Acta Agrophysica, 2003, 93, 135-144

WYZNACZANIE PODSTAWOWYCH WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH ZIARNA PSZENICY

Wanda Woźniak

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27
e-mail: wanda@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie. W pracy zaprezentowano przegląd metod stosowanych do wyznaczania modułu sprężystości ziarna zbóż. Przedstawiono metodykę badań wytrzymałości ziarna pszenicy, modułu sprężystości, odkształcenia i pracy właściwej podczas jednoosiowego ściskania próbek rdzeniowych. Stwierdzono, że zaproponowany sposób wyznaczania podstawowych parametrów mechanicznych ziarna jest poprawny i daje wyniki zbliżone do wyników uzyskanych przez innych autorów.

Słowa kluczowe: wytrzymałość, moduł sprężystości, odkształcenie, praca właściwa, ziarno pszenicy.

WSTĘP

Rozwój mechanizacji rolnictwa i przemysłu przetwórczego powoduje, że nieodzownym staje się poznanie właściwości fizycznych ziarna zbóż. Rozwiązania konstrukcyjne maszyn muszą uwzględniać również właściwości fizyczne, a szczególnie właściwości mechaniczne obrabianego materiału. Nie do pominięcia jest także problem strat wynikających z uszkodzeń wywołanych wskutek kontaktu ziarna z elementami roboczymi maszyn. Jednak sama znajomość cech fizycznych nie wystarcza. Ziarno zbóż, jako materiał biologicznie żywy, ulega zmianom pod wpływem wielu czynników zewnętrznych i wewnętrznych. Tak więc przy projektowaniu urządzeń rolniczych, czy też doborze ich parametrów obsługi, konieczna jest zarówno znajomość zmienności właściwości fizycznych ziarna jak i jego przeszłość.

PRZEGLĄD METOD

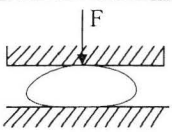
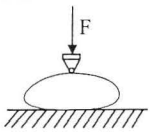
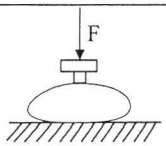
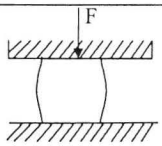
Ziarno zbóż w zależności od poziomu wilgotności może przyjmować postać ciała sprężystego (materiał suchy) poprzez lepko-sprężyste do plastycznego, w przypadku wysokiego uwodnienia. Przy normalnych warunkach przechowywania ziarno, podobnie jak inne produkty rolne, jest z natury ciałem lepko-sprężystym. Charakterystykę cech lepko-sprężystych produktów rolniczych wyznacza się na podstawie podstawowych testów mechanicznych.

Z szerokiego przeglądu literatury Kopera [7-10] oraz Kopera i Grundasa [11] wynika, że intensywny rozwój badań właściwości mechanicznych ziarna przypada na ostatnie trzydziestolecie. Badania prowadzone były w kilku kierunkach, z których najważniejszy skupił się na wyznaczaniu stałych fizycznych, określających wytrzymałość ziarna. Metodyka tych badań wywodziła się z teorii wytrzymałości materiałów konstrukcyjnych. Jednak małe wymiary i nieregularny kształt badanego obiektu dostarczają wielu trudności pomiarowych, które nie występują w przypadku materiałów konstrukcyjnych. Trudności metodyczne wynikają również z niejednorodności i anizotropii ziarniaka, jak również z tego, że na wielkość parametrów mechanicznych wpływają czynniki takie, jak: wilgotność i temperatura ziarna, cechy odmianowe, warunki uprawy, itp.

Właściwości sprężyste materiału charakteryzuje moduł sprężystości. Stąd też większość prac dotycząca mechanicznych właściwości materiałów rolniczych skupiała się na wyznaczaniu tej wielkości [1,4,5,6,13-16]. Do najczęściej stosowanych metod określania modułu sprężystości ziarna zaliczyć można [13]:

I. ściskanie ziarna między płaskimi, równoległymi płytkami; moduł sprężystości wyznaczany jest wtedy w oparciu o teorię Hertza,
II. penetrację kulistego wgłębnika o małej, w porównaniu z wymiarami ziarna, średnicy; w tym przypadku do obliczeń stosuje się teorię Hertza,
III. penetrację za pomocą cylindrycznego wgłębnika o małej średnicy i płaskiej podstawie; w tej metodzie do obliczeń modułu stosuje się teorię Boussinesq'a dla półprzestrzeni,
IV. jednoosiowe ściskanie między dwoma równoległymi płaskimi płytkami próbek rdzeniowych wyciętych z ziarna; moduł sprężystości wyznacza się wówczas z prawa Hooke'a.

Rysunek 1 prezentuje cztery metody jednoosiowego ściskania ziarna.

I	II	III	IV
 Teoria Hertza Hertz's theory	 Teoria Hertza Hertz's theory	 Teoria Boussinesq'a Boussinesq theory	 Prawo Hooke'a Hooke's law
E = 2898 MPa	E = 5699 MPa	E = 1078 MPa	E = 1579 MPa

Rys. 1. Cztery metody jednoosiowego ściskania ziarna pszenicy [13]
Fig. 1. Four methods of uniaxial compression of wheat grain [13]

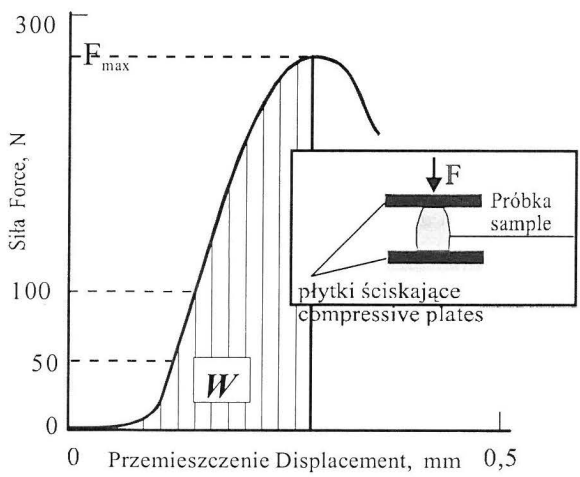
Shelef i Mohsenin [13] wyznaczyli moduł Younga ziarna pszenicy, stosując cztery z przedstawionych metod. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej Instron. Eksperyment przygotowano bardzo starannie, utrzymując stałą temperaturą i wilgotność względną powietrza, tak aby nawet przy długotrwałych pomiarach ziarno nie zmieniało wilgotności, która jest głównym czynnikiem wpływającym na jego cechy mechaniczne. Zakres wartości modułu sprężystości dla zastosowanych metod był bardzo duży: od 1078 MPa przy obciążaniu wgłębnikiem walcowym o płaskiej podstawie do 5699 MPa przy obciążaniu wgłębnikiem kulkowym. W podsumowaniu oceny przydatności opisywanych metod wyrazili pogląd, że do stwierdzenia, która z metod pomiarowych powinna być stosowana, potrzebne są dalsze badania. Wydaje się jednak, że wyniki najbardziej zbliżone do rzeczywistych i obarczone najmniejszymi błędami uzyskuje się stosując metody wykorzystujące prawo Hooke'a. Metody te są proste zarówno pod względem pomiarowym jak i obliczeniowym. Dają ponadto możliwość utrzymania dokładnego kontaktu ściętych powierzchni z płytami obciążającymi. Kształt przekroju ziarna nie wpływa na wyniki pomiarów, a ich interpretacja nie budzi zastrzeżeń. Zastrzeżenia może budzić konieczność pozbawienia ziarniaka końców, co osłabia jego konstrukcję i może obniżać wytrzymałość próbki. Zachowując jednak centralną część ziarniaka, zawierającą substancję pokarmową należy przypuszczać, że obcięcie zarodka i bródki nie powoduje istotnego obniżenie wytrzymałości materiału [3,6]. Jednak uwzględniając anizotropowość materiału, należy pokreślić, że w metodzie tej wyznaczany jest moduł sprężystości w kierunku osi podłużnej ziarna, podczas gdy w innych metodach badany jest

moduł w kierunku prostopadłym do osi podłużnej. Pomimo tych zastrzeżeń wydaje się, że określanie modułu sprężystości z prawa Hooke'a jest najbardziej wiarygodne z uwagi na to, że eliminowany jest zarówno wpływ geometrii ziarna jak i kontakt chropowatych powierzchni okrywy owoco-nasiennej z płytami obciążającymi. Za przydatnością tej metody przemawia również fakt, że nie ma konieczności stosowania dużych przybliżeń geometrycznych, co jest niezbędne w metodach opartych o teorię Hertza i Boussinesq'a.

Koper [7] zaproponował wyznaczenie właściwości mechanicznych ziarna pszenicy przy użyciu metod interferometrii holograficznej, elastooptyki i mikroskopii pomiarowej.

METODYKA BADAŃ

Do wyznaczenia podstawowych parametrów mechanicznych ziarna zastosowano jednoosiowe ściskanie próbek rdzeniowych, wyciętych z ziarna, między dwoma równoległymi płaskimi płytkami. Testy wykonano przy pomocy maszyny wytrzymałościowej Instron, model 6022, stosując głowicę tensometryczną o zakresie 1 kN i prędkość przemieszczenia 0,1 mm·min^{-1}. Rejestrowano siłę w funkcji przemieszczenia (rys. 2). Siłę wyznaczano z dokładnością ±1 N, a przemieszczenie ±0,01mm.



Rys. 2. Krzywa siła-przemieszczenie w teście jednoosiowego ściskania ziarniaka pozbawionego końców

Fig. 2. Force-displacement scurve for uniaxial compression of core specimens between parallel flat plates

Wytrzymałość próbki σ_{max} (maksymalne naprężenie ściskające) wyznaczano ze wzoru [12,13]:

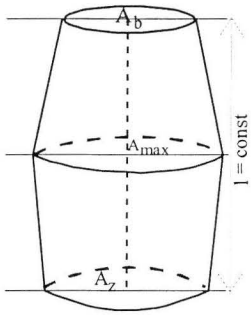
$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{\overline{A}} \tag{1}$$

gdzie: F_{max} – maksymalna siła, N;
$\overline{A}$ – średnie pole powierzchni przekroju ziarna, mm^2.

Traktując ziarniak pozbawiony końców jako dwa stożki nieobrotowe złożone większymi podstawami (rys. 3), średnie pole powierzchni przekroju określano ze wzoru:

$$\overline{A} = \frac{A_z + 2A_{max} + A_b}{4} \tag{2}$$

gdzie: A_z, A_b – pole powierzchni podstaw (od strony zarodka i bródki), mm^2;
A_{max} – pole powierzchni największego przekroju ziarna, mm^2.



Rys. 3. Ziarniak pozbawiony końców jako dwa stożki nieobrotowe
Fig. 3. A truncated kernel presented as two nonrotational cones

Moduł sprężystości E wyznaczano z prawa Hooke'a:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F \cdot l_o}{\overline{A} \cdot \Delta l} \tag{3}$$

gdzie: E – moduł sprężystości, MPa;
σ – naprężenie ściskające, MPa;
ε – odkształcenie, %;

F – siła ściskająca, N;
l_o – wysokość początkowa próbki, mm;
Δl – zmiana wysokości próbki, mm;
$\overline{A}$ – średnie pole powierzchni przekroju próbki, mm^2.

Praca odkształcenia

Całkowita praca deformacji do momentu wyczerpania wytrzymałości σ_{max} wynosi:

$$W = \int_0^{F_{max}} F dl \tag{4}$$

Pracę odkształcenia wyraża graficznie pole obszaru zawartego, na wykresie $F - \Delta l$ (rys.2), między przebiegiem siły a osią odciętych. Praca odkształcenia zależy od wymiarów próbki. Aby scharakteryzować sam materiał, wprowadza się pojęcie **pracy właściwej** w nazywanej też **energią jednostkową,** która równa jest pracy odkształcenia przypadającej na jednostkę objętości próbki.

Pracę właściwą w wyznaczano ze wzoru:

$$w = \frac{W}{V} \tag{9}$$

gdzie: W – praca odkształcenia, V – objętość ziarniaka pozbawionego końców.

Przy założeniu, że objętość ziarniaka V, równa jest objętości dwóch stożków nieobrotowych, złączonych większymi podstawami:

$$V = \frac{1}{3} l_o (A_z + A_b + 2A_{sr} + \sqrt{A_z A_{sr}} + \sqrt{A_b A_{sr}}) \tag{10}$$

pracę właściwą wyznaczano ze wzoru:

$$w = \frac{3W}{l_o (A_z + A_b + 2A_{sr} + \sqrt{A_z A_{sr}} + \sqrt{A_b A_{sr}}} \tag{11}$$

DYSKUSJA

W teście jednoosiowego ściskania wycinków ziarniaka wyznaczono podstawowe właściwości mechaniczne ziarna pszenicy jarej odmiany Henika i pszenicy ozimej Almari. W przypadku pszenicy Henika badano ziarniaki o typowo szklistym i mączystym bielmie, które zostały wyselekcjonowane z próby umieszczonej na szklanej płycie, podświetlonej od dołu białym światłem. W tabeli 1 przedstawiono wartości średnie (z 30 powtórzeń) wytrzymałości, odkształcenia, pracy właściwej i modułu sprężystości ziarna o wilgotność 10-11%.

Tabela 1. Podstawowe właściwości mechaniczne ziarna pszenicy odmiany Henika i Almari wyznaczone w teście jednoosiowego ściskania wycinków ziarniaka
Table 1. Basic mechanical properties of wheat grain cv. Henika and Almari determined from uniaxial compression of core specimens between parallel flat plates

Odmiana Variety	E (MPa)	σ_{max} (MPa)	ε (%)	w (mJ·mm^{-3})
Henika (ziarniaki szkliste) (vitreous kernels)	1327	63,16	7,07	2,30
Henika (ziarniaki mączyste) mealy kernels)	1033	44,50	6,07	1,33
Almari	779	27,70	5,40	–

Glenn i in. [3] scharakteryzowali podstawowe właściwości mechaniczne bielma 37 odmian pszenicy (tab. 2). W teście jednoosiowego ściskania cylindrycznych wycinków bielma (1 mm x 3 mm) wyznaczyli wytrzymałość na ściskanie, odkształcenie, energię właściwą i moduł sprężystości.

Porównując dane zamieszczone w tabelach 1 i 2 można uznać, że zaproponowany sposób wyznaczania podstawowych parametrów mechanicznych ziarna jest poprawny i daje wyniki zbliżone do wyników uzyskanych przez innych autorów.

Tabela 1. Fizyczne właściwości bielma 37 odmian pszenicy. Parametry wyznaczano z krzywych siła-deformacja w teście jednoosiowego ściskania [3]

Table 1. Physical properties of endosperm from 37 wheat varieties. Parameters were derived from compression force-deformation curves [3]

Odmiana Variety	Klasa Class	W_{max} (MJ·m^{-3})		σ_{max} (MPa)		E (GPa)		ε_{max} (%)	
		Średnia Average	Od. stand. S.D.	Średnia Average	Od. stand. S.D.	Średnia Average	Od. stand. S.D.	Średnia Average	Od. stand. S.D.
Becker	SRW	0,20	0,029	11,6	1,1	0,63	0,09	3,00	0,46
Severn	SRW	0,25	0,076	16,4	4,3	0,79	0,21	3,05	0,28
Penewawa	SWS	0,33	0,14	19,3	3,3	0,91	0,14	3,22	0,42
Rulet	SRW	0,49	0,13	26,8	4,2	0,98	0,08	3,53	0,47
Logan	SRW	0,46	0,12	23,9	6,2	0,97	0,23	3,44	0,45
Caldwell	SRW	0,16	0,057	11,8	2,4	0,62	0,08	2,71	0,48
Edwall	SWS	0,35	0,16	21,7	7,8	0,94	0,23	2,94	0,51
Frankenmuth	SWW	0,41	0,11	25,1	5,8	1,20	0,20	3,19	0,31
Crew	CLB	0,67	0,12	39,4	8,8	1,30	0,19	4,91	1,25
Arthur	SRW	0,69	0,11	35,4	5,2	1,20	0,37	3,84	0,51
(107)	SRW	0,38	0,11	24,0	6,5	1,10	0,22	3,34	0,13
Moro	CLB	0,54	0,27	29,4	4,0	1,0	0,10	3,50	0,51
Średnia		0,41		23,7		0,97		3,39	
Chisholm	HRW	1,15	0,44	37,2	8,5	1,50	0,17	4,85	0,80
Oslo	HRS	1,09	0,28	39,2	6,6	1,60	0,17	4,47	069
Bounty 203	HRW	1,84	0,79	40,6	9,0	1,40	0,37	5,69	0,72
Brule	HRW	1,07	0,05	36,7	2,7	1,20	0,12	5,25	0,24
Lindon	HRW	1,22	0,80	36,2	9,5	1,30	0,05	4,91	1,20
Arkan	HRW	1,46	0,75	39,2	5,5	1,60	0,37	5,20	1,16
Newton	HRW	1,92	0,61	47,0	3,0	1,60	0,27	6,52	1,47
(101)*	HRW	2,14	0,80	48,6	4,6	0,60	0,21	6,44	1,41
(120)*	HRW	1,46	0,59	44,6	7,7	1,90	0,12	5,28	091
Larned	HRW	1,87	0,76	44,7	8,4	1,40	0,26	5,96	1,32
Klasic	HW	1,38	0,39	45,1	4,8	1,60	0,29	4,74	0,89
Hawk	HRW	0,90	0,34	38,5	5,2	1,60	0,23	3,85	0,79
(110)*	HRS	2,77	0,93	60,7	6,3	1,70	0,24	6,21	1,28
(132)*	HRS	2,06	0,88	48,5	6,3	1,80	0,25	5,47	1,57
(133)*	HRS	1,77	0,35	52,0	3,4	1,80	0,27	5,54	1,53
Bennett	HRS	1,44	0,47	43,7	1,3	1,70	0,24	5,67	1,22
Hatton	HRW	1,88	0,68	49,1	5,3	1,60	0,16	5,90	0,99
Len	HRW	2,43	0,99	54,1	3,5	1,70	0,34	6,43	1,79
Butte	HRS	3,00	0,71	61,3	2,5	1,80	0,15	7,11	1,24
Średnia	HRW	1,71		45,6		1,6		5,55	
Cando	DUR	6,03	1,58	55,9	3,4	1,50	0,10	12,91	2,51
Vic	DUR	6,10	1,87	59,5	1,9	1,50	0,18	12,58	3,05
(127)*	DUR	6,39	3,33	60,6	1,4	1,60	0,25	11,78	4,28
(134)*	DUR	4,83	1,39	65,2	5,0	1,80	0,08	9,61	2,70
(128)*	DUR	4,64	1,64	68,2	6,4	2,20	0,48	9,37	3,69
Aloura	DUR	8,13	1,97	61,2	7,4	1,40	0,23	17,68	5,56
Średnia		6,02		66,2		1,67		12,35	

* – rody, SRW – miękka czerwona ozima, HRW – twarda czerwona ozima, SWW – miękka biała ozima, SWS – miękka biała jara, HRS – twarda czerwona jara, CLB – miękka (Club), DUR – Durum

PIŚMIENNICTWO

1. **Arnold P.C., Mohsenin N.N.:** Proposed techniques for axial compression tests on intact agricultural products of convex shape. Trans. ASAE, 14(1), 78-84, 1971.
2. **Fortes M., Okos M. R.:** Changes in physical properties of corn during drying. Trans. ASAE, 23(4), 1004-1008, 1980.
3. **Glenn G. M., Younce F. L., Pitts M. J.:** Fundamental physical properties characterizing the hardness of wheat endosperm. Journal of Cereal Science, 13, 179-194, 1991.
4. **Grundas S., Hnilica P.:** A porosimetric method for the study of mechanical damage of wheat grain endosperm. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 304, 113-121, 1985
5. **Grundas S., Hnilica P.:** Typy endospermu ziarna pszenicy a jego właściwości mechaniczne. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 320, 127-134, 1987.
6. **Kang Y. S., Spillman C. K. Steele J. L., Chung D. S.:** Mechanical properties of wheat. Trans. ASAE, 38(2), 573-578, 1995.
7. **Koper R.:** Właściwości mechaniczne ziarna i źdźbła pszenicy wyznaczane metodą interferometrii holograficznej i elastooptyki. Rozprawa habilitacyjna, Instytut Mechanizacji Rolnictwa, Wydział Techniki Rolniczej Akademii Rolniczej w Lublinie, Lublin 1980.
8. **Koper R.:** Próba wykorzystania metody interferometrii holograficznej do wyznaczania modułu sprężystości podłużnej ziarna pszenicy. Rocz. Nauk Roln., C-74-3, 39-46, 1980.
9. **Koper R.:** Badania cech mechanicznych ziarna pszenicy cv. Grana przy zastosowaniu interferometrii holograficznej i mikroskopii pomiarowej. Rocz. Nauk Roln., C-74-4, 155-168, 1980.
10. **Koper R.:** Nowoczesne metody badań właściwości mechanicznych ziarna zbóż. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 320, 29-41, 1987.
11. **Koper R., Grundas S.:** Moduł Younga i absorpcja barwnika w ziarnie pszenicy o zróżnicowanej zawartości białka. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 320, 151-157, 1987.
12. **Mohsenin N. N.:** Electromagnetic radiation properties of food and agricultural products. Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., New York, 1984.
13. **Shelef L., Mohsenin N.N.:** Evaluation of the modulus of elasticity of wheat grain. Cereal Chemistry, 44/4, 392-402, 1967.
14. **Staszczak Z.:** Właściwości reologiczne ziarna pszenicy. Praca doktorska, Biblioteka AR, Lublin, 1978.
15. **Staszczak Z.:** Investigations of the linear elasticity coefficient of wheat grain with the method of stretching. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 203, 225-234, 1978.
16. **Zoerb G.C., Hall C.W.:** Some mechanical properties of grain. J. Agric. Eng. Res., 5, 1, 83-93, 1960.

DETERMINATION OF BASIC MECHANICAL PROPERTIES OF WHEAT GRAIN

Wanda Woźniak

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

Abstract. The paper presents a review of methods used for determination the modulus of elasticity of wheat grain. The method of investigation of strength, strain, modulus of elasticity and specific work during uniaxial compression of barrel-shaped core samples was presented. It was found that proposed procedure used for determination of basic mechanical properties of the grain is proper and corresponds to others authors results.

Keywords: compressive strength, modulus of elasticity, strain, specific work, wheat grain