

WPŁYW STRUKTURY WEWNĘTRZNEJ I WILGOTNOŚCI ZIARNA PSZENICY C_V GRANA
NA JEGO MODUŁ SPRĘŻYSTOŚCI

Roman Koper, Józef Kukiełka

Instytut Mechanizacji Rolnictwa AR w Lublinie

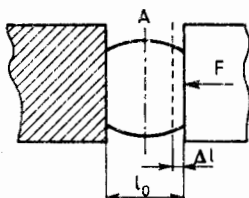
WSTĘP

Wprowadzana na coraz większą skalę mechanizacja zbioru, transportu i przechowywania ziarna zbóż wymaga znajomości podstawowych właściwości fizycznych pojedynczego ziarna. Wielkością fizyczną decydującą o odporności ziarna na odkształcenia mechaniczne, a zatem i na uszkodzenia, jest jego moduł sprężystości podłużnej [6]. Ziarna pszenicy ozimej C_V Grana charakteryzuje bardzo zróżnicowana struktura wewnętrzna [7], która w decydujący sposób wpływa na istnienie znacznego rozrzutu wartości modułu sprężystości podłużnej. Określenie tego modułu dla ziaren o strukturze szklistej, szklisto-mączystej i mączystej jest istotne z punktu widzenia techniki rolniczej.

MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono na ziarnach pszenicy ozimej C_V Grana, która pochodziła z poletek doświadczalnych RZD Felin. Materiał doświadczalny stanowiły trzy grupy ziaren zróżnicowane pod względem struktury wewnętrznej przekroju poprzecznego, którą oceniano metodą wizualną [1]. Grupę pierwszą (I) stanowiło 39 ziaren o strukturze szklistej, drugą (II) 31 ziaren o strukturze szklisto-mączystej, natomiast trzecią (III) 30 ziaren o strukturze mączystej. Czwartą grupę (IV) stanowiły wyniki badań uzyskane z trzech grup poprzednich połączone w całość. Każde ziarno badano pięciokrotnie przy różnych wartościach sił ściskających w zakresie od 30 N do 80 N. Liczebność poszczególnych grup jest różna z uwagi na to, że zaklasyfikowanie ziarna do określonej grupy odbywało się na podstawie jego przekroju poprzecznego i możliwe było dopiero po zakończeniu pomiarów. Ziarna z poszczególnych grup doświadczalnych badano przy następujących poziomach wilgotności: 10,8; 12,0; 12,8;

13,4; 15,5; 17,5 i 18,6%. W pracy wykorzystano metody interferometrii holograficznej i mikroskopii pomiarowej [3]. Pomiary wykonywano na próbkach ziarna (rys. 1), które stanowiły środkowe ich części powstałe w wyniku starannego i równoległego obciążenia końców ziarna w płaszczyznach prostopadłych do jego osi wzdłużnej. Tak przygotowana próbka była ściskana wzdłuż jej długości dwiema płaszczyznami równoległymi. Niewłaściwe przygotowanie lub nierównoległe ściskanie próbki ziarna z reguły powodowało wadliwy pomiar objawiający się „wywróceniem” lub „skrzywieniem” badanej próbki, którą w takim przypadku wykluczano z dalszej analizy. Ściskana podczas badań próbka ziarna pszenicy była odkształcana jednoosiowo w zakresie sprężystym. Kontrolę jednoosiowości stanu odkształcenia przeprowadzono za pomocą interferometru holograficznego, którego schemat przedstawiono i opisano w pracy [3].



Rys. 1. Schemat pomiarowy do określania modułu Younga próbki ziarna pszenicy

Badanie próbek ziarna w zakresie sprężystym było realne dzięki wysokiej czułości układu obciążającego, co wiązało się z możliwością stosowania sił o małych wartościach i nieprzekraczaniu niezbyt dokładnie znanej granicy sprężystości. Natomiast oceny jednorodności stanu odkształcenia dokonywano na podstawie interferogramów. Jako kryterium jednorodności przyjęto odchylenie się prążków interferogramu o $\pm 10^\circ$ od kierunku prostopadłego do wywoływanego odkształcenia. Próbki, dla których prążki interferogramu układały się pod kątem większym od krytycznego, wykluczano z dalszej analizy.

Dzięki spełnieniu dwóch, wyżej przedstawionych, podstawowych warunków przy ścisaniu, wartości modułów Younga badanych próbek ziarna określano na podstawie prawa Hooke'a.

$$E = \frac{F l_0}{A \Delta l}, \quad (1)$$

gdzie: F - siła ściskająca próbkę, mierzona od „napięcia wstępnego”, A - pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki, l_0 - długość początkowa próbki, mierzona pod „napięciem wstępnym”, Δl - zmiana długości badanej próbki.

Wartość siły ściskającej próbkę określano przy użyciu tensometrów elektrooporowych z dokładnością do 0,1 N. Długość początkową próbki mierzono za pomocą mikroskopu warsztatowego z dokładnością do 0,01 mm, natomiast pomiaru zmiany jej długości dokonywano za pomocą mikroskopu z okulem mikrometrycznym z dokładnością 0,3 μm . Założono, że badana próbka ziarna jest pryzmatyczna, a pole przekroju poprzecznego występujące we wzorze (1) obliczane jest w połowie jej długości. Wspomniane pole określano za pomocą planimetrowania zdjęcia przekroju poprzecznego próbki, wykonanego za pomocą aparatu fotograficznego zestawionego z obiektywem mikroskopowym przy powiększeniu 20x, z dokładnością do 0,2 mm². W celu określenia dokładności wyznaczanych modułów sprężystości istotne jest oszacowanie maksymalnych błędów pomiarowych, konstrukcja przedziałów ufności oraz obliczenie maksymalnych błędów aproksymacji.

Błąd pomiaru modułu Younga ziarna pszenicy wyznaczono metodą różniczkowania logarytmicznego. Po zlogarytmowaniu i zróżniczkowaniu równania (1) otrzymano wzór określający maksymalny błąd względny pomiaru

$$\frac{\Delta E}{E} = \left| \frac{\Delta F}{F} \right| + \left| \frac{\Delta l_0}{l_0} \right| + \left| \frac{\Delta A}{A} \right| + \left| \frac{\Delta(\Delta l)}{\Delta l} \right|. \quad (2)$$

Statystyczną ocenę przedziału ufności dla modułu Younga prowadzono na podstawie rozkładu t - Studenta [5]. Przedział ufności dla średniej m populacji otrzymano ze wzoru

$$P \left\{ \bar{X} + \frac{t\alpha S}{\sqrt{n-1}} < m < \bar{X} + \frac{t\alpha S}{\sqrt{n-1}} \right\} = 1 - \alpha, \quad (3)$$

przy czym przyjęto współczynnik ufności $1 - \alpha = 0,95$.

Przy opisie modułu Younga za pomocą równań aproksymacji występuje błąd aproksymacji. Jego miarą, dla określonej struktury i wilgotności ziarna, jest maksymalna różnica między wartościami otrzymanymi z badań eksperymentalnych a wartościami uzyskanymi z równań aproksymacji. Względną ocenę tego błędu określono wzorem

$$\delta_k = \max \left| \frac{E_{k,i}(W_i) - E_k(W_i)}{E_{k,i}(W_i)} \right|, \quad k = \text{I, II, III, IV}, \quad (4)$$

gdzie: δ_k - maksymalny względny błąd aproksymacji dla k -tej grupy doświadczalnej, $E_{k,i}(W_i)$ - wartości modułu Younga ziarna pszenicy otrzymane z badań eksperymentalnych dla k -tej grupy doświadczalnej oraz i -tej wilgotności, $E_k(W_i)$ - wartości

modułu Younga ziarna pszenicy uzyskane z równań aproksymacji dla k-tej grupy doświadczalnej oraz i-tej wilgotności.

W celu stwierdzenia znamienności różnic pomiędzy wartościami średnimi modułu Younga w poszczególnych grupach i dla badanych poziomów wilgotności w grupie zastosowano test t-Studenta, przyjmując jako kryterium zmienności $p < 0,05$.

T a b e l a 1

Zestawienie wartości modułu Younga w MPa dla ziarna pszenicy ozimej C_v Grana w zależności od jego struktury wewnętrznej i wilgotności (wartości średnie i błędy standardowe średniej)

\bar{E}	Struktura wewnętrzna ziarna (grupa)		
	I	II	III
10,8	823,0 ± 53,8▲	613,5 ± 11,5*	479,0 ± 21,0***
Wilgotność 12-12,8	701,2 ± 15,6▲▲▲▲	583,2 ± 14,6****	485,7 ± 20,3▲▲▲▲
13,4-15,5	525,6 ± 16,4▲▲	458,8 ± 1,6**	374,0 ± 7,7▲▲▲▲
ziarna w % 17,5	383,3 ± 13,4▲▲▲	306,6 ± 6,9***	260,0 ± 6,9▲▲▲
18,6	253,5 ± 22,5	213,6 ± 6,1	191,7 ± 6,8
E_k	604,7 ± 33,3▲▲▲▲	415,8 ± 33,2****	373,6 ± 25,1****

E_k - wartości średnie modułu Younga w MPa dla poszczególnych grup i błędy standardowe średniej, k=I, II, III

* $p < 0,05$

** $p < 0,02$ - Różnice statystycznie znamienne w stosunku

*** $p < 0,01$ do grupy I

**** $p < 0,001$

▲ $P < 0,05$

▲▲ $p < 0,02$ - Różnice statystycznie znamienne w stosunku

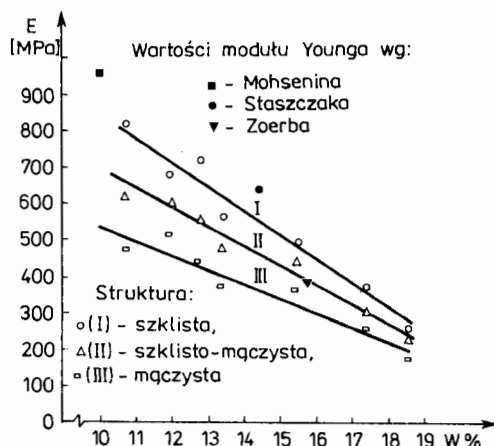
▲▲▲ $p < 0,01$ do grupy II

▲▲▲▲ $p < 0,001$

OMÓWIENIE WYNIKÓW I DYSKUSJA

Otrzymane wyniki badań wartości modułu sprężystości podłużnej ziarna pszenicy ozimej C_v Grana w zależności od struktury wewnętrznej przekroju poprzecznego i wilgotności zestawiono w tab. 1, podając wartości średnie i błędy standardowe średniej. W wyniku badań stwierdzono, że moduł Younga ziarna pszenicy systematycznie maleje ze wzrostem wilgotności i to niezależnie od struktury wewnętrznej ziarna, przy czym największy spadek wartości obserwuje się dla grupy ziaren o strukturze

szklistej, nieco mniejszy dla grupy szklisto-mączystej oraz najmniejszy dla grupy mączystej (rys. 2).



Rys. 2. Zależność modułu Younga ziarna pszenicy od jego struktury wewnętrznej i wilgotności

Dla ziaren o strukturze szklistej moduł Younga przyjmuje największą wartość średnią $823,0 \pm 53,8$ MPa dla wilgotności 10,8% oraz najmniejszą $253,5 \pm 22,5$ MPa dla wilgotności 18,6%, czyli ponad 3,2-krotnie maleje przy różnicy wilgotności 7,8%. Natomiast dla ziaren o strukturze szklisto-mączystej moduł przyjmuje największą wartość średnią równą $613,5 \pm 11,5$ MPa dla wilgotności 10,8% oraz najmniejszą $213,6 \pm 6,1$ MPa dla wilgotności 18,6%, czyli 2,8-krotnie maleje przy różnicy wilgotności 7,8%. Najniższe wartości modułu stwierdzono dla ziaren o strukturze mączystej, który osiągnął największą wartość średnią równą $479,0 \pm 21,0$ MPa dla wilgotności 10,8% oraz najmniejszą $191,7 \pm 6,8$ MPa dla wilgotności 18,6%, czyli 2,5-krotnie maleje przy różnicy wilgotności 7,8%.

Moduł Younga ziarna pszenicy zmieniał również wartości średnie w zależności od struktury wewnętrznej przekroju poprzecznego próbki i osiągnął największe wartości w grupie pierwszej ($604,7 \pm 33,3$ MPa), znacznie mniejsze w drugiej ($415,8 \pm 33,2$ MPa) oraz najmniejsze w trzeciej ($373,6 \pm 25,1$ MPa). Występujące zmiany okazały się wysoce istotne statystycznie ($p < 0,001$) między grupą pierwszą i drugą, pierwszą i trzecią oraz nieistotne między drugą i trzecią (tab. 1).

Badano również istotność różnic statystycznych modułu Younga ziarna pszenicy między poszczególnymi grupami doświadczalnymi dla kolejnych poziomów wilgotności. Ustalono, że wzrost wilgotności powoduje spadek istotności różnic statystycznych, a przy wilgotności 18,6% są one już nieistotne (tab. 1).

T a b e l a 2

Zestawienie równań aproksymacji, współczynników korelacji R_k oraz błędów aproksymacji δ_k , dla modułu Younga E_k ziarna pszenicy C_V Grana w zależności od jego struktury wewnętrznej i wilgotności

	Postać równania aproksymacji $E_k(W)$	R_k	δ_k
I	$E_I(W) = 1501,1 - 65,5 \cdot W$	0,9005	0,27
	$E_I(W) = 3168,1 \cdot \exp(-0,1247 \cdot W)$	0,9262	0,35
II	$E_{II}(W) = 1241,4(-53,8 \cdot W)$	0,9716	0,19
	$E_{II}(W) = 3259,9 \cdot \exp(-0,13912 \cdot W)$	0,9451	0,21
III	$E_{III}(W) = 946,7 - 40,0 \cdot W$	0,9395	0,21
	$E_{III}(W) = 2037,6 \cdot \exp(-0,12197 \cdot W)$	0,9504	0,19
IV	$E_{IV}(W) = 1315,5 - 57,9 \cdot W$	0,8356	0,58
	$E_{IV}(W) = 3125,8 \cdot \exp(-0,13579 \cdot W)$	0,8723	0,40

Moduł Younga ziarna pszenicy w zależności od jego wilgotności opisano, w poszczególnych grupach doświadczalnych, za pomocą równań aproksymacji liniowej i wykładniczej oraz wyznaczono odpowiednie współczynniki korelacji (tab. 2). W równaniach zestawionych w tab. 2 moduł Younga wyrażono w MPa a wilgotność w %.

Maksymalny, względny błąd pomiaru modułu Younga obliczony wg wzoru (2) nie przekracza 10%. Podstawiając do wzoru (3) wartości średnie i odchylenia standardowe modułu Younga z poszczególnych grup doświadczalnych, otrzymano następujące przedziały ufności: $534,4 < m_I < 673,9$; $345,1 < m_{II} < 486,5$; $310,0 < m_{III} < 27,2$; $437,3 < m_{IV} < 526,7$. Przy prawdopodobieństwie równym 0,95 otrzymano przedziały ufności szersze, niż wynosi maksymalny błąd obliczony wg wzoru (2), co świadczy o wystarczającej dokładności układu pomiarowego. Natomiast maksymalne, względne błędy aproksymacji, obliczone wg wzoru (4), zależą od badanej grupy doświadczalnej (tab. 2) i dla pierwszych trzech grup dają mniejsze zakresy wartości modułu Younga niż wynika to z odpowiednich przedziałów ufności, co świadczy o dobrej postaci równań aproksymacji. Połączenie wszystkich trzech grup w całość (grupa IV) zwiększa maksymalny względny błąd aproksymacji (tab. 2), który daje szerszy zakres wartości od oszacowanego przedziału ufności.

W literaturze dotyczącej właściwości sprężystych pojedynczego ziarna istnieje znaczny rozrzut wartości modułu Younga ziarna pszenicy, dochodzący do 1000%. Zbyt duża rozbieżność wyników uzyskanych przez różnych autorów wynika zarówno z niejednorodności, anizotropowości i wielkości badanego ziarna, jego skomplikowanej geometrii, jak i stosowanych technik pomiarowych. Najczęściej wyznacza się moduł

Younga na podstawie ściskania pojedynczych ziaren lub ich środkowej części, a interpretację uzyskanych wyników przeprowadza na podstawie teorii Hertza, Bous-sunesqa lub Hooke'a. Stąd też wyniki tych badań są bardzo zróżnicowane pod względem wartości i mają różny sens fizyczny, a praktyczne ich wykorzystanie należy wiązać z właściwym procesem technologicznym. O ile moduł Younga obliczony np. w teorii Hertza jest adekwatny dla jednych procesów technologicznych, to jednak dla innych bardziej reprezentatywny może być moduł obliczony na podstawie teorii Bous-sunesqa lub Hooke'a.

Staszczak [7] rozciągając lub ściskając ziarna pszenicy C_V Grana o wilgotności 14,5% otrzymał nieco wyższą wartość modułu Younga równą 657 MPa (rys. 2). Autor ten zaobserwował wpływ struktury wewnętrznej ziarna na wartość jego modułu, Kolowca i Ślipek [2] wykazali istotny wpływ struktury ziarna na jego wytrzymałość mechaniczną. Natomiast Mohsenin [4] badał ziarna pszenicy C_V Seneca o wilgotności 10%. Moduł Younga wyznaczany był na podstawie teorii Bous-sunesqa, przy czym jego wartości są również wyższe i wynoszą 980 MPa (rys. 2). Uzyskane przez nas wyniki modułu Younga ziarna pszenicy najbardziej porównywalne są z wynikami otrzymanymi przez Zoerba [8], który dla ziarna pszenicy C_V Soft-red o wilgotności 17,5% podał wartość równą 370 MPa (rys. 2).

WNIOSKI

Przedstawione wnioski dotyczą ziaren pszenicy ozimej C_V Grana w zakresie ich wilgotności od 10,8% do 18,6%. Przy wzroście wilgotności ziaren pszenicy występuje spadek wartości ich modułów Younga i to niezależnie od struktury wewnętrznej ziaren. Największy wpływ wilgotności obserwuje się dla ziaren o strukturze szklistej, a najmniejszy o strukturze mączystej.

Średnia wartość modułu Younga E_k ziaren pszenicy zależy istotnie od ich struktury wewnętrznej i wynosi: dla ziaren o strukturze szklistej $607,0 \pm 33,3$ MPa, szklisto-mączystej $415,8 \pm 33,2$ MPa oraz mączystej $373,6 \pm 25,1$ MPa. Moduł Younga ziarna pszenicy w zależności od jego wilgotności może być opisany, dla poszczególnych struktur ziarna, za pomocą równań aproksymacji liniowej $E(W) = A - BW$ lub wykładniczej $E(W) = A \exp(-BW)$ przy istotnych i wysokich współczynnikach korelacji oraz maksymalnych błędach aproksymacji mniejszych od odpowiednich przedziałów ufności. Brak rozgraniczenia ziarna pod względem struktury wewnętrznej zwiększa maksymalny względny błąd aproksymacji, który daje szerszy zakres wartości modułu od oszacowanego przedziału ufności. Wówczas zależność modułu od wilgotności lepiej niż liniowej opisuje funkcja wykładnicza, gdyż współczynnik korelacji jest wyższy, a błąd aproksymacji mniejszy.

Максимальny, względny błąd pomiaru modułu Younga ziarna pszenicy określony metodą różniczki zupełnej nie przekracza 10%. Błąd ten daje węższy zakres zmian wartości modułu, niż wynika to z przedziału ufnosci i maksymalnego błędu aproksymacji, co świadczy o wystarczającej dokładności układu pomiarowego. W miarę wzrostu wilgotności ziarna istotność różnic statystycznych modułu Younga pomiędzy poszczególnymi strukturami wewnętrznymi maleje, a przy wilgotności 18,6% różnice te są już nieistotne.

Reasumując powyższe wnioski należy stwierdzić, że wykazane różnice w wartościach modułu Younga, wynikające ze zróżnicowanej struktury wewnętrznej ziarna pszenicy C_V Grana, mogą mieć istotne znaczenie w procesach technologicznych przetworstwa i przechowania ziarna, gdzie wilgotność z reguły nie przekracza 18%, natomiast nie mają one większego znaczenia przy zbiorze ziarna, podczas którego wilgotność przekracza zwykle 18%.

PIŚMIENICTWO

1. Dorywalski J., Wojciechowicz M., Bartz J.: Metodyka oceny nasion Warszawa, PWRiL, 1964.
2. Kolowca J., Slipek Z.: Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 1978, 203, 41-44.
3. Koper R.: Roczn. Nauk Rol. 1980, ser. C-74-4, 155-168.
4. Mohsenin N. N.: Journal of Texture Studies, 1970, 1, 133-154.
5. Oktaba W.: Elementy statystyki matematycznej i metodyka doświadczalnictwa. Warszawa, PWN, 1966.
6. Shelf L., Mohsenin N. N.: Cereal Chemistry 1967, 44, 4.
7. Staszczak Z.: Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 1978, 203, 225-234.
8. Zoerb G.: Transactions of the ASAE 1967, 10, 100-113.

P. Koper, Ю. Кукелка

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ C_V ГРАНА НА ЕГО МОДУЛЬ УПРУГОСТИ

Резюме

В исследованиях выделили 3 экспериментальные группы зерен, дифференцированные по их внутренней структуре в диапазоне влажности 10,8-18,6%. Модуль Янга определяли из испытаний на сжатие отдельных зерен по закону Гука. Провели анализ измерительных и аппроксимационных ошибок, а также определили доверительные интервалы для полученных средних величин.

Статистический анализ показал, что величины модуля зависят существенно от внутренней структуры зерна. Однако с ростом его влажности существенность разниц уменьшается, а при влажности 18,6% они уже несущественны. Наибольшие величины модуля для определенного уровня влажности характеризуют зерна со стекловидной структурой, а наименьшие - со структурой мучнистой. Зависимость модуля Янга зерна пшеницы от его влажности описали при помощи уравнений линейной и показательной аппроксимаций при существенных и высоких коэффициентах корреляции.

R. Koper, J. Kukiełka

THE INFLUENCE OF INTERNAL STRUCTURE AND MOISTURE CONTENT OF GRANA
WHEAT GRAIN ON ITS ELASTICITY MODULUS

S u m m a r y

Three groups of wheat grain with a different internal structure were tested. The moisture of grains varied from 10,8% to 18,6%. Young's modulus was determined by compression tests on single grains according to Hooke's Law. Analysis of measurement and approximation errors was done. Confidence intervals were estimated for the mean values obtained.

Statistical analysis showed that values of elasticity modulus depended significantly on internal structure of grain. With the increasing moisture content, however, the significance of differences decreased and at 18,6% moisture level the differences were not significant. At given moisture level the values of modulus were the highest for the grains with glassy structure and the lowest for the grains with fluory structure. Dependence of wheat grain Young modulus on moisture content was described by equations of linear and exponential approximations at significant and high correlation coefficients.