Acta Agrophysica, 2003, 2(3), 549-557

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE TKANKI JABŁKA W ODNIESIENIU DO JEJ STRUKTURY

Ewa Jakubczyk, Piotr Paweł Lewicki

Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
ul. Nowoursynowska 159C, 02-787 Warszawa
e-mail: jakubczyk@alpha.sggw.waw.pl

Streszczenie. W pracy badano właściwości mechaniczne tkanki jabłka i zaproponowano model relaksacji naprężeń miąższu. Zbudowany pięcioelementowy model tkanki jabłka dobrze opisywał relaksację uwzględniając zachowanie elementów struktury tkanki. Założono, że tkanka roślinna to zespół zależnych od siebie komórek, w którym pojedyncze komórki roślinne otoczone są lepkosprężystą ścianą komórkową.

Słowa kluczowe: model reologiczny, struktura tkanki jabłka, właściwości mechaniczne

WSTĘP

Badania właściwości fizycznych materiału roślinnego wymagają podstawowej wiedzy o strukturze i aktywności fizjologicznej roślin. Nie są to jedyne czynniki oddziałujące na właściwości fizyczne, w tym szczególnie na właściwości mechaniczne materiału roślinnego [7,10]. W tkance roślinnej mogą wystąpić zarówno odkształcenia sprężyste, plastyczne jak i lepkie w zależności od dojrzałości, rodzaju tkanki oraz cech odmianowych. W świeżym materiale roślinnym przeważa sprężystość ścian komórkowych, o lepkości decydują płyny wypełniające komórki, zaś obecność przestrzeni międzykomórkowych może wpływać na odkształcenie plastyczne [9]. Strukturalne zniszczenie tkanki przejawia się pęknięciami ścian komórkowych i rozdzieleniem blaszki środkowej [1].

Zjawisko relaksacji materiałów roślinnych ma charakterystykę, która nie może być przedstawiona przez proste modele reologiczne ze względu na występowanie naturalnych elementów struktury. Przy badaniu krzywych relaksacji jabłek i gruszek Peleg i Calzada [8] wykazali, że wartość szczątkowej siły próbek odkształcanych

z prędkością 10 cm·min^{-1} była mniejsza niż przy prędkości 1 cm·min^{-1}. Zjawisko to tłumaczono nieodwracalnymi zmianami zachodzącymi w strukturze materiałów roślinnych.

Metody mikroskopowe i inne techniki obrazowe są uzupełnieniem oceny makroskopowych właściwości produktów żywnościowych. Zmiany właściwości na poziomie makroskopowym spowodowane przetwarzaniem, są wynikiem zmian na poziomie molekularnym oraz mikroskopowym [6]. Wykorzystanie metod mikroskopowych umożliwia dostarczenie pełnej informacji o strukturze materiału. Mikroskopia elektronowa, zwłaszcza skaningowa znalazła zastosowanie w analizie surowców i produktów roślinnych. Połączenie obserwacji mikroskopowych z analizą cech fizycznych ziarna zbóż, nasion strączkowych poszerzyło możliwości wyjaśnienia i interpretacji wyników badań wytrzymałościowych [5].

Celem pracy było określenie właściwości mechanicznych oraz struktury tkanki jabłka i zaproponowanie modelu reologicznego tkanki jabłka uwzględniającego te właściwości.

MATERIAŁ I METODY

Materiał do badań stanowiły jabłka odmiany Idared przechowywane w temperaturze 4°C przy wilgotności 80-90% przez 4 miesiące od zbioru. Z jabłek wycinano plastry o średnicy 15 mm i wysokości 5 mm.

Plastry jabłek umieszczono w metalowym cylindrze pomiarowym jeden na drugim w kształcie słupa o wysokości 40 mm. Cylinder pomiarowy miał średnicę wewnętrzną 15,2 mm i wysokość 40 mm. Tłok głowicy o średnicy 15 mm był połączony z maszyną wytrzymałościową firmy ZWICK GmbH model ZWICK 1445. Ściskanie prowadzono przy prędkości 10 mm·min^{-1} w zakresie 20% odkształcenia próbki. Testy ściskania i relaksacji przeprowadzono w 10 powtórzeniach. Dokładność pomiaru siły wynosiła ±0,1N.

Odkształcenie względne próbki ε_o obliczono ze wzoru:

$$\varepsilon_o = \frac{l_o - l}{l_o} \tag{1}$$

gdzie: l_o – wymiar próbki przed ściśnięciem [mm], l – wymiar próbki po ściśnięciu [mm].

Odkształcenie próbki ε obliczono ze wzoru:

$$\varepsilon = -\ln(1 - \varepsilon_o) \tag{2}$$

Naprężenie σ wyznaczono jako:

$$\sigma = \frac{F}{S} \tag{3}$$

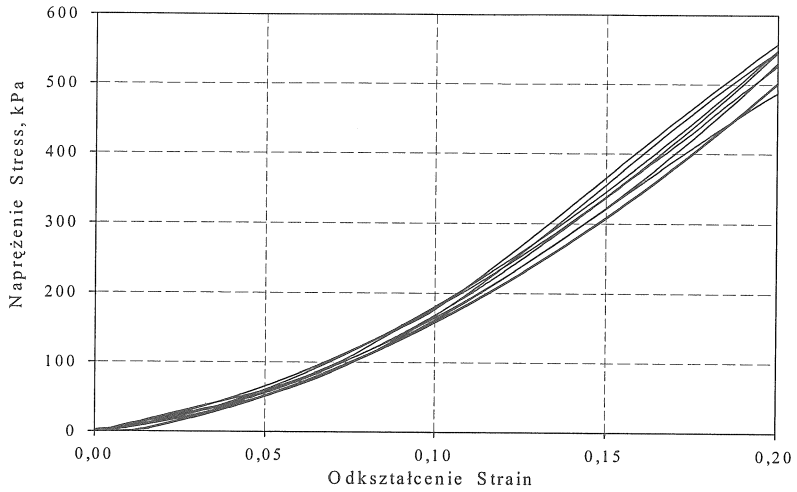
gdzie: F – siła [N], S – pole przekroju poprzecznego próbek przed odkształceniem [m^2].

Preparaty mikroskopowe tkanki jabłka przed ściskaniem i po ściskaniu przy 20% odkształceniu plasterków wykonano w Międzywydziałowej Pracowni Mikroskopii Elektronowej SGGW. Próbki poddano utrwaleniu i odwodnieniu w szeregu stężeń alkoholu etylowego, po czym suszono je w punkcie krytycznym. Wysuszone próbki po zamocowaniu na mosiężnych płytkach napylano warstwą węgla a następnie srebra. Obserwacje i zdjęcia wykonano przy pomocy mikroskopu elektronowego skaningowego JSM-35 firmy JEOL przy napięciu przyśpieszającym 25 kV i przy powiększeniu 120 i 200 razy.

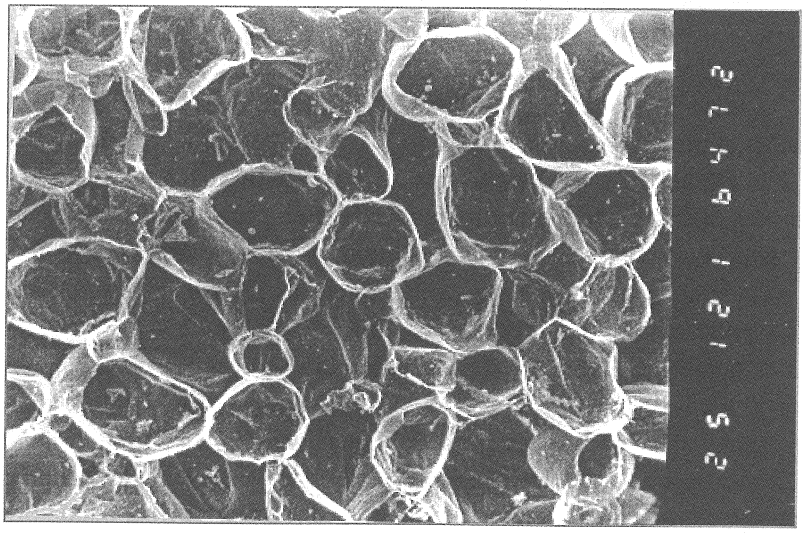
WYNIKI I DYSKUSJA

Test ściskania dostarcza szeregu informacji o zachowaniu się materiału pod wpływem działającej na niego siły. Uzyskane podczas testów krzywe ściskania plastrów tkanki jabłka przedstawiono na rysunku 1. Końcowe naprężenie 532 kPa testu ściskania jabłka surowego obciążone było błędem ± 1,8%. Krzywa ściskania jabłka surowego jest wklęsła, gdyż w początkowej fazie odkształcenia deformacja plastrów jabłka związana jest z odkształcaniem pustych przestrzeni, co ma wpływ na niższe wartości naprężeń, dalszy proces odkształcania tkanki powoduje uzyskanie wyższych naprężeń. Takie zachowanie wynika m.in. z budowy strukturalnej tkanki jabłka. W miąższu jabłka wolne przestrzenie mogą stanowić nawet do 25%. Na fotografii 1 w tkance jabłka surowego widać komórki z wyraźnie zarysowanymi przestrzeniami międzykomórkowymi. Na początku testu ściskania materiał łatwo się odkształca, co wynikać może z dużej ściśliwości gazów, które w części wypełniają przestrzenie międzykomórkowe. Dalsze odkształcanie tkanki wpływa na proces związany z przepływem kapilarnym cieczy wymuszonym nadwyżką naprężeń w komórkach, a w konsekwencji na wypełnieniu wolnych przestrzeni przez odkształcone komórki oraz ciecz wypływającą z uszkodzonych komórek tkanki. Dalszy proces odkształcania wymusza uzyskanie wysokich naprężeń związanych z małą ściśliwością płynów, wolne przestrzenie są już całkowicie wypełnione nieściśliwymi płynami. Efekt odkształcenia tkanki przedstawia fotografia 2. Warto podkreślić fakt, że obrazy mikroskopowe materiału odkształconego były otrzymane po procesie relaksacji, a więc przedstawiają materiał

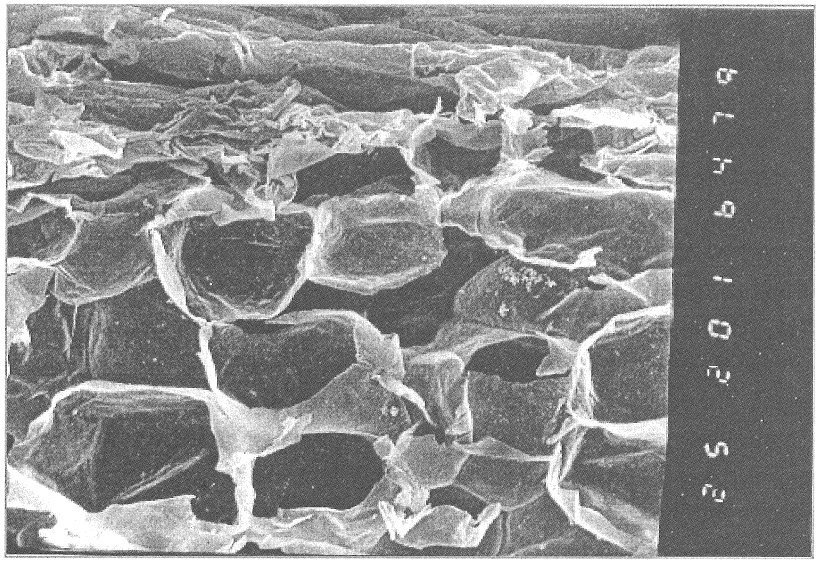
w stanie odkształcenia nieodwracalnego. W porównaniu do obrazów mikroskopowych uzyskanych dla tkanki jabłka przed (fot. 1), i po odkształceniu (fot. 2) obserwowano zniszczenie ścian komórkowych i wyraźne zagęszczenie komórek.



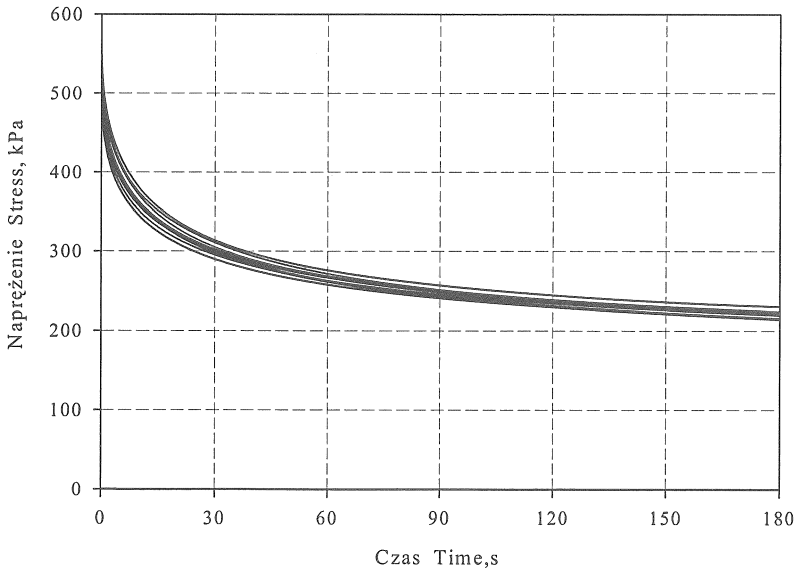
Rys. 1. Krzywe ściskania plastrów jabłka surowego
Fig. 1. Compression curves of apple slices



Fot. 1. Mikrofotografia tkanki jabłka surowego (x 120)
Fot. 1. Microphotograph of the raw apple tissue (x 120)



Fot. 2. Mikrofotografia odkształconej tkanki jabłka (x 200)
Fot. 2. Microphotograph of the compressed apple tissue (x 200)



Rys. 2. Krzywe relaksacji plastrów jabłka surowego
Fig. 2. Relaxation curves of apple slices

Pełna charakterystyka cech reologicznych jabłka jest możliwa w oparciu o opis testu relaksacji. Krzywe relaksacji uzyskane w 10 powtórzeniach nie różnią się statystycznie istotnie przy poziomie istotności $\alpha = 0{,}05$ (rys.2). Po 180 s testu relaksacji wartość naprężeń wynosiła 42% wartości maksymalnych naprężeń uzyskanych w teście ściskania i obarczona była błędem ±0,4%. Czas potrzebny do relaksacji połowy naprężeń pozostałych w odkształconym jabłku wynosił 61 s. Test ten przedstawia zachowanie się odkształconej tkanki, w której zaszły nieodwracalne zmiany wywołane kompresją materiału.

Modele reologiczne jabłka przedstawione w literaturze [2,3,4] zbudowane były głównie w oparciu o uogólniony model Maxwella. W powyższych pracach badawczych przedstawiono głównie opis matematyczny krzywych relaksacji stosując uogólniony model Maxwella, a w mniejszym stopniu koncentrowano się na charakterystyce relaksacji tkanki roślinnej w nawiązaniu do struktury materiału.

Wiedzę o budowie komórkowej i tkankowej jabłka i zachowaniu poszczególnych składników struktury wykorzystano do opracowania modelu reologicznego charakteryzującego właściwości mechaniczne badanego materiału. Przeprowadzając analizę właściwości mechanicznych jabłka brano pod uwagę zachowanie się całej tkanki, gdyż komórki połączone są ze sobą za pomocą pasemek cytoplazmy (otoczonych plazmalemmą), które nie pozwalają na całkowitą izolację komórek poprzez ściany komórkowe. Zatem tkankę roślinną traktować należy jako zespół zależnych od siebie komórek, w którym pojedyncze komórki roślinne otoczone są lepkosprężystą ścianą komórkową.

Przy ściskaniu tkanki jabłka surowego, istotny wpływ na zachowanie struktur tkankowych ma turgor, który przeciwdziała zapadaniu komórek. Pokonanie ciśnienia wewnątrzkomórkowego umożliwia odkształcenie komórek, które wówczas mogą zmieniać swój kształt i wywierać nacisk na sąsiadujące komórki, jaki i ściany komórkowe. Przy małych odkształceniach tkanki możliwe jest przesuwanie się jednych komórek względem drugich, zmniejsza się odległość między komórkami, co ma wpływ na zachowanie całej tkanki i jej deformację. Blaszka środkowa oddzielająca od siebie ściany komórkowe może stanowić wówczas swego rodzaju „amortyzator" łagodzący naprężenia przekazywane od jednej komórki do sąsiednich.

Do matematycznego opisu krzywej relaksacji wykorzystano równanie zaproponowane przez Sitkei [10] dla 3-elementowego modelu reologicznego (składającego się z elementu Maxwella połączonego równolegle ze sprężyną). W 5-elementowym modelu jabłka przy stałym odkształceniu próbek ε_o zmniejszanie naprężenia σ_τ w czasie relaksacji τ opisano równaniem wykładniczym:

$$\sigma_\tau = \varepsilon_o \left[E_E + E_1 \cdot \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} \cdot \tau \right) + E_2 \cdot \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} \cdot \tau \right) \right] \tag{4}$$

gdzie: E_E, E_1, E_2 – moduły sprężystości, η_1, η_2 – moduły lepkości, zaś wyrażenie w nawiasach przedstawia ilorazy modułów lepkości i sprężystości, które wyznaczają czasy relaksacji T_1 i T_2 modułów połączonych.

$$T_1 = \frac{\eta_1}{E_1} \tag{5}$$

$$T_2 = \frac{\eta_2}{E_2} \tag{6}$$

W skład tego 5-elementowego modelu wchodzą 2 elementy Maxwella (sprężyna-tłok), które połączone są równolegle ze sprężyną. W zaproponowanym modelu sprężyna (moduł sprężystości E_E) charakteryzuje turgor jabłka i zachowanie komórek względem siebie pod wpływem działającej siły. W komórkach tkanki połączone szeregowo moduły sprężystości E_1, E_2 i lepkości η_1, η_2 przedstawiają lepkosprężyste zachowanie blaszki środkowej i tonoplastu

Zaproponowane równanie dobrze opisuje krzywe relaksacji. Dla relaksacji jabłka surowego uzyskano wysokie wartości współczynników determinacji $R^2 = 0{,}990\text{-}0{,}998$. Współczynniki równania opisującego relaksację naprężeń jabłka surowego przedstawiono w tabeli 1. Wartość modułu sprężystości E_E jest o 30-40% większa od każdego z modułów E_1 i E_2. Czas relaksacji T_2 połączonych szeregowo modułów lepkości i sprężystości był 15-krotnie dłuższy od wartości czasu relaksacji T_1. Wartości modułów lepkości (szczególnie modułu lepkości η_2) wskazują na znaczny wpływ udziału cech lepkich na właściwości reologiczne jabłka surowego.

Tabela 1. Współczynniki równania relaksacji naprężeń plastrów jabłka
Tabele 1. The parameters of a stress relaxation equation for apple tissue

E_E (kPa)	E_1 (kPa)	E_2 (kPa)	η_1 (kPa s)	η_2 (kPa s)	T_1 s	T_2 s
1111,9	755,6	795,4	2347,9	37880,1	3,1	47,6
±88,2	±60,2	±60,9	±105,9	±1740,5	±0,1	±2,2

WNIOSKI

1. Tkankę roślinną potraktowano jako zespół zależnych od siebie komórek, w którym pojedyncze komórki roślinne otoczone są lepkosprężystą ścianą komórkową.

2. Przy ściskaniu tkanki jabłka surowego dochodzi do przesuwania się jednych komórek względem drugich. Blaszka środkowa oddzielająca od siebie ściany komórkowe może stanowić wówczas swego rodzaju „amortyzator" łagodzący naprężenia przekazywane od jednej komórki do sąsiednich.

3. Zawartość komórek (cytoplazma i zawartość wodniczek) uznać można za nieściśliwą, a zatem ściany komórkowe przy odkształceniach pokonujących ciśnienie turgorowe ulegają rozciągnięciu i komórki wypełniają przestrzenie międzykomórkowe wypełnione powietrzem.

PIŚMIENNICTWO

1. **Bourne M.C.:** Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement. Academic Press Inc., London, 1982.
2. **Chen P., Chen S.:** Stress-relaxation functions of apples under high loading rates. Transactions of the ASAE, 29(6), 1754-1759, 1986.
3. **Clevenger J. T., Hamann D. D.:** The behavior of apple skin under tensile loading. Transactions of the ASAE, 11(1), 34-37, 1968.
4. **De Baerdemaeker J.G., Segerlind L.J.:** Determination of the viscoelastic properties of apple flesh. Transactions of the ASAE, 19(2), 346-348, 353, 1976.
5. **Fornal J.:** Mikrostruktura surowców i produktów roślinnych: Metody analizy struktury żywności. Materiały seminarium dla słuchaczy studium doktoranckiego SGGW w Warszawie, 12-15 styczeń, Olsztyn, 1998.
6. **Kaláb M., Allan-Wojtas P., Miller S. S.:** Microscopy and other imaging techniques in food structure analysis. Trends Food Sci. Technol., 6 (6), 177-186, 1995.
7. **Mohsenin N. N.:** Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Science Publishers, 2nd ed., New York, 1986.
8. **Peleg M. D., Calzada J.F.:** Stress relaxation of deformed fruits and vegetables. J. Food Sci., 41(6), 1325-1329, 1976.
9. **Pitt R.E.:** Viscoelastic properties of fruits and vegetables. In: Viscoelastic Properties of Foods (Eds. M.A. Rao, J.F. Steffe), Elsevier, New York, 49-76, 1992.
10. **Sitkei G.:** Mechanics of Agricultural Materials. Akadémiani Kiadó, Budapeszt, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1986.

MECHANICAL PROPERTIES OF AN APPLE IN RELATION TO TISSUE STRUCTURE

Ewa Jakubczyk, Piotr Paweł Lewicki

Department of Food Engineering and Process Management, Warsaw Agricultural University (SGGW)
ul. Nowoursynowska 159C, 02-787 Warszawa
e-mail: jakubczyk@alpha.sggw.waw.pl

Abstract. Mechanical properties of an apple tissue were examined and stress relaxation model was proposed. Rheological model of an apple tissue consists of 5 elements. This model described relaxation of the compressed material well taking into account tissue structure and its alteration by the force. A proposal to treat plant tissue as an aggregate of cells dependent on one another in which single cells are surrounded by a visco-elastic cell wall was put forward.

Keywords: rheological model, structure of apple tissue, mechanical properties