

ROZKŁADY NACISKÓW POWIERZCHNIOWYCH JABŁEK PRZY OBCIĄŻENIACH UDAROWYCH

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

Streszczenie. Przedstawiono wyniki pomiarów nacisków powierzchniowych jabłek odmiany Ligol przy pomocy systemu Tekscan w warunkach obciążeń udarowych. Wyznaczono wartości i rozkłady nacisków w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach dla dwóch wariantów obciążenia różniących się energią zderzenia jabłka z powierzchnią oporową. Wyznaczono średnie wartości wielkości mierzonych podczas testu i przeprowadzono dla nich analizę statystyczną. Ustalono, że wzrost energii zderzenia wpływa na wartość i rozkład maksymalnych nacisków w miejscu styku jabłka z powierzchnią oporową. Wykazano, że w centralnej strefie styku nastąpiły odkształcenia plastyczne tkanki jabłka w wyniku jej uszkodzenia objawiające się niskimi wartościami nacisków powierzchniowych. Maksymalne wartości nacisków powierzchniowych znajdują się w strefie granicznej powierzchni styku.

Słowa kluczowe: naciski powierzchniowe, jabłko, obciążanie udarowe

Wprowadzenie

Jabłka w trakcie zbioru, przeladunku, transportu, sortowania i innych zabiegów niezbędnych do uzyskania wyrobu końcowego, poddane są różnorodnym obciążeniom statycznym, dynamicznym i udarowym. Obciążenia o charakterze udarowym są główną przyczyną obić powodujących straty dla plantatorów jabłek. W trakcie udaru następują nieodwracalne zmiany w budowie struktury wewnętrznej jabłek, polegające najczęściej na uszkodzeniu tkanek. Mechanizm zmian budowy komórkowej jabłek pod wpływem obciążeń udarowych różni się w istotny sposób od zmian zachodzących przy obciążeniu quasi-statycznym. Nie można w związku z tym analizować mechanizmu powstawania obić i wyznaczania odporności na obicia jabłek, stosując proste metody pomiarowe oparte o test ściskania (Gołacki, 2008).

Przy obciążeniach udarowych materiał biologiczny zachowuje się jak materiał o charakterze sprężystym. Ciecz i powietrze wypełniające przestrzenie międzykomórkowe nie mają czasu na przemieszczenie się w inne rejony o mniejszym obciążeniu, gdzie znajdują się jeszcze wolne miejsca (Gołacki, 2008). Powoduje to uwalnianie się naprężeń przekraczających wytrzymałość komórek w postaci pęknięć i nieodwracalnych uszkodzeń tkanki.

Przy niskich prędkościach obciążenia materiały biologiczne wykazują silne właściwości lepko-sprężyste. W początkowej fazie obciążania, po wyparciu gazów i wypełnieniu przestrzeni komórkowych, rozpoczyna się proces migracji cieczy powodującej odkształcenia ścian komórkowych (Blachowec, 1985). Powstaje rodzaj umocnienia materiału, będący skutkiem przenoszenia obciążenia przez składniki tkanki roślinnej o wyższej wytrzymałości, jakimi są ściany komórkowe (Konstankiewicz i in., 1996, 1998; Lippert, 1995). W efekcie ten rodzaj obciążenia umożliwia osiągnięcie wyższych wartości naprężeń niszczących niż przy obciążeniu udarowym.

Bardzo ważne praktyczne znaczenie ma określenie odporności jabłek na obicia i progów obicia. Odporność na obicia definiuje się jako stosunek energii powodującej obicie do objętości zniszczonej tkanki, natomiast próg obicia to wysokość zrzutu jabłek, przy której powstaje obicie. Najczęściej stosuje się metodę CHMI (Bajema i Hyde, 1998; Gołacki, 2008) polegającą na pomiarze energii zużytej na powstanie obić w zależności od wysokości swobodnego zrzutu jabłek. Metoda ta jest bardzo skuteczna jednak wymaga pracochłonnych i dość przybliżonych pomiarów objętości stłuczenia. Przy pomiarach tych zakłada się idealnie kulisty kształt jabłek, w związku z czym przyjmuje się powierzchnię styku w postaci koła. Jednocześnie zakłada się, że we wszystkich punktach w obrębie tego koła następuje styk jabłka z powierzchnią oporową, co nie zawsze jest spełnione. Sposób obliczania objętości obicia został podany przez Holta (Holt i Shoorl, 1977). Do pomiaru siły i opóźnienia w momencie zderzenia wykorzystywane są najczęściej czujniki piezoelektryczne mocowane na powierzchni jabłek o częstotliwości próbkowania do 150 Hz (Gołacki, 2006). Pozwalają one na wyznaczenie średniej wartości siły nacisku w trakcie zderzenia, a po wyznaczeniu przybliżonego pola powierzchni styku umożliwiają wyznaczenie średniego nacisku powierzchniowego.

Z uwagi na charakterystyczny kształt jabłek dobrym wskaźnikiem pozwalającym na określenie progów obicia i odporności na obicie może być analiza obciążeń kontaktowych, polegających na działaniu siły skupionej na małą powierzchnię. Przyjęcie nacisków powierzchniowych jako parametru wyznaczającego próg obicia oraz odporność na obicia pozwalałoby na uwzględnienie tych właściwości jabłek, od których zależą naciski tzn. podstawowych właściwości wytrzymałościowych (moduł sprężystości i stała Poissona), kształtu jabłka i wartości siły nacisku.

Problem zagadnień kontaktowych w odniesieniu do jabłek został dobrze opisany przy obciążeniach o charakterze quasi-statycznym. Najczęściej prowadzone są badania doświadczalne, zmierzające do pomiaru zmian pola powierzchni styku jabłka z elementem roboczym maszyny wytrzymałościowej pod działaniem sił zewnętrznych (Herold i in., 2001; Rabelo i in., 2001; Lewis i in., 2008). Bardzo interesujące badania jabłek przy obciążeniach dynamicznych prowadził Acican (2007). Przeprowadził analizę powstawania uszkodzeń jabłek w trakcie transportu w drewnianych skrzyniach. Van Zeebroeck (2007) przeprowadził badania jabłek przy pomocy urządzenia wykorzystującego zasadę wahadła oraz wykonał modele dyskretne metodą elementów skończonych, pozwalające na wyznaczenie wpływu warunków transportu na straty spowodowane uszkodzeniem jabłek.

Często do wyznaczenia nacisków powierzchniowych wykorzystywane są wzory Hertza, chociaż zostały one wyprowadzone przy założeniach wykluczających zastosowanie ich do obiektów pochodzenia biologicznego. Mimo tych ograniczeń zastosowanie teorii sprężystości może prowadzić do budowy wiarygodnych wskaźników opisujących wzajemną

relację pomiędzy np. naciskiem powierzchniowym i czasem kontaktu (Siyami i in., 1988). Rabelo (2001) zastosował metodę Hertz'a do analizy zagadnień kontaktowych dla pomarańczy, jednak otrzymane wyniki wskazały wyraźnie na ograniczenia stosowania tej teorii w odniesieniu do materiałów biologicznych.

Z uwagi na rozwój numerycznych metod modelowania umożliwiających w coraz większym stopniu uwzględnienie właściwości charakterystycznych dla materiałów biologicznych, wyznaczenia nacisków powierzchniowych może stanowić podstawę do przeprowadzenia doświadczalnej weryfikacji zbudowanych modeli.

Cel badań

Celem badań było doświadczalne określenie wpływu obciążeń udarowych na kształt warstwic i rozkładów nacisków powierzchniowych jabłka odmiany *Ligol*.

Metodyka i przedmiot badań

Pomiary przeprowadzono w Instytucie Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Do badań wykorzystano specjalnie zaprojektowane i zbudowane stanowisko pomiarowe, działające na zasadzie wahadła i wyposażone w czujnik foliowy systemu Tekscan.

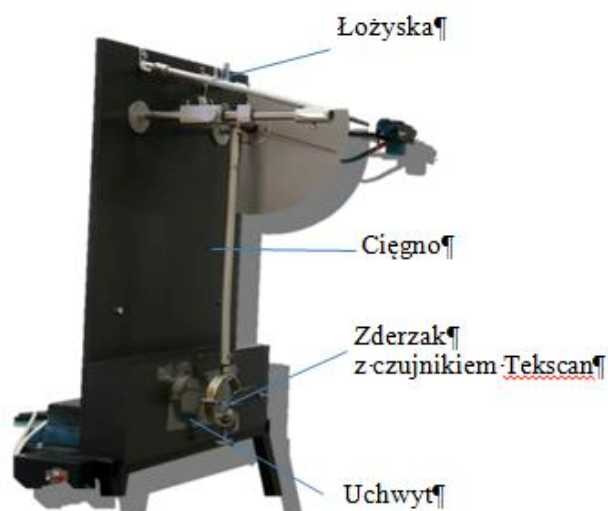
Do badań przeznaczono starannie wyselekcjonowane jabłka odmiany *Ligol* pochodzące z prywatnego sadu z okolic Wrocławia. Badania prowadzono bezpośrednio po zbiorach. Wybrane jabłka w trakcie pomiarów przechowywano w chłodni w temperaturze ok. 3°C i wilgotności powietrza na poziomie 90-95%. Posiadały one zbliżony kształt i wagę (masa ok. 200g) oraz jednakowy stosunek wysokości do średnicy wynoszący $h=0,75$. Ocenę stopnia dojrzałości jabłek przeprowadzono przy pomocy jędrnościomierza ręcznego, a do badań przeznaczono jabłka, dla których wskaźnik jędrności mieścił się w przedziale 60-65 N.

Stanowisko pomiarowe (rys.1) zbudowane było ze sztywnej ramy, której dolny fragment uformowano w zderzak o płaskiej powierzchni. Konstrukcja ramy zaprojektowana została w sposób pozwalający na eliminację efektu powstawania drgań w momencie uderzenia. Obciążenie udarowe wymuszano, wykorzystując mechanizm wahadła. Jeden koniec ramienia wahadła wykonanego z włókna węglowego ułożyskowano w górnej części ramy, a badane jabłko zamocowano w specjalnym uchwycie na jego drugim końcu.

Stanowisko umożliwiało regulację energii zderzenia poprzez zmianę kąta początkowego położenia ramienia wahadła oraz założenie dodatkowych obciążników w okolicach uchwytu.

Pomiar wartości siły oraz warstwic nacisków powierzchniowych w momencie zderzenia realizowano przy pomocy systemu Tekscan High-Speed składającego się z czujnika foliowego, układu umożliwiającego przesłanie sygnału do komputera oraz programu pozwalającego na zbieranie i analizę danych. Przy wyznaczaniu nacisków powierzchniowych w warunkach obciążeń dynamicznych konieczny jest jednoczesny pomiar siły nacisku i odpowiadającej jej wielkości pola powierzchni styku badanego obiektu z powierzchnią

zderzaka. Zastosowanie systemu Tekscan umożliwia dokonanie obu tych pomiarów dzięki ultracienkiemu czujnikowi foliowemu, zbudowanemu z układu równomiernie rozmieszczonych sensorów na powierzchni roboczej matrycy. Wyniki pomiarów siły i pola powierzchni styku w przestrzeniach pomiędzy sensorami pozwalają na obliczenie wartości nacisków powierzchniowych w poszczególnych punktach matrycy.



Rysunek 1. Stanowisko pomiarowe do badań uderzeniowych
Figure 1. Measurement stand for impact research

Czujnik zastosowany w badaniach posiadał powierzchnię roboczą o wymiarach 71,1x71,1 mm i średniej gęstości sensorów wynoszącej 0,039-szt.mm⁻² (tab. 1). Wraz z odpowiednim oprogramowaniem umożliwiał on zbieranie danych z częstotliwością dochodzącą do ok. 5000Hz.

Tabela 1
Dane techniczne czujnika dotykowego
Table 1
Technical data of the tactile sensor

| Wymiary czujnika | | Kierunek wzdłużny i kierunek poprzeczny | | Całkowita ilość czujników (szt.) | Gęstość czujników (szt.·mm ⁻²) |
|------------------|----------------|---|------------------------|----------------------------------|--|
| Długość (mm) | Szerokość (mm) | Rozstaw czujników (mm) | Ilość czujników (szt.) | | |
| 71,1 | 71,1 | 5,1 | 14 | 196 | 0,039 |

Źródło: opracowano na podstawie www.tekscan.com

Test obciążenia udarowego jabłek odmiany Ligol przeprowadzono dla różnych wariantów parametrów testu. Kąt α pochylenia ramienia wahadła stanowiska pomiarowego zmieniano co 10 stopni w zakresie od 45 do 135°. Masa każdego z odważników wynosiła 325 g, a uchwyt umożliwiał zamocowanie trzech odważników. W rezultacie uzyskano zmianę prędkości zderzenia w zakresie od $v=2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $v=4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, natomiast zmianę energii zderzenia od $E=1,0\text{J}$ bez użycia dodatkowych odważników przy kącie $\alpha=45^\circ$ do $E=6,7\text{J}$ przy użyciu trzech odważników i kącie $\alpha=135^\circ$. Dokonano dziesięciu powtórzeń dla każdego wariantu obciążenia i przeprowadzono analizę statystyczną dla maksymalnych wartości nacisków powierzchniowych.

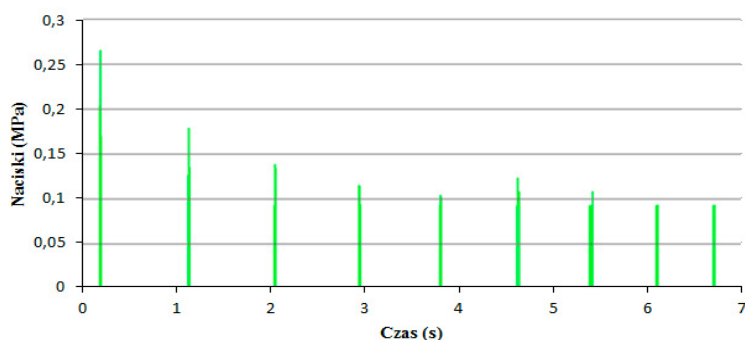
Wyniki pomiarów warstwic i rozkładów nacisków powierzchniowych poddano analizie, korzystając z wybranych przykładów obrazów otrzymanych bezpośrednio z systemu pomiarowego, natomiast maksymalne wartości mierzonych wielkości poddano obróbce statystycznej za pomocą programu Statistica. Analizie poddano 80 obserwacji, z czego po 40 przypadkało na wybrany wariant obciążenia. Do każdej wartości poszczególnych cech obliczano wartość średnią, odchylenie standardowe i 95% przedział ufności dla wartości średniej. W tabeli 2 i 3 przedstawiono przykładowe wyniki analizy statystycznej, obejmującej wyznaczenie nacisków powierzchniowych dla dwóch wartości energii zderzenia.

Na całkowity błąd doświadczalnego wyznaczania nacisków powierzchniowych składały się błędy związane z kształtem badanych jabłek, z pomiarem siły nacisku oraz wyznaczeniem pola powierzchni styku jabłka z podłożem. Ze względu na bardzo staranny wybór materiału do badań, błąd kształtu jako błąd systematyczny można pominąć. Pomiar siły, pomiar pola powierzchni styku oraz wartości nacisków powierzchniowych wyznaczano przy pomocy systemu Tekscan o następujących parametrach: dokładność systemu $<\pm 4\%$, błąd liniowości $<\pm 3\%$, powtarzalność wyników $<\pm 3,5\%$, histereza $<\pm 4,5\%$ oraz dryfowanie: $<5\%$.

Wyniki badań i ich analiza

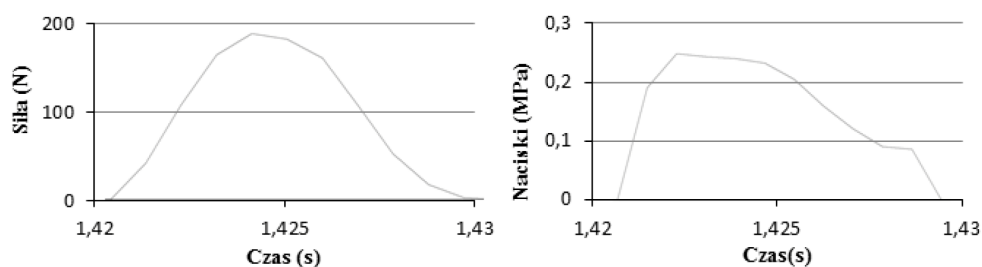
Ramię wahadła, po ustawieniu założonych parametrów testu, wprowadzono w ruch poprzez zwolnienie blokady mocowanej do konstrukcji stanowiska. Jabłko po uderzeniu w przeszkodę ulegało wielokrotnemu odbiciu, aż do całkowitego zatrzymania. Rysunek 2 przedstawia kolejne impulsy wyskalowane w wartościach nacisków powierzchniowych jako funkcja czasu. W przypadku I wariantu obciążenia (masa $m=0,5\text{kg}$, wysokość zrzutu $h=0,2 \text{ m}$, co pozwoliło uzyskać prędkość w momencie zderzenia $v=2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ i energię $E=1\text{J}$) do całkowitego zatrzymania wahadła niezbędne było 10 uderzeń jabłka o zderzak. Wartość nacisków maksymalnych powierzchniowych ulegała zmniejszeniu tylko w trzech pierwszych impulsach od $p=0,27 \text{ MPa}$ do $p=0,12 \text{ MPa}$ i następnie stabilizowała się na tym poziomie.

Pierwszy impuls siły miał regularny i symetryczny kształt zarówno w fazie zderzenia, jak i odbicia (rys. 3a) niezależnie od prędkości i energii zderzenia, co świadczyło o prawidłowej konstrukcji stanowiska. Inaczej przebiegały zmiany nacisków powierzchniowych (rys. 3b). W pierwszych dwóch milisekundach zderzenia następował szybki wzrost nacisków, aż do osiągnięcia poziomu maksymalnego, przy czym wartość ta nie odpowiadała maksymalnej sile zderzenia. W kolejnej fazie zderzenia trwającej 6 milisekund, po początkowej stabilizacji wartości nacisków na poziomie maksymalnym (w okolicach maksymalnej wartości siły) następował stopniowy ich spadek. Całkowity czas kontaktu jabłka ze zderzakiem od momentu rozpoczęcia styku do jego zakończenia w trakcie pierwszego impulsu wyniósł 8 ms.



Rysunek 2. Przykładowe kolejne impulsy nacisków powierzchniowych jako funkcja czasu – I wariant

Figure 2. Exemplary subsequent impulses of surface pressure as the time function – I variant



a) impuls siły
a) impulse of force

b) impuls naciski powierzchniowe
b) surface pressure impulse

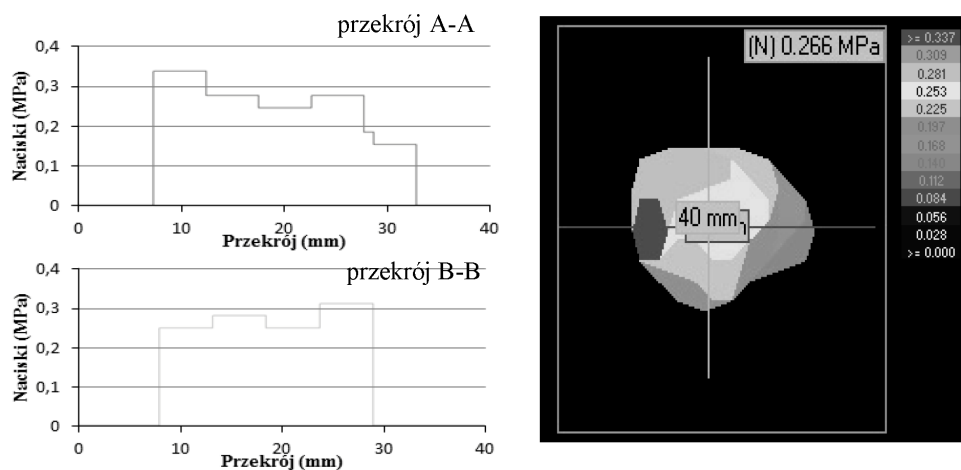
Rysunek 3a i b. Przykładowy impuls siły i nacisków powierzchniowych jako funkcja czasu (I wariant)

Figure 3 a and b. Exemplary impulse of force and surface pressure as a function of time (I variant)

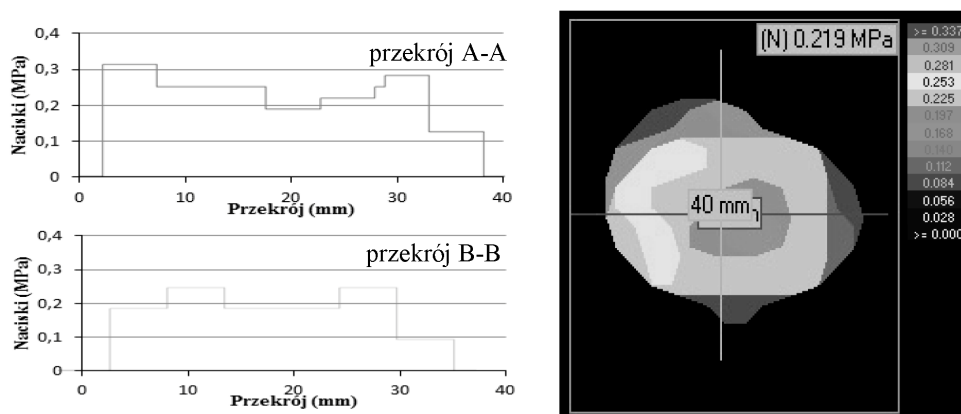
Analizując przykładowe warstwicę i rozkłady nacisków powierzchniowych (rys. 4) dla I wariantu obciążenia w fazie zderzenia (po 1 ms od momentu kontaktu), można zauważyć w przybliżeniu równomierny rozkład nacisków na powierzchni styku. Wartości maksymalnych nacisków powierzchniowych osiągają wartość do $p=0,337$ MPa, a średnia ich wartość wynosi $p=0,266$ MPa.

W fazie końcowej odbicia (rys. 5), po 7 ms od momentu kontaktu, obraz nacisków powierzchniowych w obszarze styku nie uległ istotnym zmianom. Zwiększyła się co prawda powierzchnia styku, ale w dalszym ciągu widoczny jest na niej równomierny rozkład nacisków. Ich wartości wahają się w przedziale od 0,168 MPa w strefie środkowej do 0,255 MPa na obrzeżach styku, a średnia wartość wynosi 0,219 MPa. Taki rozkład nacisków

może świadczyć o niewielkich wartościach odkształceń plastycznych tkanki jabłek w strefie największych obciążeń i przewadze odkształceń sprężystych, powodujących odbicie jabłka od zderzaka. Większość komórek jabłka znajdujących się w strefie styku bierze udział w oddawaniu energii sprężystej zgromadzonej w trakcie zderzenia.



Rysunek 4. Przykładowe warstwicze oraz rozkłady nacisków powierzchniowych, $\Delta t = 1 \text{ ms}$
 Figure 4. Exemplary contour lines and distribution of surface pressure, $\Delta t = 1 \text{ ms}$



Rysunek 5. Przykładowe warstwicze oraz rozkłady nacisków powierzchniowych, $\Delta t = 7 \text{ ms}$
 Figure 5. Exemplary contour lines and distribution of surface pressure, $\Delta t = 7 \text{ ms}$

W tabeli 2 przedstawiono średnie wartości parametrów, będących przedmiotem pomiarów w trakcie prowadzonych testów wraz z analizą statystyczną przeprowadzoną dla próby wynoszącej 10 powtórzeń.

Tabela 2

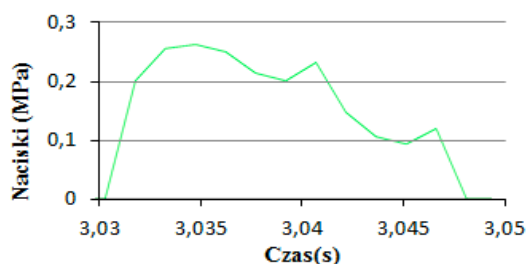
Wyniki testu – pierwszy impuls ($v=2m \cdot s^{-1}$, $E=1,0 J$)

Table 2

Test results - first impulse ($v=2m \cdot s^{-1}$, $E=1.0 J$)

| Czynnik | N | Wartość średnia | Odchylenie standardowe | 95% przedział ufności | |
|--------------------------------------|----|-----------------|------------------------|-----------------------|---------|
| Nacisk p (Mpa) | 10 | 0,219 | 0,0086 | 0,2856 | 0,2684 |
| Siła F (N) | 10 | 214 | 4,50 | 224,03 | 203,97 |
| Pole powierzchni A(mm ²) | 10 | 977 | 10,57 | 1158,56 | 1111,43 |
| Czas kontaktu Δt (ms) | 10 | 8 | 0,1 | 8,2228 | 7,7772 |

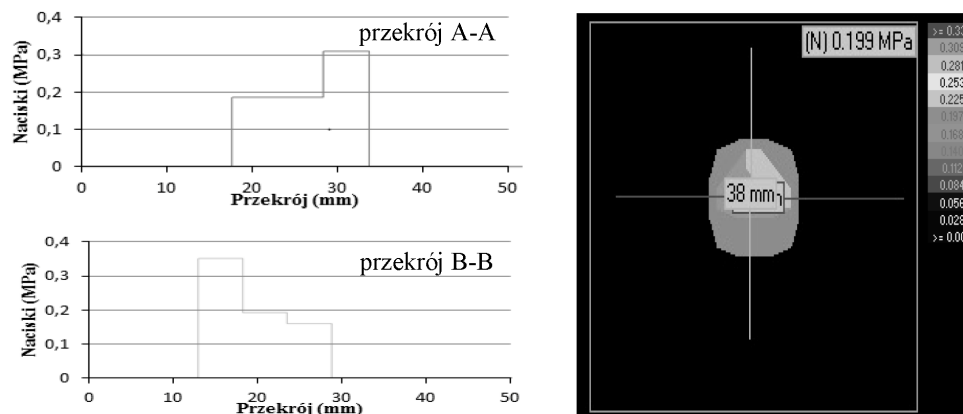
Przy maksymalnych wartościach energii w momencie zderzenia zaplanowanych w trakcie testów (II wariant obciążenia - masa $m=0,8kg$, wysokość zrzutu $h=0,85m$, co pozwoliło uzyskać prędkość w momencie zderzenia $v=4m \cdot s^{-1}$ i energię $E=6,7J$) obraz nacisków powierzchniowych w strefie styku ulega wyraźnej zmianie. Zmniejszyła się ilość odbić badanego jabłka od powierzchni oporowej do 5 impulsów, przy czym nie następowała stabilizacja wartości nacisków powierzchniowych w czasie kolejnych zderzeń. Pojedynczy impuls dla II wariantu obciążenia w początkowej fazie zderzenia miał podobny przebieg dla I wariantu. Bardzo szybko, bo w czasie 2 ms, osiągnięta została maksymalna wartość nacisków powierzchniowych (rys. 6). W momencie rozpoczęcia zderzenia, po 1 ms kontakt jabłka z powierzchnią oporową miał charakter punktowy (rys. 7). Przy niewielkim polu powierzchni styku maksymalne wartości nacisków powierzchniowych ($p=0,337 MPa$) koncentrowały się w okolicach strefy centralnej, przy czym średnia wartość nacisków wynosiła $p=0,199 MPa$. Strefa, w której naciski powierzchniowe osiągały wartości maksymalne, wynosiła 10% całej powierzchni styku i około 3% maksymalnej powierzchni styku osiągniętej w trakcie testu. W efekcie gwałtownego działania całej siły nacisku na małą powierzchnię następował wzrost ciśnienia płynów komórkowych w strefie styku, co przy braku możliwości przemieszczania się płynów prowadziło do odkształceń o charakterze plastycznym i do uszkodzenia komórek. W rezultacie uszkodzone strefy tkanki jabłek traciły właściwości sprężyste.



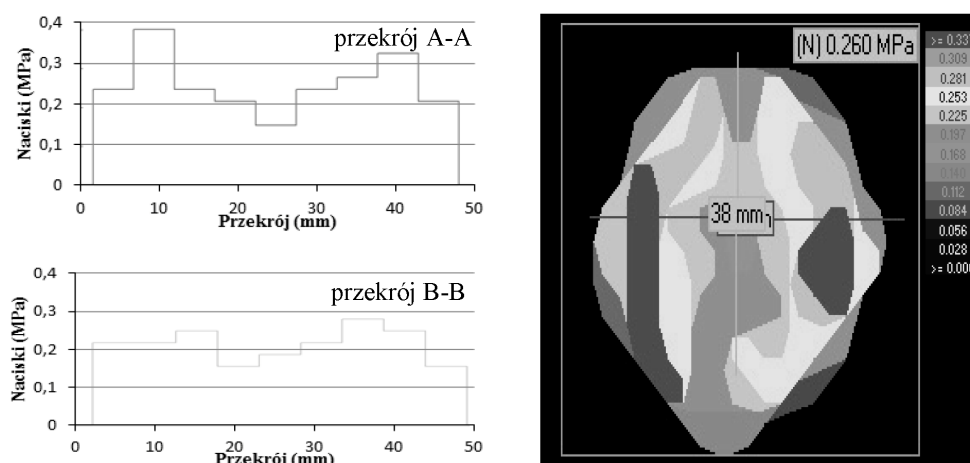
Rysunek 6. Przykładowy pojedynczy impuls nacisków powierzchniowych jako funkcja czasu – II wariant

Figure 6. Exemplary single impulse of surface pressure as the time function – II variant

Rozkłady nacisków...

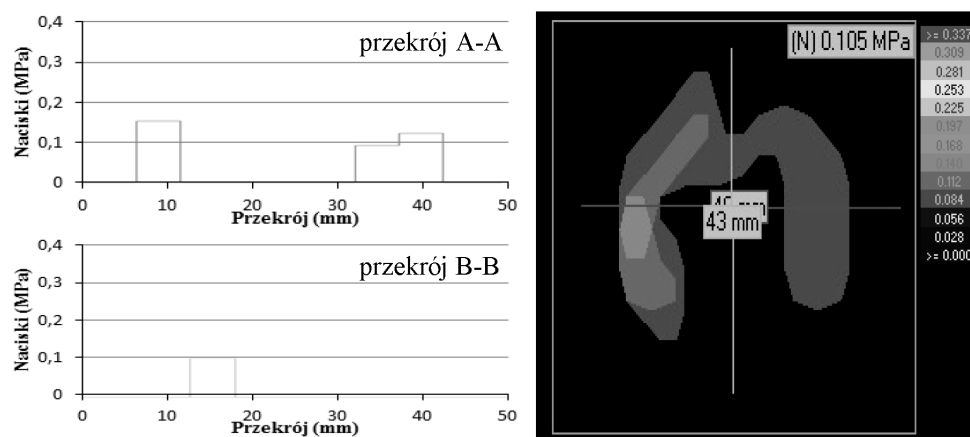


Rysunek 7. Przykładowe warstwicze oraz rozkłady nacisków powierzchniowych, $\Delta t = 1 \text{ ms}$
 Figure 7. Exemplary contour lines and distribution of surface pressure, $\Delta t = 1 \text{ ms}$



Rysunek 8. Przykładowe warstwicze oraz rozkłady nacisków powierzchniowych, $\Delta t = 3 \text{ ms}$
 Figure 8. Exemplary contour lines and distribution of surface pressure, $\Delta t = 3 \text{ ms}$

Opisany mechanizm procesu degradacji tkanek powtarzał się w miarę wchodzenia w kontakt kolejnych fragmentów badanego jabłka. Maksymalne wartości nacisków powierzchniowych (o takiej samej wartości $p = 0,337 \text{ MPa}$) pojawiały się na granicy obszaru styku w miejscach, gdzie w strefę kontaktu wchodziły nieuszkodzone partie komórek (rys. 8). Po 3 ms od momentu uderzenia pojawiała się wyraźna granica pomiędzy uszkodzonymi komórkami, które uległy trwałym odkształceniom (w okolicach strefy centralnej) a komórkami jeszcze nieuszkodzonymi, w których dominowały odkształcenia sprężyste (Herold, 2001).



Rysunek 9. Przykładowe warstwy oraz rozkłady nacisków powierzchniowych, $\Delta t=10$ ms
 Figure 9. Exemplary contour lines and distribution of surface pressure, $\Delta t=10$ ms

W fazie końcowej odbicia (rys. 9), po 10 ms od momentu rozpoczęcia uderzenia kontakt badanego jabłka z elementem oporowym następował jedynie w obszarze, w którym nie nastąpiły jeszcze odkształcenia trwałe. Dzięki właściwościom sprężystym nieuszkodzonej tkanki następowało odbicie jabłka od powierzchni oporowej. Wartości nacisków powierzchniowych wahały się w przedziale od 0,084 MPa do 0,168 MPa, a średnia ich wartość wynosiła 0,105 MPa.

Tabela 3

Wyniki testu – pierwszy impuls ($v=4$ m·s⁻¹, $E=6,7$ J)

Table 3

Test results - first impulse ($v=4$ m·s⁻¹, $E=6.7$ J)

| Czynnik | N | Wartość średnia | Odchylenie standardowe | 95% | |
|--------------------------------------|----|--------------------|---------------------------|-------------------|--------|
| | | | | przedział ufności | |
| Nacisk p (Mpa) | 10 | 0,274 | 0,00849 | 0,2929 | 0,2551 |
| Siła F (N) | 10 | 474 | 9,97 | 496,27 | 451,79 |
| Pole powierzchni A(mm ²) | 10 | 1729 | 16,11 | 1764,9 | 1693,1 |
| Czas kontaktu Δt (ms) | 10 | 10 | 0,1 | 10,2228 | 9,7772 |

Średnie wartości parametrów mierzonych w trakcie testu przy II wariantcie obciążenia wraz z analizą statystyczną przeprowadzoną dla 10 powtórzeń przedstawiono w tabeli 3. Na uwagę zasługuje fakt, że pomimo prawie dwukrotnie większej siły w momencie zderzenia dla II wariantu obciążenia w stosunku do I wariantu, naciski powierzchniowe nie uległy zmianie w istotny sposób. Zwiększył się natomiast czas kontaktu z 8 ms do 10 ms.

Wnioski

1. Rozkład nacisków powierzchniowych zależy od energii zderzenia jabłka:
 - przy małej prędkości i energii zderzenia ($v=2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $E=1,0\text{ J}$) rozkład nacisków powierzchniowych w przekroju poprzecznym jest równomierny;
 - przy większej prędkości i energii zderzenia ($v=4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $E=6,7\text{ J}$) maksymalne wartości nacisków powierzchniowych rozmieszczone są na krawędzi obszaru styku.
2. Wartość maksymalnych nacisków powierzchniowych w niewielkim stopniu zależy od energii zderzenia. Wraz ze wzrostem energii zderzenia wzrasta wartość siły oddziaływania oraz wielkość powierzchni styku.
3. Zwiększenie energii uderzenia powoduje wydłużenie czasu kontaktu jabłka z przeszkodą.

Literatura

- Acican, T.; Alibas, K.; Ozelkok, I. S. (2007). Mechanical damage to apples during transport in wooden crates. *Biosystems Engineering*, 96(2), 239-248.
- Bajema, R. W.; Hyde, G. M.; Baritelle, A. L. (1998). Temperature and strain rate effects on the dynamic failure properties of potato tissue. *Trans. ASAE*, 41(3), 733-740.
- Blahovec, J. (1985). Resistance of potatoes and similar fleshy vegetable products to mechanical damage. *Papers of the 3rd International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Praha*, 57-64.
- Gołacki, K.; Rowiński, P. (2006). Dynamiczne metody pomiaru własności mechanicznych owoców i warzyw. *Acta Agrophysica*, 139, 8(1), 69-83.
- Gołacki, K.; Bobin, G. (2008). Zastosowanie techniki chmi do wyznaczania odporności na obicia jabłek odmiany melrose. *Inżynieria Rolnicza*, 9(107), 91.
- Herold, B.; Geyer, M.; Studman, C.J. (2001). Fruit contact pressure distributions—equipment. *Comput. Electron. Agric.*, 32, 167-179.
- Holt, J. E.; Schoorl, D. (1977). Bruising and energy dissipation in apples. *Journal of Textures Studies*, 7, 421-432.
- Konstankiewicz, K.; Pukos, A.; Zdunek, A. (1996). Teorie odkształceń materiałów biologicznych w świetle relaksacji naprężeń. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 443, 353-363.
- Konstankiewicz, K.; Pukos, A. (1998). Metodyczne aspekty w badaniach nad nową mechaniką rolniczych. *Inżynieria Rolnicza*, 2(3), 5-20.
- Lewis, R.; Yoxall, A.; Marshall, M. B.; Canty, L. A. (2008). Characterizing pressure and bruising in apple fruit. *Department of Mechanical Engineering, The University of Sheffield*. Mappin Street, Sheffield S1 3JD, United Kingdom, Wear, 264 37-46
- Lippert, F. (1995). Methode zur induktion der Rissbildung bei Sprossknollen von Kohlrabi (*Brassica oleracea* var. *gongylodes* L.). *Gartenbauwissenschaft*, 60(4), 187-190.
- Rabelo, G. F.; Fabbro, I. M.; Linares, A. W. (2001). Contact stress area measurement of spherical fruit. *Proceedings of Sensors in Horticulture*, III, 195-200.
- Siyami, S.; Brown, G. K.; Burgess, G. J.; Gerrish, J. B.; Tennes, B. R.; Burton, C. L.; Zapp, R. H. (1988). Apple impact bruise prediction models. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 41, 1038-1046.
- Stopa, R. (2010). Modelowanie deformacji korzenia marchwi w warunkach obciążeń skupionych metodą elementów skończonych. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.
- Van Zeebroeck, M.; Van Linden, V.; Ramon, H.; De Baerdemaeker, J.; Nicolai, B. M.; Tijskens, E. (2007). Impact damage of apples during transport and handling. *Postharvest Biol. Technol.*, 45, 157-167.

DISTRIBUTION OF SURFACE PRESSURE OF APPLES AT IMPACT LOADING

Abstract. Results of measurements of surface pressure of Ligol apples with the use of Tekscan system in impact loading conditions were presented. Contour lines and distribution of pressure in two mutually perpendicular directions for two variants of loading differing with the energy of apple collision with the area of resistance were determined. Average values measured during the test were determined and statistical analysis was carried out for them. It was determined that the growth of collision energy influences the value and distribution of maximum pressures in the area of the apple contact with the area of resistance. It was proved that in the central contact zone, plastic deformations of the apple tissue occurred as a result of its damage appearing with low values of surface pressure. Maximum values of surface pressure are in the border zone of the contact area.

Key words: surface pressure, apple, impact loading.

Adres do korespondencji:

Roman Stopa; e-mail: roman.stopa@up.wroc.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
ul. Chelmońskiego 37/41
51-630 Wrocław