

ACTA AGROPHYSICA



Jarosław Frączek, Janusz Kaczorowski,
Zbigniew Ślipek, Józef Horabik, Marek Molenda

STANDARYZACJA METOD POMIARU WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNO-MECHANICZNYCH ROŚLINNYCH MATERIAŁÓW ZIARNISTYCH

92

Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie

Rozprawy i Monografie
Lublin 2003

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny

prof. dr hab. Ryszard T. Walczak, czł. koresp. PAN

Zastępca Redaktora Naczelnego

doc. dr hab. Józef Horabik

Rada Redakcyjna

Tomasz Brandyk, czł. koresp. PAN - przewodniczący

Ryszard Dębicki

Bohdan Dobrzański, jr

Danuta Drozd

Franciszek Dubert

Tadeusz Filipek

Józef Fornal

Jan Gliński, czł. rzecz. PAN

Grzegorz Józefaciuk

Eugeniusz Kamiński

Andrzej Kędziora

Tadeusz Kęsik

Krystyna Konstankiewicz

Janusz Laskowski

Jerzy Lipiec

Piotr P. Lewicki

Stanisław Nawrocki, czł. rzecz. PAN

Edward Niedźwiecki

Viliam Novák, Słowacja

Josef Pecen, Czechy

Stanisław Radwan, czł. koresp. PAU

Jan Sielewiesiuk

Witold Stępniewski

Bogusław Szot

Zbigniew Ślipek

Saturnin Zawadzki, czł. rzecz. PAN

Opiniowali do druku

Prof. dr hab. inż. Stanisław Wolny

Doc. dr hab. Bohdan Dobrzański, jr

Adres redakcji

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201
20-290 Lublin 27, tel. (0-81) 744-50-61, fax 744-50-67, e-mail: editor@demeter.ipan.lublin.pl

<http://www.ipan.lublin.pl>

Publikacja indeksowana przez

Polish Scientific Journals Contents - Life Sci. w sieci Internet

pod adresem <http://www.psjc.icm.edu.pl>

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr 5 P06 F 002 19
finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 2000-2003

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2003

ISSN 1234-4125

Wydanie I. Nakład 200 egz. Ark. wyd. 12,1

Skład komputerowy: dr Wanda Woźniak

Druk: Drukarnia ALF-GRAF, ul. Kościuszki 4, 20-006 Lublin

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	5
I. WPROWADZENIE	7
II. WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE POJEDYNCZYCH NASION	8
1. WSTĘP	8
2. OKREŚLENIE WYTRZYMAŁOŚCI POJEDYNCZYCH NASION	9
2.1. Pomiar sprężystości nasion	13
2.1.1. Budowa nasienia i sposób obciążania	16
2.1.2. Zastosowanie prawa Hooke'a przy określaniu sprężystości nasion	22
2.1.3. Znaczenie wartości siły przy wyznaczaniu modułu Younga w teście ściskania nasion	25
2.1.4. Prędkość odkształcania	40
2.2. Wskaźnik sprężystości	41
2.3. Pomiar twardości nasion	47
2.3.1. Definicja twardości	47
2.3.2. Metody pomiaru twardości	51
2.3.3. Wybór metody pomiaru twardości pojedynczych nasion	56
2.3.4. Nowa metoda pomiaru twardości	58
2.3.5. Określenie warunków przeprowadzania pomiaru	59
3. ZALEŻNOŚĆ MIĘDZY WSPÓŁCZYNNIKIEM SPRĘŻYSTOŚCI A TWARDOŚCIĄ POJEDYNCZYCH NASION	68
4. POMIAR POWIERZCHNI KONTAKTU NASIENIA Z PŁASKĄ POWIERZCHNIĄ	81
4.1. Metoda pomiaru	82
4.2. Wyniki pomiarów	85
III. MECHANIKA ROŚLINNYCH OŚRODKÓW ZIARNISTYCH	92
1. WSTĘP	92
2. WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE ROŚLINNYCH MATERIAŁÓW SYPKICH	94
2.1. Gęstość	94
2.2. Wytrzymałość na ścinanie	95
2.3. Iloraz naprężeń w spoczynku - k_o , iloraz naporu - k	97
2.4. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie	101
2.5. Sprężystość	103

3. APARATURA I METODY	105
3.1. Aparat bezpośredniego ścinania	106
3.2. Aparat pierścieniowy	108
3.3. Aparat prostego ścinania	109
3.4. Aparat trójosiowego ściskania	109
3.5. Właściwości mechaniczne wybranych surowców spożywczych wyznaczane według najnowszych norm	111
4. BADANIA WŁASNE	118
4.1. Materiał	118
4.2. Zastosowane procedury pomiarowe	118
4.3. Wyniki badań własnych	122
4.4. Omówienie wyników badań	128
4.4.1. Tarcie zewnętrzne	128
4.4.2. Tarcie wewnętrzne	129
4.4.3. Sprężystość	130
4.4.4. Wnioski	131
IV. CHARAKTERYSTYKI MATERIAŁU STOSOWANE W TECHNOLOGII PRZETWARZANIA PROSZKÓW	132
1. OZNACZANIE JAKOŚCI PRODUKTÓW	132
2. KONTROLA IN-LINE STRUKTURY PRODUKTÓW ROZDROBNIONYCH	144
3. TENDENCJE ROZWOJU ZASTOSOWAŃ	145
V.PIŚMIENNICTWO	149
VI. STRESZCZENIE	156
VII. SUMMARY	158

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- A – grubość ziarna [mm],
 B – szerokość ziarna [mm],
 C – długość ziarna [mm],
 c – kohezja [kPa],
 d – średnica końcówki penetratora [m],
 D – średnica zbiornika [mm],
 E – moduł sprężystości podłużnej (Younga) [MPa],
 h – wartość zagłębienia penetratora [mm],
 h_{tr} – trwały przyrost głębokości odcisku [mm],
 H – wysokość ziarna [m],
 N – siła nacisku [N],
 ΔL – odkształcenie liniowe [m],
 Q_c – ciężar próbki w cieczy [N],
 Q_p – ciężar próbki w powietrzu [N],
 n – liczba granul w objętości V ,
 N_t – średnia liczba kontaktów przypadająca na jedną granulę,
 P – powierzchnia kontaktu [mm²],
 p – ciśnienie [Pa],
 R – promień [mm],
 r^2 – współczynnik korelacji,
 R_1, R_1'' – promienie krzywizny badanego materiału w punkcie styku z górną płytką dociskową, we wzajemnie prostopadłych powierzchniach [m],
 R_2, R_2'' – promienie krzywizny badanego materiału w punkcie styku z dolną płytką dociskową, we wzajemnie prostopadłych powierzchniach [m],
 RV – twardość nasienia [MPa],
 V – objętość [m³],
 WE_n – wskaźnik sprężystości nasienia [J],
 Z – zawartość wody [kg·(kg s.s.)⁻¹],
 α – kąt wierzchołkowy penetratora [deg],
 σ – naprężenie normalne [Pa],
 δ – efektywny kąt tarcia wewnętrznego [deg],
 σ_I – naprężenie główne [Pa],
 σ_c – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie [Pa],
 σ_r – naprężenie konsolidacji [kPa],
 σ_{lu} – założony napór [kPa],
 ε – odkształcenie liniowe w kierunku wzdłużnym [mm],
 ε' – odkształcenie liniowe w kierunku poprzecznym [mm],
 ϕ – wskaźnik wypełnienia,

Φ – średnica kulki [mm],
 γ – ciężar objętościowy [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$],
 φ – kąt tarcia wewnętrznego [deg],
 φ_w – kąt tarcia [deg],
 φ – kąt tarcia kinetycznego [deg],
 μ – współczynnik tarcia,
 ρ – gęstość wody [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],
 ρ_A – gęstość ubita [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],
 ρ_b – gęstość usypna [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],
 ρ – gęstość materiału [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$],
 ρ_o – gęstość cieczy [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$],
 ν – współczynnik Poissona (przewężenia poprzecznego).

I. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój rolnictwa, przechowalnictwa oraz przemysłu przetwórczego spowodował wzrost zainteresowania wynikami badań dotyczących właściwości fizycznych przetwarzanych materiałów rolniczych. Jest to spowodowane koniecznością uzyskiwania półproduktów i produktów coraz wyższej jakości przy ograniczonych nakładach energetycznych. Jednym słowem niezbędne jest symulowanie wielu procesów produkcyjnych zmierzające do określenia wartości parametrów optymalnych dla danego procesu. Symulacja taka musi jednak opierać się na wiarygodnych wynikach badań podstawowych.

Racjonalne zasady projektowania oraz użytkowania systemów technicznych stosowanych w nowoczesnej produkcji rolniczej i przetwórstwie żywności bazują coraz szerzej na precyzyjnych informacjach o właściwościach poddawanego obróbce materiału roślinnego.

Morfologiczny i fizyczny stan materiałów pochodzenia roślinnego decyduje o doborze właściwych parametrów wielu procesów technologicznych. Szczegółowy opis tego stanu pomaga przy modelowaniu procesów roboczych, a w dalszej kolejności przy ich optymalizacji.

Właściwości fizyczne płodów rolnych to cechy typowe, charakterystyczne dla danego gatunku. Specyficzny zazwyczaj kształt i struktura wewnętrzna, anizotropowość materiału, zmienność struktur w czasie powodują, że metody pomiaru właściwości fizycznych materiału roślinnego nie mogą być przenoszone wprost z fizyki, materiałoznawstwa technicznego i wytrzymałości materiałów konstrukcyjnych.

Operowanie wieloma wielkościami określającymi stan fizyczny materiału ma znaczenie praktyczne tylko wtedy, gdy poszczególne metody pomiaru, zasady przeprowadzania eksperymentu będą spełniały wymóg porównywalności. Aktualnie do oceny cech fizycznych materiałów roślinnych stosuje się rozmaite metodyki pomiaru, co nie pozwala na porównania i właściwą interpretację wyników, a w konsekwencji utrudnia modelowanie i optymalizację procesów technologicznych.

Autorzy opracowania podjęli próbę analizy metod pomiaru wybranych właściwości fizycznych roślinnych materiałów ziarnistych, stawiając sobie za cel dokonanie uzasadnionego wyboru konkretnych metod oceny, których wprowadzenie w formie standardów dawałoby możliwość porównywania wyników badań. Uzasadniony wybór to taki, który przekonuje na podstawie przeprowadzonych analiz i eksperymentów, że dana metoda najlepiej, a przy tym bez zbędnej komplikacji procedur pomiarowych, wyznacza określone wielkości charakteryzujące badany materiał roślinny.

Zrealizowanie tego celu przyczyni się do działań zmierzających do standaryzacji metod pomiarowych w agrofizyce. Świadomość zasadności takiego działania istnieje w środowisku naukowym agrofizyków.

Inicjatywa naszego zespołu spotkała się z przychylnością w wielu ośrodkach naukowych. Mieliśmy możliwość wykonywania pomiarów, uzyskania interesujących materiałów, prowadzenia uzgodnień. Szczególne podziękowania za taką współpracę kierujemy do Instytutu Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk w Lublinie, Polskiego Towarzystwa Agrofizycznego, Polskiego Towarzystwa Inżynierii Rolniczej, Fundacji Rozwoju Nauk Agrofizycznych.

II. WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE POJEDYNCZYCH NASION

1. WSTĘP

W badaniach dotyczących określenia fizycznych właściwości nasion daje się zaobserwować wyraźne rozdzielenie na dwa kierunki. Pierwszy z nich oparty jest na pomiarach wykonywanych na pojedynczych nasionach, drugi zaś na masie ziarnistej. Jednak w zasadzie, do chwili obecnej nie podjęto nawet prób określenia powiązania między wynikami uzyskanymi tymi dwoma drogami. Prowadzi to do sytuacji, w której przykładowo, niemożliwe jest obliczenie odkształcenia określonej wymiarowo próbki materiałów ziarnistych pod wpływem przyłożonego obciążenia, na podstawie znajomości parametrów wytrzymałościowych pojedynczego ziarniaka. Świadczy to wybitnie o trudnościach związanych z przeprowadzeniem prawidłowej analizy przytoczonej sytuacji, analizy prowadzącej do sformułowania jednolitej teorii wytrzymałościowej.

W chwili obecnej brak jest w Polsce przyjętych i ogólnie uznanych standardów pomiaru wielu fizycznych właściwości nasion. W nielicznych przypadkach istnieją normy branżowe, które pozwalają na dokonanie znormalizowanych pomiarów określających pewne właściwości fizyczne ważne z punktu widzenia danego procesu technologicznego. Zazwyczaj są to więc wielkości wyrażane w jednostkach umownych, nie pozwalających na ich zastosowanie w ogólnych teoriach fizycznych. Jako przykład może posłużyć norma branżowa BN-71/9160-03 – „Pasze – oznaczenie wytrzymałości kinetycznej pasz granulowanych” [12], która została opracowana w oparciu o amerykański standard ASAE i która pozwala na określenie trwałości granulatu wyrażonej jako stosunek masy granulatu przed testowaniem do masy po testowaniu wykonanym na specjalnym urządzeniu. Przykłady tego typu pomiarów można by mnożyć.

Większość ze stosowanych do tej pory sposobów pomiaru wykorzystywanych w tego typu badaniach ma swe źródło w pomiarach stosowanych przy badaniu materiałów konstrukcyjnych. O ile jednak w klasycznej wytrzymałości występuje pełna spójność i jednoznaczność stosowanego nazewnictwa, o tyle w badaniach roślinnych materiałów ziarnistych daje się zaobserwować pewną chaotyczność. Stosowane terminy są często nieadekwatne do opisywanych właściwości.

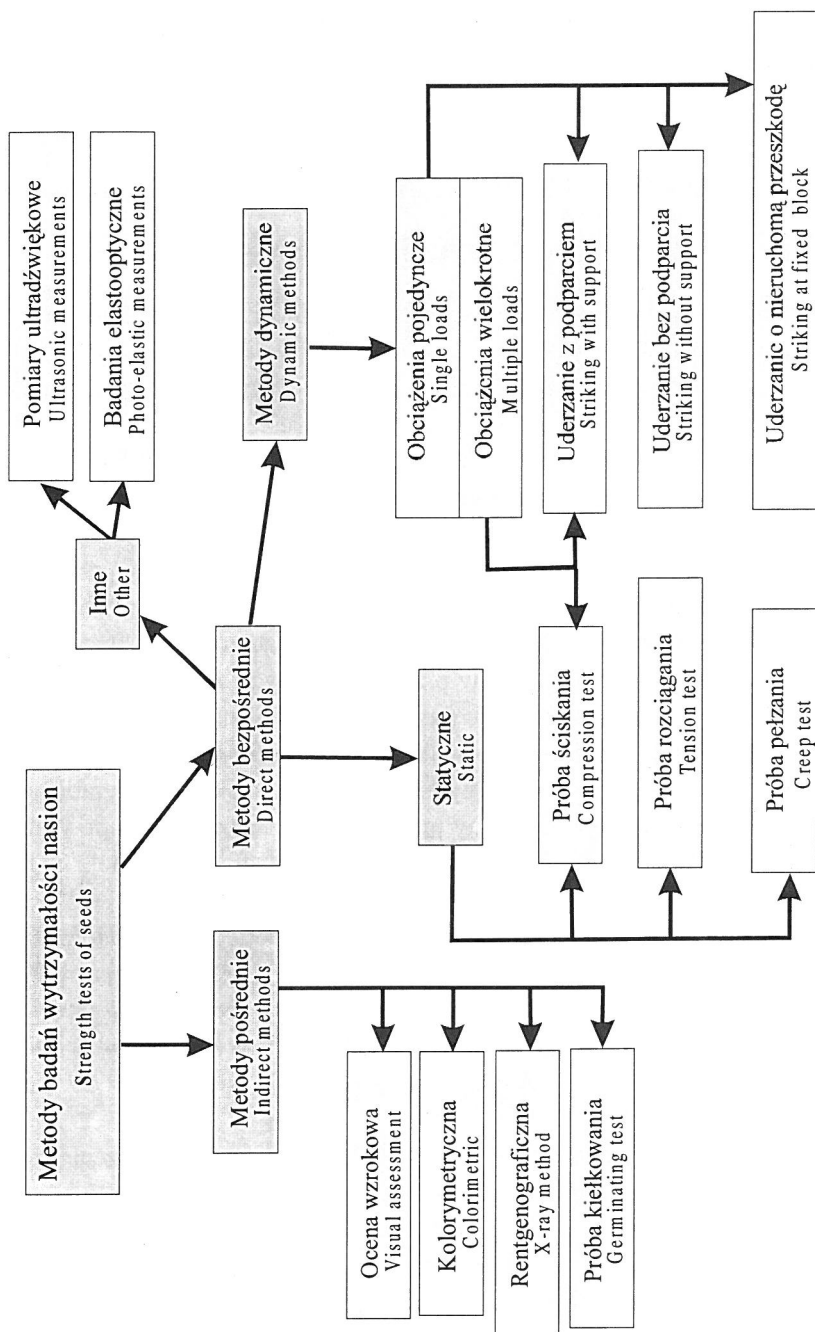
2. OKREŚLENIE WYTRZYMAŁOŚCI POJEDYNCZYCH NASION

Ocena wytrzymałości nasion prowadzona jest pośrednimi i bezpośrednimi metodami pomiarowymi (rys.1):

- pośrednio – poprzez pomiar liczebności i rodzaju uszkodzeń powodowanych przez zadane obciążenie; względnie poprzez określenie spadku wartości siewnej nasion określanej na podstawie próby kiełkowania lub zdolności do wschodów wywołanego zadaniem obciążeniem (w wyniku którego powstają uszkodzenia). Sposób ten jest stosunkowo mało obiektywny i wymaga dużego doświadczenia osoby dokonującej kwalifikacji uszkodzeń. Trudno jest zatem porównywać wyniki uzyskane w różnych ośrodkach. Dodatkowo, „waga” rozmaitych rodzajów uszkodzeń jest różna – powstaje zatem pytanie: czy można je sumować wprost? Wyniki pomiarów przeprowadzonych w ten sposób można wykorzystać jedynie do porównania między odmianami, czy też między gatunkami. Dodatkowo, mogą one służyć do oceny jakości pracy danego systemu technicznego z punktu widzenia utrzymania wysokiej jakości przerabianego materiału – problem szczególnie istotny przy produkcji nasiennej lub przy dłuższym magazynowaniu materiału. Metody pośrednie są mało przydatne z punktu widzenia utworzenia jednolitej teorii wytrzymałościowej.

Metody oceny uszkodzeń nasion są bardzo rozbudowane. Można je dokonywać począwszy od najprostszej - czyli wzrokowej, poprzez rentgenowską, a skończywszy na kolorymetrycznej (pomiar intensywności koloru barwnika, w którym zanurzone są nasiona). Ostatnia z wymienionych metod wydaje się być najbardziej obiektywną, ale nadaje się raczej do przeprowadzania pomiarów „w masie”.

- bezpośrednio – poprzez pomiar odkształcenia i naprężenia oraz wyznaczenie na tej podstawie stałych materiałowych. Wobec uniwersalności i obiektywności tego rodzaju pomiarów oraz możliwości wykorzystania uzyskanych wyników do utworzenia odpowiedniego opisu fizycznego niszczenia materiału, w prezentowanych badaniach skupiono się właśnie na tym sposobie określenia wytrzymałości nasienia.



Rys. 1. Metody badania wytrzymałości pojedynczych nasion
Fig. 1. Strength tests of individual seeds

Bezpośrednie wyznaczenie stałych fizycznych określających wytrzymałość badanych nasion jest niezbędne z punktu widzenia utworzenia poprawnego modelu reologicznego. Jest to zadanie trudne, zarówno ze względu na małe wymiary nasion, ich często skomplikowany kształt, metamorficzny i typowo reologiczny charakter oraz niezbędne jednocześnie kontrolowanie kilku parametrów w trakcie pomiaru.

W odniesieniu do badań właściwości mechanicznych nasion można wyróżnić dwa kierunki: pomiary w warunkach obciążeń quasistatycznych oraz obciążanie dynamiczne. Wymuszenia dynamiczne realizowane mogą być w różnoraki sposób. Między innymi poprzez:

- uderzanie z podparciem. Realizacja tego sposobu obciążania jest prosta - nieruchomy ziarniak uderzany jest poruszającym się ciężarkiem [71,131]. Uzyskane wyniki są obarczone dużym błędem. Wynika to z:
 - technicznych trudności pomiaru siły uderzenia. Czujnik siły można umieścić pod nasieniem lub na ciężarku, ale czas trwania zderzenia jest bardzo krótki i rejestracja zmian siły wymaga stosowania czujników pomiarowych o bardzo niskim okresie drgań własnych. Ponadto po uderzeniu następuje odbicie ciężarka i najczęściej uderza on jeszcze kilkakrotnie w umocowane nasienie. Trudno nie wspomnieć również o pomiarze odkształcenia nasienia w czasie obciążenia. Ze względu na żądaną dokładność pomiaru wymaga on stosowania bardzo dokładnych urządzeń pomiarowych.
 - trudności w prawidłowej interpretacji uzyskanych wyników pomiaru siły i odkształcenia.
- uderzanie bez podparcia [70,131]. Wirujące z określoną prędkością obrotową ramię uderza w podrzucone nasienie. Przytoczona metoda pozwala – ze względu na brak możliwości pomiaru odkształcenia badanego materiału oraz trudności w dokładnym określeniu miejsca uderzenia – jedynie na pośrednie (poprzez ocenę negatywnych skutków uderzenia – uszkodzeń wewnętrznych i zewnętrznych) oszacowanie parametrów mechanicznych nasion.
- uderzanie nasieniem w nieruchomą przeszkodę [66]. Metoda ta powstała w celu określenia współczynnika restytucji. Badane nasienie rozpędzane jest do zadanej prędkości przy pomocy strumienia powietrza lub sprężyny i uderza w nieruchomy, płaski, sztywny ekran. Bezpośrednio przed i zaraz po uderzeniu dokonywany jest pomiar prędkości nasienia. Przy zastosowaniu jako ekranu, piezoelektrycznego czujnika siły możliwe jest dokonanie pomiaru siły uderzenia. Przytoczona metoda ma podobne braki jak opisane powyżej uderzanie bez podparcia.

- obciążenia wielokrotne [89,30,31,47]. Realizowane poprzez cykliczne ściskanie przy wykorzystaniu sinusoidalnie zmiennego obciążenia lub poprzez wielokrotne uderzanie nasienia z zadaną siłą. Jest to metoda wykorzystywana przy identyfikacji układów sprężysto-tłumiących, opisanych za pomocą pętli histerezy. Przy jej wykorzystaniu można prześledzić zmiany sprężystości materiału na skutek zmęczenia lub utwardzania powierzchniowego.

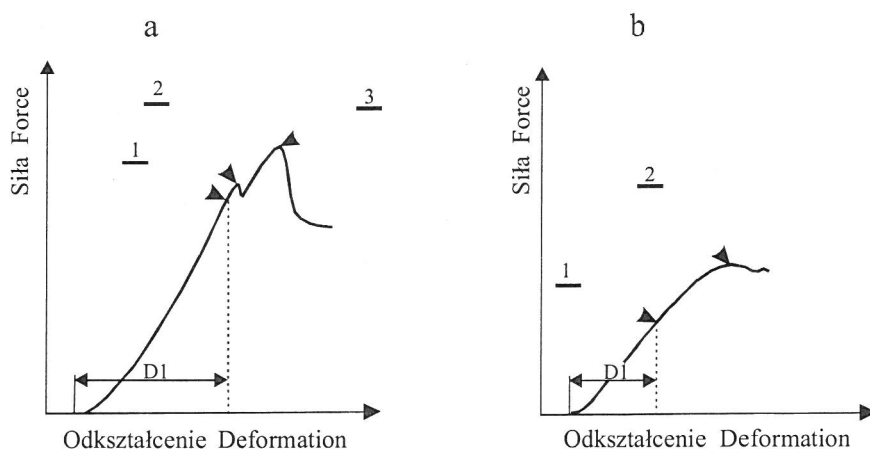
W świetle dotychczasowych badań najbardziej rozpowszechnione są jednak statyczne próby wytrzymałościowe, polegające na ścisaniu nasion między dwoma równoległymi płaszczyznami. Pozwoliły one na wyodrębnienie trzech charakterystycznych granic [91,15]:

- granicy sprężystości – definiowanej jako maksymalne naprężenie, po ustąpieniu którego ustępuje również całkowicie wywołane przez niego odkształcenie.
- granicy płynności biologicznej – czyli wartości naprężenia, po przekroczeniu której następuje ciągły wzrost odkształcenia bez konieczności zwiększania naprężenia (może ono nawet ulec zmniejszeniu). Jest to początek niszczenia struktury komórkowej obciążanego materiału.
- granicy wytrzymałości biologicznej – jest to wartość naprężenia, przy której następuje zniszczenie próbki. Odpowiada to chwili, w której następuje zniszczenie materiału (struktury komórkowej), czyli pęknięcie nasienia.

Stwierdzono również, że występują dwa rodzaje materiałów biologicznych [133,81,86]:

- materiały z wyraźną granicą płynności biologicznej (rys. 2a) wykazujące:
 - granicę odkształceń sprężystych - punkt przegięcia krzywej (1) przy granicznej wartości odkształcenia sprężystego D_1
 - punkt płynności biologicznej (2)
 - punkt zniszczenia materiału (3)
- materiały bez granicy płynności biologicznej (rys. 2b).

Jednak w obu przypadkach zakłada się występowanie punktu przegięcia krzywej naprężenie-odkształcenie traktowanej jako granica sprężystości (a raczej jako umowna granica sprężystości).



Rys. 2. Zależność pomiędzy siłą i odkształceniem dla materiałów wykazujących (a) oraz pozbawionych granicy płynności biologicznej (b) [Transactions of the ASAE]

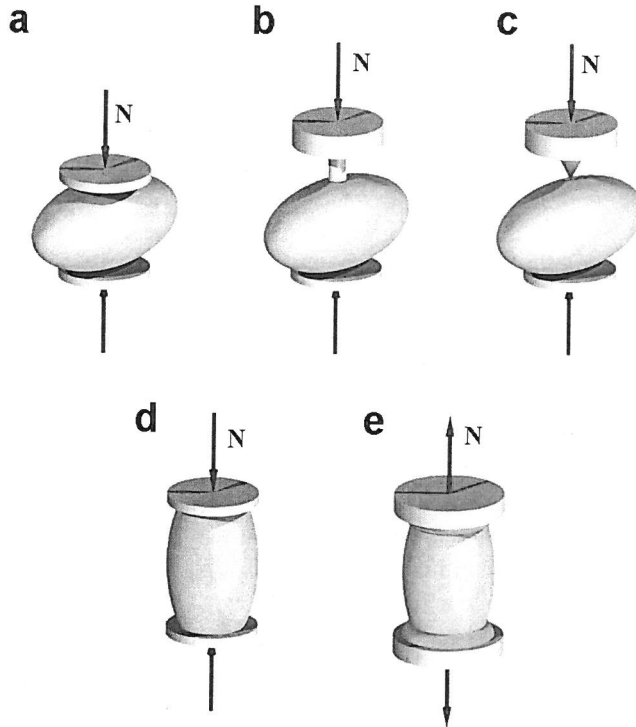
Fig. 2. Dependence between force and deformation of materials possessing the limit of biological fluency (a) and materials without the limit of biological fluency (b) [Transactions of the ASAE]

2.1. Pomiar sprężystości nasion

Jedną z ważniejszych właściwości charakteryzujących materiały pod względem wytrzymałościowym jest sprężystość. Można ją zdefiniować jako zdolność materiału do powrotu do poprzedniego kształtu po zlikwidowaniu obciążenia. Sprężystość jest oceniana zazwyczaj poprzez określenie modułu sprężystości podłużnej, czyli modułu Younga.

W przypadku materiałów konstrukcyjnych popularność tego sposobu oceny cech wytrzymałościowych ma swe źródło w stosunkowo dużej łatwości przeprowadzania pomiaru oraz powtarzalność wyników przeprowadzonego w jednakowych warunkach. Stąd też, wzorując się na ustalonych dla metali procedurach pomiarowych, w przypadku nasion bardzo często określa się wartość modułu Younga. Zazwyczaj wykorzystuje się wówczas – w zależności od sposobu przeprowadzania pomiaru (rys. 3) – teorię Hertz'a, Businessqu'a lub Hook'a.

W zasadzie, przy wyznaczaniu modułu Younga materiałów konstrukcyjnych obowiązują dwa rodzaje prób wytrzymałościowych: ściskanie lub rozciąganie. Zdecydowanie pewniejszą jest próba rozciągania i w związku z tym jest ona szczególnie zalecana. Warunki przeprowadzania tych prób są ściśle określone a próbki przeznaczone do pomiaru są przygotowywane według szczegółowych wytycznych.



Rys. 3. Przykładowe metody wyznaczania modułu Younga

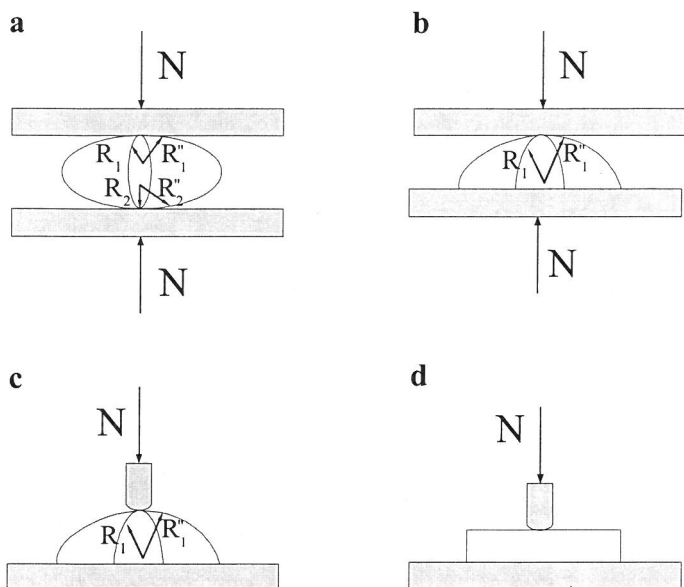
- a - ściskanie całych nasion między płaskimi płytkami (teoria Hertza)
- b - obciążanie całych nasion od strony grzbietowej wgłębnikiem kulistym (teoria Hertza)
- c - obciążanie całych nasion od strony grzbietowej wgłębnikiem walcowym (teoria Bussinesqua)
- d - ściskanie nasion ze ściętymi końcami (teoria Hooke'a)
- e - rozciąganie nasion ze ściętymi końcami (teoria Hooke'a)

Fig. 3. Example methods of determining the Young's modulus

- a – compression of whole seeds between flat plates (Hertz's theory)
- b - loading of whole seeds from the dorsal side by spherical indenter (Hertz's theory)
- c - loading of whole seeds from the dorsal side cylindrical indenter (Bussinesque's theory)
- d – compression of seeds with truncate ends (Hook's theory)
- e – tension of seeds with truncate ends (Hook's theory)

Niestety, w przypadku pomiaru sprężystości nasion mamy do czynienia z nieco inną sytuacją. Podjętych zostało bardzo wiele prób pomiaru modułu sprężystości, ale praktycznie do tej pory żaden sposób nie został usankcjonowany w postaci normy lub obowiązującego światowego standardu. Jedyne wytyczne odnośnie sposobu wyznaczania modułu Younga można znaleźć w standardach ASAE [133]. Zaproponowane procedury bazują na teorii Hertz'a i w zależności

od rodzaju materiału roślinnego obejmują różne sposoby obciążania. Zalecane zastosowania i sposoby obliczania modułu Younga zamieszczono na rysunku 4. Prezentowane wzory wyraźnie wskazują na duże uproszczenia co do geometrii badanych materiałów.



Rys. 4. Sposoby wyznaczania modułu Younga dla materiałów roślinnych

Fig. 4. Methods for determining Young's modulus of biological materials

Sposób przeprowadzania próby wytrzymałościowej zależy od rodzaju badanego materiału roślinnego:

a – zalecany dla całych warzyw, nasion

$$E = \frac{0,338 \cdot N \cdot (1 - \nu^2)}{\Delta l^{\frac{3}{2}}} \cdot \left[K_1 \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1''} \right)^{\frac{1}{3}} + K_2 \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2''} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{3}{2}}$$

b – zalecany dla połówek warzyw, nasion

$$E = \frac{0,338 \cdot K^{\frac{3}{2}} \cdot N \cdot (1 - \nu^2)}{\Delta l^{\frac{3}{2}}} \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1''} \right)^{\frac{1}{2}}$$

c – zalecany dla połówek owoców

$$E = \frac{0,338 \cdot K^{\frac{3}{2}} \cdot N \cdot (1 - \nu^2)}{\Delta l^{\frac{3}{2}}} \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1''} + \frac{4}{d} \right)^{\frac{1}{2}}$$

d – zalecany dla plastrów owoców

$$E = \frac{0,338 \cdot K^{\frac{3}{2}} \cdot N \cdot (1 - \nu^2)}{\Delta l^{\frac{3}{2}}} \cdot \left(\frac{4}{d_1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

gdzie: N – siła nacisku [N],

Δl – odkształcenie [m],

ν – współczynnik Poisson'a,

R_1, R_1'' – promienie krzywizny badanego materiału w punkcie styku z górną płytką dociskową, we wzajemnie prostopadłych powierzchniach [m],

R_2, R_2'' – promienie krzywizny badanego materiału w punkcie styku z dolną płytką dociskową, we wzajemnie prostopadłych powierzchniach [m],

d – średnica końcówki penetratora [m],

K, K_1, K_2 – stałe [74].

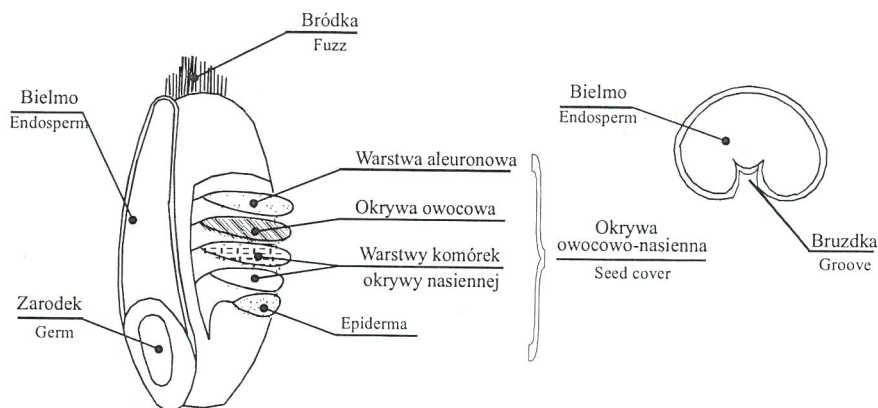
Należy uznać, że w obecnej chwili, wobec braku innych zaleceń, w badaniach sprężystości materiałów roślinnych można próbować wykorzystać standardy zaproponowane przez ASAE.

W dalszej części pracy przedstawiono analizę teoretyczno-doświadczalną opisaną metody oraz uzyskanych wyników pomiarów, pod kątem poprawności jej stosowania i wiarygodności uzyskiwanych wyników. Wykazała ona, że dla pojedynczych nasion, bazując na zbyt dużych uproszczeniach, standard ASAE nie pozwala na uzyskanie w pełni wiarygodnych i powtarzalnych wyników. Powody tej sytuacji są rozmaite. W następnych rozdziałach przedstawiono kilka najważniejszych.

2.1.1. Budowa nasienia i sposób obciążania

Nasiona są materiałem roślinnym o różnym składzie chemicznym i różnej budowie komórkowej. Bielmo ziarna, liścienie nasion stanowiące swoistego rodzaju spiżarnię, są otoczone okrywą owocowo-nasienną, która pełni rolę osłony przed chorobami, drobnoustrojami itp., a także przed obciążeniem mechanicznym. Jak to przykładowo przedstawiono dla ziarna pszenicy na rysunku 5 budowa komórkowa bielma i okrywy jest różna. Jeżeli mamy więc dokonywać oceny sprężystości całego nasienia, musimy bazować na schemacie obciążania

zgodnie z rysunkiem 4a, bowiem pozostałe przypadki wymagają przecięcia materiału poddanego próbie. Może to powodować obniżenie wytrzymałości nasienia na skutek uszkodzenia okrywy owocowo-nasiennej. Można to tłumaczyć faktem, iż zgodnie z rysunkiem 4, nasienie przypomina w pewnym sensie naczynie cienkościenne, którego ściankami jest okrywa owocowo-nasienne składająca się najczęściej z kilku różnych warstw komórek. Naprężenia w tego typu ciałach przenoszone są inaczej niż w przypadku ciągłych, izotropowych materiałów.



Rys. 5. Elementy budowy morfologicznej i anatomicznej ziarniaka pszenicy

Fig. 5. Elements of the morphological structure and the anatomical structure of the wheat's seed

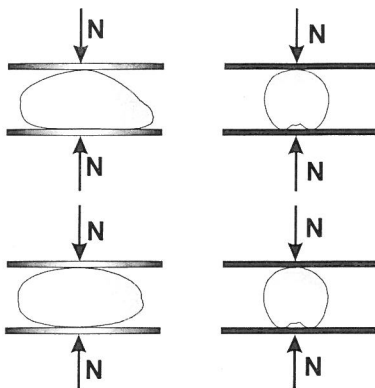
Opisana skrótowo budowa, w połączeniu z różnym kształtem nasion różnych roślin powoduje, że reakcja (a w zasadzie odkształcenie) jest zależna od kierunku przyłożonego obciążenia. Możliwość empirycznego zweryfikowania powyższej hipotezy jest niewielka – szczególnie w przypadku nasion o kształcie nieregularnym, odbiegającym od kuli. Tym niemniej, analizując budowę pojedynczego nasienia można wnioskować o tym, że przekrój niebezpieczny będzie znajdował się w miejscu, w którym udział procentowy pola powierzchni przekroju okrywy owocowo-nasiennej w stosunku do całkowitego pola powierzchni przekroju jest najmniejszy.

Należy również wspomnieć, że w przypadku ziarna kształt nasienia komplikuje jeszcze bardziej bruzdka, której głębokość jest różnaita i zależy zarówno od odmiany jak i warunków agrotechnicznych.

Problem identyfikacji stanu naprężeń próbowano rozwiązać przeprowadzając próbę ściskania na ziarnie z obciętymi końcami [89]. Niestety jak wspomniano powyżej, następuje wówczas naruszenie ciągłości okrywy owocowo-nasiennej i wykonywany pomiar nie dotyczy całego nasienia. Dodatkowo, jak przyznaje

sam autor, powstaje problem prawidłowego przygotowania próbki. Płaszczyzny przekrojów muszą być do siebie równoległe a komórki przypowierzchniowe nieuszkodzone. Wydaje się, że w przytoczonych badaniach warunki te nie zostały spełnione (materiał był szlifowany).

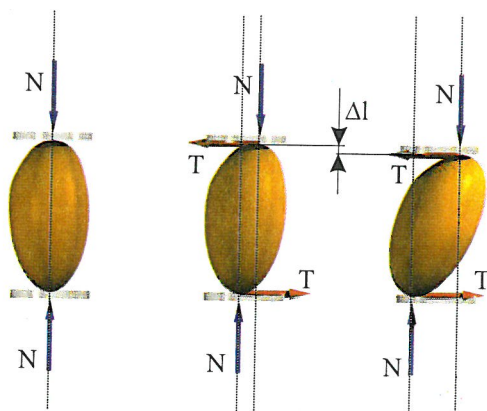
W świetle powyższych rozważań należy stwierdzić, że możliwość obciążania nasion podłużnych w wybranym kierunku jest bardzo ograniczona. Przykładowo, dla ziarna żyta, pszenicy zmuszeni jesteśmy do przeprowadzenia pomiaru przy ułożeniu ziarna bruzdką w dół (rys. 6).



Rys. 6. Ułożenie ziarna podczas próby ściskania

Fig. 6. Arrangement of the seed during the compression test

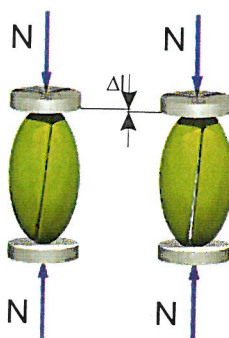
Były wprowadzanie podejmowane próby obciążania nasion wzdłuż największego wymiaru, ale są one obarczone bardzo dużym błędem. Przy stosowaniu sposobu zilustrowanego na rysunku 7 uzyskujemy trudny do opisu stan naprężeń. Prosta działania siły w sposób losowy przechodzi przez środek ciężkości przekroju – a więc tzw. czyste ściskanie zachodzi również jedynie losowo. Przy wyznaczaniu naprężeń należałoby zatem korzystać, z którejś hipotezy wyężeniowej. Niezbędne jest wówczas określenie wzajemnego usytuowania środka ciężkości oraz prostej działania siły obciążającej – co na dzisiejszym etapie badań wydaje się raczej niemożliwe. Rozwiązanie tego problemu poprzez stosowanie odpowiednich uchwytów do mocowania nasion jest wobec dużej rozpiętości kształtów i wymiarów wręcz nierealne. Dodatkowo, siła tarcia (zaznaczona na rys.7) może mieć, przynajmniej w początkowym okresie procesu ściskania na tyle małą wartość (między innymi z powodu prawie punktowego styku nasienia i płytki dociskowej), że dochodzi do przemieszczenia nasienia (obrotu). Mierzona jest wówczas wartość rzutu długości łuku drogi na kierunek działania siły nacisku Δl , a nie wartość odkształcenia.



Rys. 7. Ułożenie nasienia przy ściskaniu wzdłuż największego wymiaru

Fig. 7. Arrangement of the seed during compression along the largest dimension

W przypadkach nasion roślin dwuliściennych opisany sposób obciążania jest szczególnie niemiarodajny. Na skutek specyficznej budowy podczas obciążania dochodzi do rozdzielenia liścieni – a więc dokonuje się raczej pomiaru siły „związania” obu części nasienia a nie sprężystości badanego materiału (rys.8).



Rys. 8. Rozdzielenie liścieni w próbie ściskania

Fig. 8. Separation of the cotyledon during the compression test

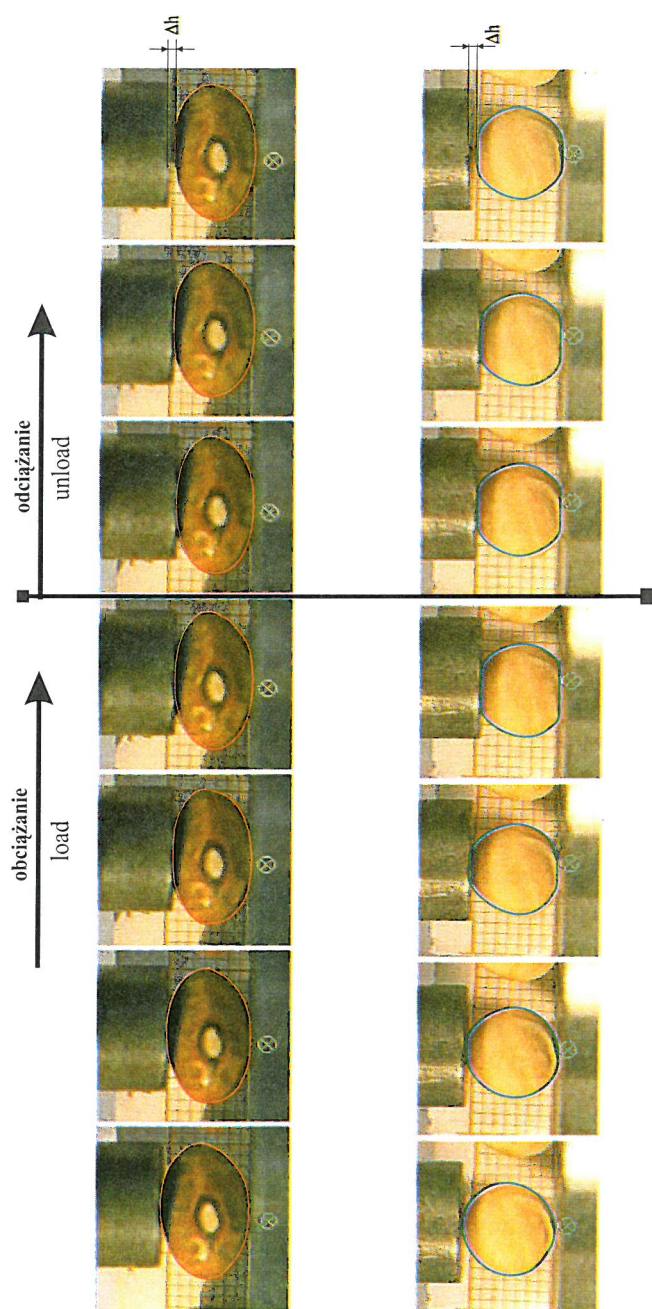
W przypadku nasion większość badań bazuje na metodach opracowanych dla materiałów konstrukcyjnych i jest w zasadzie przeprowadzana poprzez ściskanie badanego materiału między dwoma równoległymi płytkami. Do tej pory nie znaleziono bowiem rozwiązania, które dałoby możliwość odpowiedniego uchwycenia

nasienia podczas próby rozciągania – bez naruszenia struktury okrywy owocowo-nasiennej. Proponowano wprawdzie klejenie nasion do trzpieni rozciągających, ale nie wiadomo wówczas, w którym miejscu odkształca się materiał – co jest niezmiernie istotne przy obliczeniu naprężeń – i czy jest to badane nasienie, czy też mocujący je klej. Klasyczne próby na rozciąganie wymagają stosowania próbek o jednakowym przekroju poprzecznym i posiadają specjalne odsadzenia do mocowania w uchwycie zrywarki.

Należy również podkreślić, że dla materiałów konstrukcyjnych, dzięki odpowiedniemu przygotowaniu próbki materiału, podczas przeprowadzania próby na ściskanie mamy do czynienia ze stykiem próbki i płytek dociskowych na pewnej powierzchni. Powstaje zatem siła tarcia, która przeszkadza promieniowemu przemieszczaniu się materiału. W efekcie, w pobliżu powierzchni czołowych próbka materiału odkształca się w małym stopniu i przybiera kształt beczkowaty. Oczywiście stan naprężeń poszczególnych elementów próbki nie jest jednoosiowy. Można by tego uniknąć stosując odpowiednio długie próbki - zgodnie z zasadą Saint-Venanta, mówiącą o tym, że w przypadku, gdy na niewielkim obszarze działają na ciało sprężyste statycznie równoważne układy sił, to w dostatecznie dużej odległości od tych obszarów wywołane tymi siłami stany naprężenia są praktycznie jednakowe. W dostatecznie dużych odległościach od powierzchni czołowej próbki można więc pominąć oddziaływanie sił tarcia i przyjąć, że mamy do czynienia z jednoosiowym stanem naprężeń. Niestety zazwyczaj tak długie próbki ulegają wyboczeniu i nie można ich zatem stosować. Siła tarcia zostaje minimalizowana poprzez stosowanie smarowania płyt prasy oraz powierzchni czołowych próbek.

Powyższe uwagi w sposób uproszczony sygnalizują jak kłopotliwe jest przeprowadzenie próby ściskania i ile problemów wiąże się ze stosowaniem tej metody przy wyznaczaniu modułu Younga. W przypadku nasion oprócz wymienionych powyżej trudności dochodzą jeszcze nowe, takie choćby jak kwestia punktowego styku płytek dociskających i nasienia.

W celu dokonania oceny zmiany kształtu nasienia ściskanego między dwoma równoległymi płytkami autorzy opracowania filmowali przebieg tego procesu realizowany na maszynie wytrzymałościowej Instron. Uzyskane filmy przeanalizowano następnie w systemie „poklatkowym”. Przykładowe, wybrane kolejne kadry zamieszczono na rysunku 9. Można zaobserwować wyraźną zmianę początkowego kształtu nasion w miarę zwiększania nacisku. Dla uwypuklenia tego zjawiska wyjściowy kształt nasienia zaznaczono na każdym kadrze przy pomocy jednokolorowej obwiedni. Można zaobserwować wyraźne różnice w sposobie odkształcania się części górnej i dolnej. Od strony górnej, ruchomej



Rys. 9. Kolejne etapy procesu ściskania nasion; a - fasola Jubilatka, b - groch Piast
 Fig. 9. Successive steps of the seed's compression process; a - Jubilatka bean, b - Perkoz field pea

płytki dociskowej następuje szybsze odkształcenie badanego materiału. Zwiększa się bardzo wyraźnie powierzchnia kontaktu między nasieniem a płytką. W efekcie różnic w przebiegu procesu odkształcania deformacja górnej części nasienia (po odciążeniu) jest wyraźna i mimo pewnej początkowej symetrii badanego materiału, dużo większa od odkształcenia powstałego w części dolnej (ostatnie kadry na rys. 9). Świadczy to o różnym sposobie rozchodzenia się fali odkształcenia. Prawdopodobnie, od strony aktywnego elementu prędkość ta jest większa. Jednakowe traktowanie odkształceń w części dolnej i górnej może powodować błąd odczytu wartości deformacji oraz pola powierzchni kontaktu.

Pomiary położenia środków badanych nasion pozwoliły również na stwierdzenie, że mimo początkowej stabilności nasienia położonego na dolnej płytce, pod wpływem siły nacisku dochodzi do jego przemieszczenia się (obrotu) zgodnie z rozważaniami przedstawionymi już wyżej. Wydaje się więc, że dokładne opisanie przebiegu procesu ściskania nasion przy uwzględnieniu upraszczających założeń odnośnie kształtu materiału i jego stabilnego położenia, nie jest możliwe.

2.1.2. Zastosowanie prawa Hooke'a przy określaniu sprężystości nasion

Doświadczalnie zweryfikowane prawo Hooke'a mówi o tym, że w zakresie małych odkształceń ciała związku między naprężeniami a odpowiadającymi im odkształceniami są liniowe. Prawo to jest bazą, na której opiera się stereo-mechanika. W przypadku jednoosiowego stanu naprężeń prawo to można zapisać następującymi zależnościami:

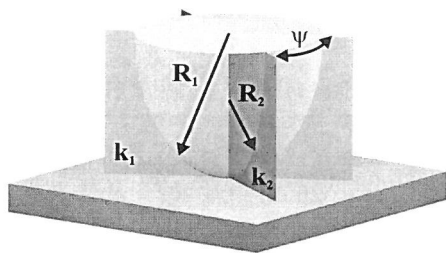
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \text{oraz} \quad \varepsilon' = -\nu \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

gdzie: ε - odkształcenie liniowe w kierunku wzdłużnym,
 ε' - odkształcenie liniowe w kierunku poprzecznym,
 σ - naprężenie normalne w przekroju poprzecznym do kierunku działania obciążenia,
 ν - współczynnik przewężenia poprzecznego (Poissona),
 E - moduł sprężystości podłużnej (Younga).

Współczynnik proporcjonalności E jest jedną z najważniejszych stałych materiałowych i określa stosunek między naprężeniem a odkształceniem w zakresie odkształceń sprężystych. Do jego określenia niezbędne jest jednak ściśle sprecyzowanie zakresu wymienionych odkształceń. Powstaje więc pytanie: jak zakres ten został określony dla pojedynczych nasion?

Podczas próby ściskania nasienia między dwoma równoległymi płytkami, mamy do czynienia z naprężeniami stykowymi (kontaktowymi). Analiza tego typu naprężeń jest jednym z trudniejszych zagadnień w teorii sprężystości. W określaniu modułu Younga wykorzystujemy wówczas elementy teorii Hertz'a dotyczącej naprężeń pochodzących od wzajemnego nacisku dwóch stykających się ciał o zadanych kształtach. Tak więc naprężenia normalne σ określane są po przyjęciu pewnych uproszczeń, które dotyczą między innymi:

- kształtu powierzchni ograniczających nasienie w punktach styku z górną i dolną płytką. Jest on opisany przy pomocy promieni krzywizn głównych - czyli krzywizn ekstremalnych w danym punkcie (rys. 10). Promień R_1 jest promieniem krzywizny minimalnej a R_2 promieniem krzywizny maksymalnej. Kąt ψ zawarty pomiędzy płaszczyznami krzywizn głównych k_1 oraz k_2 jest kątem prostym.



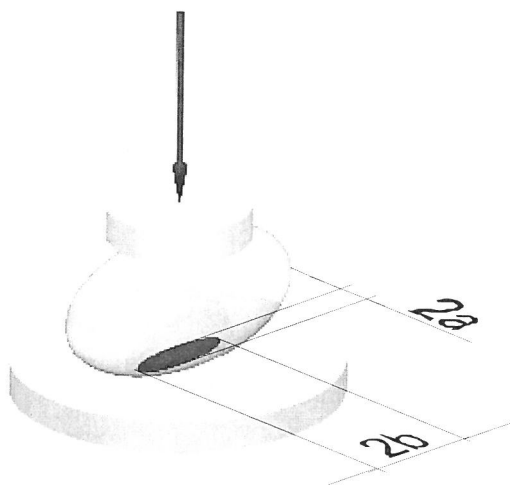
Rys. 10. Styk ciała niekulistego z płaską powierzchnią

Fig. 10. Point of contact of unrounded body with the flat surface

- kształtu powierzchni styku. Przyjmuje się, że jest to powierzchnia ograniczona elipsą (rys. 11), której półosie uzależnione są m.in. od modułu E , stałej Poissona, parametrów geometrycznych nasienia oraz wartości siły dociskającej.
- założenia, że odkształcenia w górnej i dolnej części nasienia są jednakowe
- założenia, że moduł E dla nasienia jest dużo mniejszy niż dla materiału płytek
- założenia, że największe naprężenia występuje w środku elipsy styku i wynosi:

$$\sigma_{\max} = \frac{1,5 \cdot N}{\pi \cdot a \cdot b} \quad (2)$$

gdzie: N – siła nacisku, a , b – długość półosi elipsy styku.



Rys. 11. Teoretyczna powierzchnia kontaktu nasienia z płaską powierzchnią

Fig. 11. Theoretical surface of the contact between the seed and the flat surface

Należy podkreślić, że przytoczona powyżej pobieżnie teoria dotycząca wyznaczania E , na bazie określenia naprężeń kontaktowych w dalszym ciągu dotyczy jedynie odkształceń sprężystych oraz założenia, że podczas ściskania powstaje mała powierzchnia styku. Jak jednak proces tworzenia powierzchni styku przebiega podczas ściskania materiału roślinnego? Analizując uzyskane obrazy (pod powiększeniem 40X) ściskanych nasion rozróżniono poszczególne fazy tego procesu. W pierwszej fazie, na skutek dużych naprężeń występujących przy powierzchniach styku badanego materiału i płytek dociskowych dochodzi prawdopodobnie do powstania trwałych odkształceń plastycznych. Dopiero po utworzeniu się pewnej powierzchni styku rozpoczyna się faza druga - proces „prawdziwego” ściskania całego nasienia. Skoro tak, to powstaje pytanie, do którego momentu trwa pierwszy etap? jak należy traktować uzyskane wyniki? Przede wszystkim jednak trzeba odpowiedzieć na pytanie: czy uzasadnione jest stosowanie prawa Hooke’a w przypadku nasion – problematyczne jest bowiem stwierdzenie „w zakresie małych odkształceń”. Z opisanego przebiegu procesu ściskania wynika, że wspomniany zakres małych odkształceń to prawdopodobnie odkształcenia plastyczne, a więc w pierwszej kolejności należałoby określić, w jakich warunkach, przy ściskaniu nasion, zachodzą odkształcenia sprężyste i ustalić procedurę ich określania. Jest to warunek uprawniający do wyznaczania modułu Younga.

Zastrzeżenia, co do stosowania prawa Hooke’a w stosunku do nasion można by mnożyć. Jednym z ważniejszych problemów są również wyraźne reologiczne cechy tych materiałów. Nie zawsze wiadomo zatem, czy odkształcenie trakto-

wane jako plastyczne nie zniknie po pewnym czasie. Ostatni kadr procesu ściskania zamieszczony na rysunku 9 obrazuje ubytek wysokości nasienia Δh , który wskazuje na plastyczne odkształcenie nasienia w górnej części, tym niemniej część tego odkształcenia cofa się po pewnym czasie na skutek tzw. „sprężystości opóźnionej”.

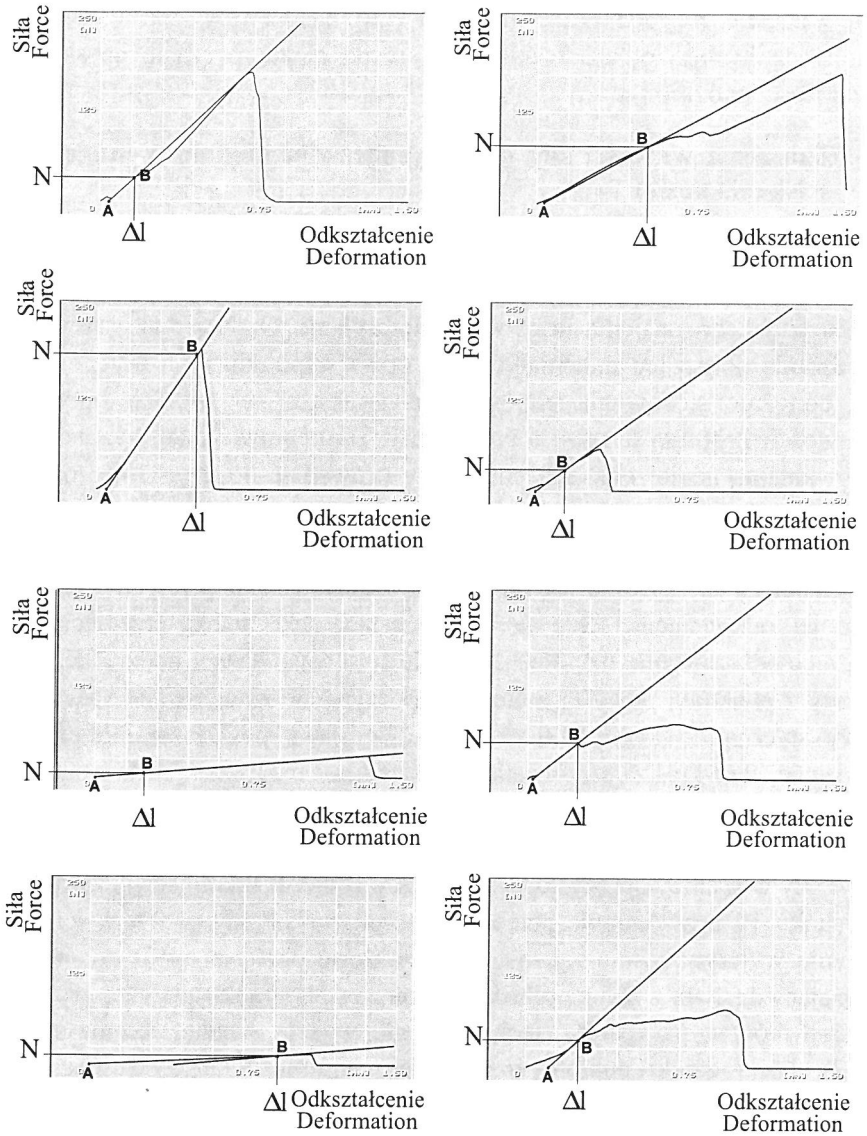
2.1.3. Znaczenie wartości siły przy wyznaczaniu modułu Younga w teście ściskania nasion

Zalecenia wypracowane przez ASAE bazują na pomiarze siły i odkształcenia w próbie ściskania między dwoma równoległymi płytkami oraz na aproksymacji kształtu badanego nasienia odpowiednimi bryłami. O ile jednak istnieją liczne opracowania dotyczące matematycznego opisu wspomnianych brył, o tyle zalecenia odnośnie stosowania odpowiednich wartości sił nacisku budzą pewne wątpliwości. Problem ten jest o tyle ważny, że nieprawidłowe wyznaczanie siły i odpowiadającego jej odkształcenia może prowadzić do uzyskania rozbieżnych wyników obliczeń.

Zgodnie ze wspomnianymi zaleceniami ASAE, przy obliczaniu modułu Younga należy uwzględnić siłę na granicy odkształceń sprężystych oraz odpowiadające jej odkształcenie. Siła ta jest określana jako punkt przegięcia krzywej obciążenie-odkształcenie uzyskanej w teście ściskania. Należy podkreślić, że jest to pierwszy z punktów, powyżej którego rozpoczyna się zmniejszanie kąta zawartego między styczną do krzywej o oś OX . Podstawą powyższej interpretacji jest twierdzenie, iż wykres zależności siła - odkształcenie ma kształt jak na rysunku 2.

Jednak w rzeczywistości, w czasie testu ściskania uzyskujemy różne charakterystyki i korzystanie z zaleceń ASAE powoduje w wielu przypadkach błędny odczyt siły w granicy sprężystości. Powyższe stwierdzenia ilustrują zamieszczone na rysunku 12 przykładowe przebiegi, które uzyskaliśmy w teście ściskania na maszynie wytrzymałościowej Instron w zakresie obciążeń od 0 do 400 N. Siła obciążająca działała wzdłuż grubości nasion ze stałą prędkością $1,25 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Zarówno w przypadku teoretycznego wykresu odkształcenie-napężenie (rys. 2), jak i dzięki analizie uzyskanych empirycznych wykresów ściskania można zaobserwować, że nawet w początkowej fazie procesu - czyli zalecanych przy obliczaniu modułu Younga małych wartości odkształceń – nie można w zasadzie wyodrębnić liniowej zależności między przytoczonymi wielkościami. Mogłoby to prowadzić do błędnego stwierdzenia, że badane nasiona nie wykazały cech sprężystych. Jednak należy raczej uznać, że mamy do czynienia z materiałem nieliniowo sprężystym.

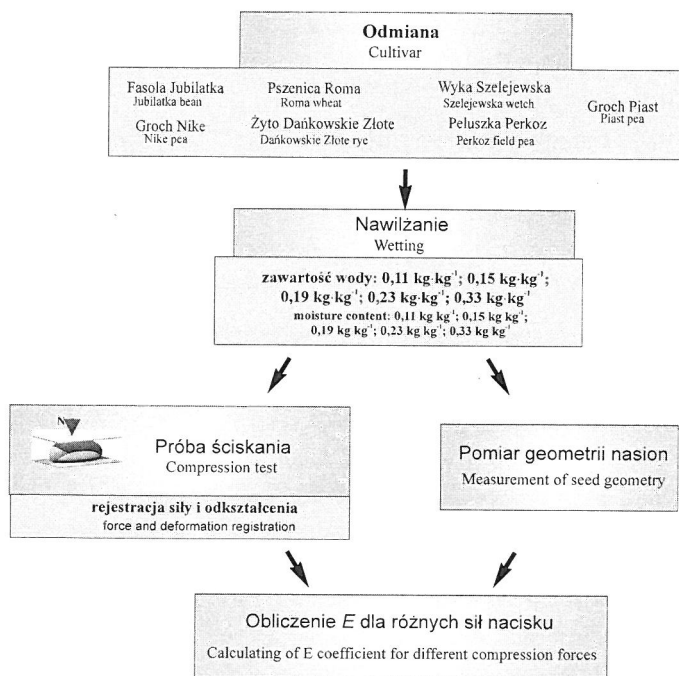


Rys. 12. Przykładowe wykresy zależności siły od odkształcenia uzyskane w próbie ściskania ziarna pszenicy Roma dla różnych zawartości wody

Fig. 12. The force-deformation curves obtained at grain compression of Roma wheat

Wyznaczanie punktu przegięcia mija się zatem z celem i prowadzi do sytuacji, w której tangens kąta nachylenia stycznej do krzywej (w punkcie przegięcia) do osi OX nie jest odpowiednikiem modułu Younga. Powyższą sytuację zobrazowano przykładowo na rysunku 12. Zgodnie ze standardem narysowano styczną w punkcie przegięcia krzywej oraz dokonano linearyzacji krzywej na długości AB. Wydaje się - w świetle przeprowadzonych badań - że uzyskany odcinek AB jest reprezentatywny dla fazy odkształceń sprężystych nasienia (z uwzględnieniem wspomnianej wcześniej sprężystości opóźnionej). Różnica wartości kątów uzyskanych odpowiednio między styczną i odcinkiem AB a osią OX jest wymierną oceną błędu popełnianego przy określaniu modułu Younga zgodnie z procedurą zaproponowaną przez ASAE.

Dla określenia, przy jakiej wartości siły nacisku należy odczytywać odkształcenie przeprowadzony został eksperyment zgodnie ze schematem na rysunku 13. Hipoteza, którą starano się zweryfikować w sposób doświadczalny brzmiała następująco: istnieje pewien przedział wartości siły nacisku, przy którym odkształcenie jest liniowo zależne od wartości tej siły (na poziomie statystycznie istotnym).



Rys. 13. Schemat doświadczenia

Fig. 13. Diagram of the experiment

Obliczenie modułu E badanych nasion zostało wykonane wg zaleceń ASAE [1999]. W przypadku nasion peluszeki Perkoz przyjęto uproszczenie, że kształt ziarna można przyrównać do sferoidy a dla nasion grochu Nike do walca. Przy takim założeniu promienie krzywizny wynoszą (rys. 14):

- w przekroju poprzecznym

$$R_L \approx \infty \quad R_u \approx \frac{H}{2} \quad (3)$$

- w przekroju podłużnym

$$R_L'' \approx \infty \quad R_L'' \approx \frac{H^2 + L^2 / 4}{2 \cdot H} \quad (4)$$

Wzór na moduł sprężystości przyjmie wówczas postać:

$$E = \frac{0,114 \cdot N}{\Delta L^{\frac{3}{2}}} \cdot K \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (8 \cdot H^2 + L^2)}{4 \cdot H^2 + H \cdot L^2}} \quad (5)$$

gdzie: E - moduł Younga [Pa],
 N - siła nacisku [N],
 ΔL - odkształcenie liniowe [m],
 H - wysokość ziarna [m],
 L - długość ziarna [m],
 K - stała.

$$K = f \left(\cos \theta = \frac{L^2}{2 \cdot (8 \cdot H^2 + L^2)} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

Przy obliczaniu modułu sprężystości ziarna pszenicy Roma oraz żyta Dańkowskie Złote założyliśmy, iż są to nasiona symetryczne (rys. 15). Można wówczas przyjąć, że promienie krzywizny wynoszą:

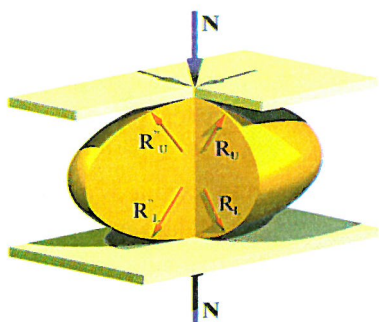
$$R_1 = \frac{H}{2} \quad R_2 = \frac{H^2 + L^2}{4 \cdot H} \quad (7)$$

Natomiast moduł sprężystości można zapisać jako:

$$E = \frac{0,643}{\Delta L^{\frac{3}{2}}} \cdot K' \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot H^2 + L^2}{4 \cdot H}} \quad (8)$$

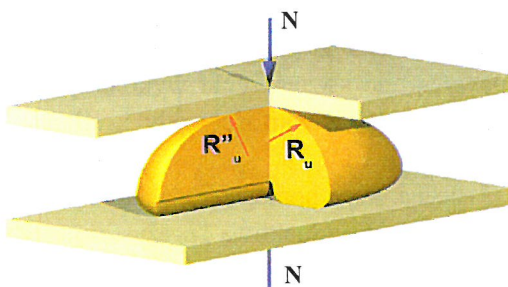
gdzie:

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



Rys. 14. Sposób obciążania nasion o kształcie elipsoidalnym

Fig. 14. Method of loading of the elipsoidal seeds



Rys. 15. Sposób obciążania ziarna symetrycznego

Fig. 15. Method of loading of the symmetrical seed

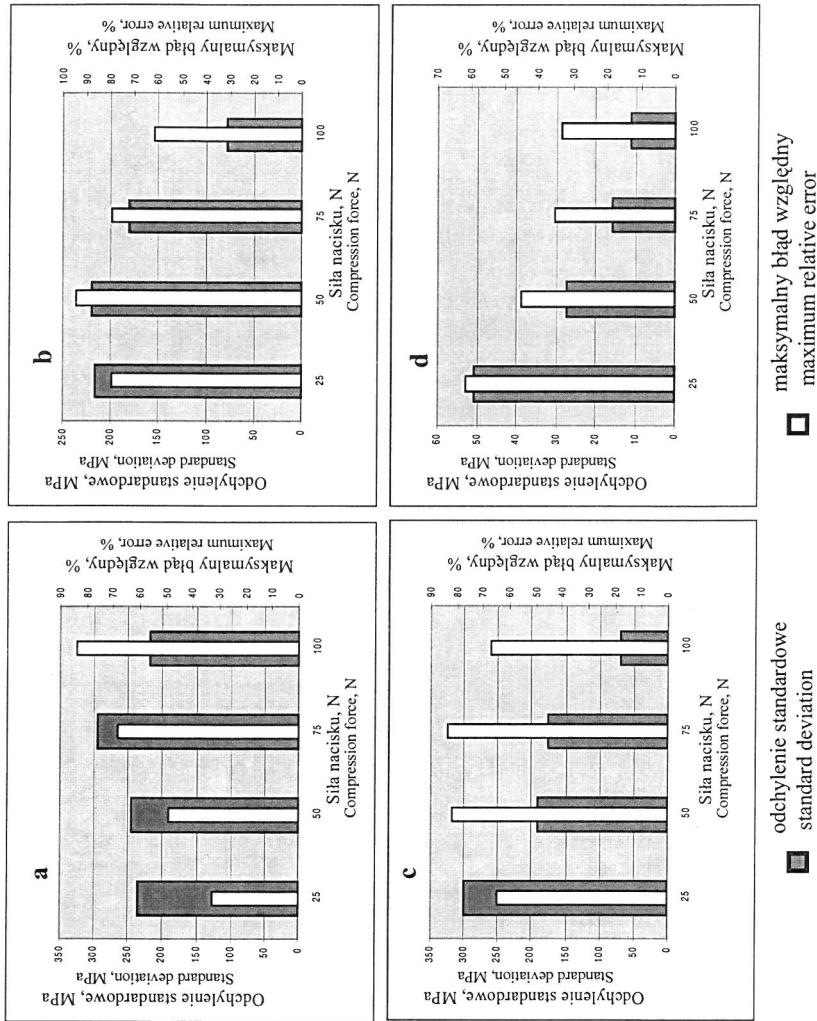
Prezentowane w dalszej części wyniki badań uzyskano dzięki doświadczeniu, zaplanowanemu i przeprowadzonemu w celu określenia warunków, w jakich należy przeprowadzać próbę ściskania nasion. Materiał badawczy stanowiły nasiona siedmiu roślin uprawnych, które różniły się kształtem oraz wymiarami geometrycznymi. Liczba analiz dla każdej wersji doświadczenia wynosiła 50. Jako dodatkowe czynniki uwzględniono zawartość wody w materiale, siłę nacisku oraz prędkość obciążania (wpływ ostatniego z wymienionych czynników został omówiony w dalszej części pracy).

Po obliczeniu modułu Younga oszacowano wiarygodność uzyskanych wyników. Kryteriami oceny było odchylenie standardowe oraz procentowa wartość maksymalnego błędu względnego. Pierwsze z kryteriów świadczy o skupieniu uzyskanych wyników wokół średniej, drugi natomiast wskazuje na szerokość przedziału między minimalną i maksymalną wartością modułu Younga. Uzyskane wyniki obliczeń prezentują wykresy zamieszczone na rysunku 16 - żyto Dańkowskie Złote, rysunku 17 - groch Piast, rysunku 18- fasola Jubilatka, rysunku 19 - groch Nike, rysunku 20 - pszenica Roma, rysunku 21 - wyka Szelejewska, rysunku 22 - peluszk Perkoz. Po dokonaniu ich analizy można stwierdzić, że przy określaniu modułu Younga nasion należy kierować się zawartością wody w materiale. I tak, w przypadku nasion suchych ($0,11-0,15 \text{ kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$) należy dokonywać odczytu odkształcenia przy sile nacisku równej 50 N; natomiast dla nasion wilgotnych, odczyt ten powinien być dokonany przy sile nacisku 25 N.

Uzasadnienie konieczności dokonania tego typu rozgraniczenia wydaje się oczywiste: w miarę wzrostu zawartości wody w nasionach stają się one coraz mniej sprężyste (zwiększa się ich lepkość), a zatem odkształcenia plastyczne rozpoczynają się przy coraz mniejszych wartościach siły nacisku.

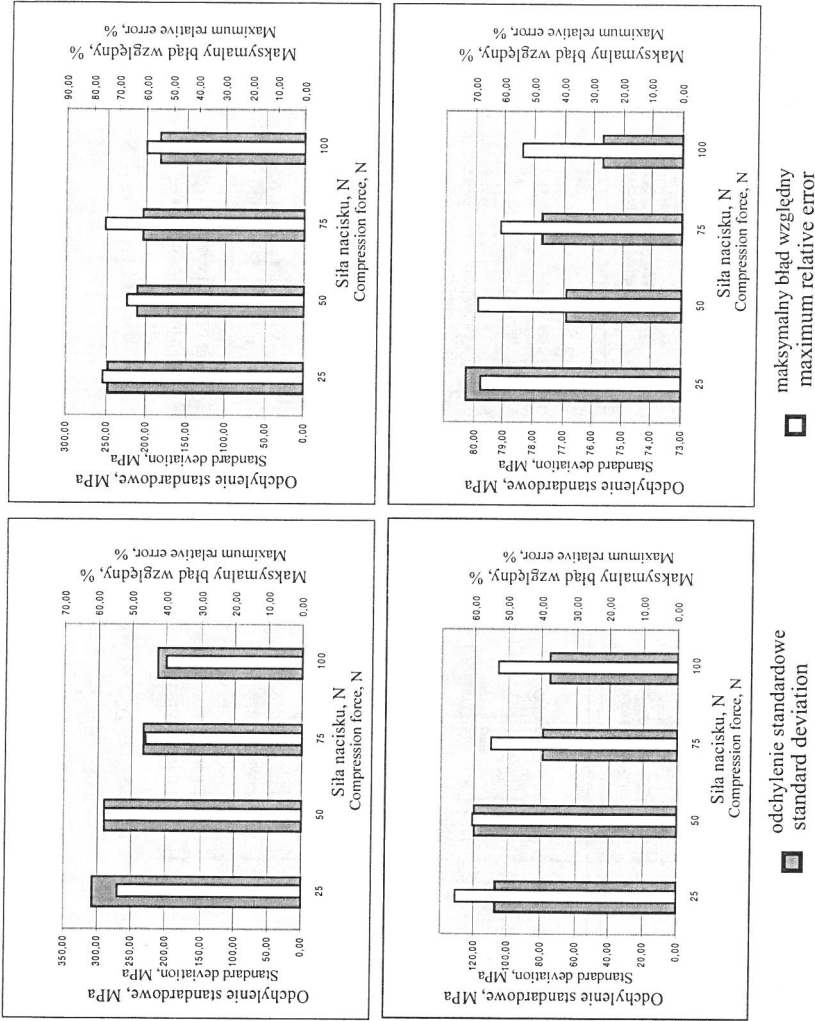
Dodatkowym argumentem za wprowadzeniem takiego zalecenia jest zaobserwowana tendencja do stabilizacji modułu Younga przy określonej sile nacisku oraz zawartości wody w nasionach. Dla sprawdzenia prawdziwości powyższego stwierdzenia wykonano test Duncana dla interakcji gatunek x siła nacisku oraz zawartość wody x siła nacisku. Wyniki tego testu zamieszczono w tabelach 1 i 2.

Jedna grupa homogeniczna, która powstała przy zawartości wody $0,33 \text{ kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$ wskazuje na jednakową sprężystość materiałów. Jak wykazała optyczna analiza przebiegu próby wytrzymałościowej, przy tak dużej zawartości wody w nasionach przeważają odkształcenia plastyczne – trudno zatem mówić o określaniu modułu Younga. Z tych względów w dalszej fazie badań ograniczono zakres nawilżania materiału do poziomu $0,23 \text{ kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$



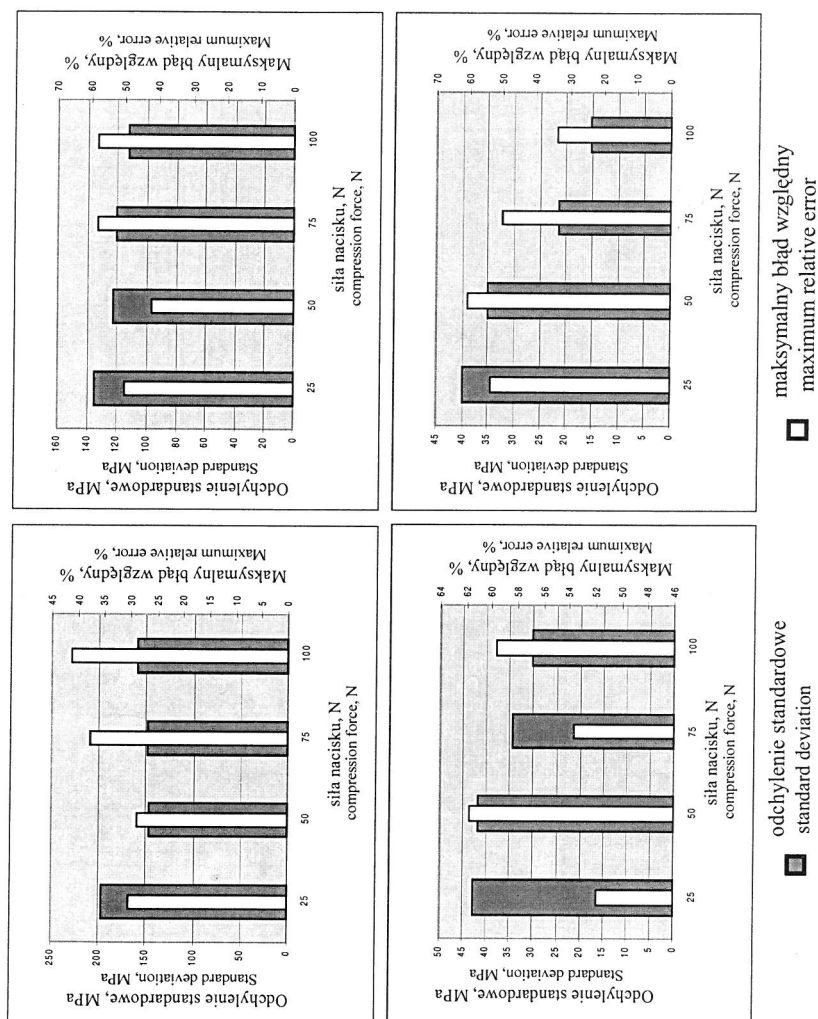
Rys. 16. Odchylenie standardowe i maksymalny błąd względny w zależności od siły nacisku na różnych poziomach zawartości wody: a – 0,1 kg·kg⁻¹; b – 0,15 kg·kg⁻¹; c – 0,19 kg·kg⁻¹; d – 0,23 kg·kg⁻¹. Żyto Dańkowskie Żłote.

Fig. 16. The standard deviation and the maximum relative error in dependency of value of compression force at different levels of water content: a – 0.11 kg kg⁻¹; b – 0.15 kg kg⁻¹; c – 0.19 kg kg⁻¹; d – 0.23 kg kg⁻¹. Dańkowskie Żłote rye.

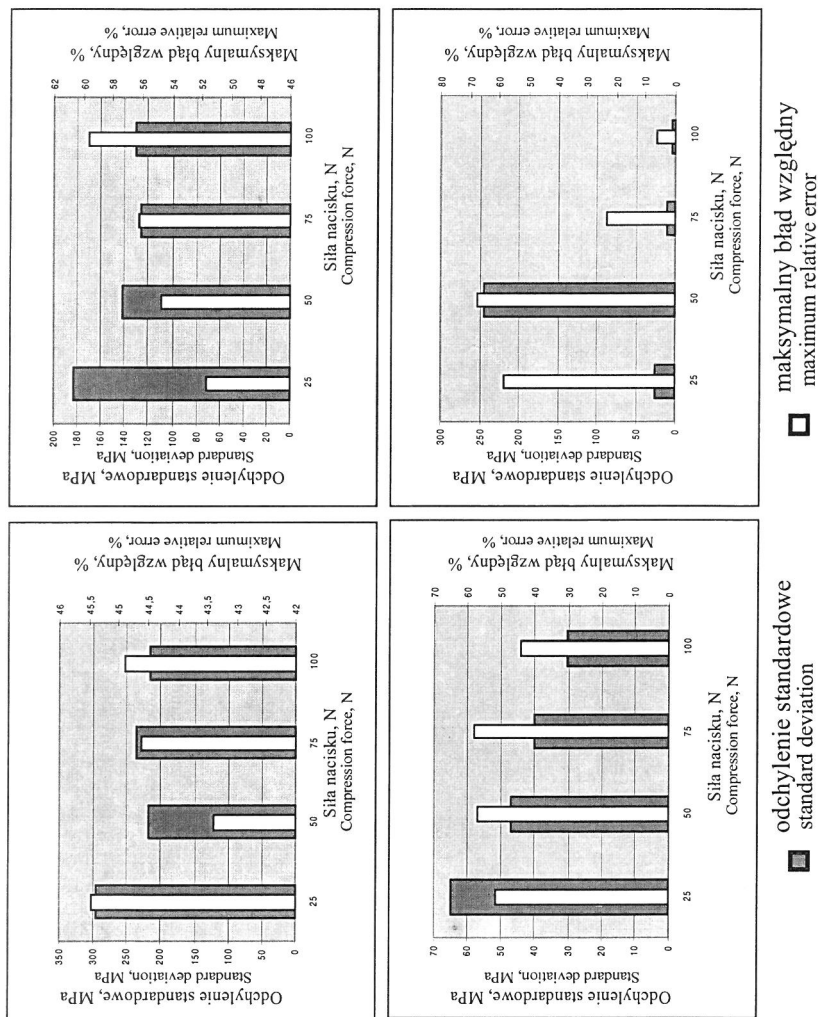


Rys. 17. Odchylenie standardowe i maksymalny błąd względny w zależności od siły nacisku na różnych poziomach zawartości wody: a – 0,11 kg·kg⁻¹; b – 0,15 kg·kg⁻¹; c – 0,19 kg·kg⁻¹; d – 0,23 kg·kg⁻¹. Groch Piast

Fig. 17. The standard deviation and the maximum relative error in dependency of value of compression force at different levels of water content: a – 0.11 kg kg⁻¹; b – 0.15 kg kg⁻¹; c – 0.19 kg kg⁻¹; d – 0.23 kg kg⁻¹. Piast pea.

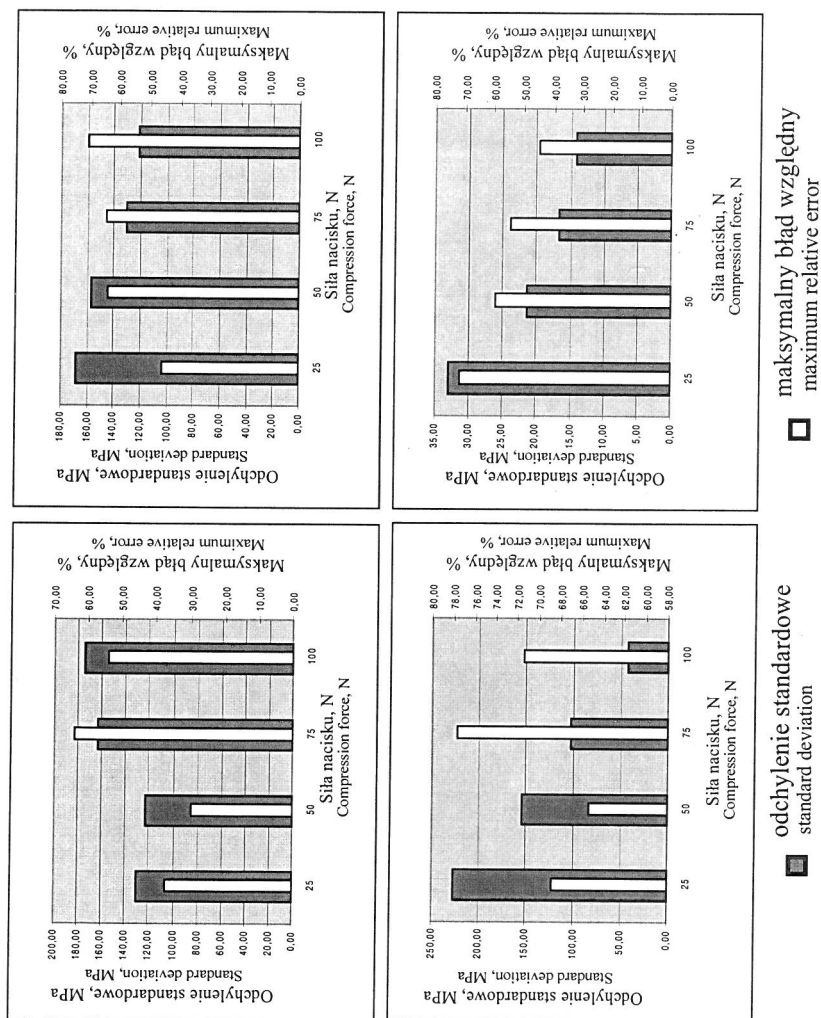


Rys. 18. Odchylenie standardowe i maksymalny błąd względny w zależności od siły nacisku na różnych poziomach zawartości wody: a – 0,11 kg·kg⁻¹; b – 0,15 kg·kg⁻¹; c – 0,19 kg·kg⁻¹; d – 0,23 kg·kg⁻¹. Fasola Jubilatka
Fig. 18. The standard deviation and the maximum relative error in dependency of value of compression force at different levels of water content: a – 0.11 kg kg⁻¹; b – 0.15 kg kg⁻¹; c – 0.19 kg kg⁻¹; d – 0.23 kg kg⁻¹. Jubilatka bean

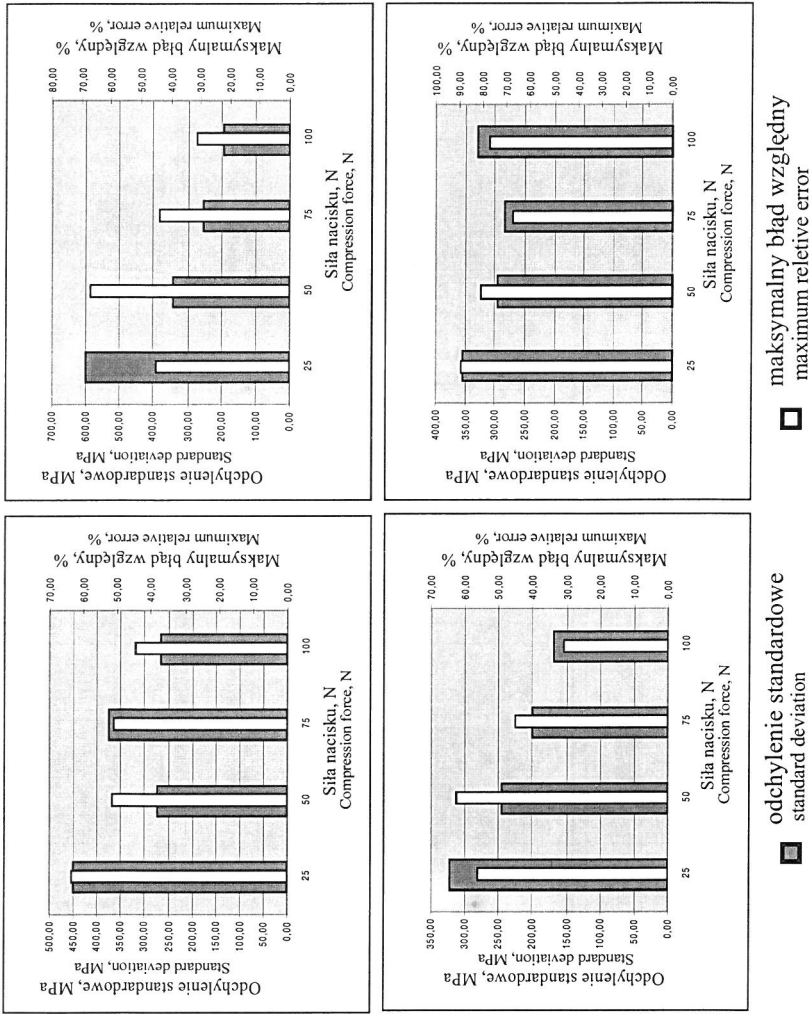


Rys. 19. Odchylenie standardowe i maksymalny błąd względny w zależności od siły nacisku na różnych poziomach zawartości wody: a – 0,11 kg·kg⁻¹; b – 0,15 kg·kg⁻¹; c – 0,19 kg·kg⁻¹; d – 0,23 kg·kg⁻¹. Groch Nike

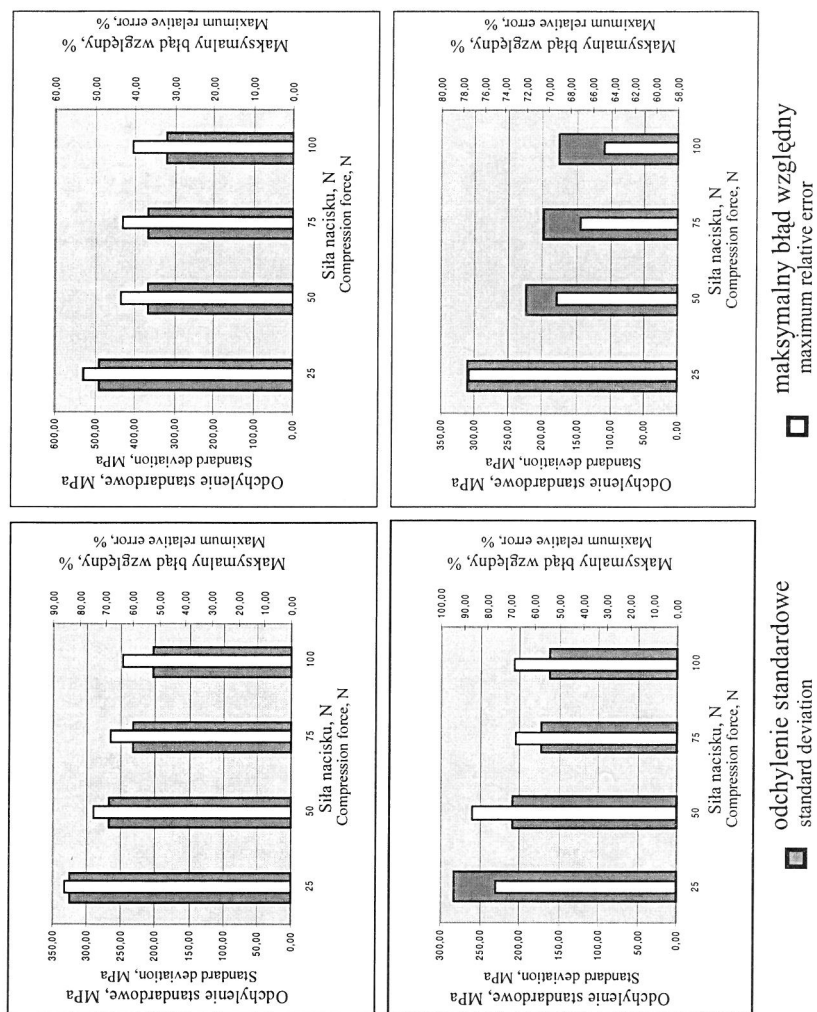
Fig. 19. The standard deviation and the maximum relative error in dependency of value of compression force at different levels of water content: a – 0.11 kg kg⁻¹; b – 0.15 kg kg⁻¹; c – 0.19 kg kg⁻¹; d – 0.23 kg kg⁻¹. Nike pea



Rys. 20. Odchylenie standardowe i maksymalny błąd względny w zależności od siły nacisku na różnych poziomach zawartości wody: a – 0,11 kg·kg⁻¹; b – 0,15 kg·kg⁻¹; c – 0,19 kg·kg⁻¹; d – 0,23 kg·kg⁻¹. Pszenica Roma
Fig. 20. The standard deviation and the maximum relative error in dependency of value of compression force at different levels of water content: a – 0.11 kg kg⁻¹; b – 0.15 kg kg⁻¹; c – 0.19 kg kg⁻¹; d – 0.23 kg kg⁻¹. Roma wheat



Rys. 21. Odchylenie standardowe i maksymalny błąd względny w zależności od siły nacisku na różnych poziomach zawartości wody: a – 0.11 kg·kg⁻¹; b – 0.15 kg·kg⁻¹; c – 0.19 kg·kg⁻¹; d – 0.23 kg·kg⁻¹. Wyka Szelejewska
Fig. 21. The standard deviation and the maximum error in dependency of value of compression force at different levels of water content: a – 0.11 kg·kg⁻¹; b – 0.15 kg·kg⁻¹; c – 0.19 kg·kg⁻¹; d – 0.23 kg·kg⁻¹. Szelejewska vetch



Rys. 22. Odchylenie standardowe i maksymalny błąd względny w zależności od siły nacisku na różnych poziomach zawartości wody: a – 0,11 kg·kg⁻¹; b – 0,15 kg·kg⁻¹; c – 0,19 kg·kg⁻¹; d – 0,23 kg·kg⁻¹. Peluszką Perkoz
Fig. 22. The standard deviation and the maximum relative error in dependency of value of compression force at different levels of water content: a – 0.11 kg kg⁻¹; b – 0.15 kg kg⁻¹; c – 0.19 kg kg⁻¹; d – 0.23 kg kg⁻¹. Perkoz field pea

Tabela 1. Wyniki testu Duncana dla interakcji zawartość wody x siła nacisku**Table 1.** Results of Duncan's test for the interaction of the water content and the compression force

Zawartość wody Water content (kg kg ⁻¹)	Siła nacisku Compression force (N)	Moduł E E modulus (MPa)	Istotność różnic Significance of differences
0,11	25	941,29	X
	50	762,00	X
	75	672,79	X
	100	599,84	X
0,15	25	723,54	X
	50	597,15	X
	75	521,88	X
	100	472,36	X
0,19	25	449,21	X
	50	319,86	X
	75	258,04	X
	100	225,96	X
0,23	25	190,99	X
	50	154,75	X
	75	136,13	X
	100	147,17	X
0,33	25	88,12	X
	50	65,78	X
	75	54,89	X
	100	72,30	X

Tabela 2. Wyniki testu Duncana dla interakcji odmiana x zawartość wody**Table 2.** Results of Duncan's test for the interaction of the cultivars and the water content

Odmiana Cultivar	Siła nacisku Compression force (N)	Moduł E E modulus (MPa)	Istotność różnic Significance of differences
Fasola Jubilatka Jubilatka bean	25	365,72	X
	50	293,13	X
	75	252,20	X
	100	243,61	X
Groch Nike Nike pea	25	381,41	X
	50	331,48	X
	75	301,50	X
	100	294,10	X
Żyto Dańkowskie Złote Dańkowskie Złote rye	25	545,49	X
	50	359,45	X
	75	237,60	X
	100	139,98	X
Pszenica Roma Roma wheat	25	462,56	X
	50	345,49	X
	75	257,42	X
	100	202,61	X
Groch Piast Piast pea	25	421,60	X
	50	376,57	X
	75	360,48	X X
	100	353,45	X
Wyka Szelejewska Szelejewska vetch	25	1030,36	X
	50	818,31	X
	75	738,48	X
	100	703,40	X
Peluszk Perkoz Perkoz field pea	25	826,64	X
	50	684,63	X
	75	632,79	X
	100	592,16	X

Przeprowadzone badania wykazały jednoznacznie, że kwestia stosowania odpowiednich sił nacisku przy określaniu modułu sprężystości Younga jest istotna. Wydaje się, że błędne jest określanie początkowej fazy obciążania - do punktu przegięcia krzywej - jako sprężystej. Przeprowadzone pomiary wykazały bowiem dużą różnorodność uzyskiwanych charakterystyk. Stosowanie praw klasycznej mechaniki ośrodków ciągłych do opisu zależności naprężenie-odkształcenie dla roślinnych materiałów ziarnistych jest zbyt dużym przybliżeniem. Niezbędne jest zatem opracowanie nowej teorii w sposób dokładniejszy opisującej zależność obciążenie - odkształcenie oraz uwzględniającej wszystkie czynniki determinujące zmianę właściwości mechanicznych ośrodka ziarnistego.

2.1.4. Prędkość odkształcania

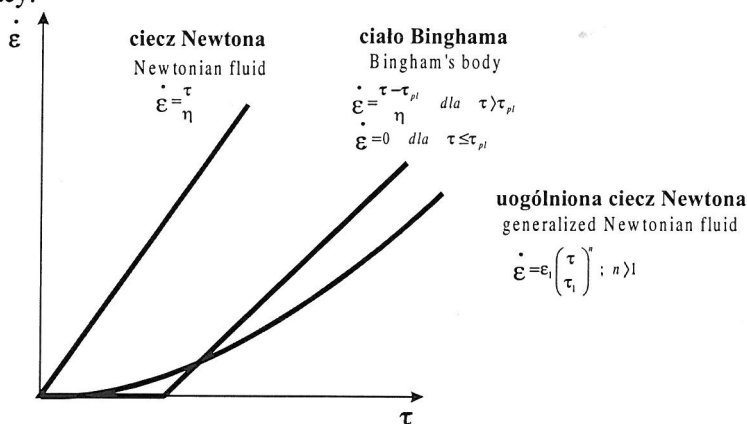
W przypadku materiałów konstrukcyjnych prędkość odkształcania, przy której prowadzi się badania, mieści się w granicach 10^{-5} - 10^{-2} mm·s⁻¹ i dla większości metali nie wpływa wówczas na kształt krzywej obciążenie – odkształcenie. Przy większych prędkościach granice wytrzymałości i plastyczności wzrastają a odkształcenie odpowiadające granicy wytrzymałości zmniejsza się.

W przypadku materiałów roślinnych sytuacja jest bardziej skomplikowana. Podczas pomiarów laboratoryjnych, które zazwyczaj przeprowadzane są w krótkich odstępach czasu (małe prędkości obciążania), za ciało stałe uważamy materiał, który nie płynie lub wykazuje płynięcie plastyczne, czyli takie, które występuje po przekroczeniu granicznej wartości naprężenia zwanej granicą plastyczności. W przypadku nasion nie ma wątpliwości, co do traktowania ich jako ciała stałe, mimo że wykazują zjawisko pełzania, które można nazwać pełzaniem sprężystym – czyli zachodzącym poniżej granicy sprężystości. To powolne pełzanie określane jest terminem płynięcia. Opisane zjawisko jest efektem komórkowej budowy nasion. Pod wpływem obciążenia komórki zmieniają swój kształt w celu stworzenia optymalnych warunków do przeniesienia naprężeń. Towarzyszy temu zazwyczaj zmiana geometrii nasienia, a więc odkształcenie. Przy stosowaniu małych naprężeń mamy do czynienia z płynięciem, a przy dużych naprężeniach, po krótkim okresie pełzania następuje pęknięcie nasienia.

Stąd też powstaje pytanie czy stwierdzenie, że mamy do czynienia z lepkosprężystą charakterystyką wytrzymałościową nasion jest wystarczające. Próby utworzenia modelu reologicznego nasienia nie zostały zakończone powodzeniem i należy podjąć wysiłki idące w kierunku stworzenia nowego modelu wytrzymałościowego takiego, który nie byłby związany wyłącznie z właściwościami sprężystymi czy plastycznymi.

Ogólnie znane prawa płynięcia zostały przedstawione na rysunku 23. W zależności od przyjętego modelu teoretycznego prędkość płynięcia może być w różny sposób zależna od naprężenia ścinającego.

Uwzględniając trudności związane z prowadzeniem badań wytrzymałościowych pojedynczych nasion, dla uzyskania jednolitości w przeprowadzaniu pomiaru i uniknięcia różnic w uzyskiwanych wynikach (związanych ze zjawiskiem płynięcia) należy ustalić jednolitą prędkość odształcania. Wartość tej prędkości określono w dalszej części pracy.



Rys. 23. Prawa płynięcia
Fig. 23. Flowing laws

2.2. Wskaźnik sprężystości

W świetle przeprowadzonych badań problematycznym staje się obliczanie współczynnika sprężystości – modułu Younga. Tym bardziej, że nigdzie do tej pory nie znalazł on zastosowania w klasycznych obliczeniach wytrzymałościowych – tak jak ma to miejsce w przypadku materiałów konstrukcyjnych. Dzieje się tak również dlatego, że istnieje wiele czynników determinujących zachowanie się złoża ziarnistych materiałów roślinnych. Trudno sobie w chwili obecnej wyobrazić sytuację – szczególnie wobec braku modelu tego typu struktury – w której odształcenie warstwy nasion obliczane jest przy wykorzystaniu wyznaczonego modułu Younga.

Dodatkowym argumentem przemawiającym za zaprzestaniem obliczania modułu sprężystości pojedynczych nasion są duże różnice występujące pomiędzy uzyskiwanymi wynikami. Dla przykładu w tabeli 3 zamieszczono wybrane wartości modułu Younga uzyskane przez różnych autorów. Wartości te mieszczą

się w przedziale od 10 do 4103 MPa. Tak dużej rozbieżności nie można tłumaczyć różnicami odmianowymi, czy też różnym zakresem wilgotności. Wydaje się, że jej powodem jest zawodna, mało precyzyjna metoda pomiaru.

Z przytoczonych powyżej względów, dla podkreślenia niemożliwości korzystania z praw mechaniki ośrodków ciągłych w przypadku pojedynczych nasion, autorzy niniejszego opracowania proponują zrezygnowanie ze stosowania określenia modułu Younga. W miejsce wspomnianej wielkości, dla wyraźnego uwypuklenia różnic w fizycznej interpretacji wyników próby ściskania nasion i materiałów konstrukcyjnych, proponują wprowadzenie nowej wielkości nazwanej wskaźnikiem sprężystości nasienia WE_n .

Wskaźnik WE_n został zdefiniowany jako podwojona wartość pracy W_n [J] włożona w odkształcenie pojedynczego nasienia (jednostkowa praca odkształcenia):

$$WE_n = 2 \cdot W_n \quad [J] \quad (9)$$

Proponuje się również, aby wskaźnik ten określany był poprzez dokonanie próby ściskania nasienia między dwoma równoległymi płytkami. Zgodnie z definicją pracę odkształcenia można obliczyć wówczas jako połowę iloczynu działającej siły nacisku N [N] i powstałego odkształcenia Δl [m]:

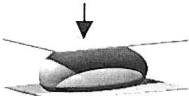
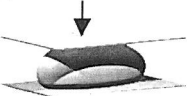
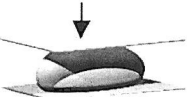
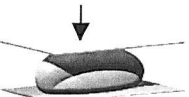
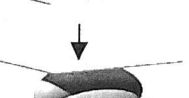
$$WE_n = 2 \cdot W_n = N \cdot \Delta l \quad [J] \quad (10)$$

Zgodnie z przytoczonymi wcześniej wynikami badań własnych, dokonywanie odczytu wartości odkształcenia powinno następować przy sile nacisku równej 25 N. Wskaźnik sprężystości nasienia można zatem obliczyć ze wzoru:

$$WE_n = 25 \cdot \Delta l \quad [J] \quad (11)$$

Należy zaznaczyć, że przy zachowaniu stałej siły obciążającej, interpretacja fizyczna proponowanego wskaźnika WE_n jest następująca: jest to podwojona wartości pracy, jaką może wykonać siła 25 N przy odkształceniu danego nasienia. Zgodnie z tą interpretacją wraz ze wzrostem zawartości wody w nasionach będzie rosła również wartość WE_n . Materiał staje się bowiem mniej sprężysty i łatwiej ulega odkształceniu czyli zwiększa się wartość odkształcenia liniowego, a zatem i wartość pracy odkształcenia, jaką jest w stanie wykonać przyłożona siła. Tak więc, mamy do czynienia z sytuacją odwrotną niż w przypadku modułu Younga – im materiał jest bardziej sprężysty, tym mniejsza wartość wskaźnika sprężystości WE_n .

Tabela 3. Wybrane wartości modułu Younga różnych nasion
Table 3. Chosen values of Young's modulus of different seeds

Autor Author	Sposób obciążania Method of loading	Materiał Material	Wartość modułu Younga Value of Young's modulus, (MPa)
Zoerb 1967		ziarno pszenicy wheat seed	300
Arnold i Roberts 1969		pszenice australijskie australian wheats wilgotność 11,5 – 13,0% moisture 11.5 – 13.0%	od 2000 do 4103
		pszenice australijskie australian wheats wilgotność 11,5 – 13,0% moisture 11.5 – 13.00%	od 1414 do 2834
Koper 1980		pszenica ozima Grana Grana winter wheat wilgotność 10,8 – 18,6% moisture 10.8 – 18.6%	od 176 do 1082
Kustermann i Kutzbach 1982		ziarno pszenicy wheat grain	10-200
Grundas i Hnilica 1987		endosperm ziarna pszenicy wheat endosperm wilgotność 10,6 – 11,0% moisture 10.6 – 11.0%	od 474 do 669
Michalak 1997		kukurydza maize wilgotność 14% moisture 14%	od 100 do 800
Dobrzański 1998		różne nasiona different seeds	od 546 do 800
Ślipek i in. 1999		różne nasiona different seeds	od 600 do 1200

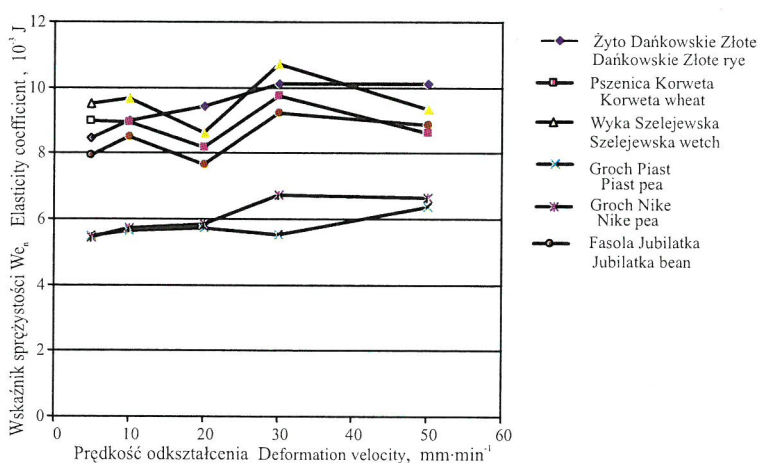
Zastosowanie wskaźnika WE_n upraszcza wiele problemów związanych ze stosowaniem praw mechaniki ośrodków ciągłych w stosunku do nasion oraz interpretacją uzyskiwanych wyników. Nie ma bowiem konieczności wykorzystywania różnych teorii (np. Hertza) bazujących na założeniach, które - jak to wcześniej udowodniono są nieadekwatne w odniesieniu do materiałów roślinnych. Dodatkowo, po przeprowadzeniu odpowiednich badań, dzięki zastosowaniu WE_n możliwe będzie wytrzymałościowe prognozowanie zachowania się warstwy nasion.

W celu przeanalizowania rozrzutu uzyskiwanych wartości WE_n oraz dokonania wyboru prędkości odkształcenia wykonano badania na różnych nasionach.

Jak wykazują nieliczne prace [58], w przypadku materiałów konstrukcyjnych, im niższa jest sprężystość materiału tym wyraźniejsze jest oddziaływanie prędkości odkształcenia na uzyskiwane wyniki pomiarów. Jak już wcześniej wspomniano, wzrost prędkości odkształcenia powoduje zwiększenie wartości granicy wytrzymałości doraźnej. Kierując się powyższymi spostrzeżeniami prędkość odkształcenia nasion ustalono dla materiału wilgotnego o zawartości wody $0,23 \text{ kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$. Badania przeprowadzono przy liczbie analiz równej 50.

Próby ściskania zrealizowano przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej Instron. Prędkość odkształcenia zmieniano w zakresie od 5 do 50 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Ustalony przedział wartości prędkości zawiera cały zakres prędkości odkształcenia podczas próby ściskania proponowany przez ASAE.

Uzyskane wyniki badań przedstawiono w sposób graficzny na rysunku 24 jako średnie z pięćdziesięciu analiz.



Rys. 24. Zależność wskaźnika sprężystości od prędkości odkształcenia

Fig. 24. Elasticity coefficient in dependency of the deformation velocity

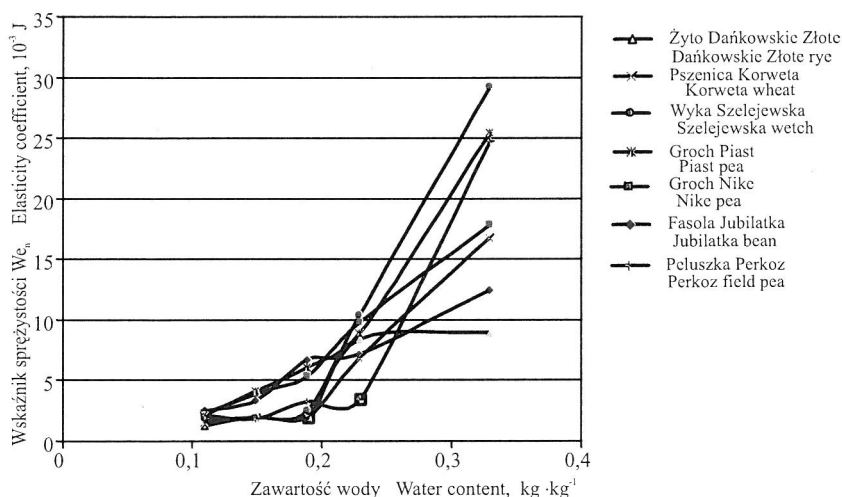
Wykonane testy statystyczne pozwoliły na wyodrębnienie grup jednorodnych. W zależności od rodzaju nasion ich liczebność była różna. Najmniej grup (dwie) wystąpiło w przypadku łubinu Mirela, najwięcej natomiast (cztery) dla żyta Dańkowskie Złote. Zatem oddziaływanie prędkości odkształcenia na uzyskiwany wynik pomiaru zależne jest od rodzaju materiału.

Test Duncana pozwolił na stwierdzenie, że w przypadku badanych nasion powstały grupy homogeniczne w przedziale prędkości $5\text{--}10\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Z tych względów, w dalszych badaniach zaleca się stosowanie prędkości odkształcenia równej $10\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Ocenę powtarzalności uzyskiwanych wyników pomiaru WE_n przeprowadzono dla siedmiu różnych nasion w zakresie zawartości wody od 0,11 do 0,33 $\text{kg}\cdot(\text{kg s.s.})^{-1}$. Badania wykonano zgodnie z ustaloną procedurą:

- pomiary siły i odkształcenia wykonano poprzez ściskanie nasion między dwoma równoległymi płytkami na maszynie wytrzymałościowej Instron zadana prędkość odkształcenia wynosiła $10\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$
- siła obciążająca, przy której dokonywano odczytu odkształcenia wynosiła 25 N
- nasiona układano w najbardziej stabilnej pozycji
- liczba analiz wynosiła 50.

Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 25.



Rys. 25. Zależność wskaźnika WE_n od zawartości wody w nasionach

Fig. 25. WE_n coefficient in dependency of the water content in seeds

Praca jaką może wykonać siła 25 N przy odkształcaniu nasienia wyraźnie wzrasta wraz z zawartością wody w materiale. Wzrost ten – a więc spadek sprężystości materiału - jest szczególnie gwałtowny przy dużych wilgotnościach nasion. Jest to zjawisko zgodne z wynikami badań wielu autorów. Należy jednak zaznaczyć, że górną wartość zawartości wody ustalono na poziomie $0,33 \text{ kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$ jedynie w celach poznawczych. Zazwyczaj bowiem wilgotność nasion podczas pozyskiwania i późniejszych procesów obróbki nie przekracza 22%.

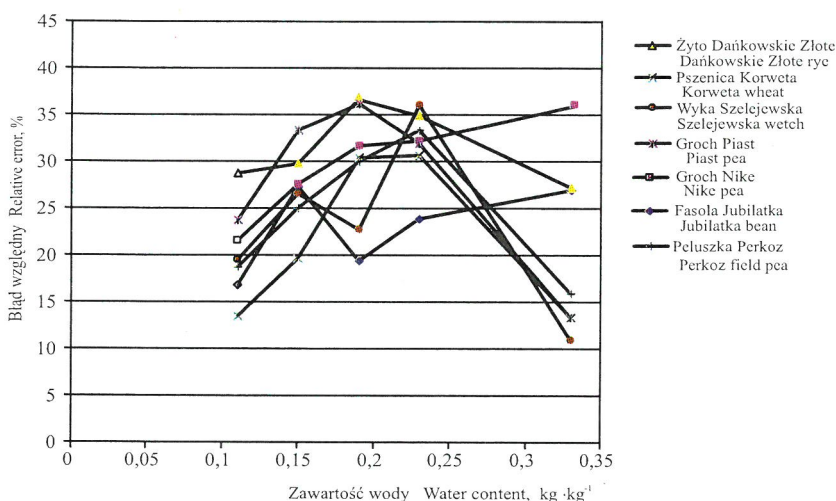
Zaproponowana metoda oceny sprężystości nasion zapewnia dużo większą powtarzalność uzyskiwanych wyników. Świadczą o tym małe wartości odchylenia standardowego zamieszczone w tabeli 4.

Wprawdzie odchylenie to – a zatem i rozrzut wyników - rośnie znacznie wraz ze wzrostem zawartości wody w nasionach, tym niemniej względny błąd pomiaru wskaźnika nie ulega zwiększeniu (rys. 26). Jego wartość mieści się w przedziale od 13% do 36% i jest zdecydowanie mniejsza niż przy klasycznym sposobie określania modułu Younga (od 30% aż do 90%).

Tabela 4. Odchylenie standardowe wartości wskaźnika WE_n

Table 4. Standard deviation of the values of WE_n coefficient

Odmiana Cultivar	Zawartość wody Moisture content, (kg kg^{-1})				
	0,11	0,15	0,19	0,23	0,33
Fasola Jubilatka Jubilatka bean	0,423	0,910	1,301	1,711	3,373
Groch Nike Nike pea	0,488	1,072	1,722	3,144	6,727
Żyto Dańkowskie Złote Dańkowskie Złote rye	0,353	0,615	0,832	2,933	2,412
Pszenica Korweta Korweta wheat	0,196	0,381	0,599	2,112	2,226
Groch Piast Piast pea	0,493	1,379	2,220	2,849	3,385
wyka Szelejewska Szelejewska vetch	0,355	0,522	0,585	3,763	3,179
peluszka Perkoz Perkoz field pea	0,404	0,467	0,981	1,137	3,929



Rys. 26. Wartość błędu względnego w zależności od zawartości wody w nasionach

Fig. 26. The value of relative error in dependency of the water content in seeds

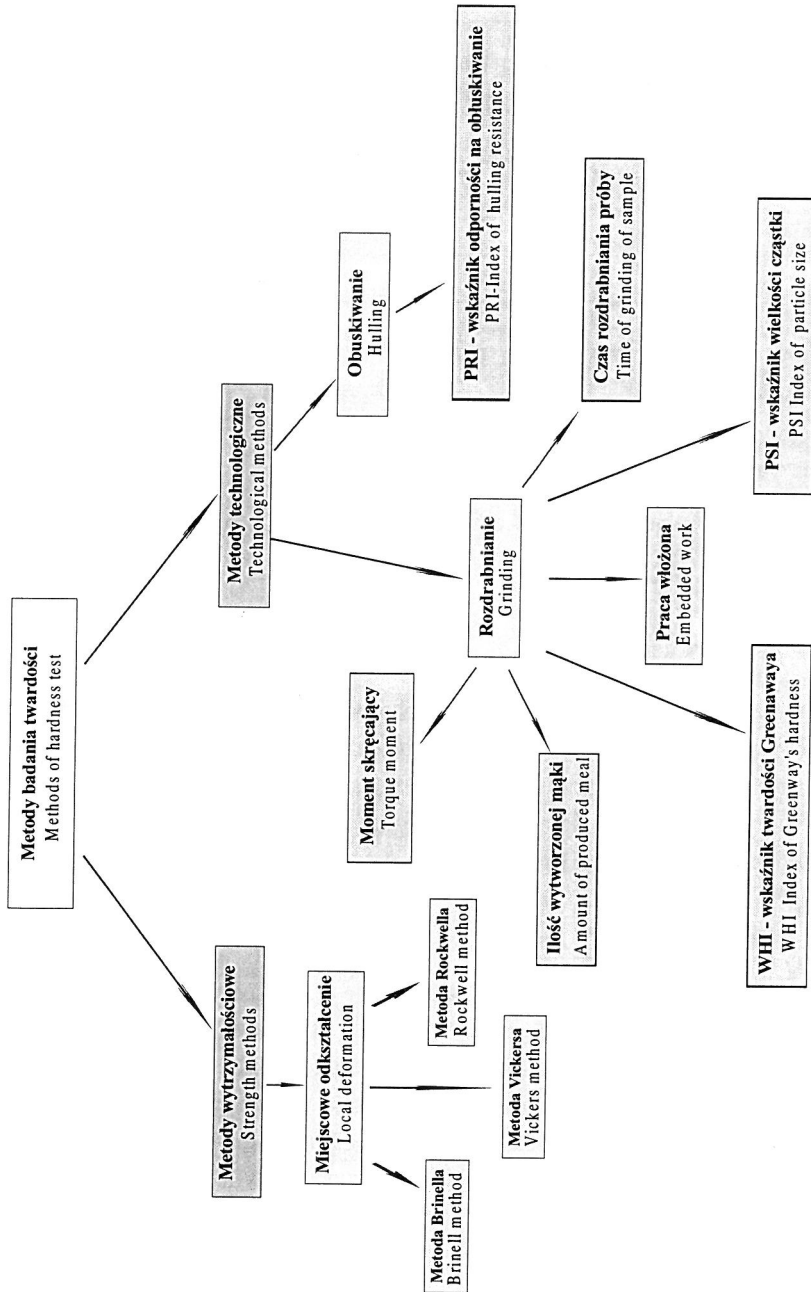
2.3. Pomiar twardości nasion

2.3.1. Definicja twardości

Jednym z ważniejszych parametrów mechanicznych, które wykorzystuje się do opisu cech wytrzymałościowych materiału jest twardość. Podstawą tego typu pomiarów jest empirycznie potwierdzona hipoteza, że w przypadku stali i innych metali pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie a twardością istnieje pewna zależność. Dla stali węglowych można ją ująć wzorem:

$$R_m \approx 0,34 HB$$

W obecnej chwili pomiar twardości metali jest przeprowadzany bardzo często i został rozszerzony również na inne materiały. Do jego rozpowszechnienia przyczyniły się nieskomplikowane urządzenia pomiarowe (twardościomierze), jak również łatwość przeprowadzania pomiarów i mała ich pracochłonność. Pomiar twardości pozwala na ocenę struktury materiału, jego anizotropii, czy stanu obróbki termicznej. Możliwość oceny twardości jest ważna zarówno z punktu widzenia kontroli prawidłowości przebiegu wielu procesów technologicznych jak i symulacji oraz optymalizacji tych procesów. Tak wielorakie zastosowanie wyników pomiarów twardości doprowadziło do powstania wielu różnych metod pomiaru. Niektóre z nich (dla materiałów konstrukcyjnych) zestawiono na rysunku 27.



Rys. 27. Podział metod pomiaru twardości nasion
Fig. 27. Methods of hardness test

Również w przypadku roślinnych materiałów ziarnistych coraz więcej uwagi poświęca się badaniu twardości. Jest ona istotną cechą zarówno ze względów technologicznych jak i mechanicznych [102,103,27]. W Kanadzie, Australii, USA już na etapie klasyfikacji ziarna pszenicy uwzględnia się twardość. Dowodem tego są nazwy handlowe takie jak: Hard Red Spring – twarda czerwona wiosenna, Hard Winter – twarda ozima, Soft Wheat – pszenica miękka czy też Australian Prima Hard – australijska twarda [44].

Twardość ciał nie jest cechą jednoznacznie zdefiniowaną. W potocznym słowa tego znaczeniu materiał twardy to taki, który nie ulega odkształceniu przy dotykaniu, ugniataniu, zginaniu itp., słabo uginający się pod naciskiem, nieelastyczny, sztywny. Można więc uznać, że jest to odwrotność sprężystości. Ogólna definicja mechaniczna twardości brzmi następująco (za Słownikiem terminologii mechaniki klasycznej, 1960): za twardość należy uznać właściwość wyrażającą się odpornością na odkształcenia plastyczne i pęknięcia przy działaniu siły skupionej na powierzchni danego ciała. Oceniając surowce i produkty żywnościowe twardość określa się zazwyczaj jako siłę niezbędną do osiągnięcia określonej deformacji.

Oprócz przytoczonej, klasycznej definicji twardości, wielokrotnie wykorzystuje się to pojęcie do określenia różnych parametrów technologicznych materiału. W przypadku materiałów wysoko uwodnionych, takich jak np. jabłka, zamiast twardości używa się pojęcia jędrności. Jest to jeden z podstawowych parametrów oceny stopnia dojrzałości i jakości uzyskiwanego produktu. Do tej pory opracowano wiele rozmaitych metod pomiaru jędrności. Bogaty ich przegląd wraz z analizą uzyskiwanych wyników można znaleźć w pracy Puchalskiego [116].

Natomiast w przypadku nasion roślin uprawnych nie wypracowano do tej pory jednolitej metody pomiaru twardości. Oprócz klasycznej, wytrzymałościowej definicji twardości, wielokrotnie używa się tego pojęcia do określenia różnych parametrów technologicznych nasion, które w sposób pośredni są wskaźnikiem twardości. Między innymi jako twardość ziarna określa się opór stawiany podczas jego rozdrabniania. Rzadziej określa się twardość ziarna jako funkcję czasu rozdrabniania ziarna granulacji mlewa lub innych parametrów procesu przemiału.

Istnieje wiele przesłanek, które wskazują na konieczność pomiaru twardości nasion. Między innymi to, że jak podaje Soszyńska i Cacek-Pietrzak [132], twardość ziarna jest obecnie najlepszym pośrednim wskaźnikiem wartości wypiekowej pszenicy. Jej związek z takimi cechami młynarskimi jak:

- łatwość prowadzenia przemiału
- stopień uszkodzenia skrobi w czasie rozdrabniania ziarna

- granulacja mąki
oraz cechami piekarskimi:

- cechy reologiczne ciasta
- podatność na działanie enzymów amylolitycznych

umożliwia wczesne, wstępne określenie przydatności technologicznej ziarna. O wadze pomiaru twardości nasion decyduje również fakt, że właśnie ten parametr jest jednym z głównych czynników decydujących o podatności ziarna na uszkodzenia. Im większa twardość nasienia, tym mniejsze są straty wywołane uszkodzeniami podczas transportu, przechowywania oraz w wielu innych procesach technologicznych. Powyższe, wynikające z badań spostrzeżenia, wskazują na to, że możliwe jest, iż twardość nasion ma ściśle powiązanie z ich granicznymi naprężeniami – podobnie jak ma to miejsce w przypadku stali. Można postawić więc następujący, wymagający rozwiązania problem: czy wobec dużych trudności związanych z oceną sprężystości pojedynczych nasion, korzystniejsze jest dokonanie pomiaru ich twardości. W dalszej części opracowania autorzy przedstawiają próbę odpowiedzi na to pytanie.

Należy również wspomnieć, że twardość jest czynnikiem decydującym o wartości powierzchni styku nasienia z innym materiałem, a zatem jednym z głównych czynników determinujących przebieg procesu tarcia [130,65].

Do dnia dzisiejszego prowadzone były rozmaite badania dotyczące określenia wpływu różnych czynników na twardość nasion. Ich wyniki, prezentowane w licznych publikacjach wskazują, że twardość tego typu materiałów najsilniej stymulowana jest przez zawartość wody w nasionach oraz rodzaj nasion. Przyczyn tej sytuacji należy szukać w fakcie, iż wraz ze wzrostem zawartości wody następuje zmniejszenie siły wiązań między skrobią a białkiem i naruszenie struktury nasion poprzez powstanie w materiale naprężeń wewnętrznych, powodowanych różnym stopniem pęcznienia poszczególnych składników. Dochodzi do rozluźnienia struktury materiału oraz zmniejszenia oddziaływań kohezyjnych.

Próby wyjaśnienia różnic w twardości występujących w ramach jednego gatunku, dla różnych odmian nie dały zadowalającego rezultatu. Między innymi badania Symesa [104] wykazały, że za cechę tę jest odpowiedzialny co najmniej jeden gen podstawowy oraz kilka pomocniczych. Natomiast badania Bakera [104] nad pszenicami kanadyjskimi ujawniły trzy geny podstawowe i jeden lub więcej pomocniczych. Do podobnych jak Symes wniosków doszedł Simmonds [127]. Stwierdził on, że główny gen kontroluje wytwarzanie jednego lub grupy składników stymulujących twardość nasion. Jednak badania genetyczne do dzisiaj nie dały odpowiedzi na pytanie, który lub które z genów są odpowiedzialne za tę cechę ziarna.

Brak jest również jednakowego poglądu na temat wpływu zawartości białka na twardość nasion. I tak np. Symes wyraził pogląd, że u niektórych odmian wraz ze wzrostem zawartości białka występuje zwiększenie twardości ziarna mierzonej wskaźnikiem rozdrobnienia PSI, natomiast u innych zaznacza się zależność odwrotna. Greenway [44] na przykładzie 100 prób wykazuje wyraźną dodatnią korelację między twardością ocenianą przy pomocy wskaźnika WHI (Wheat Hardness Index) a zawartością białka. Kontrowersyjne wyniki badań dotyczące zależności pomiędzy zawartością białka i twardością, doprowadziły do postawienia hipotezy, że twardość zależy nie od ilości, ale od składu i rozmieszczenia białka w nasieniu.

2.3.2. Metody pomiaru twardości

Jedną z przyczyn przytoczonych powyżej trudności w badaniach omawianej właściwości nasion jest niewątpliwie interpretacja pojęcia twardości oraz zróżnicowane cechy fizyczne produktów żywnościowych, co z kolei pociąga za sobą utworzenie wielu metod oceny twardości. Metody te można generalnie podzielić na technologiczne, wytrzymałościowe i inne (rys. 27).

Metody technologiczne

Badania technologiczne należy traktować jako pośredni sposób oceny twardości. Najczęściej są bowiem mierzone wartości wielkości fizycznych, decydujących o przebiegu danego procesu technologicznego. I tak np. na potrzeby przemysłu zbożowego prowadzi się badania związane z planowaniem energochłonności i łatwości prowadzenia procesu przemiału, stopnia uszkodzenia skrobii jak również stopnia granulacji mąki oraz czasu trwania procesu.

Poniżej opisano pokrótce najpopularniejsze metody technologiczne.

- Według Obuchowskiego [103] oraz Gąsiorowskiego i in. [38] za najbardziej wiarygodny sposób oceny technologicznej twardości ziarna pszenicy uważane jest wyznaczenie WHI (Wheat Hardness Index) - wskaźnika twardości pszenicy. Jest on definiowany jako stosunek maksymalnego momentu skręcającego wyrażonego w jednostkach Bradenbera do ilości uzyskiwanej mąki, wyrażonej w procentach. Moment skręcający jest mierzony na twardościomierzu Bradenbera (100 jednostek Bradenbera odpowiada momentowi skręcającemu równemu 1,29 N·m) sprzężonym z układem pomiarowym farinografu. Przy pomocy tego twardościomierza określa się:

- moment skręcający określany w jednostkach skali Bradenbera
 - ilość wytworzonej mąki – określana procentowo po przesianiu rozdrobnionego ziarna
 - czas rozdrabniania próbki
 - pracę włożoną w rozdrobnienie ziarna
- Dużą popularnością cieszy się również ocena twardości przy pomocy PSI (Particle Size Index) wskaźnika wielkości cząstki [23,24,103]. Jest to procentowa ilość mąki uzyskanej z rozdrobnienia 20 gramowej próbki ziarna określona po przesianiu jej na przesiewaczu o otworach sita 0,16 mm.
 - Przytoczone powyżej metody bazowały na przemiale określonej masowo próbki materiału ziarnistego. Natomiast w przypadku oceny wartości technologicznej pojedynczych nasion określa się najczęściej HI (Hardness Index) indeks twardości. Wykorzystywany jest w tym celu zestaw pomiarowy SKCS 100 [37,42,46,145], który służy do rejestracji siły potrzebnej do rozdrobnienia pojedynczego ziarniaka.
 - W przypadku masy ziarnistej określa się również PRI (Pearling Resistance Index) wskaźnik odporności na obłuskiwanie. Określa on procentowy udział masy próbki po procesie obłuskiwania, nie przesiewającej się przez sito o otworach 0,8 mm. Obłuskiwanie przeprowadzane jest na obłuskiwaczu laboratoryjnym w określonym przedziale czasu. Wadą tej metody jest brak ściśle sprecyzowanych warunków przeprowadzania pomiaru.
 - Często dokonuje się również oceny łatwości przemiału, poprzez określenie oporu stawianego przez ziarno podczas rozdrabniania. Można do tego celu wykorzystać urządzenie zwane farinografem po zamontowaniu w miejsce mieszalnika odpowiedniej przystawki. Składa się ona ze zbiornika na ziarno, urządzenia rozdrabniającego oraz pierścienia do regulacji wielkości szczeliny dozującej. Urządzeniem rozdrabniającym jest stożek oraz współpracujący z nim stały pierścień o powierzchni prawie równoległej do stożka. Ziarno spadające ze zbiornika, przez szczelinę dozującą do szczeliny między stożkiem a pierścieniem, zostaje wstępnie rozdrobnione. W strefie środkowej ziarno podlega śrutowaniu a w dolnej mieleniu. Opór stawiany przez ziarno przy jego rozdrabnianiu przenoszony jest przez siłomierz na skalę aparatu i do urządzenia rejestrującego.

Metody wytrzymałościowe

Liczne wytrzymałościowe metody oceny twardości zostały opracowane w przypadku minerałów oraz materiałów konstrukcyjnych (rys. 28). Wiele z nich służy jedynie do porównania różnych materiałów między sobą lub do dokonania oceny ich przydatności technologicznej (próby rysowania lub ścierania). Można by je więc zaliczyć do prób technologicznych. Jednak największe zastosowanie znalazły próby statyczne, bazujące na wgniataniu w materiał penetratora o określonym kształcie (metody: Hertza, Brinella, Vickersa, Rockwella, Knoop, Berkowicza, Grodzińskiego, Hennemana-Vickersa, Pemberton) oraz dynamiczne bazujące na uderzaniu specjalnym węgelnikiem (metoda duroskopu, mikroudaru, wahadła Herberta, skleroskopu Shore'a).

W przypadku materiałów konstrukcyjnych istnieje wiele metod pomiaru twardości. Sposób przeprowadzania pomiaru jest ściśle określony. Najczęściej są to metody wynikające z konkretnych potrzeb projektowych lub przemysłowych i zostały wypracowane w stosunkowo długim okresie. Ich przydatność zweryfikowana została w sposób empiryczny. Wystarczy wspomnieć, że jeden z pierwszych sklerometrów został skonstruowany przez A. Seebecka już w 1883 roku.

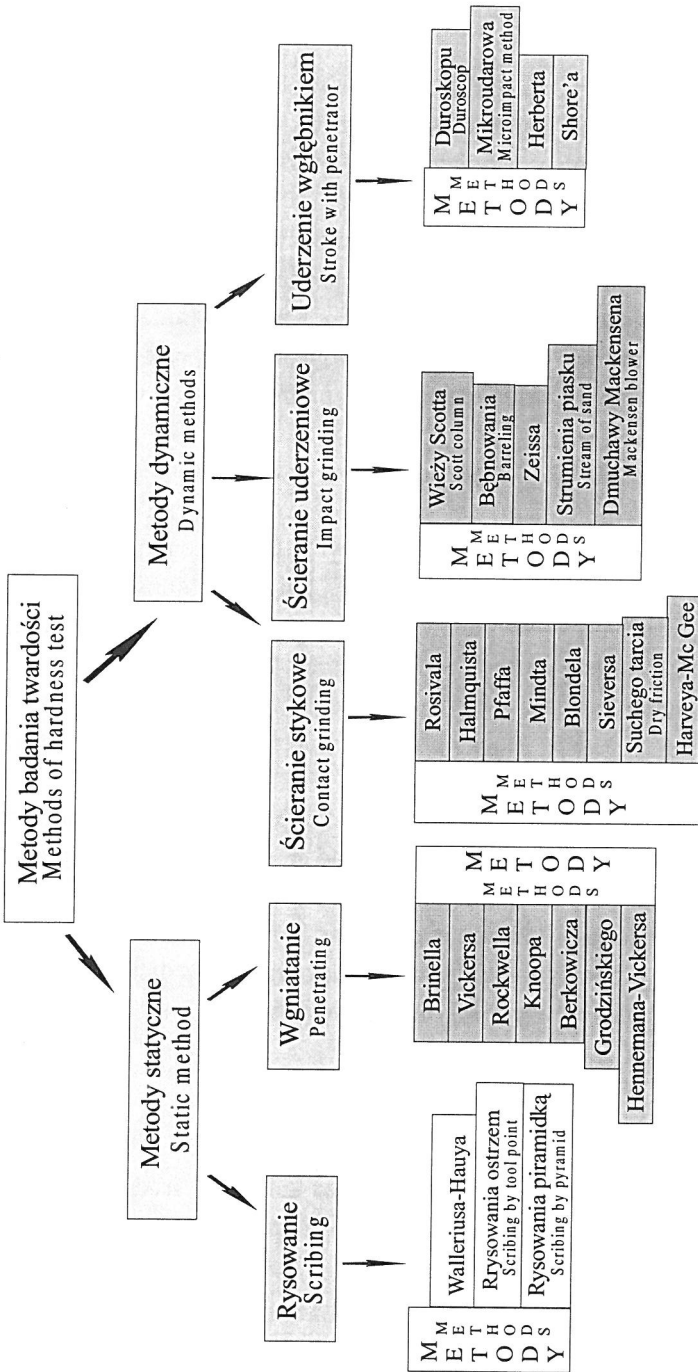
W chwili obecnej badanie twardości przeprowadza się najczęściej według metod opracowanych przez Rockwella, Brinella lub Vickersa. Zostaną one poniżej pokrótce omówione.

- Twardość określana według metody Brinella jest definiowana jako stosunek siły N [N] działającej prostopadle do badanej powierzchni i obciążającej stalową kulkę, do pola powierzchni odcisku F [mm²] jaki kulka ta zostawiła w badanym materiale. Pole powierzchni jest oceniane poprzez pomiar średnicy trwałego odcisku – przy założeniu, że ma on kształt kulistej czaszy. Wartość tak określanej twardości określa się ze wzoru:

$$HB = \frac{2 \cdot N}{\pi \cdot \Phi \cdot \left(\Phi - \sqrt{\Phi^2 - d^2} \right)} \quad (12)$$

gdzie: N - siła obciążająca, Φ - średnica kulki, d - średnica odcisku.

Do pomiaru twardości zaleca się stosować urządzenia, w których nacisk wywierany na kulkę pomiarową zwiększa się bez wstrząsów w całym zakresie pracy aparatu. Do badań używa się kulek o średnicy 10,5 lub 2,5 mm, obrobionych cieplnie do twardości minimum 850 HV (twardość w skali Vickersa).



Rys. 28. Metody badania twardości materiałów konstrukcyjnych
Fig. 28. Methods of hardness test of the constructional materials

- Próba pomiaru twardości metodą Rockwella bazuje na dwustopniowym wciskaniu w badany materiał stożka diamentowego lub kulki stalowej o określonych wymiarach. Podczas próby dokonuje się określenia trwałego przyrostu głębokości odcisku h_{ir} [mm], który podzielony przez 0,002 mm jest podstawową działką czujnika używanego do mierzenia zagłębienia wgłębnika:

$$\left. \begin{array}{l} HRC \\ HRB \end{array} \right\} = K - h \quad (13)$$

gdzie: K – stała wartość skali, h – wskazania czujnika.

$$h = \frac{h_{ir}}{0,002}$$

h_{ir} – trwały przyrost głębokości odcisku.

Metoda Rockwella oparta jest na wykorzystaniu właściwości sprężystych materiału. Twardość odczytywana jest wprost ze wskazań głębokościomierza wycechowanego w stopniach twardości. Dla zapewnienia tego, że większej twardości odpowiada większa wartość liczbowa przyjęto wzór przytoczony powyżej, w którym wielkość h odejmowana jest od pewnej wartości K zależnej od rodzaju wgłębnika. Pomiar dokonywany jest przy pomocy penetratora o końcówce diamentowej w kształcie stożka o kącie wierzchołkowym $\alpha = 120^\circ$ i promieniu zaokrąglenia 0,2 mm lub przy zastosowaniu stalowej kulki o średnicy $\Phi = \left(\frac{1}{16}\right) \approx 1,59$ mm.

- Twardość mierzona metodą Vickersa wyraża się stosunkiem siły N [N] obciążającej wgłębnik do pola powierzchni bocznej F odcisku wgłębnika, którym jest diamentowy ostrosłup prawidłowy o podstawie kwadratowej i kącie między przeciwległymi ścianami $\alpha = 136^\circ$. Wartość twardości obliczamy ze wzoru:

$$HV = \frac{2 \cdot N \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} \quad (14)$$

gdzie: d – średnica arytmetyczna obu przekątnych odcisku

W pomiarach stosowane są następujące obciążenia: 10, 50, 100, 200, 300, 500, 1000 N, a czas działania siły powinien wynosić od 10 do 15 s. Przy pomiarze długości przekątnych należy pamiętać, że do obliczeń twardości służy ich średnica arytmetyczna, a różnica długości przekątnych tego samego odcisku nie może przekraczać 2% długości większej z nich.

Jedną z zalet metody Vickersa jest to, że diamentową końcówką można badać materiały o dużej oraz małej twardości. Można przy jej pomocy badać również twardość bardzo cienkich warstw – niewielki odcisk końcówki penetratora uszkadza badany materiał mniej niż kula. Należy podkreślić, że metodę Vickersa można stosować także do pomiaru twardości powierzchni zakrzywionej – jednak pod warunkiem, że w miejscu pomiaru, wartość promienia krzywizny nie jest mniejsza od siedmiokrotnej średnicy arytmetycznej długości przekątnych odcisku.

2.3.3. Wybór metody pomiaru twardości pojedynczych nasion

Należy zaznaczyć, że pomiar twardości musi być wykonany w ściśle określonych warunkach – jedynie wtedy możemy bowiem dokonywać porównań między wynikami uzyskanymi przez różne ośrodki. Szczególnie dotyczy to czasu pomiaru i wartości siły nacisku. Zazwyczaj wartości te oraz rodzaj metody pomiaru podawane są wraz z uzyskanym wynikiem. Jak ważny jest to problem świadczą przytoczone poniżej wymagania odnoszące się do trzech najbardziej popularnych metod pomiaru twardości:

- **Twardość Brinella** oznaczana jest symbolem *HB*. Wymagana dokładność pomiaru wielkości średnicy odcisku wynosi 0,05 mm. Czas trwania pomiaru wynosi zazwyczaj 30 s, ale przy badaniu materiałów bardzo twardych ($HB > 1000 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$) wystarcza 15 s, a przy materiałach bardzo miękkich ($HB < 350 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$) należy czas wydłużyć do 180 s. Przy symbolu twardości należy podawać warunki przeprowadzenia pomiaru. Przykładowo oznaczenie $HB_{10/50000/15}$ oznacza twardość Brinella uzyskaną przy zastosowaniu kulki o średnicy 10 mm obciążonej siłą 50000 N w czasie 15 s.
- **Twardość Vickersa** oznacza się symbolem *HV*. W zależności od twardości i grubości badanego materiału siła nacisku może wynosić od 10 do 1200 N. W przypadku stosowania mniejszych wartości siły nacisku twardość materiału nazywamy mikrotwardością. Wartość twardości Vickersa jest podawana w $\text{daN}\cdot\text{mm}^{-2}$, a zatem jest to skala analogiczna do skali Brinella. Tym niemniej wartości *HV* i *HB* różnią się między sobą ze względu na różny kształt powierzchni odcisku i sztywność wciskanego penetrometru. Pomiar metodą Vickersa należy do najdokładniejszych. Do wad tej metody w zastosowaniu do nasion należy zaliczyć fakt, iż uzyskiwany odcisk jest nieznaczny i trudny zatem do zmierzenia.

▪ **Twardość Rockwella** oznaczana jest w różny sposób, w zależności od rodzaju zastosowanej skali.

- Skala A – oznaczenie *HRA*, stosowana do pomiaru materiałów wyjątkowo twardych (np. węgliki wolframu, cienkie blachy, cienkie warstwy utwardzone). Obciążenie początkowe wynosi 10 daN, końcowe 50 daN a końcówką penetratora jest diamentowy stożek.

- Skala B – oznaczenie *HRB*, stosowana do pomiaru twardości materiałów miękkich. Obciążenie początkowe wynosi 10 daN, końcowe 100 daN a końcówką penetratora jest kulka o średnicy 1/16".

- Skala C – oznaczenie *HRC*, stosowana do pomiaru twardości stali ulepszonych cieplnie. Obciążenie początkowe wynosi 10 daN, końcowe 150 daN a końcówką penetratora jest diamentowy stożek.

- Skala F – oznaczenie *HRF*, stosowana do pomiaru twardości materiałów bardzo miękkich, do których nie można stosować skali B. Obciążenie początkowe wynosi 10 daN, końcowe 50 daN a końcówką penetratora jest kulka o średnicy 1/16".

Metodę Rockwella można stosować do przedmiotów o minimalnej grubości 1 mm. Podkreślić należy dużą łatwość i szybkość przeprowadzania pomiaru – dzięki odczytowi twardości wprost ze wskazań czujnika. Według Pełczyńskiego [106] zaletą pomiaru twardości materiałów konstrukcyjnych, przy pomocy penetratorów w kształcie stożka, jest podobieństwo geometryczne zachodzące między otrzymanymi odciskami niezależnie od przyłożonego nacisku. Dodatkową zaletą jest to, że ostrość zarysu konturu odcisku nie zależy od głębokości, na jaką stożek został wcisnięty, gdyż kąt zawarty pomiędzy powierzchnią materiału a powierzchnią boczną stożka jest stały.

Z punktu widzenia dokładności i powtarzalności uzyskiwanych wyników niezbędne jest dokonanie wyboru prawidłowej metody pomiaru twardości. Przytoczone powyżej dane, wskazują również wyraźnie jak istotne jest prawidłowe ustalenie warunków przeprowadzenia pomiaru i że jest to sprzężone z rodzajem materiału, którego twardość zamierzamy określić. Niestety, dla materiału roślinnego (jakim są nasiona), jak wynika z przeglądu literatury, do chwili obecnej, nie wypracowano żadnych standardów, norm czy sposobów pomiaru tej wielkości. Badania twardości nasion mają znacznie krótszą historię i najczęściej do jej określania wykorzystywane są metody zapożyczone z klasycznych metod pomiaru twardości metali. Opracowano wprawdzie szereg nowych metod, ale są one często zawodne i nie do końca spełniają swoje zadania. Dodatkowe trudności wynikają także z braku jednoznacznie zdefiniowanych pojęć, oraz z braku bezpośrednich

przeliczników umożliwiających szybkie i łatwe przejście z jednej metody badawczej do drugiej. Stosunkowo najczęściej wykorzystywane są metody służące do określania twardości materiałów konstrukcyjnych, a spośród nich – metoda Vickersa.

Żadna z opisanych pokrótce metod pomiaru nie spełnia całkowicie wymogów niezbędnych przy pomiarze twardości nasion. Materiał roślinny jest typowym materiałem reologicznym, w którym podczas obciążania zachodzą złożone procesy utrudniające prowadzenie badań i wpływają na zafałszowanie otrzymanych wyników. Pierwszym z tych zjawisk jest pełzanie materiału, które powoduje przyrost odkształcenia w czasie, pomimo utrzymywania stałej wartości obciążenia. Drugim niekorzystnym zjawiskiem cechującym nasiona, jest tzw. sprężystość opóźniona. Powoduje ona, w przypadku badania twardości klasycznymi metodami wytrzymałościowymi, „zarastanie” odcisku po zdjęciu obciążenia penetratora. W dłuższym okresie „zarastanie” odcisku jest dodatkowym efektem procesów życiowych zachodzących w nasionach.

Niezbędne w tym kontekście – przy stosowaniu metod bazujących na pomiarze wielkości odcisku – byłoby określenie czasu, po którym mają zostać dokonane pomiary geometryczne oraz czasu trwania obciążenia, gdyż jak ma to miejsce w przypadku materiałów konstrukcyjnych, im mniej twardy jest materiał tym dłużej musi być wywierane obciążenie.

2.3.4. Nowa metoda pomiaru twardości

Zdaniem autorów niniejszej monografii konieczne jest więc opracowanie „indywidualnej” metody pomiaru twardości pojedynczych nasion.

Opracowano taką metodę opierając się na następujących założeniach:

- w sensie fizycznym twardość nasienia jest średnią wartością ciśnienia powierzchniowego wywołanego przez końcówkę penetratora. Skala twardości jest więc określona w jednostkach ciśnienia ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$).
- sposób pomiaru twardości nasienia powinien uwzględniać reologiczny charakter materiału oraz jego małą twardość.
- metoda pomiaru powinna być w miarę prosta i łatwa do realizacji. Jest to warunek, którego spełnienie umożliwi wykonanie dużej liczby analiz – koniecznej wobec bardzo dużej zmienności występującej przy określaniu fizycznych właściwości materiałów roślinnych.

Biorąc pod uwagę powyższe założenia dokonano analizy istniejących wytrzymałościowych metod pomiaru twardości. Pozwoliła ona na stwierdzenie, że żadna z nich nie spełnia równocześnie wszystkich przyjętych wymagań. Okazało się, że

jedynym z możliwych rozwiązań jest połączenie dwóch metod - Rockwella oraz Vickersa. Dla zaznaczenia, że jest to modyfikacja ogólnie znanych metod proponuje się przyjęcie oznaczenia twardości poprzez symbol RV .

Z metody Rockwella wykorzystano ideę pomiaru wartości zagłębienia penetratora. Stwarza to duże możliwości co do stosowania rozmaitych, w miarę prostych i tanich przyrządów pomiarowych – nie muszą to być specjalistyczne, drogie urządzenia optyczne jak ma to miejsce przy pomiarze geometrii odcisku. W ten sposób unika się również problemów związanych z opisanym „zarastaniem” odcisku. Szczególnie przy dużej zawartości wody w nasieniu pomiar wartości zagłębienia jest bardziej miarodajny. Niebagatelną sprawą jest także skrócenie czasu odczytu.

Z metody Vickersa wykorzystano natomiast definicję twardości – jest ona w pełni zgodna z przyjętą fizyczną interpretacją tej wielkości. Zatem wartość twardości RV można wyrazić wzorem:

$$RV = \frac{N}{F} \quad [MPa] \quad (15)$$

gdzie: N – siła obciążająca wgłębnik [N], F – pole powierzchni odcisku [mm^2]. Po uwzględnieniu stożkowego kształtu końcówki penetratora uzyskujemy

$$RV = N \cdot \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\pi \cdot h^2 \cdot \tan^2 \frac{\alpha}{2}} \quad [MPa] \quad (16)$$

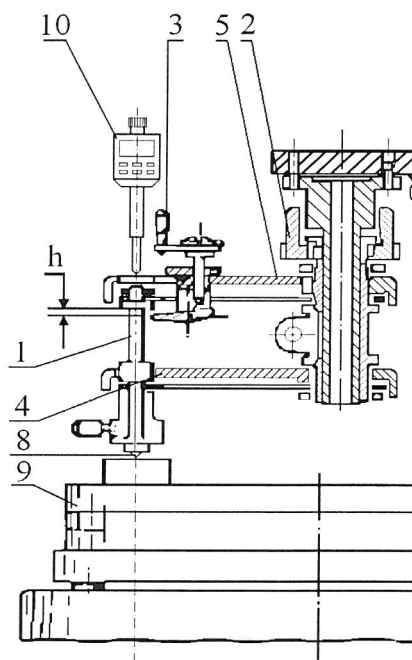
gdzie: α - kąt wierzchołkowy penetratora [$^\circ$], h – wartość zagłębienia penetratora [mm]. Przyjęto, że wgłębnik będzie miał kształt stożka, gwarantuje to bowiem – zgodnie z prawem Kicka podobieństwo geometryczne odcisków niezależnie od wartości przyłożonego obciążenia [106]. Dodatkowo, ostrość zarysu konturu odcisku nie zależy od głębokości na jaką stożek został wciśnięty, gdyż kąt zawarty między powierzchnią materiału a powierzchnią boczną wgłębnika ma wartość stałą.

2.3.5. Określenie warunków przeprowadzania pomiaru

Po ustaleniu głównych założeń odnośnie sposobu pomiaru i określenia twardości nasion przeprowadzono szersze badania mające na celu ustalenie warunków przeprowadzania pomiaru. Zaplanowane i zrealizowane doświadczenie miało na celu ustalenie – wzorem istniejących, objętych odpowiednimi normami metod pomiaru twardości materiałów konstrukcyjnych – trzech podstawowych

parametrów: wartości kąta wierzchołkowego, czasu trwania obciążenia oraz wartości siły nacisku.

Wszystkie pomiary wykonywane były na specjalnie skonstruowanym stanowisku, którego schemat zamieszczono na rysunku 29. Zastosowano krzywkowy mechanizm obciążający, który pozwolił na płynne obciążanie penetratora. Pomiar zagłębienia wykonywany był przy wykorzystaniu cyfrowego czujnika firmy Mitutoyo o dokładności pomiaru 10^{-3} mm.



Rys. 29. Schemat twardościomierza. 1 - trzpień obciążający, 2 - śruba regulacyjna, 3 - korba; 4, 5 - płaskie sprężyny, 8 - wgłębnik, 9 - stolik, 10 - czujnik Mitutoyo

Fig. 29. Diagram of hardness testing machine. 1 - loading mandrel, 2 - adjusting screw, 3 - crank, 4, 5 - flat springs, 8 - penetrator, 9 - table, 10 - Mitutoyo indicator

Określenie wartości siły obciążającej

W opisaną już metodzie Rockwella istotne jest zastosowanie odpowiednich obciążeń. Przy pomiarze twardości materiałów konstrukcyjnych wykorzystuje się zazwyczaj obciążenie wstępne 100 N oraz obciążenie końcowe od 500 do 1000 N. Nasiona charakteryzują się dużo mniejszą twardością i zastosowanie tak dużych sił nacisku prowadzi do zniszczenia próbki. Zniszczenie to jest - zgodnie z wynikami

badan – tym łatwiejsze im większa jest zawartości wody w materiale. Z kolei zastosowanie niskich wartości siły nacisku w przypadku nasion suchych powoduje zmniejszenie dokładności pomiaru – czujnik zagłębia się w materiał w niewielkim stopniu.

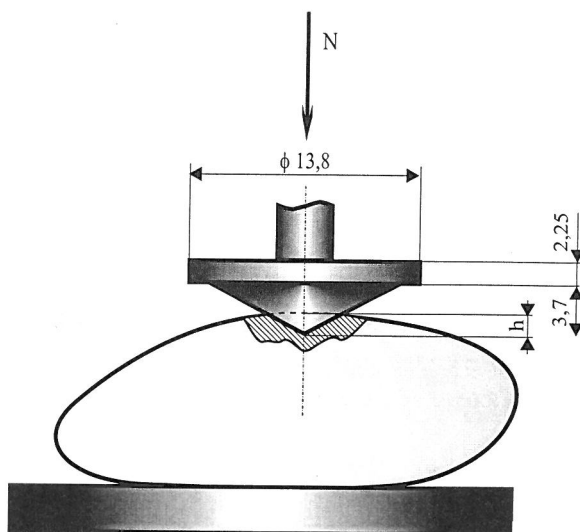
Podsumowując, w przypadku nasion możemy stosować jedynie małe wartości siły nacisku N. Dokonujemy więc pomiaru mikrotwardości i wartość obciążenia nie powinna zatem przekraczać 2 N. W związku z tym przyjęto, że pomiar twardości będzie przebiegał w dwóch fazach:

- obciążenie wstępne siłą nacisku wynikającą z ciężaru trzpienia obciążającego i wynoszącą 0,1 N
- obciążenie końcowe siłą o wartości 2 N.

Określenie wartości kąta wierzchołkowego końcówki penetratora oraz czasu przeprowadzania pomiaru

Analiza klasycznych metod pomiaru wykazała, że w zależności od rodzaju badanego materiału stosowane są różne kształty końcówek penetratora. Zgodnie z metodą Rockwella (przyjęto, że dokonywany będzie pomiar zagłębienia penetratora) jako elementu obciążającego używa się czujników o kształcie stożka lub kulki. Biorąc pod uwagę pewność pomiaru oraz dużo mniejszą – w porównaniu ze stalą – twardość nasion, w badaniach zastosowano hartowany stalowy stożek. Celem prezentowanych w tej części pracy badań, było określenie niezbędnego czasu pomiaru oraz wartości kąta wierzchołkowego stożka końcówki penetratora. Kąta, przy którym można przeprowadzić pomiary twardości pojedynczych nasion zarówno o małej jak i dużej zawartości wody.

Badania przeprowadzono na nasionach zróżnicowanych pod względem wielkości i kształtu: groch Nike, pszenica Roma, żyto Dańkowskie Żółte, kukurydza cukrowa Gama, wyka Szelejewska oraz trzy odmiany fasoli: Augustynka, Jubilatka, Tara. Wszystkie pomiary zostały wykonane przy pomocy penetratorów w kształcie stożka (rys. 30) o kątach wierzchołkowych równych 90° , 120° , 136° . Końcowa siła nacisku wynosiła 2 N. Zawartość wody w nasionach utrzymywana była na sześciu poziomach: 0,11; 0,15; 0,19; 0,23; 0,33 i 0,42 $\text{kg} \cdot (\text{kg s.s})^{-1}$. Liczba powtórzeń dla każdej badanej kombinacji wynosiła 20.



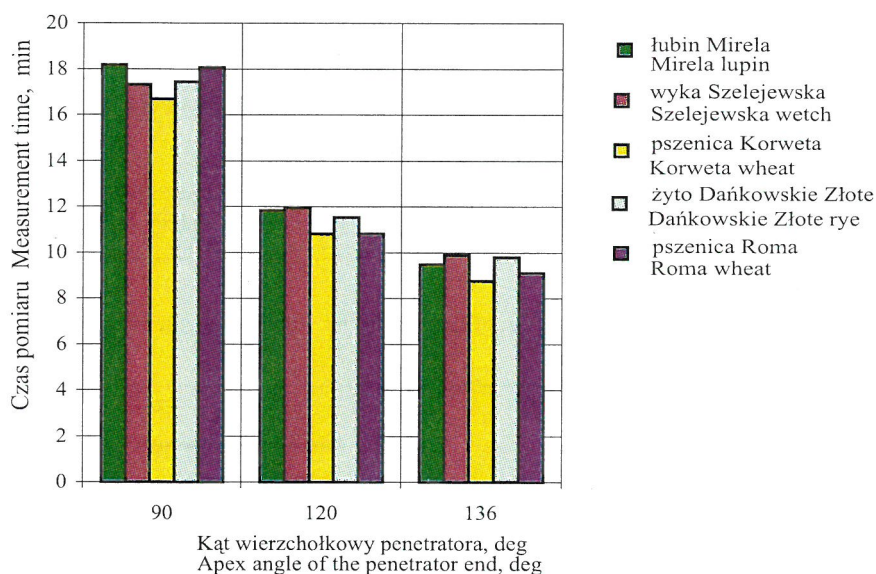
Rys. 30. Schemat obciążania nasienia podczas pomiaru twardości
Fig. 30. Diagram of loading of seeds during the hardness test

Czas trwania pomiaru

Wyniki wstępnych badań własnych wykazały, że zastosowanie czasu obciążania takiego jak zalecany jest w przypadku metali (rzędu kilkunastu sekund) w odniesieniu do nasion jest niemożliwe. W przypadku materiału o dużej zawartości wody zakończenie pomiaru w tak krótkim czasie prowadzi do uzyskania błędnych wyników – penetrator musi być bowiem zatrzymywany w czasie zagłębiania się w materiał. Przed przystąpieniem do określenia kąta wierzchołkowego końcówki penetratora przeprowadzono więc badania, które zgodnie ze wspomnianym wcześniej zjawiskiem płynięcia miały na celu określenie niezbędnego czasu wykonywania pomiaru.

Badania wykonano dla trzech różnych, wykonanych z hartowanej stali, końcówek penetratora o kątach wierzchołkowych 90° , 120° oraz 136° . Pomiar czasu zagłębiania się penetratora w badany materiał przeprowadzono przy stałym obciążeniu wynoszącym 2 N. Zawartości wody w nasionach wynosiła $0,33 \text{ kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$ – zjawisko pełzania jest wówczas bardzo wyraźne i łatwe do rozróżnienia. Pomiary wykonywano do momentu ustabilizowania się końcówki wgłębnika na pewnym poziomie, o czym sygnalizowała nie zmieniająca się wartość odkształcenia wyświetlana na czujniku.

Przykładowe wyniki badań zostały przedstawione na rysunku 31. Dla wszystkich badanych nasion, najkrótszy czas niezbędny do osiągnięcia stałej wartości odkształcenia, uzyskano dla penetratora o kącie wierzchołkowym $\alpha = 136^\circ$ i wynosił on poniżej 10 minut. Natomiast najdłuższy czas stabilizacji, wynoszący ponad 18 minut wystąpił przy penetratorze o kącie wierzchołkowym $\alpha = 90^\circ$. Natomiast dla penetratora o kącie wierzchołkowym $\alpha = 120^\circ$ czas pomiaru wyniósł około 12 minut. W celu ujednolicenia pomiarów, do dalszych badań przyjęto czas obciążania penetratora równy 10, 15 i 20 minut dla penetratorów o kątach wierzchołkowych odpowiednio 136° , 120° i 90° .



Rys. 31. Zależność czasu pomiaru od kąta wierzchołkowego końcówki penetratora

Fig. 31. Measurement time in dependency of the apex angle of the penetrator end

Kąt wierzchołkowy końcówki penetratora

Wyniki pomiarów opracowano statystycznie. Wykonano dwuczynnikową analizę wariancji z powtórzeniami. Jako czynniki główne przyjęto: *zawartość wody* oraz *kąt wierzchołkowy końcówki penetratora*. Przeprowadzony test wykazał istotność wpływu wszystkich czynników głównych na twardość pojedynczych nasion. Istotna statystycznie okazała się również interakcja drugiego rzędu: *zawartość wody* x *kąt wierzchołkowy końcówki penetratora*. W związku z uzyskanymi wynikami w dalszej kolejności wykonano testy Duncana.

Test Duncana wykonany dla czynników głównych nie wykazał grup jednorodnych w przypadku czynnika *kąt wierzchołkowy*. Zatem istotne jest dokonanie wyboru kąta wierzchołkowego stożka penetratora i ujednolicenie w ten sposób warunków pomiaru.

Dla dokonania prawidłowego wyboru kąta α przeprowadzono test Duncana dla interakcji *kąt wierzchołkowy końcówki penetratora* x *zawartość wody* (tab. 5). Wykazał on istnienie kilku grup homogenicznych. Dla penetratorów o kącie wierzchołkowym 90° i 120° powstała pojedyncza grupa dla zawartości wody od 0,23 do $0,33 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{s.s.})^{-1}$ natomiast dla penetratora o kącie wierzchołkowym 136° , powstały dwie grupy homogeniczne: dla zawartości wody od 0,19 do 0,23 oraz od 0,23 do $0,33 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{s.s.})^{-1}$. Świadczy to o tym, że wzrost wartości kąta wierzchołkowego końcówki penetratora prowadzi do zmniejszenia „czułości” przeprowadzanych pomiarów. Należy więc uznać, że penetrator o kącie wierzchołkowym 136° jest mało przydatny do pomiaru twardości nasion o wyższej wilgotności.

Tabela 5. Test Duncana dla interakcji *kąt wierzchołkowy penetratora* x *zawartość wody*

Table 5. Duncan's test for the interaction of the apex angle of penetrator and the water content

Wartość kąta wierzchołkowego Value of apex angle	Grupy homogeniczne Homogenic groups				
90°	x_{11}	x_{21}	x_{31}	x_{41}	x_{51}
120°	x_{12}	x_{22}	x_{32}	x_{42}	x_{52}
136°	x_{13}	x_{23}	x_{33}	x_{43}	x_{53}
	$x_{11} = 47,51;$	$x_{21} = 16,08;$	$x_{31} = 3,06;$	$x_{41} = 1,70;$	$x_{51} = 0,58$
	$x_{12} = 24,18;$	$x_{22} = 10,75;$	$x_{32} = 1,89;$	$x_{42} = 1,05;$	$x_{52} = 0,30$
	$x_{13} = 22,00;$	$x_{23} = 5,87;$	$x_{33} = 1,44;$	$x_{43} = 0,74;$	$x_{53} = 0,22$

oznaczenia (symbols): x_{ji}

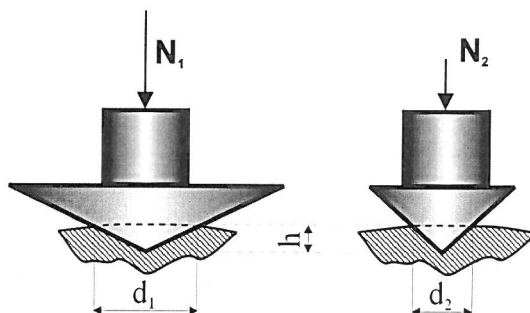
gdzie (where): i – kąt wierzchołkowy penetratora (apex angle of penetrator): 1 – 90° ; 2 – 120° ; 3 – 136°

j – zawartość wody (water content): 1 - $0,11 \text{ kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$, 2 - $0,15 \text{ kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$,
3 - $0,19 \text{ kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$, 4 - $0,23 \text{ kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$, 5 - $0,33 \text{ kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$

* - różnice nieistotne podkreślono

* - unimportant differences were underlined

Natomiast w przypadku penetratora o kącie wierzchołkowym 90° stwierdzono wysokie wartości twardości. Dodatkowo wystąpił brak różnic statystycznie istotnych między średnimi dla różnych odmian, co świadczy o niskiej czułości przyrządu.



Rys. 32. Zagłębianie się końcówki penetratora w materiał

Fig. 32. Penetration of the penetrator end in the material

Powodem tej sytuacji jest fakt, że niski kąt rozwarcia stożka stwarza dobre warunki do łatwego zagłębiania się czujnika w materiał – w przypadku dużego kąta rozwarcia, ta sama siła powoduje powstanie dużo mniejszych naprężeń, zwiększa się bowiem pole kontaktu czujnika i badanego materiału. Jak zilustrowano to na rysunku 32, siła N potrzebna do uzyskania tej samej wartości zagłębienia penetratora będzie dużo większa dla stożka o większym kącie rozwarcia ($d_1 > d_2$). Uplastycznienie materiału na skutek wzrostu zawartości wody powoduje dodatkowe zmniejszenie oporu przy zagłębianiu się penetratora w materiał.

Na podstawie przeprowadzonej analizy, można stwierdzić, iż spośród trzech badanych penetratorów najbardziej przydatny do badania twardości pojedynczych nasion okazał się wgłębnik o kącie wierzchołkowym 120° . W związku z tym, dalsze pomiary przeprowadzano przy wykorzystaniu wgłębnika o tym właśnie kącie.

W ramach przeprowadzonego eksperymentu określono również powtarzalność pomiaru twardości przy stosowaniu zaproponowanej metody. Oceniono ją na podstawie wartości odchylenia standardowego dla wszystkich badanych odmian. Małe wartości tego odchylenia świadczą o dużym skupieniu uzyskiwanych wyników wokół średniej twardości danych nasion przy danej zawartości wody (tab. 6).

Tabela 6. Wartości odchylenia standardowego**Table 6.** Value of the standard deviation

Odmiana Cultivar	Zawartość wody Water content, kg kg ⁻¹				
	0,11	0,15	0,19	0,23	0,33
Łubin Mirela Mirela lupin	4,425	1,000	0,359	0,052	0,015
Groch Piast Piast pea	1,300	0,305	0,081	0,012	0,004
Fasola Wiejska Wiejska bean	4,398	0,433	0,045	0,036	0,006
Fasola Atena Atena bean	0,608	0,682	0,092	0,021	0,014
Fasola Augustynka Augustynka bean	2,969	0,240	0,127	0,041	0,009
Fasola Jubilatka Jubilatka bean	3,484	0,373	0,082	0,033	0,007
Wyka Szelejewska Szelejewska wetch	5,710	1,563	0,461	0,039	0,023
Pszenica Korweta Korweta wheat	7,168	4,739	0,851	0,420	0,032
Żyto Dańkowskie Złote Dańkowskie Złote rye	4,430	5,267	0,631	0,327	0,066
Pszenica Roma Roma wheat	5,625	2,987	0,642	0,183	0,063

Podsumowanie

Analiza porównawcza stosowanych obecnie metod pomiaru pozwoliła na opracowanie metody pomiaru twardości pojedynczych nasion. Jest to połączenie metody Rockwella (pomiar wartości zagłębienia penetratora) oraz Vickersa (sposób obliczania twardości).

Zaproponowana metoda uwzględnia typowo reologiczny charakter materiału oraz jego małą twardość. Jej realizacja jest prosta i łatwa, dzięki czemu możliwe jest przeprowadzenie dużej liczby pomiarów przy niewielkich kosztach aparatury. Nie wymaga również specjalnego przygotowania osoby prowadzącej pomiar – dzięki zastosowaniu cyfrowych urządzeń pomiaru długości, odczyt twardości może następować bezpośrednio z wyświetlacza (po odpowiednim przeskalowaniu) lub z komputerowego monitora. Zaletą metody jest również to, że skala twardości jest

określona w jednostkach ciśnienia – a więc możliwe jest wykorzystanie wyników w tworzonych modelach fizycznych.

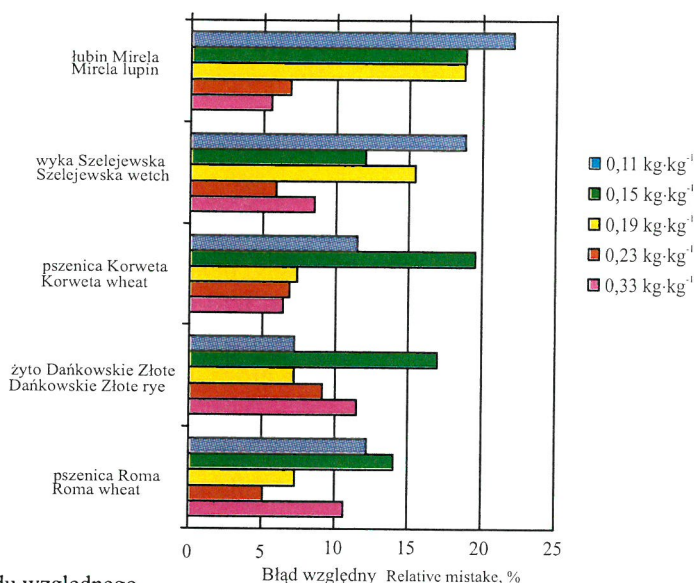
W wyniku przeprowadzonego eksperymentu sprecyzowano również warunki, w jakich pomiar ten ma być przeprowadzany:

- obciążenie wstępne wynosi 0,1 N
- obciążenie końcowe wynosi 2 N
- czas po którym dokonywany jest odczyt zagłębienia penetratora wynosi 15 min.
- pomiary wykonywane są przy użyciu penetratora w kształcie stożka o kącie wierzchołkowym równym 120°
- twardość obliczana jest ze wzoru (po uwzględnieniu $\alpha = 120^\circ$ oraz $N = 2 \text{ N}$):

$$RV = 0,1838 \cdot h^{-2} \text{ [MPa]} \quad (17)$$

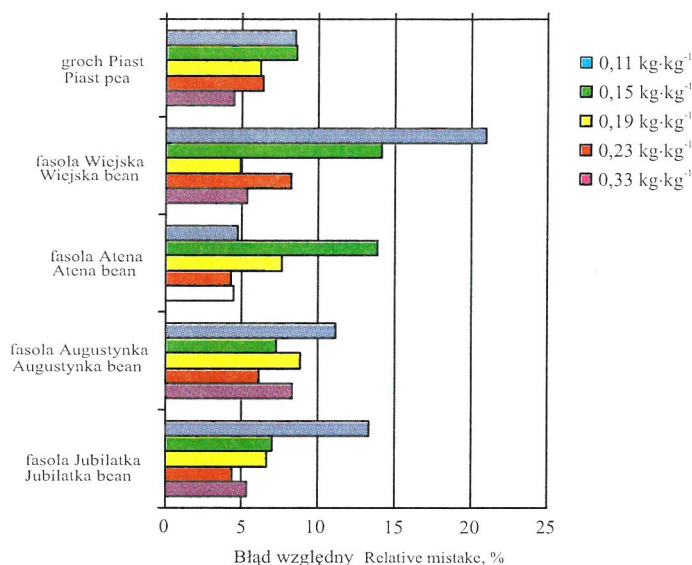
gdzie: h – wartość zagłębienia penetratora [mm].

Przeprowadzony w ten sposób pomiar twardości obarczony jest małym błędem. Na rysunkach 33 i 34 zamieszczono wartości tego błędu określone dla badanych nasion. Mieszczą się one w przedziale od 4,34% do 22,10%. Są to w porównaniu z pomiarem sprężystości dużo mniejsze wartości. Jest to dodatkowy argument przemawiający za rezygnacją z określania sprężystości pojedynczych nasion na korzyść ich twardości.



Rys. 33. Wartości błędu względnego

Fig. 33. Value of the relative mistake



Rys. 34. Wartości błędu względnego

Fig. 34. Value of the relative mistake

3. ZALEŻNOŚĆ MIĘDZY WSPÓŁCZYNNIKIEM SPRĘŻYSTOŚCI A TWARDOŚCIĄ POJEDYNCZYCH NASION

Jak już wcześniej opisano, przy pomiarze sprężystości występują liczne utrudnienia dające w efekcie duży rozrzut wyników. Powoduje to, że ich wykorzystanie w praktyce inżynierskiej jest bardzo problematyczne. Natomiast – jak wykazały badania - zdecydowanie prostszą i pewniejszą metodą określenia cech wytrzymałościowych pojedynczego ziarniaka może być pomiar jego twardości.

W związku z powyższym powstaje pytanie czy istnieje związek między współczynnikiem sprężystości nasienia WE_n oraz jego twardością RV . Gdyby odpowiedź na nie była twierdząca – w miejsce mało dokładnego pomiaru WE_n można by przeprowadzać pomiar twardości i na jego podstawie szacować sprężystość badanych nasion.

Badania przeprowadzono na następujących nasionach: groch Nike, pszenica Roma, żyto Dańkowskie Złote, fasola Jubilatka, wyka Szelejewska, łubin Mirela. Wszystkie pomiary zostały wykonane zgodnie z metodyką zaproponowaną w pierwszej części pracy dla pięciu poziomów zawartości wody: (0,11; 0,16; 0,22; 0,28; 0,33 kg s.s.)⁻¹).

Dla sformułowania ogólnej zależności między sprężystością a twardością testowano hipotezę roboczą, którą można zapisać następująco:

$$WE_n = f(RV) \quad (18)$$

Podczas tworzenia modelu wykorzystano sztuczne sieci neuronowe.

Sztuczne sieci neuronowe (SSN) są stosowane coraz częściej przy modelowaniu różnych zjawisk i procesów towarzyszące pozyskiwaniu i przetwarzaniu materiałów roślinnych (biologicznych) [84,34,151]. Pozwalają bowiem na opracowanie dobrze działającego modelu bez konieczności tworzenia teorii, a dodatkowo - porównanie modeli wykorzystujących SSN z modelami teoretyczno-empirycznymi wykazuje, iż te pierwsze mają większą dokładność [35]. Szczególnie często stosowane są jednokierunkowe wielowarstwowe SSN.

Do modelowania wykorzystano wyniki pomiarów empirycznych, przeprowadzonych dla wymienionych powyżej nasion przy różnych zawartościach wody.

Jako zmienne wejściowe dla SSN przyjęto:

- X_1 - zawartość wody [$\text{kg H}_2\text{O} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$]
- X_2 - twardość RV
- X_3 - liczbę porządkową charakteryzującą odmianę:

groch Nike	$X_3 = 1$
fasola Jubilatka	$X_3 = 2$
wyka Szelejewska	$X_3 = 3$
peluszką Perkoz	$X_3 = 4$
pszenica Korweta	$X_3 = 5$
żyto Dańkowskie Złote	$X_3 = 6$

Zmienną wyjściową Y był współczynnik sprężystości.

Wartości zmiennych wejściowych i zmiennej wyjściowej poddano następnie skalowaniu (normalizacji) do przedziału od 0 do 1 wg wzoru [78]:

$$y_{NORM} = \frac{y_{RZECZYWISTA} - y_{DOLNE}}{y_{GÓRNE} - y_{DOLNE}} \quad (19)$$

gdzie: y_{NORM} – wartość normalizowana zmiennej,
 $y_{GÓRNE}$ – przyjęte ograniczenie górne zakresu zmienności,
 y_{DOLNE} – przyjęte ograniczenie dolne zakresu zmienności.

Bazując na wynikach pomiarów, dla poszczególnych zmiennych przyjęto następujące ograniczenia zmienności:

$$\begin{array}{ll} X_{1, \text{DOLNE}} = 0,05 [\text{kg H}_2\text{O} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}] & X_{1, \text{GÓRNE}} = 0,40 [\text{kg H}_2\text{O} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}] \\ X_{2, \text{DOLNE}} = 0 [\text{N}] & X_{2, \text{GÓRNE}} = 200 [\text{N}] \\ X_{3, \text{DOLNE}} = 0 & X_{3, \text{GÓRNE}} = 7 \\ Y_{\text{DOLNE}} = 0 [\text{MPa}] & Y_{\text{GÓRNE}} = 40 [\text{MPa}] \end{array}$$

Tak przygotowane dane doświadczalne, podzielono losowo na zbiór uczący (210 wzorców) i testujący (90 wzorców) i wykorzystano do tworzenia modelu neuronowego. Wykorzystano wielowarstwowe jednokierunkowe sieci neuronowe o unipolarnych funkcjach przejścia dla wszystkich neuronów:

$$y = f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (20)$$

Badaniom poddano sieci dwuwarstwowe i trójwarstwowe. Ogólną architekturę sieci jednokierunkowych wielowarstwowych o trzech wejściach i jednym wyjściu przedstawiono schematycznie na rysunku 35 [34].

Testowane sieci uczone były przy użyciu algorytmu wstecznej propagacji błędu. Proces uczenia powtarzano trzykrotnie dla każdej architektury. Uczenie było prowadzone przez 50 000 epok (brak widocznego postępu procesu uczenia).

Do wyboru najlepszej SSN wykorzystano miernik mBw , będący sumą wartości bezwzględnej średniego błędu względnego dla wzorców testujących i odchylenia standardowego tego błędu:

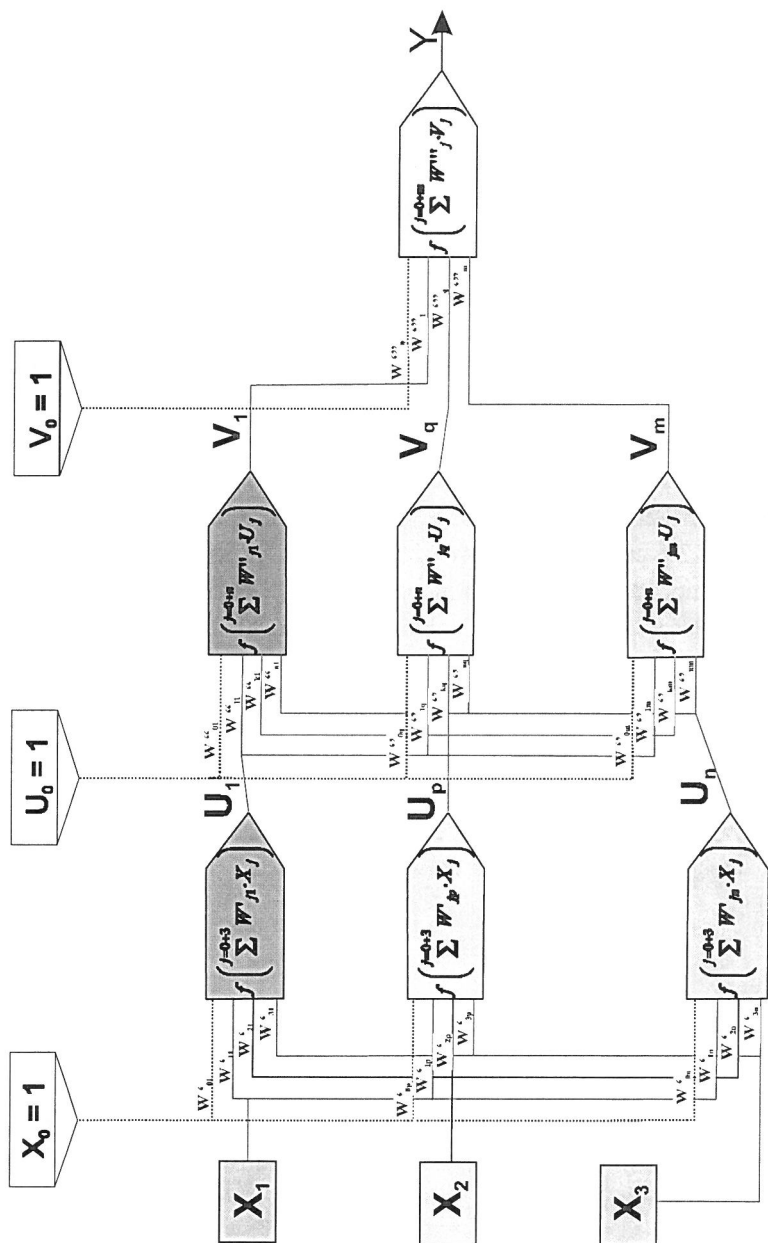
$$mBw = |srBw| + sdBw \quad (21)$$

gdzie: $|srBw|$ średnia arytmetyczna względnych błędów procentowych,
 $sdBw$ odchylenie standardowe względnych błędów procentowych.

Model ogólny

Wyniki uczenia, wartości miernika mBw dla poszczególnych sieci neuronowych, wykazały, że najdokładniej modeluje badane zjawisko SSN nr 2 o architekturze $3 \rightarrow 6 \rightarrow 1$ (3 neurony w pierwszej warstwie ukrytej, 6 neuronów w drugiej warstwie ukrytej i 1 neuron w warstwie wyjściowej). Sieć ta uzyskała:

dla wzorców testujących $mBw = 38,84\%$; ($srBw = -4,52\%$; $sdBw = 34,32\%$),
dla wzorców uczących $mBw = 39,48\%$; ($srBw = -4,55\%$; $ddBw = 34,93\%$).



Rys. 35. Schemat jednokierunkowej wielowarstwowej sztucznej sieci neuronowej
 Fig. 35. Diagram of the one-way multilayered artificial neuronal net

Wartości mBw są duże i nie upoważniają do uznania zaprojektowanej sieci jako miarodajnej w opisie zależności między badanymi parametrami. Graficzne porównanie wartości współczynnika sprężystości generowanego przez model SSN z wartościami uzyskanymi z pomiarów przedstawiono w skali podwójnie logarytmicznej na rysunku 36. Łatwo można zaobserwować wyraźne różnice między obydwoimi wartościami. Uznano zatem, że niezbędne są dalsze modyfikacje.

Ze względu na niewystarczającą dokładność modelu SSN opracowanego dla wszystkich danych doświadczalnych, przystąpiono do opracowania modeli cząstkowych. Zdecydowano się na utworzenie osobnych modeli dla różnych grup nasion. Po przeanalizowaniu dotychczasowych wyników badań dokonano podziału badanych nasion na grupy wg dwóch kryteriów:

- mała (od 0,11 do 0,19 kg·(kg s.s.)⁻¹) lub duża (od 0,19 do 0,33 kg·(kg s.s.)⁻¹) zawartość wody w materiale. Powodem tego rozgraniczenia był fakt, iż na skutek wzrostu zawartości wody w nasionach następuje zmiana właściwości mechanicznych nasion ze sprężysto-plastycznych na plastyczno-sprężyste. Dowodem tego są choćby bardzo duże różnice w wartościach HV (od $RV = 0,008$ MPa dla 0,33 kg·(kg s.s.)⁻¹ do $RV = 159$ MPa dla 0,11 kg·(kg s.s.)⁻¹).
- mała (do 1,3 g·cm⁻³) i duża (powyżej 1,3 g·cm⁻³) gęstość teoretyczna czyli gęstość jednorodnego materiału nieporowatego. Gęstość jest jedną z podstawowych właściwości fizycznych charakteryzujących dany materiał.

Gęstość pojedynczych nasion

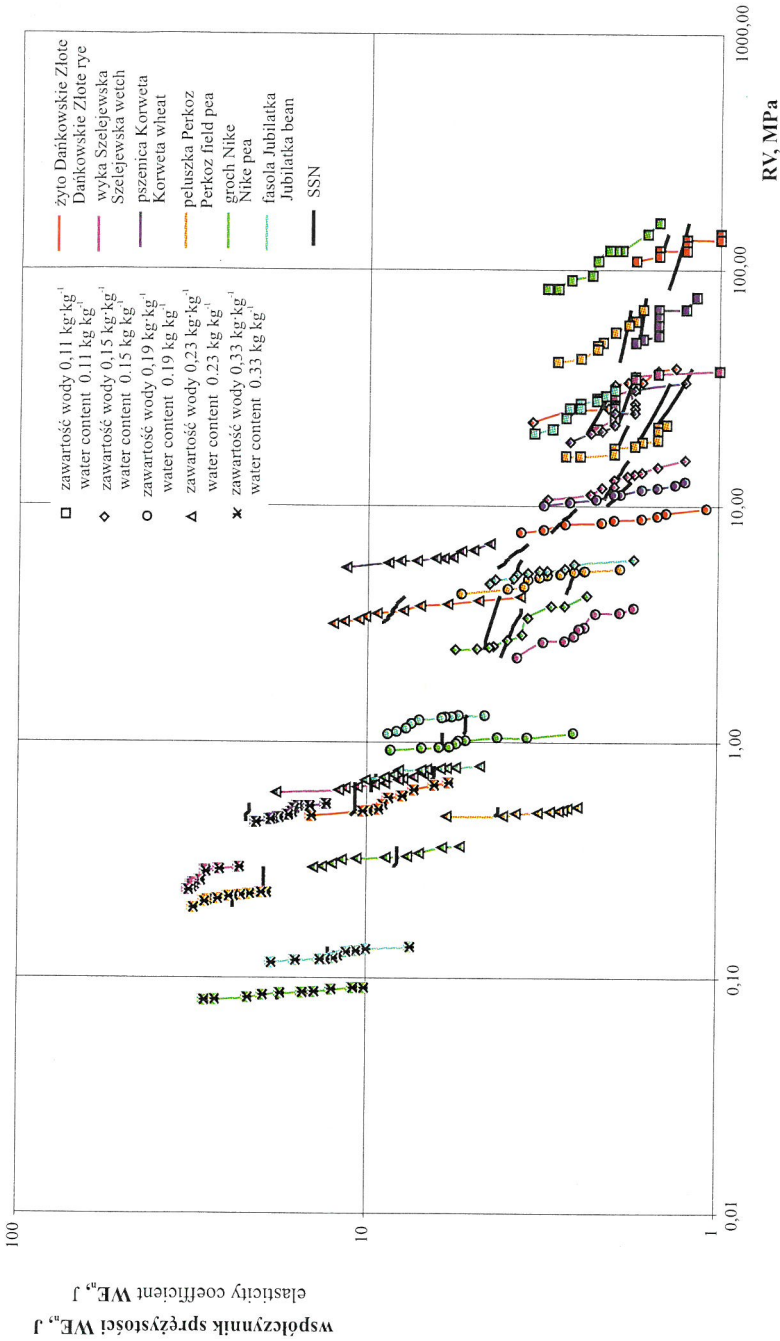
Przy określeniu gęstości teoretycznej (gęstości pojedynczych nasion) zastosowano elektroniczny zestaw do wyznaczania gęstości ciał stałych i cieczy z wagą typu WPS. Pomiar gęstości odbywa się przy wykorzystaniu prawa Archimedesesa. Gęstość obliczana była ze wzoru:

$$\rho = \frac{Q_p}{Q_p - Q_c} \rho_o \quad (22)$$

gdzie: ρ - gęstość materiału [g·cm⁻³], Q_p - ciężar próbki w powietrzu [N],

Q_c - ciężar próbki w cieczy [N], ρ_o - gęstość cieczy [g·cm⁻³].

Cieczą, w której zanurzano nasiona był olej o gęstości 917 kg·m⁻³. Pomiar masy próbki w powietrzu i w oleju odbywał się z dokładnością do 0,001 g. Liczba powtórzeń wynosiła 50. W tabeli 7 zamieszczono średnie wartości uzyskanych wyników pomiarów.



Rys. 36. Porównanie wyników pomiarów i wartości współczynnika sprężystości generowanych przez model sieciowy opracowany dla wszystkich badanych nasion i całego zakresu wilgotności

Fig. 36. Comparison of the measurements results and the value of elasticity coefficient generated by the network model worked out for all tested plants and whole moisture range

Tabela 7. Średnia gęstość teoretyczna nasion
Table 7. Average theoretical density of seeds

Odmiana Cultivar	Średnia gęstość Average density, g cm ⁻³	Odchylenie standardowe Standard deviation
Groch Nike Nike pea	1,2806	0,0137
Pszenica Roma Roma Wheat	1,3429	0,0298
Żyto Dańkowskie Złote Dańkowskie Złote rye	1,3367	0,0308
Fasola Jubilatka Jubilatka bean	1,2893	0,0126
Wyka Szelejewska Szelejewska wetch	1,3345	0,0197
Łubin Mirela Mirela lupine	1,2601	0,0174

Modele cząstkowe

Różnice w zmianach wartości HV i współczynnika sprężystości dla różnych materiałów ziarnistych spowodowały decyzję o opracowaniu niezależnych modeli dla różnych roślin. Przy zastosowaniu przyjętych kryteriów podziału uzyskano cztery grupy:

- grupa pierwsza: wyka Szelejewska, peluszka Perkoz, pszenica Korweta i żyto Dańkowskie Złote; zawartość wody od 0,11 do 0,19 kg·(kg s.s.)⁻¹
- grupa druga: groch Nike i fasola Jubilatka; zawartość wody od 0,11 do 0,19 kg·(kg s.s.)⁻¹
- grupa trzecia: wyka Szelejewska, peluszka Perkoz, pszenica Korweta i żyto Dańkowskie Złote; zawartość wody od 0,19 do 0,33 kg·(kg s.s.)⁻¹
- grupa czwarta: groch Nike i fasola Jubilatka; zawartość wody od 0,19 do 0,33 kg·(kg s.s.)⁻¹.

Ostatecznie opracowano cztery modele SSN:

- model I — dla grupy I: 84 wzorce uczące, 36 wzorców testujących,
- model II — dla grupy II: 42 wzorce uczące, 18 wzorców testujących,
- model III — dla grupy III: 84 wzorce uczące, 36 testujących,
- model IV — dla grupy IV: 42 wzorce uczące, 18 testujących.

Dla modeli III i IV zmieniono zakres normalizacji zmiennej wejściowej X_2 :

$$X_{2, \text{DOLNE}} = 0 \text{ [N]}; \quad X_{2, \text{GÓRNE}} = 15 \text{ [N]}.$$

Dla poszczególnych modeli przebadano wszystkie dostępne architektury sieci neuronowych – zmieniano liczby neuronów w warstwach ukrytych (tab. 8 i 9). Maksymalna liczba neuronów sieci jest uzależniona od liczby zmiennych i liczby wzorców uczących [88].

Za najlepsze sztuczne sieci neuronowe uznano:

- model I – SSN nr3: $7 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ (7 neuronów w pierwszej warstwie ukrytej, 2 neurony w drugiej warstwie ukrytej i 1 neuron w warstwie wyjściowej), która uzyskała dla wzorców:
 testujących: $mBw = 17,62\%$; ($srBw = 0,45\%$; $sdBw = 17,17\%$),
 uczących: $mBw = 21,65\%$; ($srBw = -0,57\%$; $sdBw = 21,09\%$),
- model II – SSN nr1: $2 \rightarrow 0 \rightarrow 1$ (2 neurony w pierwszej warstwie ukrytej i 1 neuron w warstwie wyjściowej), która uzyskała dla wzorców:
 testujących: $mBw = 23,18\%$; ($srBw = 0,91\%$; $sdBw = 22,27\%$),
 uczących: $mBw = 23,69\%$; ($srBw = -0,85\%$; $sdBw = 22,84\%$),
- model III – SSN nr2: $2 \rightarrow 5 \rightarrow 1$ (2 neurony w pierwszej warstwie ukrytej, 5 neuronów w drugiej warstwie ukrytej i 1 neuron w warstwie wyjściowej), która uzyskała dla wzorców:
 testujących: $mBw = 16,49\%$; ($srBw = -0,73\%$; $sdBw = 15,76\%$),
 uczących: $mBw = 20,37\%$; ($srBw = -1,46\%$; $sdBw = 18,91\%$),
- model IV – SSN nr1: $3 \rightarrow 0 \rightarrow 1$ (3 neurony w pierwszej warstwie ukrytej i 1 neuron w warstwie wyjściowej), która uzyskała dla wzorców:
 testujących: $mBw = 33,65\%$; ($srBw = -1,68\%$; $sdBw = 31,97\%$),
 uczących: $mBw = 21,07\%$; ($srBw = -0,20\%$; $sdBw = 20,87\%$).

Analizując uzyskane wyniki dokładności działania poszczególnych modeli SSN można zauważyć, że mniejsze wartości miernika mBw uzyskały modele I i III, opracowane dla pierwszej grupy badanych roślin (wyki Szelejewskiej, peluszek Perkoz, pszenicy Korweta i żyta Dańkowskiego Złotego), niż modele II i IV, sporządzone dla grochu Nike i fasoli Jubilatki. Szczególnie model IV charakteryzuje się zwiększoną wartością mBw. Powodem może być fakt, że modele I i III tworzą sieci neuronowe trójwarstwowe, a modele II i IV sieci dwuwarstwowe. Świadczy to o tym, że opisywana zależność jest na tyle skomplikowana, że wymaga stosowania sieci o bardziej rozbudowanej architekturze, dających możliwość tworzenia skomplikowanych funkcji matematycznych. W przyszłości w badaniach związanych z tworzeniem modeli neuronowych opisujących analizowane parametry należy więc dążyć do uzyskania liczby danych niezbędnych do utworzenia sieci trójwarstwowych.

Tabela 8. Architektury SSN badane dla modelu I i III
Table 8. SSN architectures tested for model I and model III

		Liczba neuronów w pierwszej warstwie ukrytej Number of neurons in hidden layer						
		2	3	4	5	6	7	8
Liczba neuronów w drugiej warstwie ukrytej Number of neurons in hidden layer	0	+	+	+	+	+	+	+
	1	+	+	+	+	+	+	+
	2	+	+	+	+	+	+	
	3	+	+	+	+			
	4	+	+	+				
	5	+	+	+				
	6	+	+					
	7	+						

Tabela 9. Architektury SSN badane dla modelu II i modelu IV
Table 9. SSN architectures tested for model II and model IV

		Liczba neuronów w pierwszej warstwie ukrytej Number of neurons in the first hidden layer			
		2	3	4	5
Liczba neuronów w drugiej warstwie ukrytej Number of neurons in the second hidden layer	0	+	+	+	
	1	+	+	+	
	2	+	+		
	3	+			
	4	+			
	5				

Wagi dla zmiennych wejściowych oraz wartości progowej Bias uzyskane w poszczególnych modelach przedstawiono w tabelach 10-13.

Tabela 10. Wagi dla modelu I (sieć neuronowa 7→2→1)

Table 10. Weights for model I (neural net 7→2→1)

		Wejścia do warstwy 1							
		Inputs of 1 st layer							
		X ₁	X ₂	X ₃	Bias				
Warstwa 1 ukryta 1 st hidden layer	neuron 1	-2,96	-0,34	0,02	0,31				
	neuron 2	-1,80	-0,73	0,01	-0,15				
	neuron 3	5,83	2,02	0,01	-1,59				
	neuron 4	-0,63	-0,73	0,20	-0,12				
	neuron 5	-4,26	10,06	3,14	-0,27				
	neuron 6	-3,15	-2,37	4,08	0,64				
	neuron 7	-0,39	-5,56	4,81	-1,47				
		Wejścia do warstwy 2							
		Inputs of 2 nd layer							
Warstwa 2 ukryta		U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅	U ₆	U ₇	Bias
2 nd hidden layer	neuron 1	-1,84	-0,78	3,60	0,11	-1,75	-1,74	0,97	0,36
	neuron 2	-2,10	-1,39	6,02	-0,50	8,10	-4,32	-5,77	1,14
		Wejście do warstwy 3							
		Input of 3 rd layer							
Warstwa 3 wyjściowa 3 rd output layer		Z ₁	Z ₂		Bias				
	neuron 1	-3,60	-6,23		3,55				

Tabela 11. Wagi dla modelu II (sieć neuronowa 2→0→1)**Table 11.** Weights for model II (neural net 2→0→1)

		Wejścia do warstwy 1 Inputs of 1 st layer			
		X ₁	X ₂	X ₃	Bias
Warstwa 1 ukryta 1 st hidden layer	neuron 1	-13,19	13,65	-4,73	4,94
	neuron 2	10,85	0,83	3,00	-3,40
		Wejście do warstwy 2 Inputs of 2 nd layer			
		Z ₁	Z ₂	Bias	
Warstwa 2 wyjściowa 2 nd hidden layer	neuron 1	-7,44	-9,70	7,89	

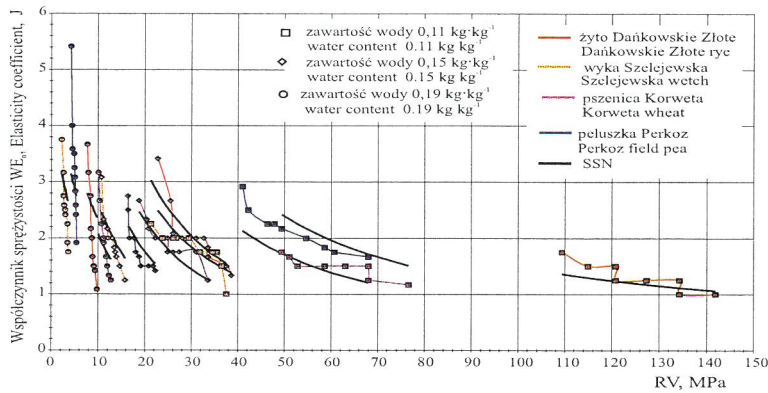
Tabela 12. Wagi dla modelu III (sieć neuronowa 2→5→1)**Table 12.** Weights for model III (neural net 2→5→1)

Warstwa 1 ukryta 1 st hidden layer		Wejścia do warstwy 1 Inputs of 1 st layer						
		X ₁	X ₂	X ₃	Bias			
	neuron 1	-3,32	21,55	1,72	-0,82			
	neuron 2	-9,74	-5,54	-5,88	10,00			
		Wejścia do warstwy 2 Inputs of 2 nd layer						
		U ₁	U ₂	Bias				
Warstwa 2	ukryta	neuron 1	3,98	-10,60	-1,37			
2 nd hidden layer		neuron 2	16,94	-3,59	-1,69			
		neuron 3	5,84	-3,27	-1,57			
		neuron 4	5,26	-14,19	1,26			
		neuron 5	-0,41	-5,78	3,92			
Warstwa 3 wyjściowa 3 rd output layer		Wejście do warstwy 3 Inputs of 3 nd layer						
		Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Bias	
		neuron 1	-7,71	-9,89	4,23	7,38	-3,10	4,66

Tabela 13. Wagi dla modelu I (sieć neuronowa 3→0→1)
Table 13. Weights for model I (neural net 3→0→1)

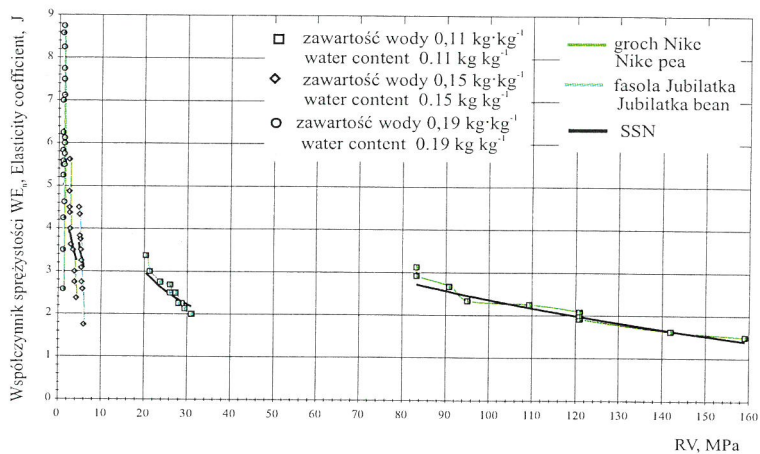
Warstwa ukryta		Wejścia do warstwy 1 Inputs of 1 st layer			
		X ₁	X ₂	X ₃	Bias
1 st hidden layer	neuron 1	-7,49	-1,11	-4,02	2,89
	neuron 2	2,56	16,48	-4,27	-1,34
	neuron 3	-10,76	12,22	10,47	7,08
Warstwa 2 wyjściowa		Wejścia do warstwy 2 Inputs of 2 nd layer			
		Z ₁	Z ₂	Z ₃	Bias
2 nd hidden layer	neuron 1	7,86	-14,35	-8,74	11,97

Wartości współczynnika sprężystości generowane przez modele SSN zostały porównane z wynikami pomiarów doświadczalnych (rys. 37- 40). Zaproponowane SSN w sposób zadowalający (w tego typu badaniach) odzwierciedlają badane zależności. Na tej podstawie można stwierdzić, że hipoteza robocza została zweryfikowana pozytywnie i potwierdzone zostały wcześniejsze spostrzeżenia odnośnie związku między twardością nasion a ich wskaźnikiem sprężystości.



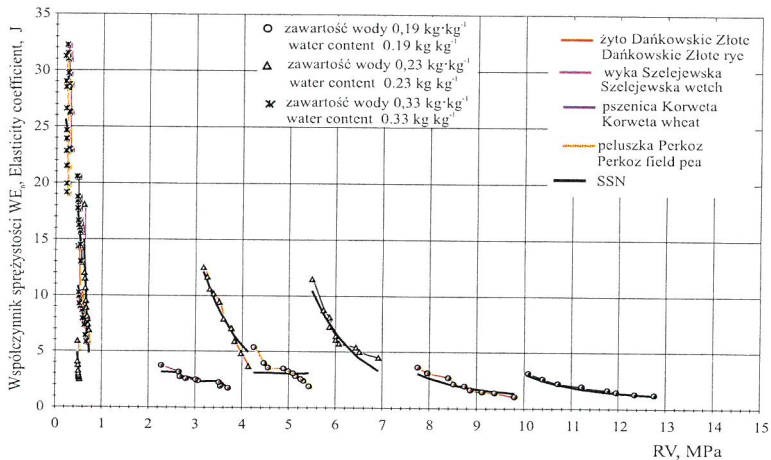
Rys. 37. Porównanie wartości współczynnika sprężystości generowanych przez model I i wyników pomiarów eksperymentalnych

Fig. 37. Comparison of the value of elasticity coefficient generated by model I and the results of experimental measurements



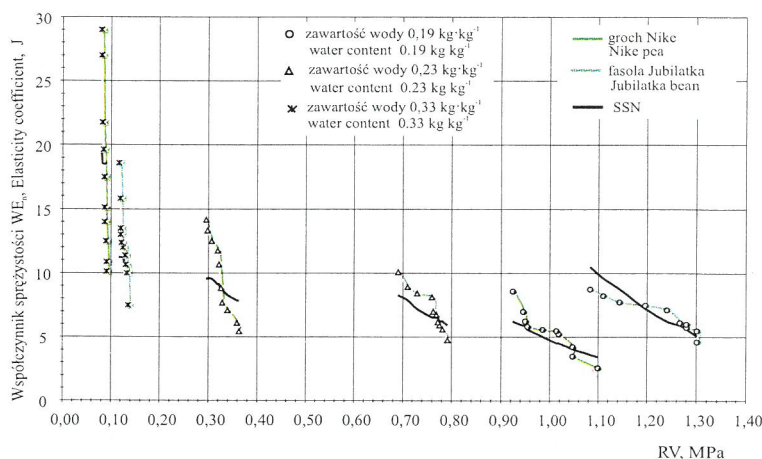
Rys. 38. Porównanie wartości współczynnika sprężystości generowanych przez model II i wyników pomiarów eksperymentalnych

Fig. 38. Comparison of the value of elasticity coefficient generated by model II and the results of experimental measurements



Rys. 39. Porównanie wartości współczynnika sprężystości generowanych przez model III i wyników pomiarów eksperymentalnych

Fig. 39. Comparison of the value of elasticity coefficient generated by model III and the results of experimental measurements



Rys. 40. Porównanie wartości współczynnika sprężystości generowanych przez model IV i wyników pomiarów eksperymentalnych

Fig. 40. Comparison of the value of elasticity coefficient generated by model IV and the results of experimental measurements

4. POMIAR POWIERZCHNI KONTAKTU NASIENIA Z PŁASKĄ POWIERZCHNIĄ

Przy rozwiązywaniu wielu problemów z dziedziny agrofizyki niezbędne jest określenie rzeczywistej powierzchni kontaktu stykających się ciał. Jak wykazują liczne badania jest to problem szczególnie istotny w przypadku badań związanych ze zjawiskiem tarcia [29,32,63,64,65,74,75,91,92]. Rzeczywista powierzchnia kontaktu jest czynnikiem decydującym o wartości nacisku panującego w strefie kontaktu dwóch ciał. W przypadku masy ziarnistej jest to obszar bezpośredniego styku ciał, który jest sumą wartości wszystkich jednostkowych mikrokontaktów o łącznej powierzchni stanowiącej tylko niewielki ułamek nominalnej powierzchni styku.

Dla ziarnistych materiałów roślinnych, jednostkowa (określona dla pojedynczych nasion) rzeczywista powierzchnia kontaktu nasion z płaską powierzchnią determinowana jest głównie przez zawartość wody w materiale oraz wartość siły nacisku [92,130]. Badania przeprowadzone przez Frączka [27] wskazują również ściśle powiązanie powierzchni kontaktu z rodzajem materiału ziarnistego.

Do tej pory nie zostały opracowane standardy pomiaru rzeczywistej powierzchni kontaktu. Jedną z nielicznych prób pomiaru powierzchni kontaktu podjął Molenda i inni [92] podczas badań nad zjawiskiem tarcia zewnętrznego. Autorzy opracowali i zastosowali własną metodę pomiaru tej powierzchni powstającej między

ziarnem a płaską płytką szklaną. Metoda ta wykorzystuje zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia światła, fotografię mikroskopową w świetle odbitym oraz standardowy przyrząd do pomiaru pola powierzchni płaskich obiektów (aparat Delta T Area Meter). Ziarniak zatopiony jest do połowy w cemencie i takie umocowanie uniemożliwia naturalne jego odkształcenie, a także zmianę położenia ziarniaka. Zastosowanie tej metody do badań na masach ziarnistych jest więc problematyczne. W czasie zwiększania obciążenia dochodzi bowiem do wzajemnego przemieszczania się oraz zwiększania liczby nasion będących w bezpośrednim kontakcie z powierzchnią materiału konstrukcyjnego, czego niestety nie można uwzględnić w opisanej metodzie.

Opracowano również metodę pomiaru rzeczywistej powierzchni kontaktu masy ziarnistej z płaską powierzchnią [28]. Dzięki niej możliwe jest dokonanie pomiarów w zależności od wartości siły nacisku oraz zawartości wody w materiale ziarnistym. Przeprowadzone badania wstępne wykazały nieliniową zależność rzeczywistej powierzchni od siły nacisku oraz zawartości wody.

4.1. Metoda pomiaru

Metoda pomiaru powierzchni kontaktu nasienia z płaską powierzchnią powinna spełniać następujące wymagania:

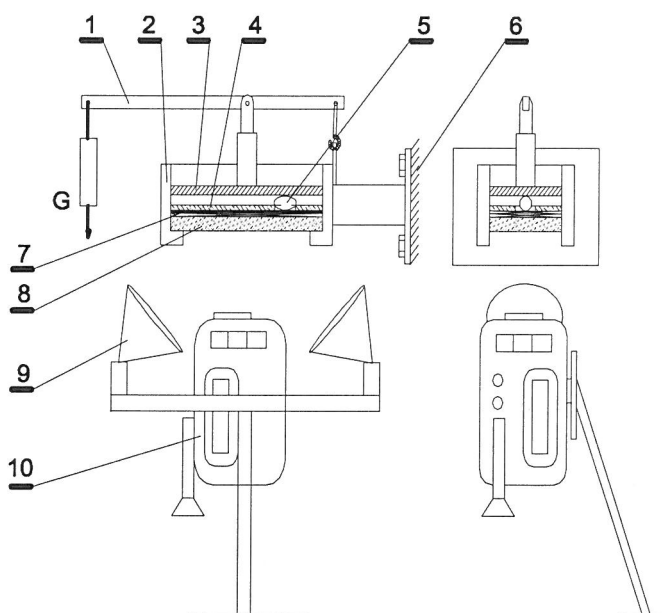
- możliwość pomiaru powierzchni kontaktu przy różnych wartościach siły nacisku,
- możliwość pomiaru powierzchni kontaktu przy różnym kształcie i wielkości nasion,
- prostota pomiaru,
- krótki czas pomiaru (duża liczba powtórzeń).

W świetle dokonanego przeglądu literatury wymagania te spełnia metoda zaproponowana przez Frączka [27]. Wykorzystywane w niej elementy komputerowej analizy obrazu skracają i ułatwiają pomiar.

Stanowiska pomiarowe zaprezentowano na rysunku 41. Pomiar powierzchni kontaktu przeprowadzany jest w kasecie (2) o wymiarach 70 x 120 mm. Dno kasety to płytka szklana (8) o grubości 5 mm - na której dla dokładnego określenia powierzchni, na jakiej przeprowadzony jest pomiar – umieszcza się maskownicę wykonaną z białego kartonu o wymiarach 30 x 30 mm. Na maskownicy znajdują się dwie kalki: techniczna i kopiująca. Kalkę kopiującą ułożyć należy tak, aby pozostawiała odciski na kalce technicznej. Do kasety wkładane są badane nasiona (5), które przykrywane są następnie pokrywą (3) i obciążane poprzez zawieszanie obciążników na ramieniu dzwigni (1). Pod kasetą ustawiona jest kamera (10), na której rejestro-

wane są obrazy w obrębie maskownicy. Są to ciemne pola obrazujące powierzchnię kontaktu nasion z płaską płytką.

Sposób pomiaru został zmodyfikowany w sposób umożliwiający zwielokrotnienie liczby powtórzeń oraz zwiększenie dokładności pomiaru. We wcześniejszym sposobie pomiaru nacisk wywierany był na pojedyncze nasienie. Nie wpływało to dobrze na stabilność układu materiał – płytka dociskowa i mogło powodować zwiększenie błędu pomiarowego. Dla uniknięcia tej sytuacji wprowadzono dodatkowy element w postaci szablonu, w którym wycięto trzy otwory znajdujące się na wierzchołkach trójkąta równobocznego. W wyznaczone w ten sposób miejsca wkładane są pojedyncze nasiona. W ten sposób płytka dociskowa podpierana jest w trzech równo od siebie oddalonych punktach i poprzez to jest stabilna. Przy spełnieniu warunku, że włożone nasiona mają jednakowe wymiary uzyskujemy również jednakowe siły nacisku. Dzięki zastosowaniu szablonu podczas jednego cyklu obciążania uzyskujemy obrazy trzech powierzchni kontaktu.



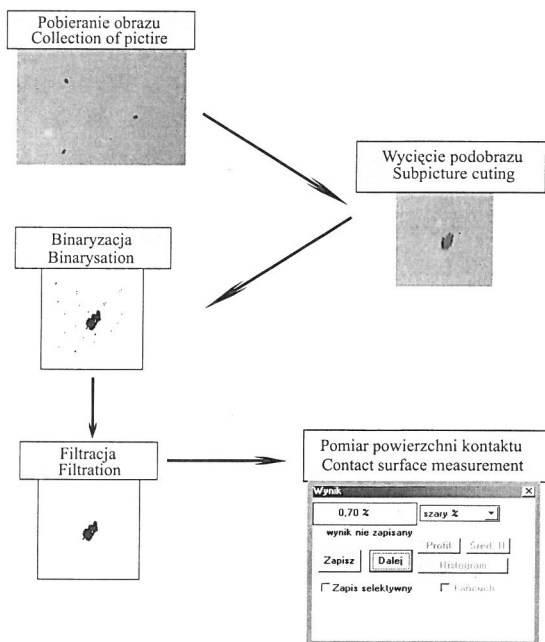
Rys. 41. Schemat stanowiska pomiarowego.

1 - dźwignia, 2 - kaseta pomiarowa, 3 - ruchoma pokrywa, 4 - szablon, 5 - nasienie, 6 - utwierdzenie w ścianie, 7 - kalki - techniczna i kopiująca, 8 - płytka szklana, 9 - lampa oświetleniowa, 10 - kamera

Fig. 41. Diagram of the testing stand.

1 - lever, 2 - measuring cassette, 3 - movable cover, 4 - stencil, 5 - seed, 6 - restrain in wall, 7 - carbon paper: technical and copying, 8 - glass plate, 9 - lighting lamp, 10 - video-camera

Kamera połączona jest z komputerem wyposażonym w kartę Show-Time Plus i program MultiScan, dzięki czemu możliwy jest ciągły podgląd obrazu na monitorze i korekcja ustawienia kamery. Obrazy rejestrowane są na kasecie video lub bezpośrednio na twardym dysku komputera w postaci bitmapy o rozdzielczości 600 dpi.



Rys. 42. Schemat komputerowej analizy obrazu

Fig. 42. Diagram of the computer analysis of image

W dalszej kolejności przeprowadzana jest analiza obrazu według schematu zamieszczonego na rysunku 42. Pierwszą operacją jest wczytanie obrazu, a następnie wycięcie podobrazu tak, aby zawierał tylko pole wewnątrz maskownicy. Dopiero taki obraz poddawany jest obróbce i analizie [142]. Dla uproszczenia pomiaru wszystkie przekształcenia uwzględniono w postaci makrodefinicji. Są to kolejno:

- binaryzacja z górnym progiem na poziomie 95 - polegająca na tym, że wszystko powyżej wymienionego progu szarości staje się czarne, zaś wszystko poniżej niego – białe. Przeprowadzenie binaryzacji progowej było niezbędne ponieważ dopiero na obrazach binarnych można dokonywać podstawowych pomiarów, takich jak: liczebność elementów, pole powierzchni, długość itp.

- przy dalszej obróbce zastosowano filtrowanie, którego celem było usunięcie zbędnych szczegółów pochodzących od nierówności oświetlenia, a także wzmocnienie punktów obrazujących pole powierzchni kontaktu.

Na tak przygotowanym obrazie zostaje przeprowadzony pomiar pola powierzchni charakteryzujący się dużą dokładnością i prostotą. Mierzenie powierzchni sprowadza się bowiem do zliczenia punktów tworzących dany obiekt. Otrzymany wynik jest procentem szarości całego pola zawartego w maskownicy. Znając całkowite pole maskownicy S_m łatwo można obliczyć rzeczywistą powierzchnię kontaktu P korzystając ze wzoru:

$$P = \frac{a \cdot S_m}{100\%} \quad [\text{mm}^2] \quad (23)$$

gdzie: $S_m = 900 \text{ mm}^2$ - pole powierzchni maskownicy,
 a - procent udziału szarości [%].

4.2. Wyniki pomiarów

Zgodnie z zaproponowaną procedurą przeprowadzono badania. Materiał stanowiło sześć różnych nasion: fasola Jubilatka, łubin Mirela, wyka Szelejewska, kukurydza Koński Ząb, pszenica Korweta, żyto Dańkowskie Złote. Badania przeprowadzono przy sześciu różnych zawartościach wody: 0,11; 0,15; 0,19; 0,23; 0,28 oraz 0,33 $\text{kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$. Ziarna obciążano w kolejności rosnącej ośmioma wartościami siły, począwszy od 41 N do 230 N. Krotność pomiarów wynosiła 5.

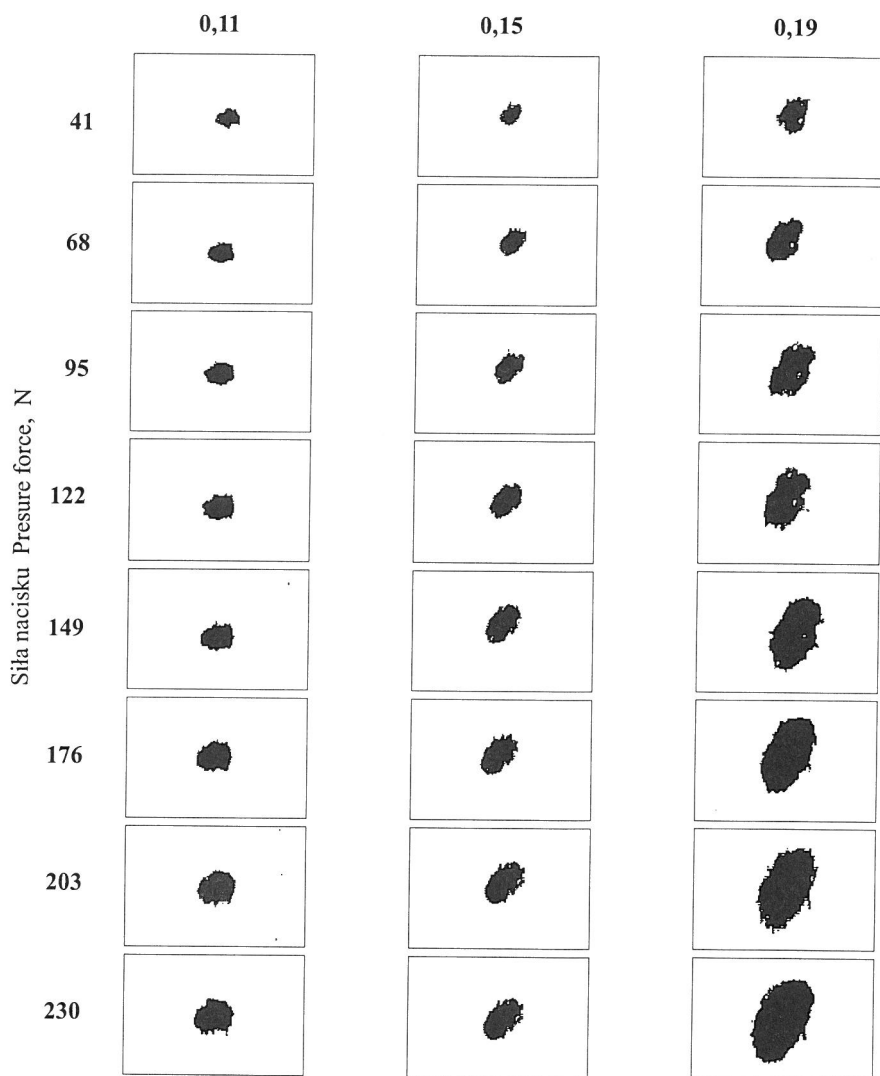
Przykładowe obrazy ilustrujące zmianę powierzchni kontaktu dla fasoli Jubilatka zamieszczono na rysunku 43.

Wyniki pomiarów posłużyły do wykonania testów statystycznych. W pierwszej kolejności przeprowadzono analizę wariancji, która w pełni potwierdziła wpływ zawartości wody w materiale, wymiarów ziaren oraz nacisku na wartość powierzchni kontaktu. Graficzną interpretacją wyżej wymienionej sytuacji są rysunki 44-49.

Na rysunkach tych przedstawiono przebieg zmian jednostkowej powierzchni kontaktu w zależności od zawartości wody, przy różnych wartościach nacisku. Wartości powierzchni kontaktu są średnimi z danej grupy pomiarów. W przypadku wszystkich badanych materiałów roślinnych wystąpiła interakcja: zawartość wody $\times$ nacisk. Przy niskiej wartości nacisku zmiana powierzchni kontaktu P , wywołana zmianą zawartości wody była stosunkowo niewielka. Dla kukurydzy Koński Ząb, przy nacisku 41N zmiana zawartości wody z 0,11 $\text{kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$ do 0,33 $\text{kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$ spowodowała wzrost powierzchni kontaktu jedynie o 3 mm^2 . W takich samych

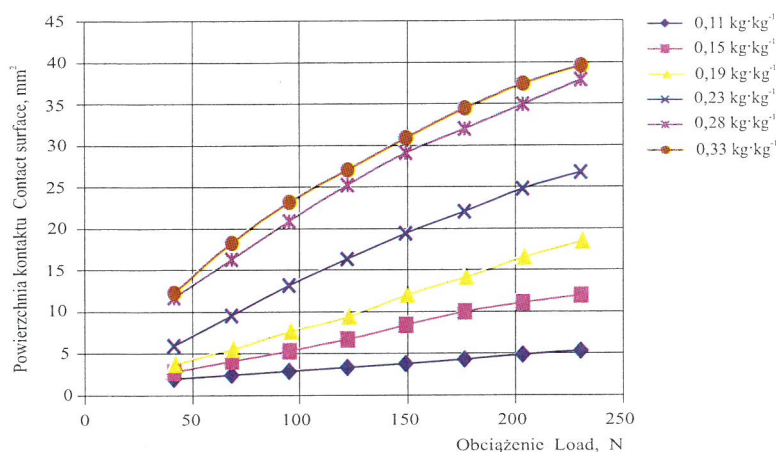
warunkach przyrost P kształtował się odpowiednio: wyka Szelejewska 3,9 mm², pszenica Korweta 4,6 mm², łubin Mirela 5,1 mm², żyto Dańkowskie Złote 5,2 mm², oraz fasola Jubilatka 10,3 mm².

Zawartość wody Water contents, kg kg



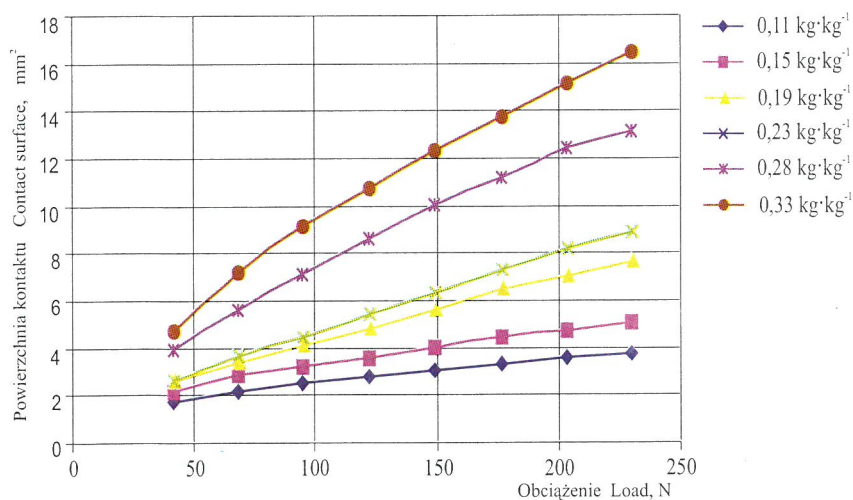
Rys. 43. Obraz powierzchni kontaktu z płaską powierzchnią fasoli Jubilatki

Fig. 43. Image of the contact surface of the flat surface of the Jubilatka bean



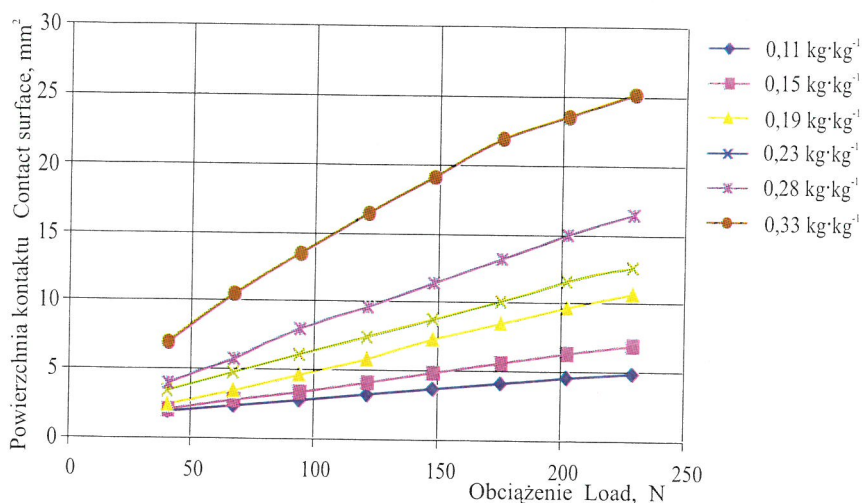
Rys. 44. Zmiana rzeczywistej powierzchni kontaktu w zależności od obciążenia przy różnych zawartościach wody dla fasoli Jubilatki

Fig. 44. Change of the real surface of contact in dependency of load at different water contents of the Jubilatka bean



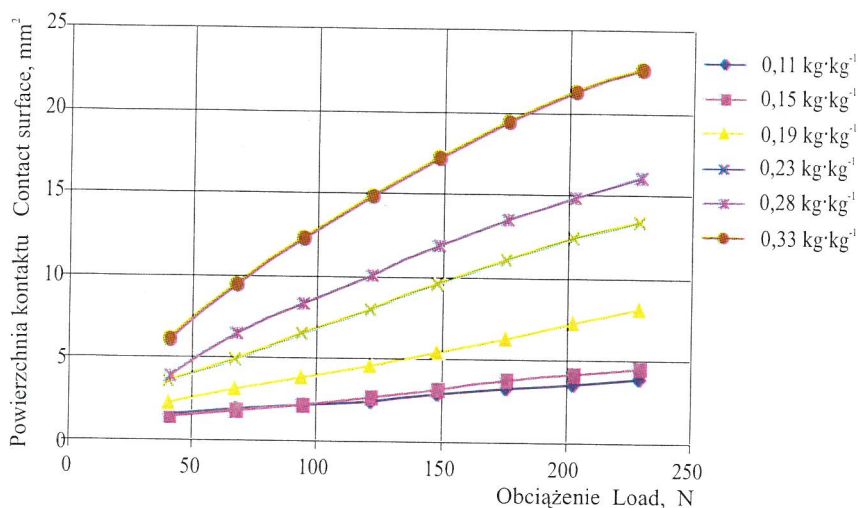
Rys. 45. Zmiana rzeczywistej powierzchni kontaktu w zależności od obciążenia przy różnych zawartościach wody dla kukurydzy Koński Ząb

Fig. 45. Change of the real surface of contact in dependency of load at different water contents of the Horse's Tooth maize



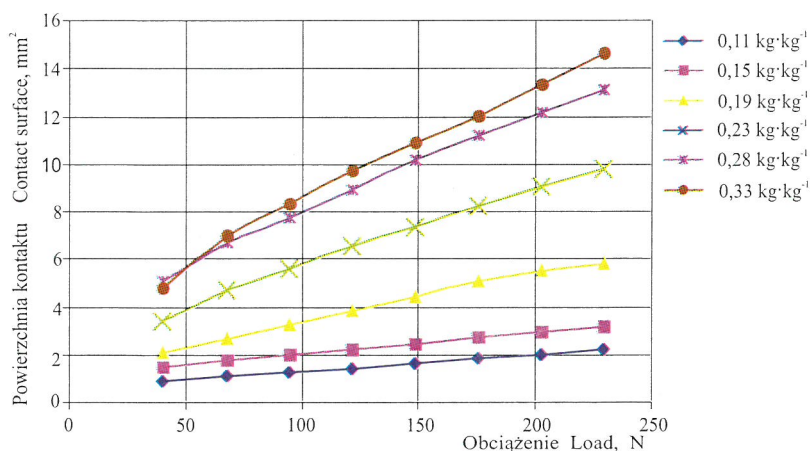
Rys. 46. Zmiana rzeczywistej powierzchni kontaktu w zależności od obciążenia przy różnych zawartościach wody dla łubinu Mirela

Fig. 46. Change of the real surface of contact in dependency of load at different water contents of Mirela lupine



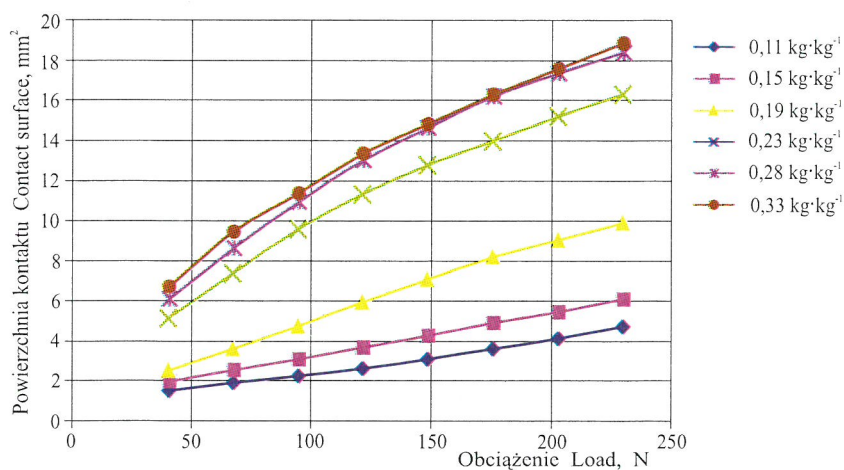
Rys. 47. Zmiana rzeczywistej powierzchni kontaktu w zależności od obciążenia przy różnych zawartościach wody dla pszenicy Korweta

Fig. 47. Change of the real surface of contact in dependency of load at different water contents of Korweta wheat



Rys. 48. Zmiana rzeczywistej powierzchni kontaktu w zależności od obciążenia przy różnych zawartościach wody dla wyki Szelejewska

Fig. 48. Change of the real surface of contact in dependency of load at different water contents of Szelejewska vetch



Rys. 49. Zmiana rzeczywistej powierzchni kontaktu w zależności od obciążenia przy różnych zawartościach wody dla żyta Dańkowskie Żłote

Fig. 49. Change of the real surface of contact in dependency of load at different water contents of Dańkowskie Żłote rye

Przy dużych naciskach rozbieżności pomiędzy badanymi materiałami roślinnymi są nieco większe. Przyrosty powierzchni kontaktu P przy sile nacisku 230N i zmianie zawartości wody od $0,11 \text{ kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$ do $0,33 \text{ kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$ kształtują się odpowiednio: wyka Szelejewska $12,4 \text{ mm}^2$, kukurydza Koński Ząb $12,7 \text{ mm}^2$, żyto Dańkowskie Złote $14,1 \text{ mm}^2$, pszenica Korweta $18,7 \text{ mm}^2$, łubin Mirella $20,2 \text{ mm}^2$, fasola Jubilatka $34,3 \text{ mm}^2$.

Uzyskane wyniki testów posłużyły do wykonania obliczeń w celu określenia funkcyjnej zależności między powierzchnią kontaktu a wybranymi czynnikami ją determinującymi. Zmiennymi niezależnymi były: zawartość wody, siła nacisku oraz wymiary ziarniaka. Opisane zagadnienie przedstawiono za pomocą modelu:

$$P = [A/C]^a \cdot [B/C]^b \cdot Z^c \cdot N^d \quad (24)$$

gdzie: P - powierzchnia kontaktu [mm^2], A - grubość ziarna [mm], B - szerokość ziarna [mm], C - długość ziarna [mm], Z - zawartość wody [$\text{kg} \cdot (\text{kg s.s.})^{-1}$], N - siła nacisku [N], a, b, c, d - stałe modelu

Wyniki aproksymacji według powyższego równania zamieszczono w tabeli 14.

Współczynnik determinacji r^2 testowanej funkcji uzyskał najmniejszą wartość w przypadku ziarna kukurydzy (76,41%) a najwyższą dla pszenicy (89,98%). Należy więc uznać, że estymowana funkcja w sposób zadowalający opisuje zależność powierzchni kontaktu od geometrii ziarna, zawartości wody oraz siły nacisku.

Należy również stwierdzić, że zawartość wody w nasionach w podobny sposób wpływa na zmianę powierzchni styku pojedynczego nasienia z płaską powierzchnią. Świadczy o tym fakt, że współczynnik d zmienia się w zakresie od 1,33 do 1,61.

W przypadku siły nacisku można zanotować podobne oddziaływanie. Współczynnik potęgowy wynosi od 0,577 do 0,778. Tak więc uzyskane wyniki potwierdzają wcześniejsze spostrzeżenia, że do opisu zmian badanej powierzchni nie można stosować teorii Hertza dotyczącej naprężeń stykowych – przy rosnącej sile normalnej N , naprężenia kontaktowe nie wzrastają jak N^3 . Prawdopodobnie wynika to z faktu, iż teoria ta obowiązuje jedynie dla materiałów sprężystych, natomiast w przypadku badanych nasion, wraz ze wzrostem zawartości wody wzrasta również udział odkształceń plastycznych powstających podczas dociskania materiału do płaskiej powierzchni. Trudno więc wówczas mówić o czystych odkształceniach sprężystych.

Tabela 14. Wyniki aproksymacji nieliniowej
Table 14. Results of non-linear approximation

Odmiana Cultivar		a	b	c	d	r^2
Wspólne All	Wykładnik Exponent	1,596	-1,690	1,447	0,896	68,73%
	Błąd stat. Stat. error	0,050	0,057	0,025	0,007	
Fasola Jubilatka Jubilatka bean	Wykładnik Exponent	-1,296	-0,061	1,512	0,928	78,25%
	Błąd stat. Stat. error	0,312	0,067	0,045	0,020	
Kukurydza Koński Ząb Horse's Tooth maize	Wykładnik Exponent	0,008	-0,126	1,351	0,790	74,74%
	Błąd stat. Stat. error	0,145	0,142	0,045	0,014	
Łubin Mirela Mirela lupine	Wykładnik Exponent	-2,103	-1,988	1,351	0,755	82,60%
	Błąd stat. Stat. error	0,355	0,220	0,045	0,014	
Pszenica Korweta Korweta wheat	Wykładnik Exponent	-0,935	0,228	1,783	0,834	87,97%
	Błąd stat. Stat. error	0,226	0,271	0,042	0,018	
Wyka Szelejewska Szelejewska wetch	Wykładnik Exponent	0,214	-	1,526	0,813	81,69%
	Błąd stat. Stat. error	0,212	-	0,046	0,011	
Żyto Dańkowskie Złote Dańkowskie Złote rye	Wykładnik Exponent	-1,433	0,242	1,299	0,675	84,84%
	Błąd stat. Stat. error	0,169	0,238	0,480	0,250	

III. MECHANIKA ROŚLINNYCH OŚRODKÓW ZIARNISTYCH

1. WSTĘP

Podłoże dla rozwoju mechaniki ośrodków sypkich ustanowiły wyniki badań jakie Andrew Jenike opublikował w opracowaniu „Gravity flow of bulk solids” wydanym w 1961 roku. Już wtedy stało się jasne, że każdy przemysł przetwórczy ma do czynienia z grawitacyjnym płynięciem jakiegoś materiału sypkiego, a często grupy materiałów sypkich. Opracowanie Jenikego było pierwszym wyczerpującym studium tego zagadnienia, możliwym dzięki rozwojowi teorii plastyczności w czasie poprzednich 15 lat oraz równoczesnemu pojawieniu się komputerów [60]. Stąd autor miał narzędzie teoretyczne do matematycznego sformułowania zagadnienia, a także możliwość jego rozwiązania. Jenike adaptował technikę badawczą i pewne koncepcje z mechaniki gruntu. Jego wkład twórczy był ważki, gdyż analizował materiał sypki poddany naprężeniom 100 do 1000 razy niższym niż będące w zainteresowaniu mechaniki gruntów. Oznaczało to, iż krytycznego znaczenia nabierały zjawiska, jakich w ogóle nie dostrzegano w mechanice gruntów. Dla przykładu, w mechanice gruntów nie występuje krzywizna obwiedni kół Mohra w układzie współrzędnych (σ, τ) , która ma zasadnicze znaczenie dla wyznaczania sypkości (flowability) materiału sypkiego.

Naturalnym zastosowaniem osiągnięć Jenikego była technika silosowa. Sam autor rozwijał praktyczne zastosowania na tym polu, a wkrótce pojawiła się w światowych laboratoriach liczna grupa badaczy pracujących w tym kierunku. Po czterdziestu latach intensywnych prac i ożywionych dyskusji osiągnięto porozumienie i utworzono szereg standardów narodowych dotyczących projektowania silosów, m. in. amerykańskie: ACI 313-91, 1995 oraz ASAE EP433, 1999; australijski - AS 3774, 1996; polski - PN-B-03254, 2002 oraz standard europejski Eurocode 1 [26]. Integralną częścią norm projektowania są standardowe metody wyznaczania właściwości mechanicznych przechowywanych materiałów sypkich. Podstawą obliczeń konstrukcyjnych pozostaje liczące sobie ponad sto lat równanie Janssena (1895), jednak uzgodnienie sposobów obliczeń i metod wyznaczania parametrów doprowadziło do spójności wyników projektowania na znacznym obszarze świata oraz pozwoliło na obniżenie wartości współczynników bezpieczeństwa.

Z praktycznego punktu widzenia ważne jest zwrócenie bacznej uwagi na odmienność zachowania się materiałów ziarnistych od typowych stanów skupienia: cieczy, ciała stałego i gazu.

Porównując materiał ziarnisty z cieczą istotne są trzy zasadnicze różnice w zachowaniu mechanicznym:

- Materiały ziarniste mają kąt tarcia wewnętrzznego większy niż zero, ciecze – równy zero. Dlatego napór statyczny w cieczy nie zależy od kierunku, w materiale ziarnistym na ogół zmienia się zależnie od kierunku. Materiał sypki w stanie statycznym przenosi naprężenie ścinające, zaś ciecz nie. Dlatego ciecz w stanie spoczynku tworzy płaską powierzchnię, zaś materiał ziarnisty tworzy stożkową pryzmę.
- Naprężenie styczne w materiale ziarnistym poddanym ścinaniu nie zależy od prędkości deformacji, zależy zaś od średniego naprężenia. W płynie naprężenie ścinające zależy od prędkości odkształcenia (jako efekt działania lepkości) a nie zależy od ciśnienia.
- Wiele materiałów ziarnistych, po skonsolidowaniu, posiada spójność (wytrzymałość kohezyjną) i zachowuje kształt nadany pod obciążeniem. Mogą one tworzyć stabilne sklepienie, albo kanał - jakie nie mogą powstać w płynie.

Brak precyzyjnej wiedzy o mechanicznym zachowaniu się materiałów sypkich stał się szczególnie uciążliwy i kosztowny w miarę upowszechniania masowych technologii przetwarzania w przemysłach: chemicznym, farmaceutycznym i przetwórczym [61,69]. Niepewność co do wartości parametrów materiału powodowała błędy projektowania procesów, a zmienność właściwości materiału prowadziła do awarii instalacji w trakcie użytkowania. Znane i sprawdzone metody laboratoryjne pozwalają na poprawne wyznaczenie właściwości materiałowych, uznano jednak, że dla zastosowań praktycznych są czasochłonne i wymagają zbyt wysokich kwalifikacji personelu. Dlatego aktualnie poszukuje się wskaźników technologicznych, które dałyby możliwość szybkiej i taniej charakterystyki materiału w ograniczonym zakresie danego procesu technologicznego [9,107,108].

Globalizacja rynku pociągnęła za sobą, nie tylko wzrost skali produkcji, lecz także zaostrenie konkurencji. Wymusza to uzyskiwanie i utrzymanie wysokiej jakości produktu. W przypadku materiałów sypkich utrzymanie stabilności właściwości mechanicznych, a zwłaszcza sypkości, jest warunkiem wysokiej jakości. Zmiany sypkości surowca w poszczególnych partiach, albo w trakcie procesu technologicznego mogą powodować zmiany składu, co obniża jakość, a nawet (jak w przypadku leków) może mieć fatalne konsekwencje. Sypkość bywa też miarą atrakcyjności artykułów spożywczych takich jak kawa instant, mleko w proszku czy cukier. W przypadku tego typu materiałów często zachodzi też konieczność oznaczania wielkości, kształtu i układu przestrzennego cząstek.

Sprawia to szczególną trudność w warunkach kontroli procesu in-line [10]. W tym zakresie badania nad konstrukcją przetworników pomiarowych są wciąż w stadium wstępnym.

Prezentowane opracowanie zawiera opis aktualnego stanu wyżej wzmiankowanych zastosowań praktycznych mechaniki ośrodków sypkich w odniesieniu do nasion - surowców przemysłu spożywczego. Poza obszarem zainteresowania pozostały dwa kierunki intensywnego rozwoju mechaniki ośrodków sypkich: poszukiwanie modeli konstytutywnych materiału oraz badania numeryczne.

2. WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE ROŚLINNYCH MATERIAŁÓW SYPKICH

2.1. Gęstość

Gęstość jest jednym z podstawowych parametrów materiałów sypkich. Znajomość dokładnej wartości gęstości złoża materiału sypkiego jest niezwykle ważna w wielu zastosowaniach praktycznych. Gęstość wpływa istotnie na charakterystyki mechaniczne. Jest jednym z trzech podstawowych parametrów, oprócz współczynnika tarcia i ilorazu naporu, służących do wyznaczenia naporu materiału sypkiego na konstrukcję zbiornika. Jest niezbędna do dokładnego oszacowania pojemności zbiorników.

Popularna metoda oznaczania gęstości ziarna zbóż w stanie zsypanym (gęstość usypna) oparta jest na pomiarze masy materiału nasypanego swobodnie do cylindrycznego pojemnika o stałej objętości 0,25 lub 1 dm³ [111]. Przedstawiona w tabeli 15 gęstość usypna najpopularniejszych nasion jest niższa niż gęstość materiału w silosie, gdzie w dolnych warstwach wysokiej kolumny ziarna panuje duży napór pionowy. Gęstość zależy od wilgotności, ciśnienia, stopnia zanieczyszczenia, szybkości i sposobu formowania złoża oraz wysokości spadania nasion. Parametr ten zmienia się na ogół w dość znacznych granicach zależnie od gatunku i odmiany, wilgotności, sposobu napełniania, wysokości złoża, stopnia zanieczyszczenia i innych czynników.

Gęstość w stanie utrzęsionym dostarcza informacji o podatności materiału sypkiego na zagęszczanie w warunkach wstrząsów. Zgodnie z normą pomiar polega na doprowadzeniu znanej masy materiału sypkiego do najmniejszej objętości poprzez zastosowanie drgań o stałej amplitudzie i częstotliwości [112]. Gęstość utrzęsiona ziarna zbóż jest większa od gęstości usypnej na ogół o kilka do kilkunastu bądź nawet dwudziestu kilku procent [128].

Tabela 15. Gęstość usypna, porowatość i ciężar właściwy nasion [ASAE D241.4]**Table 15.** Pouring density, porosity and specific gravity of seeds [ASAE D241.4]

Nasiona Seeds	Gęstość usypna Pouring density (kg m^{-3})	Wilgotność Moisture (%)	Porowatość Porosity (%)	Ciężar właściwy, Specific gravity, (kN m^{-3})
Jęczmień Barley	618	9,7-10,7	39,5-57,6	12,1-13,3
Rzepak Rape	669	6,5-6,7	38,4-38,9	11,0-11,5
Kukurydza Maize	721	9-15	40,0-44,0	11,9-13,0
Siemię lniane Flax-seed	721	5,8	34,6	11,0
Owies Oats	412	9,4-10,3	47,6-55,5	09,5-10,6
Ryż Rice	579	11,9-12,4	46,5-50,4	11,1-11,2
Żyto Rye	721	9,7	41,2	12,3
Soja Soya bean	772	6,9-7,0	33,8-36,1	11,3-11,8
Pszenica Wheat	772	9,8	39,6-42,6	12,9-13,2

2.2. Wytrzymałość na ścinanie

W dążeniu do bardziej szczegółowego opisu materiałów ziarnistych posłużono się ujęciem mechaniki ośrodków ciągłych. Konieczne było w tym celu przyjęcia założenia o ciągłości materiału ziarnistego. Zakłada się, że substancja jest rozłożona równomiernie w otoczeniu rozważanego punktu w pewnej objętości materiału. Założenie to jest słuszne, jeśli pory i niejednorodności są wystarczająco małe w odniesieniu do objętości rozważanego obszaru. Można wówczas używać terminów: naprężenie normalne i naprężenie styczne oraz aparatu teoretycznego mechaniki ośrodków ciągłych. Właściwości mechaniczne materiału rozdrobnionego w zasadniczym stopniu zależą od jego gęstości. Gęstość, ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], jest przede wszystkim funkcją naporu zagęszczania, czasu zagęszczania, wilgotności materiału i temperatury. Zagęszczanie to proces zmniejszania objętości materiału w wyniku obciążenia go naporem.

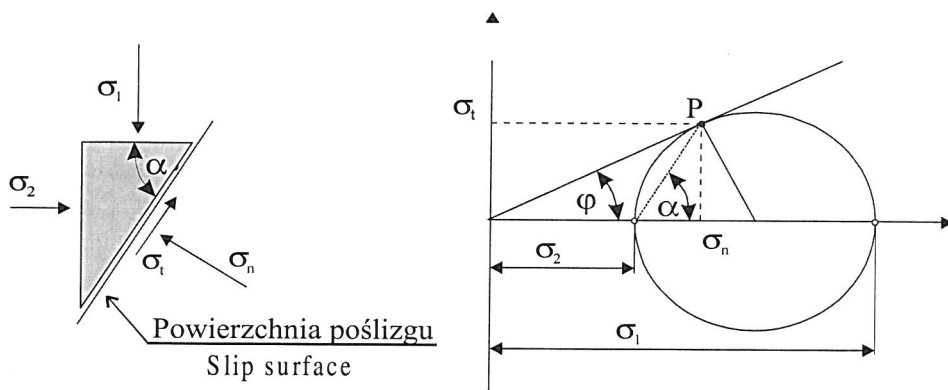
Podstawowe problemy wytrzymałości materiału ziarnistego zostały rozwiązane przez mechanikę gruntów. Konieczność wyznaczenia parametrów materiałowych podyktowana była praktycznymi potrzebami projektowania fundamentów budynków, ścian oporowych, kąta pochylenia nasypów itp. Przedmiotem zainteresowania były więc dopuszczalne, graniczne wartości naprężeń jakie może przenieść grunt. Jednym z zasadniczych zadań teorii wytrzymałości jest określenie naprężeń wewnętrznych wywołanych obciążeniem zewnętrznym, przy których nastąpi załamanie wytrzymałości – płynięcie materiału tzn., kiedy następuje bardzo duże, nieodwracalne odkształcenie materiału. Warunek pły-

nięcia („załamania” wytrzymałości) można w ogólności wyrazić jako funkcję trzech naprężeń głównych i gęstości [22]:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \rho) = 0 \quad (25)$$

Przyjęcie gęstości jako parametru warunku plastyczności prowadzi do sformułowania modelu plastycznego ze wzmocnieniem i osłabieniem. Pominięcie wpływu gęstości na zachowanie mechaniczne materiału prowadzi natomiast do sformułowania modelu idealnie plastycznego. Liczne badania wskazywały, że o osiągnięciu uplastycznienia w złożonym stanie naprężenia decydują wartości największego σ_1 i najmniejszego σ_2 naprężenia głównego. Wpływ pośredniego naprężenia σ_3 można pominąć. Wtedy warunek płynięcia można łatwo zilustrować na płaszczyźnie σ_1, σ_2 . Możliwe jest także graficzne przedstawienie tak ujętego warunku płynięcia na płaszczyźnie składowej stycznej τ_n i składowej normalnej σ_n wektora naprężania, zwanej płaszczyzną Mohra, która jest tradycyjnie stosowana do ilustrowania stanu naprężenia. Na płaszczyźnie tej stan naprężenia (σ_1, σ_2) ilustruje okrąg (rys. 50). Zbiór stanów spełniających warunek (25) jest zbiorem kół. Reprezentacją geometryczną warunku płynięcia jest obwiednia kół z parametrem ρ . Warunek płynięcia dla ustalonej gęstości złoża reprezentuje jedna obwiednia. Każda z obwiedni może być opisana matematycznie jako związek pomiędzy naprężeniem stycznym τ_n i normalnym σ_n wzdłuż kierunku ścinania:

$$\tau_n = F(\sigma_n) \quad (26)$$

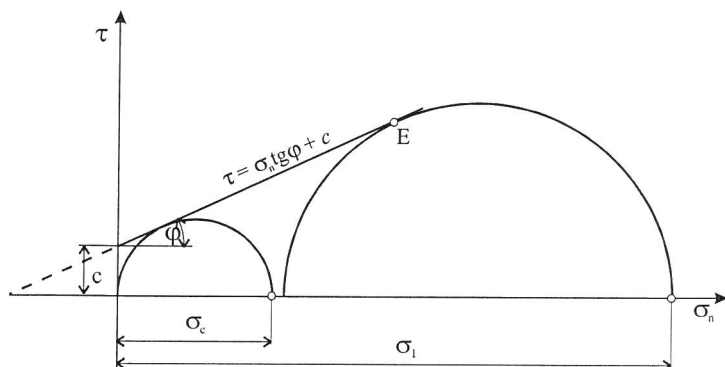


Rys. 50. Reprezentacja stanu naprężenia na płaszczyźnie Mohra

Fig. 50. Representation of state of tension in plane Mohr's surface

Szczególną postacią funkcji F jest funkcja liniowa (rys. 51):

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + c \quad (27)$$



Rys. 51. Warunek Coulomba-Mohra

Fig. 51. Coulomb-Mohr's condition

Formuła podana w 1773 roku przez Coulomba oznacza, że wytrzymałość na ścinanie jest liniową funkcją naporu normalnego. Wyrażenie (27) zwane jest liniowym warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra, i wciąż pozostaje ujęciem najbardziej popularnym w zastosowaniach praktycznych. Kąt φ nosi nazwę kąta tarcia wewnętrznego, zaś stała c to kohezja. Z siłami spójności materiału i kohezją związana jest wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie σ_c (unconfined yield strength). Ten ważny parametr charakteryzujący „płynność” materiału, gdy mniejsze naprężenie główne równe jest zeru związany jest z φ i c związkiem:

$$\sigma_c = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (28)$$

Związek (28) wyprowadzony jest z liniowej postaci warunku wytrzymałości. Również nieliniową postać warunku (26) można wyrazić przez wielkości φ , c i σ_c . Kąt φ będzie wówczas kątem lokalnego nachylenia obwiedni do osi składowej normalnej wektora naprężenia σ_n .

2.3. Iloraz naprężeń w spoczynku - k_0 , iloraz naporu - k

Iloraz naprężeń w spoczynku k_0 [122] jest opisowym wskaźnikiem stosowanym w mechanice gleb. Obrazuje on, że płynięcie plastyczne materiału sypkiego nie może być traktowane tak jak płynięcie cieczy. Rozważmy półprzestrzeń ograniczoną płaszczyzną poziomą. Oś x leży na płaszczyźnie, a oś z skierowana jest pionowo

w dół. Niech σ_x oznacza poziome, a σ_z pionowe naprężenie ściskające na pewnej głębokości. Dla zachowania symetrii naprężenia te są równocześnie naprężeniami głównymi. Iloraz naprężeń w spoczynku wyraża się jako $k_0 = \sigma_x/\sigma_z$. W cieczy molekuly mają swobodę ruchu we wszystkich kierunkach. Kiedy ciecz pozostaje w spoczynku, we wszystkich kierunkach działa jednakowe ciśnienie hydrostatyczne tzn. $k_0 = 1$. W przypadku materiału sypkiego, pod działaniem siły ciężkości, cząstki przemieszczają się również w kierunku poziomym wytwarzając dodatkowe naprężenie poziome σ_x . Cząstki nie mają jednak zupełnej swobody ruchu, jak molekuly płynu, i dlatego $\sigma_x < \sigma_z$ i $0 < k_0 < 1$. Wartości skrajne obowiązują dla materiału sypkiego w warunkach ekstremalnych. Dla złoża w stanie fluidyzacji $k_0 \rightarrow 1$, zaś dla materiałów mocno zagęszczonych $k_0 \rightarrow 0$. Iloraz naprężeń jest silnie uzależniony od historii obciążenia i stopnia w jakim jest ona zapamiętana w materiale. Na przykład w złożach sedymentacyjnych, uformowanych pod niewielkim ciśnieniem, składowa pozioma naprężenia jest mniejsza niż składowa pionowa. W złożach, na których w przeszłości zalegał lodowiec wywierając na nie wysokie ciśnienie, składowa pozioma naprężenia może być większa niż składowa pionowa [49].

Przy pewnej idealizacji warunków panujących w półprzestrzeni materiału ograniczonej z góry poziomą płaszczyzną można wyprowadzić iloraz naporu w oparciu o teorię sprężystości [68]. Zakładamy, że półprzestrzeń jest wypełniona materiałem izotropowym. Rozważamy pionową kolumnę materiału o wysokości z i polu powierzchni A . Wewnątrz materiału nie występują odkształcenia ani przemieszczenia, zatem naprężenia na pionowych ścianach kolumny są w równowadze i nie występują naprężenia styczne. Ciężar kolumny wynosi $Q = Az\rho g$, zatem pionowe naprężenie na głębokości z wynosi:

$$\sigma_z = \frac{Q}{A} = z\rho g \quad (29)$$

W płaskim stanie odkształcenia zachodzą związki [143]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z) \right] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} \left[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z) \right] = 0 \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} \left[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \right] \end{aligned} \quad (30)$$

Stąd

$$\sigma_y = \nu(\sigma_x + \sigma_z)$$

oraz

$$\varepsilon_x = \frac{1+\nu}{E} [(1-\nu)\sigma_x - \nu\sigma_z]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1+\nu}{E} [(1-\nu)\sigma_z - \nu\sigma_x]$$

W półprzestrzeni $\varepsilon_x = 0$, zatem

$$\sigma_x = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z = k_0 z \rho g$$

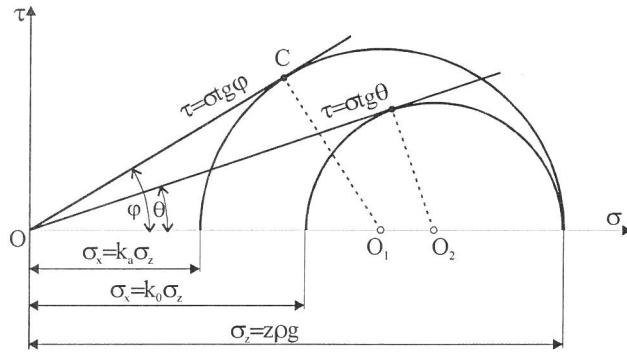
Współczynnik k_0 jest zatem stałą zależną od współczynnika Poissona ν ośrodka. Naprężenie poziome w półprzestrzeni jest wprost proporcjonalne do pionowego i rośnie liniowo z przyrostem głębokości. Rzeczywiste materiały wykazują liczne odstępstwa od powyższego stwierdzenia. W przypadku materiału anizotropowego, jeżeli moduł sprężystości w kierunku osi cylindra jest wyższy niż w kierunku promienia, wartość k jest mniejsza niż wynikałoby to z równania (32).

Ważnym z praktycznego punktu widzenia jest również związek ilorazu naporu k z kątem tarcia wewnętrznego φ . Rankine wywiódł ten związek z obserwacji, że warstwa gruntu ma tendencję do poślizgu wzdłuż powierzchni nachylonej do poziomu pod kątem tarcia wewnętrznego [67]. Na rysunku 52 przedstawiono stan naprężeń w półprzestrzeni materiału. Okrąg o środku O_2 styczny do prostej $\tau = \sigma g \theta$ przedstawia stan naprężeń w spoczynku, gdy materiał nie osiągnął jeszcze stanu granicznego. Jeżeli w opisanej półprzestrzeni dopuścimy ruch w kierunku poziomym, to nastąpi zmiana naprężenia poziomego bez zmiany naprężenia pionowego. Jeśli będzie to ruch na zewnątrz osi z naprężenie poziome σ_x zmaleje; materiał osiągnie graniczny stan naprężeń w którym $\tau = \sigma g \varphi$. W przypadku materiału bezkohezyjnego stan taki zwany czynnym stanem Rankine'a przedstawia okrąg o środku O_1 (rys. 52). Z zależności geometrycznych wynika:

$$\sin \varphi = \frac{C_1 O}{OO_1} = \frac{\frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x)}{\frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_x)}$$

zatem

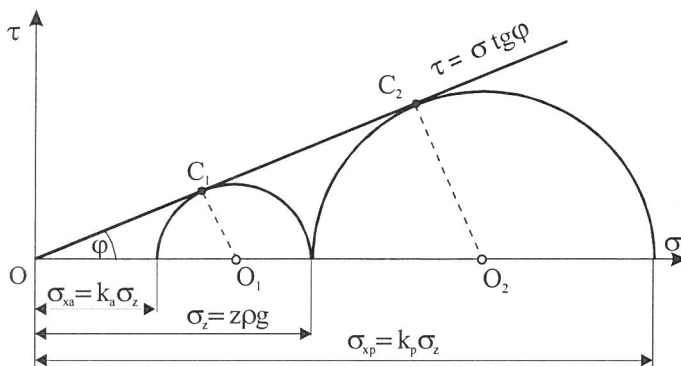
$$\frac{\sigma_x}{\sigma_z} = k_a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}.$$



Rys. 52. Naprężenia w stanie spoczynku oraz w czynnym stanie Rankine'a
Fig. 52. Stress state in static equilibrium and in the active state of Rankine

Naprężeniom w spoczynku i w czynnym stanie Rankine'a odpowiadają wartości ilorazu naporu, oznaczone na rysunku 52 odpowiednio k_0 i k_a . Jeżeli teraz materiał będzie podlegał ścisnaniu w kierunku poziomym, to naprężenie poziome σ_x będzie rosło, bez zmiany naprężenia pionowego σ_z (rys. 53). Promień koła naprężeń będzie malał do zera (stan hydrostatycznego ścisnania $\sigma_x = \sigma_z$). Naprężenie poziome przekroczy wartość pionowego i będzie rosło aż stan naprężeń osiągnie stan graniczny zwany biernym stanem Rankine'a (okrąg o środku O_2 na rys. 53). W tym stanie iloraz naporu jest dany zależnością:

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_z} = k_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (35)$$



Rys. 53. Czynny i bierny stan naprężeń Rankine'a
Fig. 53. Active and passive stress state of Rankine

W półprzestrzeni materiału ziarnistego naprężenia główne są pionowe i poziome, a zatem naprężenie styczne w tych kierunkach jest równe zeru. W wielu zastosowaniach praktycznych (np. w silosach) warstwa ziarna jest ograniczona sztywnymi pionowymi ścianami. W takich warunkach rozkład naprężeń w przekroju poziomym może nie być stały, ponieważ materiał ziarnisty może przenosić naprężenia ścinające. W osi cylindrycznego zbiornika panuje stan naprężeń taki jak w półprzestrzeni materiału sypkiego tzn. osie naprężeń głównych σ_1 i σ_2 zorientowane są w kierunkach odpowiednio pionowym i poziomym, zaś naprężenia styczne mają wartość zero. W miarę oddalania się od osi rośnie pionowe naprężenie styczne, pochodzące od tarcia materiału o ścianę, które osiąga wartość maksymalną $\tau_{xz} = \tau_t$ przy ścianie zbiornika. Przyrostowi naprężenia stycznego, przy zbliżaniu się do ściany, towarzyszy obrót osi naprężeń głównych. Oś większego naprężenia głównego σ_1 obraca się tak, że wytwarza składową poziomą działającą w kierunku ściany. Ponieważ nie można wyznaczyć stanu naprężeń bez znajomości wartości naprężenia stycznego na ścianie τ_t przyjmuje się założenie, że tarcie na ścianie jest w pełni rozwinięte tzn. $\tau_t = \sigma_x \tan \varphi_w$. Wzrost kąta tarcia o ścianę powoduje przyrost naprężenia poziomego σ_x i równoczesny spadek naprężenia pionowego σ_z . Stosunek naprężenia poziomego do pionowego osiąga wartość maksymalną kiedy kąt tarcia o ścianę φ_w równy jest kątowi tarcia wewnętrznego φ , wówczas $\tau_t = \sigma_n \tan \varphi$.

2.4. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie

Wyżej opisane parametry materiałów rozdrobnionych charakteryzują ich wytrzymałość oraz oddziaływanie na elementy konstrukcyjne urządzeń. W ostatnich latach projektanci procesów i technolodzy przetwórstwa coraz częściej zgłaszają konieczność częstego, dokładnego i taniego oznaczania płynności materiału [np. 9,62]. W wielu procesach istotne jest by nie następowało zbrylanie. Często jest to elementarna cecha akceptowalnej jakości surowca. Oczywiście są także zyski z zachowania płynności przez sypkie produkty spożywcze. Szczególnego znaczenia nabiera w tej sytuacji wzmiankowana już wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie - σ_c , która jest tradycyjnym wskaźnikiem płynności. Wprowadził go A. Jenike [60] jako element teorii wywiedzionej z własnych badań eksperymentalnych. Autor opisał płynięcie materiału ziarnistego opierając się na ujęciu mechaniki ośrodków ciągłych. Był to pierwszy skuteczny opis plastycznego płynięcia ośrodka ziarnistego z uwzględnieniem tarcia wewnętrznego. Doskonalona przez lata do dziś teoria Jenikego pozostaje najszerzej uznawaną na świecie. Wytrzymałość na

jednoosiowe ściskanie σ_c zależy od wartości większego obciążenia konsolidującego σ_1 :

$$FF_c = \sigma_c(\sigma_1) \quad (36)$$

Przebieg $\sigma_c(\sigma_1)$ dla większości materiałów zależy od czasu konsolidacji, temperatury i wilgotności. Niskie wartości σ_c wskazują na wysoką płynność materiału, wysokie wartości σ_c świadczą o niskiej płynności. W szczególności materiał doskonale sypki charakteryzuje σ_c o wartości zero dla wszystkich wartości większego obciążenia konsolidującego σ_1 . Zależność (36) jest nazywana funkcją płynięcia i oznaczana skrótem FF (flow function). Współczynnik kierunkowy stycznej do funkcji płynięcia nosi nazwę indeksu płynięcia i . Materiały granularne często są charakteryzowane ze względu na wartość indeksu płynięcia i [60] jako:

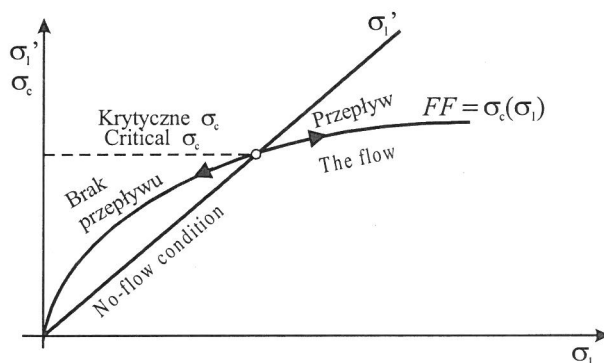
- $i < 0,1$ - swobodnie płynące,
- $0,1 < i < 0,25$ - łatwo płynące,
- $0,25 < i < 0,5$ - kohezyjne,
- $0,5 < i$ - niepłynące.

Jenike [60] wprowadził ponadto współczynnik przepływu, który charakteryzuje kanał przepływu. Współczynnik przepływu ff (flow factor) zdefiniowany jest jako:

$$ff = \frac{\sigma'_1}{\sigma_1} \quad (37)$$

Obserwacje praktyczne wskazują, że najczęściej zaburzenia przepływu występują jako sklepienia tworzące się w leju wysypowym silosu przy przepływie masowym, albo jako tunele – w silosach o przepływie rdzeniowym. Sklepienia i tunele tworzą się na skutek konsolidacji materiału, która powoduje przyrost jego wytrzymałości maksymalnie do wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie σ_c . Jeżeli wartość σ_c jest zbyt niska by utrzymać stabilne sklepienie lub tunel – materiał płynie. Dlatego też kryteria płynięcia wiążą naprężenie na styku leja z materiałem w poziomie przesklepienia σ'_1 z wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie σ_c . Im wyższe jest naprężenie σ'_1 panujące na styku leja z materiałem tym niższa wytrzymałość σ_c tym łatwiejszy jest przepływ. Im wyższa jest wartość ff tym korzystniejszy kształt kanału. Analiza w układzie współrzędnych (σ_1, σ_c) wzajemnego położenia funkcji płynięcia FF oraz współczynnika przepływu ff jest podstawą projektowania kanałów wypływowych. Zgodnie z rysunkiem 54

materiał płynie jeśli $\sigma'_1 > \sigma_c$ tzn. gdy sklepienie nad otworem nie może utrzymać się. Wartość krytyczna σ_1 występuje w punkcie przecięcia linii współczynnika przepływu ff i funkcji płynięcia FF . Wartość współczynnika przepływu jest funkcją efektywnego kąta tarcia δ , kąta pochylenia ścian leja θ oraz kąta tarcia materiału o ścianę ϕ_w .



Rys. 54. Kryterium przepływu materiału sypkiego [60]

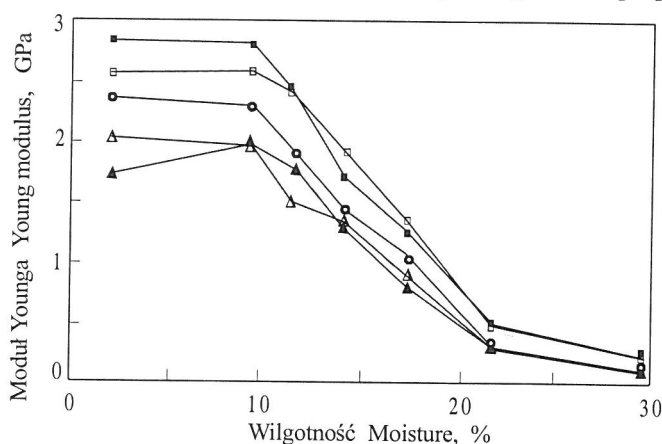
Fig. 54. The flow, no-flow condition [60]

2.5. Sprężystość

Sprężystość objętościowa materiału sypkiego ma bardzo duży wpływ na parcie przekazywane przez materiał sypki na konstrukcję zbiornika [80,79]. Do rozwiązywania praktycznych zagadnień przyjmowana jest najczęściej empiryczna, stała dla określonego zakresu ciśnienia, wartość modułu sprężystości złoża materiału sypkiego [115,123]. Polska Norma PN-B-03254 zaleca uzależniać wartość modułu sprężystości złoża ziarna od wielkości silosu, inaczej mówiąc od zakresu ciśnienia w złożu materiału sypkiego. W przypadku zbiornika o średnicy w zakresie 6-9 m norma zaleca, aby stosować wartość modułu sprężystości ziarna zbóż równą 10 MPa przy wysokości złoża 15 m oraz 20 MPa przy wysokości 30 m, a przy średnicy powyżej 9 m dwukrotnie wyższe wartości.

W przypadku materiałów sypkich pochodzenia roślinnego moduł sprężystości zależy silnie od wilgotności. Stasiak i Molenda [134] wykazali, że moduł sprężystości pszenicy wyznaczany w warunkach edometrycznego ściskania przy naporze pionowym 100 kPa i wilgotności ziarna 10% wynosi 22 MPa, a przy wilgotności 20% maleje do 11 MPa. Wyznaczony przez Frontczaka i Metzgera [36] w teście edometrycznego ściskania moduł sprężystości złoża ziarna kukurydzy przy naporze pionowym w zakresie 100- 240 kPa malał od 14 MPa do 6 MPa przy wzroście wilgotności od 7% do 23,5%.

Sprężystość złoża materiału sypkiego jest ściśle związana ze sprężystością ziaren tworzących ośrodek. Moduł sprężystości nasion poszczególnych gatunków roślin zmienia się w szerokim zakresie. W przypadku pszenicy moduł Younga wyznaczany dla walcowych próbek wyciętych precyzyjnie z endospermu ziarna mieści się w zakresie 0,2-3 GPa (rys. 55) zależnie od odmiany [43]. Moduł sprężystości zależy od zawartości białka, jak również od typu endospermu [72]. Dla ziaren szklistych jest o około 30% większy niż mączystych [47,144]. Wielokrotne nawilżanie i suszenie ziarna powoduje wewnętrzne pęknięcia struktury bielma ziarna, co obniża moduł sprężystości nawet o 40%. W przypadku ziarna kukurydzy moduł sprężystości maleje ze wzrostem wilgotności od 600 MPa przy wilgotności 10% do 50 MPa przy wilgotności 35% [77]. Moduł sprężystości nasion rzepaku o wilgotności kondycjonalnej wynosi około 40 MPa, a ze wzrostem wilgotności maleje do kilku MPa [135]. Moduł sprężystości nasion grochu mieści się w przedziale 100-400 MPa zależnie od odmiany i wilgotności [20].



Rys. 55. Zależność modułu sprężystości endospermu ziarna pszenicy od wilgotności [43]

Fig. 55. Young modulus of wheat endosperm as influenced by moisture content [43]

Bezpośrednie powiązanie modułu sprężystości objętościowej materiału sypkiego ze sprężystością ziaren ośrodka ze względu na komplikacje obliczeniowe i interpretacyjne należy do nielicznych. Walton [140] wyprowadził zależność efektywnego modułu sprężystości objętościowej losowego układu kul K na podstawie oddziaływań sprężystych zachodzących w obszarze elementarnego kontaktu:

$$K = K_o E^{\frac{2}{3}} |p|^{\frac{1}{3}} \quad (38)$$

gdzie:

$$K_o = \frac{1}{6} \left(\frac{3\phi^2 N_t^2}{\pi^2 (1 - \nu^2)^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\phi = \frac{4\pi R^3 n}{3V}$$

- E - moduł Younga,
- K_o - parametr materiałowy,
- n - liczba granul w objętości V ,
- N_t - średnia liczba kontaktów przypadająca na jedną granulę,
- p - ciśnienie,
- R - promień,
- V - objętość,
- ϕ - wskaźnik wypełnienia,
- ν - stała Poissona.

Do opisu zależności naprężenie-odkształcenie w obszarze elementarnego kontaktu ciał zastosował wzór Hertza powszechnie używany dla przypadku kontaktu sprężystej kuli z płaską, sztywną powierzchnią [90,138].

3. APARATURA I METODY

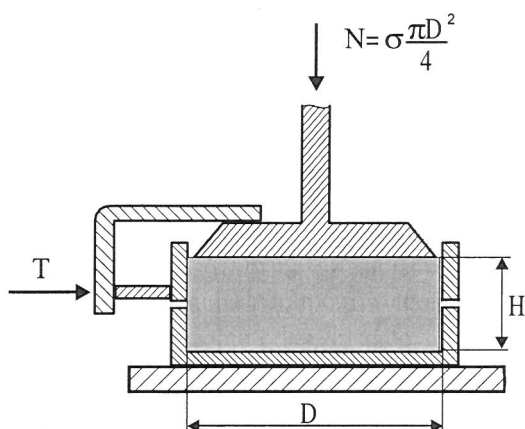
Określenie wytrzymałości materiału ziarnistego w większości przypadków sprowadza się do wyznaczenia warunku płynięcia materiału. Najczęściej wystarczająco dokładne jest kryterium wytrzymałości Mohra-Coulomba. Do jego wyznaczania opracowano wiele metod pomiarowych wykorzystujących różnego typu aparaty ścinające [52,121,124,125,126,136]. Można tu rozróżnić aparaty pośredniego i bezpośredniego ścinania. W aparatach bezpośredniego ścinania sama konstrukcja determinuje położenie strefy ścinania, zaś w aparatach pośredniego ścinania strefa ta nie jest wymuszona przez konstrukcję lecz formuje się zgodnie ze stanem naprężenia w próbce. W aparatach bezpośredniego ścinania największe naprężenie główne obraca się w czasie testu. W aparatach pośredniego ścinania kierunki naprężeń głównych pozostają w czasie trwania testu niezmiennie. W grupie aparatów bezpośredniego ścinania wyróżnić można urządzenia o ruchu postępowym i obrotowym. Aparaty pośredniego ścinania podzielić można na grupy dwuosiowych i trójosiowych. Wybór typu aparatu zależy od celu pomiarów, do

których ma być zastosowany. Najogólniej wyróżnić można trzy zakresy zastosowań: badania naukowe dla wyznaczenia zależności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem, praktyczne zagadnienia inżynierskie np. wymiarowanie silosów, projektowanie kanału wysypowego czy porównywanie kolejnych partii materiałów sypkich.

Do wyznaczania parametrów teoretycznych i empirycznych modeli opisujących zależność naprężenie-odkształcenie bardzo często stosowana jest metoda trójosiowego ściskania. Metodę tą zastosowali Zhang i in. [147,148,149] oraz Li i in. [83] do wyznaczenia parametrów sprężysto-plastycznych modeli do opisu zależności naprężenie-odkształcenie w ziarnie zbóż. Z kolei Ziolkowski i in. [150] zastosowali aparat trójosiowego ściskania jako kolumnę rezonansową do wyznaczenia modułu sprężystości postaciowej oraz charakterystyk tłumienia drgań w ziarnie pszenicy.

3.1. Aparat bezpośredniego ścinania

Jenike [60] w badaniach materiałów sypkich stosował aparat bezpośredniego ścinania o kołowym przekroju komory pomiarowej (rys. 56). Jest to pionowo ustawiony



Rys. 56. Aparat Jenikego
Fig. 56. Jenike shear cell

cylinder (o średnicy $D = 95$ mm) podzielony na dwa pierścienie prostopadle do osi. Dolny pierścień umocowany jest do podłoża. Badanym materiałem napełnia się cylinder i obciąża się siłą normalną N . Następnie górny pierścień przesuwają prostopadle do osi symetrii, rejestrując siłę styczną T . Dzieląc siłę normalną i styczną przez pole powierzchni przekroju poziomego próbki uzyskujemy naprężenie normalne σ :

$$\sigma = \frac{N}{S} \quad (39)$$

oraz naprężenie styczne τ w płaszczyźnie ścinania:

$$\tau = \frac{T}{S} \quad (40)$$

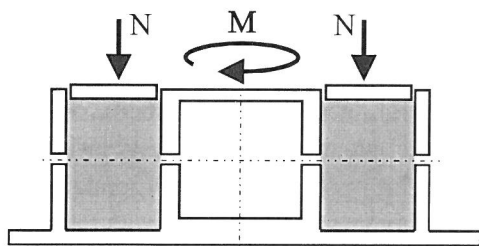
Wyniki otrzymane dla kilku różnych naprężeń normalnych naniesione na płaszczyznę Mohra wyznaczają krzywą $\tau = f(\sigma)$ zwaną przez Jenike'go graniczną krzywą płynięcia. Kąt zawarty między osią σ a styczną do krzywej jest kątem tarcia wewnętrznego φ . Według Mroza i in. [98] powyższa interpretacja będzie poprawna, jeśli wymuszona w aparacie płaszczyzna ścicia jest nachylona względem płaszczyzny większego naprężenia głównego σ_1 pod kątem $\pi/4 + \varphi/2$. Założenie to, przyjmowane dotychczas powszechnie w badaniach bezpośredniego ścinania jest jednak dyskusyjne, gdyż ścicie materiału nie musi zachodzić dokładnie wzdłuż tej płaszczyzny. Badania eksperymentalne i rozważania teoretyczne prowadzone przez wielu autorów [53,99,117,118,124] wykazały, że wokół zakładanej płaszczyzny poślizgu tworzy się obszar odkształcenia w kształcie soczewki. W materiale powstaje więc zróżnicowana gęstość. Na podstawie zmiany wysokości próbki można oszacować zmianę średniej gęstości materiału w czasie ścinania, co nie daje jednak pełnego obrazu rozkładu gęstości i pola deformacji w strefie poślizgu.

Na podobnej zasadzie działają stosowane w gruntoznawstwie i gleboznawstwie, aparaty bezpośredniego ścinania, w których przekrój poziomy komory pomiarowej ma kształt kwadratu lub prostokąta. Pomiaru wykonywane w aparacie o wymiarach próbki 60 x 60 x 50 mm, są uznawane w Polsce jako standardowe próby techniczne dla określenia wytrzymałości gruntów [114]. Do badań materiałów roślinnych stosowano aparaty o wymiarach próbki $D = 210$ i $H = 120$ mm [137].

W oparciu o wyniki doświadczeń uzyskane w aparacie bezpośredniego ścinania o wymiarach próbki 400 x 200 x 60 mm stwierdzono, że rolnicze materiały ziarniste w przeciwieństwie do gruntów, do osiągnięcia naprężenia granicznego, wymagają dużych - często dochodzących do 20% przekroju próbki - przemieszczeń. W czasie pomiaru następuje istotne zmniejszenie powierzchni czynnej ścinania, a ponadto zaznacza się silny wpływ wnikania krawędzi komory w próbkę. Przeprowadzone przez Hessego i Hoffmanna [52] badania rozkładu naprężeń normalnych w komorze pomiarowej przyrządu wykazały, że przy ścinaniu rozkład naprężeń nad dnem nie jest stały. Wady te utrudniają prawidłową interpretację uzyskanych wyników. Dzięki łatwości formowania próbek oraz prostej konstrukcji aparat jest nadal chętnie stosowany. Odmiany tego aparatu różnią się kształtem komory pomiarowej, sposobem napędu dwudzielnej skrzynki pomiarowej oraz stosowaniem różnego rodzaju przegród. Te niewielkie zmiany nie mają jednak decydującego wpływu na interpretację wyników.

3.2. Aparat pierścieniowy

Stosunkowo niewielkie (4-6 mm) przemieszczenie warstw próbki w aparatach z ruchem postępowym ogranicza ich zastosowanie do materiałów drobnoziarnistych. Dla materiałów gruboziarnistych zaprojektowano aparaty ścinające z ruchem obrotowym. Do badań właściwości mechanicznych materiałów roślinnych stosowane są często aparaty pierścieniowe [21,41,52,76,141, 146]. Różnią się one od omówionych poprzednio sposobem realizacji naprężeń ścinających, które w tym przypadku są wymuszane momentem skręcającym (rys. 57). Zapewniają one stałą wielkość powierzchni ścinania, ale nie eliminują niejednorodności stanu naprężeń w próbce, co wynika z zasady działania i zastosowanej konstrukcji [141].



Rys. 57. Aparat pierścieniowo-obrotowy

Fig. 57. Annular shear tester

Korzystne rozwiązanie stanowi aparat skrętny opisany przez Hessego i Hoffmanna [52]. Kanał ścinania w kształcie pierścienia kołowego ograniczony jest podstawą, pierścieniami nastawnymi wewnętrznymi i zewnętrznymi oraz tłokiem połączonym z kołem. Przez zmianę ustawienia tych pierścieni można uzyskać różne kształty próbek. Przy założeniu, że składowa

promieniowa naprężenia jest mała w porównaniu do składowej obwodowej, można przyjąć że w kanale pierścieniowym występuje płaski stan naprężenia. Konstrukcja aparatu umożliwia pomiar zmiany wysokości próbki w czasie ścinania.

Aparaty skrętne można uważać za aparaty bezpośredniego ścinania, w których wyeliminowano niejednorodność stanu naprężenia i odkształcenia na czołowej i tylnej ścianie próbki oraz ograniczenia drogi ścinania. Wymuszone płaszczyzny poślizgu tworzą się równoległe do powierzchni tłoka pierścieniowego. Jako skutek pierścieniowego kształtu próbek i momentu wymuszającego naprężenie, w płaszczyźnie ścinania należy rozpatrywać składową obwodową i promieniową naprężenia ścinającego. Przy ocenie wyników wykonanych aparatem skrętnym należy uwzględniać, że droga ścinania w wewnętrznej części próbki jest krótsza niż w części położonej dalej od środka pierścienia. Powoduje to, że stan graniczny jest uzyskiwany wcześniej w części próbki o większym promieniu; utrudnia interpretację i wymaga korekty wyników.

W literaturze dotyczącej badań ośrodków sypkich [99,136] wykazano, że aparaty o wymuszonej płaszczyźnie ścinania, wprowadzają znaczne niejednorod-

ności gęstości i naprężeń w badanym materiale. Otrzymanie rzetelnych wyników badań wymaga ścisłego przestrzegania ustalonych procedur pomiaru [141].

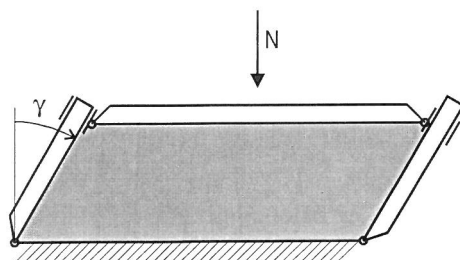
3.3. Aparat prostego ścinania

Roscoe [119] w swoich badaniach gruboziarnistego bezkohezyjnego piasku stosował aparat o ruchomych ścianach bocznych, przez które przekazywane było obciążenie ścinające, tzw. aparat prostego ścinania (rys. 58). Aparat ten adaptowany i zastosowany przez Schwedesa [125] do pomiarów drobnoziarnistych kohezyjnych proszków okazał się bardzo użyteczny również dla tej grupy materiałów. Najważniejszą zaletą tego urządzenia jest w pełni określony stan naprężenia. Próbkę w aparacie odkształca się tak samo jak odkształcałyby się nieograniczona jego ścianami. Strefa, w której struktura ośrodka podlega odkształceniu rozciąga się w tym przypadku na całą próbkę. Za pomocą badań rentgenowskich stwierdzono, że płaszczyzny poślizgu w aparacie prostego ścinania tworzą się równoległe do podstaw. Z wyników pomiarów można wyznaczyć równocześnie i niezależnie koła Mohra dla odkształcenia i naprężenia oraz położenie płaszczyzny poślizgu względem płaszczyzny największego naprężenia głównego.

Badania ziarna zbóż przeprowadzone na tego typu aparacie przez Hessego i Hoffmanna [52] wykazały, że przy długich drogach ścinania, wymaganych dla roślinnych materiałów sypkich, występują znaczne nierównomierności rozkładu naprężenia ściskającego podobne do obserwowanych w aparacie bezpośredniego ścinania. Zdaniem autorów aparat prostego ścinania może mieć bardzo ograniczony zakres stosowania przy badaniu tego typu materiałów. Cechą niekorzystną tego aparatu jest również brak możliwości realizowania dowolnych schematów obciążeń badanej próbki [136].

3.4. Aparat trójosiowego ściskania

Wad występujących w omówionych urządzeniach pomiarowych bezpośredniego ścinania nie mają aparaty, w których naprężenia w próbce ośrodka zadawane są w sposób niezależny z dwu, lub trzech wzajemnie prostopadłych kierunków. Do urządzeń tego typu należą aparaty dwuosiowego i trójosiowego ściskania [11,126].



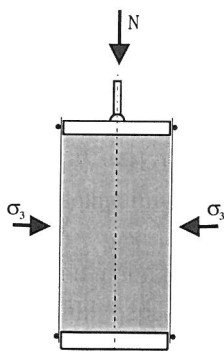
Rys. 58. Aparat prostego ścinania

Fig. 58. Simple shear tester

W aparacie dwuosowego ściskania próbka ma kształt sześcianu lub prostopadłościanu [3,48]. Wysokość próbki w kierunku pionowym jest stała, ograniczona dwoma poziomymi ścianami aparatu. W poziomych kierunkach x i y próbka ograniczona jest ścianami w postaci prostokątnych stalowych płyt łożyskowanych w prowadnicach. Każda para przeciwległych pionowych ścian może przemieszczać się ku wewnątrz próbki napędzana przez popychacze poruszające się ze stałą prędkością. W trakcie obciążania pionowa oś symetrii utrzymywana jest w stałym położeniu. Aparat dwuosowego ściskania nie znalazł szerszego zastosowania prawdopodobnie ze względu na skomplikowaną i kosztowną konstrukcję mechaniczną, przy walorach podobnych do prostszego aparatu trójosiowego.

Aparat trójosiowego ściskania jest powszechnie stosowany w badaniach mechaniki gruntów i gleboznawstwie [11,120,139]. Wyniki uzyskane w tym aparacie stanowią podstawę do określania wytrzymałości gruntu.

Schemat aparatu przedstawiono na rysunku 59. Osiowo-symetryczny stan naprężenia wytwarzany jest poprzez umieszczenie walcowej próbki badanego ośrodka (w osłonce gumowej) w komorze ciśnieniowej oraz obciążenie próbki siłą



Rys. 59. Aparat trójosiowego ściskania

Fig. 59. Triaxial compression tester

N wzdłuż jej osi symetrii. Naprężenie σ_1 jest sumą ciśnienia hydrostatycznego σ_3 oraz naprężenia wynikającego z przyłożonej siły N . Aparat trójosiowego ściskania umożliwia realizowanie różnych schematów obciążania próbki, co pozwala wyznaczyć wiele stałych materiałowych ośrodka [14,83,147,149]. W przypadku wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego metodą trójosiowego ściskania w praktyce rejestrowany jest przebieg naprężenia σ_1 w miarę wzrostu odkształcenia próbki ε_1 wzdłuż jej osi symetrii przy stałej wartości naprężenia σ_3 . Odkształcenie ε_1 kontynuowane

jest do momentu uzyskania maksymalnej bądź ustalonej wartości naprężenia σ_1 lub też do momentu zaobserwowania wyraźnej płaszczyzny poślizgu. Kąt tarcia wewnętrznego wyznaczany jest z nachylenia obwiedni kół Mohra reprezentujących stan naprężenia w trakcie płynięcia ośrodka dla kilku różnych wartości naprężenia σ_3 . Pomiar poziomu cieczy w kapilarze połączonej z komorą trójosiowego ściskania umożliwia wyznaczenie odkształcenia objętościowego ε_v .

Próbka materiału w aparatach stosowanych w gruntoznawstwie ma kształt cylindryczny o stosunku średnicy do wysokości równym 1:2. W powszechnie stoso-

wanych w Polsce aparatach bada się próbki gruntu o średnicy 36 mm i wysokości 72 mm. W badaniach naukowych Bishop i Henkel [11] stosowali aparat o średnicy próbki 100 mm, a Horabik i Molenda [55] także próbki o wymiarach 150 x 300 mm. Ze wzrostem wielkości próbki przebiegi eksperymentalne są coraz gładzsze [13]. Do badania hydrostatycznego zagęszczania ośrodka lepsze okazały się próbki o większej niż 1:2 wartości stosunku średnicy do wysokości [45]. Większość badań prowadzonych w aparacie trójosiowego ściskania dotyczy gruntów spoistych, chociaż aparat ten jest coraz częściej stosowany do badania roślinnych materiałów ziarnistych.

Wielu autorów podkreśla zalety metody trójosiowego ściskania w stosunku do innych metod pomiarowych. Szczególnie istotny jest fakt, że powierzchnia poślizgu nie jest wymuszana przez konstrukcję aparatu, a formuje się odpowiednio do właściwości materiału i panującego w nim stanu naprężenia. W opinii Schwedesa [126] jedynie aparat prostego ścinania, aparat dwuosiowy i aparat trójosiowy mogą być stosowane w badaniach naukowych. Tylko te urządzenia umożliwiają pełny opis stanu naprężenia i odkształcenia w próbce.

3.5. Właściwości mechaniczne wybranych surowców spożywczych wyznaczane według najnowszych norm

Standardowe procedury wyznaczania właściwości mechanicznych materiałów sypkich poza dziedziną mechaniki gruntów znajdujemy w normach projektowania silosów na materiały sypkie. Do lat dziewięćdziesiątych w normach posługiwano się stabelaryzowanymi wartościami parametrów. Autorzy norm mieli przy tym świadomość, że skojarzenie nazwy materiału z wartością parametru może dawać błędne rezultaty obliczeń. I tak autorzy ACI 313-91 [1] ostrzegają, że podstawowe parametry projektowe: dla obliczeń naporu - gęstość, kąt tarcia wewnętrznego i kąt tarcia o ścianę zależą od stanu materiału oraz od warunków eksploatacji silosu. Schwedes [126] zaleca, aby jeśli możliwe wyznaczać parametry dla każdego przypadku projektowania z materiałem uczestniczącym w procesie i w warunkach tego procesu. Wydaje się, że taka tendencja przeważa w ostatnich nowelizacjach norm projektowania. Metody wyznaczania właściwości mechanicznych zawarte są w dodatkach do najnowszych norm ISO 11697: 1995(E), Eurocode, 1996; AS 3774-1996 (australijska) oraz w projekcie PN-B-03254 [114]. Projekty w tym fragmencie powołują się na wcześniejszą rekomendację EFCE [25]. Członkowie Grupy Roboczej Europejskiego Stowarzyszenia Inżynierii Chemicznej (EFCE) zalecili dla wyznaczania parametrów projektowych metodę

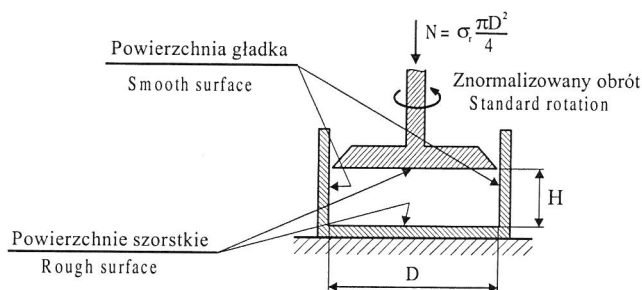
bezpośredniego ścinania zwaną też metodą Jenike. Niżej przedstawiono procedury pomiarowe za ISO 11697:1995(E).

Przygotowanie próbki

Próbki powinny ściśle odpowiadać materiałowi, jaki będzie przechowywany z uwzględnieniem takich parametrów jak: skład cząstek, granulacja, zawartość wilgoci, temperatura, czas po produkcji, technologia produkcji itd. W badaniach powinno uwzględniać się także wyznaczenie zakresu zmienności parametrów jako skutków zmienności parametrów drugorzędnych.

Gęstość materiału skonsolidowanego

Gęstość materiału jest podstawowym parametrem dla obliczeń naporu w silosie. Dla wielu materiałów gęstość zależy od metody napełniania silosu i poziomu naporu. Gęstość potrzebna dla obliczeń projektowych nie musi być równa tej stosowanej w handlu, czy w naukowym opisie materiału. Dla celów projektowania wyznacza się gęstość ważąc próbkę i dzieląc wynik przez objętość próbki po konsolidacji. Tak wyznaczona gęstość służy do określenia górnej granicy obciążeń. Próbkę materiału umieszcza się w cylindrycznym pojemniku (rys. 60) o średnicy D , która jest co najmniej 40 razy większa od maksymalnego wymiaru cząstki. Wysokość zagęszczonej próbki H zawiera się w przedziale od $0,3D$ do $0,4D$. Po napełnieniu pojemnika bez wibracji górna powierzchnia próbki jest obciążana siłą normalną N wytwarzając naprężenie odniesienia σ_r (odpowiadające maksymalnemu naporowi pionowemu p_v , albo równe 100 kPa). Następnie górna płyta aparatu jest trzykrotnie obracana o 10° w prawo i lewo w celu dodatkowej konsolidacji próbki.



Rys. 60. Urządzenie do określania ciężaru objętościowego γ [58]

Fig. 60. A device for determination of the bulk weight density γ [58]

Norma Eurocode 1 zaleca, aby dla potrzeb obliczania naporu materiału sypkiego stosować ciężar objętościowy ($\gamma = \rho g$) wyznaczany bezpośrednio z ciężaru i objętości zagęszczonej próbki materiału sypkiego. Typowe wartości ciężaru objętościowego sypkich surowców spożywczych zalecane przez normę Eurocode 1 do stosowania przy projektowaniu silosów na materiały sypkie zamieszczono w tabeli 16.

Tabela 16. Ciężar objętościowy γ skonsolidowanych materiałów sypkich według normy Eurocode 1 i ISO 11697

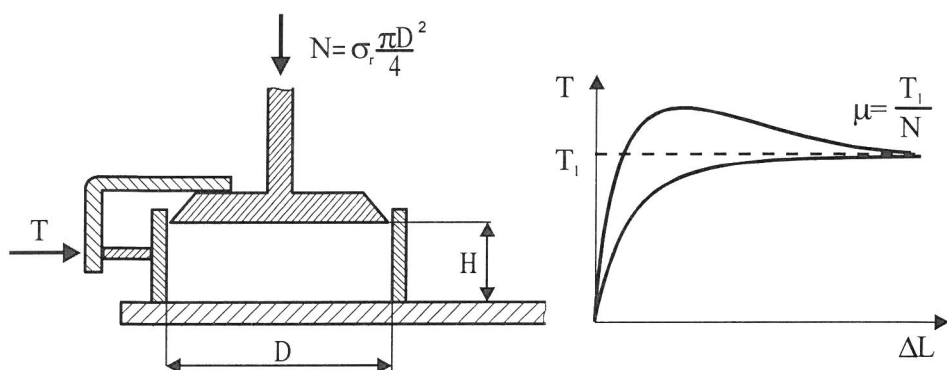
Table 16. Bulk weight density γ of consolidated granular materials according to the Eurocode 1 and ISO 11697 standards

Materiał sypki Granular material	Ciężar objętościowy złoza materiału sypkiego $\gamma = \rho g$
	Bulk density of granular material (kN m ⁻³)
Cukier Sugar	9,5
Jęczmień Barley	8,5
Kukurydza Maiz	8,5
Mąka Meal	7,0
Pszenica Wheat	9,0

Współczynnik tarcia o ścianę (do wyznaczania obciążeń)

Zasada pomiaru jest identyczna jak w przypadku kąta tarcia o ścianę. Pomiar (ścięcie próbki) prowadzi się jednak przy wyższym poziomie obciążenia – odpowiadającym naporowi na ścianę. Stosuje się aparat bezpośredniego ścinania o średnicy D nie mniejszej niż 40 krotność największego wymiaru cząstki i o wysokości H w zakresie od $0,15D$ do $0,20D$. Przed ścinaniem materiał podlega konsolidacji jak w przypadku wyznaczania gęstości skonsolidowanej. Siła normalna N ma wartość jaką wytwarza naprężenie odniesienia σ_r równe maksymalnej wartości naporu poziomego p_h , albo 50 kPa. Następnie włączany jest napęd i komora aparatu przesuwana się ruchem prostoliniowym z prędkością ok. $0,4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Współczynnik tarcia μ wyznaczany jest na podstawie stabilnej wartości siły tarcia F_t uzyskiwanej przy większym przemieszczeniu (rys. 61).

Norma Eurocode 1 podaje orientacyjne wartości współczynnika tarcia o stal oraz beton dla pięciu typowych sypkich surowców spożywczych (tab. 17). W rzeczywistości współczynnik tarcia zmienia się w dużo szerszym zakresie. Norma zaleca więc wyznaczać współczynnik tarcia dla poszczególnych realizacji technicznych według ściśle określonej procedury pomiaru.



Rys. 61. Schematy procedury wyznaczania współczynnika tarcia o ścianę silosu według normy Eurocode 1 i ISO 11697

Fig. 61. Schematic diagram of experimental procedure for determination of the wall friction coefficient according to the Eurocode 1 and ISO 11697 standards

Tabela 17. Współczynnik tarcia sypkich surowców spożywczych według normy Eurocode 1
Table 17. Friction coefficient of granular food materials according to the Eurocode 1

Materiał Material	Współczynnik tarcia o stal Steel friction coefficient	Współczynnik tarcia o beton Concrete friction coefficient
Jęczmień Barley	0,35	0,45
Mąka Meal	0,30	0,40
Kukurydza Maiz	0,30	0,40
Cukier Sugar	0,45	0,55
Pszenica Wheat	0,30	0,40

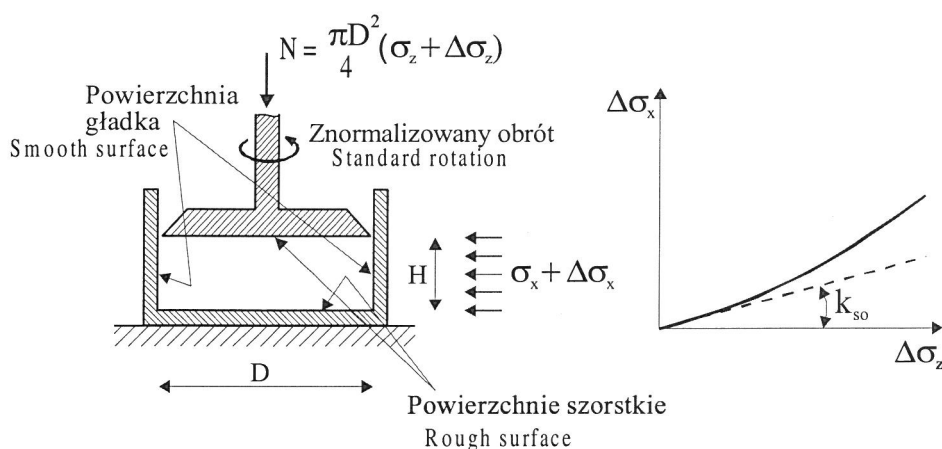
Kąt tarcia o ścianę dla zapewnienia wypływu

Pomiar wykonywany jest w aparacie bezpośredniego ścinania. Próbką materiału sypkiego ślizga się po powierzchni odpowiadającej materiałowi ściany silosu z prędkością około $0,4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Siła normalna jest niewielka - taka, aby poziom naporu odpowiadał temu, jaki występuje w sąsiedztwie otworu wysywowego silosu.

Iloraz naporu poziomego do pionowego

Wartość tego parametru otrzymuje się w drodze bezpośredniego pomiaru, albo oblicza z empirycznej zależności od kąta tarcia wewnętrznego.

W przypadku pomiaru obciążenie pionowe jest przykładane do górnej powierzchni próbki. Mierzony jest napór poziomy i pionowy, a z ich wartości obliczany iloraz naporu (k_{s0} wg PN-B-03254). Aparat pomiarowy i procedura wstępnego przygotowania próbki są identyczne jak w przypadku wyznaczania gęstości materiału skonsolidowanego. Z pomiaru wyznaczany jest przebieg zależności $\Delta\sigma_2(\Delta\sigma_1)$, i dalej iloraz naporu k , co ilustruje rysunek 62.



Rys. 62. Metoda wyznaczania ilorazu naporu według normy Eurocode 1

Fig. 62. Method for determination of the pressure ratio according to the Eurocode 1

Wartość ilorazu naporu k dla warunków napełniania i przechowywania (spoczynku) można także wyliczyć z empirycznej zależności k od kąta tarcia wewnętrznego φ :

$$k = 1,1 (1 - \sin\varphi) \quad (41)$$

Typowe wartości ilorazu naporu sypkich surowców spożywczych zalecane przez normę Eurocode 1 do stosowania przy projektowaniu silosów na materiały sypkie zamieszczono w tabeli 18.

Tabela 18. Iloraz naporu sypkich surowców spożywczych według normy Eurocode 1
Table 18. Pressure ratio of granular food materials according to the Eurocode 1

Materiał Material	Iloraz naporu k k pressure ratio
Jęczmień Barley	0,55
Mąka Meal	0,40
Kukurydza Maiz	0,50
Cukier Sugar	0,50
Pszenica Wheat	0,55

Parametry wytrzymałości - φ , δ i c

Przyjmuje się, że wytrzymałość materiału sypkiego można wyrazić za pomocą trzech parametrów: kąta tarcia wewnętrznego próbki - φ , efektywnego kąta tarcia wewnętrznego - δ oraz kohezji - c (rys. 63). Warunek plastyczności wyznaczany jest metodą bezpośredniego ścinania. Średnica komory aparatu D jest co najmniej 40 razy większa od wymiaru największego ziarna, zaś jej wysokość zawiera się w przedziale od $0,3D$ do $0,4D$. Wstępne przygotowanie próbki, napór odniesienia σ_r i prędkość ścinania są identyczne jak dla opisanego już przypadku wyznaczania współczynnika tarcia o ścianę. Do obliczenia parametrów c , φ i δ przyjmuje się maksymalną wartość naporu ścinania τ_r , jaka wystąpiła przed osiągnięciem poziomego przemieszczenia komory aparatu $\Delta L = 0,05D$. Zaleca się wykonanie dwu testów w warunkach jak przedstawiono w tabeli 19.

Wartości wyznaczanych parametrów oblicza się korzystając z zależności:

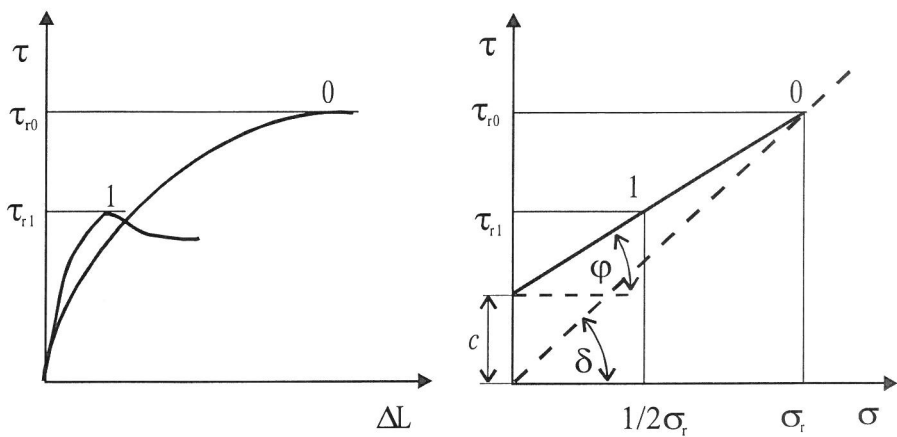
$$\delta = \arctan \frac{\tau_{r0}}{\sigma_r} \quad (42)$$

$$\varphi = \arctan \frac{\tau_{r0} - \tau_{r1}}{0,5\sigma_r} \quad (43)$$

$$c = \sigma_r (\tan \delta - \tan \varphi) \quad (44)$$

Materiały bezkohezyjne (dla których $c = 0$) są charakteryzowane tylko przez kąt tarcia wewnętrznego φ , równy w tym przypadku efektywnemu kątowi tarcia wewnętrznego δ .

Norma zaleca test trójosiowego ściskania jako alternatywną metodę wyznaczania parametrów wytrzymałościowych materiałów ziarnistych.



Rys. 63. Wyznaczanie parametrów wytrzymałości materiału sypkiego według normy Eurocode 1
Fig. 63. Determination of shear strength parameters according to the Eurocode 1

Tabela 19. Procedura wyznaczania parametrów wytrzymałości materiału sypkiego
Table 19. Procedure of determination of strength parameters of granular solids

Pomiar Measurement	Napór konsolidacji Consolidation pressure	Napór normalny podczas pomiaru Normal pressure during the measurement	Napężenie styczne Tangential stress
1	σ_r	σ_r	τ_{r0}
2	σ_r	$0,5\sigma_r$	τ_{r1}

4. BADANIA WŁASNE

4.1. Materiał

Pomiarami objęto nasiona siedmiu gatunków roślin: fasoli odmiany Jubilatka, Grochu odmiany Nike oraz Piast, kukurydzy odmiany Perłowa, łubinu odmiany Mireka, peluszek odmiany Perkoz, pszenicy odmiany Korweta oraz wyki odmiany Szelejewska o pięciu poziomach wilgotności: 10, 12, 14, 16 i 18%. Wyjściowa wilgotność nasion była zbliżona do 10%. Wyższe poziomy wilgotności uzyskiwano dolewając odpowiednią ilość wody destylowanej do 5 kg próbek nasion o wilgotności wyjściowej. Zamknięte w szczelnym pojemniku na czas 24 godz. próbki nasion okresowo mieszano w celu równomiernego rozprowadzenia wody. Po okresie stabilizacji wilgotności rozpoczynano pomiary właściwości mechanicznych nasion. Wilgotność nasion określano metodą suszarkową.

4.2. Zastosowane procedury pomiarowe

Pomiar współczynnika tarcia zewnętrznego

Współczynnik tarcia zewnętrznego wyznaczano w aparacie Jenikego zgodnie z metodyką pomiaru zalecaną przez normę Eurocode 1. Średnica komory pomiarowej wynosiła 210 mm, a wysokość warstwy materiału sypkiego 40 mm. Wewnętrzna powierzchnia ścian bocznej komory pomiarowej była gładka, natomiast płyty górnej szorstka. W celu minimalizacji drgań ciernych prędkość przemieszczenia wynosiła $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Pomiary wykonywano przy pięciu wartościach naporu normalnego σ_n : 20, 30, 40, 50 oraz 60 kPa. Taki zakres naporu poziomego na ścianę silosu powstaje przy wysokości słupa materiału rzędu 15 m. Siłę styczną mierzono za pośrednictwem czujnika siły o zakresie 2 kN i dokładności $\pm 4 \text{ N}$. Określano współczynnik tarcia o blachę stalową ocynkowaną. Przed każdym pomiarem powierzchnię blachy przecierano czterochlorkiem węgla w celu usunięcia substancji organicznej osadzającej się w trakcie procesu tarcia. Każdy pomiar wykonywano w trzech powtórzeniach.

Pomiar kąta tarcia zewnętrznego

Kąt tarcia zewnętrznego wyznaczano wykorzystując aparat uchylny do wyznaczania kąta zsypania (rys. 64). W celu zwiększenia naporu normalnego powyżej wartości wynikającej z ciężaru własnego warstwy nasion, materiał otoczony kwadratową ramką o boku 20 cm obciążano poprzez sztywną pokrywę, a następnie

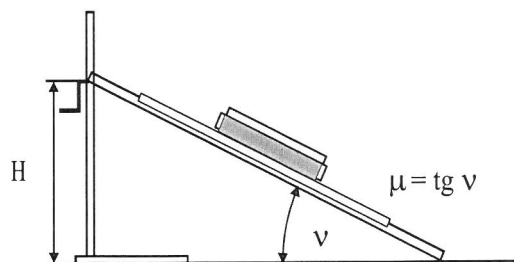
zwiększano kąt pochylenia powierzchni względem poziomu rejestrując moment, w którym rozpoczyna się ruch materiału względem powierzchni. Kąt tarcia o blachę stalową ocynkowaną wyznaczano przy następujących wartościach naporu normalnego σ_n : 0,5, 1, 1,5, 2 oraz 2,5 kPa. Podobnie jak w przypadku wyznaczania współczynnika tarcia zewnętrznego przed każdym pomiarem powierzchnię blachy przecierano czterochlorkiem węgla. Każdy pomiar wykonywano w trzech powtórzeniach.

Pomiar kąta tarcia wewnętrznego i kohezji

Pomiary kąta tarcia wewnętrznego φ , efektywnego kąta tarcia wewnętrznego δ i kohezji c przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania Jenikego o średnicy 210 mm zgodnie z uproszczoną metodą pomiaru zalecaną przez normę Eurocode 1, omówioną w poprzednim rozdziale. Prędkość przemieszczenia wynosiła $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Siłę styczną mierzono czujnikiem o zakresie 2 kN i dokładności $\pm 4 \text{ N}$. W celu określenia wpływu naporu konsolidacji na wartość wyznaczanych parametrów pomiary wykonywano przy czterech wartościach naprężenia odniesienia σ_r : 40, 60, 80 i 100 kPa. Dla każdego naprężenia odniesienia σ_r wykonywano dwa różne testy ścinania. W pierwszym próbka była konsolidowana i ścinana przy tej samej wartości naprężenia normalnego. W drugim próbkę konsolidowano zgodnie ze standardową procedurą przy naprężeniu odniesienia σ_r , a następnie ścinano przy naprężeniu normalnym równym połowie naprężenia odniesienia. W celu wytworzenia zadanej wartości naprężenia normalnego próbkę obciążano za pośred-

nictwem siłownika pneumatycznego [54]. Każdy pomiar wykonywano w trzech powtórzeniach.

W przypadku zastosowanej wielkości komory pomiarowej stosunek średnicy próbki D do średniego wymiaru ziarna był zbliżony do wymienianej przez normy granicznej wartości 40. Przy tej wartości stosunku droga ścinania, niezbędna dla uzyskania ustalonej wartości naprężenia stycznego, jest stosun-



Rys. 64. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania kąta tarcia o ścianę silosu

Fig. 64. Scheme of the experimental set for determination of the angle of wall friction

kowo długa i czasami przekracza graniczną wartość 5% zalecaną przez normy. Aby jednak uniknąć konieczności nadmiernego powiększania rozmiaru próbki i zwią-

zanych z tym trudności technicznych przeprowadzenia testu, powiększono graniczną wartość stosunku przemieszczenia $\Delta L/D$ z zalecanej przez normę wartości 0,05 do 0,1. Jak wykazały badania Łukaszuka i Horabika [85] wprowadzenie takiej modyfikacji nie powoduje istotnego błędu pomiaru, a uzyskiwane wartości kąta tarcia wewnętrznego pokrywają się z wartościami wyznaczonymi metodą trójosiowego ściskania przy wilgotności nasion nie przekraczającej 20%.

Pomiar parametrów sprężystości

Moduł sprężystości E_m oraz stałą Poissona ν wyznaczano w teście jednoosiowego ściskania cylindrycznej próbki materiału sypkiego. Wykorzystywano w tym celu początkowy, liniowy odcinek zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_z(\varepsilon_z)$ podczas procesu odciażania materiału (rys. 65). W tej fazie procesu odciażania materiału występuje jedynie liniowa deformacja sprężysta w kierunku osi z [97,123]:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_m} \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) \quad (45)$$

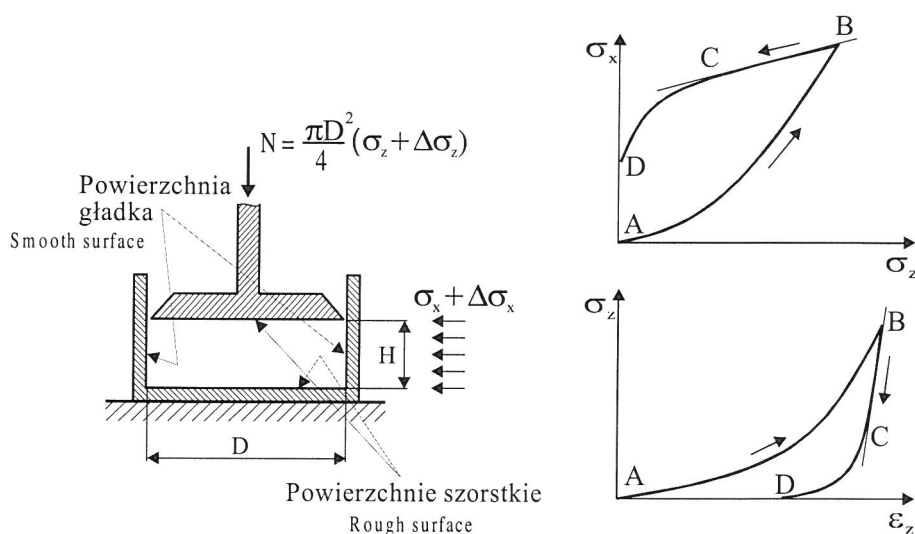
Relację pomiędzy naprężeniem poziomym σ_x i pionowym σ_z określa zależność:

$$\sigma_x = \sigma_z \frac{\nu}{1-\nu}. \quad (46)$$

Stałą Poissona ν wyznaczano z liniowej aproksymacji zależnością (32) początkowego odcinka krzywej $\sigma_x(\sigma_z)$ (odcinek BC na rys. 65) reprezentującej proces odciażania próbki materiału. W celu wyznaczenia modułu sprężystości E_m eksperymentalny przebieg $\sigma_z(\varepsilon_z)$ w początkowym, liniowym odcinku procesu odciażania (odcinek BC na rys. 65) aproksymowano zależnością liniową (31) po uprzednim wyznaczeniu stałej Poissona ν .

Pomiary przeprowadzono w aparacie jednoosiowego ściskania o średnicy 0,21 m i wysokości 0,17 m. W celu pomiaru naporu poziomego ściana boczna składała się z dwóch identycznych części złączonych ze sobą wzdłuż tworzącej walca przy pomocy czterech czujników siły o zakresie pomiarowym 5 kN i dokładności ± 10 N, po dwa na każdej stronie [56]. Jedna z połówek ściany bocznej posiadała możliwość ruchu w kierunku poziomym w zakresie odkształceń czujników siły wynikających z naporu materiału sypkiego. Dno i płyta górna komory pomiarowej przenosiły napór pionowy poprzez czujniki siły o zakresie pomiarowym 20 kN

i dokładności $\pm 40\text{N}$. Próbkę materiału obciążano za pośrednictwem maszyny wytrzymałościowej Instron. Wewnętrzna powierzchnia ściany bocznej komory była gładka, natomiast dna i płyty górnej szorstka. Wysokość zagęszczonej próbki H zawierała się w przedziale 60-80 mm. Przeszyczenie mierzono indukcyjnym czujnikiem przeszczenia o zakresie 50 mm i dokładności $\pm 0,05\text{ mm}$. Prędkość przeszczenia pokrywy komory pomiarowej wynosiła $0,35\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Materiał zagęszczano do momentu uzyskania naprężenia pionowego σ_z równego 100 kPa, po czym rozpoczynano proces odciązania. Każdy pomiar wykonywano w trzech powtórzeniach.



Rys. 65. Metoda wyznaczania stałych sprężystości materiałów sypkich

Fig. 65. Method for determination of elasticity parameters of granular materials

4.3. Wyniki badań własnych

Tabela 20. Średnie wartości ($\pm$ odch. st.) współczynnika tarcia μ nasion o wilgotności w zakresie 10-18% o blachę ocynkowaną wyznaczone przy naporze normalnym w zakresie 20-60 kPa.

Table 20. Mean values ($\pm$ St. Dev.) of the friction coefficient μ of seeds at the moisture content of 10-18% against galvanized steel determined at the normal pressure of 20-60 kPa

Wilgot- ność Moisture (%)	Napór normalny Normal pressure (kPa)	Współczynnik tarcia		Friction coefficient	
		Fasola Jubilatka Jubilatka bean	Groch Nike Nike pea	Groch Piast Piast pea	Kukurydza Perłowa Perłowa maize
10	20	0,126 $\pm$ 0,002	0,119 $\pm$ 0,012	0,182 $\pm$ 0,006	0,208 $\pm$ 0,026
	30	0,146 $\pm$ 0,007	0,155 $\pm$ 0,002	0,158 $\pm$ 0,001	0,191 $\pm$ 0,011
	40	0,166 $\pm$ 0,012	0,171 $\pm$ 0,002	0,165 $\pm$ 0,003	0,174 $\pm$ 0,007
	50	0,188 $\pm$ 0,008	0,171 $\pm$ 0,002	0,176 $\pm$ 0,005	0,181 $\pm$ 0,003
	60	0,187 $\pm$ 0,004	0,172 $\pm$ 0,003	0,176 $\pm$ 0,008	0,170 $\pm$ 0,006
12	20	0,154 $\pm$ 0,017	0,262 $\pm$ 0,004	0,269 $\pm$ 0,003	0,186 $\pm$ 0,013
	30	0,173 $\pm$ 0,008	0,263 $\pm$ 0,002	0,282 $\pm$ 0,009	0,288 $\pm$ 0,009
	40	0,179 $\pm$ 0,008	0,267 $\pm$ 0,004	0,294 $\pm$ 0,003	0,278 $\pm$ 0,006
	50	0,187 $\pm$ 0,004	0,269 $\pm$ 0,004	0,294 $\pm$ 0,002	0,253 $\pm$ 0,004
	60	0,186 $\pm$ 0,005	0,269 $\pm$ 0,002	0,294 $\pm$ 0,001	0,264 $\pm$ 0,005
14	20	0,301 $\pm$ 0,014	0,205 $\pm$ 0,024	0,329 $\pm$ 0,029	0,330 $\pm$ 0,007
	30	0,357 $\pm$ 0,005	0,254 $\pm$ 0,003	0,353 $\pm$ 0,002	0,334 $\pm$ 0,010
	40	0,358 $\pm$ 0,007	0,238 $\pm$ 0,008	0,320 $\pm$ 0,018	0,336 $\pm$ 0,005
	50	0,351 $\pm$ 0,002	0,241 $\pm$ 0,005	0,319 $\pm$ 0,022	0,339 $\pm$ 0,007
	60	0,350 $\pm$ 0,005	0,252 $\pm$ 0,007	0,316 $\pm$ 0,018	0,335 $\pm$ 0,000
16	20	0,130 $\pm$ 0,031	0,202 $\pm$ 0,021	0,204 $\pm$ 0,008	0,171 $\pm$ 0,003
	30	0,173 $\pm$ 0,007	0,249 $\pm$ 0,013	0,211 $\pm$ 0,002	0,174 $\pm$ 0,009
	40	0,185 $\pm$ 0,010	0,265 $\pm$ 0,005	0,217 $\pm$ 0,005	0,200 $\pm$ 0,011
	50	0,197 $\pm$ 0,010	0,266 $\pm$ 0,004	0,217 $\pm$ 0,002	0,207 $\pm$ 0,001
	60	0,194 $\pm$ 0,006	0,260 $\pm$ 0,009	0,222 $\pm$ 0,005	0,220 $\pm$ 0,006
18	20	0,177 $\pm$ 0,026	0,143 $\pm$ 0,011	0,165 $\pm$ 0,010	0,190 $\pm$ 0,007
	30	0,249 $\pm$ 0,007	0,142 $\pm$ 0,002	0,208 $\pm$ 0,010	0,196 $\pm$ 0,004
	40	0,256 $\pm$ 0,016	0,147 $\pm$ 0,002	0,216 $\pm$ 0,009	0,201 $\pm$ 0,002
	50	0,257 $\pm$ 0,017	0,154 $\pm$ 0,006	0,232 $\pm$ 0,021	0,198 $\pm$ 0,001
	60	0,290 $\pm$ 0,012	0,155 $\pm$ 0,006	0,222 $\pm$ 0,020	0,196 $\pm$ 0,003

Tabela 21. Średnie wartości ($\pm$ odch. st.) współczynnika tarcia μ nasion o wilgotności w zakresie 10-18% o blachę ocynkowaną wyznaczane przy naporze normalnym w zakresie 20-60 kPa.

Table 21. Mean values ($\pm$ St. Dev.) of the friction coefficient μ of seeds at the moisture content of 10-18% against galvanized steel determined at the normal pressure of 20-60 kPa

Wilgot- ność Moisture (%)	Napór normalny Normal pressure (kPa)	Współczynnik tarcia		Friction coefficient	
		Łubin Mirela Mirela Lupine	Peluszka Perkoz Perkoz field pea	Pszenica Korweta Korweta wheat	Wyka Szelejewska Szelejewska wetch
10	20	0,103 $\pm$ 0,011	0,153 $\pm$ 0,003	0,115 $\pm$ 0,012	0,182 $\pm$ 0,009
	30	0,120 $\pm$ 0,018	0,189 $\pm$ 0,004	0,135 $\pm$ 0,006	0,188 $\pm$ 0,005
	40	0,126 $\pm$ 0,003	0,205 $\pm$ 0,007	0,148 $\pm$ 0,003	0,176 $\pm$ 0,023
	50	0,142 $\pm$ 0,005	0,203 $\pm$ 0,001	0,154 $\pm$ 0,003	0,194 $\pm$ 0,006
	60	0,161 $\pm$ 0,003	0,208 $\pm$ 0,004	0,158 $\pm$ 0,003	0,192 $\pm$ 0,006
12	20	0,211 $\pm$ 0,004	0,268 $\pm$ 0,017	0,220 $\pm$ 0,007	0,258 $\pm$ 0,005
	30	0,212 $\pm$ 0,001	0,294 $\pm$ 0,012	0,227 $\pm$ 0,004	0,269 $\pm$ 0,002
	40	0,216 $\pm$ 0,004	0,306 $\pm$ 0,002	0,228 $\pm$ 0,004	0,270 $\pm$ 0,001
	50	0,219 $\pm$ 0,001	0,287 $\pm$ 0,004	0,230 $\pm$ 0,006	0,278 $\pm$ 0,017
	60	0,210 $\pm$ 0,004	0,286 $\pm$ 0,010	0,241 $\pm$ 0,003	0,270 $\pm$ 0,001
14	20	0,242 $\pm$ 0,023	0,317 $\pm$ 0,029	0,189 $\pm$ 0,012	0,162 $\pm$ 0,013
	30	0,300 $\pm$ 0,014	0,335 $\pm$ 0,007	0,215 $\pm$ 0,002	0,201 $\pm$ 0,004
	40	0,312 $\pm$ 0,004	0,343 $\pm$ 0,008	0,213 $\pm$ 0,002	0,197 $\pm$ 0,008
	50	0,312 $\pm$ 0,002	0,345 $\pm$ 0,004	0,215 $\pm$ 0,007	0,198 $\pm$ 0,007
	60	0,323 $\pm$ 0,006	0,351 $\pm$ 0,005	0,209 $\pm$ 0,008	0,202 $\pm$ 0,006
16	20	0,201 $\pm$ 0,008	0,247 $\pm$ 0,004	0,133 $\pm$ 0,008	0,198 $\pm$ 0,003
	30	0,214 $\pm$ 0,006	0,293 $\pm$ 0,014	0,145 $\pm$ 0,016	0,213 $\pm$ 0,006
	40	0,227 $\pm$ 0,004	0,309 $\pm$ 0,005	0,162 $\pm$ 0,003	0,239 $\pm$ 0,006
	50	0,198 $\pm$ 0,012	0,323 $\pm$ 0,008	0,168 $\pm$ 0,002	0,243 $\pm$ 0,005
	60	0,208 $\pm$ 0,007	0,329 $\pm$ 0,001	0,168 $\pm$ 0,013	0,239 $\pm$ 0,005
18	20	0,109 $\pm$ 0,011	0,198 $\pm$ 0,007	0,127 $\pm$ 0,015	0,146 $\pm$ 0,013
	30	0,123 $\pm$ 0,012	0,209 $\pm$ 0,003	0,133 $\pm$ 0,010	0,165 $\pm$ 0,003
	40	0,151 $\pm$ 0,013	0,216 $\pm$ 0,003	0,133 $\pm$ 0,011	0,167 $\pm$ 0,004
	50	0,167 $\pm$ 0,008	0,213 $\pm$ 0,005	0,140 $\pm$ 0,004	0,169 $\pm$ 0,001
	60	0,173 $\pm$ 0,007	0,212 $\pm$ 0,004	0,143 $\pm$ 0,006	0,171 $\pm$ 0,002

Tabela 22. Średnie wartości ($\pm$ odch. st.) współczynnika tarcia μ nasion o wilgotności w zakresie 10-18% o blachę ocynkowaną wyznaczone przy naporze normalnym w zakresie 0-2,5 kPa

Table 22. Mean values ($\pm$ St. Dev.) of the friction coefficient μ of seeds at the moisture content of 10-18% against galvanized steel determined at the normal pressure of 0-2.5 kPa

Wilgot- ność Moisture (%)	Napór normalny Normal pressure (kPa)	Współczynnik tarcia		Friction coefficient	
		Fasola Jubilatka Jubilatka bean	Groch Nike Nike pea	Groch Piast Piast pea	Kukurydza Perłowa Perłowa maize
10	0	0,206 $\pm$ 0,012	0,211 $\pm$ 0,001	0,225 $\pm$ 0,013	0,260 $\pm$ 0,018
	0,5	0,206 $\pm$ 0,005	0,225 $\pm$ 0,014	0,235 $\pm$ 0,005	0,225 $\pm$ 0,008
	1	0,208 $\pm$ 0,008	0,215 $\pm$ 0,013	0,226 $\pm$ 0,010	0,226 $\pm$ 0,006
	1,5	0,189 $\pm$ 0,003	0,216 $\pm$ 0,009	0,221 $\pm$ 0,011	0,224 $\pm$ 0,009
	2,1	0,189 $\pm$ 0,005	0,212 $\pm$ 0,008	0,219 $\pm$ 0,002	0,218 $\pm$ 0,008
	2,5	0,195 $\pm$ 0,005	0,212 $\pm$ 0,009	0,206 $\pm$ 0,004	0,220 $\pm$ 0,015
12	0	0,224 $\pm$ 0,006	0,218 $\pm$ 0,007	0,221 $\pm$ 0,018	0,234 $\pm$ 0,006
	0,5	0,228 $\pm$ 0,004	0,186 $\pm$ 0,006	0,193 $\pm$ 0,008	0,221 $\pm$ 0,010
	1	0,208 $\pm$ 0,007	0,176 $\pm$ 0,004	0,185 $\pm$ 0,006	0,203 $\pm$ 0,006
	1,5	0,203 $\pm$ 0,006	0,181 $\pm$ 0,001	0,180 $\pm$ 0,003	0,203 $\pm$ 0,006
	2,1	0,195 $\pm$ 0,013	0,184 $\pm$ 0,009	0,188 $\pm$ 0,007	0,193 $\pm$ 0,009
	2,5	0,187 $\pm$ 0,012	0,181 $\pm$ 0,002	0,182 $\pm$ 0,009	0,193 $\pm$ 0,010
14	0	0,232 $\pm$ 0,010	0,235 $\pm$ 0,005	0,232 $\pm$ 0,011	0,236 $\pm$ 0,005
	0,5	0,218 $\pm$ 0,007	0,212 $\pm$ 0,012	0,224 $\pm$ 0,006	0,226 $\pm$ 0,014
	1	0,216 $\pm$ 0,003	0,208 $\pm$ 0,002	0,207 $\pm$ 0,008	0,232 $\pm$ 0,008
	1,5	0,194 $\pm$ 0,007	0,196 $\pm$ 0,011	0,218 $\pm$ 0,005	0,222 $\pm$ 0,011
	2,1	0,194 $\pm$ 0,003	0,204 $\pm$ 0,005	0,193 $\pm$ 0,008	0,216 $\pm$ 0,016
	2,5	0,196 $\pm$ 0,009	0,199 $\pm$ 0,008	0,187 $\pm$ 0,007	0,199 $\pm$ 0,011
16	0	0,246 $\pm$ 0,006	0,242 $\pm$ 0,003	0,241 $\pm$ 0,001	0,242 $\pm$ 0,008
	0,5	0,232 $\pm$ 0,009	0,232 $\pm$ 0,011	0,240 $\pm$ 0,002	0,233 $\pm$ 0,013
	1	0,211 $\pm$ 0,013	0,221 $\pm$ 0,010	0,227 $\pm$ 0,006	0,232 $\pm$ 0,009
	1,5	0,232 $\pm$ 0,011	0,200 $\pm$ 0,010	0,219 $\pm$ 0,001	0,219 $\pm$ 0,006
	2,1	0,228 $\pm$ 0,004	0,207 $\pm$ 0,016	0,214 $\pm$ 0,016	0,230 $\pm$ 0,006
	2,5	0,218 $\pm$ 0,012	0,211 $\pm$ 0,003	0,217 $\pm$ 0,016	0,220 $\pm$ 0,007
18	0	0,239 $\pm$ 0,001	0,244 $\pm$ 0,005	0,236 $\pm$ 0,000	0,240 $\pm$ 0,000
	0,5	0,230 $\pm$ 0,000	0,236 $\pm$ 0,005	0,237 $\pm$ 0,006	0,235 $\pm$ 0,005
	1	0,224 $\pm$ 0,003	0,237 $\pm$ 0,006	0,230 $\pm$ 0,002	0,228 $\pm$ 0,002
	1,5	0,218 $\pm$ 0,002	0,223 $\pm$ 0,005	0,217 $\pm$ 0,002	0,229 $\pm$ 0,010
	2,1	0,224 $\pm$ 0,004	0,215 $\pm$ 0,001	0,215 $\pm$ 0,013	0,233 $\pm$ 0,003
	2,5	0,219 $\pm$ 0,008	0,207 $\pm$ 0,006	0,202 $\pm$ 0,003	0,210 $\pm$ 0,000

Tabela 23. Średnie wartości ($\pm$ sdch. st.) współczynnika tarcia μ nasion o wilgotności w zakresie 10-18% o blachę ocynkowaną wyznaczone przy naporze normalnym w zakresie 0-2,5 kPa

Table 23. Mean values ($\pm$ St. Dev.) of the friction coefficient μ of seeds at the moisture content of 10-18% against galvanized steel determined at the normal pressure of 0-2.5 kPa

Wilgot- ność Moisture (%)	Napór normalny Normal pressure (kPa)	Współczynnik tarcia Friction coefficient			
		Łubin Mirela Mirela Lupine	Peluszka Perkoz Perkoz field pea	Pszenica Korweta Korweta wheat	Wyka Szelejewska Szelejewska wetch
10	0	0,205 $\pm$ 0,001	0,233 $\pm$ 0,003	0,299 $\pm$ 0,006	0,200 $\pm$ 0,010
	0,5	0,230 $\pm$ 0,010	0,226 $\pm$ 0,004	0,290 $\pm$ 0,000	0,217 $\pm$ 0,006
	1	0,225 $\pm$ 0,004	0,227 $\pm$ 0,006	0,284 $\pm$ 0,002	0,215 $\pm$ 0,008
	1,5	0,225 $\pm$ 0,005	0,216 $\pm$ 0,003	0,279 $\pm$ 0,005	0,203 $\pm$ 0,006
	2,1	0,214 $\pm$ 0,014	0,213 $\pm$ 0,010	0,273 $\pm$ 0,001	0,202 $\pm$ 0,007
	2,5	0,207 $\pm$ 0,005	0,206 $\pm$ 0,005	0,273 $\pm$ 0,001	0,195 $\pm$ 0,004
12	0	0,238 $\pm$ 0,005	0,249 $\pm$ 0,004	0,254 $\pm$ 0,007	0,227 $\pm$ 0,011
	0,5	0,211 $\pm$ 0,010	0,221 $\pm$ 0,005	0,273 $\pm$ 0,009	0,212 $\pm$ 0,013
	1	0,194 $\pm$ 0,015	0,202 $\pm$ 0,008	0,253 $\pm$ 0,007	0,203 $\pm$ 0,013
	1,5	0,200 $\pm$ 0,011	0,191 $\pm$ 0,001	0,247 $\pm$ 0,003	0,203 $\pm$ 0,012
	2,1	0,203 $\pm$ 0,002	0,188 $\pm$ 0,007	0,237 $\pm$ 0,012	0,191 $\pm$ 0,005
	2,5	0,187 $\pm$ 0,004	0,196 $\pm$ 0,016	0,238 $\pm$ 0,003	0,196 $\pm$ 0,010
14	0	0,240 $\pm$ 0,004	0,235 $\pm$ 0,015	0,240 $\pm$ 0,003	0,230 $\pm$ 0,006
	0,5	0,227 $\pm$ 0,008	0,216 $\pm$ 0,008	0,220 $\pm$ 0,011	0,217 $\pm$ 0,012
	1	0,213 $\pm$ 0,018	0,211 $\pm$ 0,003	0,207 $\pm$ 0,007	0,218 $\pm$ 0,005
	1,5	0,222 $\pm$ 0,010	0,205 $\pm$ 0,002	0,203 $\pm$ 0,006	0,220 $\pm$ 0,009
	2,1	0,210 $\pm$ 0,005	0,196 $\pm$ 0,005	0,193 $\pm$ 0,004	0,202 $\pm$ 0,009
	2,5	0,191 $\pm$ 0,008	0,192 $\pm$ 0,005	0,198 $\pm$ 0,004	0,194 $\pm$ 0,006
16	0	0,253 $\pm$ 0,007	0,231 $\pm$ 0,001	0,247 $\pm$ 0,016	0,240 $\pm$ 0,002
	0,5	0,233 $\pm$ 0,010	0,237 $\pm$ 0,006	0,254 $\pm$ 0,006	0,248 $\pm$ 0,013
	1	0,210 $\pm$ 0,012	0,214 $\pm$ 0,016	0,230 $\pm$ 0,019	0,227 $\pm$ 0,008
	1,5	0,218 $\pm$ 0,013	0,218 $\pm$ 0,002	0,234 $\pm$ 0,019	0,227 $\pm$ 0,010
	2,1	0,227 $\pm$ 0,013	0,230 $\pm$ 0,001	0,212 $\pm$ 0,001	0,222 $\pm$ 0,003
	2,5	0,219 $\pm$ 0,001	0,202 $\pm$ 0,007	0,208 $\pm$ 0,009	0,221 $\pm$ 0,015
18	0	0,246 $\pm$ 0,002	0,242 $\pm$ 0,003	0,246 $\pm$ 0,005	0,230 $\pm$ 0,000
	0,5	0,239 $\pm$ 0,003	0,237 $\pm$ 0,001	0,240 $\pm$ 0,002	0,223 $\pm$ 0,006
	1	0,231 $\pm$ 0,001	0,227 $\pm$ 0,005	0,229 $\pm$ 0,001	0,220 $\pm$ 0,010
	1,5	0,234 $\pm$ 0,012	0,221 $\pm$ 0,002	0,230 $\pm$ 0,010	0,222 $\pm$ 0,008
	2,1	0,216 $\pm$ 0,003	0,217 $\pm$ 0,001	0,223 $\pm$ 0,003	0,209 $\pm$ 0,001
	2,5	0,213 $\pm$ 0,006	0,203 $\pm$ 0,006	0,208 $\pm$ 0,002	0,207 $\pm$ 0,002

Tabela 24. Średnie wartości ($\pm$ odch. st.) efektywnego kąta tarcia wewnętrznego δ kąta tarcia wewnętrznego φ oraz kohezji c nasion o wilgotności 10%

Table 24. Mean values ($\pm$ St. Dev.) of the effective angle of internal friction δ the angle of internal friction φ and the cohesion c of seeds at the moisture content of 10%

Materiał Material	Napężenie konsolidacji Consolidation pressure, kPa	Efektywny kąt tarcia wewnętrznego Effective angle of internal friction	Kąt tarcia wewnętrznego Angle of internal friction (deg)	Kohezja Cohesion (kPa)	r^2
Fasola	40	33,8 $\pm$ 0,9	32,1 $\pm$ 0,9	1,7 $\pm$ 0,5	99,9
Jubilatka	60	33,1 $\pm$ 0,5	29,8 $\pm$ 0,5	4,7 $\pm$ 0,4	99,9
Jubilatka	80	33,9 $\pm$ 1,9	33,3 $\pm$ 1,8	1,3 $\pm$ 2,0	99,5
bean	100	33,2 $\pm$ 0,2	32,4 $\pm$ 0,2	2,0 $\pm$ 0,3	99,9
Groch Nike	40	42,6 $\pm$ 3,3	39,9 $\pm$ 3,3	3,3 $\pm$ 1,8	99,0
Nike pea	60	41,5 $\pm$ 2,1	37,9 $\pm$ 2,1	6,3 $\pm$ 1,7	99,6
	80	40,7 $\pm$ 1,7	38,8 $\pm$ 1,6	4,4 $\pm$ 1,7	99,7
	100	40,1 $\pm$ 0,2	39,0 $\pm$ 0,2	3,2 $\pm$ 0,2	99,9
Groch Piast	40	38,7 $\pm$ 1,1	38,0 $\pm$ 1,1	0,8 $\pm$ 0,6	99,9
Piast pea	60	36,5 $\pm$ 1,5	35,9 $\pm$ 1,5	1,0 $\pm$ 1,2	99,7
	80	36,5 $\pm$ 0,5	34,4 $\pm$ 0,6	4,4 $\pm$ 0,7	99,9
	100	36,1 $\pm$ 0,7	34,9 $\pm$ 0,7	3,1 $\pm$ 1,0	99,9
Kukurydza	40	26,0 $\pm$ 1,0	25,7 $\pm$ 1,0	0,3 $\pm$ 0,6	99,7
Perłowa	60	25,4 $\pm$ 1,7	22,9 $\pm$ 1,7	3,1 $\pm$ 1,4	98,9
Perłowa	80	25,5 $\pm$ 0,5	23,8 $\pm$ 0,5	2,9 $\pm$ 0,6	99,9
maize	100	25,7 $\pm$ 0,4	24,7 $\pm$ 0,3	2,2 $\pm$ 0,4	99,9
Łubin	40	29,9 $\pm$ 0,7	31,5 $\pm$ 0,7	-1,5 $\pm$ 0,4	99,9
Mirela	60	29,4 $\pm$ 0,6	29,4 $\pm$ 0,6	0,0 $\pm$ 0,5	99,9
Mirela	80	29,5 $\pm$ 0,5	29,7 $\pm$ 0,5	-0,3 $\pm$ 0,6	99,9
lupine	100	30,0 $\pm$ 1,2	30,8 $\pm$ 1,1	-1,8 $\pm$ 1,6	99,8
Peluszka	40	36,3 $\pm$ 1,0	34,4 $\pm$ 1,0	2,0 $\pm$ 0,6	99,8
Perkoz	60	36,0 $\pm$ 0,3	35,0 $\pm$ 0,3	1,6 $\pm$ 0,2	99,9
Perkoz field	80	35,5 $\pm$ 0,3	34,4 $\pm$ 0,3	2,2 $\pm$ 0,3	99,9
pea	100	34,6 $\pm$ 0,4	32,9 $\pm$ 0,4	4,2 $\pm$ 0,6	99,9
Pszenica	40	33,1 $\pm$ 0,9	32,4 $\pm$ 0,9	0,7 $\pm$ 1,2	99,9
Korweta	60	26,5 $\pm$ 0,8	24,9 $\pm$ 0,8	2,1 $\pm$ 0,6	99,8
Korweta	80	25,5 $\pm$ 0,5	24,0 $\pm$ 0,5	2,5 $\pm$ 0,5	99,9
wheat	100	24,8 $\pm$ 0,4	23,5 $\pm$ 0,3	2,7 $\pm$ 0,4	99,9
Wyka	40	33,3 $\pm$ 0,5	31,2 $\pm$ 0,5	2,1 $\pm$ 0,2	99,9
Szelejewska	60	33,2 $\pm$ 1,0	32,6 $\pm$ 1,0	0,9 $\pm$ 0,8	99,8
Szelejewska	80	32,8 $\pm$ 0,3	31,1 $\pm$ 0,3	3,2 $\pm$ 0,4	99,9
wetch	100	32,7 $\pm$ 0,9	32,4 $\pm$ 0,9	0,7 $\pm$ 1,2	99,9

Tabela 25. Średnie wartości ($\pm$ odch. st.) współczynnika sprężystości E oraz stałej Poissona ν nasion o wilgotności w zakresie 10-18%

Table 25. Mean values ($\pm$ St. Dev.) of the elasticity coefficient E and the Poisson ratio ν of seeds at the moisture content of 10-18%

Materiał Material	Wilgotność Moisture (%)	Współczynnik sprężystości elasticity coefficient (MPa)	Stała Poissona Poisson ratio
Fasola Jubilatka Jubilatka bean	10	$14,0 \pm 1,5$	$0,25 \pm 0,04$
	12	$12,8 \pm 0,6$	$0,14 \pm 0,01$
	14	$11,8 \pm 0,2$	$0,12 \pm 0,01$
	16	$10,6 \pm 0,3$	$0,12 \pm 0,01$
	18	$9,9 \pm 0,3$	$0,12 \pm 0,01$
Groch Nike Nike pea	10	$22,1 \pm 0,9$	$0,16 \pm 0,01$
	12	$18,4 \pm 0,2$	$0,11 \pm 0,01$
	14	$14,1 \pm 0,6$	$0,10 \pm 0,01$
	16	$11,3 \pm 0,5$	$0,12 \pm 0,01$
	18	$10,9 \pm 0,5$	$0,11 \pm 0,01$
Groch Piast Piast pea	10	$15,8 \pm 0,7$	$0,22 \pm 0,03$
	12	$14,9 \pm 1,1$	$0,15 \pm 0,01$
	14	$12,9 \pm 0,4$	$0,15 \pm 0,01$
	16	$11,7 \pm 0,2$	$0,14 \pm 0,01$
	18	$10,5 \pm 0,2$	$0,12 \pm 0,01$
Kukurydza Perłowa Perłowa maize	10	$23,4 \pm 1,7$	$0,27 \pm 0,02$
	12	$22,9 \pm 0,7$	$0,21 \pm 0,01$
	14	$20,6 \pm 1,0$	$0,21 \pm 0,01$
	16	$19,4 \pm 1,1$	$0,20 \pm 0,02$
	18	$19,4 \pm 0,2$	$0,19 \pm 0,01$
Łubin Mirela Mirela lupine	10	$17,1 \pm 0,3$	$0,17 \pm 0,09$
	12	$15,5 \pm 0,4$	$0,13 \pm 0,01$
	14	$13,8 \pm 0,9$	$0,14 \pm 0,01$
	16	$13,3 \pm 0,2$	$0,11 \pm 0,01$
	18	$11,8 \pm 0,7$	$0,15 \pm 0,03$
Peluszk Perkoz Perkoz field pea	10	$21,2 \pm 0,8$	$0,18 \pm 0,01$
	12	$19,8 \pm 0,9$	$0,17 \pm 0,01$
	14	$19,5 \pm 0,8$	$0,14 \pm 0,02$
	16	$18,1 \pm 0,3$	$0,14 \pm 0,01$
	18	$16,0 \pm 0,4$	$0,12 \pm 0,01$
Pszemica Korweta Korweta wheat	10	$22,0 \pm 0,4$	$0,20 \pm 0,01$
	12	$20,0 \pm 0,9$	$0,20 \pm 0,01$
	14	$18,0 \pm 0,6$	$0,17 \pm 0,01$
	16	$16,4 \pm 0,5$	$0,17 \pm 0,01$
	18	$14,9 \pm 0,7$	$0,19 \pm 0,01$
Wyka Szelejewska Szelejewska wetch	10	$23,6 \pm 1,3$	$0,16 \pm 0,02$
	12	$22,9 \pm 0,9$	$0,16 \pm 0,01$
	14	$20,8 \pm 0,6$	$0,16 \pm 0,01$
	16	$20,2 \pm 0,4$	$0,13 \pm 0,01$
	18	$15,7 \pm 0,6$	$0,11 \pm 0,01$

4.4. Omówienie wyników badań

4.4.1. Tarcie zewnętrzne

Współczynnik tarcia nasion wyznaczany przy naporze normalnym w zakresie 20-60 kPa w aparacie Jenikego zależał od właściwości powierzchniowych nasion, wilgotności i naporu normalnego. Współczynnik tarcia mieścił się przedziale 0,1 (łubin) - 0,35 (peluszką). Osiągał maksimum przy wilgotności nasion 12% (groch odmiany Nike, pszenica, wyka) bądź 14% (groch odmiany Piast, kukurydza, łubin, peluszką, fasola). W większości przypadków współczynnik tarcia rósł ze wzrostem naporu normalnego, a w kilku przypadkach był stały (groch odmiany Nike - $w = 12\%$; kukurydza - $w = 14\%$ i 18% ; łubin - $w = 10\%$; wyka - $w = 14\%$).

Współczynnik tarcia otrzymany w aparacie z płytą uchylną w zakresie naporu normalnego 0-2,5 kPa mieścił się w przedziale 0,18 (groch) - 0,26 (kukurydza) i na ogół był istotnie wyższy od otrzymanego w aparacie Jenikego. Współczynnik tarcia wyznaczany w aparacie z płytą uchylną we wszystkich przypadkach malał ze wzrostem naporu w przeciwieństwie do omówionego wcześniej współczynnika wyznaczanego w aparacie Jenikego, który na ogół rósł ze wzrostem naporu. Wpływ wilgotności nie był jednakowy dla wszystkich nasion. Współczynnik tarcia rósł, malał bądź nie zależał od wilgotności.

Przyczyną odmiennego zachowania się współczynnika tarcia w dwóch różnych zakresach naporu jest różny udział składowej adhezyjnej i deformacyjnej w wypadkowej sile tarcia. Przy naporze w zakresie 0-2,5 kPa udział składowej adhezyjnej - niezależnej od naporu normalnego jest dominujący. Skutkiem tego im niższy napór tym większy jest współczynnik tarcia. Z kolei w zakresie naporu 20-60 kPa zaczyna dominować składowa deformacyjna - skrawanie powierzchni nasion przez mikronierówności powierzchni trącej. Składowa ta jest proporcjonalna do nacisku normalnego, skutkiem czego współczynnik tarcia wyznaczany przy naporze 20-60 kPa na ogół rósł ze wzrostem naporu.

Zalecany przez normę Eurocode 1 umowny podział na współczynnik tarcia μ – służący do obliczania parcia materiału sypkiego - oraz kąt tarcia φ_w – służący do określenia warunków wypływu materiału w okolicach leja wysypowego - znajduje pełne uzasadnienie w obserwowanym wpływie naporu normalnego na wartość współczynnika tarcia.

4.4.2. Tarcie wewnętrzne

Kąt tarcia wewnętrznego φ zależy zarówno od gęstości i struktury upakowania oraz od szorstkości powierzchni nasion. Najwyższe wartości kąta tarcia wewnętrznego φ stwierdzono w przypadku grochu odmiany Nike (38° - 40°) oraz Piast (34° - 38°) zaś najniższe w przypadku kukurydzy (23° - 26°). Przyczyną wysokiej wartości kąta tarcia wewnętrznego grochu są oddziaływania kształtowe wynikające ze specyficznego kształtu nasion grochu. W przypadku kukurydzy niska wartość kąta tarcia wewnętrznego wynika ze specyficznych własności powierzchniowych nasion kukurydzy odmiany Perłowa. W rozważanym zakresie naporu konsolidacji (40-100 kPa) w większości przypadków kąt tarcia wewnętrznego nie zmieniał się istotnie ze zmianą naporu konsolidacji. Wyjątkiem jest pszenica, dla której kąt tarcia wewnętrznego wyznaczany przy naporze 40 kPa był istotnie większy od nie różniących się istotnie między sobą wartości wyznaczanych przy naporze konsolidacji 60, 80 i 100 kPa. Prawdopodobną przyczyną istotnego zawyżenia wartości kąta tarcia wewnętrznego wyznaczanego przy naporze 40 kPa był wpływ struktury upakowania złoża niesferycznych ziaren powodujący wzrost wytrzymałości na ścinanie wynikający z oddziaływań kształtowych pomiędzy ziarnami. Wpływ ten, wyraźny przy niskim naporze, zanikał przy wyższych wartościach naporu. Wynika z tego istotne spostrzeżenie, że podczas wyznaczania katalogowych wartości kąta tarcia wewnętrznego dla celów ogólnych należy unikać zbyt niskich wartości naporu. Natomiast w szczególnych przypadkach praktycznych należy brać pod uwagę możliwość istotnych odchyłek od wartości katalogowej na skutek wpływu wielu czynników jak np. niski napór eksponujący wpływ struktury upakowania.

Efektywny kąt tarcia wewnętrznego δ przyjmuje wartości nieco większe od kąta tarcia wewnętrznego φ , co wynika z definicji obu kątów. Im mniejsza kohezja c tym mniejsza różnica pomiędzy kątami δ i φ . Kohezja c jedynie w kilku przypadkach nie różniła się istotnie od zera. Ujemne wartości kohezji pojawiające się w przypadku łubinu należy traktować jako element błędu pomiaru – wartości te na ogół nie różniły się istotnie od zera. Wysokie wartości współczynnika korelacji liniowego dopasowania zależności $\tau(\sigma)$, na podstawie której wyznaczano parametry wytrzymałości na ścinanie wskazują na dużą powtarzalność wyników pomiaru.

Porównanie średniej wartości kąta tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy w zakresie naporu 60-100 kPa ($24,1^{\circ} \pm 0,8^{\circ}$) z wartością wyznaczoną metodą trójosowego ściskania [85] ($24,0^{\circ} \pm 0,9^{\circ}$) oraz metodą bezpośredniego ścinania w

dużym aparacie o przekroju prostokątnym 25x61 cm ($26,5^{\circ} \pm 1,7^{\circ}$) [95] pozwala stwierdzić, że wartości kąta tarcia wewnętrznego wyznaczone w aparacie Jenikego przy powiększeniu drogi ścinania, niezbędnej dla uzyskania ustalonej wartości naprężenia stycznego τ , z 5% do 10% średnicy próbki były zbliżone do wartości wyznaczanych pozostałymi dwoma metodami.

4.4.3. Sprężystość

Magazynowany materiał sypki zagęszcza się pod wpływem własnego ciężaru oraz obciążenia zewnętrznego. Zagęszczenie wzrasta w wyniku zmiany upakowania oraz deformacji ziaren ośrodka. Wypadkowe odkształcenie objętościowe jest sumą odkształcenia odwracalnego, wywołanego sprężystą deformacją ziaren (zatem znikającego po usunięciu obciążenia) oraz odkształcenia nieodwracalnego (plastycznego) związanego ze zmianą wzajemnego ułożenia ziaren. Sprężystość materiału sypkiego ma bardzo duży wpływ na parcie przekazywane przez materiał sypki na konstrukcję zbiornika. Do rozwiązywania praktycznych zagadnień przyjmowana jest empiryczna zależność modułu sprężystości od naporu, lub też dla określonego zakresu ciśnienia, stała wartość modułu.

W przypadku materiałów sypkich pochodzenia biologicznego moduł sprężystości maleje ze wzrostem wilgotności. W zakresie wilgotności od 10 do 18% zależność modułu sprężystości złoża nasion od wilgotności uznać można za liniową. Największą zmianę modułu sprężystości stwierdzono w przypadku grochu odmiany Nike: spadek od 22 MPa do 10,9 MPa przy wzroście wilgotności od 10 do 18%, zaś najmniejszą w przypadku kukurydzy: od 23 MPa do 19 MPa. W przypadku pszenicy moduł sprężystości malał od 22 MPa do 14,9 MPa. Jakościowe podobieństwo zależności modułu sprężystości pojedynczego ziarna oraz modułu sprężystości złoża materiału sypkiego od wilgotności wskazuje na ten sam mechanizm oddziaływania wilgotności, pomimo że zmiana modułu sprężystości złoża nasion jest kilkakrotnie mniejsza niż zmiana modułu sprężystości pojedynczych nasion.

Również stała Poissona ν malała ze wzrostem wilgotności. Największe zmiany stwierdzono w przypadku fasoli (0,25-0,12) oraz grochu odmiany Piast (0,22-0,12) a najmniejsze w przypadku wyki (0,16-0,11).

Polska norma PN-B-03254 [114] zaleca uzależniać wartość modułu sprężystości złoża ziarna od wielkości silosu, czyli od zakresu naprężenia w złożu materiału sypkiego. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zalecane przez normę wartości modułu sprężystości korespondują z najszerszym zakresem wartości 10-24 MPa (tab. 12) uzyskany w rozważanym

zakresie wilgotności. Ta sama norma zaleca przyjmować wartość współczynnika Poissona ν_m równą 0,4. Uzyskane wartości eksperymentalne stałej ν są istotnie niższe od zalecanej wartości.

4.4.4. Wnioski

1. Charakterystyczną cechą złoża nasion jest duża odkształcalność materiału oraz silna zależność właściwości fizycznych od wilgotności. Zmiana wilgotności istotnie zmienia właściwości fizyczne.

2. Eksperymentalne metody wyznaczania właściwości mechanicznych powinny uwzględniać specyfikę badanych materiałów. W przypadku nasion jest to duża i zależna od wilgotności odkształcalność nasion oraz długa droga dochodzenia do warunków ustalonego płynięcia.

3. Kąt tarcia o powierzchnie konstrukcyjne zależy od właściwości powierzchni trącej (rodzaj powierzchni, szorstkość), warunków tarcia (nacisk normalny, droga poślizgu, prędkość poślizgu), właściwości powierzchniowych ziaren materiału sypkiego (wilgotność, gatunek, odmiana, stan rozdrobnienia) oraz warunków otoczenia. W przypadku wszystkich badanych nasion współczynnik tarcia malał ze wzrostem nacisku normalnego. Zalecany przez normę Eurocode 1 umowny podział na współczynnik tarcia (służący do obliczania parcia materiału sypkiego) wyznaczany przy maksymalnej wartości naporu normalnego oraz kąt tarcia (służący do określenia warunków tarcia o powierzchnię leja wysypowego podczas wypływu) wyznaczany przy najniższym możliwym naporze normalnym znajduje pełne potwierdzenie w obserwowanym silnym wpływie naporu normalnego na wartość współczynnika tarcia.

4. Kąt tarcia wewnętrznego materiałów sypkich zależy od właściwości pojedynczych ziaren ośrodka oraz od struktury upakowania złoża materiału. Wyznaczanie kąta tarcia wewnętrznego do celów ogólnych dobrze jest przeprowadzać przy naporze normalnym powyżej 50 kPa. Poszerzenie zakresu przemieszczenia z zalecanych przez normę Eurocode 1 5% średnicy próbki do 10% pozwala na poprawny pomiar kąta tarcia wewnętrznego metodą bezpośredniego ścinania złoża nasion, dla których stosunek średnicy komory pomiarowej do wymiaru nasion jest zbliżony do granicznej wartości 40.

5. Zakres modułu sprężystości złoża nasion 10-24 MPa uzyskany w zakresie wilgotności 10-18% koresponduje dobrze z zalecanym przez normę zakresem wartości modułu sprężystości 10-20 MPa.

IV. CHARAKTERYSTYKI MATERIAŁU STOSOWANE W TECHNOLOGII PRZETWARZANIA PROSZKÓW

Aktualny stan wiedzy o mechanice materiałów ziarnistych nie pozwala jeszcze na szeroką standaryzację metod i parametrów. Przemysł potrzebuje jednak parametrów projektowych i miar jakości produktów. Powstają więc firmy konsultingowe oferujące usługi w zakresie wyznaczania właściwości i rekomendacji rozwiązań konstrukcyjnych. Największą wiarygodność na rynku uzyskują firmy założone i prowadzone przez specjalistów o ugruntowanej wcześniej renomie. Prawdopodobnie dobrą ilustracją zapotrzebowania przemysłu i proponowanych rozwiązań będzie analiza oferty firm Jenike and Johanson, Inc. oraz JR Johanson Inc. Przedstawionych w Internecie (www.jenike.com oraz www.jrjohanson.com). Założyciele tych firm to byli pracownicy uniwersytetów, specjaliści najwyższej światowej klasy o niekwestionowanym autorytecie. Pierwsza z wymienionych firm adresuje swoją ofertę do zakładów przemysłów: chemicznego, ochrony środowiska, spożywczego, szklarskiego, metalowego, produktów mineralnych, górniczego, papierniczego, farmaceutycznego, tworzyw sztucznych i proszków metali. Jenike and Johanson w zasadniczym swym profilu proponuje testy standardowe dla wyznaczania: kohezji, tarcia o ścianę, ściśliwości, przepuszczalności oraz kąta nachylenia ryny zsykowej zapewniającego stabilny wypływ. W razie potrzeby proponuje się wyznaczanie właściwości materiałów w zależności od: czasu spoczynku, naporu, temperatury i wilgotności powietrza otoczenia. Stosowana aparatura to przede wszystkim aparat Jenikego (aparat bezpośredniego ścinania) ze stanowiskiem do konsolidacji próbek. Ostatnio wprowadzono również aparat pierścieniowy, który oprócz zastosowań typowych dla aparatu Jenikego umożliwia także pomiar zużycia ciernego materiału. W sytuacjach kiedy wyznaczenie właściwości nie zapewnia wystarczającej informacji dla zaprojektowania przebiegu procesu firma proponuje wykonanie badań na modelu.

1. OZNACZANIE JAKOŚCI PRODUKTÓW

Kontrola jakości jest ważnym elementem w wytwarzaniu i przetwarzaniu proszków, gdyż pozwala uniknąć awarii związanych z zaburzeniami przepływu oraz umożliwia utrzymanie stałości składu produktu. Dlatego w ostatnich latach zaproponowano szereg nowych konstrukcji testerów i dziś szukają one swojego miejsca na rynku. Badania jakości materiału muszą odbywać się wszędzie tam, gdzie na linii produkcyjnej płynność może ulegać zmianom, tak że materiał nie

mógłby być niezawodnie przetwarzany. Dzięki badaniu jakości przed wprowadzeniem materiału na linię produkcyjną można odrzucić partię surowca, który wprowadzony do procesu mógłby spowodować kosztowną awarię. Zmienność płynności materiału może być spowodowana wieloma czynnikami. Dla złożonych procesów składniki są często zakupywane u różnych dostawców. Stałość właściwości surowca zależy od metod wytwarzania, które mogą być różne. Rutynowe badanie płynności jest niezbędne dla stwierdzenia zgodności właściwości produktu z deklarowanymi przez dostawcę.

W wielu procesach aparatura jest dostrajana w czasie rozruchu, kiedy powstaje produkt uboczny. Badanie tego produktu rozruchu umożliwia podjęcie decyzji czy może on być z powrotem wprowadzony do procesu. W typowych warunkach określa się maksymalną wytrzymałość kohezyjną dla stwierdzenia czy w układzie nie wystąpią problemy z przepływem. Czasami jednak wartość produktu końcowego warunkuje minimalna wytrzymałość kohezyjna. W przypadku niektórych materiałów występuje konflikt - najlepszy produkt jest najtrudniejszy w wytwarzaniu. Tym ważniejsze są wówczas - dla utrzymania koniecznej proporcji - badania jakości.

Powtórzmy za Ploofem i Carsonem [110] wymagania stawiane przez rynek testerowi jakości proszków:

- Po pierwsze aparat ma być łatwy w użyciu i wymagać od obsługi minimum szkolenia i wprawy.
- Czas niezbędny dla wykonania pomiaru i analizy wyników ma być możliwie najkrótszy.
- Wyniki pomiarów powinny być dokładne, powtarzalne oraz powinny dawać istotną informację o materiale.
- Konstrukcja aparatu ma być prosta i zwarta, zapewniając przenośność.

Wtedy zamiast dostarczać materiał do laboratorium, można umieszczać urządzenie w odpowiednim miejscu linii produkcyjnej.

Aparat obrotowy Peschla

Obiecującą propozycję obrotowego aparatu pomiarowego przedstawił Peschl [107] formułując również metodę wyznaczania właściwości mechanicznych [108] oraz metodę kontroli jakości proszków do zastosowania w przemyśle [109]. Autor analizował znane aparaty ścinające. Stwierdził, że niektóre aparaty zawyżają wartości parametrów materiałowych w stosunku do teorii, inne zaś zaniżają wartości parametrów. Uznał, że obrotowy aparat ścinający o dwudzielnej komorze daje wartości

parametrów materiałowych bliskie nominalnym. Potwierdził słuszność swych rozważań eksperymentami. W aparacie Peschla materiał ścinany jest w wyniku ruchu obrotowego dolnej części komory aparatu względem części górnej. Powierzchnia przekroju poziomego próbki wynosi 30 cm^2 , a objętość 45 cm^3 . W efekcie zastosowania ruchu obrotowego nie ma ograniczenia długości drogi ścinania, a w wyniku poziomego podziału komory płaszczyzna ścięcia formuje się w środku wysokości próbki, gdzie najslabsze są zakłócenia od poziomych granic próbki. Autor zaleca taki wybór procedury pomiarowej by możliwie najbliższej oddawała warunki procesu, dla którego wyznaczane są parametry. Peschl woli nie formułować procedury standardowej, ale daje możliwość zaprogramowania przebiegu ścinania w automatycznie sterowanym aparacie. W trakcie analizy wyników można wybrać liniową albo wykładniczą aproksymację warunku plastyczności. Dla większości materiałów swobodnie płynących i słabo kohezyjnych wystarczająca jest aproksymacja liniowa. Wówczas parametry materiałowe mają znaną zrozumiałą interpretację. Niektóre materiały charakteryzuje warunek płynięcia silnie nieliniowy w zakresie niskich naporów. Wtedy Peschl [108] proponuje aproksymację liniową w dwu przedziałach. Z prostej dla wyższego zakresu naporu wyznacza się większe naprężenie główne σ_1 , a z przebiegu dla niższego zakresu naporu wyznacza się kohezję c i dalej wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie σ_c . Jeżeli powyższe metody nie dają wystarczającej dokładności opisu warunku płynięcia konieczna jest aproksymacja funkcją wykładniczą. Metoda aproksymacji nie może być narzucona z góry, musi ona wynikać z rozważenia konkretnego przypadku. Peschl uważa, że zaproponowana przez niego metoda daje możliwość symulowania wszystkich praktycznie występujących warunków, prawidłowego wyznaczenia parametrów, a zatem właściwego funkcjonowania instalacji przemysłowych. Technologia proszków osiągnęła poziom nauki inżynierskiej i umożliwia już projektowanie instalacji przemysłowych bez uprzedniego eksperymentowania z urządzeniami i instalacją.

Bardzo ważną właściwością materiałów sypkich o wciąż rosnącym znaczeniu jest płynność. Jest to cecha determinująca jakość materiału. Klient oczekuje niezmienniej sypkości zakupionego proszku do prania, cukru czy mleka w proszku. W procesie mieszania i pakowania stabilna sypkość decyduje o prawidłowym przebiegu procesu i stabilnych właściwościach produktu (np. leku). Peschl sprawdził swój aparat w testach produktów przemysłu farmaceutycznego i węglowego [109] i zaleca jego stosowanie do kontroli jakości. Mierzone parametry to: napór konsolidacji (σ_1), kąt tarcia wewnętrznego (φ), kohezja (c) oraz wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (σ_c). Materiał swobodnie płynący charakteryzowany jest jedynie przez

kąt tarcia wewnętrznego. Materiał kohezyjny charakteryzowany jest przez kohezję i kąt tarcia wewnętrznego. Napór konsolidacji σ_1 w trakcie pomiaru powinien być porównywalny z naporem jakiemu podlega materiał w warunkach procesu. Kąt tarcia wewnętrznego związany jest z wartościami σ_1 oraz σ_c . Jako bezwymiarowy parametr Peschl proponuje „płynność bezwzględna” - FLA :

$$FLA = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \rho}{\sigma_c \rho_w} \quad (47)$$

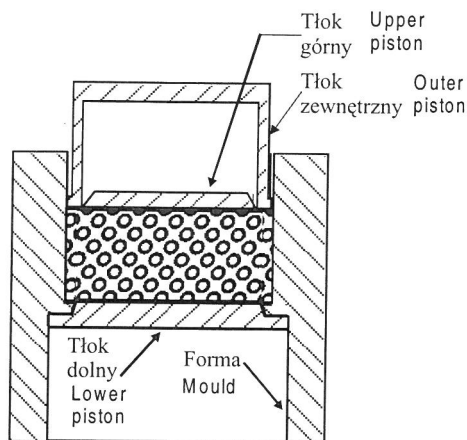
gdzie (oprócz wymienionych parametrów): ρ - gęstość wody.

Bell i in. [9] badając szerzej znane metody oznaczania jakości proszków pod kątem ich przydatności w przemyśle oceniali również metodę Peschla. Zastosowane sposoby uproszczenia metody Jenikego szły w dwu kierunkach – automatyzacji pomiaru, albo opracowania nowych metod. Metoda Peschla jest przykładem tego pierwszego podejścia. Bell i in. [9] uznali iż metoda daje powtarzalne wyniki w zakresie niskich i średnich naporów. Jej zaletą jest możliwość wielokrotnego pomiaru na tej samej próbce, w przypadku materiałów podatnych na uszkodzenia w ścinaniu należy jednak zachować szczególną ostrożność. Automatyka zastosowana w testerze Peschla czyni go bardzo kosztownym co ogranicza możliwość umieszczenia aparatu na liniach produkcyjnych wszędzie tam gdzie byłby potrzebny. Ponadto korzyść z automatyzacji staje się wątpliwa w przypadku potrzeby wyznaczania funkcji płynięcia z konsolidacją czasową. Takie pomiary wymagają osobnych próbek konsolidowanych pod różnymi naporami w kontrolowanych warunkach otoczenia i ta sama próbka nie może być wielokrotnie badana bez każdorazowego kondycjonowania.

Aparat i wskaźniki Johansona

J.R. Johanson oddzielił się w 1985 roku od firmy Jenike & Johanson i zaproponował swoją metodę wyznaczania właściwości proszków [62]. Zasadniczym elementem aparatury jest komora pomiarowa przedstawiona schematycznie na rysunku 66. Próbkę jest poddawana konsolidacji w cylindrycznej formie za pomocą składającego się z dwóch części tłoka. Napór konsolidacji mierzony jest na tłoku wewnętrznym podczas równoczesnego ruchu obu tłoków. Tłok zewnętrzny przejmuje cały opór tarcia eliminując w ten sposób siły tarcia, które mogłyby obciążać tłok wewnętrzny fałszując pomiar naporu konsolidacji. Próbkę konsolidowaną jest do założonego poziomu większego naprężenia głównego. Po zakończeniu konsolidacji napór pionowy jest obniżany do zera, a dolny tłok opada. Górny, zewnętrzny tłok unosi się ponad komorę, a próbka jest ścinana

przez ruch wewnętrznego tłoka ku dołowi. W ten sposób wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie σ_c jest mierzona bezpośrednio. Johanson uważa, iż jego układ pomiarowy daje wyniki bardziej dokładne niż aparat bezpośredniego ścinania, a pomiar wymaga znacznie mniej czasu niż w przypadku metody bezpośredniego ścinania. Twierdzi również, iż badacz, ekspert, inżynier projektant czy handlowiec, dzięki jego metodzie może oznaczyć właściwości materiałów sypkich z łatwością i niezawodnie.



Rys. 66. Komora aparatu Johansona [62]

Fig. 66. Johanson indicizer test cell [62]

Układ pomiarowy Johansona był przedmiotem testów innych badaczy m.in. specjalistów firmy DuPont [9]. Na wstępie autorzy ci podkreślają znaczenie pomiarów płynności informując, że badania materiałów sypkich w 95% dotyczą jakości i projektowania produktów, a nie projektowania silosów. Z zainteresowaniem badano aparaturę Johansona gdyż było to pierwsze komercyjne urządzenie szybkie w użyciu, stosunkowo proste i dostępne w umiarkowanej cenie. Wykonano badania na kilkunastu typowych materiałach sypkich i porównano wyniki z rezultatami testu bezpośred-

niego ścinania. Stwierdzono, że aparatura daje wysoce powtarzalne wyniki dla szerokiej grupy materiałów. Pomiar nie wymaga długiego czasu, ani specjalnego szkolenia operatora. Przeliczenie uzyskiwanych z testu parametrów (średnica sklepienia i średnica tworzenia kanału) na wytrzymałość przy jednoosiowym ściskaniu σ_c wskazuje, że przyrząd konsekwentnie daje niższe wartości σ_c niż metoda bezpośredniego ścinania. Kiedy jako wskaźnik płynności stosowano iloraz wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie i gęstości, σ_c/γ , uzyskiwano słabą zgodność z wynikami metody bezpośredniego ścinania przy niskich poziomach naporu. Przy wyższych poziomach naporu uzyskiwano zadowalającą zgodność wyników obu metod.

Wykonano także ranking płynności badanych materiałów stosując wskaźnik tunelu Johansona i odpowiednie wartości metody Jenikego. I w tym przypadku uzyskano zgodność wyników obu metod. W konkluzji autorzy stwierdzają, że aparatura Johansona jest wygodnym narzędziem dającym powtarzalne wyniki jednak wyznaczane za jej pomocą wartości wytrzymałości na jednoosiowe

ściskanie σ_c nie w pełni zgadzają się z wynikami szeroko uznawanej metody Jenikego. Dla części materiałów uzyskano dobrą zgodność rankingów płynności, nie udało się jednak ściśle określić warunków dla takiej zgodności.

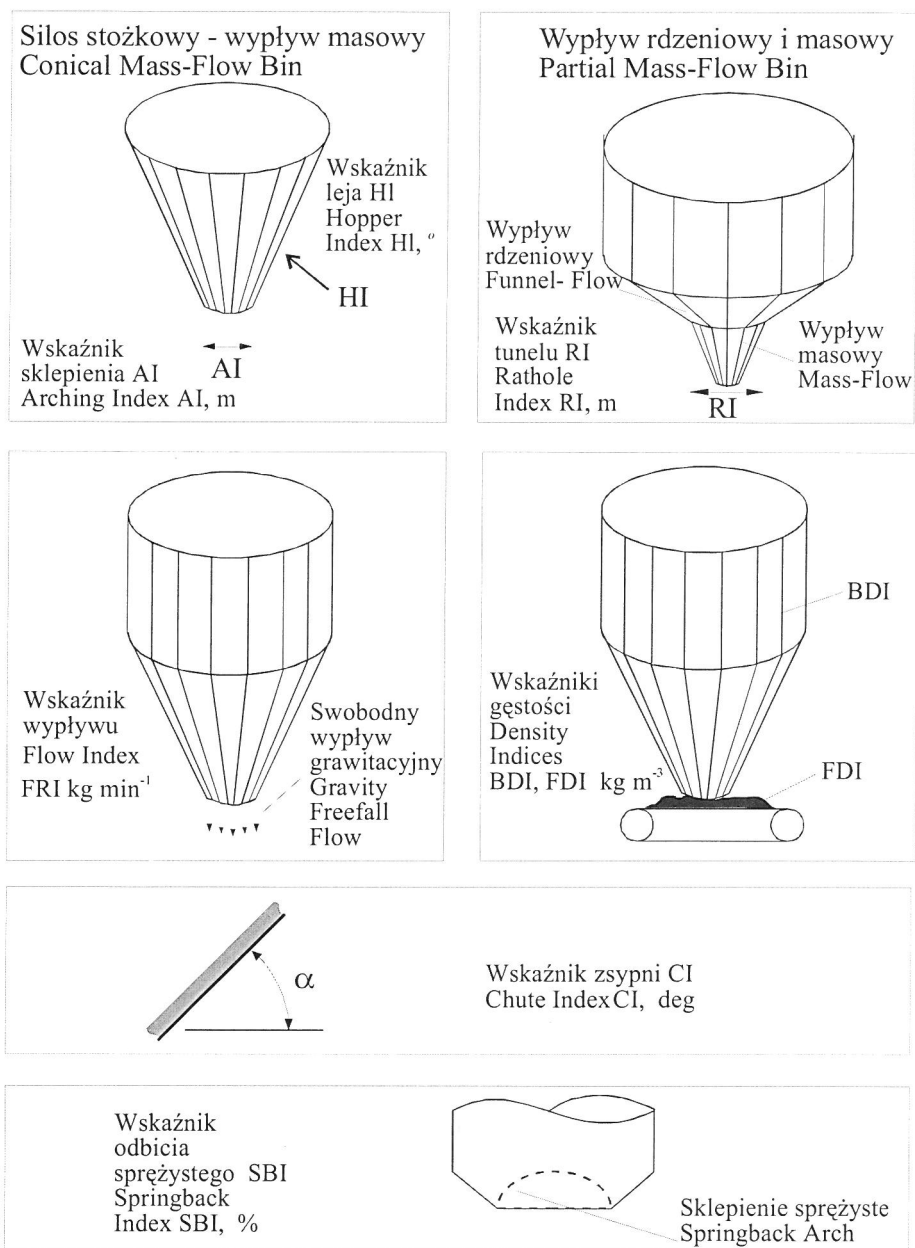
JR Johanson Inc. proponuje badania materiałów w szerokim zakresie temperatury i wilgotności. W standardowych testach proponuje się wyznaczanie gęstości, przepuszczalności, wytrzymałości oraz katów tarcia i adhezji. W zakresie usług jest także wyznaczanie wskaźników płynięcia zaproponowanych przez Johansona. Właściwości do wyznaczania wskaźników mierzone są przy naporach i współczynnikach skali odpowiadających rozmiarom urządzeń uczestniczących w rozważanym procesie. Niektóre wskaźniki mają wymiar fizyczny wyrażony w jednostkach stosowanych w USA z racji ich występowania na tym rynku. Zestaw wskaźników z ilustracją ich interpretacji fizycznej przedstawiono na rysunku 67 [61].

Wartości wskaźników wyznaczone są pod określonym naporem i stosownie do skali urządzeń technologicznych rozważanego procesu. Wartości cytowane niżej obowiązują dla średnicy silosu $D = 10$ ft (3,05 m) i średnicy otworu wysypowego $d = 1$ ft (0,305 m).

Wskaźnik sklepienia AI (Arching Index) to średnica otworu wylotowego zapewniająca załamanie sklepienia w stożkowym zbiorniku. Przyjmuje wartości od 0 do 4 ft (1,22 m). Jeżeli otwór wylotowy jest mniejszy niż AI, nie wystąpi grawitacyjny wpływ materiału. AI związany jest z właściwościami fizycznymi następującą zależnością: $AI = 2.2\sigma_c/\gamma$, wartości σ_c i γ mierzone są pod naporem równym $3\gamma d/2$.

Wskaźnik tunelu RI (Ratholing Index) to zalecana średnica kołowego kanału wypływu zapewniająca załamanie się ściany tunelu i zupełne opróżnienie silosu o wypływie rdzeniowym. Przyjmuje wartości w zakresie od 0 do 9,15 m. W zbiorniku o średnicy kanału mniejszej niż RI materiał nie zsypuje się do kanału wysypowego. RI jest także miarą skłonności materiału do zbrylania. W przypadku kiedy po spoczynku RI przekracza 10 ft (3 m) konieczne jest urządzenie do rozbijania brył materiału. Z właściwościami fizycznymi materiału wskaźnik RI jest związany zależnością: $RI = 2,5 \cdot \sigma_c/\gamma$ przy czym wartości σ_c i γ mierzone są pod naporem równym γd .

Wskaźnik leja HI (Hopper Index) to zalecana wartość połowy kąta stożkowego leja wysypowego zapewniająca poślizg wzdłuż ściany leja. Opisuje go zależność: $HI = 42 - \varphi'$, gdzie φ' to kąt tarcia kinetycznego zmierzony pod naporem γd , albo jeśli φ' jest wyższy przy wyższym naporze - należy stosować φ' zmierzony pod naporem γD .



Rys. 67. Wskaźniki technologiczne Johansona [61]

Fig. 67. Johanson indices [61]

Wskaźnik szybkości wypływu FRI (Flow Rate Index) to maksymalna spodziewana szybkość wypływu po odpowietrzeniu proszku w silosie. Przyjmuje wartości w zakresie $1\text{--}12000\text{ lb}\cdot\text{min}^{-1}$ (około $0,5\text{--}5500\text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$) i jest miarą szybkości wypływu przez otwór wysypowy o średnicy d . Niska wartość FRI oznacza, że proszek jest drobnoziarnisty i bardzo ściśliwy. Materiał o cząstkach większych niż $400\text{ }\mu\text{m}$ jest zazwyczaj nieściśliwy, przepuszczalny i wykazuje wysoką wartość FRI. Zmiany wartości wskaźnika mogą być sygnałem segregacji bądź zmian składu mieszaniny w trakcie procesu technologicznego.

Wskaźniki gęstości: FDI (Feeder Density Index) oraz BDI (Bin Density Index) to wartości gęstości na podajniku i w silosie. FDI to gęstość zmierzona pod naporem γ_d , a BDI to gęstość zmierzona pod naporem γ_d .

Wskaźnik zsypani CI (Chute Index) to zalecany kąt nachylenia rynny zsypanej w obszarach udarowego kontaktu z materiałem. Przyjmuje wartość $CI = ASC + 10^\circ$, gdzie ASC to kąt tarcia ślizgowego po płaskiej powierzchni, próbki najpierw dociśniętej naporem $4700\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ a następnie odciążonej przed nachyleniem powierzchni.

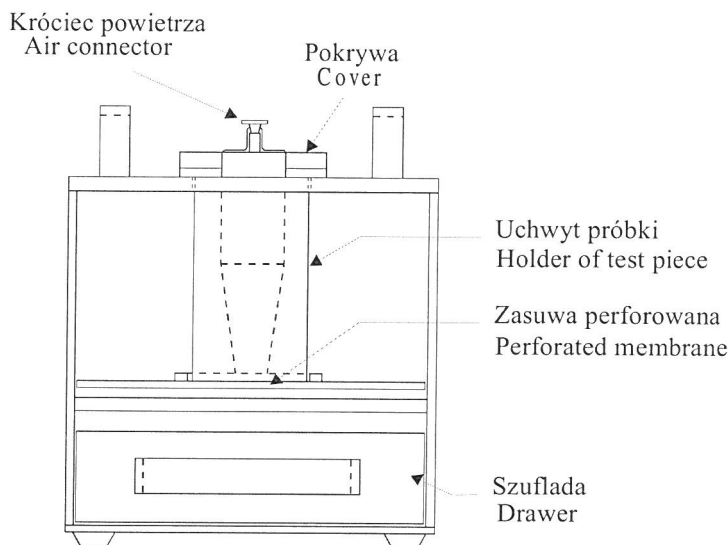
Wskaźnik odbicia sprężystego SBI (Springback Index) to wartość odkształcenia odwracalnego po konsolidacji wyrażona w procentach; wskazuje kiedy może wystąpić sklepienie w materiałach sprężystych (jak słoma, drewno, mika, pianka poliuretanowa itp.) i, że potrzebne są dalsze pomiary. Przy wyznaczaniu SBI materiał jest zagęszczany pod naporem $D \times BDI$ i mierzony jest procentowy przyrost wysokości próbki po zdjęciu obciążenia.

Znajomość charakterystyki materiału wyrażonej w wartościach wskaźników pozwala zaprojektować proces technologiczny o przewidywalnym przebiegu. Johanson [61] przedstawia przykład wykorzystania znajomości wskaźników materiałów dla zapewnienia przebiegu procesu mieszania bez segregacji składników mieszanki.

Tester jakości Jenike & Johanson

Tester firmy Jenike & Johanson składa się z dwu podzespołów: korpusu zawierającego pojemnik próbki oraz układu sterującego. Pojemnik próbki (rys. 68) o kształcie cylindrycznym w górnej części i stożkowym w dolnej ma objętość jednego galona ($3,785\text{ dm}^3$). Górna powierzchnia pojemnika zamykana jest szczelną pokrywą, w której mieści się króciec wlotu sprężonego powietrza oraz mocowanie manometru. Wylot stożkowej części pojemnika zamykany jest przesuwaną płytą perforowaną o otworach mniejszych niż wymiar najmniejszych ziaren testo-

wanego materiału. Procedura testu wymaga by próbka przed pomiarem była poddana serii wstrząsów dla napowietrzenia.



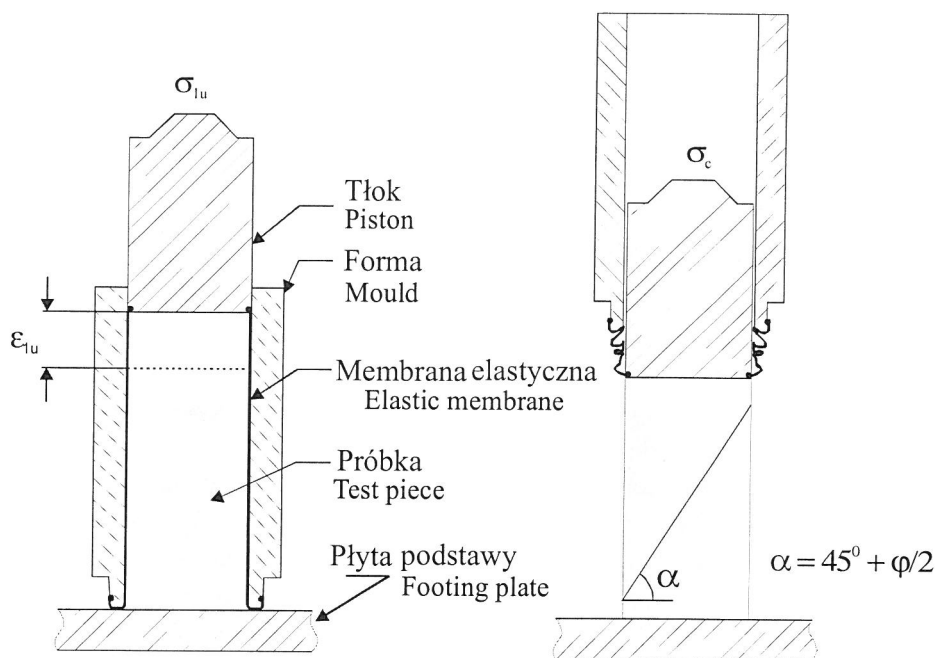
Rys. 68. Aparat kontroli jakości firmy Jenike & Johanson [110]

Fig. 68. Jenike & Johanson quality control tester [110]

Wybrany, właściwy dla materiału pojemnik próbki jest umieszczany w korpusie i delikatnie napełniany. Pojemnik jest zamykany pokrywą i materiał poddawany jest ciśnieniu powietrza o przyjętej wartości, które ustalane jest za pomocą regulatora i utrzymywane przez 30 sekund. Po tym czasie ciśnienie jest obniżane do zera, a wylot pojemnika otwierany przez usunięcie perforowanej płytki przesuwnej. Następnie włączany jest miernik ciśnienia, a ciśnienie w pojemniku powoli podnoszone do chwili aż załame się sklepienie u wylotu i materiał zacznie wypływać z pojemnika. Cykl czynności od konsolidacji do wypływu materiału powtarzany jest czterokrotnie (co najmniej) dla tego samego ciśnienia konsolidacji. Jeżeli zachodzi potrzeba cały proces jest powtarzany dla innego ciśnienia konsolidacji. Dla porównania wyników uzyskiwanych z testera z wynikami metody bezpośredniego ścinania przeprowadzono pomiary na mące, pyłe wapiennym i sodzie kuchennej. Część testów wykazała dobrą zgodność, a część była niezgodna z wynikami testu bezpośredniego ścinania. Autorzy uważają, że tester może być skutecznie stosowany do porównywania partii tego samego materiału [110].

Aparat jednoosiowego ściskania POSTEC

Kierując się przesłankami podobnymi do podawanych przez innych konstruktorów aparatury testującej specjaliści norweskiego ośrodka badawczego POSTEC również podjęli próbę skonstruowania testera jakości materiałów sypkich. Tester należy do grupy aparatów pośredniego ścinania, a jego opis przytaczamy za konstruktorami [87]. W procesie jednoosiowego ściskania można wyznaczyć wytrzymałość na ściskanie podobną do wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie σ_c wyznaczonej metodą bezpośredniego ścinania. Pomiar wymaga ułamka czasu potrzebnego dla pomiaru metodą Jenikego. Ze względu na przyjętą procedurę konsolidacji tester nie nadaje się do wyznaczania parametrów dla projektowania silosów, chyba że zostaną zastosowane współczynniki korekcyjne. Przyjęta procedura zapewnia jednak minimalny rozrzut wyników, co wraz z krótkim czasem pomiaru czyni aparat efektywnym testerem jakości. W aparacie POSTEC (rys. 69a) próbka umieszczona jest w lekko stożkowej formie i konsolidowana za pomocą tłoka poruszającego się pionowo w dół. Elastyczna membrana rozciągnięta jest między zewnętrzną powierzchnią tłoka i wewnętrzną powierzchnią formy. Ściana formy jest smarowana dla utrzymania możliwie najniższego tarcia. Forma napełniana w położeniu „do góry nogami”, następnie szczelnie zamykana dolną pokrywą i umieszczana w korpusie aparatu. Włączany jest napęd tłoka i próbka jest konsolidowana. Po osiągnięciu założonego naporu σ_{lu} , przy przemieszczeniu ε_{lu} ruch tłoka jest zatrzymywany. Po stabilizacji próbki przez założony czas jest ona odciążana do momentu wyzerowania naporu, a forma jest unoszona ponad próbkę (rys. 63b). Wytrzymałość na ściskanie jest mierzona po uruchomieniu ruchu tłoka ku dołowi. Wartość maksymalna σ_c występuje tuż przed rozpadnięciem się próbki.



Rys. 69. Aparat jednoosiowego ściskania POSTEC [87]

Fig. 69. POSTEC uniaxial tester [87]

Aparat umożliwia dokładną obserwację tworzenia się powierzchni ścięcia, która teoretycznie tworzy kąt $\alpha = 45^\circ + \varphi/2$ z poziomem. Bardziej skomplikowany kształt powierzchni ścinania wskazuje na to iż próbka była zbyt niska. Stosując ściśle opracowaną procedurę w badaniach wapienia BCR Maltby i Enstad otrzymywali odchylenia wartości σ_c nie większe niż $\pm 0,13$ kPa niezależnie od poziomu naporu konsolidacji. Otrzymali też dobrą powtarzalność wyników z odchyleniami nie wyższymi niż 5%. Dobra powtarzalność wyników wraz z krótkim czasem pomiaru i niezależnością wyników od operatora czynią, zdaniem autorów, tester POSTEC efektywnym aparatem kontroli jakości właściwości proszków. Dokładność metody jest wystarczająca dla wykrywania różnic jakości między partiami materiału w procesach technologicznych. Urządzenie może być stosowane także w badaniach ściśliwości słabo zagęszczonych próbek, wyznaczania modułu sprężystości, czy badaniach relaksacji i pełzania materiałów ziarnistych.

Wskaźniki Carra

W przemyśle chemicznym, a zwłaszcza farmaceutycznym istnieje szczególnie silne zapotrzebowanie na charakterystyki drobnoziarnistych proszków. Płynność proszku ma zasadniczy wpływ na operacje transportu, mieszania, dozowania, przechowywania, granulowania czy formowania tabletek. W tym zakresie utrwaliły swoją użyteczność wskaźniki Carra. Amerykańskie Stowarzyszenie Badania Materiałów (ASTM) wprowadziło standard wyznaczania właściwości proszków [7] określanych wskaźnikami Carra (Carr indices). Aktualnie dostępna jest na rynku aparatura wielu producentów działająca zgodnie ze standardem. Metoda ma zastosowanie do materiałów swobodnie płynących oraz o niewielkiej kohezji, przy maksymalnym wymiarze ziarna nie większym niż 2 mm. Materiał w stanie napowietrzonemu musi wypływać przez otwór wysypowy o średnicy $7\text{mm} \pm 1\text{mm}$. Na metodę składa się osiem testów. Wyznacza się z nich dziesięć następujących wskaźników (wskaźniki są mierzone z wyjątkiem C i F, które są wyliczane):

- A. Kąt nasypu Carra (Carr Angle of Repose)
- B. Kąt zsypania Carra (Carr Angle of Fall)
- C. Kąt różnicy Carra (Carr Angle of Difference)
- D. Gęstość usypna Carra (Carr Loose Bulk Density)
- E. Gęstość upakowana Carra (Carr Packed Bulk Density)
- F. Ściśliwość Carra (Carr Compressibility)
- G. Kohezja Carra (Carr Cohesion)
- H. Jednorodność Carra (Carr Uniformity)
- I. Kąt łopatkowy Carra (Carr Angle of Spatula)
- J. Rozproszanie Carra (Carr Dispersibility).

Równocześnie popularny w praktyce jest wskaźnik Carra [7] definiowany jako:

$$CI(\%) = \frac{100 \cdot (\rho_t - \rho_b)}{\rho_t} \quad (48)$$

gdzie: ρ_t – gęstość ubita, ρ_b – gęstość usypna.

Parametr ten obliczany jest po zagęszczeniu materiału przez ubijanie w pojemniku cylindrycznym o objętości od 10 do 1000 ml przy liczbie uderzeń bijaka ustalonej przez użytkownika (w zakresie 10 do 500). Z tego samego pomiaru można obliczyć inny popularny parametr – wskaźnik Hausnera:

$$R_h = \frac{\rho_t}{\rho_b} \quad (49)$$

W praktyce uważa się, że proszek płynie łatwo przy CI mieszczącym się w zakresie 5 do 15%, a trwałe tabletki można wytworzyć z proszku o R_h nie wyższym niż 1,6.

2. KONTROLA IN-LINE STRUKTURY PRODUKTÓW ROZDROBNIONYCH

W aktualnych warunkach masowej, zautomatyzowanej produkcji największą wartość dla praktyki mają metody charakteryzowania materiałów w trakcie procesu wytwarzania (in-line). W pierwszej kolejności zajęto się pomiarem in-line rozkładu wielkości cząstek. Znajomość charakterystyki rozkładu wielkości cząstek umożliwia bowiem kontrolę jakości i sterowanie wydajnością procesu. Wydajność procesów produkcyjnych wciąż rośnie i opóźnienie pomiędzy pomiarem laboratoryjnym, a korektą procesu może być nieakceptowalne.

Aktualnie najchętniej stosuje się transport pneumatyczny, gdyż umożliwia on skuteczne sterowanie przepływem z zastosowaniem metod optycznych. Harvill i in. [50] opisują jedno z takich urządzeń oparte na dyfrakcji światła lasera, a użyte w szerokiej gamie zastosowań laboratoryjnych i przemysłowych. Układ pomiarowy składa się z głowicy optycznej, interfejsu, komputera i oprogramowania. Strumień cząstek przepływa przez cylindryczny kanał w poprzek wiązki światła laserowego. Szybkość strumienia cząstek nie ma wpływu na wynik pomiaru. Kiedy cząstki przecinają wiązkę, rozproszone światło przechodzi przez soczewkę i jest skupiane na pierścieniowym detektorze. Detektor jest skanowany z wielką szybkością przez kartę interfejsu, która rejestruje poziomy sygnał na poszczególnych pierścieniach. Każdy pierścień detektora mierzy całkowitą intensywność sygnału. Każda cząstka rozprasza światło skierowane na wszystkie pierścienie detektora. Mierzony sygnał odpowiada sumarycznemu światłu rozproszonemu przez wszystkie cząstki. Po zebraniu niezbędnej liczby pomiarów dzięki odpowiedniemu oprogramowaniu obliczana jest względna koncentracja cząstek. Urządzenie umożliwia efektywne wyznaczenie rozkładu wielkości i koncentracji cząstek w czasie rzeczywistym. Zastosowano je skutecznie w procesie wytwarzania farmaceutyków do optymalizacji pracy młyna w układzie sprzężenia zwrotnego kompensującego odchylenie nastawienia, zużycie, błędy operatora, zmienność surowca itp.

Podobnie jak w przemyśle farmaceutycznym kontrola in-line może przynieść ogromne korzyści w przemyśle spożywczym. Kluczowym czynnikiem jest tu struktura produktu. Analizę aktualnych trendów rozwojowych w tej branży przytaczamy za specjalistami potężnego uczestnika rynku - koncernu Unilever [10]. Wymagania rynku wymuszają precyzyjne sterowanie procesów produkcyjnych, co z kolei wymaga lepszego rozumienia zależności struktury produktu od parametrów procesu i zastosowanych urządzeń. Konieczne stają się precyzyjne pomiary in-line. Atrybuty struktury o fundamentalnym znaczeniu to: ogólny skład

produktu, właściwości i stan poszczególnych faz składowych, rozkład właściwości wewnątrz faz oraz układ przestrzenny poszczególnych faz. Autorzy dokonali przeglądu metod pomiarowych, które mogą być zastosowane do pomiaru in-line oraz wskazali ich ograniczenia.

- Czujniki do oznaczania składu (wilgotności, zawartości tłuszczu, etc.) osiągają aktualnie dokładność rzędu 0,1 do 1%. Jest to na ogół poziom wystarczający, jednak powinien być skrócony (albo wyeliminowany) czas kalibracji ze względu na nagłe zmiany portfela produktów.
- Czujniki do kontroli stanu fazowego będą stosowane głównie do zrozumienia podstaw procesu dla późniejszego projektowania nowych procesów oraz do sterowania procesami. Potencjalny rozwój kontroli stanu fazowego nastąpi na bazie źródeł i detektorów impulsu akustycznego, których zasadniczą zaletą jest pomiar zdalny. Kontrola jakości in-line w tym zakresie pozostanie jednak nadal trudna, gdyż końcowe stadium procesu (żelowanie lub krystalizacja) często odbywa się już po zapakowaniu, albo nawet w trakcie przechowywania.
- Istnieją pewne możliwości bezwzględnego oznaczania ilości, jednak aktualnie dostępne metody zapewniają jedynie jakościowe porównanie wielkości cząstek. W przypadku szybko zmieniającego się portfela produktów taki poziom dokładności pomiaru może nie być wystarczający. Takie zrozumienie procesu jak i sterowanie elastycznym wytwarzaniem wymaga informacji ilościowej. Wymaganie to może spełnić obrazowanie in-line oraz analiza obrazu. Ścisłe śledzenie tej informacji aż do finalnej fazy wytwarzania zapewni równocześnie poprawne sterowanie oraz kontrolę jakości.
- Zagadnienie układu przestrzennego cząstek wewnątrz objętości produktu jest wciąż na bardzo wczesnym stadium rozwoju i nie ma jeszcze istotnego wpływu na sprzęt używany w procesach wytwarzania.

3. TENDENCJE ROZWOJU ZASTOSOWAŃ

W ostatnim dwudziestoleciu XX wieku wystąpiło wzmożone zainteresowanie nauki materiałami rozdrobnionymi. Przemysł używał coraz więcej surowców w postaci materiałów ziarnistych, a także wytwarzał coraz więcej produktów w takiej formie. Globalna konkurencja wymusza zwiększanie skali produkcji, co pociąga za sobą konieczność automatyzacji procesów technologicznych. Równocześnie wymaga się powtarzalnej i stabilnej jakości produktów oznaczonych określoną marką i nazwą. Forma materiału sypkiego znakomicie ułatwia przechowywanie, przetwarzanie, mieszanie, dozowanie, pakowanie i dystrybucję towa-

rów. Zapotrzebowanie przemysłu stymulowało rozwój wiedzy o materiałach ziarnistych w trzech obszarach:

- badań teoretycznych w kierunku sformułowania modelu konstytutywnego ośrodka ziarnistego,
- metod wyznaczania właściwości mechanicznych dla potrzeb projektowania urządzeń i procesów technologicznych, oraz
- opracowania prostych metod badania jakości i wskaźników jakości.

Począwszy od lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku nastąpił niebywały wzrost mocy obliczeniowej powszechnie dostępnych komputerów, co dało nowe możliwości badań teoretycznych. Powstały nowe ujęcia teoretyczne, przy czym dojrzałą formę osiągnęły dwa kierunki – modelowanie numeryczne uwzględniające oddziaływania w indywidualnych kontaktach oraz wykorzystanie znanych wcześniej teorii wymagających skomplikowanych obliczeń. W zakresie modelowania wypadkowej oddziaływań kontaktowych utrwaliła swoją obecność metoda elementów dyskretnych (DEM – discrete element method) mająca swe korzenie w pracy Cundalla i Stracka [18]. Przykładem nowego wykorzystania znanej teorii są prace Mühlhausa i współautorów [np. 100] oraz Changa i współautorów [np. 17], gdzie autorzy wykorzystują teorię niesymetrycznej sprężystości (teorię Cosseratów).

W zakresie badań eksperymentalnych opracowano nowe metody pomiarowe oraz doskonalono metody znane, aby dać interpretację efektów dotychczas niewyjaśnionych oraz uprościć żmudne i czasochłonne procedury pomiarowe. W zakresie wyznaczania parametrów technologicznych szeroko zaakceptowano i wpisano do norm projektowania metodę Jenike [60]. Spośród licznych, wcześniejszych opracowań aparat pierścieniowy prawdopodobnie na trwałe pozostanie wśród uznanych technik pomiarowych. Jego przewaga nad innymi urządzeniami uwidacznia się zwłaszcza w badaniach materiałów roślinnych i produktów spożywczych. Materiały te z powodu odkształcalności granul wymagają stosunkowo długiej drogi ścinania, zaś ta w aparacie pierścieniowym jest nieograniczona. Druga istotna zaleta aparatu pierścieniowego to możliwość badań przy niskich poziomach obciążenia. Pionowe obciążenie próbki odniesione do stosunkowo dużej powierzchni poziomego przekroju kanału aparatu daje niewielkie wartości naporu pionowego. Rozpoznanie mechanicznego zachowania się materiałów ziarnistych pod niskim poziomem naporu jest aktualnie szczególnie oczekiwane przez praktykę. Obie wymienione zalety otwierają szerokie pole zastosowań aparatu pierścieniowego oraz możliwość zrozumienia niewyjaśnionych dotychczas zjawisk.

Prawdopodobnie także dwie inne metody sprzed lat pozostaną w standardach wyznaczania właściwości materiałów ziarnistych – pomiar kąta usypu oraz pomiar kąta tarcia trybometrem nachylnym.

Znamiennym trendem ostatnich lat w technologii materiałów ziarnistych było poszukiwanie metod badania i wskaźników jakości. W sensie mechaniki badanie jakości materiału sprowadza się do wyznaczenia jego płynności. Miarą płynności w rozumieniu teorii Jenike [60] jest funkcja płynięcia $ff = \sigma_c(\sigma_1)$ – zależność wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie od większego naporu konsolidującego. Metoda Jenike ma jednak w odniesieniu do zastosowań praktycznych istotne wady. Badania są żmudne i czasochłonne. Opracowanie i interpretacja wyników wymagają znacznej wiedzy. Praktycy przemysłu oczekują więc szybkiej i prostej metody oraz jednoznacznego i zrozumiałego wskaźnika jakości materiału. Placówki naukowe oraz firmy konsultingowe przedstawiają kolejne propozycje. Wciąż jednak nie można mówić o opracowaniu metody, która uzyskałaby szeroką akceptację. Wydaje się, że w środowisku inżynierii procesów chemicznych przyjął się zestaw wskaźników Johansona [61].

Podsumowanie

Pod koniec XX wieku wytworzyło się kilka grup zastosowań mechaniki ośrodków sypkich. Jednak wielokrotnie dochodzi do sytuacji, w której przedstawiciele istniejących ośrodków badawczych często nie rozumieją się dobrze, a nawet używają tych samych pojęć w różnym znaczeniu. Podobnie rozwój metod tworzenia charakterystyk materiałów przebiega w różnych kierunkach, zgodnie z zainteresowaniami poszczególnych grup. Poniżej autorzy kreślą stan aktualny i przewidywane kierunki rozwoju standaryzacji metod charakteryzowania materiałów sypkich w poszczególnych grupach zastosowań.

W zakresie metod pomiarowych służących weryfikacji modeli konstytutywnych materiału trwałym punktem odniesienia pozostanie metoda trójosiowego ściskania. Słusznie zarzuca się jej wprawdzie, że nie jest „prawdziwie” trójosiowa, jednak mimo wielu prób nie udało się dotychczas opracować efektywnej, dokładniejszej metody tego typu. Wyniki każdej nowej metody, dla jej uwiarygodnienia porównuje się z wynikami metody tradycyjnej. Modele konstytutywne opracowane przez teoretyków i zweryfikowane laboratoryjnie wchodzą bezpośrednio do praktyki jako gotowe elementy składowe programów do projektowania inżynierskiego, gdzie niekiedy pozostają niewidoczne dla mniej dociekliwych projektantów.

Inżynieria budowlana w zakresie projektowania silosów pozostanie przy metodzie bezpośredniego ścinania znanej w tej dziedzinie jako metoda Jenikego. Pierwszeństwo tej metody zostało utrwalone w Eurocode 1 – europejskiej normie projektowania, poprzez zalecenie jej do wyznaczania wytrzymałości przechowywanych materiałów. Badania autorów wykazały, że metoda w zakresie zastosowań przewidzianych Eurocode 1 nadaje się do stosowania dla ziarna zbóż i innych materiałów pochodzenia biologicznego. W przypadku materiału wilgotnego wymaga jednak wydłużenia drogi ścinania (w stosunku do zalecanego przez Eurocode 1) do 0,1 wymiaru średnicy komory pomiarowej.

Następny szeroki obszar zastosowań, to badania ziarnistych produktów rynku detalicznego. Materiał na tym rynku jest przemieszczany w ilościach od tysięcy ton w silosie, poprzez dziesiątki ton w skrzyni samochodu ciężarowego do 1 kg w pudełku kartonowym albo torebce. Oznacza to zmienność naporu w zakresie sześciu rzędów wielkości – a jak to wykazano w licznych badaniach właściwości materiału zależą od naporu. W żywotnym zainteresowaniu producentów towarów rynku detalicznego pozostają także takie parametry jak: spadek ciśnienia w transporcie pneumatycznym, skłonność do segregacji oraz skłonność do zbrylania materiału. Występuje więc szereg zagadnień, które są poza zainteresowaniem dwu wyżej wymienionych grup badaczy. Klient może stawiać wymagania wobec jakości produktu zupełnie nie przejawiające się w znanych testach. Nie zostały one do tej pory w pełni rozpoznane ani skodyfikowane. Dlatego poszukiwania metod charakteryzowania materiałów w tym zakresie, pozostają w stadium początkowym i nie sposób odpowiedzialnie przedstawić prognozy ich rozwoju.

Następne pole rozwoju różnych sposobów pomiaru, to kontrola in-line. Wprawdzie i w tym wypadku można mówić o początkowym stadium rozwoju, ale wydaje się, że z powodu oczywistych korzyści płynących ze sterowania procesem tj. obniżenia kosztów i możliwości utrzymania stabilnej jakości produktu można prognozować szybki postęp w tym zakresie. Stosuje się różnego rodzaju przetworniki i wciąż prowadzi badania nad nowymi. Zasadnicze wyzwania to:

- obniżenie kosztu przetwornika
- podniesienie jego niezawodności
- opracowanie programów obróbki danych, które przetworzą sygnał z przetwornika w informację użyteczną dla sterowania procesem.

Poza obszarem rozważań pozostawiono materiały ziarniste o wymiarze poniżej dziesięciu mikrometrów. Jest to wprawdzie bardzo ważna grupa materiałów, choćby ze względu na rozwój nanotechnologii, to jednak, zdaniem autorów, zasadnicze dla ich zachowania są zjawiska fizyczne inne niż grawitacja. Z tych względów tworzą grupę materiałów, która musi być traktowana odrębnie.

V. PIŚMIENNICTWO

1. **ACI 313-91:** Standard practice for design and construction of concrete silos and stacking tubes for storing granular materials. American Concrete Institute. Box 19150 Redford Station. Detroit Michigan 48219, 1995.
2. **Arnold P.C., Roberts A.W.:** Fundamental aspects of load-deformation behavior of wheat grains. Transactions of the ASAE 12 (1), 104-108, 1969.
3. **Arthur J.R.F., Dunstan T., Engstad G.G.:** Determination of the flow function by means of a cubic plane strain tester. Int. J. Bulk Solids Storage in Silos., 1(2), 7-10, 1985.
4. **AS 3774-1996:** Loads on bulk solids containers. Standards Australia. 1 The Crescent, Home bush, NSW 2140, 1996.
5. **ASAE Standards, D241.4:** Density, specific gravity, and mass-moisture relationships of grain for storage. St. Joseph, MI, ASAE, 1999.
6. **ASAE Standards, EP433:** Loads exerted by free-flowing grain on bins. St. Joseph, MI, ASAE, 1999.
7. **ASTM - D4781-99:** Standard Test Method for Mechanically Tapped Packing Density of Fine Catalyst Particles and Catalyst Carrier Particles. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2000.
8. **ASTM D6393-99:** Standard Test Method for Bulk Solids Characterization by Carr Indices. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2000.
9. **Bell T.A., Ennis B.J., Grygo R.J., Scholten W.J.F., Schenkel M.M.:** Practical Evaluation of the Johanson hang-up indicizer. Bulk Solids Handling 14(1), 117-125, 1994.
10. **Bijnen F.G.C., H. van Aalst, P.-Y. Baillif, J.C.G. Blonk, Kersten D., F. Kleinherenbrink, R. Lenke, M.L.M.:** In-line structure measurement of food products. Powder Technology 124, 188-194, 2002.
11. **Bishop M.A., Henkel D.J.:** The measurement of soil properties in the triaxial test. London, 1974.
12. **BN-71/9160-03:** Pasze – oznaczenie wytrzymałości kinetycznej pasz granulowanych.
13. **Bock R.G., Puri V.M., Manbeck H.B.:** Triaxial test sample size effect on stress relaxation of wheat en masse. Transactions of the ASAE, 34(3), 966-971, 1991.
14. **Bock R.G., Puri V.M., Manbeck H.B.:** Modeling stress relaxation response of wheat en masse using the triaxial test. Transactions of the ASAE 32(5), 1701-1708, 1989.
15. **Byszewski W., Haman J.:** Gleba – maszyna - roślina. PWN, 1977.
16. **Cenkowski S., Bielewicz ., Britton M.G.:** A single kernel creep and recovery test. Transactions of the ASAE, 34(6), 2484-2490, 1991.
17. **Chang C.S. i L. Ma.:** Modelling of discrete granulates as micropolar continua. Journal of Engineering Mechanics. 116(12): 2703-2721, 1990.
18. **Cundall P.A., Strack O.D.L.:** Discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique. 29 (1), 47- 65, 1979.
19. **Dobrzański B.:** Mechanizmy powstawania uszkodzeń nasion roślin strączkowych. Acta Agrophisica, 13, 1998.
20. **Dobrzański B.:** Metodyczne aspekty oceny mechanicznych właściwości nasion grochu. Praca doktorska. Instytut Agrofizyki PAN, Lublin, 1990.
21. **Drescher A.:** Badanie mechanizmów plastycznego płynięcia materiałów ziarnistych. Prace IPPT PAN, 1975.

22. **Drescher A.:** Metody obliczeń parć i przepływu materiałów ziarnistych w zbiornikach. PWN, Warszawa-Poznań, 1983.
23. **Dziambła J., Dzik D., Laskowski J. :** Wpływ nawożenia azotowego na wybrane właściwości ziarna pszenicy. Inżynieria Rolnicza, 10 (30), 121-127, 2001.
24. **Dzik D., Laskowski J. :** Badanie właściwości przemiałowych wybranych pszenic. Inżynieria Rolnicza, 8, 63-70, 2000.
25. **EFCE – European Federation of Chemical Engineering.** Glossary of terms on storage and flow of particulate solids. <http://magis.cz/efce/3/under.htm>, 1989.
26. **Eurocode 1:** Basis of design and actions on structures – Part 4: Actions in silos and tanks. European Committee for Standardization, Brussels, 1996.
27. **Frączek J.** Tarcie ziarnistych materiałów roślinnych. Zesz. Nauk. Akademii Rolniczej w Krakowie, 252, 1999.
28. **Frączek J., Hebda T.:** Próba zastosowania metody Rockwella do badania twardości nasion fasoli. Inżynieria Rolnicza, 9, 179-187, 2001.
29. **Frączek J., Kaczorowski J., Ślipek Z.:** The interaction of individual surface microridges at the course of friction between construction walls and plant material. Mat. III Int. Conf. of Physics of Agro and Food Products, Lublin, 1998.
30. **Frączek J., Ślipek Z.:** Fatigue strength of wheat grains. Part 1. Analysis of grain deformation at multiple loads. Int. Agrophysics, 13, 93-97, 1999.
31. **Frączek J., Ślipek Z.:** Influence of humidity and multiple mechanical impacts upon the biological value of wheat grains. Mat. 6th Int. Conf. on Agrophysics, Lublin, 1997.
32. **Frączek J.:** The influence of selected factors on the force value of internal friction of rye and wheat grains. Int. Agrophysics, 11, 293-299, 1997.
33. **Frączek J.:** Wytrzymałość ziarna zbóż obciążanego w masie. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 443, 375-384, 1996.
34. **Francik S., Frączek J.:** Model development of the external friction of granular vegetable materials on the basis of artificial neural networks. Int. Agrophysics, 15, 231-236, 2001.
35. **Francik S., Frączek J.:** Wpływ kształtu pojedynczych nasion na wartość siły tarcia zewnętrznego. Inż. Rolnicza, 4 (37), 83-89, 2002.
36. **Frontczak J., Metzger T.:** Określenie zależności współczynnika tarcia wewnętrznego od modułu Younga ziarna kukurydzy o różnej wilgotności. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 320, 81-88, 1987.
37. **Gaines C. S., Finney P. F., Fleege L. M., Andrews L. C.:** Predicting a hardness measurement using the Single-Kernel Characterization System. Cereal Chem., 73, 278-286, 1996.
38. **Gąsiorowski H., Kołodziejczyk P., Obuchowski W.:** Twardość ziarna pszenicy. Przegląd Zbożowo-Młynarski, 7, 6-8, 1999.
39. **Gąsiorowski H., Kołodziejczyk P.:** Mikrotwardość ziarna żyta. Przegląd Zbożowo-Młynarski, 5-6, 9-12 i 19, 1990.
40. **Gąsiorowski H., Poliszko S.:** A wheat endosperm microhardness index. Acta Alimentaria, 6/2, 113-117, 1977.
41. **Gebhard H.:** The stress and strain behaviour of powders in shear tests. 1st European Symposium on the Stress and Strain Behaviour of Particulate Solids. CHISA'84, Praha, Czechoslovakia, 1984.

42. **Geodecki M., Grundas S. :** Ocena cech technologicznych pojedynczych ziarniaków pszenicy w zależności od ich położenia w kłosie. Przegląd Zbożowo-Młynarski, 4, 25-26, 1999.
43. **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.
44. **Greenway W.T.:** A wheat hardness index. Cereal Sci. Today, 14, 2, 4-7, 1989.
45. **Grisso R.D., Johnson C.E., Bailey A.C., Nichols.:** Influences of solid sample geometry on hydrostatic compaction. Transactions of the ASAE, 27(6), 1650-1653, 1984.
46. **Grundas S. :** Określenie cech fizycznych pojedynczych ziarniaków pszenicy przy zastosowaniu techniki rentgenowskiej i systemu SKCS. Inżynieria Maszyn, Konferencja Naukowa pt. Żywnienie Człowieka – Inżynieria Mechaniczna Żywności, Bydgoszcz, 51, 51-58, 2001.
47. **Grundas S., Hnilica P.:** Typy endospermu ziarna pszenicy a jego właściwości mechaniczne. ZPPNR, 320, 127-133, 1987.
48. **Harder J., Schwedes J.:** The development of a true biaxial shear tester. Part. Charact. 2, 149-153, 1985.
49. **Harr M.E.:** Mechanics of particulate media: a probabilistic approach.. Mc Graw-Hill International Book Company. New York, 1977.
50. **Harvill T.L., J.H. Hoog i D.J. Holve:** In-process particle size distribution measurement for pharmaceutical applications. Powder Handling and Processing, 7(2), 139-141, 1995.
51. **Hertz H.:** Gesammelte Werke, t I, Leipzig, 1895.
52. **Hesse T., Hoffmann O.H.:** Scherverhalten Körniger Landwirtschaftlicher Hanfwerke. Grundl. Landtechnik, 27(6), 205-213, 1977.
53. **Hoffmann O.H.:** Neuere Grundlagen der Mechanik Körniger Haufwerke. Grundl. Landtechnik, 25(2), 33-64, 1975.
54. **Horabik J., Grochowicz M.:** Wyznaczanie parametrów plastycznego płynięcia sypkich surowców spożywczych. Acta Agrophysica, 37, 29-38, 2000.
55. **Horabik J., Molenda M.:** Wpływ orientacji przestrzennej ziaren próbki na kąt tarcia wewnętrznego mierzony metodą trójosiowego ściskania. ZPPNR, 351, 133-140, 1988.
56. **Horabik J., Rusinek R.:** Pressure ratio of cereal grains determined in uniaxial compression test. International Agrophysics, 16(1), 23-28, 2002.
57. **Iliuszyn A.A.:** Ob odnoj teorii dlitelnoj prochnosti. Inżyniornyj żurnał. Miechanika twierdowo tiela. 3, 1967.
58. **ISO 11697:1995(E):** Bases for design of structures – Loads due to bulk materials. International Standard. ISO, 1995.
59. **Janssen H. A.:** Versuche über Getreidedruck in Silozellen.Verein Deutscher Ingenieure, 39, 1045-1049, 1895.
60. **Jenike A.W.:** Gravity Flow of Bulk Solids. Bulletin of the University of Utah, (52)29, 1961.
61. **Johanson J.R.:** Smooth out solids blending problems. Chemical Engineering Progress, (96) 4, 21-37, 2000.
62. **Johanson J.R.:** The Johanson indicizer system vs. the Jenike shear tester. Bulk Solids Handling, 12(2), 237-240, 1992.
63. **Kaczorowski J., Ślipek Z., Frączek J.** Modelling of the external friction kinetic process in plant materials. Part III. Mathematical model. Annual Rev. of Agricultural Engineering , 1/1, 95-104, 1996.

64. **Kaczorowski J., Ślipek Z.:** Modelling of the external friction kinetic process in plant materials. Part I. Analysis of the sliding contact of single microunevennesses of the plant and construction materials. *Annual Rev. of Agricultural Engineering*, 1/1, 79-87, 1996a.
65. **Kaczorowski J., Ślipek Z.:** Modelling of the external friction kinetic process in plant materials. Part II. Determination of the real contact area during kinetic friction of plant materials. *Annual Rev. of Agricultural Engineering*, 1/1, 87-94, 1996b.
66. **Kęska W.:** Badania sił przy zderzeniu nasion niektórych roślin uprawnych z powierzchniami roboczymi maszyn rolniczych. *Prace PIMR*, 41/2, 1996.
67. **Ketchum M.:** The design of walls, bins and grain elevators. McGraw-Hill Book Company. New York, 1919.
68. **Kezdi A.:** Handbook of soil mechanics. Akademiai Kiado, Budapest, 1974.
69. **Knowlton T.N., J.W. Carson, G.E. Klinzing i Wen-Ching Yang.:** The Importance of Storage, Transfer and Collection. *Chemical Engineering Progress*, (90)4, 44-54, 1994.
70. **Kolowca J.:** Badania nad wytrzymałością ziarna zbóż. *Zeszyty Naukowe AR w Krakowie*, 77, 1973.
71. **Konieczna M.:** Odształcenie ziarniaków ziarna pszenicy w warunkach kontrolowanego obciążenia dynamicznego. *Roczniki Nauk Rolniczych*, 77-C-1, 1986.
72. **Koper R., Grundas S.:** Moduł Younga i absorpcja barwnika w ziarnie pszenicy o zróżnicowanej zawartości białka. *ZPPNR*, 320, 151-157, 1987.
73. **Koper R.:** Właściwości mechaniczne ziarna i źdźbła pszenicy wyznaczone metodą interferometrii holograficznej i elastooptyki. Rozprawa habilitacyjna, AR Lublin, 1980.
74. **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*, 12(1), 31-40, 1962.
75. **Kragielskij I.W., Lankow A. A.:** O primienimosti formul Gierca dla rozczeta konturnoj płoszczadi. O prirodie trienija twiordych tieł. *Nauka i Technika*, 307-315, 1971.
76. **Kuipers H., Kroesbergen B.:** The significance of moisture continent, pore space, method of sample preparation and type of shear annulus used on laboratory torsional shear testing of soils. *Journal of Terramechanics*, 3, 4, 1966.
77. **Kustermann M.F., Kutzbach H.D.:** Young's modulus dependent on deformation velocity. *ASAE Paper*, 82-3055, 1982.
78. **Langman J.:** Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w inżynierii rolniczej. *Inżynieria Rolnicza*, 1(7), 153 -158, 1999.
79. **Lapko A., Prusiel J.A.:** Investigation on thermal effects in reinforced concrete cylindrical silo structures. *Proc. of the 3rd Israeli Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids*. Vol. 1, 4.25-4.30, 2000.
80. **Lapko A.:** Efekty oddziaływania materiału sypkiego na żelbetowe ściany komór w eksploatowanych silosach na zboże. *Zesz. Nauk. Politechniki Białostockiej*, 71, 1989.
81. **Laskowski J., Janiak G.:** Metodyka określania cech wytrzymałościowych ziarna dla potrzeb procesów przetwórczych. *Biul. Nauk. Przem. Pasz.*, 1, 45-58, 1996.
82. **Leyko J.:** Słownik terminologii mechaniki klasycznej. PWT, Warszawa, 1960.
83. **Li Y., Zang Q., Puri V.M., Manbeck H.B.:** Physical properties effect on stress-strain behavior of wheat en masse - part 1, load response dependence on initial bulk density and moisture content. *Transactions of ASAE*, 32(1), 194-202, 1989.

84. **Liao K., Paulsen M.R., Reid J.F., Ni B.C., Bonifacio-Maghirang E.P.:** Corn kernel breakage classification by machine vision using a neural network classifier. *Transactions of the ASAE*, 36(6), 1949-1953, 1993.
85. **Łukaszuk J., Horabik J.:** Wyznaczanie kąta tarcia wewnętrznego roślinnych materiałów sypkich. *Acta Agrophysica*, 65, 1-94, 2002.
86. **Łysiak G.:** Wpływ właściwości fizycznych surowców roślinnych na przebieg procesu rozdrabniania. Rozprawa doktorska. AR Lublin, 1997.
87. **Maltby L.P., G.G. Enstad:** Uniaxial tester for quality control and flow property characterization of powders. *Bulk Solids Handling*, 13(1), 135-139, 1993.
88. **Masters T.:** Sieci neuronowe w praktyce. WNT, 1996.
89. **Michalak D.:** Modelowe badania wytrzymałościowe ziaren zbóż na użytek projektowania maszyn rolniczych. *Prace PIMR*, 17-21, 1997.
90. **Mindlin R.D.:** Compliance of elastic bodies in contact. *J. Appl. Mechanics*, 16, 259-268, 1949.
91. **Mohsenin N.N.:** Physical properties of plant and animal materials, Gordon and Breach Science Publ. New York, 1970.
92. **Molenda M., Horabik J., Grochowicz M.:** Tarcie ziarna pszenicy. *Acta Agrophysica*, 4, 1995.
93. **Molenda M., Horabik J.:** Effect of filling method and moisture content on stress distribution in cylindrical bed of wheat grain. Operation on granular materials. *Proceedings of the seminar, Lublin*, 41-48, 1998.
94. **Molenda M., Horabik J.:** Effect of filling method and moisture content on stress distribution in cylindrical bed of wheat grain. Operation on granular materials. *Proceedings of the seminar, Lublin*, 41-48, 1998.
95. **Molenda M., J. Horabik, I.J. Ross, M.D. Montross:** Friction of wheat: grain-on-grain and on corrugated steel. *Transactions of the ASAE*, 45(2), 415-420, 2002.
96. **Molenda M.:** Wpływ struktury złoża nasion na stan naprężenia. *Acta Agrophysica*, 12, 1998.
97. **Morland L.W., Sawicki A., Milne P.C.:** Uni-axial compaction of a granular material. *J. Mech. Phys. Solids*, 41(11), 1755-1779, 1993.
98. **Mróz Z., Drescher A., Hueckel T.:** Doskonalenie metod badania parametrów płynięcia materiałów ziarnistych.. *Prace IPPT PAN*, 54/73, 1973.
99. **Mróz Z., Drescher A.:** Podstawy teorii plastyczności ośrodków rozdrobnionych. Ossolineum, 1972.
100. **Mühlhaus H.B., Vardoulakis I.:** The thickness of shear bands in granular material.. *Geotechnique*, 37(3), 271-283, 1987.
101. **Mutermilch J., Jastrzębski P. Orłowski W.:** Wytrzymałość materiałów. Arkady, Warszawa, 1974.
102. **Obuchowski W., Gąsiorowski H., Kołodziejczyk P.:** Twardość ziarna pszenicy jako kryterium jego jakości. *Postępy Nauk Rolniczych*, 5/81, 97-107, 1981.
103. **Obuchowski W.:** Twardość ziarna pszenicy: znaczenie technologiczne i czynniki wpływające na tę własność. *Rocznik Akademii Rolniczej w Poznaniu*, 1-56, 1985.
104. **Pabis S.:** Teoria konwekcyjnego suszenia płodów rolnych. PWN, 1982.
105. **Pelczyński T.:** Statyczne pomiary twardości stożkiem. *Prace ITiEM*, 1978.
106. **Pelczyński T.:** Twardość metali i ich stopów w aspekcie korelacji z własnościami mechanicznymi. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 1996.
107. **Peschl I.A.S.Z.:** Equipment for the measurement of mechanical properties of bulk materials. *Powder Handling and Processing*, (1) 1, 73-81, 1989a.

108. **Peschl I.A.S.Z.:** Measurement and evaluation of mechanical properties of powders. Powder Handling and Processing, (1) 2, 135-141, 1989b.
109. **Peschl I.A.S.Z.:** Quality control of powders for industrial application. Powder Handling and Processing, (1) 4, 357-363, 1989c.
110. **Ploof D.A., Carson J.W.:** Quality control tester to measure relative flowability of powders. Bulk Solids Handling, 14(1), 127-132, 1994.
111. PN-73/R-74007: Polska Norma. Ziarno zbóż. Oznaczanie gęstości. 1987.
112. PN-74/Z-04002: Ochrona czystości powietrza. Badania fizycznych własności pyłów. Oznaczanie kąta nasypu pyłu. 1974.
113. PN-88/B-04481: Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu. 1988.
114. PN-B-03254-2002: Silosy żelbetowe na materiały sypkie. Obliczenia statyczne, projektowanie, wykonawstwo i eksploatacja. 2002.
115. **Prusiel J.A., Nikitin W.:** Analiza efektów termicznych w cylindrycznych silosach żelbetowych na ośrodki sypkie. XI Konferencja „Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze”, 161-168, Świeradów Zdrój, 2000.
116. **Puchalski Cz.:** Metodyczne aspekty badania tarcia i jedności jablek pod kątem oceny ich jakości. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, 275, 2001.
117. **Rademacher F.J.C., Haaker G.:** Possible deviations in the determination of bulk-solid characteristics caused by the loading mechanism of the Jenike shear cell. VDI-Forschungsheft, 629, 1-32, 1985.
118. **Rooda J.E.:** A numerical method for the calculation of the powder flow properties obtained with the Jenike flow factor tester. Powder Technology, 12, 97-102, 1975.
119. **Roscoe K.H.:** An apparatus for the application of simple shear to soil samples. 3rd Inter. Conf. Soil Mech. Zurich, Vol. 1, 1953.
120. **Rosiński B.:** Badanie własności mechanicznych gruntów. Zakłady Aparatury Naukowej. Uniwersytet Jagielloński, Kraków 1955.
121. **Rowe P.W.:** The relation between the shear strength of sands in triaxial compression, plane strain and direct shear. Geotechnique, 19(1), 75-86, 1969.
122. **Rumpf H.:** Particle Technology. Chapman and Hall, London, 1990.
123. **Sawicki A., Świdziński W.:** Cyclic compaction of soils, grains and powders. Powder Technology, 85, 97-104, 1995.
124. **Schwedes J.:** Fliessverhalten von Schüttgütern in Bunkern. Verlag Chemie GmbH 1970.
125. **Schwedes J.:** Shearing behaviour of slightly compressed cohesive granular materials. Powder Technol., 11, 59-67, 1975.
126. **Schwedes J.:** Vergleichende Betrachtungen zum Einsatz von Schergeräten zur Messung von Schüttguteigenschaften. Inst. für Mech. Verfahrenstechnik Technische Universität Braunschweig, 1976.
127. **Simmonds D.H.:** Chemical basis of hardness and vitreousity in the wheat kernel. Bakers Dig., 48, 16-18, 1992.
128. **Ślaska-Grzywna B.:** Metoda wyznaczania granicznych wartości zagęszczania materiałów sypkich. Rozprawa doktorska. Akademia Rolnicza w Lublinie. Wydział Techniki Rolniczej, 1995.
129. **Ślipek Z., Frączek J., Złobecki A.:** Uszkodzalność ziarna pszenicy pod wpływem wielokrotnych obciążeń mechanicznych. Inżynieria Rolnicza, 7, 169-174, 2000.
130. **Ślipek Z., Kaczorowski J., Frączek J.:** Analiza teoretyczno-doświadczalna tarcia materiałów roślinnych. PTIR, Kraków, 1999.

131. **Sosnowski S., Rataj V.:** Rejestracja przebiegu obciążenia dynamicznego (uderzeń) na kliszy fotograficznej. Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych, 404, 1992
132. **Soszyńska M., Cacek-Pietrzak G.:** Mikrotwardość ziarna żyta. Przegląd Zbożowo-Młynarski, 2-3, 7-8, 1992.
133. Standards of the ASAE, 1998.
134. **Stasiak M., Molenda M.:** Analiza wpływu wilgotności złoza ziarna pszenicy na przebieg zależności naprężenie-odkształcenie. VI Konferencja Międzynarodowa "Inżynieria mechaniczna żywności", Inżynieria Maszyn, 75-80, Bydgoszcz, 2001.
135. **Stępniewski A.:** Wpływ wilgotności i temperatury na zmienność właściwości mechanicznych nasion rzepaku. Praca doktorska, Instytut Agrofizyki PAN, Lublin, 1997.
136. **Suchnicka H.:** Problemy określania wytrzymałości gruntów. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki Politechniki Wrocławskiej, 30/9, 1979.
137. **Szot B., Horabik J., Molenda M.:** The effect of the spatial orientation of cereal grain in bulk on its mechanical behaviour. Collection of papers Faculty of Mechanization, College of Agriculture in Prague, 873-878, 1985.
138. **Timoshenko S., Goodier J.N.:** Theory of elasticity. 3rd Ed. New York, Hill, 1970.
139. **Turski R., Domżał H., Słowińska A.:** Zależność tarcia wewnętrznego od wilgotności gleb wytworzonych z różnych skał macierzystych. Roczn. Gleboznawcze, XXIII/1, 15-28, 1972.
140. **Walton K.:** The effective elastic moduli of a random packing of spheres. J. of Mech. Phys. of Solids, 35(2), 213-226, 1987.
141. **Wilms H., Schwedes J.:** Interpretation of ring shear tests. Bulk Solids Handling, 5(5), 1017-1020, 1985.
142. **Wojnar L., Majorek M.:** Komputerowa analiza obrazu. Computer Scanning Systems Ltd., 1994.
143. **Wolny S., Siemieniec A.:** Wytrzymałość materiałów. Wydawnictwo Naukowe AGH, Kraków, 2000.
144. **Woźniak W.:** The effect of moisture treatment on mechanical properties of wheat grain. Proceedings of the Ninth Seminar "Properties of water in foods", 62-70, Zakopane, 1998.
145. **Woźniak W.:** Wpływ nawilżania ziarna pszenicy na twardość technologiczną. Acta Agrophisica, 46, 227-233, 2001.
146. **Yokimi Y., Oh-Oka H.:** A ring torsion apparatus for simple shear tests. Proc. 8th Inter. Conf. Soil Mech., 12, Moscow 1973.
147. **Zhang Q., Puri V.M., Manbeck H.B., Wang M.C.:** Elastoplastic constitutive parameters for wheat en masse for a cyclic load model. Transactions of the ASAE, 31(3), 910-916, 1988.
148. **Zhang Q., Puri V.M., Manbeck H.B.:** Determination of elastoplastic constitutive parameters for wheat en masse. Transactions of the ASAE, 29(6), 1739-1746, 1986.
149. **Zhang Y.H., Jofriet J.C.:** Equivalent stress-strain relationship for soybean and corn. ASAE Paper No. 934506, ASAE, St. Joseph, MI 49085, 1993.
150. **Ziolkowski D.P., Hardin B.O., Schwab C.V., Ross I.J.:** Shear Modulus of wheat at low strain amplitude. Transactions of the ASAE, 28(3), 884-888, 1985.
151. **Złobecki A., Francik S.:** Defining the damaging process of cereal grains on the basis of artificial neural network. Int. Agrophysics, 15, 219-223, 2001.
152. **Zoerb G.C., Hall C.W.:** Some mechanical and rheological properties of grains. J. Agric. Engng. Res., Vol. 5, nr 1, 83-93, 1960.

VI. STRESZCZENIE

W pracy dokonano przeglądu metod stosowanych w pomiarach właściwości fizycznych rolniczych materiałów granularnych pod kątem wypracowania jednolitych standardów pomiarowych. Analiza istniejącego stanu pozwoliła na stwierdzenie, w chwili obecnej brak jest w Polsce przyjętych i ogólnie uznanych standardów pomiaru wielu fizyko-mechanicznych właściwości nasion. W nielicznych przypadkach istnieją normy branżowe, które pozwalają na dokonanie znormalizowanych pomiarów określających pewne właściwości fizyczne ważne z punktu widzenia danego procesu technologicznego. Zazwyczaj są to więc wielkości wyrażane w jednostkach umownych, nie pozwalających na ich zastosowanie w ogólnych teoriach fizycznych.

Istnieją dwa kierunki badań, które często nie zazębiają się ze sobą. Pierwszy z nich to badania przeprowadzane na pojedynczych nasionach. Większość ze stosowanych do tej pory sposobów pomiaru wykorzystywanych w tego typu badaniach ma swe źródło w pomiarach stosowanych przy badaniu materiałów konstrukcyjnych. O ile jednak w klasycznej wytrzymałości występuje pełna spójność i jednoznaczność stosowanego nazewnictwa, o tyle w badaniach roślinnych materiałów ziarnistych daje się zaobserwować pewną chaotyczność. Stosowane terminy są często nieadekwatne do opisywanych właściwości. Przeprowadzone badania wykazały, iż stosowany przy określaniu modułu Younga standard ASAE nie spełnia wymagań odnośnie dokładności i powtarzalności uzyskiwanych wyników. Przeprowadzona analiza pozwoliła na stwierdzenie, iż powodem tego jest błędne stosowanie praw mechaniki ośrodków ciągłych do opisu zachowania się obciążanych nasion. W związku z tym autorzy zaproponowali nowe metody określania sprężystości i twardości pojedynczych nasion, w których uwzględnione zostały specyficzne cechy materiału, jakim są nasiona (przede wszystkim jego typowo reologiczny charakter).

Przeprowadzono również obliczenia mające na celu uzyskanie odpowiedzi na pytanie, czy istnieje powiązanie między współczynnikiem sprężystości nasienia oraz jego twardością. Wykorzystano w tym celu sztuczne sieci neuronowe. Okazało się, że w celu zwiększenia dokładności prognozowania niezbędne jest dokonanie podziału nasion na grupy, pod względem zawartości wody oraz gęstości teoretycznej.

Drugi kierunek badań, rozwijający się bardzo dynamicznie, to badania nasion w złożu.

Różnorodność stosowanych w tym wypadku metod wielokrotnie doprowadza do sytuacji, w której przedstawiciele istniejących ośrodków badawczych często nie rozumieją się dobrze, a nawet używają tych samych pojęć w różnym znaczeniu. Podobnie rozwój metod tworzenia charakterystyk materiałów przebiega w różnych kierunkach, zgodnie z zainteresowaniami poszczególnych grup. W prezentowanej pracy autorzy dokonali analizy aktualnego stanu i zaprezentowali przewidywane kierunki rozwoju standaryzacji metod charakteryzowania materiałów sypkich w poszczególnych grupach zastosowań.

W zakresie metod pomiarowych służących weryfikacji modeli konstytutywnych materiału trwałym punktem odniesienia pozostanie metoda trójosiowego ściskania. Słusznie zarzuca się jej wprowadzie, że nie jest „prawdziwie” trójosiowa, jednak mimo wielu prób nie udało się dotychczas opracować efektywnej, dokładniejszej metody tego typu. Wyniki każdej nowej metody, dla jej uwierzygodnienia porównuje się z wynikami metody tradycyjnej.

Inżynieria budowlana w zakresie projektowania silosów pozostanie przy metodzie bezpośredniego ścinania znanej w tej dziedzinie jako metoda Jenikego. Pierwszeństwo tej metody zostało utrwalone w Eurocode 1 – europejskiej normie projektowania, poprzez zalecenie jej do wyznaczania wytrzymałości przechowywanych materiałów. Badania autorów wykazały, że metoda w zakresie zastosowań przewidzianych Eurocode 1 nadaje się do stosowania dla ziarna zbóż i innych materiałów pochodzenia biologicznego. W przypadku materiału wilgotnego wymaga jednak wydłużenia drogi ścinania.

Następne pole rozwoju różnych sposobów pomiaru, to kontrola in-line. Wprowadzie w tym wypadku można mówić o początkowym stadium rozwoju, ale wydaje się, że z powodu oczywistych korzyści płynących ze sterowania procesem tj. obniżenia kosztów i możliwości utrzymania stabilnej jakości produktu można prognozować szybki postęp w tym zakresie. Stosuje się różnego rodzaju przetworniki i wciąż prowadzi badania nad nowymi. Zasadnicze wyzwania to: obniżenie kosztu przetwornika, podniesienie jego niezawodności, opracowanie programów obróbki danych, które przetworzą sygnał z przetwornika w informację użyteczną dla sterowania procesem.

VII. SUMMARY

The purpose of this work is to review methods applied in measurements of physical proprieties of granulated agricultural materials from the perspective of attempting to establish uniform measuring standards. Analysis of the present situation showed a lack of accepted and generally recognized standards of measurement of the physico-mechanical proprieties of seeds in Poland at this time. In some cases there exist industry standards, which allow for standardized measurements of certain physical proprieties relevant to the given technological process. The quantities, in these cases, are usually defined in conventional units, which do not allow their use in general physics theories.

There are two, often not overlapping, paths of testing. The first one proposes to test individual seeds. The majority of current measurements conducted in these types of studies stem from those used in testing constructional materials. Whereas in case of classic strength there exists a fully cohesive and unambiguous terminology, the tests of biological material are somewhat chaotic. The terminology used is often inadequate in describing the proprieties. The studies conducted showed, that the ASAE standard, applied in defining Young's modulus, does not fulfill the requirements regarding accuracy and repeatability of the obtained results. The conducted analysis permitted to affirm, that this is due to the incorrect use of the laws of continuous medium mechanics in describing the behavior of seeds under stress. For that reason, the authors proposed new methods for defining the elasticity and hardness of individual seeds. These methods took into account the seeds' specific material properties (especially their typically rheological character).

Calculations were also done to see if any connections exist between a seed's elasticity coefficient and its hardness. The artificial neuronal nets were used for that. It turned out, that in order to increase the accuracy of the prognosis, it is necessary to divide the seeds into groups, based on their water content of and theoretical density.

The second, dynamically growing, path is made up of tests carried out on seeds deposited in one place, for example stored in silos. The variety of methods used here often led to miscommunication between the representatives of the different testing centers. The same term may have two completely different meanings. The same holds true for the process of developing the profiles of materials. The work goes on simultaneously in many different directions, depending on the interests of the individual groups. The authors analyzed the

existing situation and forecasted the directions in which the standardization of methods of characterizing granulated materials may progress in the individual groups of use.

Among the methods of measurement used to verify the constitutional models of the material, the method of triaxial compression will remain the main point of reference. This method is in reality not truly “triaxial”, but there are no other effective and more exact testing methods of this sort on hand today. Every new method is verified by comparing its results with these of the traditional method.

In designing silos, construction engineering will continue to follow the direct cutting method, well known in this field as the Jenike’s method. The priority of this method was explicitly stated in Eurocode 1 - the European design standard. It is recommended as the method of choice for determining the strength of stored materials. The authors’ tests have shown that the method, as far Eurocode 1 specified uses are concerned, is suitable for use with grain cereals and other materials of biological origin. However, in the case of moist material, the path of the cut needs to be extended.

Another promising area of measurement method development is the in-line control. This field is still in its initial stage, but considering the benefits arising from controlling the process, that are cutting the costs and stabilizing product quality, one can expect fast headway. Many different transducer types are in use, and new ones are being developed. The main challenges at hand are: the lowering of transducer costs, increasing its reliability, developing data processing programs for use in changing transducer signals into information useful in controlling the process.

Adresy Autorów:

Jarosław Frączek
Zbigniew Ślipek
Katedra Podstaw Budowy Maszyn, Akademia Rolnicza
ul. Balicka 104, 30-149 Kraków
e-mail: fraczek@ar.krakow.pl
e-mail: slipek@ar.krakow.pl

Janusz Kaczorowski
Zakład Podstaw Konstrukcji Maszyn, Akademia Pedagogiczna
ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków
e-mail: technika@ap.krakow.pl

Józef Horabik
Marek Molenda
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27
e-mail: jhorabik@demeter.ipan.lublin.pl
e-mail: mmolenda@demeter.ipan.lublin.pl