

OCENA SPRĘŻYSTOŚCI WYBRANYCH NASION NA PODSTAWIE POMIARU ICH TWARDOŚCI

J. Frączek, T. Hebda

Wydział Techniki i Energetyki Rolnictwa AR, ul. Balicka 104, 30-149 Kraków

Streszczenie: Celem prezentowanej pracy była próba oceny sprężystości wybranych nasion na podstawie pomiaru ich twardości. Twardość mierzono przy wykorzystaniu zmodyfikowanej metody Vickersa. W czasie pomiarów, w miejsce określenia wielkości odcisku, dokonywano odczytu maksymalnej wartości zagłębienia się penetratora w materiał biologiczny. Stwierdzono, że minimalny konieczny czas obciążenia wynosi 15 minut. Badania modułu sprężystości przeprowadzono opierając się na zaleceniach ASAE. Przeprowadzone testy statystyczne wykazały istotny wpływ zawartości wody oraz rodzaju materiału na jego twardość. Stwierdzono również istnienie interakcji drugiego rzędu pomiędzy współczynnikiem kształtu a zawartością wody. Przeprowadzono estymację nieliniową według różnych modeli. Stosunkowo największą wierność dopasowania krzywej teoretycznej do wyników eksperymentu uzyskano dla modelu potęgowego.

Słowa kluczowe: nasiona, twardość, moduł Younga.

WSTĘP

Poszukiwanie charakterystycznych współzależności między właściwościami nasion, jego zachowaniem się w procesach technologicznych a cechami gotowego produktu mają na celu ułatwienie podjęcia właściwej decyzji o przeznaczeniu danej partii materiału na określone cele oraz zastosowaniu odpowiednich zabiegów technologicznych dla uzyskania produktu najwyższej jakości. Praktycznym celem tych prac jest przekazanie konstruktorom informacji o przewidywanych warunkach pracy i rzeczywistych obciążeniach maszyn, jak również wskazanie kierunków optymalizacji tych cech poprzez odpowiednie zabiegi hodowlane. Chodzi tu więc zarówno o wypracowanie wspólnego poglądu

na optymalne wartości cech roślin, jak i ustalenie hierarchii ich ważności wśród hodowców, mechanizatorów, technologów przemysłu rolno-spożywczego oraz odbiorców produktów rolniczych.

Pomimo dużej wiedzy o właściwościach nasion i czynnikach je determinujących, zagadnienia te nie zostały w pełni poznane. Współczesna nauka rozwinęła szereg metod oceny właściwości mechanicznych ziarna ze szczególnym uwzględnieniem właściwości anatomiczno-morfologicznych i wytrzymałościowych. Metody te oparte są między innymi na oznaczeniu składu chemicznego, aktywności enzymatycznej oraz na testach pośredniej oceny właściwości technologicznych nasion. Okazuje się jednak, że w wielu przypadkach proponowane metody są zawodne lub nie do końca spełniają swoje zadania [6].

CEL I ZAKRES PRACY

Trudności związane z pomiarem sprężystości i określeniem modułu Younga oraz stosowanie różnych metod pomiaru siły i odkształcenia dają bardzo duży rozrzut wyników (sięgający nawet 500% [3]), zatem ich wykorzystanie w praktyce inżynierskiej jest bardzo problematyczne. Wydaje się, że zdecydowanie prostszą metodą określenia cech wytrzymałościowych pojedynczego ziarniaka może być pomiar jego twardości; tym bardziej, że jak wykazują liczne publikacje [5,6,7] głównym elementem "odpowiadającym" za wytrzymałość ziarna jest jego okrywa owocowo-nasienna. W związku z powyższym, celem prezentowanej pracy była próba oceny sprężystości wybranych nasion na podstawie pomiaru ich twardości.

Badania przeprowadzono na nasionach: grochu Nike, grochu Fidelia, peluszki Perkoz, łubinu Mirela, fasoli Jubilatki. Wszystkie pomiary zostały wykonane przy stałej sile nacisku (2 N) dla pięciu różnych poziomów zawartości wody: 0,11; 0,16; 0,22; 0,28; 0,35 kg/kg s.m..

METODYKA

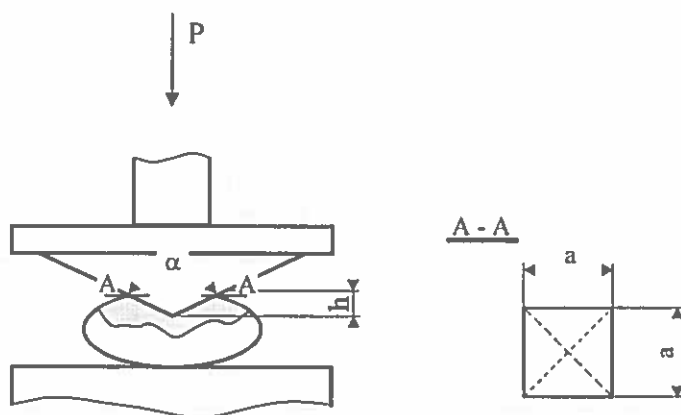
Jak wykazuje przegląd literatury, do pomiaru twardości ziarnistych materiałów roślinnych najczęściej wykorzystywana jest metoda Vickersa [2]. Jej zastosowanie wymaga jednak dokonania pewnych modyfikacji mających na celu uzyskanie powtarzalności otrzymywanych wyników. Jest to związane z dwoma zjawiskami cechującymi materiał roślinny. Pierwsze z nich to pęcznienie. Polega ono na wzroście odkształcenia materiału poddanego stałemu naprężeniu. Drugim

ze zjawisk - charakterystycznym dla materiałów biologicznych - jest sprężystość opóźniona. W jej wyniku, po zdjęciu obciążenia materiał wraca do swego pierwotnego kształtu (w ramach odkształceń sprężystych) dopiero po pewnym czasie.

Tak więc - w efekcie działania wymienionych wyżej procesów - wielkość odcisku uzyskanego podczas wykonywania pomiarów twardości metodą Vickersa zależna jest od czasu obciążania. Dodatkowo po usunięciu penetratora odcisk ten może się po pewnym czasie zupełnie zabiźnić. W związku z tym niezbędne jest dokonanie modyfikacji sposobu pomiaru wielkości odkształcenia materiału oraz eksperymentalne ustalenie czasu pomiaru.

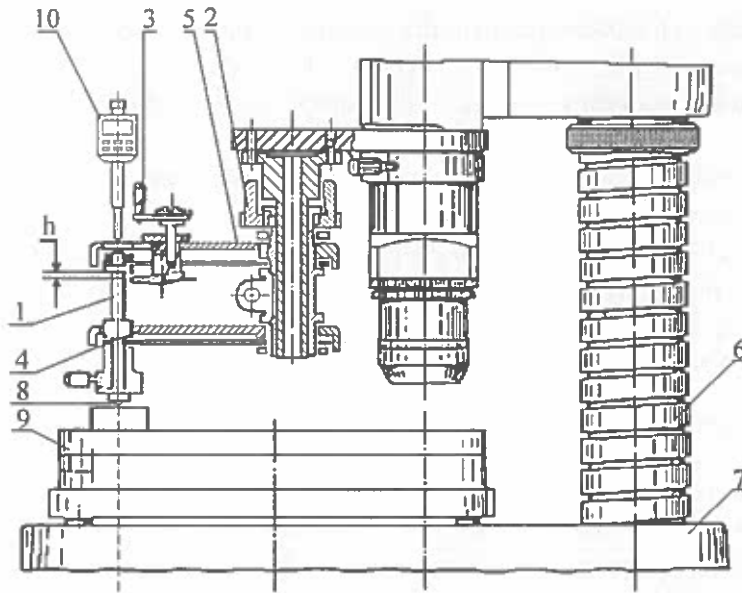
Pomiar twardości

Zastosowana w niniejszej pracy modyfikacja metody Vickersa umożliwia wyeliminowanie błędów pomiarowych związanych z upływem czasu między docieżaniem a pomiarem wielkości odcisku. W miejsce stosowanego do tej pory pomiaru wielkości odcisku za pomocą mikroskopu w pracy zaproponowano dokonywanie odczytu maksymalnej wartości "h" zagłębienia się końcówki penetratora w materiał biologiczny pod wpływem stałego obciążenia 2N (Rys.1). W tym celu na kolumnie mikrotwardościomierza PMT-3 zamontowano dodatkowo czujnik zegarowy "Digimatic" firmy Mitutoyo (Rys. 2).



Rys. 1. Pomiar twardości nasion.

Fig. 1. Measurement of the penetrator sinking depth.



Rys. 2. Schemat twardościomierza PMT-3.

1 – tłocznik, 2 - nakrętka regulująca wysokość mechanizmu, 3 - korbka wyłączająca obciążenie, 4 - sprężyny płaskie, 5 – kolumna, 6 - podstawa twardościomierza, 7 – wgłębnik, 8 - stolik przedmiotowy, 9 - czujnik firmy Mitutoyo, h - przesunięcie wgłębnika.

Fig. 2. Diagram of PMT-3 hardness-testing machine.

1 - press tool, 2 - mechanism height adjustment nut, 3 - load switching crank, 4 - flat spring, 5 - column, 6 - hardness-testing machine base, 7 - indenter, 8 - object stage, 9 - dial indicator manufactured by *Mitutoyo*, 10 - distance of indenter movement.

Wartość przesunięcia wgłębnika jest wyświetlana na ekranie czujnika z dokładnością do 0,001 mm. Czujnik ten posiada 6-cio miejscowy wskaźnik, możliwość zerowania w każdej pozycji, końcówkę pomiarową wykonaną z węglików spiekanych oraz gniazdo wyjściowe do bezpośredniego podłączenia z komputerem.

Twardość Vickersa definiowana jest jako stosunek obciążenia F do powierzchni bocznej trwałego odcisku S . Twardość t_V , oznaczoną odpowiednio do wartości obciążenia (np. HV0,2; HV2), oblicza się następująco:

$$HV = \frac{0,204 \cdot P \cdot \sin 68^{\circ}}{d^2} = 0,189 \frac{P}{d^2} \quad [N/mm^2] \quad (1)$$

gdzie: P – siła nacisku [N]

d – średnia arytmetyczna przekątnych jednego odcisku [mm]

Zgodnie z proponowaną modyfikacją, przytoczony wzór można przekształcić korzystając z podstawowych zależności geometrycznych. Pole powierzchni bocznej końcówki penetratora stykającej się z materiałem - zgodnie z oznaczeniami jak na rysunku 1 – wyniesie wówczas:

$$F = 2 \cdot a \cdot H \quad [mm^2] \quad (2)$$

Uzależniając długość a i H od wartości zagłębienia się penetratora h uzyskujemy:

$$d = 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad \text{oraz} \quad H = \frac{h}{\cos \frac{\alpha}{2}}$$

Wzór (2) przyjmie zatem postać:

$$F = 4 \cdot h^2 \cdot \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad [mm^2] \quad (3)$$

Po uwzględnieniu kąta między przeciwległymi ścianami końcówki penetratora $\alpha = 136^\circ$ oraz wartości obciążenia $P = 2$ [N] twardość nasion możemy obliczyć:

$$HV2 = 0,0757 \cdot h^{-2} \quad [N/mm^2] \quad (4)$$

Przed przystąpieniem do badań właściwych - w celu wyeliminowania zjawiska pelzania - wykonano pomiary wstępne. Materiał badawczy stopniowo nawilżano obciążając każdy rodzaj nasion przy różnych poziomach zawartości wody. Pomiar czasu zagłębienia się penetratora w materiał wykonywano do momentu ustalenia się końcówki wglębniaka na stałym poziomie - o czym sygnalizowała stała wartość odkształcenia wyświetlana na ekranie czujnika.

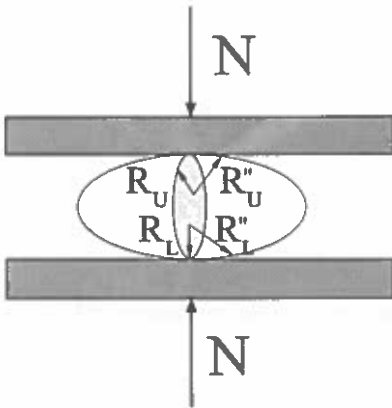
Badania właściwe rozpoczęto od pomiaru twardości materiału powietrznie suchego (zawartość wody około 0,11 kg/kg s.m.). Po przeprowadzeniu pomiarów ziarno nawilżano w szczelnych pojemnikach przez 48 godzin okresowo mieszając w celu uzyskania maksymalnej zawartości wody (0,35 kg/kg s.m.). Następnie próbki ziarna przesuszano na sitach laboratoryjnych i przeprowadzano pomiary

twierdności przy kolejnych poziomach zawartości wody: 0,28; 0,22; 0,16 kg/kg s.m.

Pomiary zawartości wody w ziarnie wykonywane były przy użyciu wagosuszarki typu WPE-300S. Pomiary przeprowadzono na 2,5 gramowych próbkach zmielonego ziarna według normy PN - 91/A - 74010 w temperaturze 130 °C w czasie 11 minut przy czasie próbkowania 10 sekund.

Pomiar sprężystości

Ze względu na brak jakichkolwiek norm krajowych odnośnie sposobu przeprowadzania pomiaru modułu sprężystości w prowadzonych badaniach autorzy niniejszej pracy oparli się na zaleceniach ASAE [8]. Moduł Younga wyznaczono ściskając nasiona pomiędzy dwoma równoległymi płytkami (Rys. 3).



Rys. 3. Promienie krzywizny powierzchni w punktach styku: a – ziarno pszenicy, b – ziarno symetryczne.

Fig. 3. Plane curvature radii in the contact points: a – wheat grain, b – symmetrical seed.

Wówczas wzór na moduł sprężystości podłużnej przyjmie postać [1]:

$$E = \frac{0,338 \cdot N \cdot (1 - \nu^2)}{\Delta L^{\frac{3}{2}}} \cdot \left[K_U \cdot \left(\frac{1}{R_U} + \frac{1}{R_U''} \right)^{\frac{1}{3}} + K_L \cdot \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_L''} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

gdzie: E - moduł Younga [Pa],

N - siła nacisku [N],

ΔL - odkształcenie liniowe [m],

K_U - stała [4],

$$K_U = \left(\cos \theta = \frac{\frac{1}{R_U} - \frac{1}{R_U''}}{\frac{1}{R_U} + \frac{1}{R_U''}} \right)$$

R_U , R_U'' - promienie krzywizny powierzchni w punkcie styku z górną płytka dociskową, w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach [m],

ν - współczynnik Poissona, $\nu = 0,42$ [1],

K_L - stała [4],

$$K_L = f \left(\cos \theta = \frac{\frac{1}{R_L} - \frac{1}{R_L''}}{\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_L''}} \right)$$

R_L , R_L'' - promienie krzywizny powierzchni w punkcie styku z dolną płytka dociskową, w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach [m].

W przypadku nasion peluski Perkoz przyjęto, że mają one kształt zbliżony do kuli. Można wówczas przyjąć, że w przekroju poprzecznym promień

krzywizny wynosi $R_U \approx \frac{H}{2}$, $R_L \approx \infty$ a w przekroju podłużnym $R_U' \approx \frac{H^2 + L^2 / 4}{2H}$,

$R_L'' \approx \infty$.

A zatem wzór na moduł sprężystości przyjmie postać [8]:

$$E = \frac{0,114 \cdot N}{\Delta L^{\frac{3}{2}}} \cdot K \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (8 \cdot H^2 + L^2)}{4 \cdot H^3 + H \cdot L^2}} \quad (6)$$

gdzie: H - wysokość ziarna [m],

L - długość ziarna [m],

$$K' - \text{stała}, K' = K_U^{1/2} = \left(f \left(\cos \theta = \frac{L^2}{2 \cdot (8 \cdot H^2 + L^2)} \right) \right)^{1/2}$$

Natomiast w przypadku nasion fasoli można przyjąć, że promienie krzywizn R_1 i R_2 są sobie odpowiednio równe. Zakładając, że $R_1 = \frac{H}{4}$ oraz $R_2 = \frac{H^2 + L^2}{4 \cdot H}$ moduł Younga możemy obliczyć ze wzoru [9]:

$$E = \frac{0,643 \cdot N}{\Delta L^{\frac{3}{2}}} \cdot K'' \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot H^2 + L^2}{4 \cdot H}} \quad (7)$$

$$\text{gdzie: } K'' = K^{3/2} = \left(f \left(\cos \theta = \frac{L^2}{4H^2 + L^2} \right) \right)^{3/2}$$

WYNIKI BADAŃ

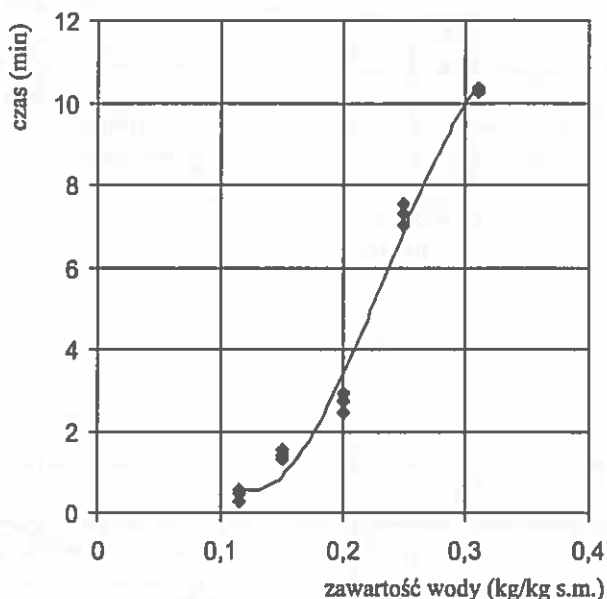
Przeprowadzone badania wstępne miały za zadanie określenie czasu wykonania pomiaru. Jak zilustrowano to przykładowo na rysunku 4 dla peluszki, w miarę wzrostu zawartości wody w ziarnie wydłużał się czas niezbędny do prawidłowego wykonania pomiaru. Tendencja ta była jednakowa dla wszystkich badanych materiałów. Wykonano test Duncana, który wykazał iż dla czynnika "czas" utworzone zostały grupy homogeniczne dla średnich powyżej 0,35 zawartości wody [kg/kg s.m.]. W związku z powyższym w celu ujednoczenia pomiarów do dalszych badań przyjęto maksymalny czas penetracji. Wystąpił on w przypadku nasion łubinu i wynosił 15 minut.

Uzyskane wyniki pomiarów twardości opracowano statystycznie. Przeprowadzone testy wykazały istotny wpływ zawartości wody oraz rodzaju materiału na jego twardość. Stwierdzono również istnienie interakcji drugiego rzędu pomiędzy odmianą i zawartością wody.

Przeprowadzono estymację nieliniową, w wyniku której największą wierność dopasowania (oceniającą poprzez wartość współczynnika determinacji) krzywej teoretycznej do wyników doświadczenia uzyskano dla modelu potęgowego:

$$E = a \cdot HV^b \text{ [MPa]} \quad (8)$$

gdzie: E - moduł Younga [MPa];
 HV - twardość [N/mm^2];
 a, b - stałe.



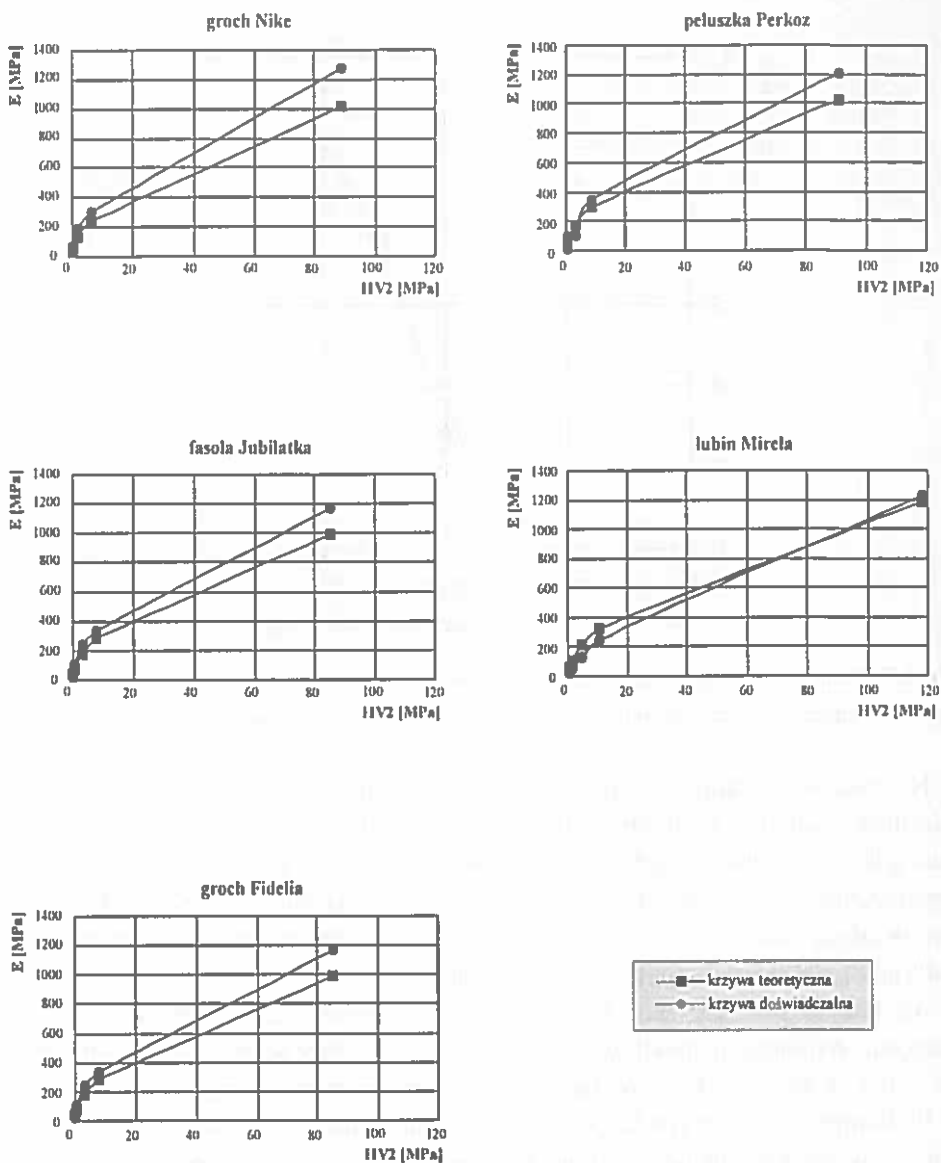
Rys. 4. Zależność czasu penetracji od zawartości wody w ziarnie.

Fig. 4. Dependency of penetration time in relation to water content in a seed.

Na rysunku 5 zamieszczono krzywe teoretyczne i doświadczalne obrazujące zależność między modułem sprężystości a twardością badanych nasion. Niewielka odległość między uzyskanymi krzywymi (co sugerował wysoki współczynnik determinacji) wskazuje na ścisłe powiązanie między sprężystością i twardością nasion oraz potwierdza możliwość prognozowania sprężystości materiału roślinnego na podstawie jego twardości.

Analizując przebieg tych krzywych można stwierdzić, że spadek twardości następuje najbardziej gwałtownie dla zawartości wody w przedziale pomiędzy 0,11 i 0,22 kg/kg s.m. Powyżej tej zawartości twardość stabilizuje się.

Podobnie jak w przypadku twardości ziarna, zaobserwować można wyraźną różnicę w tempie spadku modułu Younga przy niskiej i wysokiej zawartości wody. W przedziale od 0,11 do 0,22 kg/kg s.m. nawet niewielki wzrost zawartości wody powoduje spadek modułu Younga, natomiast powyżej tej granicy (0,22 kg/kg s.m.) następuje stabilizacja modułu sprężystości podłużnej. Jest to wynikiem zmiany właściwości materiału ze sprężysto-plastycznych na lekko-plastyczno-sprężyste.



Rys. 5. Krzywe teoretyczne i doświadczalne obrazujące zależność między modulem sprężystości a twardością.

Fig. 5. Theoretical and experimental curves illustrating the dependency between elasticity modulus and hardness.

Przeprowadzono również zbiorczą estymację dla wszystkich badanych odmian, dla której uzyskano $a = 91,55 \pm 6,635$, $b = 0,536 \pm 0,016$. Wysoka wartość współczynnika determinacji ($R^2 = 94,94\%$) wskazuje na to, iż mimo stwierdzenia różnic odmianowych występujących w przypadku twardości oraz modułu sprężystości nasion, zależność między wymienionymi czynnikami jest podobna dla każdej odmiany. Można więc uznać, że poprzez prosty pomiar twardości materiału (wg zaprezentowanej metody) możliwe jest obliczenie sprężystości nasion bez konieczności dokonywania pomiarów jego geometrii. Jest to znaczne ułatwienie przeprowadzania tego typu badań.

WNIOSKI

- 1 Na podstawie badań wstępnych ustalono, że podczas pomiaru twardości ziarnistych materiałów roślinnych niezbędne jest obciążenie materiału przez minimum 15 minut.
- 2 Stwierdzono, że zawartość wody oraz cechy odmianowe w podobny sposób wpływają istotnie zarówno na twardość jak i sprężystość ziarnistych materiałów roślinnych.
- 3 Badania wykazały, iż wzrost zawartości wody w badanym materiale ziarnistym powodował obniżenie jego sprężystości i twardości. Proces ten zaznaczył się szczególnie wyraźnie przy zawartości wody poniżej 0,22 kg/kg s.m.
- 4 Stwierdzono, iż w przypadku badanych materiałów zależność modułu Younga E od twardości materiału HV można opisać równaniem potęgowym w postaci:
 $E = 91,55 HV^{0,536}$ (przy $R^2 = 94,94\%$).
- 5 Wyniki przeprowadzonej analizy regresji wskazują iż w przyszłych badaniach wytrzymałościowych możliwe będzie dokonanie oceny sprężystości materiału roślinnego poprzez pomiar jego twardości.

PIŚMIENNICTWO

1. Arnold P. C., Roberts A. W.: Fundamental aspects of load-deformation behaviour of wheat grains. Trans. Of the ASAE 12(1), 104-108, 1969.
2. Gąsiorowski H., Kołodziejczyk P.: Mikrotwardość ziarna żyta. Przegląd Zbożowo – Młynarski nr 5 - 6, str. 9-12 i 19, 1990.

3. Koper R.: Właściwości mechaniczne ziarna i źdźbła pszenicy wyznaczone metodą interferencji holograficznej i elastooptyki. Rozprawa habilitacyjna. AR w Lublinie, maszynopis, 1980.
4. Kozma A., Cunningham H.: Tables for calculating the compressive surface stresses and deflections in the contact of two solid elastic bodies where principal plants of curvature do not coincide. Journal of Industrial Mathematics, Detroit, MI, 12(1), 31-40, 1962.
5. Obuchowski W., Gąsiorowski H., Kołodziejczyk P.: Twardość ziarna pszenicy jako kryterium jego jakości. Postępy Nauk Rolniczych, nr 5, 97-108, 1981.
6. Obuchowski W.: Twardość ziarna pszenicy: znaczenie technologiczne i czynniki wpływające na tę własność. Roczniki AR w Poznaniu, z. 152, 1-56, 1985.
7. Soszyńska M., Cacek-Pietrzak G.: Twardość ziarna pszenicy jako kryterium oceny jego jakości. Przegląd Zbożowo-Młynarski, nr 2-3, 7-8, 1992.
8. Standards of the ASAE 1998.
9. Ślipek Z., Kaczorowski J., Frączek J.: Analiza teoretyczno-doświadczalna tarcia materiałów roślinnych. Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków, 1999.

ELASTICITY EVALUATION OF SELECTED SEEDS ON THE BASIS OF THEIR HARDNESS MEASUREMENT

J. Frączek, T. Hebda

Department of Machine Design, University of Agriculture, Balicka 104, 30-149 Kraków

Summary: The objective of the presented work has consisted in the attempt to evaluate elasticity of selected seeds, relying on the measurement of their hardness. Hardness has been measured using a modified Vickers method. During the measurement, instead of determining the indent size, maximum depth of penetrator sinking into the biological material was measured. Minimum necessary loading time was determined to be 15 minutes. The investigations of the elasticity modulus were conducted in accordance with ASAE recommendations. The conducted statistical tests indicated significant influence of the water content and kind of the material on its hardness. Existence of second order interaction between the shape factor and the water content was found. Non-linear estimation according to various models has been conducted. Relatively, the highest best fit of the theoretical curve to experimental results was obtained in the exponential model.

Keywords: hardness, Young's modulus.