different crosshead speeds *V*. "*" means significant difference of mean values

Danusia

prędkość przem. głowicy ściskającej *V*[mm/min]	rdzeń zewnętrzny			rdzeń wewnętrzny			
	wartość średnia *R* [MPa]	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	wartość średnia *R* [MPa]	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	$L_{zew-wew}$
0,5	1,34	*0,13*	0,05 *	1,78	*0,24*	0,08	0,09 *
1,5	1,40	*0,09*	0,04	1,77	*0,11*	0,05	0,05 *
5	1,40	*0,08*	0,04	1,79	*0,13*	0,06	0,05 *
15	1,43	*0,11*	0,05	1,74	*0,14*	0,09	0,06 *
50	1,45	*0,11*		1,79	*0,24*		0,08 *

Kuba

prędkość przem. głowicy ściskającej *V*[mm/min]	rdzeń zewnętrzny			rdzeń wewnętrzny			
	wartość średnia *R* [MPa]	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	wartość średnia *R* [MPa]	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	$L_{zew-wew}$
0,5	1,78	*0,16*	0,08	2,05	*0,18*	0,08	0,08 *
1,5	1,82	*0,21*	0,09	2,05	*0,18*	0,08	0,09 *
5	1,77	*0,18*	0,08	2,07	*0,18*	0,07	0,08 *
15	1,69	*0,19*	0,08	2,04	*0,15*	0,07	0,08 *
50	1,76	*0,17*		2,07	*0,17*		0,08 *

Tabela 10. Odkształcenie niszczące ε_m dla rdzenia zewnętrznego i rdzenia wewnętrznego dwóch badanych odmian ziemniaka dla różnych prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej V. „*" oznacza istotną różnicę średnich

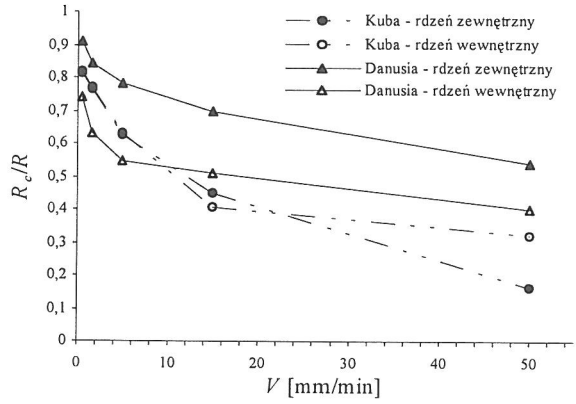
Table 10. Failure strain ε_m for outer and inner core of investigated potato varieties at different crosshead speeds V. "*" means significant difference of mean values

Danusia

prędkość przem. głowicy ściskającej V[mm/min]	rdzeń zewnętrzny wartość średnia ε_m [%]	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	rdzeń wewnętrzny wartość średnia ε_m [%]	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	$L_{zew-wew}$
0,5	41,3	*2,0*	0,9	48,4	*3,1*	1,1 *	1,2 *
1,5	41,8	*1,9*	0,8 *	46,5	*1,8*	1,0	0,8 *
5	40,5	*1,9*	0,9	45,9	*2,5*	1,0 *	1,0 *
15	40,8	*2,1*	1,1	43,3	*2,2*	1,2	1,0 *
50	40,3	*2,7*		42,7	*3,1*		1,3 *

Kuba

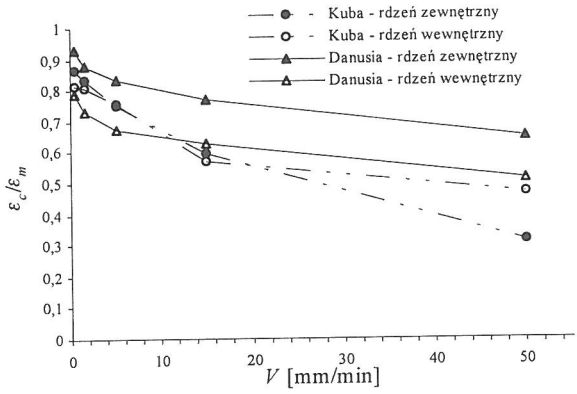
prędkość przem. głowicy ściskającej V[mm/min]	rdzeń zewnętrzny wartość średnia ε_m [%]	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	rdzeń wewnętrzny wartość średnia ε_m [%]	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	$L_{zew-wew}$
0,5	48,9	*4,0*	1,6 *	55,4	*2,4*	1,0 *	1,5 *
1,5	46,3	*3,2*	1,3 *	52,4	*2,1*	1,0 *	1,2 *
5	44,8	*2,6*	1,2 *	49,3	*2,5*	1,0	1,1 *
15	43,4	*2,8*	1,0	48,5	*2,0*	1,0 *	1,1 *
50	43,2	*1,8*		46,7	*2,4*		0,9 *



Rys. 26. Zależności R_c/R od prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej V dla rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego badanych odmian ziemniaka.

Fig. 26. R_c/R dependence on crosshead speed V for outer and inner core of investigated potato varieties.

Proces ściskania zespołu komórek powoduje migrację cieczy z komórek o wyższym ciśnieniu do obszarów o ciśnieniu niższym. Różnica ciśnień w poszczególnych komórkach może być spowodowana ich indywidualnymi właściwościami lub różnym gradientem wzrostu ciśnienia podczas ściskania. Tak jak to zostało opisane wcześniej, z ciśnieniem wewnątrzkomórkowym związany jest ściśle stan naprężeń w ścianach komórkowych. Wyrównywanie ciśnień wewnątrzkomórkowych powoduje więc ujednolicenie stanu naprężeń w ścianach komórkowych ściskanej próbki. Powolny proces ściskania, któremu towarzyszy również wypływ cieczy poza próbkę, może powodować spłaszczanie komórek bez ich pękania. Destrukcja ścian komórkowych zajdzie wówczas przy stosunkowo dużym odkształceniu i naprężeniu komórki. Jednak proces ten, gdy się rozpocznie, to z racji stosunkowo jednorodnego rozkładu naprężeń, powinien przebiegać lawinowo. W prezentowanym eksperymencie właśnie temu zjawisku odpowiada zbliżanie się wielkości opisujących stan krytyczny i wytrzymałość ściskanych próbek tkanki ziemniaka.



Rys. 27. Zależności $\varepsilon_c/\varepsilon_m$ od prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej V dla rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego badanych odmian ziemniaka.

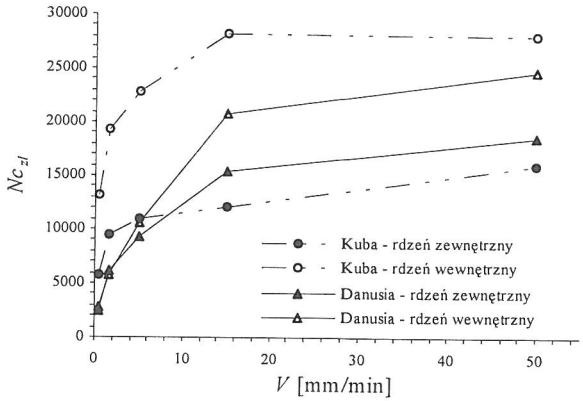
Fig. 27. $\varepsilon_c/\varepsilon_m$ dependence on crosshead speed V for outer and inner core of investigated potato varieties.

Na Rys. 24 oraz Rys. 25 widoczne są różnice w przebiegu krzywych uzyskanych dla rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego obydwu odmian. Zarówno wartości R i ε_m są wyższe dla rdzenia wewnętrznego w całym przedziale badanych prędkości. Potwierdza to analiza półprzedziałów ufności różnicy średnich dla rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego - $L_{zew\text{-}wew}$ (Tabela 8 i 9). Uzyskany wynik ujemnie koreluje więc ze średnią wielkością komórek badanych typów tkanek (Tabela 4). W przypadku obu odmian, rdzeń wewnętrzny o średnio mniejszych komórkach jest bardziej wytrzymały od rdzenia zewnętrznego zbudowanego z komórek większych.

Otrzymane wyniki potwierdzają hipotezę o znaczącym wpływie wielkości komórek na wytrzymałość tkanek roślinnych [38, 39]. Należy tu przypomnieć, że takiej jednoznacznej zależności nie zaobserwowano dla wielkości opisujących stan krytyczny.

Na Rys. 28 zaprezentowano wyniki pomiaru całkowitej liczby zliczeń Nc_{zl} przy różnych prędkościach przemieszczenia głowicy ściskającej. Punkty pomiarowe, podobnie jak na poprzednich wykresach, są średnimi z danych serii pomiarowych, natomiast odchylenia standardowe tych średnich oraz analizę wyników przy pomocy półprzedziałów ufności umieszczono w Tabeli 11. Uzyskane wyniki świadczą o istotnym wpływie prędkości na całkowitą sumę zliczeń Nc_{zl}. Wzrost prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej powoduje

wzrost całkowitej sumy zliczeń Nc_{zl}, szczególnie silny w zakresie niskich prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej <15 mm/min (Rys. 28). Kształt krzywych wskazuje na logarytmiczną zależność Nc_{zl} od prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej V.



Rys. 28. Zależność całkowitej sumy zliczeń Nc_{zl} od prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej V dla rdzenia zewnętrznego i wewnętrznego badanych odmian ziemniaka.

Fig. 28. Total count sum Nc_{zl} dependence on crosshead speed V for outer and inner core of investigated potato varieties.

Aproksymacja punktów eksperymentalnych z Rys. 28 zależnością:

$$Nc_{zl} = a \ \ln(V) + b \quad , \tag{30}$$

gdzie: a i b – współczynniki równania,
daje wysokie współczynniki korelacji R^2, które wraz z odpowiednimi współczynnikami a i b zaprezentowano w Tabeli 12.

Tabela 11. Całkowita suma zliczeń Nc_{zl} dla rdzenia zewnętrznego i rdzenia wewnętrznego dwóch badanych odmian ziemniaka dla różnych prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej *V*. „*" oznacza istotną różnicę średnich

Table 11. Total count sum Nc_{zl} for outer and inner core of investigated potato varieties at different crosshead speeds *V*. "*" means significant difference of mean values

Danusia

prędkość przem. głowicy ściskającej	rdzeń zewnętrzny			rdzeń wewnętrzny			
	wartość średnia	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	wartość średnia	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	$L_{zew-wew}$
V[mm/min]	Nc_{zl}			Nc_{zl}			
0,5	2446	*1831*	1355 *	2691	*1786*	999 *	805
1,5	6166	*3899*	1971 *	5801	*2624*	1722 *	1479
5	9227	*4905*	2431 *	10480	*4803*	2798 *	2160
15	15346	*5968*	2921 *	20812	*7483*	3114 *	3012 *
50	18527	*7110*		24563	*6479*		3027 *

Kuba

prędkość przem. głowicy ściskającej	rdzeń zewnętrzny			rdzeń wewnętrzny			
	wartość średnia	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	wartość średnia	*odch. stand.*	$L_{V(k+1)-V(k)}$	$L_{zew-wew}$
V[mm/min]	Nc_{zl}			Nc_{zl}			
0,5	5809	*3117*	1626 *	13214	*4321*	2078 *	1676 *
1,5	9394	*4123*	2352	19210	*4995*	2625 *	2038 *
5	10962	*6234*	2657	22776	*6682*	3060 *	2875 *
15	11977	*5695*	2923 *	28077	*7067*	3309 *	2856 *
50	15920	*7341*		27968	*7786*		3367 *

Tabela 12. Współczynniki dopasowania punktów doświadczalnych krzywą logarytmiczną o równaniu: $Nc_{zl} = a\ \ln(V) + b$

Table 12. Coefficients of the curve: $Nc_{zl} = a\ \ln(V) + b$

Odmiana i typ tkanki	*a*	*b*	R^2
Kuba rdzeń zewnętrzny	1981	7665	0,95
Kuba rdzeń wewnętrzny	3321	16974	0,93
Danusia rdzeń zewnętrzny	3586	4645	0,98
Danusia rdzeń wewnętrzny	5098	4770	0,96

Uzyskane wartości Nc_{zl} są wyższe w całym zakresie prędkości dla rdzenia wewnętrznego w porównaniu do rdzenia zewnętrznego w przypadku obu badanych odmian. Podobnie, wartości współczynnika *a* są dla obu odmian wyższe w przypadku rdzenia wewnętrznego. Łącząc ten wynik z rozkładami wielkości komórek możemy wnioskować, że współczynnik *a* związany jest z wielkością komórek i może przyjmować wyższe wartości dla tkanek zbudowanych z mniejszych komórek.

Podobne, jak w opisywanym powyżej eksperymencie, zależności parametrów sygnału emisji akustycznej od prędkości oraz budowy mikro-strukturalnej obserwuje się dla innym materiałów jak np. materiały ceramiczne, dla których funkcje te są dość dobrze opisane [78]. Badania tego typu wymagają odpowiednich technik obserwacji rozwoju pęknięć i umożliwiających opis tego pęknięcia (np. jego powiększających się wymiarów) oraz elementów w najbliższym jego sąsiedztwie. W przypadku materiałów roślinnych wydaje się to obecnie bardzo trudne. Mimo szeroko prowadzonych badań mikroskopowych tkanek roślinnych, obserwacje pęknięć stanowią bardzo niewielką część. Podstawową trudnością jest zlokalizowanie pęknięcia, które często ma niewielkie rozmiary w porównaniu do niszczonej próbki, a nawet jak podaje literatura może nastąpić „zabliźnienie" szczeliny po ustaniu sił niszczących [41].

Wyniki uzyskane przy pomocy metody emisji akustycznej wnoszą więc tylko część informacji na temat zależności procesów pękania od prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej i powinny być w przyszłości uzupełnione o szczegółowe badania mikroskopowe pęknięć tkanki roślinnej, bez których również szczegółowa interpretacja, otrzymanych w prezentowanym eksperymencie wyników, jest ograniczona.

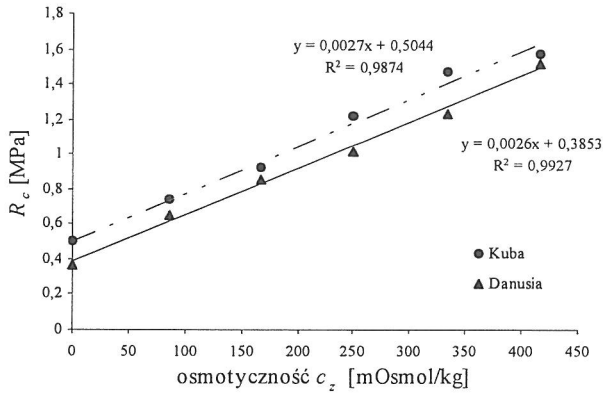
Podsumowując badania wpływu prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej na wytrzymałość tkanki bulwy ziemniaka można stwierdzić, że:

- Naprężenie niszczące R tkanki bulwy ziemniaka nie zależy od prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej. Natomiast odkształcenie niszczące ε_m zmienia się wraz z prędkością w zakresie niskich prędkości do 15 mm/min.
- Wielkości komórek wpływa istotnie na wytrzymałość tkanki bulwy ziemniaka. Tkanki rdzenia wewnętrznego bulwy ziemniaka zbudowane z mniejszych komórek charakteryzuje wyższe naprężenie niszczące R i odkształcenie niszczące ε_m w porównaniu do rdzenia zewnętrznego danej odmiany.
- Całkowita suma zliczeń Nc_{zl} tkanki rdzenia wewnętrznego bulwy ziemniaka zbudowanej z mniejszych komórek jest wyższa niż tkanki rdzenia zewnętrznego zbudowanej z komórek większych.
- Zależności całkowitej sumy zliczeń Nc_{zl}, otrzymane w teście ściskania tkanek bulwy ziemniaka, od prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej mają charakter logarytmiczny.

7.4 Wpływ turgoru na procesy pękania tkanki roślinnej

7.4.1 Wpływ turgoru na stan krytyczny tkanki bulwy ziemniaka

Wyniki prezentowane w niniejszym rozdziale uzyskano dla rdzenia zewnętrznego obu badanych odmian: Kuba i Danusia przy prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej V=5 mm/min. Zależność naprężenia krytycznego R_c oraz odkształcenia krytycznego ε_c od osmotyczności c_z roztworów, w których umieszczone były próbki przedstawiono odpowiednio na Rys. 29 i Rys. 30. Natomiast w Tabeli 13 i 14 umieszczono wyniki analizy półprzedziałów ufności $L_{p(k+1)-p(k)}$ i L_{odm} odpowiednich różnic średnich.



Rys. 29. Zależność naprężenia krytycznego R_c dla rdzenia zewnętrznego dwóch badanych odmian ziemniaka od osmotyczności roztworów mannitolu c_z, w których przebywały próbki wraz z odpowiednimi równaniami regresji liniowej. Wyższe wartości c_z odpowiadają niższemu turgorowi tkanki.

Fig. 29. Critical stress R_c of outer core of two investigated potato varieties dependence on osmolality of mannitol solutions c_z where sample were placed and regression lines. Higher value of c_z corresponds to lower tissue turgor.

W zastosowanej procedurze zmiany turgoru wyższe wartości osmotyczności roztworu mannitolu c_z, w których umieszczone były próbki, odpowiadają niższym tugorom tkanki bulwy ziemniaka osiąganym w stanie równowagi. Przeprowadzone badania wykazały silny wpływ turgoru tkanki bulwy ziemniaka na naprężenie krytyczne R_c, które przy skrajnych turgorach różnią się nawet

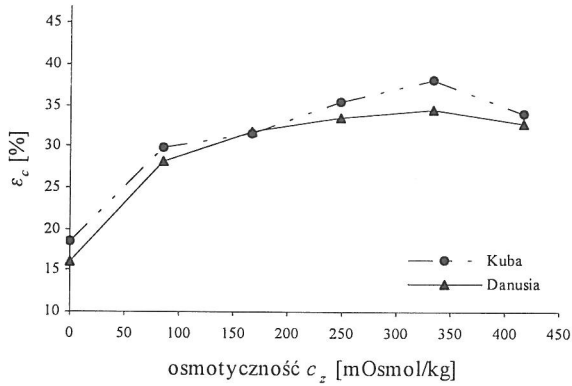
kilkukrotnie. Zależność ta, poparta testem istotności (półprzedziały $L_{p(k+1)-p(k)}$ w Tabeli 13), ma charakter liniowy. Z wyznaczonych równań regresji liniowej wynika, że współczynnik nachylenia jest podobny dla obydwu badanych odmian i wynosi około 0,0026, przy czym w całym zakresie badanych turgorów naprężenie krytyczne odmiany Kuba jest wyższe od naprężenia krytycznego odmiany Danusia. Różnica ta jest niewielka, choć istotna (półprzedział L_{odm} w Tabeli 13) i wynosi około 0,1 MPa. Wynik ten odwrotnie koreluje z uzyskanymi rozkładami wielkości komórek, które dla odmiany Kuba są wyraźnie mniejsze (Rys. 18 i 19 oraz Tabela 4 i Tabela 5).

Tabela 13. Średnie wartości naprężenia krytycznego R_c wraz z odchyleniami standardowymi dla rdzenia zewnętrznego odmiany Danusia i Kuba. „*" oznacza istotną różnicę średnich

Table 13. Average values of critical stress R_c with standard deviations obtained for outer core of Danusia and Kuba potato varieties. "*" means significant difference of mean values

Osmotyczność	Odmiana						różnice odm.
	Danusia			Kuba			
c_z [mOsmol/kg]	wartość średnia R_c [MPa]	*odch. stand.*	$L_{p(k+1)-p(k)}$	wartość średnia R_c [MPa]	*odch. stand.*	$L_{p(k+1)-p(k)}$	L_{odm}
0	0,36	*0,11*	0,05 *	0,50	*0,12*	0,06 *	0,05 *
86	0,65	*0,11*	0,06 *	0,74	*0,16*	0,08 *	0,06 *
167	0,86	*0,17*	0,08 *	0,92	*0,18*	0,10 *	0,08
249	1,01	*0,20*	0,15 *	1,22	*0,26*	0,15 *	0,10 *
334	1,23	*0,43*	0,22 *	1,47	*0,40*	0,28	0,19 *
416	1,52	*0,53*		1,57	*0,79*		0,30

Podobne zmiany, jak w przypadku naprężenia krytycznego, zaobserwowano dla odkształcenia krytycznego ε_c. Uzyskane zależności nie mają jednak charakteru liniowego w całym badanym zakresie c_z. Najsilniejsze zmiany ε_c zachodzą przy wysokich turgorach (niskich wartościach osmotyczności c_z na Rys. 30). Natomiast przy stosunkowo niskich turgorach zmiany odkształcenia krytycznego nie są już tak wyraźne, a nawet spadają dla minimalnego badanego turgoru (maksymalna wartość osmotyczności $c_z \approx 400$ mOsmol/kg). Odkształcenia krytyczne w całym zakresie badanych turgorów są tylko nieznacznie wyższe dla odmiany Kuba. Na podstawie analizy półprzedziałów ufności dla różnic odpowiednich średnich można stwierdzić, że różnice odmianowe w tym przypadku są nieistotne (półprzedział L_{odm} w Tabeli 14).



Rys. 30. Zależność odkształcenia krytycznego ε_c dla rdzenia zewnętrznego dwóch badanych odmian ziemniaka od osmotyczności roztworów mannitolu c_z, w których przebywały próbki. Wyższe wartości c_z odpowiadają niższemu turgorowi tkanki.

Fig. 30. Critical strain ε_c of outer core of two investigated potato varieties dependence on osmolality of mannitol solutions c_z where sample were placed and regression lines. Higher value of c_z corresponds to lower tissue turgor.

Tabela 14. Średnie wartości odkształcenia krytycznego ε_c wraz z odchyleniami standardowymi dla rdzenia zewnętrznego odmiany Danusia i Kuba. „*" oznacza istotną różnicę średnich

Table 14. Average values of critical strain ε_c with standard deviations obtained for outer core of Danusia and Kuba potato varieties. "*" means significant difference of mean values

Osmotyczność	Odmiana						różnice odm.
	Danusia			Kuba			
c_z [mOsmol/kg]	wartość średnia ε_c [%]	*odch. stand.*	$L_{p(k+1)-p(k)}$	wartość średnia ε_c [%]	*odch. stand.*	$L_{p(k+1)-p(k)}$	L_{odm}
0	16,1	*4,9*	2,0 *	18,5	*3,8*	1,9 *	2,0 *
86	28,2	*4,2*	1,9 *	29,9	*4,6*	1,9	1,9
167	31,8	*4,4*	2,0	31,6	*4,1*	1,8 *	1,9
249	33,4	*4,7*	2,8	35,3	*3,8*	2,1 *	1,9
334	34,4	*7,4*	2,9	38,1	*5,3*	3,0 *	2,9 *
416	32,6	*5,2*		34,0	*7,8*		3,0

Do interpretacji przedstawionych powyżej wyników można wykorzystać model, w którym właściwości tkanki roślinnej są reprezentowane przez pojedynczą komórkę i który opisano w przeglądzie literatury (pkt 2.3.2) niniejszej pracy [70, 72].

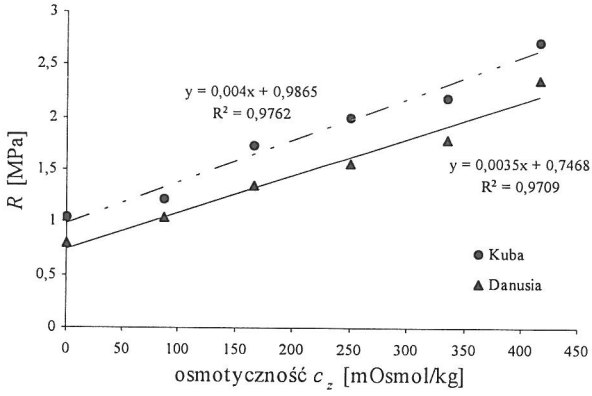
Turgor, według definicji, jest stanem naprężenia ścian komórkowych w wyniku nagromadzenia się wody w komórkach. Im wyższy turgor tym początkowe naprężenie ścian komórkowych jest wyższe. Zakładając, że ściany komórkowe są w przybliżeniu sprężyste i mają ściśle określoną wytrzymałość, dodatkowe odkształcenie i naprężenie ściany komórkowej wymagane do jej zniszczenia zależeć będą właśnie od naprężenia początkowego, a więc od turgoru tkanki przed procesem deformacji. Przy wyższym początkowym turgorze dodatkowe naprężenie i odkształcenie ma niższe wartości. Wynik taki zaobserwowano w prezentowanym eksperymencie, w którym wartości R_c i ε_c przyjmują niższe wartości dla wyższych turgorów. Analityczne rozwiązania modelu pojedynczej wyidealizowanej komórki zaprezentowane w pkt. 2.3.2 niniejszej pracy potwierdzają ten tok rozumowania (Rys. 5a i b w pkt 2.3.2 niniejszej pracy).

Opisane powyżej wyniki badań stanu krytycznego próbek tkanki rdzenia zewnętrznego dwóch odmian ziemniaka przy różnych wartościach osmotyczności roztworu mannitolu c_z, można podsumować następującymi stwierdzeniami:

- Naprężenie krytyczne R_c próbek tkanki bulwy ziemniaka obydwu badanych odmian ma wyższe wartości przy mniejszych turgorach – zaobserwowano liniową zależność pomiędzy osmotycznością roztworu mannitolu c_z, a naprężeniem krytycznym R_c w całym badanym zakresie wartości c_z.
- Odkształcenie krytyczne ε_c próbek tkanki bulwy ziemniaka obydwu badanych odmian ma wyższe wartości przy mniejszych turgorach, z wyjątkiem tych uzyskanych przy maksymalnej wartości osmotyczności c_z użytej w eksperymencie.
- Charakter zmian naprężenia krytycznego R_c i odkształcenia krytycznego ε_c w funkcji osmotyczności roztworu mannitolu c_z jest podobny dla obydwu badanych odmian, przy czym tkanka rdzenia zewnętrznego odmiany Kuba posiada istotnie wyższe wartości R_c w porównaniu z odmianą Danusia.
- Zgodność uzyskanych zależności naprężenia krytycznego R_c i odkształcenia krytycznego ε_c od turgoru tkanki bulwy ziemniaka z przewidywaniami modelu pojedynczej komórki roślinnej pokazuje, że jednym z procesów niszczenia tkanek roślinnych i źródłem sygnału EA jest pękanie ścian komórkowych.

7.4.2 Wpływ turgoru na wytrzymałość tkanki bulwy ziemniaka

Na Rys. 31 przedstawiono uzyskane w eksperymencie zależności naprężenia niszczącego R od osmotyczności roztworu mannitolu c_z dla obydwu badanych odmian. Naprężenie niszczące R wykazuje liniowy wzrost wraz ze wzrostem osmotyczności roztworów zewnętrznych, co jednocześnie oznacza spadek naprężenia niszczącego wraz ze wzrostem turgoru tkanki. Podobnie jak dla naprężenia krytycznego R_c różnice kolejnych średnich naprężeń niszczących R są istotne dla niemal każdego półprzedziału $L_{p(k+1)-p(k)}$ (Tabela 15). Równania prostych regresji liniowej wraz ze współczynnikiem korelacji R^2 umieszczono przy odpowiednich prostych. Współczynniki nachylenia prostej regresji są podobne dla obydwu odmian i wynoszą 0,0035 dla odmiany Kuba oraz 0,004 dla odmiany Danusia.



Rys. 31. Zależności naprężenia niszczącego R dla rdzenia zewnętrznego dwóch badanych odmian ziemniaka od osmotyczności roztworów mannitolu c_z, w których przebywały próbki. Wyższe wartości c_z odpowiadają niższemu turgorowi tkanki.

Fig. 31. Failure stress R of outer core of two investigated potato varieties dependence on osmolality of mannitol solutions c_z where sample were placed and regression lines. Higher value of c_z corresponds to lower tissue turgor.

Różnice odmianowe dla naprężenia niszczącego R są bardziej wyraźne niż w przypadku naprężenia krytycznego R_c; odmiana Kuba posiada wyższą wytrzymałość o około 0,2 MPa w porównaniu z odmianą Danusia. Różnice te potwierdza test istotności (Tabela 15).

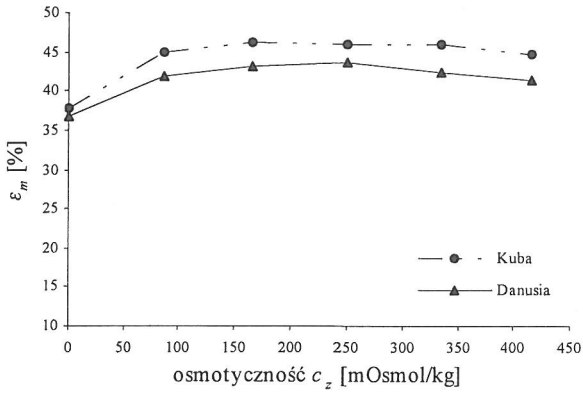
Tabela 15. Średnie wartości naprężenia niszczącego R wraz z odchyleniami standardowymi dla rdzenia zewnętrznego odmiany Danusia i Kuba. „*" oznacza istotną różnicę średnich

Table 15. Average values of failure stress R with standard deviations obtained for outer core of Danusia and Kuba potato varieties. "*" means significant difference of mean values

Osmotyczność	Odmiana						różnice odm.
	Danusia			Kuba			
c_z [mOsmol/kg]	wartość średnia R [MPa]	*odch. stand.*	$L_{p(k+1)-p(k)}$	wartość średnia R [MPa]	*odch. stand.*	$L_{p(k+1)-p(k)}$	L_{odm}
0	0,80	*0,08*	0,04 *	1,04	*0,10*	0,04 *	0,04 *
86	1,04	*0,10*	0,05 *	1,22	*0,09*	0,06 *	0,04 *
167	1,34	*0,10*	0,04 *	1,72	*0,16*	0,06 *	0,06 *
249	1,55	*0,09*	0,05 *	2,00	*0,12*	0,07 *	0,05 *
334	1,79	*0,13*	0,09 *	2,18	*0,17*	0,09 *	0,07 *
416	2,35	*0,25*		2,71	*0,21*		0,10 *

Zmiany odkształcenia niszczącego ε_m dla różnych wartości osmotyczności roztworu zewnętrznego c_z przedstawiono na Rys. 32. W zakresie wysokich turgorów obserwujemy nieznaczny, ale istotny wzrost ε_m (Tabela 16). Natomiast średnie naprężenia niszczące ε_m próbek umieszczonych w roztworach o osmotyczności wyższej niż 160 mOsmol/kg nie różnią się istotnie, a przy maksymalnej wartości osmotyczności (416 mOsmol/kg) obserwuje się nawet nieznaczny spadek odkształcenia niszczącego ε_m, podobnie jak dla opisywanego wcześniej odkształcenia krytycznego ε_c. Porównanie Rys. 30 i Rys. 32 (ta sama skala na wykresach) pozwala stwierdzić, że ogólnie zmiany ε_m są mniejsze od zmian ε_c w zakresie badanych turgorów.

Podobnie jak w przypadku naprężenia niszczącego R, odkształcenie niszczące ε_m dla próbek odmiany Kuba posiada istotnie wyższe wartości w całym przedziale badanych turgorów w porównaniu do odmiany Danusia (Rys. 32 i Tabela 16).



Rys. 32. Zależność odkształcenia niszczącego ε_m dla rdzenia zewnętrznego dwóch badanych odmian ziemniaka od osmotyczności roztworów mannitolu c_z, w których przebywały próbki. Wyższe wartości c_z odpowiadają niższemu turgorowi tkanki.

Fig. 32. Failure strain ε_m of outer core of two investigated potato varieties dependence on osmolality of mannitol solutions c_z where sample were placed and regression lines. Higher value of c_z corresponds to lower tissue turgor.

Tabela 16. Średnie wartości odkształcenia niszczącego ε_m wraz z odchyleniami standardowymi dla rdzenia zewnętrznego odmiany Danusia i Kuba. „*" oznacza istotną różnicę średnich

Table 16. Average values of failure strain ε_m with standard deviations obtained for outer core of Danusia and Kuba potato varieties. "*" means significant difference of mean values

Osmotyczność	Odmiana						różnice odm.
	Danusia			Kuba			
c_z [mOsmol/kg]	wartość średnia ε_m [%]	*odch. stand.*	$L_{p(k+1)-p(k)}$	wartość średnia ε_m [%]	*odch. stand.*	$L_{p(k+1)-p(k)}$	L_{odm}
0	36,8	*2,3*	1,1 *	37,8	*2,5*	1,0 *	1,1
86	41,8	*2,8*	1,1 *	44,9	*2,0*	0,8 *	1,1 *
167	43,2	*2,2*	0,9	46,2	*1,8*	0,7	0,9 *
249	43,7	*1,7*	0,8 *	46,0	*1,6*	0,9	0,7 *
334	42,4	*1,8*	1,2	45,9	*2,2*	0,8 *	0,9 *
416	41,3	*3,4*		44,7	*1,3*		1,2 *

Jak wspomniano wcześniej turgor jest stanem naprężenia ścian komórkowych. W wyniku wzrostu turgoru tkanki wrasta naprężenie ścian

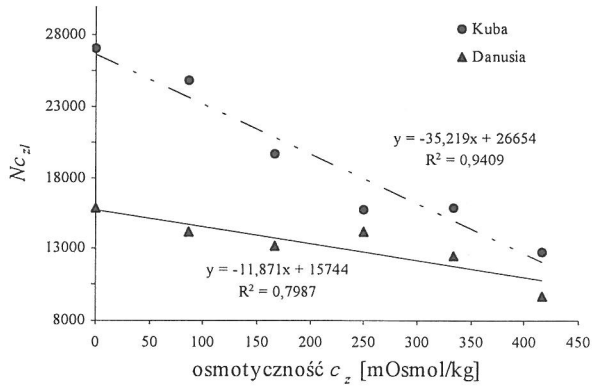
komórkowych. Wzrost ten zmienia nie tylko warunki mechaniczne, w których rozpoczyna się pękanie struktury komórkowej (zmiana wartości R_c i ε_c przy różnych osmotycznościach roztworu mannitolu c_z, Rys. 29 i Rys. 30), ale również sprawia, że przy jednostkowym wzroście odkształcenia lub naprężenia więcej elementów strukturalnych (np. ścian komórkowych) zostanie zniszczonych. Każde nowo powstające pęknięcie ścian komórkowych lub innego elementu budowy komórkowej może stać się źródłem sygnału emisji akustycznej. Oznacza to, że przy wyższym turgorze rejestrowane tempo zliczeń dN_{zl}/dt powinno być wyższe. W rezultacie otrzymujemy wyższą całkowitą sumę zliczeń Nc_{zl} na końcu procesu odkształcania w momencie wyczerpania wytrzymałości materiału.

Opisany powyżej efekt zaobserwowano w prezentowanym eksperymencie dla obydwu badanych odmian. Mimo braku istotnych różnic pomiędzy średnimi przy kolejnych wartościach osmotyczności roztworu mannitolu c_z (półprzedziały $L_{p(k+1)-p(k)}$ w Tabeli 17), uzyskano liniowy spadek całkowitej sumy zliczeń Nc_{zl} wraz ze wzrostem osmotyczności roztworu zewnętrznego c_z, co jednocześnie oznacza wzrost Nc_{zl} przy wzroście turgoru (Rys. 33).

Jak zostało to wykazane w Rozdziale 7.3.2, całkowita suma zliczeń Nc_{zl} jest proporcjonalna do $\ln(V)$, gdzie V jest prędkością przemieszczenia głowicy ściskającej. Łącząc wyniki testów przy różnych prędkościach przemieszczenia głowicy ściskającej i różnym turgorze (ciśnieniu turgorowym p_0) można zapisać następującą proporcjonalność:

$$Nc_{zl} \approx p_0 \ln(V) \quad , \tag{31}$$

gdzie: p_0 jest ciśnieniem turgorowym tkanki roślinnej przed procesem odkształcania próbki.



Rys. 33. Zależność całkowitej sumy zliczeń Nc_{zl} dla rdzenia zewnętrznego dwóch badanych odmian ziemniaka od osmotyczności roztworów mannitolu c_z, w których przebywały próbki. Wyższe wartości c_z odpowiadają niższemu turgorowi tkanki.

Fig. 33. Total count sum Nc_{zl} of outer core of two investigated potato varieties dependence on osmolality of mannitol solutions c_z where sample were placed and regression lines. Higher value of c_z corresponds to lower tissue turgor.

Tabela 17. Średnie wartości całkowitej sumy zliczeń Nc_{zl} wraz z odchyleniami standardowymi dla rdzenia zewnętrznego odmiany Danusia i Kuba. „*" oznacza istotną różnicę średnich

Table 17. Average values of total count sum Nc_{zl} with standard deviations obtained for outer core of Danusia and Kuba potato varieties. "*" means significant difference of mean values

Osmotyczność	Odmiana						różnice odm.
	Danusia			Kuba			
c_z [mOsmol/kg]	wartość średnia Nc_{zl}	*odch. stand.*	$L_{p(k+1)-p(k)}$	wartość średnia Nc_{zl}	*odch. stand.*	$L_{p(k+1)-p(k)}$	L_{odm}
0	15862	*6813*	2999	27122	*8615*	4401	3456 *
86	14097	*6663*	2789	24789	*11018*	4369 *	4051 *
167	13229	*5848*	2653	19599	*8448*	3385 *	3233 *
249	14166	*6076*	2788	15673	*6658*	3389	2836
334	12518	*6448*	2628 *	15893	*8464*	3280	3348 *
416	9732	*5310*		12751	*6086*		2541 *

Zależności podobnego charakteru zaobserwowano dla obydwu badanych odmian, przy czym całkowita suma zliczeń Nc_{zl} i współczynnik nachylenia prostej

regresji jest wyższy dla odmiany Kuba niż dla odmiany Danusia. Analiza statystyczna wykazała, że różnice odmianowe dla średnich całkowitej sumy zliczeń są istotne w prawie całym przedziale badanych osmotyczności roztworu zewnętrznego c_z (półprzedział L_{odm} Tabela 17).

Opisane powyżej wyniki badań wytrzymałości próbek tkanki rdzenia zewnętrznego dwóch odmian ziemniaka przy różnych wartościach osmotyczności roztworu mannitolu c_z, można podsumować następującymi stwierdzeniami:

- Naprężenie niszczące R próbek tkanki bulwy ziemniaka obydwu badanych odmian ma wyższe wartości przy niższych turgorach – zaobserwowano liniową zależność pomiędzy osmotycznością roztworu mannitolu c_z, a naprężeniem niszczącym R w całym badanym zakresie wartości c_z.
- Zaobserwowano wzrost odkształcenia niszczącego ε_m próbek tkanki bulwy ziemniaka obydwu badanych odmian przy spadku turgoru w zakresie niskich wartości osmotyczności roztworu mannitolu c_z (tzn. do około 160 mOsmol/kg), w zakresie wyższych wartości c_z zmiany ε_m są nieistotne.
- Charakter zmian naprężenia niszczącego R i odkształcenia niszczącego ε_m w funkcji osmotyczności roztworu mannitolu c_z jest podobny dla obydwu badanych odmian, przy czym tkanka rdzenia zewnętrznego odmiany Kuba posiada istotnie wyższe wartości R w porównaniu z odmianą Danusia.
- Całkowita suma zliczeń Nc_{zl} maleje liniowo wraz ze spadkiem tugoru tkanki bulwy ziemniaka obydwu badanych odmian, przy czym wartości Nc_{zl} są wyższe dla odmiany Kuba niż dla odmiany Danusia. Również nachylenie prostej $Nc_{zl}(c_z)$ dla odmiany Kuba jest około trzykrotnie wyższe w porównaniu do odmiany Danusia.

8. WNIOSKI

W pracy przedstawiono metodę i oryginalne stanowisko badawcze do jednoczesnych pomiarów zależności naprężenie-odkształcenie i sygnału emisji akustycznej tkanek roślinnych oraz ich wykorzystanie do badań procesów pękania tego typu materiałów.

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków ogólnych:

- Wykazano wysoką przydatności metody emisji akustycznej do wykrywania i badania procesów pękania tkanek roślinnych.
- Użycie metody emisji akustycznej pokazało, że w ściskanej próbce tkanki roślinnej następuje propagacja pęknięć, która rozpoczyna się w stanie krytycznym i prowadzi do osiągnięcia wyczerpania wytrzymałości materiału.
- Wielkości takie jak całkowita suma zliczeń Nc_{zl}, naprężenie krytyczne R_c i odkształcenie krytyczne ε_c, uzyskane przy pomocy emisji akustycznej zmieniają się wraz ze zmianą turgoru oraz prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej V.
- Jednym ze źródeł sygnału emisji akustycznej w ściskanej tkance roślinnej jest pękanie ścian komórkowych.

Badania eksperymentalne przeprowadzone dla tkanek bulw ziemniaka wybranych dwóch odmian: Kuba i Danusia pozwoliły na sformułowanie następujących szczegółowych wniosków:

- Parametrem sygnału emisji akustycznej opisującym cały proces pękania tkanki roślinnej jest całkowita suma zliczeń Nc_{zl}, która rośnie logarytmiczne wraz ze zmianą prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej V oraz liniowo wraz z turgorem tkanki bulwy ziemniaka.
- Wzrost prędkości przemieszczenia głowicy ściskającej powoduje spadek naprężenia krytycznego R_c i odkształcenia krytycznego ε_c oraz odkształcenia niszczącego ε_m próbki bulwy ziemniaka, natomiast naprężenie niszczące R nie zmienia się wraz z prędkością przemieszczenia głowicy ściskającej. Dla bardzo małych prędkości wielkości opisujące stan krytyczny i wytrzymałość zbliżają się do siebie.
- Stwierdzono ujemną liniową korelację naprężenia krytycznego R_c i naprężenia niszczącego R z turgorem tkanki bulwy ziemniaka. Odkształcenie krytyczne ε_c i odkształcenie niszczące ε_m nie mają monotonicznego przebiegu w badanym zakresie turgorów.

- Wykazano, że próbki tkanki rdzenia wewnętrznego bulwy ziemniaka o mniejszych komórkach posiadają wyższą wytrzymałość na ściskanie oraz wyższą całkowitą sumę zliczeń Nc_{zl} w całym przedziale badanych prędkości w porównaniu z rdzeniem zewnętrznym. Wykazano również brak jednoznacznego wpływu wielkości komórek na stan krytyczny bulwy ziemniaka.

9. PIŚMIENNICTWO

1. **Abbott J.A., Lu R.:** Anisotropic mechanical properties of apples. Transaction of ASAE, 39(4), 1451-1459, 1996.
2. **Adler G.:** Anforderungen der verarbeitungsindustrie an den rohstoff kartoffeln. Der Kartoffelbau, 28, 242, 1977.
3. **Bajema R.W., Hyde G.M., Baritelle A.L.:** Effects of mannitol on turgor and on failure stress and strain in potato tuber tissue. Posthrvest Biology and Technology, 14, 199-205, 1998a.
4. **Bajema R.W., Hyde G.M., Baritelle A.L.:** Temperature and strain rate effects on the dynamic failure properties of potato tissue. Transaction of ASAE, 41(3), 733-740, 1998b.
5. **Bajema R.W., Hyde G.M., Baritelle A.L.:** Turgor and temperature effects on dynamic failure properties of potato tuber tissue. Transaction of ASAE, 41(3), 741-746, 1998c.
6. **Bajema R.W., Hyde G.M., Peterson K.:** Instrumentation design for dynamic axial compression of cylindrical tissues samples. Transaction of ASAE, 41(3), 747-757, 1998d.
7. **Baritelle A.L., Hyde G.M., Thornton R.E., Bajema R.W.:** A classification system for impact related defects in potato tubers. http://www.wsu.edu:8080/~gmhyde/impact-properties98/pdf_mss_impact-properties/bruise-classification.pdf, 1999.
8. **Brook R.C.:** Potato Bruising; How and Why; Emphasizing blackspot bruise. Haslett, MI: Running Water Publishing, 1996.
9. **Brusevitz G.H., Bartsch J.A.:** Impact parameters related to post harvest bruising of apples. Transaction of ASAE, 32(3), 953-957, 1998.
10. **Buttle D.J., Scruby C.B.:** Characterization of fatigue of aluminium alloys by acoustic emission, part I – Identyfication od source mechanism. Journ. Of Acoustic Emission, vol. 9, 4, 243-254, 1990.
11. **Ceranoglu A., Pao Y.:** Propagation of elastic pulses and acoustic emission in a plate. Part 1: Theory, Part 2: Epicentral responses, Part 3: General responses. Journ. Of Applied Mechanics, vol. 48, 1, 125-147, 1981.
12. **Chappell T.W., Hamann D.D.:** Poisson's ratio and young modulus for apple flesh. Transaction of ASAE, 11(5), 608-610, 1968.
13. **Chen P., Sun Z.:** Critical strain failure criterion: Pros and Cons. Transaction of ASAE, 27(1), 278-281, 1984.
14. **Chen P., Yazdani R.:** Prediction of apple bruising due to impact on different surface. Transaction of ASAE, 34(3), 956-961, 1991.
15. **Dal Fabro 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.

16. **De Baerdemaeker J.G., Segerlind L.J., Murase H., Merva G.E.:** Water potential effect on tensile and compressive failure stresses of apple and potato tissue. ASAE Paper No. 78-3057, Logan, Utah, Juna, 1978.
17. **Dean B., 1996:** The chemical nature of blackspot bruising. Potato Bruising; How and Why; Emphasizing Blackspot Bruise. Ed. R.C. Brook, Haslett, MI: Running Water Publishing.
18. **Dean B.B., Jackowiak N., Nagel M., Pavek J., Corsini D.**: Blackspot pigment development of resistant and susceptible *Solanum tuberosum* 1. Genotypes at harvest and during storage measured by three methods of evaluation. Am. Porato J., 70, 201-217, 1993.
19. **Delwiche M., Sargi Y.:** A probe impact sensor for fruit firmness measurement. Transaction of ASAE, 34(1), 187-191, 1991.
20. **Edgell T., Cobb A.H.:** An ultrastructural study of potato bruising. Abstracts of Conference Papers, posters and Demonstrations, 13th Triennal Conference of the Eauropean Association for Potato Research,Veldhowen, The Nederlands, 14-19 July, 535-535, 1996.
21. **Falk S., Hertz H., Virgin H.I.:** On the relation between turgor pressure and tissue rigidity. I - Experiments on resonance frequency and tissue rigidity. Physiologia Plantarum, 11, 803-817, 1958.
22. **Finney E.E., Hall C.W., Mase G.E.:** Theory of linear viscoelasticity applied to the potato. Journal of Agric. Engin. Res., 9, 307-312, 1964.
23. **Finney E.E., Hall C.W.**: Elastic properties of potatoes. Transaction of ASAE, 10(1), 4-8, 1967.
24. **French W.M.**: Potato damage assessment. Ann. Appl. Biol., 96, 343-347, 1980.
25. **Gabriel W.**: Biologia Ziemniaka. Praca zbiorowa, PWN, Warszawa, 1985.
26. **Gao Q., Pitt R.E.**: Mechanics of parenchyma tissue based on cell orientation and microstructure. Transaction of ASAE, 34(1), 232-238, 1991.
27. **Gertel E.T., Green P.B.:** Cell growth pattern and wall microfibrillar arrangement. Plant Physiol., 60, 247-254, 1977.
28. **Gluska A., Zgórska K. [red]**: Charakterystyka zrejonizowanych odmian ziemniaka. Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – Oddział Jawdwisin, 2000.
29. **Gołacki K.:** Charakterystyki lepkosprężyste korzeni marchwi w szerokim zakresie prędkości obciążeń mechanicznych. Rozprawy Naukowe Akademii Rolniczej w Lublinie, 216, Lublin, 1998.
30. **Gołacki K.:** Influence of deformation speed and water potential on parameters of plant tissue critical resistance. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, z.399, 77-81, 1993.
31. **Gostoł J., Czerko Z., Żychoń S.:** Wpływ sposobu zbioru na uszkodzenia mechaniczne bulw kilku odmian ziemniaka. Biul. Inst. Ziemn. 33, 49-66, 1985.
32. **Gostol J.:** Metoda badań odporności bulw na uszkodzenia mechaniczne stosowana w doświadczeniach agrotechnicznych. Biul. Inst. Ziemn., 33, 7-18, 1985.

33. **Grant A., Hughes J.C.:** The relationship between physical properties of tubers measured during pendulum impact tests and tuber fracture damage. Potato Research, 28, 203-221, 1985.
34. **Grześkiewicz H., Gruczek T., Gójski B.:** Wpływ poziomu nawożenia mineralnego na uszkodzenia mechaniczne bulw powstające w czasie zbioru w warunkach produkcyjnych. Biul. Inst. Ziemn., 33, 67-72, 1985.
35. **Haman J., Konstankieiwcz K., Pukos A., Zdunek A.:** Linearity and nonlinearity of stress relaxation in rheology of biological media. Proceedings of the International Workshop „Stress Relaxation in Solid of Biological Origin", Prague, Chech Republic, September 18-19, pp. 19-29, 1996.
36. **Haman J., Konstankiewicz K., Zdunek A.:** Badanie procesów pękania tkanki rdzenia wewnętrznego i zewnętrznego bulwy ziemniaka. Acta Agrophysica, 24, 97-107, 1999.
37. **Haman J., Konstankiewicz K., Zdunek A.:** Influence of water potential on the failure of potato tissue. Int. Agrophysics, 14, 181-186, 2000.
38. **Haman J., Konstankiewicz K.:** Destruction Processes in the Cellular Medium of a Plant – Theoretical Approach. Int. Agrophysics, 14, 37-42, 2000.
39. **Haman J., Konstankiewicz K.:** Procesy zniszczenia w komórkowym ośrodku roślinnym. Acta Agrophysica, 24, 67-86, 1999.
40. **Harris D.O., Tetelman A.S., Darwish F.A.:** Detection of fibre cracking by acoustic emission. Acoustic Emission, ASTM STP 505, Amer. Soc. For Testing and Materials, Philadelphia, 238-249, 1972.
41. **Haza-Vandenpeereboom B., Baritelle A.L., Hyde G.M.:** Potato bruise formation during the initial time after impact and the resulting cell wall repair. Poster Presentation at the 14th Triennal Conference of the European Assiociation for Potato Research. May 2-7, 1999, Sorrento, Italy Assessorato Agricolura Regione Compania Publishers. 659-660, 1999.
42. **Hejnowicz Z.:** Anatomia i histogeneza roślin naczyniowych. PWN, wyd. drugie, Warszawa, 1985.
43. **Hudson D.E.:** The raletionship of cell size, intercellular space, and specific gravity to bruise depth in potatoes. American Potato Journal, 52,9-15, 1975.
44. **Konstankiewicz K., Guc A., Stoczkowska B.:** Determination of the structure parameters of potato tuber tissue using specialistic image analysis program. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, v.7/48. N.3, p.59-64, 1998.
45. **Konstankiewicz K., Pawlak K., Zdunek A.:** Quantitative method for determining cell structural parameters of plant tissues. Int. Agrophysics, 15, 161-164, 2001.
46. **Konstankiewicz K., Zdunek A.:** Metoda emisji akustycznej w badaniu procesów pękania tkanek roślinnych. Acta Agrophysica, 24, 87-95, 1999.

47. **Królikowski J., Witczak Z.:** Charakterystyka i klasyfikacja sygnałów EA. [w]: Malecki I., Ranachowski J. [red.]: Emisja akustyczna, źródła, metody, zastosowania. PASCAL Publications, Warszawa, 467-485, 1994.
48. **Krzysztofik B.:** Wpływ grubości perydermy oraz wielkości komórek parenchymy na wielkość mechanicznych uszkodzeń bulw ziemniaka. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 408, 339-348, 1993.
49. **Learke P.E., Christiansen J.:** Measurements of potato susceptibility. Abstracts of Conference Papers, Posters and Demonstrations, 13th Triennal Conference of the Eauropean Association for Potato Research,Veldhowen, The Nederlands, 14-19 July, 224-225, 1996.
50. **Lin T.T., Pitt R.E.:** Rheology of apple and potato tissue as affected by cell turgor pressure. J. of Texture Studies, 17, 291-313, 1986.
51. **Lockhart J.A.:** Physical nature of irreversible deformation of plant cells. Plant. Physiol, 42, 1545-1552, 1967.
52. **Malecki I., Opilski A.:** Charakterystyka i klasyfikacja sygnałów EA. [w]: Malecki I., Ranachowski J. [red.]: Emisja akustyczna, źródła, metody, zastosowania, PASCAL Publications, Warszawa, 19-34, 1994.
53. **Malecki I.:** Fizyczne podstawy akustyki technicznej. PWN, Warszawa, 1969.
54. **Malecki I.:** Rozwój historyczny badań misji akustycznej. [w]: Malecki I., Ranachowski J. [red.]: Emisja akustyczna, źródła, metody, zastosowania. PASCAL Publications, Warszawa, 9-18, 1994.
55. **Marks N., Baran P., Sobol Z.:** Wpływ rozkładu temperatur w okresie wegetacji na wielkość mechanicznych uszkodzeń bulw ziemniaka. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 408, 329-337, 1993.
56. **Marks N., Krzysztofik B., Piech T.:** Wpływ prędkości i energii uderzenia ma mechaniczne uszkodzenia bulw ziemniaka. Roczniki Nauk Rolniczych, 76-C-1, 63-73, 1985.
57. **Martins F.:** Instrumental tests for black spot evaluation, Measurements of Potato Susceptibility. Abstracts of Conference Papers, Posters and Demonstrations, 13th Triennal Conference of the Eauropean Association for Potato Research,Veldhowen, The Nederlands, 14-19 July, 328-329, 1996.
58. **Mathew R., Hyde G.M.:** Potato impact damage treshold. Transaction of ASAE, 40(3), 705-709, 1997.
59. **Matysek R., Marutama S., Boyer J.S.:** Rapid wall relaxation in elongating tissues. Plant. Physiol., 86, 1163-1167, 1988.
60. **McLoughilin N.B., Pitt R.E.:** Failure Characteristics of Apple Tissue Under Cyclic Loading. Transaction of ASAE, 27(1), 311-320, 1984.
61. **Miles J.A., Rehkugler G.E.:** A failure criterion for apple fresh. Transaction of ASAE, 16(6), 1148-1153, 1973.

62. **Mitrus J.:** Penetrometr do badań wrażliwości ziemniaków na uszkodzenia mechaniczne. Biul. Inf. IBMER, 4, 1971.
63. **Mohsenin N.N.:** Physical properties of plant and animal materials. 2nd Ed. New York, N.Y.: Gordon & Breach Science Publishers, 1986.
64. **Murase H., Merva G.E., Segerling L.J.:** Variation of Young's modulus of potato as a function of water potential. Transaction of ASAE, 23(3), 794-800, 1980.
65. **Nilsson S.B., Hertz C.H., Falk S.:** On the relation between turgor pressure and tissue rigidity. II Theoretical calculations on model systems. Physiologia Plantarum, 11, 818-837, 1958.
66. **Oktaba W., Niedokos E.:** Matematyka i podstawy statystyki matematycznej. PWN, Warszawa, 1976.
67. **Pawlak K., Król A.:** Zmiany struktury tkanki bulwy ziemniaka w wyniku deformacji. Acta Agrophysica, 24, 109-133, 1999.
68. **Peters R.:** Damage of potato tubers, a review. Potato Research, 39, 479-484, 1996.
69. **Petran M., Hadravsky M., Boyde A.:** The tandem scanning reflected light microscope. Int. Agrophysics, 9, 275-286, 1995.
70. **Pitt R.E., Chen H.L.:** Time-dependent aspects of the strength and rheology of vegetative tissue. Transaction of ASAE, 26(6), 1275-1280, 1983.
71. **Pitt R.E., Davis D.C.:** Finite element analysis of fluid – filled cell response to external loading. Transaction of ASAE, 1976-1983, 1984.
72. **Pitt R.E.:** Models for the rheology and statistical strength of uniformly stressed vegetative tissue. Transaction of ASAE, 25(6),1776-1784, 1982.
73. **Pratt M.A.:** Definition of damage terms. Ann. Appl. Biol., 96, 342-343, 1980.
74. **Preston R.D.:** Microscopic properties of plant cell walls. Handbuch der Planzenphysiologie 1, 722-730, 1955.
75. **Probine M.C., Preston R.D.:** Cell growth and the structure and mechanical properties of wall in internodal cells of nitella opaca. Journal of Experimental Botany, 13(37), 111-127, 1962.
76. **Przestalski S.:** Fizyka z elementami biofizyki i agrofizyki. Wyd. Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 1993.
77. **Raczkowski J., Moliński W., Ranachowski Z.:** Emisja akustyczna w drewnie i tworzywach drzewnych. [w]: Malecki I., Ranachowski J. [red.]: Emisja akustyczna, źródła, metody, zastosowania. PASCAL Publications, Warszawa, 242-268, 1994.
78. **Ranachowski J, Rejmund F.:** Emisja akustyczna w ceramice technicznej [w]: Malecki I., Ranachowski J. [red.]: Emisja akustyczna, źródła, metody, zastosowania. PASCAL Publications, Warszawa, 56-107, 1994.
79. **Ranachowski Z.:** Pomiary i analiza sygnału emisji akustycznej. Prace IPPT, Warszawa, 6, 1996.

80. **Reeve R.M.:** Preliminary histological observation on internal blackspot in potatoes. American Potato Journal, 45, 157-167, 1968.
81. **Robards A.W.:** Electron microscopy and plant ultrastructure. McGraw-Hill, London, 1970.
82. **Roztropowicz S., Czernik L.:** Uszeregowanie odmian ziemniaka po względem odporności bulw na uszkodzenia mechaniczne (określoną metodą sortownika laboratoryjnego) w nawiązaniu do liczby warstw komórek perydermy. Biul. Inst. Ziemn., 33, 35-39, 1985.
83. **Skrynicki J.:** Zjawisko emisji akustycznej w glebach rolniczych i gruntach. Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej 229, Mechanika 56, Lublin, 1992.
84. **Witos F.:** Fale sprężyste emisji akustycznej. [w]: Malecki I., Ranachowski J. [red.]: Emisja akustyczna, źródła, metody, zastosowania. PASCAL Publications, Warszawa, 36-54, 1994.
85. **Zdunek A., Konstankiewicz K.:** Acoustic emission as a method for the detection of fractures in the plant tissue caused by the external forces. Int. Agrophysics, 11, 223-227, 1997.
86. **Zgórska K., Frydecka-Mazurczyk A.:** Wpływ przechowalnictwa i dojrzałości bulw na powstawanie ciemnej plamistości pouderzeniowej. Biul. Instytut. Ziemn., 33, 109-121, 1985.
87. **Zgórska K.:** Biologiczne i ekologiczne czynniki warunkujące podatność bulw ziemniaka na powstawanie ciemnej plamistości pouszkodzeniowej. Pracownia Małej Poligrafii Instytutu Ziemniaka, Bonin, 1989.
88. **Zgórska K.:** Zellwandbestandteile von Kartoffelknollen in Abhangingkeit von der Reife. Verof, der Arbeitsgemeinschaft Kartoffelforsch. Band 9, 11-18, 1987.

10. STRESZCZENIE

Tkanki owoców i warzyw są szczególnie podatne na uszkodzenia mechaniczne, które mogą powodować nieodwracalne zmiany w strukturze, kolorze i ich smaku. Uwzględniając wyniki już opublikowanych prac autor niniejszej pracy stwierdził, że dotychczas stosowane metody badań nie pozwalają na obserwację i badanie procesów pękania tkanek roślinnych podczas deformacji. W tym celu autor niniejszej pracy zastosował metodę emisji akustycznej (metodę EA). Jednoczesny pomiar sygnału EA oraz zależności naprężenie-odkształcenie pozwala między innymi uzyskać naprężenie i odkształcenie krytyczne w chwili początku procesu pękania oraz naprężenie i odkształcenie niszczące wraz z całkowitą sumą zliczeń sygnału EA opisujące granicę wytrzymałości ściskanej próbki.

Eksperyment przeprowadzono dla rdzenia zewnętrznego i rdzenia wewnętrznego dwóch wybranych odmian bulwy ziemniaka: Danusia i Kuba. Strukturę tkanki opisano ilościowo jako rozkład wielkości komórek (powierzchni przekrojów komórek i obwodów przekrojów komórek) i ich wydłużenia. Testy ściskania z różną prędkością prowadzono do osiągnięcia granicy wytrzymałości cylindrycznych próbek. Próbki cechowały się również różnym poziomem turgoru.

Porównanie wyników eksperymentu z modelem teoretycznym pojedynczej komórki roślinnej pokazało, że jednym ze źródeł sygnału EA w ściskanej tkance roślinnej może być pękanie ścian komórkowych. Wykazano, że wzrost zarówno prędkości głowicy ściskającej jak i turgoru powoduje zmniejszenie wartości naprężenie i odkształcenia krytycznego. Naprężenie niszczące tkanki bulwy ziemniaka nie zależy od prędkości przesuwu głowicy ściskającej, natomiast rośnie liniowo gdy spada turgor próbki. Całkowita suma zliczeń sygnału EA rośnie logarytmicznie wraz z prędkością przesuwu głowicy ściskającej oraz liniowo z turgorem próbek. Stwierdzono, że wielkość komórek tkanki bulwy ziemniaka nie wpływa na stan krytyczny, jednakże zaobserwowano, że naprężenie niszczące i odkształcenie niszczące jest niższe dla tkanek o większych komórkach.

Słowa kluczowe: emisja akustyczna, pękanie, tkanka roślinna, mikrostruktura.

Acoustic emission in investigation of plant tissue cracking

11. SUMMARY

The soft plant tissues as fruits and vegetables are highly susceptible to mechanical damage. This damage causes irreversible changes in structure, color and taste of the tissue. Having analysed results published by many researchers, the author of this work have concluded that present methods of damage investigation in plant tissues do not allow investigation in real-time cracking of the plant tissue subjected to external loading.

In order to observing cracking processes from their beginning to the strength of compressed sample of the tissue author of this work applies acoustic emission method (AE method). Simultaneously measurement AE signal and stress-strain curve allows obtaining critical stress and critical strain at the beginning of the tissue cracking, whereas failure stress and failure strain accompanied by total count sum of AE describe strength of the compressed sample.

Experiment was done for samples of two varieties of potato tuber: Danusia and Kuba parenchyma tissue, both outer core and inner core. Tissue structure as a distribution of cell size (area and perimeter) and cell elongation was quantitatively described. Compression tests with different quasi-static crosshead speed were carried out to the strength of the cylindrical samples. The samples had different turgor level.

Comparison of experimental results with theoretical model of single plant cell shows that the source of the AE signal in compressed plant tissue can be cell wall cracking.

The experiment showed that increase in both the crosshead speed and the turgor causes decrease in the critical stress and the critical strain. The failure stress of potato tuber tissue does not depend on the crosshead speed but it linearly decreases when the turgor increases. Total count sum of acoustic emission signal logarithmically increases with the crosshead speed and linearly increases with the turgor. Cell size of potato tuber tissue does not influence on the critical state but the failure stress and the failure strain are lower for tissue with bigger cells.

Keywords: acoustic emission, cracking, plant tissue, micro-structure.

Adresy Autorów:

Artur Zdunek
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego
Polska Akademia Nauk
ul. Doświadczalna 4
P.O. BOX 201, 20-290 Lublin27
Tel. (0-81) 7445061, fax. (081) 7445067
e-mail: azdunek@demeter.ipan.lublin.pl

Krystyna Konstankiewicz
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego
Polska Akademia Nauk
ul. Doświadczalna 4
P.O. BOX 201, 20-290 Lublin27
Tel. (0-81) 7445061, fax. (081) 7445067
e-mail: konst@demeter.ipan.lublin.pl