

Grzegorz Szwed* , Elżbieta Kusińska**

ZMIANA NIEKTÓRYCH CECH GEOMETRYCZNYCH ZIARNIAKÓW PSZENICY W WYNIKU NIEKORZYSTNYCH WARUNKÓW PRZECHOWYWANIA

Streszczenie. Praca zawiera opis wpływu warunków przechowywania na zmiany geometryczne ziaren pszenicy. Badania prowadzono na ziarnach pszenicy jarej odmiany Kontesa o wilgotności 20%, które przechowywano przez 126 dni w ściśle określonej temperaturze i stanie naprężeń między ziarnami. Analizie poddano powierzchnię rzutów ziaren po procesie przechowywania, porównując je z analogicznymi powierzchniami rzutów ziaren przed przechowywaniem. Uwzględniono takie parametry powierzchni jak: największa i najmniejsza średnica, długość obwodu pola rzutu ziarna. Wykazano znaczący wpływ zadanych warunków przechowywania na mierzone parametry, wynikające z trwałego odkształcenia powierzchni przechowywanych ziaren.

Słowa kluczowe: pszenica, odkształcenie, naprężenie, przechowywanie

WSTĘP

Magazynowany materiał sypki w trakcie przechowywania ulega zagęszczaniu. Zagęszczanie, a co za tym idzie i zmiana porowatości jest wynikiem: sposobu napełniania silosu, wysokości warstwy oraz ruchów cieplnych elementów konstrukcyjnych (dotyczy to szczególnie silosów metalowych). O zagęszczeniu przechowywanej warstwy decydują również czynniki wewnętrzne, takie jak: kształt ziaren, możliwość wzajemnego przemieszczania ziaren ośrodka i zmiana ich orientacji, a także ich deformacja w wyniku istniejących naprężeń (dotyczy to szczególnie materiału pochodzenia biologicznego).

Deformacja ziaren powoduje zagęszczenie ośrodka, niezależnie od tego czy jest ona wynikiem odkształceń sprężystych, czy nieodwracalnych (trwałych).

Nieodwracalne odkształcenie ziaren jest skutkiem zachodzących zjawisk lepkosprężystych. Na ich wielkość mają wpływ wartość występujących naprężeń na powierzchni styku ziaren oraz stan reologiczny materiałów, z jakich są one zbudowane (zawartość wody, skład chemiczny) i oczywiście czas trwania procesu przechowywania.

* Doc. dr hab. Grzegorz Szwed, Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie

** Dr hab. Elżbieta Kusińska, Katedra Inżynierii i Maszyn Spożywczych Akademii Rolniczej w Lublinie

Zła izolacja wodna magazynu powoduje nawilgocenie przechowywanego zboża, a w końcu samozagrzewanie i zepsucie. Podobnie nierównomierne nagrzewanie lub ochładzanie różnych części magazynowanych partii zboża prowadzi do miejscowego zawilgocenia [Bulsiewicz i in. 1977]. W przypadku długiego okresu składowania ziarna o podwyższonej wilgotności siły spójności pomiędzy ziarnami mogą przybierać bardzo duże wartości, prowadząc w skrajnym przypadku do zlegiwania złoży. Jak podaje w swojej pracy Horabik [2001], jedną z przyczyn zlegiwania jest szybki wzrost pola powierzchni kontaktu ziaren wraz ze wzrostem wilgotności na skutek deformacji. W przedziale 10–20% wzrost ten jest wykładniczy, a siły wiązań powierzchniowych rosną gwałtownie w miarę upływu czasu składowania.

Badaniami cech geometrycznych nasion zajmują się liczne ośrodki naukowe [Guz 2000, Liao i in. 1994, Panasiewicz i in. 2002, Tylek 1995]. W dostępnej literaturze brakuje jednak opracowań dotyczących wielkości deformacji ziaren w wyniku niekorzystnych warunków ich przechowywania. Niniejsza praca jest próbą bliższego poznania tego problemu.

Celem pracy było poznanie, jak niekorzystne warunki przechowywania mogą wpływać na zmiany geometryczne ziarniaków pszenicy.

MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono wykorzystując ziarna pszenicy jarej odmiany Kontesa pozyskanych z doświadczenia przeprowadzonego przez Szweða i Tysa [2003]. Żądaną wilgotność masy ziarnowej (20%) uzyskiwano poprzez dodanie wody w ilości wcześniej obliczonej dla partii 10 kg ziarna o znanej uprzednio zawartości wody. Niezwłocznie po dodaniu wody ziarna mieszano przez 10 minut w mieszarce bębnowej, a następnie umieszczano je w plastikowych, szczelnie zamkniętych torbach, w których były przechowywane przez 48 godzin w celu równomiernego rozkładu wody. Podobnie postępowali Jayas i in. [1989]. Wilgotność ziarna sprawdzano wykorzystując suszarkę firmy Brabender. Po uzyskaniu żądanej wilgotności, ziarna pszenicy w ilości 2,5 kg wsypywano do odpowiednich pojemników lateksowych (rys. 1), które umieszczano w specjalnej komorze, pozwalającej symulować warunki przechowywania w silosach przemysłowych. Czynnikiem wywołującym naprężenie między ziarnami było sprężone powietrze do 300 kPa wtłaczane do komory ciśnieniowej. W komorze z próbkami utrzymywano stałą temperaturę 30°C. W takich warunkach ziarno przechowywano przez 126 dni.

Dokładna analiza zmian powierzchni i objętości przechowywanych w ten sposób ziarniaków jest metodycznie trudna. Dlatego zdecydowano, że będą analizowane obrazy rzutu ziarniaków na płaszczyznę, przy czym podczas fotografowania ziarniaki będą ułożone bruzdką do płaszczyzny rzutowej. Analiza powierzchni rzutu ziarniaka dotyczyła:

- całkowitej powierzchni rzutowej (S),
- długości rzutu, odzwierciedlającej długość ziarniaka (l),
- szerokości rzutu, odzwierciedlającej szerokość ziarniaka (b),
- długości obwodu powierzchni rzutowej ziarniaka (O).

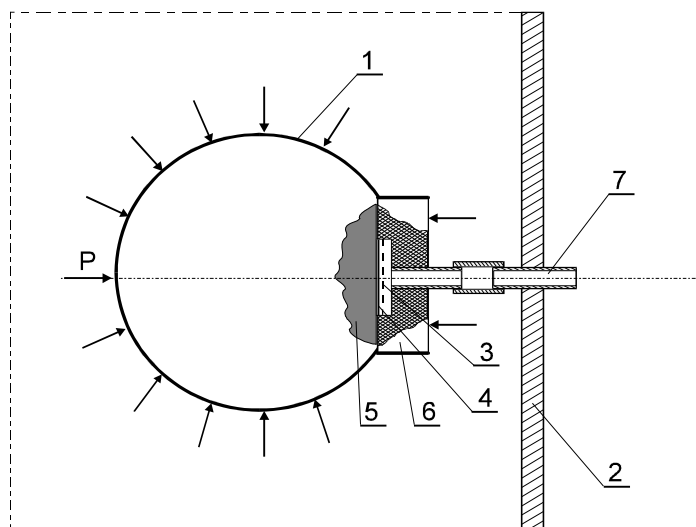
Badaniami objęto każdorazowo powierzchnie rzutów 100 sztuk ziarniaków poddanych i nie poddanych procesowi przechowywania, lecz pochodzących z tego samego poletka doświadczalnego. Wybrane losowo ziarniaki obu grup przechowywano

do chwili wykonywania obrazów w tym samym pomieszczeniu, doprowadzając do uzyskania wilgotności równowagowej (około 12%).

Analizę przeprowadzono za pomocą komputerowej metody wizyjnej Super VIST v.1 z modulem do pomiarów morfometrycznych SVISTMET (zgodnie z ASAE Paper N° 911751). System SVISTMET zainstalowano w komputerze PC. Obraz otrzymywano z kamery CCD, odróżniającej 256 odcieni szarości, a wyświetlano go na ekranie kolorowego monitora NEC, podłączonego do karty wizyjnej VESA Local Bus. Kilka ziarniaków (do 10 sztuk) umieszczano na stoliku przedmiotowym w polu widzenia kamery. Oświetlano je światłem rozproszonym za pomocą czterech lamp w celu wyeliminowania cienia. Obraz otrzymywany z kamery i wyświetlany na monitorze kontrolnym był zapisywany w postaci mapy bitowej. Po wyskalowaniu systemu uruchamiano procedury programu SVISTMET, które umożliwiały odczyt wymaganych parametrów [Panasiwicz i in. 2002, Tylek 1995].

OPIS ZJAWISKA I WYNIKI BADAŃ

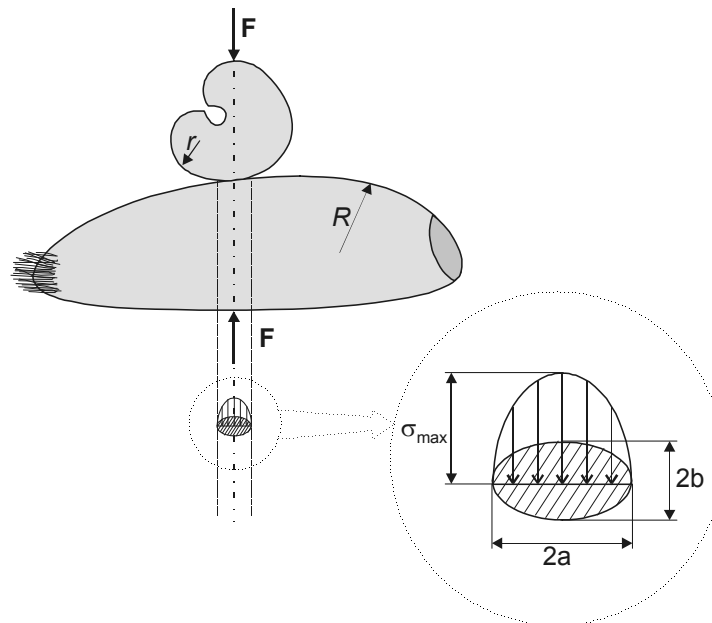
Ciśnienie powietrza w zbiorniku (rys. 1) wywołuje określone naprężenia stykowe między ziarniakami znajdującymi się w płaszczu lateksowym (1).



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – płaszcz lateksowy, 2 – ścianka zbiornika, 3 – siatka, 4 – tkanina przepuszczająca gaz, 5 – ziarna pszenicy, 6 – głowica zamykająca ziarna w powłoce lateksowej, 7 – dren łączący ziarna z atmosferą zewnętrzną komory, P – ciśnienie oddziałujące na ziarna

Fig. 1. Measurement stands scheme: 1 – latex container, 2 – pressure vessel, 3 – net, 4 – viscose fabric, 5 – wheat grain, 6 – head, 7 – pipe connecting seed sample with the atmosphere outside the chamber, P – pressure acting on grain

Gaz wypełniający przestrzeń między ziarnami próbki ma możliwość ujęcia na zewnątrz poprzez dren (7) i nie podlega sprężaniu. Na skutek istniejących między ziarniakami naprężeń wywołanych ciśnieniem P w komorze, ich powierzchnie ulegają lokalnym odkształceniom. Zarówno powierzchnia styku (kontaktu), jak i rozkład naprężeń występujący w miejscu kontaktu ziarniaków (rys. 2) są zależne (przy określonej sile nacisku F) między innymi od kształtu powierzchni naciskanych wzajemnie na siebie ziarniaków.



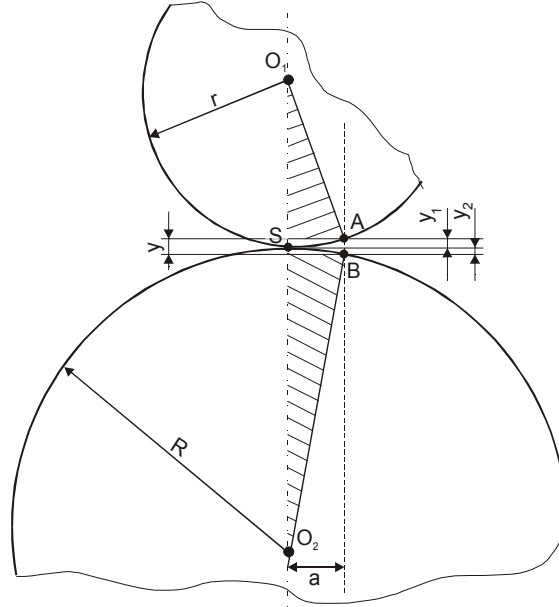
Rys. 2. Rozkład naprężeń na powierzchni styku dwóch ziarniaków dociskanych siłą F : r , R – promienie powierzchni ziaren, a , b – promienie powierzchni styku, $\sigma_{\max}$ – naprężenie

Fig. 2. Schedule of tensions on the surface of point of junction of two grains tightened with power F : r , R – rays of grains, a , b – radius of surface of the point of contact, $\sigma_{\max}$ – stress

W przypadku ciał o kształcie kulistym powierzchnia styku jest kołem, w innych przypadkach najczęściej jest to elipsoida [Walczak 1967]. Największa wartość naprężeń ($\sigma_{\max}$) występowała, w każdym przypadku, w środkowej części powierzchni styku dociskanych do siebie ziarniaków.

Analiza naprężeń stykowych jest jednym z trudniejszych problemów w teorii sprężystości. Do celów praktycznych w technice wykorzystuje się rozwiązania wynikające z rozwinięcia teorii Hertza przez jego następców. Ponieważ materiał roślinny nie spełnia wymagań stawianym teorii Hertza, stąd analityczne dochodzenie do wartości i rozkładu naprężeń, a zarazem wielkości odkształceń w przechowywanych ziarnach jest bardzo trudne, a uzyskane wyniki obarczone są dużym błędem.

Dla uproszczenia należy rozpatrzeć dwa stykające się ziarniaki o kształcie kulistym i różnicowanych średnicach (rys. 3).



Rys. 3. Geometria styku dwóch powierzchni kulistych o różnych promieniach: R , r – promienie kul, y – maksymalne zbliżenie kul, y_1 – odkształcenie kuli o promieniu mniejszym, y_2 – odkształcenie kuli o promieniu większym

Fig. 3. Geometry of the point of junction of two spherical surfaces with different radiuses: R , r – radius of spheres, y – maximum close relations of spheres, y_1 – deformation of the sphere with a smaller radius, y_2 – deformation of the sphere with a greater radius

Oznaczając przez r i R promienie krzywizny powierzchni ziarniaków, można wyznaczyć odległość (y) przeciwnych punktów A i B , w jakiej znajdują się one na obu powierzchniach jeszcze nie odkształconych i położonych w tej samej odległości a od osi O_1O_2 , łączącej środki rozważanych powierzchni sferycznych. Z zakreskowanych trójkątów O_1SA i O_2SB (rys. 3) wynikają następujące zależności geometryczne:

$$a^2 + (r - y_1)^2 = r^2 \quad (1)$$

$$a^2 + (R - y_2)^2 = R^2 \quad (2)$$

Stąd po wykonaniu działań:

$$a^2 - 2ry_1 + y_1^2 = 0 \quad (3)$$

$$a^2 - 2Ry_2 + y_2^2 = 0 \quad (4)$$

Pomijając w każdym z tych równań ostatni wyraz, jako z założenia bardzo małej wartości, otrzymamy:

$$y_1 = \frac{a^2}{2r} \quad (5)$$

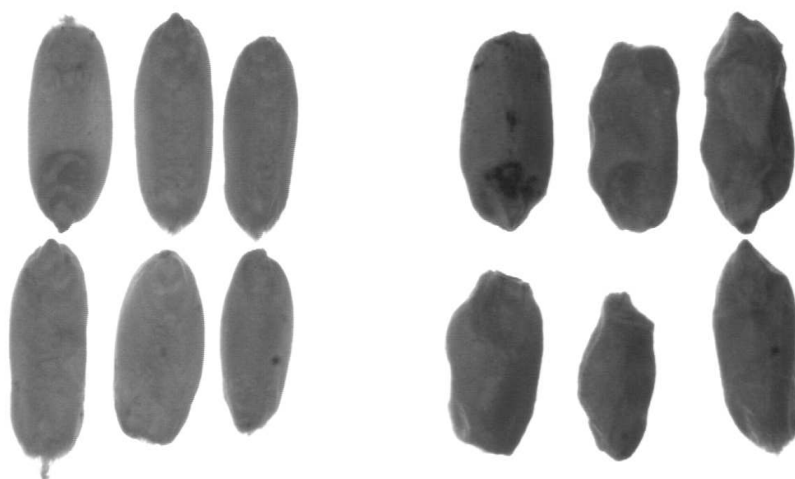
$$y_2 = \frac{a^2}{2R} \quad (6)$$

Z uwagi na to, że $r < R$, więc i $y_1 > y_2$, głębiej będą się odkształcać powierzchnie o mniejszym promieniu krzywizny. Całkowite zbliżenie punktów O_1 i O_2 , a więc i odkształcenie obu ziarniaków wyniesie:

$$y = y_1 + y_2 = \frac{a^2}{2} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right) \quad (7)$$

Wyprowadzone zależności uwzględniają odkształcenia lokalne obu stykających się powierzchni o różnych promieniach krzywizny. Należy oczekiwać, że w przechowywanej masie, w wyniku istniejących naprężeń, bardziej narażone na odkształcenia są części ziarniaków o większej krzywiznie powierzchni (okolicie bródki i zarodka). Głębsza deformacja powierzchni ziarniaka niewątpliwie niesie za sobą większe ryzyko jego uszkodzenia.

Odształcenia sprężyste ziaren pozostają utrwalone w wyniku długotrwałego przechowywania i zachodzących w tym czasie procesów lepko-sprężystych, zwiększając powierzchnię kontaktu oraz pogarszając warunki przechowywania w silosie (zmiana porowatości, wzrost sił adhezyjnych). Rys. 4 przedstawia ziarniaki po procesie przechowywania o widocznej deformacji ich powierzchni oraz ziarniaki tej samej pszenicy przed przechowywaniem.

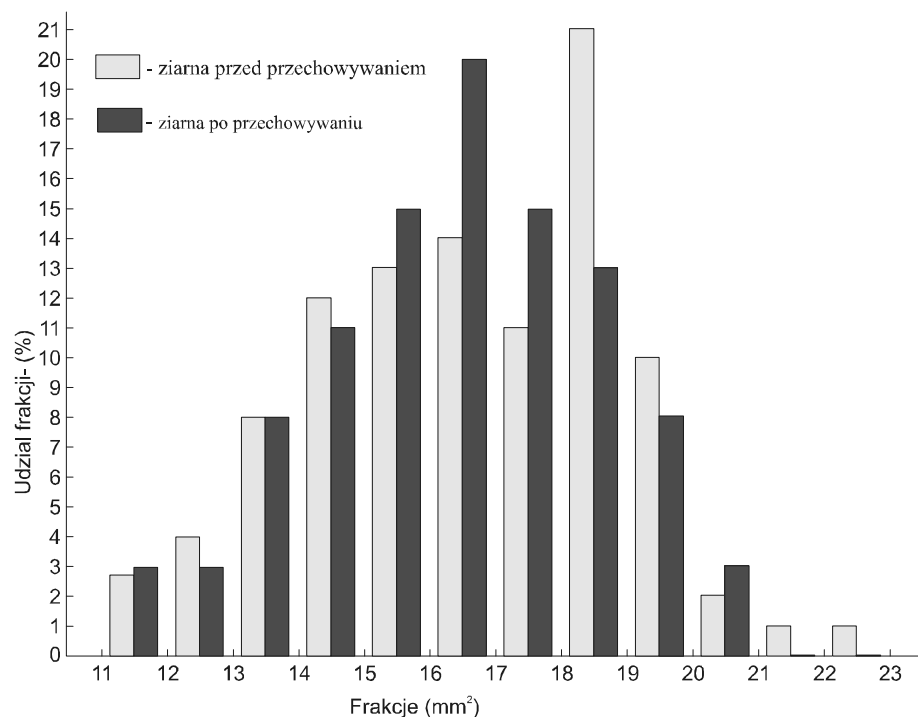


Rys. 4. Ziarna pszenicy przed przechowywaniem (z lewej) i po przechowywaniu (z prawej)

Fig. 4. Grains of wheat before storage (from the left) and after storage (from the right)

Analiza pola powierzchni rzutu ziarniaków

Pomierzone pola powierzchni S uzyskanych rzutów pogrupowano w odpowiednie frakcje o wielkości przedziałów 1 mm^2 . Uzyskane w ten sposób wyniki dla ziarniaków biorących udział w doświadczeniu przedstawiono w postaci histogramów na rys. 5.



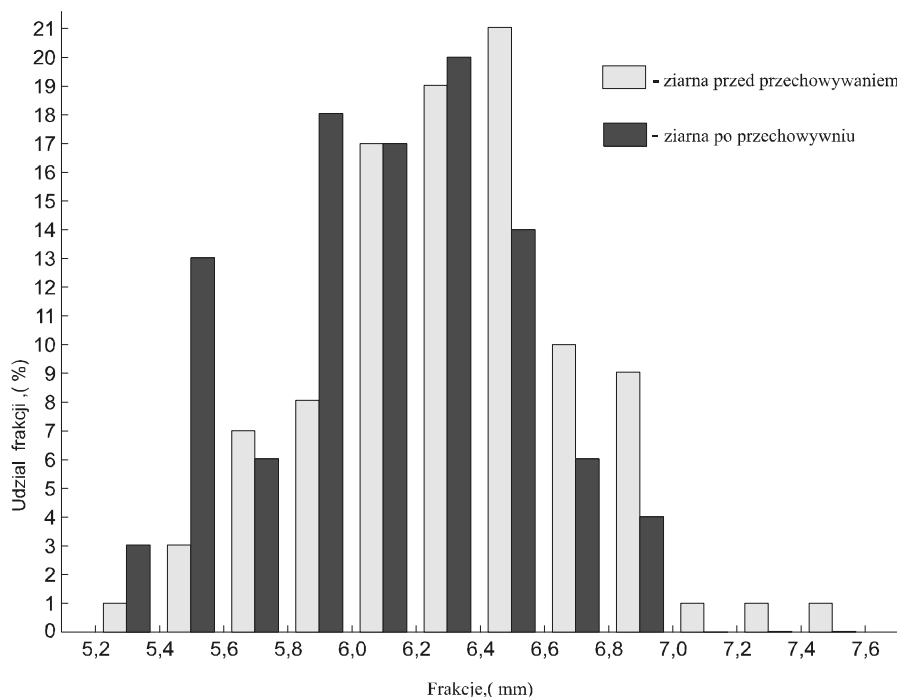
Rys. 5. Podział frakcyjny ziaren ze względu na pole powierzchni rzutu

Fig. 5. Fractional division of grains with regard to the projection surface field

Zaprezentowane histogramy wykazują podobny rozkład frakcji ziarniaków obciążonych i nieobciążonych warunkami przechowywania. Ziarniaki pszenicy charakteryzują się dość zwartą budową wewnętrzną, więc deformacja ich powierzchni sugeruje, że mamy w tym przypadku do czynienia z odkształceniem postaciowym. Pola rzutów takich ziarniaków nie muszą w tym przypadku zbytnio różnić się od uzyskanych powierzchni rzutów ziarniaków nieodkształconych. Z prezentowanych na rys. 5 histogramów wynika, że w przechowywanych ziarniakach największe frakcje zanikły ($S > 21 \text{ mm}^2$), co świadczy o przestrzennym ich odkształceniu i przez to zmniejszeniu się powierzchni pola rzutu. Największe zróżnicowanie ilości ziarniaków w obu grupach ziaren (przechowywanych i nieprzechowywanych) przypada na frakcje o wymiarach średnich i dużych. Pola mniejszych wymiarowo ziarniaków zachowują mniejsze w tym względzie zróżnicowanie. Dowodzi to mniejszej podatności na odkształcenia ziarniaków o małych gabarytach.

Analiza długości rzutów ziarniaków

Długości rzutów ziarniaków l odpowiednio pogrupowano, tworząc różne frakcje co 0,2 mm. Histogramy przedstawione na rys. 6 wykazują dość duże zróżnicowanie w liczebności występowania obu grup frakcji.



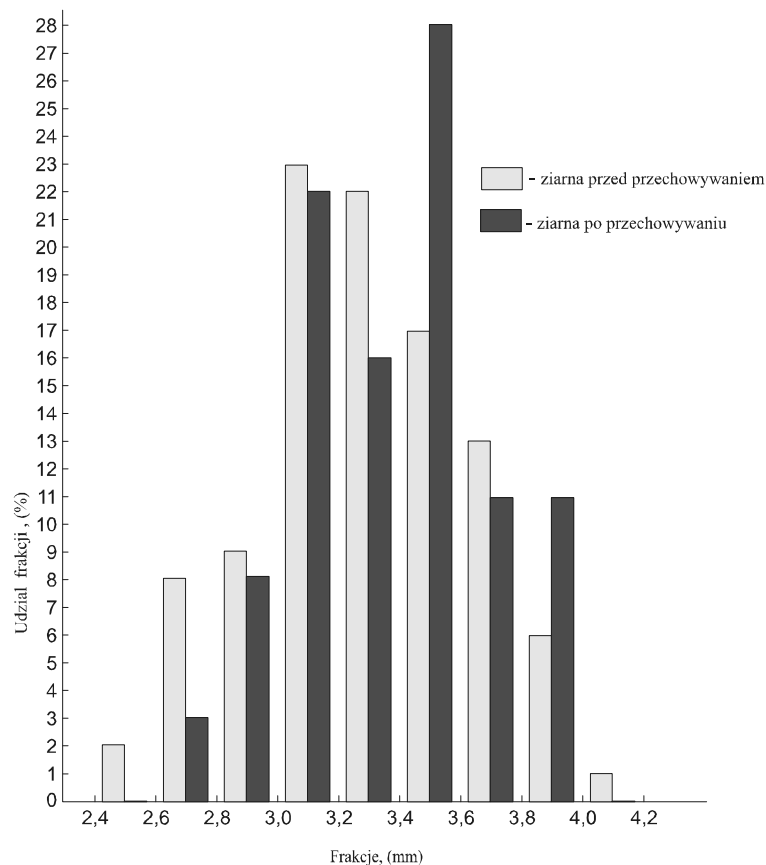
Rys. 6. Podział frakcyjny ziaren ze względu na długość

Fig. 6. Fractional division of grains with regard to length

Proces przechowywania spowodował, że duża ilość ziarniaków skróciła się, a frakcje o długości $l > 7$ mm całkowicie znikły. Liczniejsze stały się frakcje o mniejszych długościach. Ilość frakcji o długościach większych ($l > 6,4$ mm) wyraźnie zmniejszyła się. Nie pojawiły się natomiast nowe frakcje ($l < 5,2$ mm), co mogło by świadczyć, że małe ziarniaki w niewielkim stopniu odkształcają się. W wyniku procesu przechowywania nastąpiło „przesunięcie” frakcji obrazów ziarniaków o większej długości do frakcji obrazów o mniejszej długości. Duże odkształcenie ziarniaków na linii ich długości ma swoje uzasadnienie teoretyczne, wyrażone już wcześniej. Okolice bródki i zarodka mają mały promień krzywizny, co sprzyja większej głębokości ich odkształceń w stosunku do środkowej części ziarniaka. Deformacja części wierzchołkowych ziarniaka jest szczególnie niebezpieczna z uwagi na możliwość uszkodzenia zarodka.

Analiza szerokości rzutu ziarniaków

Szerokość rzutów b obu grup ziarniaków podzielono na frakcje różnej wielkości co 0,2 mm. Przedstawione na rys. 7 histogramy wykazują, że zastosowane warunki przechowywania ziarniaków spowodowały zanik obrazów frakcji skrajnych, o szerokości najmniejszej i największej.



Rys. 7. Podział frakcyjny ziaren ze względu na szerokość

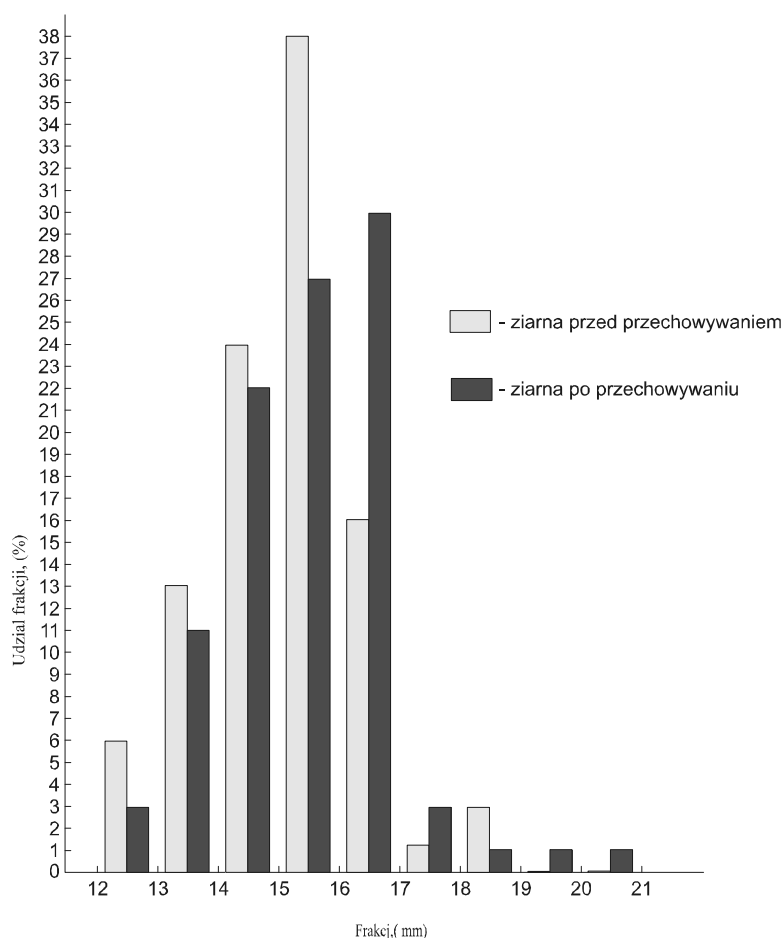
Fig. 7. Fractional division of grains with regard to width

Większość ubytków jest po stronie frakcji o mniejszych szerokościach. Frakcje przechowywanych ziarniaków o większej szerokości są liczniejsze od frakcji ziarniaków niepoddanych procesowi przechowywania. Przyczyną tego zjawiska jest niewątpliwie spęcznienie ziarniaków (odkształcenie na linii długości). Następuje wówczas zwiększenie liczebności frakcji o większych wymiarach kosztem frakcji mniejszych.

Analiza obwodu rzutu ziarniaka

Obwód rzutu O jest uzależniony od ilości i głębokości deformacji powierzchni ziarniaka. Odkształcenia lokalne sprzyjają zwiększeniu powierzchni całego ziarniaka, co

wpływa na zwiększenie obwodu dowolnego przekroju oraz obwodu pola rzutu. Uzyskane wielkości obwodów rzutów obu grup ziarniaków podzielono na frakcje różniące się między sobą o 1 mm. Przedstawione na rys. 8 rozkłady występowania frakcji ziarniaków przechowywanych oraz nieprzechowywanych są bardzo zbliżone do siebie. Przechowywane ziarniaki powiększyły obwód rzutów, co przyczyniło się do powstania nowych frakcji o obwodzie $O > 19$ mm. Niewielki ubytek w ilości frakcji mniejszych zauważony w ziarnach przechowywanych należy tłumaczyć przesunięciem ich do frakcji o większej długości w wyniku deformacji powierzchni bocznej.



Rys. 8. Podział frakcji ziaren ze względu na długość

Fig. 8. Division of grain fractions with regard to length

Analiza statystyczna wyników badań

Otrzymane wyniki pomiaru parametrów geometrycznych ziaren pszenicy poddano analizie statystycznej. Do obliczeń zastosowano program Statistica 5.1. Analiza warian-

cji wykazała, że wyniki pomiaru długości, szerokości ziarna, obwodu i pola powierzchni rzutu ziarniaków przed przechowywaniem i po przechowywaniu nie różnią się istotnie między sobą. W tab. 1 przedstawiono średnie wartości mierzonych parametrów oraz odchylenia standardowe.

Tabela 1. Średnia wartość mierzonych parametrów i ich odchylenie standardowe
Table 1. The average value of the measured parameters and their standard deviation

Parametr rzutu ziarna	Ziarna przed przechowywaniem		Ziarna po przechowywaniu	
	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
l	6,331	0,411	6,106	0,386
b	3,282	0,330	3,379	0,320
S	16,578	0,277	16,446	2,13
O	15,087	0,176	15,509	1,396

b – szerokość ziaren – width of grains, l – długość ziaren – length of grains, O – obwód ziaren – contour of grains, S – pole powierzchni – area of surface.

Z przedstawionych rezultatów pomiarów i dokonanych obliczeń wynika, że w trakcie przechowywania maleją: średnia wartość długości ziarna oraz pole powierzchni rzutu, natomiast wzrastają: średnia wartość szerokości ziarna oraz obwód rzutu.

Do wyznaczenia matematycznego modelu określającego pole oraz obwód ziarna posłużono się estymacją nieliniową. Założono, że kształt pola rzutu ziarna pszenicy przed przechowywaniem jest w dużym stopniu zbliżony do elipsy. Opierając się na tym założeniu, wyprowadzono równania, które opisują pole powierzchni oraz obwód rzutu ziarna przed przechowywaniem:

$$S = 0,795 lb \quad (8)$$

$$R^2 = 0,991$$

$$O = 1,57(l + b) \quad (9)$$

$$R^2 = 0,875$$

Ziarna w wyniku przechowywania w opisanych warunkach ulegały wielu trudnym do matematycznego opisu deformacjom, więc i modele opisujące parametry geometryczne są bardziej złożone:

$$S = 0,134 l^{2,2} \cdot 1,04 b^{1,78} \quad (10)$$

$$R^2 = 0,998$$

$$O = 3,93l^{0,73} + 0,000031b^{8,062} \quad (11)$$

$$R^2 = 0,713$$

WNIOSKI

1. Niekorzystne warunki przechowywania ziarna pszenicy powodują istotne zmiany ich kształtu w wyniku trwałej deformacji.
2. Najbardziej narażone na odkształcenia są powierzchnie ziaren o małych promieniach krzywizny (okolice bródki i zarodka)
3. Powstałe odkształcenia powierzchniowe ziaren w sposób znaczący zmniejszają porowatość złoża, zwiększają powierzchnię kontaktu między ziarnami, a także obniżają zdolności reprodukcyjne przechowywanego zboża.

PIŚMIENNICTWO

1. **Bulsiewicz T., Matzke W., Smarzyński E., Świątek H., 1977:** Magazynowanie ziarna zbóż nasion strączkowych i oleistych. WNT, Warszawa.
2. **Guz T., 2000:** Badania składu sypek mieszanin dwuskładnikowych metodą komputerowej analizy obrazów. Inż. Roln., 5, 69–74.
3. **Horabik J., 2001:** Charakterystyka właściwości fizycznych roślinnych materiałów sypek istotnych w procesach składowania. Acta Agrophysica, 54.
4. **Jayas D.S., Sokhansanj S., White N.D.G., 1989:** Bulk density and porosity of two canola species. Trans. of the ASAE, 32 (1), 291–294.
5. **Liao K., Paulsen M.R., Reid J.F., 1994:** Real time detection of color and surface defect of maize kernels machine vision. J. Agricult. Eng. Res., 59(4), 263–271.
6. **Panasiewicz M., Guz T., Mazur J., 2002:** System wizyjny jako instrument badawczy do oceny zmian cech geometrycznych nasion w procesie ich płatkowania. Inż. Roln., 9, 229–233.
7. **Szwed G., Tys J., 2003:** Wpływ nawożenia i warunków przechowywania na zmianę gęstości i porowatości warstwy ziarna pszenicy. Acta Agrophysica, 183–191, 82.
8. **Tylek P., 1995:** Pomiar wybranych cech geometrycznych nasion z zastosowaniem komputerowej analizy obrazu. Zesz. Probl. PNR, 423, 335–341.
9. **Walczak J., 1967:** Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości i plastyczności. T. III, PWN, Warszawa.

CHANGE OF SOME GEOMETRICAL FEATURES OF GRAINS OF WHEAT GRAINS DUE TO UNFAVOURABLE STORAGE CONDITIONS

Summary. The work contains a description of an influence of storage conditions on geometrical changes of wheat grains. The investigations were carried out on spring wheat grains Kontesa with 20% moisture, which were kept for 126 days in a strictly defined temperature and the state of tensions between grains. The surface of grain projections was analysed after storage and compared to analogous surfaces of grain projections before storage. The following surface parameters were considered: the largest and the smallest diameter, length of the circuit of grain projection span. A considerable influence was shown of the set conditions of storage on the measured parameters, due to durable deformation of the stored grains surface.

Key words: wheat, deformation, stress, storage

Recenzent: dr hab. inż. Janusz Nowak, prof. AR