

WPLYW RELAKSACJI NAPRĘŻEŃ NA ZMIANY NACISKÓW POWIERZCHNIOWYCH JABŁEK

Piotr Komarnicki, Roman Stopa, Małgorzata Młotek
Instituut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. W pracy przedstawiono zmiany rozkładów nacisków powierzchniowych w funkcji czasu dla jabłek poddawanych testom relaksacji naprężeń. W pierwszej kolejności przeprowadzono testy ściskania całych owoców w celu wyznaczenia maksymalnych przemieszczeń, prowadząc je aż do zniszczenia materiału. Na podstawie otrzymanych krzywych $F = f(\Delta L)$ ustalono wartości przemieszczeń, powyżej których zachodzą procesy intensywne niszczenia struktury tkanki miększowej jabłek. Przeprowadzono testy relaksacji naprężeń przy przemieszczeniu odpowiadającym lokalnemu zniszczeniu owocu – na poziomie 20% wartości ΔL_{\max} , rejestrując jednocześnie rozkłady nacisków powierzchniowych. W czasie relaksacji zaobserwowano wyraźne zmiany nacisków powierzchniowych. Proces relaksacji naprężeń charakteryzował się stopniową redukcją maksymalnych nacisków powierzchniowych do poziomu 0,31 MPa oraz wyraźnym ujednorodnieniem ich rozkładu poprzecznego. Wyrównanie rozkładu poprzecznego nacisków powierzchniowych uwidacznia się już po około 300 s od chwili przyłożenia obciążenia – 150 s od rozpoczęcia procesu relaksacji.

Słowa kluczowe: relaksacja naprężeń, naciski powierzchniowe, przemieszczenie, jabłko

Wstęp

Jabłka są jednym z ważniejszych produktów ogrodnictwa oraz istotnym surowcem dla przemysłu spożywczego. W handlu coraz bardziej pożądane są owoce cechujące się wysoką jakością. Dbalność o produkt to większe spożycie, wysoki eksport, które powodują w efekcie wyższą opłacalność produkcji (Nadulski, 2009; Płocharski i in., 2000; Płocharski i Konopacka, 1999). Jabłka są szczególnie podatne na różnego rodzaju oddziaływania, np. mechaniczne, termiczne, wywołujące zmiany struktury, a w ich następstwie – cały szereg procesów prowadzących do obniżania jakości i psucia się. Procesy fizyczne, jak np. pęknięcie w oddziaływaniach mechanicznych, są inicjowane na poziomie komórki. Wysokowodnione materiały biologiczne są typowymi obiektami reologicznymi, które pod działaniem zewnętrznych sił płyną w czasie, zachowując się jednocześnie jak ciała stałe i płynne (Kolowca, 2005). Jabłka zaliczane są do materiałów lepko-sprężystych, charakteryzujących się niską odpornością reologiczną. Materiał ten jest wrażliwy i ulega często

uszkodzeniom mechanicznym, co wynika z obniżonej wytrzymałości tkanki mięszu. Przy ściskaniu tkanki jabłka dochodzi do przesuwania komórek spowodowanego obecnością przestrzeni międzykomórkowych wypełnionych powietrzem (Jakubczyk i Lewicki, 2003; Jakubczyk i Uziak, 2005; Peleg, 1980). Do badań podatności materiałów roślinnych na uszkodzenia najbardziej odpowiednie są wskaźniki zależne nie tylko od zmian fizjologicznych w uszkodzonych tkankach, ale przede wszystkim określane na podstawie wytrzymałości materiału (Stropek i in., 2009). Trudności w badaniach reologicznych polegają na dobraniu właściwej metody pomiaru w celu uzyskania pełnej informacji o cechach mechanicznych, charakterystycznych dla badanego materiału.

Badania reologiczne materiałów biologicznych przeprowadza się najczęściej w oparciu o dwa podstawowe testy: pelzania oraz relaksacji (Chen i Chen, 1986). W procesie relaksacji obserwuje się zmiany naprężeń w warunkach stałego odkształcenia jako funkcji czasu. W przypadku składowania wysokouwodnionego materiału w warstwach jest to proces niepożądany i dlatego ma bardzo ważne znaczenie praktyczne. Powszechnie stosowaną metodą w ocenie właściwości lepkosprężystych owoców jest test ściskania. Wyniki przebiegu testu aproksymuje się równaniami wykładniczymi, wywodzącymi się od modelu Maxwella. Budowane w ten sposób modele matematyczne pozwalają co prawda na interpretację zmiennych fizycznych stanu obiektu badań, ale są próbą idealizacji rzeczywistego obiektu i wymagają wprowadzenia szeregu uproszczeń, nie wnikając w strukturę rzeczywistą materiału (Bohdziewicz, 2005; Gołacki i in., 1999; Stropek i Gołacki, 2006).

Owoce takie jak jabłka poddawane są zmiennym obciążeniom o charakterze statycznym oraz dynamicznym. Duża ich część powstaje w wyniku długotrwałego oddziaływania statycznych obciążeń ściskających, których następstwem są deformacje o charakterze plastycznym – nieodwracalne zmiany w budowie wewnętrznej tkanek (Kamiński i in., 2011). Z praktycznego punktu widzenia istotne jest poznanie wpływu wielkości obciążeń granicznych i ilości cykli obciążania na wartość nacisków powierzchniowych. Mając na uwadze kulisty kształt owoców i warzyw, decydujący wpływ na rodzaj i wielkość uszkodzeń mają naciski kontaktowe, charakteryzujące się oddziaływaniem siły skupionej na niewielką powierzchnię styku. W sytuacji składowania materiałów biologicznych występujące małe powierzchnie styku pomiędzy owocami mogą powodować miejscową koncentrację naprężeń, co może naruszyć dopuszczalną wytrzymałość tkanek, prowadząc lokalnie do zniszczenia struktury komórkowej (Herold i in., 2001; Stopa i in., 2012). Eksperymentalnie naciski powierzchniowe są trudne do zmierzenia. Wiedza na temat rozkładu nacisków występujących na powierzchniach styku materiału biologicznego pozwoliłaby na rozwiązywanie problemów związanych np. z oceną stopnia odporności surowca na obicia, zgniecenia związane z wielokrotnym obciążaniem oraz z określeniem jakości przechowalniczej. Dotychczas niespotykane są badania reologiczne materiałów roślinnych, podczas których uzyskiwano by informacje w czasie rzeczywistym o naciskach na powierzchniach styku.

Cel badań

Celem podjętych badań było przedstawienie zmian rozkładów nacisków powierzchniowych dla jablek poddawanych testom relaksacji naprężeń.

Material i metoda badań

Badania przeprowadzono w laboratorium agrofizyki Instytutu Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Materiałem wytypowanym do badań były jabłka odmiany *Ligol* przechowywane w temperaturze 3°C i wysokiej względnej wilgotności powietrza 90-95% przez dwa miesiące od terminu zbioru. Dla uzyskania powtarzalności wyników pomiarów z losowo wybranej partii wyselekcjonowano materiał pod względem geometrycznym, masowym oraz pod kątem dojrzałości, co opisano wskaźnikiem jędrności. Do badań pobrano 25 sztuk jabłek, które posiadały zbliżone kształty (promienie krzywizny) odpowiadające zakresom: wymiarowym (maksymalne średnice zewnętrzne od 80-90 mm), wagowym (masy 200-220 g) oraz odpowiadały przedziałom wskaźników jędrności 50-60 N.

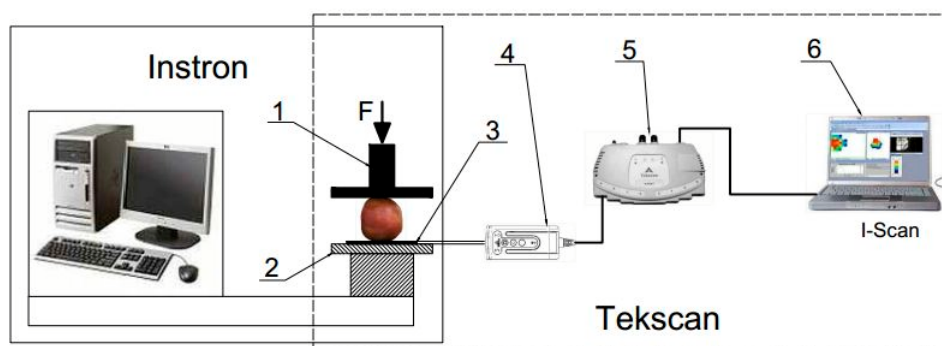
W pierwszej kolejności przeprowadzono testy ściskania całych jabłek w celu wyznaczenia maksymalnych przemieszczeń, prowadząc je aż do zniszczenia materiału. Analizowano początkową fazę procesu ściskania pod kątem występowania pierwszych lokalnych spadków obciążenia. Dzięki nim wyznaczono wartości przemieszczeń, powyżej których rozpoznano inicjację procesów niszczenia struktury tkanki mięksiszowej jabłek. Początek deformacji tkanki mięksiszowej zaobserwowano dla 20% wartości przemieszczenia maksymalnego, dla którego ΔL_0 wyniosło średnio 4,4 mm.

Następnie całe jabłka poddano relaksacji naprężeń przy przemieszczeniu na poziomie 20% wartości ΔL_{max} , uprzednio wyznaczonej podczas testu ściskania. Obiekt poddawano deformacji, a następnie utrzymując stałe odkształcenie, rejestrowano zmiany wartości sił reakcji w czasie 1200 sekund. Wykonane zostało 25 pomiarów relaksacji naprężeń dla 5 serii w 5 powtórzeniach. W pracy zaprezentowane zostały uśrednione krzywe.

Testy relaksacji naprężeń przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej typu INSTRON 5566 z głowicą tensometryczną klasy 0,5 o zakresie pomiarowym do 1 kN, przy prędkości przemieszczenia 1,8 mm·min⁻¹. Jak wynika z quasi-statycznych warunków obciążenia, prędkość elementu odkształcającego powinna być na tyle niska, aby nie było istotnej różnicy pomiędzy wartościami sił kontaktu na początku i na końcu obiektu w tym samym czasie podczas trwania obciążenia. Dlatego też przyjęta prędkość przemieszczania głowicy wynosząca 1,8 mm·min⁻¹ jest wartością najwyższą spośród prędkości przyjmowanych przy badaniach wykonywanych w warunkach quasi-statycznych. Przesunięcie głowicy rejestrowano z dokładnością do 0,01 mm. Zmiany naprężeń w materiale rejestrowano co 0,1 sekundy trwania procesu. Maszyna wytrzymałościowa była podłączona do komputera PC wyposażonego w oprogramowanie Bluehill 2, które umożliwiała sterowanie przebiegiem testów oraz zapis wyników. Równoległe podczas testu relaksacji rejestrowano rozkłady nacisków powierzchniowych jabłek, wykorzystując do tego przenośny system firmy Tekscan. System pomiarowy składał się z kontaktowego czujnika nacisku o grubości 0,2 mm o zakresie pomiarowym do 3,44 MPa, który mocowano do specjalnego uchwytu. Transmisja danych do komputera PC odbywała się za pomocą wielokanałowego portu, który podłączano bezpośrednio do uchwytu czujnika (rys. 1).

Badane jabłka usytuowano w pozycji bocznej pomiędzy dwoma równoległymi płytami maszyny wytrzymałościowej: ruchomą – obciążającą oraz nieruchomą – podstawą. Jabłko pod wpływem obciążenia wywierało nacisk na umieszczony pod nim czujnik, który utwierdzono na nieruchomej podstawie. Serce systemu stanowiło dedykowane oprogramowanie I-Scan, dzięki któremu możliwe było przetwarzanie i analizowanie badanych sił,

obrazów pól powierzchni oraz wynikowych nacisków powierzchniowych w funkcji czasu. Oprogramowanie pozwalało na obserwację w czasie rzeczywistym obrazów zachodzących zmian nacisków podczas przeprowadzanych testów relaksacji naprężeń jabłek. Rejestracja obrazów nacisków powierzchniowych odbywała się przy częstotliwości próbkowania do 1 kHz od momentu styku płyty obciążającej badany materiał do końca trwania procesu. Błąd pomiaru powierzchni czujnika wynosił do 4%. Zestawienie odczytów równoległe z maszyny wytrzymałościowej oraz z systemu Tekscan umożliwiło porównanie wartości sił nacisku, które nie różniły się więcej niż 2%. System Tekscan obliczał naciski powierzchniowe p wynikające z ilorazu siły obciążającej F odniesionej do pola powierzchni styku obiektu z czujnikiem A . Otrzymane wyniki sił, pól powierzchni oraz wynikowych nacisków poddano analizie statystycznej w arkuszu kalkulacyjnym.

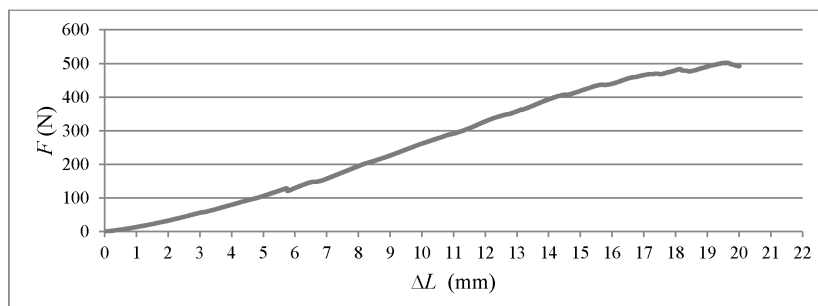


Rysunek 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – ruchoma płyta obciążająca maszyny wytrzymałościowej, 2 – nieruchoma podstawa, 3 – dotykowy czujnik nacisku, 4 – uchwyt czujnika, 5 – wielokanałowy port, 6 – komputer PC wraz z oprogramowaniem I-Scan
 Figure 1. Diagram of the test rigs: 1 – floating loading plate of the testing machine, 2 – immobile base, 3 – touch sensitive pressure sensor, 4 – sensor handle, 5 – multi-channel port, 6 – PC with I-Scan software

W pracy przedstawiono współczynnik relaksacji naprężeń jako zmiany nacisków względnych p_w , w którym wartość nacisków po czasie relaksacji p_t odnoszono do nacisków dla danego przemieszczenia początkowego p_0 . Zmiany nacisków powierzchniowych pozwoliły określić prędkość relaksacji, którą wyznaczono w oparciu o gradient nacisków – różnicę pomiędzy ich wartościami dla ustalonego przemieszczenia początkowego ΔL_0 a wartościami dla końca trwania procesu.

Wyniki badań i ich analiza

Testy ściskania stanowiły pierwszy etap badań i dostarczyły informacji o zachowaniu owoców pod wpływem przyłożonego obciążenia. Na rysunku 2a zaprezentowano wybraną krzywą ściskania dla całych jabłek, które prowadzono aż do ich zniszczenia.

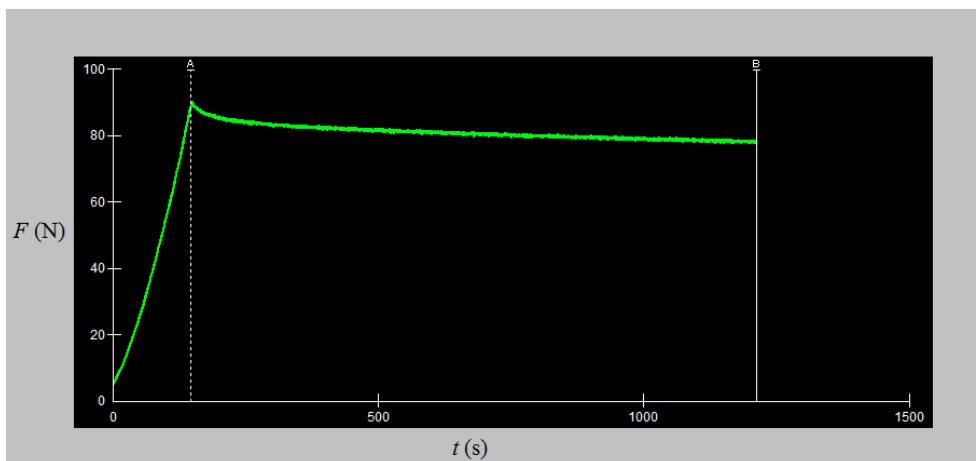


Rysunek 2. Przykładowy przebieg ilustrujący ściskanie aż do całkowitego zniszczenia owocu
 Figure 2. Exemplary course illustrating compression as to the total fruit damage

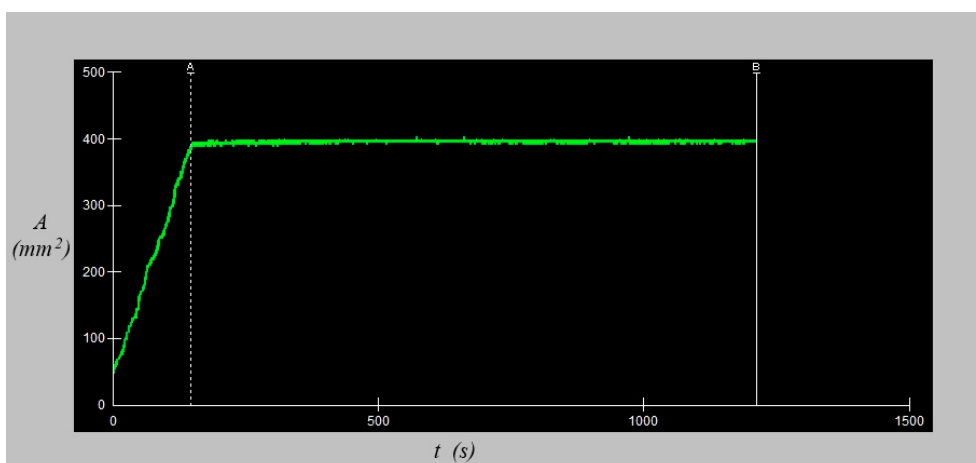
Otrzymane podczas testów ściskania krzywe pozwoliły wyznaczyć zakres maksymalnej wytrzymałości owoców – sił oraz nieodwracalnych przemieszczeń, które dla badanych jabłek wynosiły odpowiednio $F_{max}= 500$ N przy $\Delta L_{max}= 19,5$ mm. Z punktu widzenia prowadzonych badań ważna była początkowa faza przebiegu procesu, w której występująca deformacja owoców związana była z odkształceniami pustych przestrzeni komórkowych tkanek jabłka. W wysokouwodnionym materiale biologicznym wraz ze wzrostem przemieszczenia głowicy postępują destrukcyjne zmiany wewnątrz struktury komórkowej. Materiał ulegał stopniowej deformacji, co spowodowane było ściśliwością gazów oraz przesunięciami komórek między sobą. W wyniku wzrostu ciśnienia dochodziło do uszkodzenia komórek, z których wypływający płyn wypełniał wolne przestrzenie, co potęgowało dalszy wzrost naprężeń. Początkowy przebieg testu ściskania ilustruje lokalny spadek siły (lokalne zniszczenia), po którym materiał ulegał dalszemu umocnieniu. Pierwsze chwilowe spadki sił obserwowano dla 20% przemieszczenia maksymalnego, co odpowiadało – przy obciążeniu w przedziale 80-100 N – przemieszczeniu początkowemu, wynoszącemu w przybliżeniu 4,4 mm.

Testy relaksacji naprężeń przeprowadzone dla zadanej wartości przemieszczenia początkowego ΔL_0 pozwoliły określić reakcję materiału – redukcję sił w czasie co zaprezentowano na rysunku 3. Przedstawiona krzywa zmian siły F w funkcji czasu obrazuje stopniowy i równomierny wzrost obciążenia do chwili 150 s, osiągając maksymalną wartość 90,5 N. Przebieg testu prowadzony do końca procesu relaksacji naprężeń (do 1200 s) wskazuje na zmniejszanie się wartości obciążenia, które w rezultacie uległo redukcji do 78,3 N, czyli stanowiło 86,5% wartości początkowej.

Przeprowadzone badania pozwoliły zarejestrować zmiany pól powierzchni styku badanych jabłek w czasie całego procesu (rys. 4). Przedstawiony rozkład pola powierzchni w czasie relaksacji od 150 do 1200 s wykazał ustabilizowany charakter przebiegu, który utrzymywał się niemalże niezmiennie na poziomie 396 mm². Można przyjąć, że podczas prowadzonego testu relaksacji naprężeń pole powierzchni styku nie wpływało znacząco na wartość nacisków powierzchniowych.

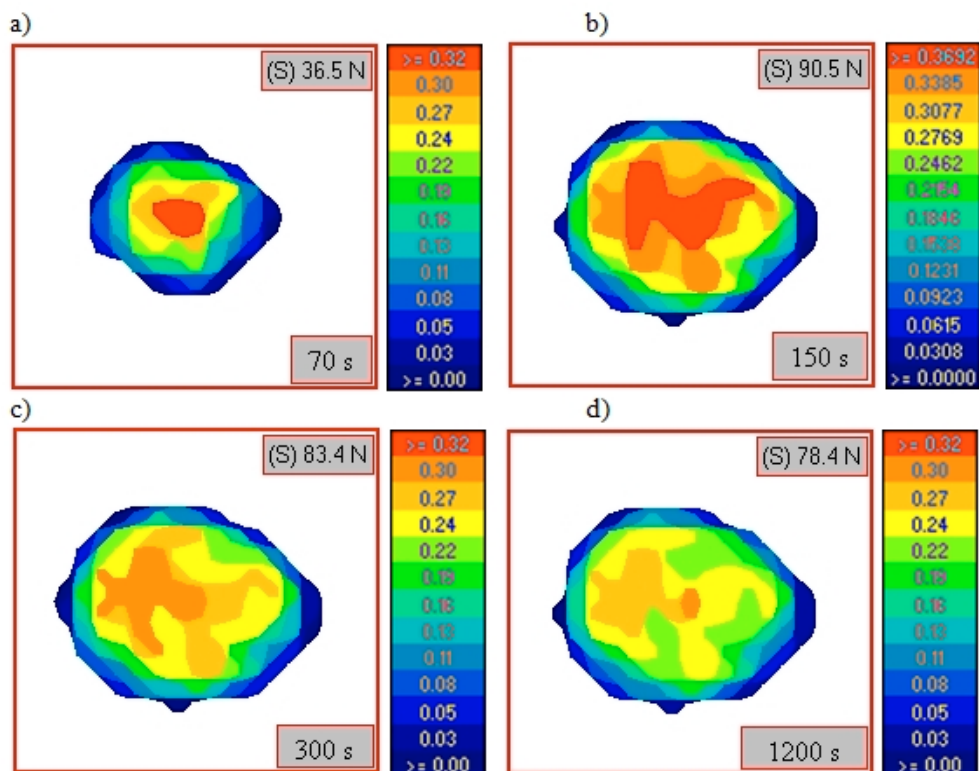


Rysunek 3. Przebieg zmian siły F w funkcji czasu relaksacji
 Figure 3. Course of the force change F as a function of relaxation time



Rysunek 4. Przebieg zmian pola powierzchni styku A w funkcji czasu relaksacji
 Figure 4. Course of changes of contact area field A as a function of relaxation time

Na rysunku 5 przedstawiono obrazy warstwiczne zmian nacisków powierzchniowych w wybranych odstępach czasu. Przedstawione obrazy wskazują, że w początkowym etapie zwiększania przemieszczenia głowicy maszyny wytrzymałościowej do stałej wartości ΔL_0 (rys. 5a) naciski powierzchniowe wzrastają, przy czym główna ich koncentracja występuje w centrum powierzchni styku.

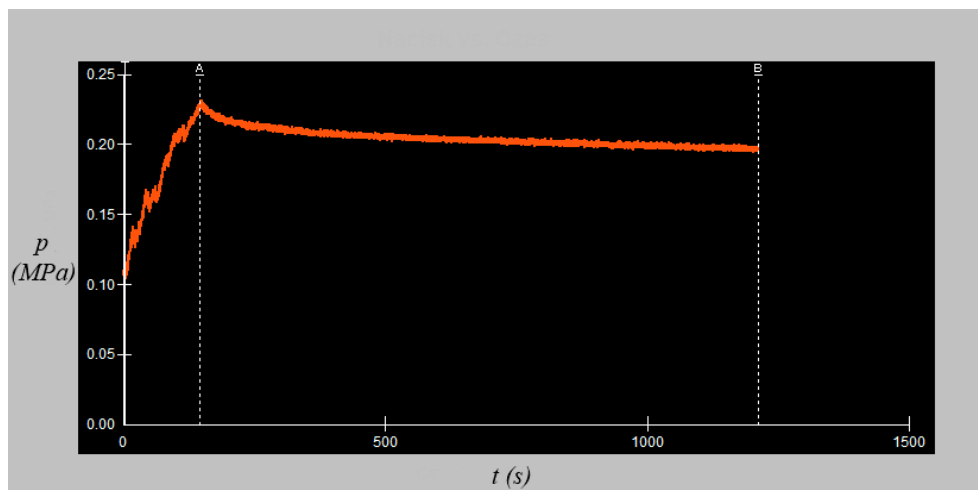


Rysunek 5. Obrazy warstwiczne zmian nacisków powierzchniowych p (MPa) w wybranych odstępach czasu: a – po 70 s od chwili przyłożenia obciążenia, b – dla 150 s – dla wartości przemieszczenia początkowego ΔL_0 (początek relaksacji), c – dla 300 s (w trakcie procesu relaksacji), d – dla 1200 s wyznaczającego koniec procesu relaksacji

Figure 5. Contour lines images of surface pressure changes p (MPa) in the selected time intervals: a – after 70 s from the moment of placing load, b – for 150 s – for the value of initial displacement ΔL_0 (beginning of relaxation), c – for 300 s (during the relaxation process), d – for 1200 s determining the end of the relaxation process

Obserwacja obrazów pozwoliła stwierdzić, że przy dalszym wzroście odkształcania do wartości zadanej ΔL_0 zwiększa się istotnie obszar występowania maksymalnych wartości nacisków powierzchniowych (rys. 5b). Należy sądzić, że wiąże się to z niewielką ściśliwością cieczy wypełniającej wolne przestrzenie między komórkami, która wywołuje wzrost nacisków na większej powierzchni oddziaływania. Niewątpliwie wpływ ma również charakterystyczna budowa komórkowa tkanek, lepko-sprężyste właściwości i kulisty kształt jądełek. Przebieg procesu relaksacji jądełek przedstawiony na rysunku 5c jednoznacznie wskazuje na redukcję warstw nacisków powierzchniowych oraz ich rozproszenie w czasie, co zilustrowano na rysunku 5d.

Rozkład średnich nacisków powierzchniowych w funkcji czasu przedstawia krzywa relaksacji na rysunku 6.



Rysunek 6. Krzywa relaksacji dla średnich nacisków powierzchniowych w funkcji czasu
Figure 6. Relaxation curve for the average surface pressure as a function of time

W przedziale czasu relaksacji zaobserwowano wyraźne zmiany nacisków powierzchniowych. Przeprowadzone testy pozwoliły wyznaczyć statystycznie średnią maksymalną wartość nacisków powierzchniowych, która dla badanych jablek kształtowała się na poziomie 0,23 MPa na początku procesu (linia A na wykresie). Wyniki przeprowadzonej analizy statystycznej badanych parametrów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Wyniki analizy statystycznej dla badanych parametrów

Table 1

Results of statistical analysis for the researched parameters

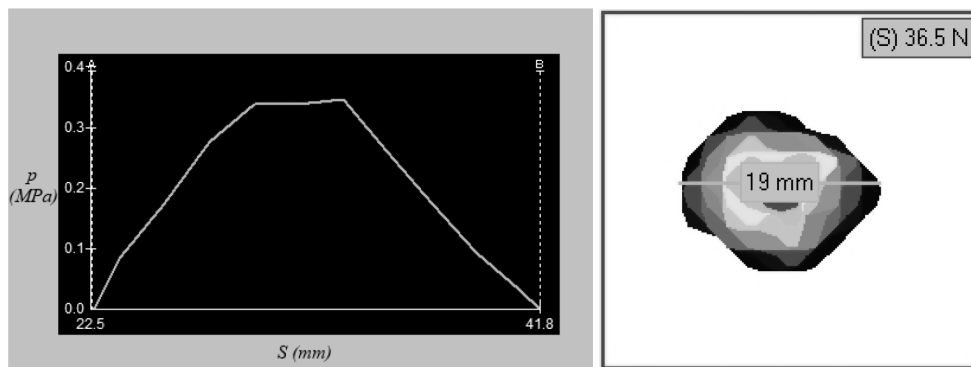
Parametry	Średnia	Odchylenie standardowe	Błąd standardowy	Minimum dla poziomu ufności 95%	Maksimum dla poziomu ufności 95%
Siła F (N)	83,253	3,367	0,147	77,641	90,029
Pole kontaktu A (mm ²)	396,154	1,986	0,019	388,000	403,000
Nacisk p (MPa)	0,2141	0,0097	0,0005	0,1959	0,2321

Wpływ relaksacji naprężeń...

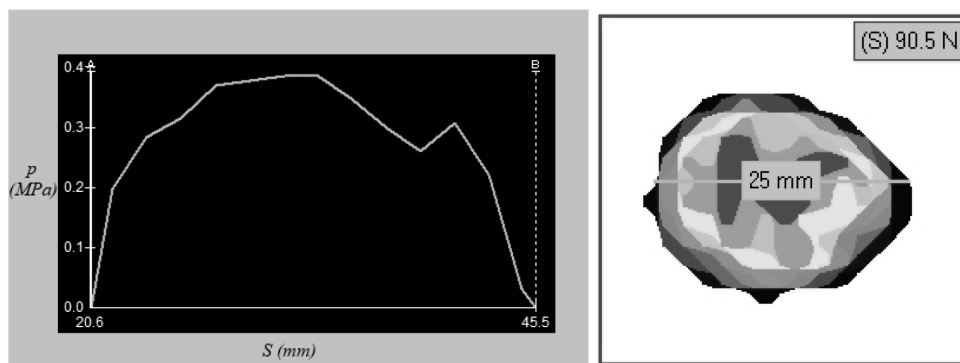
Gwałtowne zmiany nacisków zauważalne są w przedziale czasu 150-300 s, cechuje je nieliniowy spadek wartości do około 0,21 MPa. Po tym okresie relaksacji następował etap spowolnionego i stabilnego spadku wartości nacisków powierzchniowych do około 0,19 MPa. Obliczony współczynnik nacisków względnych dla całego okresu relaksacji wyniósł 0,85. W rezultacie po czasie 1200 s (linia B na wykresie) wartość nacisków powierzchniowych obniżyła się o 15% wartości początkowych, przy prędkościach zachodzących zmian od $1,47 \cdot 10^{-4} \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ do $1,35 \cdot 10^{-5} \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$.

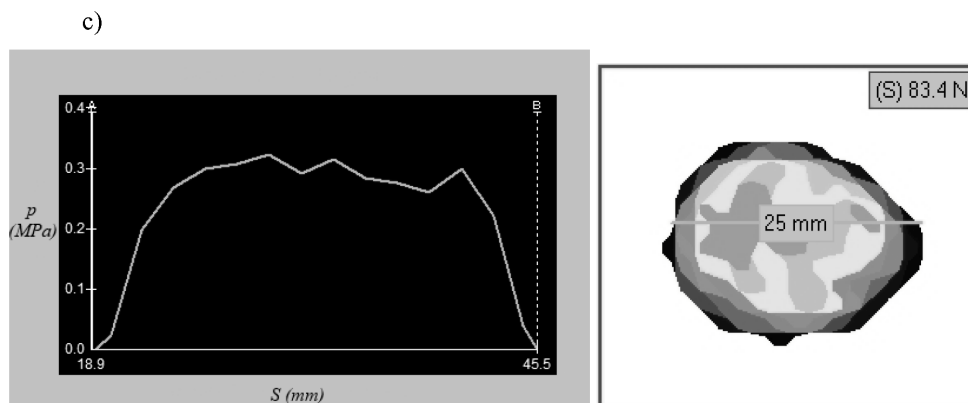
Rozkłady poprzeczne nacisków powierzchniowych na długości powierzchni styku zaprezentowano na rysunku 7. Na ich podstawie uzyskano informację o obszarach lokalnego występowania maksymalnych nacisków wraz ze wzrostem przemieszczenia do zadanej wartości początkowej ΔL_0 . W początkowym przedziale czasu 0-100 s zaobserwowano wzrost nacisków powierzchniowych w centrum powierzchni styku (rys. 7a). W miarę wzrostu obciążenia do zadanej wartości początkowej ΔL_0 (w czasie 150 s) nastąpiło spłaszczenie rozkładu przy wzroście nacisków do maksymalnych wartości na poziomie 0,38 MPa (rys 7b).

a)



b)





Rysunek 7. Wybrane rozkłady poprzeczne zmian nacisków powierzchniowych p (MPa) na długości powierzchni styku S (mm). a – po czasie 70 s od momentu przyłożenia obciążenia, b – po czasie 150 s, c – po czasie 300 s

Figure 7. Selected transverse distribution of surface pressure p (MPa) at the length of the contact area S (mm). a – after 70 s from the moment of placing the load, b – after 150 s, c – after 300 s.

Na rysunku 7c przedstawiono dalszy przebieg procesu relaksacji naprężeń, który charakteryzował się stopniową redukcją maksymalnych nacisków powierzchniowych do poziomu 0,31 MPa oraz wyraźnym ujednorodnieniem ich rozkładu poprzecznego. Wyrównanie rozkładu poprzecznego nacisków powierzchniowych uwidacznia się już po około 300 s od chwili przyłożenia obciążenia – 150 s od rozpoczęcia procesu relaksacji.

Przedstawiona w pracy metoda badawcza umożliwiła z powodzeniem wyznaczenie nacisków na powierzchni styku podczas testów relaksacji jabłek. Badania mogą mieć swoje uzasadnienie praktyczne, np. przy doborze maksymalnej wysokości pojemników oraz nacisków dopuszczalnych dolnych warstw składowanego surowca.

Wnioski

Przeprowadzone badania nasuwają następujące wnioski:

1. Przeprowadzone testy relaksacji naprężeń dla zadanej wartości przemieszczenia początkowego ΔL_0 pozwoliły określić reakcję materiału charakteryzującego się zmniejszaniem wartości obciążenia w czasie, z 90,5 N do 78,3 N, co stanowiło spadek o 13,5% od wartości początkowej.
2. Analiza zmian pola powierzchni styku wykazała niezmienny jego charakter w funkcji czasu procesu relaksacji, co wpływało w niewielkim stopniu na wartość nacisków powierzchniowych badanych jabłek.
3. Z rozkładu średnich nacisków powierzchniowych wynika, że wyznaczony współczynnik nacisków względnych dla całego okresu relaksacji wyniósł 0,85. W rezultacie po czasie 1200 s wartość nacisków powierzchniowych uległa rozproszeniu o 15% wartości

początkowych, przy prędkościach zachodzących zmian od $1,47 \cdot 10^{-4}$ MPa·s⁻¹ do $1,35 \cdot 10^{-5}$ MPa·s⁻¹.

4. Badania nacisków powierzchniowych jabłek na długości powierzchni styku wykazały stopniowe wyrównywanie rozkładów poprzecznych w funkcji czasu relaksacji. Ujednorodnianie rozkładu poprzecznego nacisków powierzchniowych uwidacznia się już po około 300 s od chwili przyłożenia obciążenia, czyli 150 s od rozpoczęcia procesu relaksacji.

Literatura

- Bohdziewicz, J. (2005). Próba doboru modelu reologicznego tkanki warzyw rzepowatych na podstawie testu relaksacji naprężeń. *Acta Agrophysica*, vol. 5, 3, 525-534.
- Chen, P.; Chen, S. (1986). Stress-relaxation functions of apples under high loading rates. *Transactions of the ASAE*, 29(6), 1754-1759.
- Gołacki, K.; Stropek, Z.; Graboś, A. (1999). Test relaksacji naprężeń w materiale biologicznym w warunkach obciążenia dynamicznego – realizacja techniczna. *Inżynieria Rolnicza*, 1(99), 111-117.
- Herold, B.; Geyer, M.; Studman, C. (2001). Fruit Contact Pressure Distributions – Equipment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 32, 167-179.
- Jakubczyk, E.; Lewicki, P.P. (2003). Właściwości mechaniczne tkanki jabłka w odniesieniu do jej struktury. *Acta Agrophysica*, vol. 2, 3, 549-557.
- Jakubczyk, E.; Uziak, D. (2005). Charakterystyka instrumentalnych metod badania właściwości mechanicznych wybranych owoców i warzyw. *Inżynieria Rolnicza*, 11(71), 181-189.
- Kamiński, E.; Stopa, R.; Stępień, B. (2011). Zmiana nacisków powierzchniowych korzeni marchwi w funkcji czasu przy stałej wartości przemieszczenia początkowego. *Inżynieria Rolnicza*, 4(129), 105-111.
- Kolowca, J. (2005). Właściwości reologiczne miąższu jabłek o zróżnicowanej strukturze. *Inżynieria Rolnicza*, 6(66), 355-359.
- Nadulski, R. (2009). Wpływ czasu i warunków przechowywania jabłek na ich wybrane właściwości mechaniczne. *Inżynieria Rolnicza*, 2(111), 107-116.
- Peleg, M. (1980). Linearization of Relaxation and Creep Curves of Solid Biological Materials. *J. Rheology*, 24, 451-463.
- Płocharski, W. J.; Konopacka, D. (1999). The relations between mechanical and sensory parameters of apples. *Acta Horticulture*, 485, 309-318.
- Płocharski, W. J.; Konopacka, D.; Zwierz, J. (2000). Comparison of Magness-Taylor's pressure test with mechanical, non-destructive methods of apples and pears firmness measurements. *Int. Agrophysics*, 14, 311-318.
- Stopa, R.; Stępień, B.; Komarnicki, P.; Porczyk, M. (2012). Wpływ wielokrotnego obciążania korzenia marchwi na wartość nacisków powierzchniowych. *Inżynieria Rolnicza*, 2(136), 315-324.
- Stropek, Z.; Gołacki, K. (2006). Metoda porównania przebiegów krzywych relaksacji naprężeń różnych materiałów roślinnych. *Inżynieria Rolnicza*, 12(87), 473-479.
- Stropek, Z.; Gołacki, K.; Rowiński, P. (2009). Wyznaczanie progu obicia jabłek. *Acta Agrophysica*, 13(1), 261-272.

IMPACT OF STRESS RELAXATION ON SURFACE PRESSURE CHANGES OF APPLES

Abstract. In the paper changes of surface pressures distributions as a function of time for apples subjected to stress relaxation tests were presented. Compression tests of whole fruit were carried out in order to determine maximum displacements leading them to material damage. Based on the obtained curves $F = f(\Delta L)$ displacement values were determined, above which processes of intensive destruction of apple parenchyma structure take place. Stress relaxation tests at dislocation corresponding to local fruit damage - at the level of 20% of the value ΔL_{\max} were carried out, at the same registering the surface pressure distribution. During relaxation clear changes of surface pressure were reported. Stress relaxation process was characterized by a gradual reduction of maximum surface pressure to the level of 0.31 MPa and clear homogenization of their transverse distribution. Levelling transverse distribution of surface pressure is visible after approximately 300 s from the moment of placing the load - 150 s from the moment of starting the relaxation process.

Key words: stress relaxation, surface pressure, displacement, apple

Adres do korespondencji:

Piotr Komarnicki; e-mail: piotr.komarnicki@up.wroc.pl

Instytut Inżynierii Rolniczej

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

ul. Chelmońskiego 37/41

51-630 Wrocław