

**Instytut Agrofizyki  
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN  
w Lublinie**

# ACTA AGROPHYSICA

**4**

**Marek Molenda, Józef Horabik,  
Marian Grochowicz, Bogusław Szot**

**TARCIE ZIARNA PSZENICY**

Lublin 1995

**Komitet redakcyjny**  
prof. dr hab. Jan Gliński  
doc. dr hab. Krystyna Konstankiewicz  
doc. dr hab. Ryszard Dębicki

**Wydawnictwo sponsorowane przez  
Fundację Rozwoju Nauk Agrofizycznych**

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr 5 5513 9203  
finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 1992-1994

**Adres redakcji**  
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN  
ul. Doświadczalna 4, 20-236 Lublin  
tel. (0-81) 450-61

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN  
Lublin 1995

ISBN 83-901426-2-7  
ISSN 1234-4125

Wydanie I. Nakład 150 egz.  
Ark. wyd. 7,0. Ark. druk. 5,75.  
Skład: „Mropol”, Pl. Litewski 2, 20-080 Lublin  
Druk: „Tekst”, ul. 1 Maja 51, 20-410 Lublin

# SPIS TREŚCI

|  |    |
|--|----|
| SPIS OZNACZEŃ  | 5  |
| WSTĘP  | 7  |
| I. TARCIE WEWNĘTRZNE   | 9  |
| 1.1 Przegląd piśmiennictwa   | 9  |
| 1.1.1 Stan naprężenia w ośrodku granularnym  | 9  |
| 1.1.2 Warunek stanu granicznego Coulomba – Mohra   | 12 |
| 1.1.3 Czynniki determinujące tarcie ośrodka ziarnistego  | 14 |
| 1.1.3.1 Wilgotność ziarna  | 15 |
| 1.1.3.2 Gęstość materiału  | 16 |
| 1.1.3.3 Struktura geometryczna ośrodka   | 18 |
| 1.1.4 Metody pomiarowe i aparatura   | 19 |
| 1.1.4.1 Aparat bezpośredniego ścinania   | 19 |
| 1.1.4.2 Aparat pierścieniowy   | 21 |
| 1.1.4.3 Aparat prostego ścinania   | 22 |
| 1.1.4.4 Aparat trójosiowego ściskania  | 23 |
| 1.1.4.5 Kąt usypu warstwy ziarna   | 24 |
| 1.2 Badania własne   | 25 |
| 1.2.1 Wilgotność ziarna  | 25 |
| 1.2.2 Gęstość ośrodka  | 27 |
| 1.2.3 Orientacja przestrzenna ziarna   | 30 |
| 1.2.3.1 Metoda przygotowania próbki  | 30 |
| 1.2.3.2 Ocena przestrzennej orientacji w próbce  | 31 |
| 1.2.3.3 Wpływ orientacji ziarna na kąt tarcia wewnętrznego                                       | 31 |
| 1.3 Dyskusja wyników   | 36 |
| 1.4 Wnioski  | 38 |
| 1.5 Literatura   | 39 |
| 2. TARCIE ZEWNĘTRZNE   | 43 |
| 2.1 Przegląd piśmiennictwa   | 43 |
| 2.1.1 Teorie tarcia  | 43 |
| 2.1.2 Metody pomiarowe i aparatura   | 46 |
| 2.1.3 Czynniki determinujące tarcie zewnętrzne ziarna zbóż                                       | 48 |
| 2.1.3.1 Wilgotność   | 48 |
| 2.1.3.2 Nacisk normalny  | 49 |
| 2.1.3.3 Prędkość poślizgu  | 50 |
| 2.1.3.4 Stan powierzchni materiału trącego   | 50 |
| 2.2 Badania własne   | 52 |
| 2.2.1 Zastosowane metody pomiarowe   | 52 |
| 2.2.1.1 Metoda pomiaru chropowatości powierzchni   | 52 |
| 2.2.1.2 Metody pomiaru pola powierzchni kontaktu i siły tarcia na rzeczywistym obszarze kontaktu | 53 |
| 2.2.1.3 Metoda pomiaru siły tarcia warstwy ziarna  | 55 |
| 2.2.2 Przygotowanie materiału do badań   | 56 |
| 2.2.3 Program badań  | 57 |

|   |    |
|---|----|
| 2.2.4 Rzeczywista powierzchnia kontaktu . . . . .                       | 58 |
| 2.2.5 Tarcie pojedynczych ziarn o powierzchnię szklaną . . . . .        | 60 |
| 2.2.5.1 Struktura wewnętrzna ziarna i warstwa kutyny . . . . .          | 60 |
| 2.2.5.2 Wilgotność ziarna i chropowatość powierzchni poślizgu . . . . . | 62 |
| 2.2.6 Tarcie pojedynczych ziarn o powierzchnię stalową . . . . .        | 65 |
| 2.2.6.1 Chropowatość płytki i wilgotność ziarna . . . . .               | 65 |
| 2.2.7 Tarcie warstwy ziarna o powierzchnię stalową . . . . .            | 71 |
| 2.2.7.1 Czas trwania pomiaru – droga tarcia . . . . .                   | 71 |
| 2.2.7.2 Wilgotność ziarna . . . . .                                     | 72 |
| 2.2.7.3 Odmiana i miejsce uprawy . . . . .                              | 73 |
| 2.2.7.4 Chropowatość ziarna . . . . .                                   | 74 |
| 2.3 Interpretacja fizyczna . . . . .                                    | 75 |
| 2.4 Dyskusja wyników . . . . .  | 81 |
| 2.5 Wnioski . . . . .   | 84 |
| 2.6 Literatura . . . . .  | 85 |
| SUMMARY . . . . .   | 89 |

## SPIS OZNAUCZEN

| Oznaczenie                     | Opis  | Jednostki         |
|--------------------------------|---|-------------------|
| $\alpha$                       | Kąt nachylenia powierzchni poślizgu względem płaszczyzny największych naprężeń głównych | stopnie           |
| $\beta$                        | Kąt pochylenia próbki   | stopnie           |
| $\gamma$                       | Kąt zawarty między kierunkiem orientacji ziarna a płaszczyzną poślizgu                  | stopnie           |
| $\delta$                       | Efektywny kąt tarcia wewnętrznego   | stopnie           |
| $\epsilon_l$                   | Odształcenie osiowe próbki  |                   |
| $\epsilon_v$                   | Odształcenie objętościowe próbki  |                   |
| $\mu$                          | Współczynnik tarcia   |                   |
| $\nu$                          | Stała Poissona  |                   |
| $\rho$                         | Gęstość ośrodka   | kgm <sup>-3</sup> |
| $\tau$                         | Naprężenie styczne  | MPa               |
| $\sigma$                       | Naprężenie normalne   | MPa               |
| $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ | Naprężenia główne   | MPa               |
| $\tau_0$                       | Wytrzymałość wiązania adhezyjnego na ścinanie   | MPa               |
| $\phi$                         | Kąt tarcia wewnętrznego   | stopnie           |
| $\phi_l$                       | Kąt tarcia wewnętrznego   | stopnie           |
| $\phi_s$                       | Kąt tarcia wewnętrznego   | stopnie           |
| A                              | Pole powierzchni przekroju  | m <sup>2</sup>    |
| B                              | Stały parametr  |                   |
| c, C                           | Kohezja   | MPa, N            |
| D                              | Średnica  |                   |
| E                              | Moduł Younga  | MPa               |
| h                              | Głębokość wnikania nierówności w podłoże  | mm                |
| N                              | Sila normalna   | N                 |
| $p_r$                          | Naprężenie normalne na powierzchni kontaktu   | MPa               |
| $p_w$                          | Granica plastyczności materiału   | MPa               |
| r                              | Promień krzywizny nierówności   | mm                |
| R                              | Współczynnik korelacji  | %                 |
| R <sup>2</sup>                 | Współczynnik determinacji   | %                 |

| Oznaczenie     | Opis  | Jednostki       |
|----------------|---|-----------------|
| R <sub>a</sub> | Średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej | μm              |
| R <sub>t</sub> | Wysokość chropowatości                                    | μm              |
| S              | Pole powierzchni kontaktu                                 | mm <sup>2</sup> |
| S <sub>w</sub> | Przekrój poprzeczny bruzdy tarcia                         | mm <sup>2</sup> |
| t              | Czas  | s               |
| T              | Siła oporu tarcia   | N               |
| T <sub>a</sub> | Składowa adhezyjna siły tarcia                            | N               |
| T <sub>d</sub> | Składowa deformacyjna siły tarcia                         | N               |
| w              | Wilgotność ziarna   | %               |

## WSTĘP

Przebieg procesów technologicznych z udziałem materiałów sypkich (np. rolniczych, farmaceutycznych, mineralnych) jest ważnym elementem związanym z wieloma operacjami przemysłowymi, dotyczącymi zarówno obróbki surowca, jak też jakości produktów końcowych. Optymalizacja każdej fazy tych procesów (zbiór, przechowywanie, transport, przetwarzanie) wymaga szczegółowej wiedzy o reakcji materiału na obciążenie mechaniczne. Technologie wytwarzania (np. piekarnicze) wymagają niekiedy bardzo precyzyjnego dozowania materiałów sypkich, a zmiany np. w procesie wypływu surowca mogą powodować odchylenia udziału procentowego składników, pogorszenie jakości produktu i w efekcie znaczne straty ekonomiczne. Istnieje zatem potrzeba projektowania urządzeń przetwarzających w sposób z góry założony, przewidywalny i powtarzalny. Aby osiągnąć te możliwości pracy urządzeń niezbędna jest szczegółowa wiedza o właściwościach mechanicznych materiałów sypkich (zwanych też granularnymi lub ziarnistymi).

Mechanika tych materiałów wywodzi się z mechaniki gruntów. W miarę gromadzenia wiedzy o gruncie, który od tysiącleci wykorzystywany jest jako materiał budowlany i podłoże obiektów, formułowano prawa o ogólniejszym znaczeniu. Do dzisiaj użyteczne są opracowania Ch. Coulomba i K. Terzagiego [17, 31]. Podstawy teoretyczne i metody doświadczalne wypracowane w badaniach gruntu zostały w ostatnich dziesięcioleciach, po niezbędnych modyfikacjach, przeniesione na inne grupy materiałów i dziedziny zastosowań. Wśród badanych ośrodków można wyróżnić materiały pyliste (np. cement), materiały gruboziarniste (np. brykiety paszowe, śruta), materiały o znacznej kohezji (np. drobnoziarniste produkty spożywcze, glina) i materiały sypkie (np. ziarno zbóż, piasek). Mechanika ośrodków sypkich formuluje prawa materiałowe tych ośrodków i opisuje ich właściwości mechaniczne [11, 13, 42, 61].

W zagadnieniach związanych z rolnictwem mechanika ośrodków sypkich znajduje zastosowanie m.in. w technologii procesów przetwórczych, technikach transportu, uprawie gleby, ocenie zagęszczania gleby przez maszyny czy projektowaniu technik magazynowania i przepływu ziarna w silosach [10, 11, 19, 34, 62]. Przegląd popularnych norm projektowania silosów przeprowadzony przez Wilmsa [72] wykazał, że większość z nich opiera się na równaniu Janssena. Zasadniczym parametrem materiałowym tego równania jest współczynnik tarcia o ścianę, którego wartość zależy głównie od szorstkości ściany, ale także od współczynnika tarcia wewnętrznego materiału. Wartości współczynnika tarcia zewnętrznego i współczynnika tarcia wewnętrznego są podstawowymi parametrami opisu rozkładu naprężeń w warstwie materiału i związanych z nim obciążeń konstrukcji [41]. Projektant zbiorników magazynowych musi znać zależności pomiędzy właściwościami mechanicznymi przechowywanego materiału, rodzajem przepływu i wynikającym stąd rozkładem naporu ośrodka na konstrukcję zbiornika. Brak wystarczającej wiedzy o zachowaniu się ośrodka sypkiego jest uzna-

wany za jedną z zasadniczych przyczyn nieprawidłowego funkcjonowania lub nawet awarii silosów [44, 62]. Uzasadnione jest więc przekonanie, że dokładniejsze zrozumienie właściwości mechanicznych materiałów granularnych oraz mechanizmów przenoszenia naprężeń w ośrodku, powinno stanowić podstawę opracowywania efektywnych metod wyliczania rozkładu obciążenia w silosie.

Problemy mechaniki ośrodków granularnych pochodzenia biologicznego są bardzo podobne do problemów napotykaných w mechanice bezkohezyjnych ośrodków sypkich (np. piasek). Zasadnicza różnica między tymi ośrodkami leży w wymiarze i kształcie ziaren oraz ich odkształcalności [38, 67, 68, 69, 78]. W niniejszej pracy szczególną uwagę zwrócono na te właściwości mechaniczne ziarna zbóż, które wyróżniają je spośród ośrodków granularnych i są przyczyną specyficznego zachowania się ośrodka.



# 1. TARCIE WEWNĘTRZNE

## 1.1 Przegląd piśmiennictwa

### 1.1.1 Stan naprężenia w ośrodku granularnym

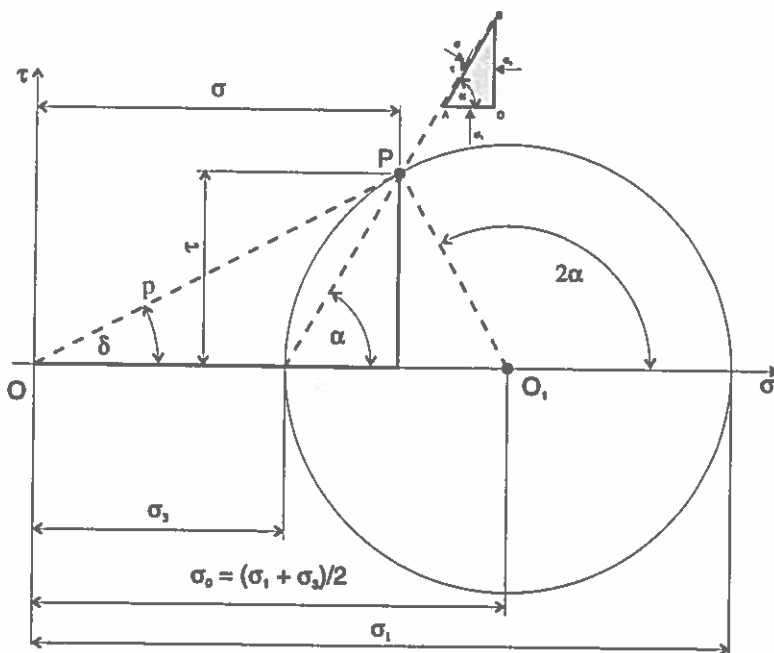
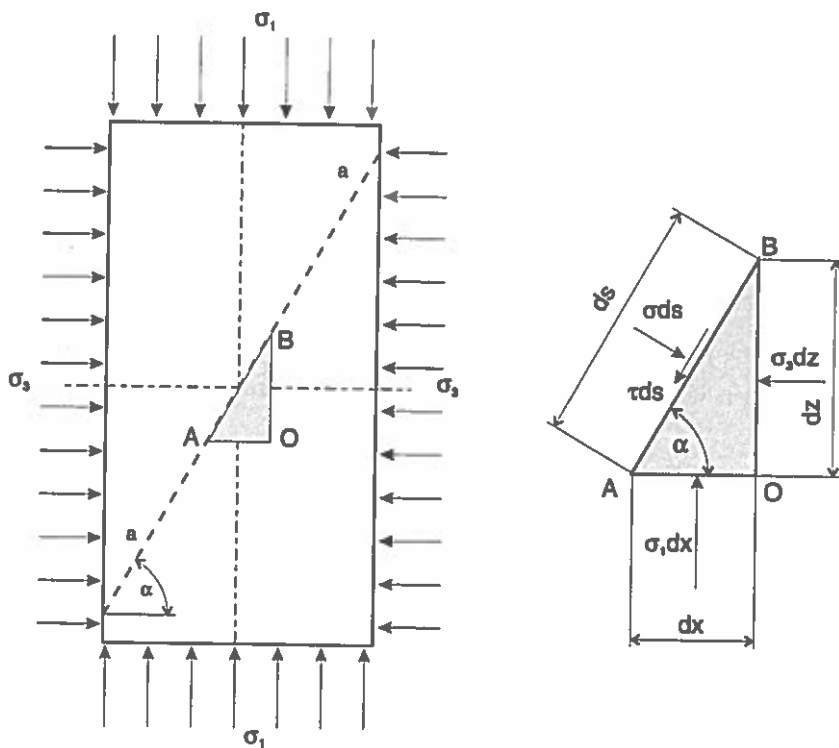
Naprężenie mechaniczne w dowolnym punkcie ośrodka określa się rozpatrując przekrój ciała przez ten punkt. Siłę przenoszoną przez rozpatrywany przekrój można rozłożyć na dwie składowe: normalną i styczną do płaszczyzny przekroju. Graniczną wartość stosunku składowej normalnej siły, działającej na nieskończenie mały element przekroju, do pola powierzchni tego przekroju nazywamy naprężeniem normalnym  $\sigma$  [17, 51]:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A} \quad (1)$$

gdzie:  $N$  – siła normalna,  $A$  – pole powierzchni przekroju.

Podobnie graniczną wartość stosunku składowej stycznej do pola powierzchni przekroju nazywamy naprężeniem stycznym  $\tau$ . Przyjmując powyższą definicję pochodzącą z mechaniki ośrodków ciągłych akceptujemy założenie, że ośrodek jest ciągły tzn. że substancja jest równomiernie rozłożona w otoczeniu rozważanego punktu. Założenie to będzie słuszne, jeżeli pory i niejednorodności materiału będą wystarczająco małe w stosunku do rozmiaru pola powierzchni rozpatrywanego obszaru [34]. Zbiór wszystkich składowych naprężenia wszystkich przekrojów płaskich przechodzących przez dany punkt określa stan naprężenia w tym punkcie. W każdym punkcie ciała istnieją trzy wzajemnie prostopadle płaszczyzny, na których tylko naprężenia normalne nie są równe zero. Płaszczyzny te nazywamy płaszczyznami głównymi, a naprężenia normalne działające na tych trzech płaszczyznach nazywa się naprężeniami głównymi [17, 71]. Największe z tych naprężeń oznacza się  $\sigma_1$  i nazywa największym naprężeniem głównym, najmniejsze – najmniejszym naprężeniem głównym  $\sigma_3$ , a trzecie – naprężeniem pośrednim  $\sigma_2$ . W przypadku analizy stanu naprężenia na płaszczyźnie rozpatruje się naprężenia główne  $\sigma_1$  i  $\sigma_3$ . Naprężenia ściskające przyjmuje się za dodatnie.

Rozważmy elementarny graniastosłup o podstawie trójkąta prostokątnego wycięty z warstwy materiału. Załóżmy, że warstwa materiału ma wymiar nieskończony w kierunku pośredniego naprężenia głównego. Zatem na każdym przekroju warstwy równoległym do przedstawionego na rysunku 1.1 stan naprężenia jest jednakowy (płaski stan naprężenia). Niech jedna ze ścian graniastosłupa leży na płaszczyźnie  $a$ - $a$ . Każda z dwóch pozostałych ścian jest równoległa do odpowiedniej płaszczyzny naprężeń głównych. Rozłóżmy elementarną siłę działającą na ścianę  $AB$  na składowe: normalną  $\sigma$  i styczną  $\tau$ . Kąt  $\alpha$  mierzony jest od płaszczyzny  $\sigma_1$  (prostopadłej do kierunku



Rys. 1.1. Naprężenia w otoczeniu rozważanego punktu i ich graficzna ilustracja na wykresie Mohra

naprężenia  $\sigma_1$ ) przeciwnie do ruchu wskazówek zegara. W warunkach równowagi spełnione są zależności:

$$\sigma_1 \cos \alpha \, ds - \sigma \cos \alpha \, ds - \tau \sin \alpha \, ds = 0 \quad (2)$$

$$\sigma_3 \sin \alpha \, ds - \sigma \sin \alpha \, ds + \tau \cos \alpha \, ds = 0 \quad (3)$$

które po rozwiązaniu ze względu na  $\sigma$  i  $\tau$  przyjmują postać:

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha \quad (4)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha \quad (5)$$

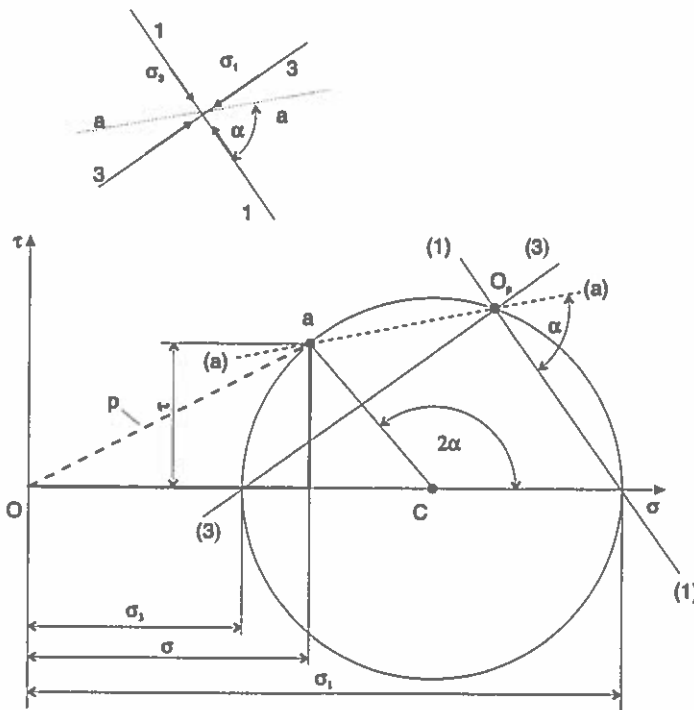
Po wprowadzeniu oznaczeń:  $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$  oraz  $R = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$  i wyeliminowaniu  $\alpha$  z równań (5) otrzymujemy:

$$1 - \frac{\tau^2}{R^2} = \frac{(\sigma - \sigma_0)^2}{R^2} \quad (6)$$

i po przekształceniu:

$$(\sigma - \sigma_0)^2 + \tau^2 = R^2 \quad (7)$$

Równanie (7) opisuje okrąg w układzie współrzędnych  $(\sigma, \tau)$ , którego środek leży na osi  $\sigma_1$  w odległości  $\sigma_0$  od początku układu współrzędnych, a promień jest równy:  $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$  (rysunek 1.1). Za pomocą takiego graficznego przedstawienia stanu naprężenia można określić naprężenia  $\sigma$  i  $\tau$  dla każdej wartości kąta nachylenia płaszczyzny  $\alpha$ . Punkt P na okręgu koła wyraża składowe naprężenia na płaszczyźnie nachylonej pod kątem  $\alpha$  do płaszczyzny największego naprężenia głównego. Naprężenie wypadkowe wyraża odległość OP gdyż,  $p^2 = (\sigma^2 + \tau^2)$ . Taka graficzna ilustracja płaskiego stanu naprężenia zaproponowana została przez Mohra w 1882 roku i jest znana jako koło Mohra [31]. Jeśli znane jest koło Mohra, można wyznaczyć składowe naprężenia  $\sigma$  i  $\tau$  na dowolnej płaszczyźnie a-a, stosując metodę konstrukcji graficznej przedstawioną na rysunku 1.2. Załóżmy, że 1-1 i 3-3 są płaszczyznami odpowiednio największego i najmniejszego naprężenia głównego. Znając wartości naprężeń głównych  $\sigma_1$  i  $\sigma_3$  można wykreślić diagram Mohra. Prosta przechodząca przez punkt  $\sigma_1$  na osi  $\sigma$  i równoległa do płaszczyzny 1-1 przecina okrąg w punkcie  $O_p$ , zwanym biegunem koła Mohra [17]. Prosta przechodząca przez biegun i przez punkt  $\sigma_3$  na osi  $\sigma$  wyznacza płaszczyznę 3-3, najmniejszego naprężenia głównego. Prosta przechodząca przez biegun i równoległa do kierunku a-a tworzy kąt  $\alpha$  z prostą 1-1. Kąt środkowy między osią  $\sigma$  i prostą aC równy jest zatem  $2\alpha$ , tzn. że współrzędne punktu a wyznaczają poszukiwane naprężenia  $\sigma$  i  $\tau$ .



Rys. 1.2. Sposób wykreślny wyznaczania naprężeń działających w dowolnym kierunku z zastosowaniem bieguna koła Mohra

### 1.1.2 Warunek stanu granicznego Coulomba – Mohra

Najbardziej rozpowszechnione metody opisu reakcji materiału rozdrobnionego na obciążenie mechaniczne opierają się na warunku stanu granicznego Coulomba – Mohra. Zgodnie z koncepcją Coulomba zniszczenie materiału następuje wtedy, kiedy naprężenie styczne w pewnym przekroju ośrodka przekroczy opór tarcia i kohezji między cząsteczkami materiału. Sformułowane w 1773 roku przez Coulomba prawo głosi, że wytrzymałość na ścinanie  $\tau$  jest liniową funkcją naprężenia normalnego  $\sigma$  [17, 31, 34]:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \phi + C \quad (8)$$

gdzie:  $\phi$  – kąt tarcia wewnętrzznego,  $C$  – kohezja.

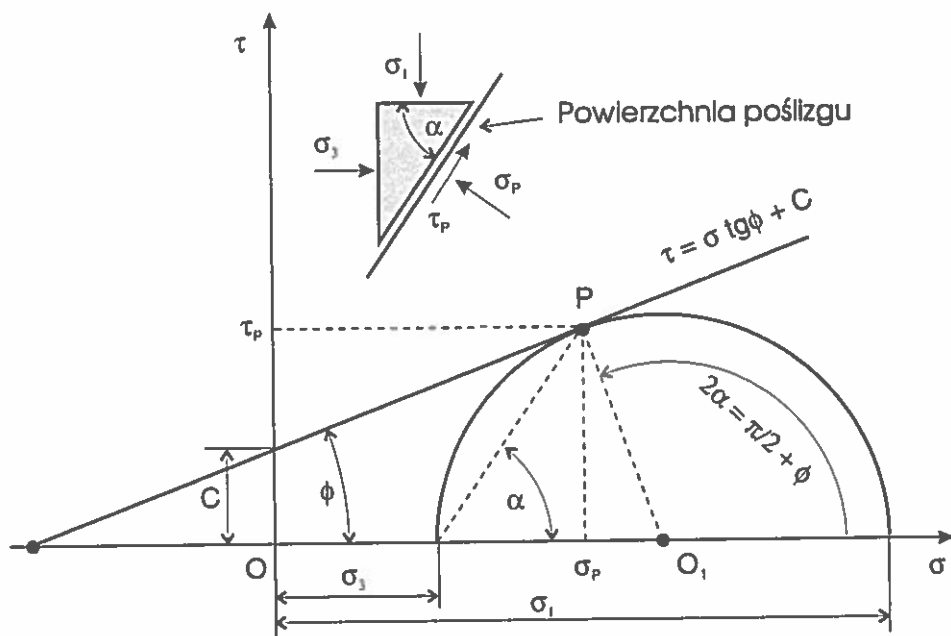
Powierzchnia, na której naprężenie styczne spełnia warunek wyrażony równaniem (8) jest nazywana powierzchnią przelomu albo powierzchnią poślizgu. W ujęciu Coulomba kąt tarcia wewnętrznego  $\phi$  i kohezja  $C$  są stałymi zależnymi jedynie od rodzaju materiału. Konsekwentnie kąt tarcia wewnętrznego  $\phi$  jest kątem nachylenia prostej Coulomba względem osi  $\sigma$ , zaś kohezja  $C$  to maksymalne naprężenie ścinające  $\tau$  przenoszone przez materiał przy braku obciążenia normalnego ( $\sigma = 0$ ) (rysunek 1.3)

Tangens kąta  $\phi$  jest określany jako współczynnik tarcia wewnętrznego. Stan naprężenia poniżej prostej Coulomba nie powoduje naruszenia struktury materiału, stan naprężenia na prostej to osiągnięcie maksymalnej wytrzymałości materiału (przełom lub płynięcie), zaś stany naprężenia powyżej prostej Coulomba nie są możliwe.

Stan naprężenia ( $\sigma$ ,  $\tau$ ) spełniający warunek Coulomba – Mohra należy do koła Mohra reprezentującego stan naprężenia w danym obszarze ośrodka. Na rysunku 1.3 punkt P na płaszczyźnie ( $\sigma$ ,  $\tau$ ) wyznacza naprężenie normalne  $\sigma_p$  i styczne  $\tau_p$  na powierzchni poślizgu. Kąt  $\alpha$  pomiędzy płaszczyzną największego naprężenia głównego  $\sigma_1$ , a powierzchnią poślizgu wynosi:

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (9)$$

Liczne badania wykazały, że wiele materiałów wykazuje istotne odchylenia od przedstawionego opisu. Stosując kąt tarcia wewnętrznego  $\phi$  zaleca się [26, 27] rozróżniać kąt tarcia  $\phi_1$  rozpoczynającego się płynięcia i kąt tarcia  $\phi_s$  ustalonego płynięcia. Kąt  $\phi_s$  jest stały, zaś kąt  $\phi_1$  zależy od naprężenia normalnego i gęstości materiału. Poślizg nie zachodzi dokładnie wzdłuż powierzchni, na której spełniony jest warunek stanu granicznego Coulomba – Mohra odchylonej od płaszczyzny największego naprężenia głównego o kąt  $\alpha$ . Często zdarza się, że kohezja C nie reprezentuje sił spójności



Rys. 1.3. Sposób wyznaczania orientacji płaszczyzny poślizgu z warunku wytrzymałości Coulomba – Mohra

między ziarnami przy braku naprężenia normalnego ( $\sigma = 0$ ), a jest jedynie parametrem aproksymacji liniowej. Warunek stanu granicznego Coulomba – Mohra pozostaje nadal szeroko rozpowszechniony w zastosowaniach praktycznych.

### 1.1.3 Czynniki determinujące tarcie ośrodka ziarnistego

Z fizycznego punktu widzenia ośrodek sypki jest to układ losowo zorientowanych cząstek różnego kształtu i wielkości. Odształcenie ośrodka jest wynikiem odształceń poszczególnych cząstek oraz względnych przesunięć między nimi. Losowy układ cząstek byłby niezmienny, gdyby cząstki były sztywne, a więc nie ulegały deformacjom pod wpływem sił zewnętrznych. W rzeczywistości poszczególne elementy ośrodka są odształcalne, skutkiem czego naruszona zostaje wewnętrzna równowaga sił, powstają małe przesunięcia w układzie, a w efekcie duże odształcenie całego ośrodka [36]. Ośrodek pozostaje w równowadze, jeżeli dla każdej cząstki wypadkowa działania wszystkich sił stycznych i normalnych w punktach kontaktu oraz ich moment względem dowolnego punktu będzie równy zeru, a także jeśli dla wszystkich punktów kontaktu każdej cząstki z sąsiednimi, siły styczne będą mniejsze od maksymalnej siły tarcia statycznego [76]. W zakresie odształceń sprężystych wyżej podane warunki nie zostają naruszone i cząstka ulega tylko sprężystej deformacji w punktach kontaktu z sąsiednimi elementami ośrodka. W rzeczywistości odształcenia w punktach styku nie są w pełni odwracalne i prowadzą zazwyczaj do naruszenia warunku równowagi. Proces odształcenia plastycznego ośrodka składa się z szeregu małych przesunięć cząstek i trwa do czasu, kiedy układ sił doprowadzi do stanu równowagi nowe położenia cząstek. Całkowite odształcenie ośrodka jest wynikiem odształceń poszczególnych cząstek szkieletu oraz względnych przesunięć między nimi. Przemieszczenia powstałe w wyniku poślizgu cząstek, ich uszkodzenia lub plastycznej deformacji są nieodwracalne. Dlatego też tylko część odształcenia powstałego podczas zagęszczania ośrodka zanika po usunięciu obciążenia. Odprężanie cząstek w trakcie odciążania jest wywołane energią sprężystą nagromadzoną w poszczególnych ziarnach podczas obciążania. Zmiany objętościowe podczas odciążania wynikają zarówno z rozprężania się poszczególnych ziaren, jak i z wymuszonych przez to zjawisko zmian w ich upakowaniu.

Całkowity opór na ścinanie jest równy sile powodującej względne przemieszczenie ziaren i jest równy sumie wytrzymałości poszczególnych wiązań. Opór ten na ogół ma charakter tarcia, czyli jest proporcjonalny do siły normalnej dociskającej ziarna do siebie. Kąt tarcia wewnętrzznego zależy od właściwości powierzchniowych ziaren oraz od struktury ośrodka utworzonego z tych ziaren. Właściwości powierzchniowe modyfikowane są wilgotnością ziarna, gatunkiem i odmianą. Parametry struktury to gęstość ośrodka oraz parametry sieci geometrycznej punktów kontaktu ziaren w warstwie.

### 1.1.3.1 Wilgotność ziarna

Wartość kąta tarcia wewnętrznego w dużym stopniu zależy od wilgotności ziarna [1, 10, 19, 20, 23, 24]. W literaturze dotyczącej zastosowań tarcia wewnętrznego materiałów ziarnistych pochodzenia roślinnego do rozwiązywania praktycznych problemów często nie uwzględnia się wilgotności jako istotnego parametru. Wynika to przede wszystkim z tego, że wielu autorów [22, 26] prowadziło badania tarcia wewnętrznego dla ziarna pozostającego w równowadze wilgotnościowej z otaczającym powietrzem.

Mechanizm oddziaływania wilgoci jest różny dla ośrodków pochodzenia mineralnego i roślinnego, a szczególnie dla nasion. W ośrodkach mineralnych drobiny wody umieszczone między ziarnami szkieletu tworzą wiązania powierzchniowe i wywierają istotny wpływ na odkształcenie, wytrzymałość, wartość kąta tarcia wewnętrznego oraz kohezję [17, 33, 52, 70]. W ośrodkach ziarnistych pochodzenia roślinnego oddziaływanie wody nie ogranicza się do zwilżania powierzchni cząstek i wypełniania porów, ale wnika ona do wnętrza ziaren powodując zmianę właściwości mechanicznych szkieletu.

Ziarna zbóż w zależności od wilgotności mogą wykazywać właściwości ciała sztywno-kruchoego, poprzez sprężyste ciało Hooke'a, do lepko-sprężystego, a nawet plastycznego dla dużych wilgotności [40, 67]. Dużym utrudnieniem jednoznacznego opisu zmian właściwości mechanicznych ziarna ze zmianą wilgotności jest jego nieciągła budowa komórkowa oraz zróżnicowanie budowy anatomicznej komórek w różnych obszarach ziarna. Poszczególne składniki struktury ziarna (skrobia, białko, lignina) różnie reagują na zmiany wilgotności. Wpływ wilgotności na zmianę właściwości mechanicznych całego ziarna jest podobny do wpływu temperatury na zmianę właściwości mechanicznych materiałów technicznych. Thompson i Ross [60] badając ściśliwość masy ziarna pszenicy w zakresie ciśnienia do 7 kPa stwierdzili, że w zakresie wilgotności ziarna od 8% do 12% połowa zmiany gęstości ośrodka pochodziła od reorientacji ziaren, a połowa od ich sprężystej deformacji. Wzrost wilgotności powodował wzrost udziału deformacji ziaren w zmianie gęstości ośrodka. Przy wilgotności ziarna równej 24% około 70% zmiany gęstości ośrodka pochodziło od deformacji ziaren. Grundas i Horabik [23] badając proces pelzania i opóźnionej sprężystości masy ziarna pszenicy stwierdzili, że udział lepko-sprężystej deformacji ośrodka, zanikającej po usunięciu obciążenia, stanowi od 35% do 48% całkowitej zmiany objętości ośrodka, zależnie od wilgotności ziarna. Bock i inni [8] stwierdzili, że w procesie relaksacji naprężeń w ziarnie pszenicy badanym metodą trójosiowego ściskania stała czasowa uogólnionego modelu Maxwella zależy istotnie od wilgotności ziarna.

Kąt tarcia wewnętrznego zależy istotnie od wilgotności ziarna. Metzger [39] mierząc kąt tarcia wewnętrznego ziarna kukurydzy metodą trójosiowego ściskania stwierdził, że w przedziale wilgotności ziarna od 9% do 33% kąt tarcia wewnętrznego

rosł monotonicznie od wartości 17° do 35°. Zależność kąta tarcia wewnętrznego od wilgotności ziarna autor opisał funkcją wykładniczą. Natomiast Grochowicz [20] mierząc metodą trójosiowego ściskania kąt tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy w podobnym przedziale wilgotności stwierdził, że po przekroczeniu 24% wilgotności ziarna kąt tarcia wewnętrznego przestawał przyrastać ze wzrostem wilgotności.

Wielu autorów [26, 27, 43] zakłada, że w materiałach ziarnistych pochodzenia roślinnego zjawisko kohezji nie występuje, a sam parametr kohezji wynika jedynie z matematycznej interpretacji uzyskanych wyników opracowanych w oparciu o warunek plastyczności Coulomba – Mohra. Jednakże przy dużej wilgotności ziarna występują siły spójności między ziarnami. Kohezja C reprezentuje wtedy wiązania adhezyjne w miejscu styku ziaren. Wiązania te są wynikiem występowania różnego rodzaju sił, takich jak: siły przyciągania van der Waalsa, siły walencyjne między cząsteczkami, występowanie napięć powierzchniowych, siły przyczepności przez mostki cieczowe, elektrostatyczne siły przyciągania i inne. W pewnych przypadkach między ziarnami mogą tworzyć się silne wiązania w wyniku krystalizacji, osadzania cząstek koloidalnych i innych procesów chemicznych [50, 62]. Wszystkie te siły rosną w miarę zwiększania się powierzchni kontaktu ziaren oraz w miarę upływu czasu. W przypadku długiego okresu składowania ziarna o podwyższonej wilgotności siły spójności między ziarnami przyjmują bardzo duże wartości. Zjawisko to często nazywane jest zleganiem ziarna [77]. Kohezja rośnie wraz ze zmniejszaniem się wielkości cząstek szkieletu ośrodka i wzrostem jego wilgotności [62, 64].

W literaturze dotyczącej tarcia zewnętrznego ziarnistych materiałów roślinnych wilgotność ziarna i wilgotność otaczającego powietrza są traktowane jako dwa różne parametry decydujące o wartościach uzyskiwanych wyników pomiarów [14]. Ziarno w warstwie w stanie ustalonym (np. w procesie przechowywania) pozostaje w warunkach wilgotności równowagowej [1, 74] i w takich warunkach powinien być mierzony kąt tarcia wewnętrznego. Można to uzyskać przez wykonanie pomiarów w odpowiednio klimatyzowanych komorach lub przez badanie szczelnie zamkniętych próbek ziarna po ustaleniu się w nich wilgotności równowagowej.

#### 1.1.3.2 Gęstość materiału

Kąt tarcia wewnętrznego zależy zarówno od właściwości mechanicznych ziarna (chropowatość, twardość), jak i od koncentracji wyrażonej gęstością lub porowatością ośrodka. Uwzględniając wpływ koncentracji, kryterium płynięcia można wyrazić pewną funkcją naprężeń  $\sigma$  i  $\tau$  oraz gęstości  $\rho$ :  $f(\sigma, \tau, \rho) = 0$  lub w równoważnej postaci [11, 43, 6]:

$$\tau = F(\sigma, \rho) \quad (10)$$

Szczególną postacią funkcji  $F$  jest funkcja liniowa:

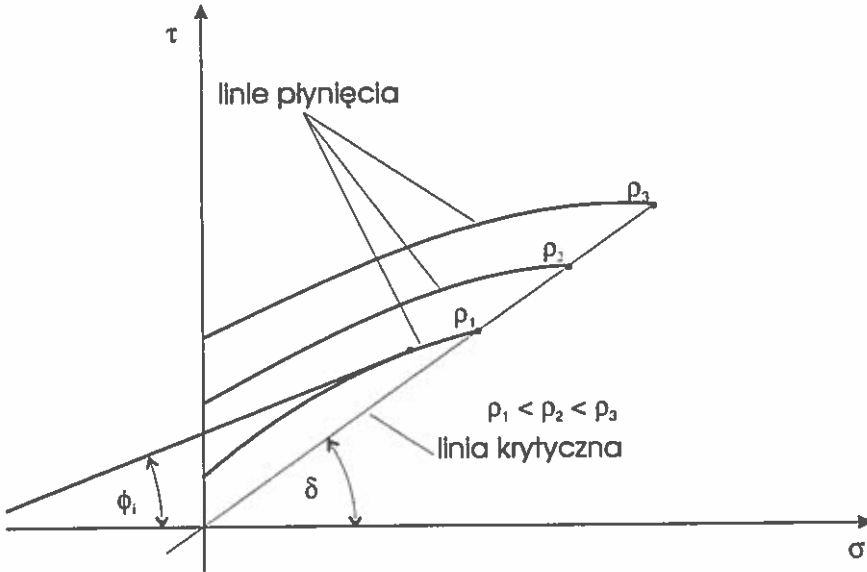


$$\tau = a(\rho)\sigma + b(\rho) \quad (11)$$

gdzie  $a$  i  $b$  są funkcjami gęstości. Oznaczając w wyrażeniu (11) kąt nachylenia prostej przez  $\phi$ , a rzędną przecięcia z osią  $\tau$  przez  $C$  otrzymamy następującą postać:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg}\phi(\rho) + C(\rho) \quad (12)$$

W przypadku gdy kąt tarcia wewnętrzznego i kohezja nie zależą od gęstości, formuła (12) wyraża liniowy warunek stanu granicznego Coulomba – Mohra (8).



Rys. 1.4. Wpływ naprężenia normalnego  $\sigma$  i gęstości  $\rho$  na kąt tarcia wewnętrzznego  $\phi$

Ilustracją nieliniowego kryterium płynięcia na płaszczyźnie  $\sigma, \tau$  jest rodzina krzywych płynięcia, dla których parametr  $\rho$  decyduje o położeniu krzywej na płaszczyźnie  $(\sigma, \tau)$  (rysunek 1.4). Wzrost gęstości początkowej próbki powoduje przyrost wytrzymałości na ścinanie, co określane jest terminem wzmocnienia gęstościowego materiału. Punkty końcowe poszczególnych linii płynięcia wyznaczają stan płynięcia bez zmian gęstości materiału zachodzący przy stałej wartości naprężenia stycznego i normalnego. Linia łącząca końcowe punkty płynięcia nosi nazwę linii krytycznej. Jeżeli przyjmiemy, że linia ta jest prostą i przecina początek układu współrzędnych, co uzasadnia szereg badań eksperymentalnych [27], to warunek płynięcia przyjmie postać:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg}\delta \quad (13)$$

gdzie w miejsce kąta  $\phi$  wprowadzono kąt  $\delta$  zwany efektywnym kątem tarcia wewnętrzznego. W przypadku braku kohezji kąt  $\delta$  odpowiada kątowi tarcia ustalonego płynięcia  $\phi_s$ .

### 1.1.3.3 Struktura geometryczna ośrodka

Charakterystyki mechaniczne ośrodka rozdrobnionego zależą od wzajemnego przestrzennego ułożenia ziarn w warstwie. Systematyczne badania wpływu struktury przestrzennego ułożenia granuł na właściwości mechaniczne ośrodka zapoczątkował Oda [46, 47]. Dla opisu przestrzennej orientacji niesferycznych granuł w próbce wprowadził dwie następujące miary przestrzennego uporządkowania:

1 – preferowany kierunek najdłuższych osi granuł względem wybranego układu odniesienia:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{2} \arctg \left( \frac{\sum_{i=1}^n \sin 2\theta_i}{\sum_{i=1}^n \cos 2\theta_i} \right) \quad (14)$$

2 – intensywność równoległego ułożenia najdłuższych osi

$$V*M = \sqrt{\left( \sum_{i=0}^n \sin 2\theta_i \right)^2 + \left( \sum_{i=0}^n \cos 2\theta_i \right)^2} * \frac{100}{n} \quad (15)$$

gdzie:  $n$  oznacza ilość pomiarów, zaś  $\theta_i$  jest kątem nachylenia najdłuższej osi danego ziarna względem przyjętego układu odniesienia. Wartość wyrażenia  $V*M$  zmienia się w zakresie od 0% do 100%. Kompletnie losowemu ułożeniu najdłuższych osi granuł odpowiada wartość 0%, podczas gdy 100% reprezentuje idealnie równoległe ułożenie najdłuższych osi wszystkich granuł.

Oda wyróżnia dwa rodzaje anizotropii ośrodka wywołanej przestrzennym uporządkowaniem granuł: anizotropię spowodowaną wyróżnionym kierunkiem ułożenia niesferycznych granuł oraz anizotropię spowodowaną wyróżnionym kierunkiem koncentracji normalnych do punktów kontaktu ziaren. Gdy ośrodek składa się z granuł niesferycznych mogą wystąpić oba rodzaje anizotropii, natomiast gdy ośrodek składa się z cząstek sferycznych może pojawić się tylko drugi typ anizotropii. Ziarna zbóż są wyraźnie niesferyczne. W przypadku pszenicy długość ziarna jest około dwukrotnie większa niż jego szerokość. Jeżeli najdłuższe osie ziaren są zorientowane losowo, a ziarna upakowane z jednakową gęstością, to można oczekiwać, że ośrodek będzie jednorodny i izotropowy. Jeśli jednak przeważa pewien wyróżniony kierunek orientacji dłuższych osi ziaren, to ośrodek wykazuje anizotropię właściwości mechanicznych. Wartość kąta tarcia wewnętrznego zależy wtedy od kierunku poślizgu [44, 45]. W kierunku równoległym do wyróżnionej orientacji najdłuższych ziaren kąt tarcia wewnętrznego jest najmniejszy, zaś w kierunku prostopadłym – największy.

### 1.1.4 Metody pomiarowe i aparatura

Określenie wytrzymałości materiału granularnego w większości przypadków sprowadza się do wyznaczenia warunku płynięcia materiału. Najczęściej wystarczająco dokładny jest warunek stanu granicznego Mohra – Coulomba. Do jego wyznaczania opracowano wiele metod pomiarowych wykorzystujących różnego typu aparaty ścinające [26, 59, 62, 63, 64, 66, 77]. 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 określenia zależności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem, praktyczne zagadnienia inżynierskie np. wymiarowanie silosów oraz porównywanie materiałów sypkich.

Do wyznaczania parametrów teoretycznych i empirycznych modeli opisujących zależność naprężenie-odkształcenie bardzo często stosowana jest metoda trójosiowego ściskania. Pukos [53] oraz Konstankiewicz [33] zastosowali metodę trójosiowego ściskania do weryfikacji termodynamicznych modeli odkształcenia ośrodka gębowego. Metodę tę zastosowali Zhang i inni [78, 79, 80] oraz Li i inni [37] do wyznaczenia parametrów sprężysto-plastycznych modeli do opisu zależności naprężenie-odkształcenie w ziarnie zbóż. Z kolei Ziolkowski i inni [81] zastosowali aparat trójosiowego ściskania jako kolumnę rezonansową do wyznaczenia modułu sprężystości postaciowej oraz charakterystyk tłumienia drgań w ziarnie pszenicy.

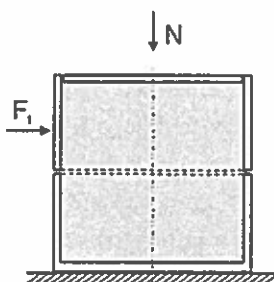
#### 1.1.4.1 Aparat bezpośredniego ścinania

Jenike [62] w badaniach materiałów roślinnych stosował aparat bezpośredniego ścinania o kołowym przekroju komory pomiarowej (rysunek 1.5). Jest to pionowo ustawiony cylinder (o średnicy  $D = 95$  mm) podzielony na dwa pierścienie prostopadłe do osi. Dolny pierścień umocowany jest do podłoża. Badanym materiałem napelnia się cylinder i obciąża siłą normalną  $N$ . Następnie górny pierścień przesuwa się prostopadłe do osi symetrii, rejestrując siłę styczną  $F_t$ . Dzieląc siłę normalną i styczną przez pole powierzchni przekroju poziomego próbki uzyskujemy naprężenie normalne  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{N}{S} \quad (16)$$

oraz naprężenie styczne  $\tau$  w płaszczyźnie ścinania:

$$\tau = \frac{F_t}{S} \quad (17)$$



Rys. 1.5. Aparat bezpośredniego ścinania

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  $\sigma$ , a styczną do krzywej jest kątem tarcia wewnętrznego  $\phi$ . Według Mroza i in. [43] powyższa interpretacja będzie poprawna, jeśli wymuszona w aparacie płaszczyzna ścicia jest nachylona względem płaszczyzny większego naprężenia głównego  $\sigma_1$  pod kątem  $\pi/4 + \phi/2$ . 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 [27, 42, 53, 55, 63] wykazały, że wokół przyjętej płaszczyzny poślizgu tworzy się obszar soczewkowatego odkształcenia. W materiale powstaje więc zróżnicowana gęstość. Na podstawie zmiany wysokości próbki można sądzić o zmianie średniej gęstości w czasie ścinania, co nie daje jednak pełnego obrazu rozkładu gęstości i pola deformacji w strefie poślizgu.

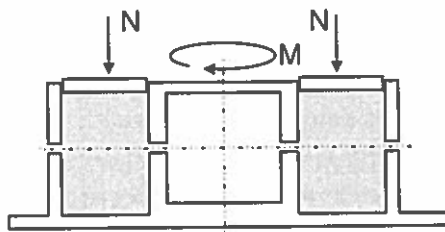
Na podobnej zasadzie działają stosowane w gruntoznawstwie i gleboznawstwie, aparaty bezpośredniego ścinania [2, 7, 43, 58, 66, 68], w których przekrój poziomy komory pomiarowej ma kształt kwadratu lub prostokąta. Pomiary wykonywane w aparacie o wymiarach próbki 60×60×50 mm, są uznawane w Polsce jako standardowe próby techniczne dla określenia wytrzymałości gruntów [48]. Do badań materiałów roślinnych stosowano aparaty o wymiarach próbki  $D = 210$  i  $H = 120$  mm [68].

W oparciu o wyniki doświadczeń uzyskanych aparatem bezpośredniego ścinania o wymiarach próbki 400×200×60 mm stwierdzono, że rolnicze materiały ziarniste w przeciwieństwie do gruntów, wymagają dużych przemieszczeń do osiągnięcia naprężenia granicznego, dochodzących często do 20% przekroju próbki. W czasie pomiaru następuje istotne zmniejszenie się powierzchni czynnej ścinania, a ponadto zaznacza

się duży wpływ wnikania krawędzi skrzynki w próbkę. Przeprowadzone przez Hessego i Hoffmanna [26] 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.

#### 1.1.4.2 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 [11, 15, 26, 35, 73, 76]. Różnią się one od omówionych poprzednio sposobem realizacji naprężeń ścinających, które w tym przypadku są wymuszane momentem skręcającym (rys. 1.6). Zapewniają one stałą wielkość powierzchni ścinania, ale nie eliminują niejednorodności stanu naprężeń w próbce, co wynika z zasady działania i zastosowanej konstrukcji [73].



Rys. 1.6. Aparat pierścieniowy bezpośredniego ścinania

Korzystne rozwiązanie stanowi aparat skrętny opisany przez Hessego i Hoffmanna [26]. Kanał ścinający w kształcie pierścienia kołowego ograniczony jest podstawą, pierścieniami nastawczymi wewnętrznymi i zewnętrznymi oraz tłokiem połączonym z kołem. Przez zmianę ustawienia tych pierścieni można osiągnąć 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.

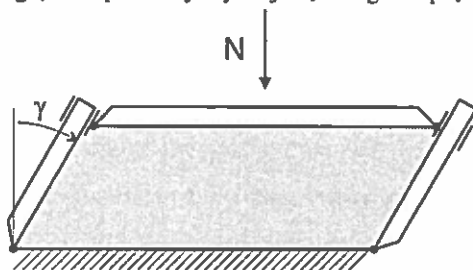
Aparaty skrętne można uważać za aparaty bezpośredniego ścinania, w których wyeliminowano niejednorodność stanu naprężenia i odkształcenia na czołowej i tylnej

ściance 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 uwzględnić, 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 o większym promieniu próbki. Utrudnia to interpretację i wymaga korekty wyników.

W literaturze dotyczącej badań ośrodków sypkich [42, 66] wykazano, że aparaty o wymuszonej płaszczyźnie ścinania, wprowadzają znaczne niejednorodności gęstości i naprężeń w badanym materiale. Otrzymanie rzetelnych wyników badań wymaga ścisłego przestrzegania ustalonych procedur pomiaru [73].

#### 1.1.4.3 Aparat prostego ścinania

Roscoe [56] w swoich badaniach gruboziarnistego bezkohezyjnego piasku stosował aparat o ruchomych ścianach bocznych, przez które przekazywane było obciążenie ścinające, tzw. aparat prostego ścinania (rys. 1.7). Aparat ten adaptowany i zastosowany przez Schwedesa [64] do pomiarów drobnoziarnistych kohezyjnych proszków okazał się bardzo użyteczny również dla tej grupy materiałów. Najważniejszą zaletą tego urządzenia jest w pełni określony stan naprężenia. Próbka w aparacie odkształca się tak samo jak odkształcałaby 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 tym urządzeniu 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.



Rys. 1.7. Aparat prostego ścinania

Badania ziarna zbóż przeprowadzone na tego typu aparacie przez Hessego i Hofmanna [26] wykazały, że przy długich drogach ścinania, wymaganych dla roślinnych materiałów sypkich, występują znaczne nierównomierności rozkładu naprężenia ścisającego podobne do obserwowanych w aparacie bezpośredniego ścinania. Zdaniem

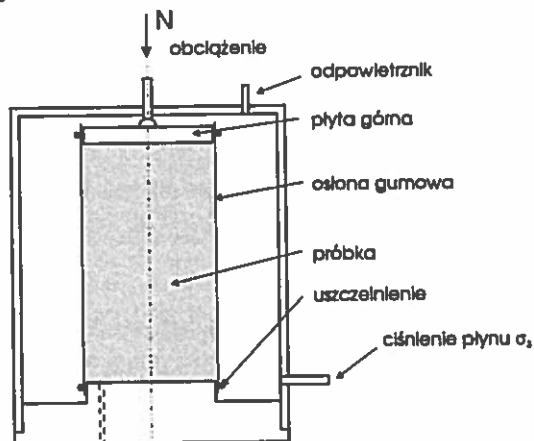
autorów aparat prostego ścinania może mieć bardzo ograniczony zakres stosowania przy badaniu tych materiałów. Cechą niekorzystną tego aparatu jest również brak możliwości realizowania dowolnych schematów obciążeń badanej próbki [67].

#### 1.1.4.4 Aparat trójosiowego ściskania

Wad występujących w omówionych metodach 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 [6, 12, 63]. W aparacie dwuosiowego ściskania próbka ma kształt sześcianu lub prostopadłościanu [5, 25]. 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 stałowych płyt łożyskowanych w prowadnicach. Każda para przeciwnych pionowych ścian może przemieszczać się ku wnętrzu próbki, napędzana przez popychacze poruszające się ze stałą prędkością. W trakcie obciążania pionowa oś symetrii utrzymywana jest w stałym położeniu. Aparat dwuosiowego ściskania nie znalazł szerszego zastosowania prawdopodobnie ze względu na swoją skomplikowaną i kosztowną konstrukcję mechaniczną, przy walorach podobnych do prostszego aparatu trójosiowego.

Aparat trójosiowego ściskania jest powszechnie stosowany w badaniach gruntoznawczych i gleboznawstwie [3, 6, 58, 70]. Wyniki uzyskane w tym aparacie stanowią w gruntoznawstwie podstawę do określania wytrzymałości gruntu [48, 66].

Schemat aparatu przedstawiono na rys. 1.8. Osiowo-symetryczny stan naprężenia wytwarzany jest poprzez umieszczenie walcowej próbki badanego ośrodka (w osłonce gumowej) w komorze ciśnieniowej oraz obciążenie próbki siłą  $N$  wzdłuż jej osi symetrii. Naprężenie  $\sigma_1$  jest sumą ciśnienia hydrostatycznego  $\sigma_3$  oraz naprężenia



Rys. 1.8. Aparat trójosiowego ściskania

wynikającego z przyłożonej siły  $N$ . Aparat trójosiowego ściskania umożliwia realizowanie wielu różnych schematów obciążania próbki, co pozwala wyznaczyć wiele stałych materiałowych ośrodka [8, 37, 79, 80]. W przypadku wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego metodą trójosiowego ściskania w praktyce rejestrowany jest przebieg naprężenia  $\sigma_1$  w miarę wzrostu odkształcenia próbki wzdłuż jej osi symetrii  $\varepsilon_1$  przy stałej wartości naprężenia  $\sigma_1$ . Odkształcenie  $\varepsilon_1$  kontynuowane jest do momentu uzyskania maksymalnej bądź ustalonej wartości naprężenia  $\sigma_1$  lub też do momentu zaobserwowania wyraźnej płaszczyzny poślizgu. Kąt tarcia wewnętrznego wyznaczany jest z nachylenia obwiedni kół Mohra reprezentujących stan naprężenia w chwili płynięcia ośrodka dla kilku różnych wartości naprężenia  $\sigma_3$  [67]. Pomiar poziomu cieczy w kapilarze połączonej z komorą trójosiowego ściskania umożliwia wyznaczenie odkształcenia objętościowego  $\varepsilon_v$ .

Próbka materiału w aparatach stosowanych w gruntoznawstwie ma kształt cylindryczny o stosunku średnicy do wysokości równym 1:2. W powszechnie stosowanych w Polsce aparatach bada się próbki gruntu o średnicy 36 mm i wysokości 72 mm, a w literaturze [24, 59] opisano aparat, w którym zastosowano próbki o wymiarach 65×130 mm. W badaniach naukowych Bishop i in. [6] stosowali aparat o średnicy próbki 100×200 mm (4"×8"), a Horabik i Mołenda także próbki 150×300 mm. Ze wzrostem wielkości próbki przebiegi eksperymentalne są coraz gładziej [9]. Do badania hydrostatycznego zagęszczania ośrodka lepsze okazały się próbki o większej niż 1:2 wartości stosunku średnicy do wysokości [18]. Większość badań prowadzonych w aparacie trójosiowego ściskania dotyczy gruntów spoistych, chociaż w ostatnich latach aparat ten jest coraz powszechniej stosowany do badania roślinnych materiałów granulanych [8, 9, 20, 22, 29, 80].

Wielu autorów [6, 12, 16, 32, 33, 52, 75] 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 jedynie aparat prostego ścinania, aparat dwuosiowy i aparat trójosiowy mogą być stosowane w badaniach naukowych [63]. Tylko te urządzenia umożliwiają pełny opis stanu naprężenia i odkształcenia w próbce.

#### 1.1.4.5 Kąt usypu warstwy ziarna

Kątem usypu (lub nasypu) nazywamy kąt jaki powstaje między poziomą podstawą i tworzącą stożka utworzonego przy nasypywaniu ośrodka sypkiego w jedno miejsce [19]. Kąt usypu jest zwykle większy od kąta tarcia wewnętrznego. Tylko dla materiałów gruboziarnistych pozbawionych kohezji, kąt usypu jest zbliżony do kąta tarcia wewnętrznego  $\phi$  [54, 60]. W wielu opracowaniach dotyczących konstrukcji urządzeń



transportowych i magazynowych dla materiałów sypkich zaniedbuje się różnicę między kątem tarcia wewnętrznego a kątem swobodnego usypu [19, 67, 77]. Dla materiałów sypkich, w których występuje kohezja, kąt usypu przy ograniczonej wysokości stożka będzie większy niż kąt tarcia wewnętrznego  $\phi$ . Zjawisko samosortowania się ziarna, a także kształt ziarna poszczególnych gatunków i odmian zboża oraz wilgotność ziarna mają istotny wpływ na wartość kąta usypu [4, 10, 19, 40, 60]. Przykłady urządzeń do pomiaru kąta usypu omówił szczegółowo Zenkow [77].

## 1.2 Badania własne

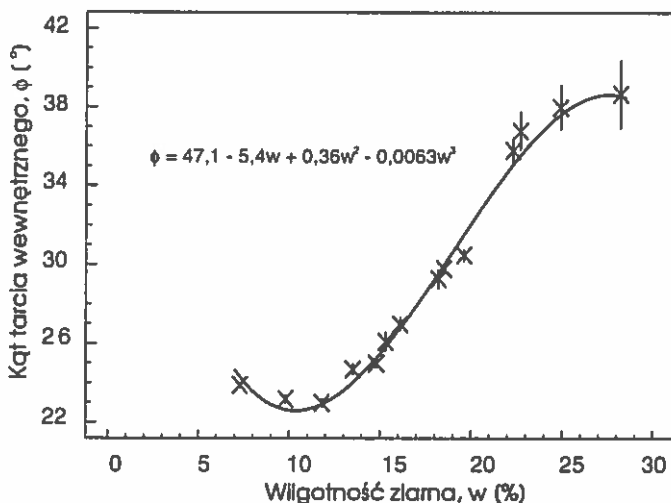
Badaniami objęto wpływ trzech podstawowych parametrów decydujących o wartości kąta tarcia wewnętrznego: wilgotności ziarna, gęstości upakowania oraz orientacji przestrzennej ziarna. Pomiary kąta tarcia wewnętrznego przeprowadzano metodą trójosiowego ściskania, a w przypadku badania wpływu orientacji przestrzennej ziarna – także metodą bezpośredniego ścinania. Wymiary próbki ośrodka w teście trójosiowego ściskania wynosiły:  $D = 65$  mm,  $H = 130$  mm – w przypadku badania wpływu wilgotności ziarna oraz:  $D = 150$  mm,  $H = 300$  mm – w przypadku badania wpływu pozostałych czynników. Wymiary cylindrycznej próbki ośrodka w teście bezpośredniego ścinania w aparacie Jenike'go wynosiły:  $D = 210$  mm,  $H = 120$  mm. Kąt tarcia wewnętrznego wyznaczano metodą obwiedni kół Mohra znajdując metodą najmniejszych kwadratów parametry stycznej do kół Mohra [68].

### 1.2.1 Wilgotność ziarna

Pomiary przeprowadzono dla pięciu wartości stałego naprężenia poziomego  $\sigma_3 = 0,03; 0,05; 0,1; 0,2$  i  $0,3$  MPa, w dziesięciu powtórzeniach dla każdej kombinacji. Wilgotność początkowa ziarna pszenicy odmiany Grana wynosiła 28,2%. W celu określenia wpływu wilgotności na wartość współczynnika tarcia wewnętrznego próbki do pomiarów pobierano w trakcie naturalnego suszenia ziarna. Dla otrzymania wilgotności niższych niż 11,8% ziarno dosuszano w suszarce w temperaturze 50°C. Wilgotność ziarna określano metodą suszarkową po każdej serii pomiarów.

Wartości średnie kąta tarcia wewnętrznego dla różnych wilgotności warstwy ziarna pszenicy odmiany Grana przedstawiono na rysunku 1.9. W przedziale wilgotności od 7 do 28% zależność kąta tarcia wewnętrznego od wilgotności jest nieliniowa. Zależność tę opisuje dobrze wielomian trzeciego stopnia (rysunek 1.9). Przy naturalnym suszeniu ziarna, od wilgotności 28,2% do 7,3%, kąt tarcia zmalał od 38,3° do 23°.

Można wyróżnić trzy przedziały wilgotności ziarna, w których zależność kąta tarcia wewnętrznego od wilgotności zmienia swój charakter: poniżej 11%; od 11% do 24% oraz powyżej 24%.



Rys. 1.9. Zależność kąta tarcia wewnętrznego ( $\phi$ ) od wilgotności ( $w$ ) ziarna pszenicy. Dane z pomiaru i estymowana krzywa

W przedziale wilgotności ziarna poniżej 11% kąt tarcia ulega nieznaczącej zmianie z tendencją malejącą w miarę wzrostu wilgotności ziarna.

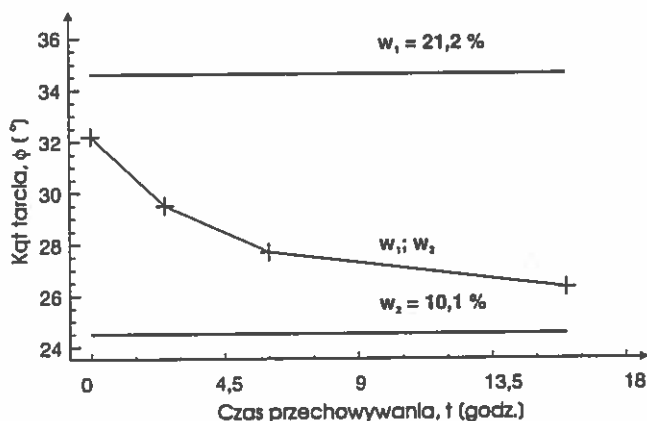
W przedziale od 11% do 24% wilgotności ziarna następuje szybki wzrost kąta tarcia wewnętrznego. Jego wartość wzrastała szybciej w przypadku ziarna zamkniętego w pojemnikach, w których panował stan wilgotności równowagowej [21].

Przedział trzeci obejmuje ziarna o wilgotności powyżej 24%. W tym przedziale wilgotności zachodzi jakościowa zmiana właściwości mechanicznych ziarna. Daje się to zauważyć szczególnie w przypadku ziarna zamkniętego w pojemnikach w stanie wilgotności równowagowej. Ziarno to było napęczniałe, miękkie, a okrywa nasienna mało odporna na odkształcenia. Na powierzchni ziaren można było zauważyć ślady cieczy. Często zachodziło wzajemne zlepianie się ziaren. W tym zakresie wilgotności ziarna wyraźnie wzrastała wielkość odkształcenia osiowego  $\epsilon_1$ , niezbędnego do wytworzenia wyraźnej płaszczyzny ścięcia. Po pomiarze można stwierdzić duże odkształcenia postaciowe poszczególnych ziaren oraz pęknięcia okrywy nasiennej. Natomiast ziarno o tej samej wilgotności globalnej (określanej metodą wagową), lecz pozostające w atmosferze o niższej wilgotności względnej powietrza posiadało okrywę nasienną twardszą i suchą. Ziarno to było również bardziej odporne na odkształcenia postaciowe, niż ziarno pozostające w warunkach wilgotności równowagowej.

Porównanie wyników pomiarów próbek ziarna pobranego do badań bezpośrednio w czasie suszenia w warunkach naturalnych oraz przygotowanego w zamkniętych pojemnikach, wykazuje podobny przebieg zależności wartości kąta tarcia wewnętrznego

od wilgotności ziarna. Wartość kąta tarcia wewnętrznego była wyższa dla ziarna pozostającego w warunkach wilgotności równowagowej [21].

W celu oceny wpływu ziaren o różnej wilgotności w obrębie tej samej próbki na kąt tarcia wewnętrznego przeprowadzono pomiary na próbce powstałej ze zmieszania w proporcji 1:1 ziarna o dwu różnych poziomach wilgotności: 10,1% i 21,2%. Pomiar kąta tarcia wewnętrznego przeprowadzono dla każdej próby oddzielnie, a następnie po 10 minutach od chwili zmieszania ziarna o różnej wilgotności. Pomiar powtórzono następnie po 2,5, 6 i 16 godzinach. Zmieszane ziarno przechowywano w zamkniętych pojemnikach. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 1.10. Bezpośrednio po zmieszaniu ziarna kąt tarcia wewnętrznego przyjmuje wartość bliższą dla ziarna bardziej wilgotnego. W miarę upływu czasu i wyrównywania się wilgotności ziarna w próbce, kąt tarcia wewnętrznego dąży do poziomu odpowiadającego wynikowej wilgotności ziarna.

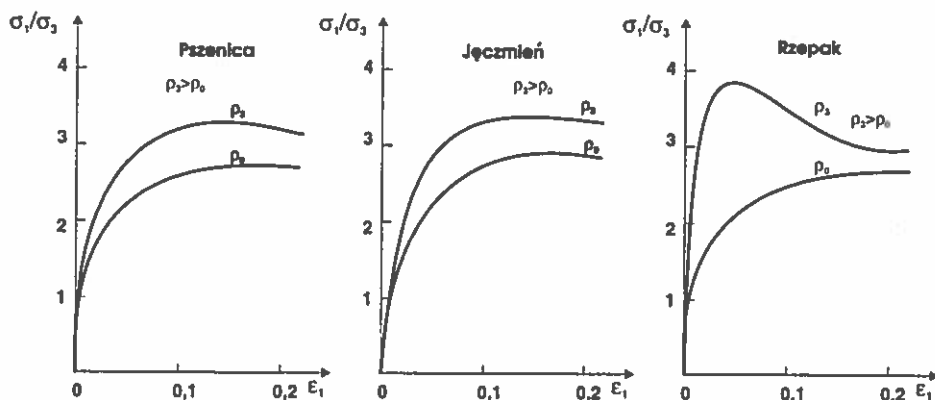


Rys. 1.10. Zależność kąta tarcia wewnętrznego  $\phi$  mieszanki dwu próbek ziarna pszenicy o wilgotnościach  $w_1 = 21,2\%$  i  $w_2 = 10,1\%$  od czasu przechowywania

### 1.2.2 Gęstość ośrodka

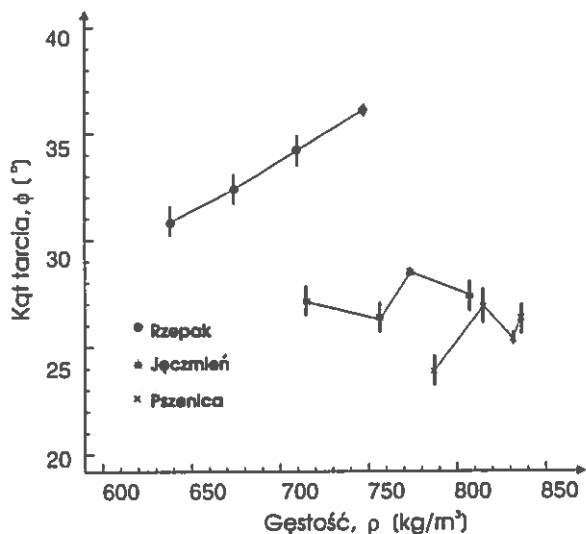
Badania przeprowadzono na ziarnie pszenicy i jęczmienia oraz na nasionach rzepaku. Ziarno nasypywano do formy trójosiowej próbki równomiernym strumieniem wzdłuż osi symetrii próbki. Taka metoda napełniania gwarantowała uzyskanie symetrycznej struktury próbki, a tym samym maksymalną wytrzymałość dla danej gęstości ośrodka. Następnie próbkę ośrodka poddawano zagęszczaniu wibracyjnemu poprzez wymuszenie drgań poziomych o stałej amplitudzie  $a = 1,6$  mm i zmiennej częstotliwości. Częstotliwość drgań w zakresie od 0 do 50 Hz dobierano tak, aby uzyskać cztery różne gęstości ośrodka. Próby trójosiowego ściskania przeprowadzono dla pięciu wartości naprężenia poziomego:  $\sigma_3 = 0,04; 0,05; 0,06; 0,07$  oraz  $0,09$  MPa. Prędkość

odkształcenia próbki wzdłuż osi symetrii wynosiła  $0,0028 \text{ s}^{-1}$ . Każdy wariant eksperymentu przeprowadzono w pięciu powtórzeniach. Kąt tarcia rozpoczynającego się płynięcia  $\phi_1$  wyznaczano w oparciu o maksymalną wartość stosunku naprężeń głównych  $\sigma_1/\sigma_3$ .



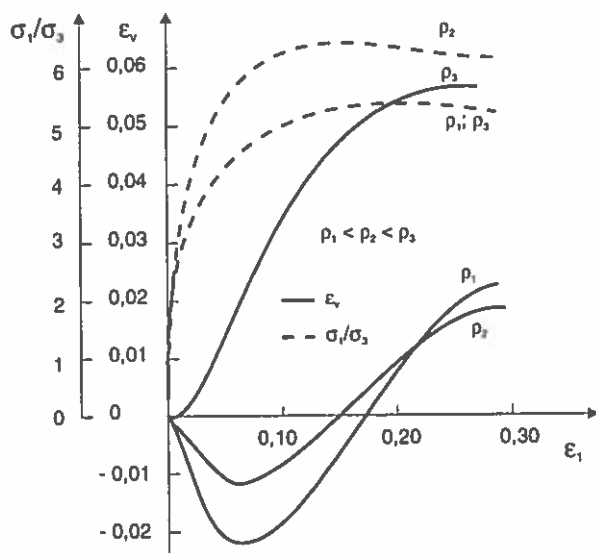
Rys. 1.11. Stosunek największego do najmniejszego naprężenia głównego w próbce trójosiowego ściskania ziarna pszenicy, jęczmienia i rzepaku w zależności od odkształcenia próbki

Rysunek 1.11 ilustruje przebieg krzywych  $\sigma_1/\sigma_3 - \epsilon_1$  dla skrajnych gęstości ośrodka dla trzech badanych nasion. Jedynie w przypadku zagęszczonej próbki rzepaku obserwowano wyraźne osłabienie ośrodka, czyli zmniejszanie się wartości stosunku naprężeń głównych  $\sigma_1/\sigma_3$  w miarę wzrostu odkształcenia  $\epsilon_1$ . W przypadku luźnej próbki rzepaku stosunek naprężeń głównych  $\sigma_1/\sigma_3$  rósł monotonicznie aż do osiągnięcia stanu granicznego. Wstępnie zagęszczone próbki pszenicy i jęczmienia nie wykazywały wyraźnego efektu osłabienia. W przypadku pszenicy i jęczmienia stosunek naprężeń głównych  $\sigma_1/\sigma_3$  stabilizował się, gdy wartości odkształcenia osiowego  $\epsilon_1$  przekroczyła około 10%, pomimo zmian objętości próbki. Typowy przebieg zależności odkształcenia objętościowego  $\epsilon_v$  próbki jęczmienia od odkształcenia osiowego  $\epsilon_1$  przedstawia rysunek 1.12. Próbka wstępnie zagęszczona zaczynała rozluźniać się praktycznie natychmiast po przyłożeniu obciążenia. Próbka ta również najszybciej traciła jednorodność deformacji oraz wytwarzała się wyraźna płaszczyzna ścięcia. Zupełnie inaczej zachowywała się próbka luźna. Próbka ta na ogół zagęszczała się ze wzrostem odkształcenia osiowego  $\epsilon_1$ , a jedynie przy bardzo dużych odkształceniach osiowych rzędu 20% oraz przy najniższej wartości naprężenia poziomego zaczynała powiększać swą objętość powyżej objętości początkowej. Ten rodzaj próbki wykazywał również największą jednorodność deformacji. Nie obserwowano płaszczyzny ścięcia, zaś próbka równomiernie pęczniała, przyjmując kształt beczki.



Rys. 1.12. Kąt tarcia wewnętrzne  $\phi$  mierzony metodą trójosiowego ściskania w zależności od gęstości  $\rho$  nasion rzepaku, oraz ziarna jęczmienia i pszenicy

Rysunek 1.13 ilustruje przebieg zmian kąta tarcia wewnętrzne rozpoczynającego się płynięcia  $\phi_1$  ze zmianą gęstości ośrodka  $\rho$ . Dla wszystkich trzech badanych nasion kąt ten rósł ze wzrostem gęstości ośrodka. Największe zmiany gęstości oraz zmiany kąta tarcia wewnętrzne (około 17%) obserwowano w przypadku rzepaku.



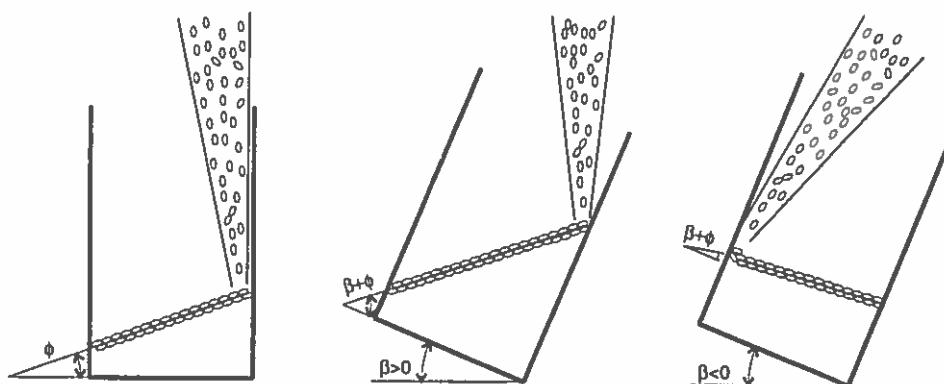
Rys. 1.13. Przebieg stosunku naprężeń  $\sigma_1/\sigma_3$  i odkształcenia objętościowego  $\epsilon$  próbki ziarna jęczmienia w trakcie trójosiowego ściskania

## 1.2.3 Orientacja przestrzenna ziarna

### 1.2.3.1 Metoda przygotowania próbki

Do badań wybrano ziarno pszenicy, jęczmienia, żyta oraz nasiona rzepaku. Wybrane gatunki ziarna reprezentują kształt od kuli (rzepak) do mocno wydłużonej elipsoidy (żyto). Wilgotność ziarna zawierała się w przedziale od 10,5% do 12%, zaś w przypadku rzepaku wynosiła 8%.

W celu wywołania określonej orientacji ziarna w próbce wykorzystano zjawisko powstawania kąta naturalnego usypu ziarna oraz efekt układania się ziaren na ogół najdłuższą osią wzdłuż tworzącej powstałego stożka [28, 29, 68]. Metodę przygotowania próbki do badań trójosiowego ściskania ilustruje rysunek 1.14. Ziarno nasypywano równomiernym strumieniem ze zbiornika zasypowego z prostokątnym otworem wylotowym o wymiarach 8×24 mm do gumowej membrany umieszczonej w sztywnej, dwuczęściowej, walcowej (cylicydrycznej) formie. Zbiornik zasypowy umieszczony przy ścianie formy podnoszono do góry w miarę napelniania formy ziarnem, tak aby otwór wylotowy znajdował się zawsze około 20 mm powyżej wierzchołka swobodnej powierzchni usypującego się ziarna. Po wypełnieniu całej formy badanym ośrodkiem zamocowywano górną cylindryczną pokrywę próbki. Następnie wytwarzano podciśnienie wewnątrz próbki, dzięki czemu zyskiwała ona sztywność kształtu, co pozwalało wyjąć ją z formy oraz umieścić w komorze ciśnieniowej, bez obawy o naruszenie przestrzennej struktury ośrodka wytworzonej w trakcie formowania próbki.



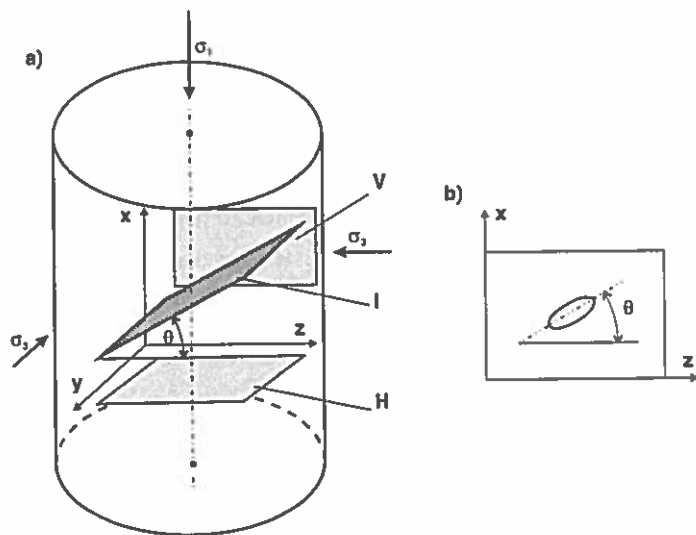
Rys. 1.14. Metoda przygotowania próbki ziarna do testu trójosiowego ściskania

Kąt zawarty między swobodną powierzchnią sypanego ziarna a podstawą próbki zmieniano poprzez pochylenie formy względem pionu podczas nasypywania ziarna. Ponieważ ziarna układają się na ogół najdłuższą osią równoległe do tworzącej stożka naturalnego usypu, zatem zmieniając pochylenie formy względem pionu zmieniano równocześnie preferowaną przestrzenną orientację ziaren względem układu odniesienia

związanego z próbką. Do dalszych badań wybrano sześć wartości kąta pochylenia próbki:  $\beta = -20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$  i  $30^\circ$  (rysunek 1.14). Kąt naturalnego usypu ziarna wynosił około  $20^\circ$ . Dodatkowo w celach porównawczych ziarno nasypywano do pionowej formy ( $\beta = 0^\circ$ ), umieszczając otwór wylotowy zbiornika zasypowego wzdłuż osi symetrii próbki, a nie jak poprzednio przy ścianie. Każdorazowo ta sama ilość ziarna wypełniała całą objętość formy, w związku z czym otrzymywano zawsze tę samą gęstość ośrodka.

### 1.2.3.2 Ocena przestrzennej orientacji w próbce

W celu oszacowania stopnia uporządkowania najdłuższych osi ziaren, próbki ośrodka przygotowane zgodnie z omówioną wyżej metodyką, zalewano żywicą poliesterową. Po zastygnięciu żywicy próbkę przecinano w płaszczyźnie V oraz H (rysunek 1.15). Następnie na podstawie otrzymanych przekrojów wyznaczano miary uporządkowania struktury zgodnie ze wzorami 14 i 15; dla kąta  $\beta = 20^\circ$  oraz dla przekroju V miary te wynosiły odpowiednio:  $\theta = 38^\circ, V \cdot M = 65\%$ . Następnie przecinano próbkę w płaszczyźnie I (rysunek 1.15), przy czym kąt  $\theta$  nachylenia przekroju I względem poziomu odpowiadał najbardziej prawdopodobnemu kierunkowi orientacji ziaren w przekroju V.



Rys. 1.15. Trzy płaszczyzny przekroju próbki

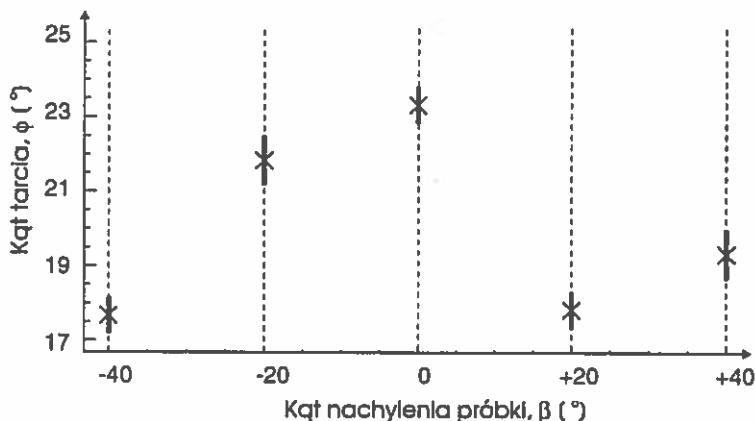
### 1.2.3.3 Wpływ orientacji ziarna na kąt tarcia wewnętrznego

Wpływ orientacji przestrzennej ziarna trzech gatunków zbóż i rzepaku na kąt tarcia wewnętrznego mierzono metodą trójosiowego ściskania i metodą bezpośredniego ścinania. Wybrano te dwie metody pomiarowe ze względu na ich szerokie rozpo-

wszechnienie w badaniach doświadczalnych mechaniki materiałów rozdrobnionych. Założono, że porównanie obu metod pozwoli wnioskować o ich przydatności w badaniach materiałów rolniczych.

Procedura przygotowania próbki ośrodka do testu bezpośredniego ścinania była identyczna jak w przypadku testu trójosiowego ściskania. W badaniach bezpośredniego ścinania zastosowano pięć poziomów obciążenia normalnego  $\sigma$  równych wartościom naprężenia  $\sigma_3$  w teście trójosiowego ściskania. Prędkość wzajemnego przemieszczania się dwóch połówek próbki wynosiła 1,3 mm/s. Każdy wariant eksperymentu powtarzano trzykrotnie.

Wstępne badania wpływu sposobu przygotowania próbki do badań przeprowadzone metodą trójosiowego ściskania na nasionach żyta w rozszerzonym zakresie kąta pochylenia próbki  $\beta = -40^\circ, -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ$  i  $40^\circ$  pozwoliły stwierdzić, że sposób nasywywania ziarna do formy wpływa istotnie na otrzymane charakterystyki mechaniczne badanych próbek ośrodka. Najbardziej wytrzymałe były próbki nasywywane do pionowej formy. Ten rodzaj próbek wykazywał również największą jednorodność deformacji. Na ogół nie obserwowano wyraźnej płaszczyzny ścięcia, lecz próbka równomiernie pęczniała przyjmując kształt beczki. Zupełnie inaczej zachowywała się próbka nasywywana do formy pochylonej względem pionu pod kątem  $\beta$ . Próbką taką szybciej traciła jednorodność deformacji i powstawała wyraźna płaszczyzna ścięcia. Ze wzrostem wartości kąta  $\beta$  malała maksymalna wartość stosunku naprężeń głównych. Na rysunku zaznaczono również powstałą w trakcie deformacji płaszczyznę ścięcia (linia przerywana). Zaznaczona orientacja płaszczyzny ścięcia powtarzała się regularnie w każdym eksperymencie. Na podstawie otrzymanych maksymalnych wartości stosunku naprężeń głównych  $\sigma_1/\sigma_3$  obliczano wartość kąta tarcia wewnętrznego  $\delta$  w oparciu o warunek plastyczności Coulomba – Mohra. Rysunek 1.16 przedstawia wartości kąta tarcia wewnętrznego dla różnych wartości kąta pochylenia formy względem pionu  $\beta$ . Naj-

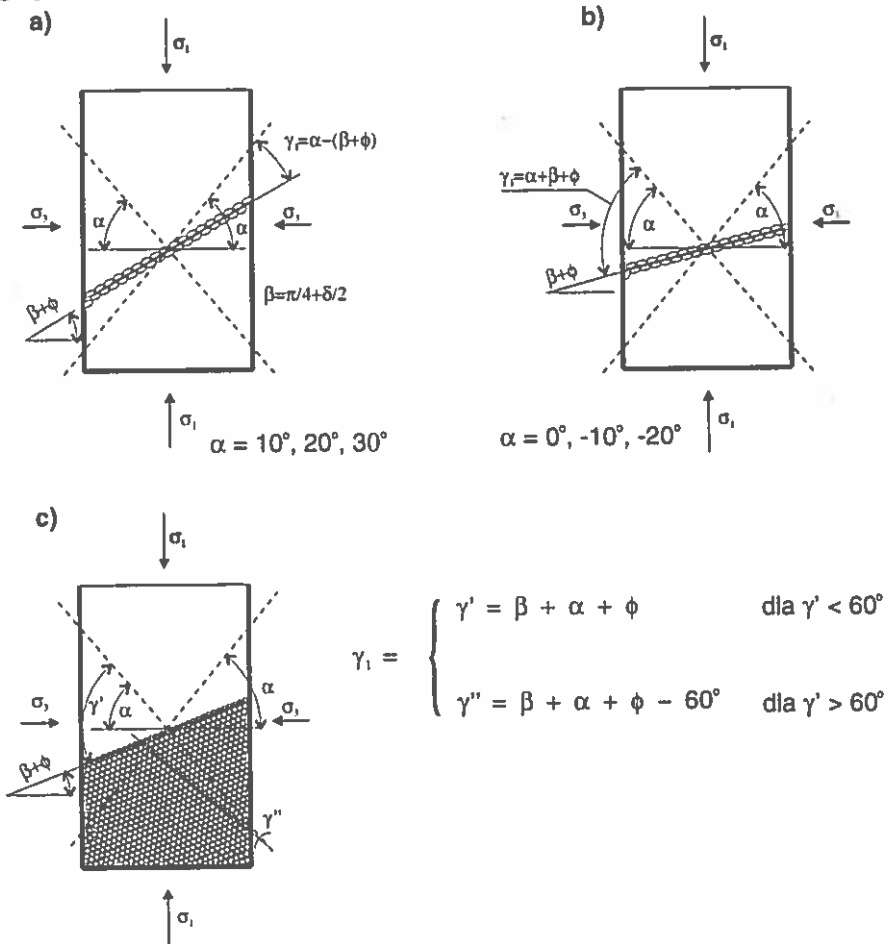


Rys. 1.16. Kąt tarcia wewnętrznego  $\phi$  ziarna żyta dla pięciu wartości kąta nachylenia próbki  $\beta$

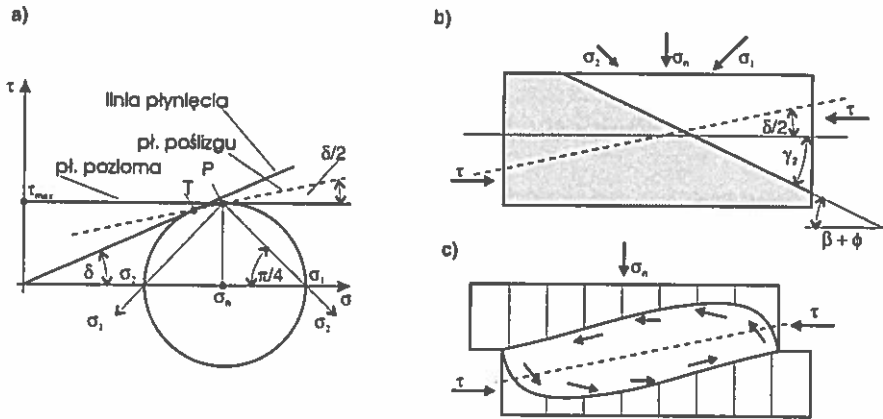


większe wartości kąta tarcia wewnętrznego otrzymano w przypadku próbki nasypywanej do pionowej formy, a zwłaszcza gdy ziarno nasypywane było wzdłuż osi symetrii. Ze wzrostem kąta pochylenia próbki  $\beta$  kąt tarcia wewnętrznego istotnie małał.

Zgodnie z warunkiem Coulomba płaszczyna poślizgu jest nachylona pod kątem  $\alpha = \pm(\pi/4 + \phi/2)$  do płaszczyny większego naprężenia głównego. Na rysunku 1.17 przedstawiono płaszczyny poślizgu i nachyloną do jednej z nich pod kątem  $\gamma_1$  swobodną powierzchnię próbki ziarna. Rysunek 1.17a odnosi się do testu trójosiowego ściskania przy kątach pochylenia próbki  $\beta$ :  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  i  $30^\circ$ , zaś rysunek 1.17b dotyczy kątów  $\beta$ :  $0^\circ$ ,  $-10^\circ$  i  $-20^\circ$ . O ile w przypadku ośrodka izotropowego istnieje wiele możliwych orientacji płaszczyny poślizgu, to w przypadku materiału anizotropowego płaszczyna poślizgu jest wymuszona przez kierunek najmniejszej wytrzymałości materialu.



Rys. 1.17. Próbkę materiału ziarnistego w teście trójosiowego ściskania  
a), b) – ziarna niesferyczne, c) – ziarna sferyczne



Rys. 1.18. Próbkę ziarna w teście bezpośredniego ścinania

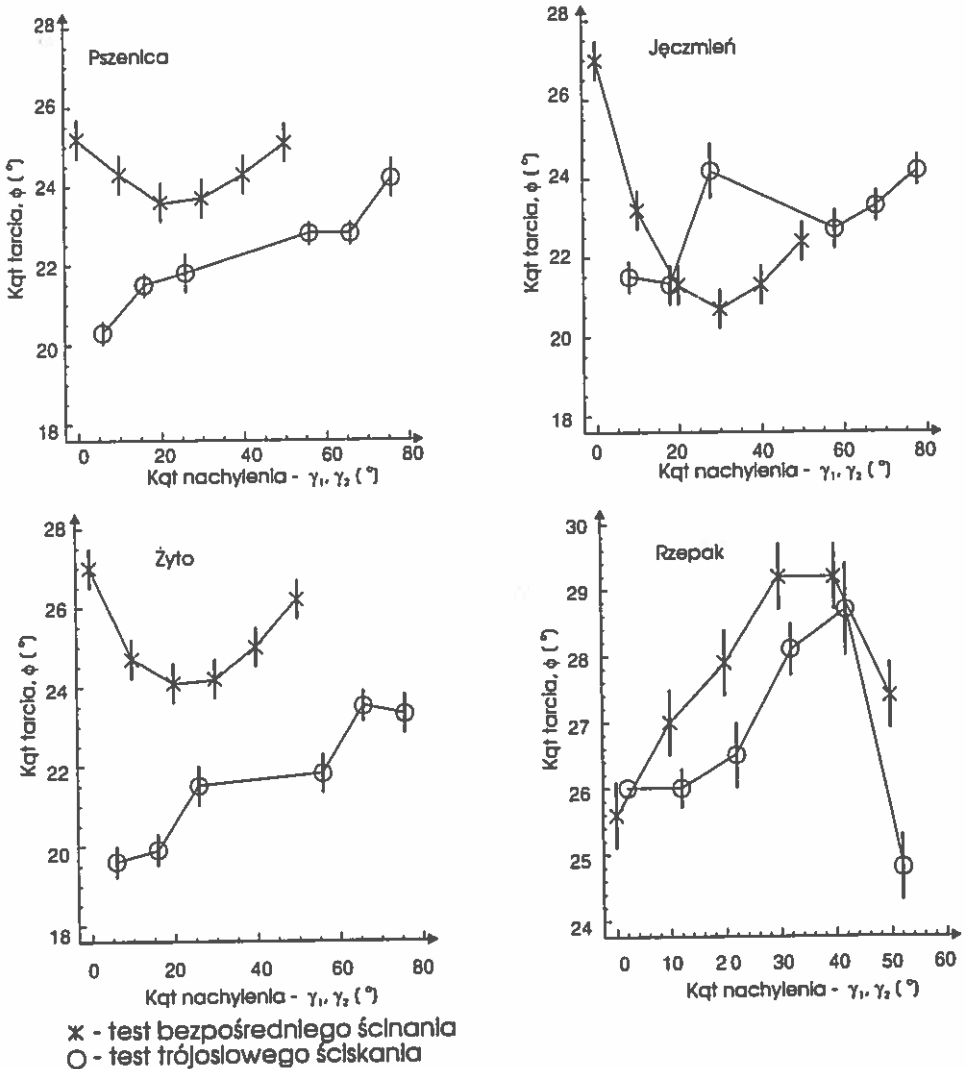
W ośrodku złożonym z ziarn sferycznych może wystąpić anizotropia koncentracji normalnych do punktów kontaktu ziarn. W strukturze heksagonalnej normalne do punktów kontaktu są wzajemnie nachylone pod kątem  $60^\circ$ , zatem kąt nachylenia normalnych do płaszczyzny poślizgu opisują równania przedstawione na rysunku 1.17c.

Na rysunku 1.18 przedstawiono stan naprężenia realizowany w aparacie bezpośredniego ścinania. Punkt P na wykresie Mohra ilustruje wartości naprężenia normalnego  $\sigma$  i maksymalnego naprężenia stycznego  $\tau$  zmierzone w poziomej płaszczyźnie ścięcia. Punkt P nie jest identyczny z punktem T – styczności warunku stanu granicznego Coulomba – Mohra z kołem Mohra [64]. Zatem płaszczyzna, na której spełniony jest warunek Coulomba – Mohra, nie pokrywa się z wymuszoną poziomo płaszczyzną ścinania, lecz jest do niej nachylona pod kątem  $\delta/2$ . Kąt preferowanego nachylenia dłuższych osi ziarn  $\gamma_2$  odnoszono nie do płaszczyzny, na której spełniony jest warunek Coulomba – Mohra, lecz do poziomej płaszczyzny ścięcia.

Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 1.19 jako wykresy zależności kąta tarcia wewnętrznego  $\phi$  od kąta nachylenia płaszczyzny poślizgu do preferowanego kierunku dłuższych osi ziarn  $\gamma_1$ , albo kierunku normalnych do punktów kontaktu  $\gamma_2$ . Najbliższą zgodność przebiegów zależności  $\phi(\gamma_1)$  i  $\phi(\gamma_2)$  otrzymano w przypadku nasion rzepaku. W obu testach z tymi nasionami wystąpiło maksimum  $\phi = 29^\circ$  dla zbliżonych kątów  $\gamma_1 \approx \gamma_2 \approx 35^\circ$ . Uwzględniając fakt, że płaszczyzna większego naprężenia głównego  $\sigma_1$  jest nachylona do płaszczyzny poślizgu pod kątem  $\alpha = \pi/4 + \phi/2$ , łatwo zauważyć zgodność otrzymanego maksimum kąta tarcia wewnętrznego z wynikami Ody [45, 46, 47]. Autor ten stwierdził, że w trakcie procesu wzmocnienia deforma-

cyjnego materiału ziarnistego normalne do punktów kontaktu koncentrują się wokół kierunku większego naprężenia głównego, oraz że kierunek ten stopniowo obraca się w miarę wzrostu naprężenia stycznego.

W przypadku ziarn niesferycznych stwierdzono odmienny przebieg zależności kąta tarcia wewnętrznego od kąta zawartego między kierunkiem orientacji najdłuższych osi ziarn a kierunkiem poślizgu dla testu trójosiowego ściskania i bezpośredniego ścinania. W próbie trójosiowego ściskania kąt  $\phi$  wzrastał z przyrostem kąta  $\gamma_1$  -



Rys. 1.19. Wpływ kąta nachylenia próbki  $\gamma$  na kąt tarcia wewnętrznego  $\phi$  w teście bezpośredniego ścinania i trójosiowego ściskania

nachylenia dłuższych osi ziarn do płaszczyzny poślizgu. Tendencja ta wystąpiła dla wszystkich badanych gatunków zbóż. Zależność  $\phi(\gamma_2)$  otrzymana w teście bezpośredniego ścinania przebiega w przybliżeniu parabolicznie z minimum dla kąta  $\gamma_2 = 25^\circ$ . Te różnice przebiegów zależności  $\phi(\gamma_1)$  i  $\phi(\gamma_2)$  wynikają z różnic mechanizmów odkształcenia próbki w dwóch porównywanych testach. W próbie trójosiowego ściskania płaszczyzna poślizgu formuje się stosownie do stanu naprężenia i struktury materiału, podczas gdy w próbie bezpośredniego ścinania kierunek poślizgu jest wymuszony. W tym ostatnim teście proces ścinania jest ponadto komplikowany przez niejednorodny stan odkształcenia i anizotropię materiału; wymuszane są przemieszczenia i obroty pojedynczych ziarn. Na rysunku 1.18c przedstawiono schematycznie te dwie składowe makroskopowo obserwowanego procesu ścinania. Minimum kąta tarcia  $\phi$  otrzymane metodą bezpośredniego ścinania należy interpretować jako wynik optymalnego układu przestrzennego ziaren w warunkach wymuszonego kierunku ścięcia próbki.

### 1.3 Dyskusja wyników

Rozwój technologii przechowywania i przetwarzania materiałów granulanych pochodzenia roślinnego spowodował wzrost zainteresowania nauki tymi materiałami. Zjawiska obserwowane w naturalnych warunkach magazynowania i przepływu ośrodków sypkich oraz podczas badań naukowych prowadzonych w ściśle kontrolowanych warunkach wskazują na konieczność uwzględnienia w opisie zależności naprężenie-odkształcenie ośrodka jego wilgotności, gęstości i struktury geometrycznej. Okazało się, że najczęściej stosowany parametr wytrzymałościowy – kąt tarcia wewnętrznego jest istotnie modyfikowany przez wymienione czynniki. Szczególną uwagę należy zwrócić na wilgotność materiału. Ponieważ omawiane materiały na ogół są przechowywane i przetwarzane po wysuszeniu, stosunkowo późno dostrzeżono znaczenie wilgotności. Znaczny wpływ wilgotności ziarna kukurydzy na kąt naturalnego usypu opisali Scherer i Kutzbach [60]. Grochowicz [20, 22] badając tarcie pszenicy oraz Metzger [39] badając tarcie kukurydzy stwierdzili, że wilgotność materiału jest podstawowym czynnikiem decydującym o zmienności współczynnika tarcia wewnętrznego. Autorzy wykazali, że zależność kąta tarcia wewnętrznego ziarna od wilgotności można przybliżyć krzywą wykładniczą. Według Metzgera wpływ wilgotności wyraża się pośrednio poprzez oddziaływanie na mikrotwardość i porowatość ziarna w masie.

Grundas i Horabik [23] wykazali istotny wpływ wilgotności na odkształcalność ziarna. Ważne spostrzeżenia o znaczeniu wilgotności ziarna dla rozkładu obciążenia w zbiorniku zawiera praca Horabika [30], wykazująca wpływ odkształcalności ziarna na wartość i zwrot naporu stycznego na ścianę zbiornika.

Świadomość wagi wpływu koncentracji cząstek na wytrzymałość materiału granulowanego pojawiła się znacznie wcześniej w badaniach materiałów mineralnych. Już w roku 1885 Reynolds zaobserwował, że przy ścinaniu materiałów granulowanych występuje zmiana objętości próbki. W roku 1938 Hvorslev stwierdził, że wytrzymałość próbki na ścinanie jest funkcją nacisku normalnego i porowatości w płaszczyźnie poślizgu. Dopiero jednak w latach pięćdziesiątych powstało trwale zainteresowanie problemem i zaowocowało większą ilością prac opublikowanych w następnych latach [27]. Znaczny wkład w zrozumienie reakcji materiału granulowanego poddanego odkształceniu wniósł Roscoe z grupą współpracowników [56, 57]. Stan graniczny ośrodka w układzie współrzędnych: naprężenie normalne – naprężenie styczne – porowatość, reprezentuje powierzchnia krzywoliniowa. Ten sposób przedstawienia znalazł szerokie zastosowanie w późniejszych badaniach naukowych.

Wyniki niniejszej pracy potwierdzają wcześniejsze wnioski innych autorów i uściślają je w odniesieniu do ziarna zbóż. Ze względu na stosunkowo duże rozmiary ziarn zaleca się powiększenie wymiarów próbki. Wydaje się, że wymiary zastosowane w omawianych tu testach (próbka trójosiowa:  $D = 150$  mm,  $H = 300$  mm, próbka w teście bezpośredniego ścinania:  $D = 210$  mm,  $H = 120$  mm) są wystarczające. Szczególnie wartą zalecenia do pomiarów kąta tarcia wewnętrznego jest metoda trójosiowego ściskania, chociaż w przypadku ziarn kulistych mniej złożona metoda bezpośredniego ścinania pozwala uzyskać zbliżone wartości wyników.

Metoda trójosiowego ściskania była bardzo często stosowana do wyznaczania parametrów teoretycznych i empirycznych modeli opisujących zależność naprężenie-odkształcenie. Metodę tę zastosowali Zhang i inni [78] oraz Li i inni [37] do wyznaczenia parametrów sprężysto-plastycznego modelu sformułowanego przez Lade'go dla bezkohezyjnego piasku, adoptowanego przez autorów do opisu zależności naprężenie-odkształcenie w ziarnie pszenicy. W modelu tym całkowity przyrost odkształcenia wywołany przyrostem naprężenia równy jest sumie trzech składników: przyrostu odkształcenia sprężystego, przyrostu odkształcenia plastycznego wywołanego naprężeniem normalnym oraz przyrostu odkształcenia plastycznego wywołanego dewiatorem naprężenia. Wartości parametrów modelu wyznaczone z testów trójosiowego ściskania umożliwiają dokładny opis reakcji ośrodka na inne warunki obciążenia. Do opisu anizotropii oraz histerezy w zależności naprężenie-odkształcenie w przypadku wielokrotnych obciążeń ziarna pszenicy Zhang i inni [79] zastosowali sprężysto-plastyczny model, uwzględniający gęstościowe i kinematyczne wzmocnienie ośrodka. Do wyznaczenia wartości parametrów tego modelu zastosowano również metodę trójosiowego ściskania. Podobnie metodę trójosiowego ściskania zastosowali Zhang i Jofriet [80] do wyznaczenia parametrów sprężysto-plastycznego modelu opisującego zależność naprężenie-odkształcenie dla nasion soi oraz kukurydzy.

Na pewnym etapie badań opis mechaniki ośrodków ciągłych uśredniający cechy materiału przestał być wystarczający. Pojawiły się modele mikromechaniczne uwzględniające orientację przestrzenną pojedynczych cząstek w obszarze próbki [47]. Problem samego opisu geometrycznego rozmieszczenia cząstek w przestrzeni okazał się niezwykle skomplikowany, mimo licznych prób, pozostaje nadal nie rozwiązany. W świetle omawianych tu badań dla opisu wpływu upakowania cząstek na mierzony kąt tarcia wewnętrznego użyteczne okazały się wskaźniki zaproponowane przez Odę [46]. Wyniki badań potwierdzają istotny wpływ orientacji przestrzennej ziaren próbki na otrzymywaną w testach bezpośredniego ścinania i trójosiowego ściskania wartość kąta tarcia wewnętrznego ziarna zbóż. Otrzymywane wartości zmieniały się o około 20% w stosunku do wartości minimalnej. Dla ziaren niesferycznych zależności kąta tarcia wewnętrznego od orientacji ziaren miały inny przebieg w przypadku testu bezpośredniego ścinania (w przybliżeniu paraboliczny z minimum) niż w przypadku testu trójosiowego ściskania (w przybliżeniu prostoliniowy).

Również badania na modelowych siłosach relacjonowane w literaturze [30, 41, 44] uwydatniły wpływ sposobu napelniania i opróżniania siłosu, a zatem pośrednio orientacji ziarna względem kierunku obciążenia na statyczne i dynamiczne obciążenia konstrukcji.

Przeprowadzone badania potwierdziły słusność wyboru wilgotności ziarna i przestrzennego upakowania materiału jako czynników determinujących zależność odkształcenie-napężenie materiału granularnego pochodzenia roślinnego. Sformułowano szereg zależności empirycznych wiążących kąt tarcia wewnętrznego z rozważanymi parametrami. Przedstawiono interpretację fizyczną niektórych obserwowanych zjawisk. Wydaje się, że pogłębienie zrozumienia procesu wymaga dalszych badań w następujących grupach tematów:

- opis wpływu wilgotności na właściwości poszczególnych cząstek,
- opis wzajemnych oddziaływań cząstek,
- matematyczny opis struktury geometrycznej warstwy materiału i jej zmian pod wpływem obciążenia,
- poszukiwanie aparatu matematycznego właściwego dla sformułowania zależności odkształcenie-napężenie ośrodka granularnego pochodzenia roślinnego.

## 1.4 Wnioski

1. Badania przeprowadzone w szerokim zakresie zmiennych parametrów eksperymentu wykazały szczególną przydatność metody trójosiowego ściskania do wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego ziarna zbóż. W przypadku ziarna zbóż szczególnie istotne jest stosowanie dużych rozmiarów próbki.

2. Wilgotność ziarna, gęstość i orientacja przestrzenna ziarna w próbce istotnie wpływają na wartość kąta tarcia wewnętrznego.

3. Dla suchego ziarna pszenicy (poniżej 11% wilgotności) kąt tarcia wewnętrznego zawiera się w granicach od 23° do 24°, dla ziarna wilgotnego (od 11 do 28%) ze wzrostem wilgotności kąt tarcia wewnętrznego rośnie od 24° do 38,3°, zaś przy wzroście wilgotności ziarna powyżej 24% kąt tarcia stabilizuje się.

4. W przypadku zmieszania wilgotnego i suchego ziarna pszenicy kąt tarcia wewnętrznego przyjmuje na początku wartości bliższe wartościom charakterystycznym dla ziarna wilgotnego, dopóki nie nastąpi wyrównanie wilgotności w obrębie całej próbki.

5. W zakresie obciążeń do 0,3 MPa nie stwierdzono wpływu wartości naprężenia na wartość kąta tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy.

6. Zagęszczenie próbki powodowało w każdym przypadku wzrost wartości kąta tarcia rozpoczynającego się płynięcia  $\phi_1$  oraz kohezji C. Największe zmiany gęstości oraz zmiany kąta tarcia wewnętrznego (około 17%) obserwowano w przypadku eksperymentów z rzepakami.

7. W przeprowadzonych eksperymentach trójosiowego ściskania rzepak zachowywał się jak typowy ośrodek sypki o wzmocnieniu gęstościowym. Dla próbki rzepaku wstępnie zagęszczonej obserwowano osłabienie po osiągnięciu maksymalnej wytrzymałości, zaś w przypadku próbki luźnej stosunek naprężeń głównych  $\sigma_1/\sigma_3$  rósł monotonicznie, aż do osiągnięcia stanu granicznego. Wstępnie zagęszczone próbki pszenicy i jęczmienia nie wykazywały wyraźnego efektu osłabienia.

8. W trakcie formowania stożka naturalnego usypu ziarna wykazują tendencję do układania się dłuższą osią wzdłuż tworzącej stożka. Zjawisko to wytwarza anizotropię właściwości mechanicznych ośrodka. Anizotropia występuje zarówno w przypadku ziaren niesferycznych (na skutek koncentracji najdłuższych osi ziaren wzdłuż wybranego kierunku), jak i w przypadku ziaren sferycznych (na skutek koncentracji kierunków normalnych w punktach styku ziaren).

9. Kąt tarcia wewnętrznego mierzony metodą trójosiowego ściskania i bezpośredniego ścinania zależy od wstępnej anizotropii próbki wynikającej ze sposobu jej formowania. W przypadku ziaren niesferycznych przebieg zależności kąta tarcia wewnętrznego  $\phi$  od kierunku wymuszonej orientacji ziarn próbki był inny w teście bezpośredniego ścinania niż w teście trójosiowego ściskania. W przypadku ziaren sferycznych obydwie metody pomiarowe dawały zbliżone wyniki.

## 1.5 Literatura

1. ASAE Standards, D242.1. *Friction coefficient of grains*, St. Joseph, MI. 49085, 342, 1971.
2. *Aparat bezpośredniego ścinania AB, instrukcja obsługi*, Uniwersytet Jagielloński, Zakład Aparatów Naukowych, Kraków 1955.

3. Aparat trójosiowy AT, instrukcja obsługi, Uniwersytet Jagielloński, Zakład Aparatów Naukowych, Kraków 1955.
4. Anderson G.A., Bern C.J.: *Dynamic angle of repose of corncobs placed by three mechanical means*, Transactions of the ASAE, 27(3), 935-936, 1984.
5. 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.
6. Bishop M.A., Henkel D.J.: *The measurement of soil properties in the triaxial test*, London 1974.
7. Blunden B.G., McLachlan C.B., Kirby J.M.: *A high-speed shear box machine*, J. agric. Engng Res. 56(1), 81-87, 1993.
8. 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.
9. 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.
10. Byszewski W., Haman J.: *Gleba – maszyna – roślina*, PWN Warszawa 1977.
11. Drescher A.: *Badanie mechanizmów plastycznego płynięcia materiałów ziarnistych*, Prace IPPT PAN, 1975.
12. Eelkman Rooda J., Haaker G.: *A testing procedure for triaxial tests and a numerical method for the calculation of powder flow properties*, Powder Technol., 16, 1977.
13. Fedá J.: *Zaklady mechaniky partikulárních lutek*, Academia, Praha 1977.
14. Fiala J.: *Vliv vlhkosti zemedelských materialu na silu trení*, Zemed. Techn., B 16/XLIII, 7, 1970.
15. 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, September 3-7, 1984.
16. Gergowicz Z.: *Badania wytrzymałościowe ośrodków sypkich dla celów budownictwa podziemnego*, Zesz. Nauk Pol. Wrocławskiej nr 60, Budownictwo XIII, Wrocław 1962.
17. Glazer Z.: *Mechanika gruntów*, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1977.
18. Grisso R.D., Johnson C.E., Bailey A.C., Nichols.: *Influences of soli sample geometry on hydrostatic compaction*, Transactions of the ASAE, 27(6), 1650-1653, 1984.
19. Grochowicz J.: *Technologia produkcji mieszanek paszowych*, PWRiL, Warszawa 1985.
20. Grochowicz M.: *Wpływ niektórych czynników fizycznych na tarcie wewnętrzne roślinnego materiału ziarnistego*, Praca doktorska, AR Lublin, 1986.
21. Grochowicz M.: *An evaluation of internal friction of wheat grain*, 4. Tagung of Agrophysik, Rostock, 140-145, 1987.
22. Grochowicz M., Horabik J., Molenda M.: *Zastosowanie aparatu trójosiowego ściskania do badania właściwości mechanicznych ośrodków rozdrobnionych pochodzenia roślinnego*, ZPPNR, 320, 107-114, 1987.
23. Grundas S., Horabik J.: *Wpływ wilgotności na lepko-sprężyste właściwości zboża*, Polskie Towarzystwo Biofizyczne, Biofizyka (prace doświadczalne), Siedlce, 299-316, 1980.
24. Haman J., Grochowicz M.: *Methodology of determination of the internal friction coefficient of grain layer at increased strains*, ZPPNR, 203, 153-159, 1978.
25. Harder J., Schwedes J.: *The development of a true biaxial shear tester*, Part. Charact. 2, 149-153, 1985.
26. Hesse T., Hoffmann O.-H.: *Scherverhalten Körniger Landwirtschaftlicher Haufwerke*, Grundl. Landtechnik, 27(6), 205-213, 1977.
27. Hoffmann O.-H.: *Neuere Grundlagen der Mechanik Körniger Haufwerke*, Grundl. Landtechnik, 25(2), 33-64, 1975.
28. Horabik J., Molenda M.: *Die Anwedung des Dreiaachsenapparats zur Untersuchung mechanischer Eigenschaften der Kornmasse*, 3. Wissenschaftliche Tagung Agrophysik, Reinhardsbrenn, NRD, 355-358, 1984.
29. Horabik J., Molenda M.: *Wpływ orientacji przestrzennej ziaren próbki na kąt tarcia wewnętrznego mierzony metodą trójosiowego ściskania*, ZPPNR, 351, 133-140, 1988.



30. Horabik J.: *Wpływ właściwości mechanicznych ziarna pszenicy na rozkład obciążenia w zbiorniku*, Acta Agrophysica, Nr 1, 1994.
31. Kezdi A.: *Handbook of soil mechanics*, Vol. 1. Soil physics. Akademiai Kiado, Budapest 1974.
32. Kisiel I.: *Doświadczenie w aparacie trójosiowym a teoria*, Arch. Hydrotech. t.X, 1963.
33. Konstankiewicz K.: *Wpływ prędkości odkształceń na charakterystyki mechaniczne gleb*, Problemy Agrofizyki, z. 51, 1987.
34. Koolen A.J., Kuipers H.: *Agricultural soil mechanics*, Springer-Verlag, Berlin 1983.
35. Kuipers H., Kroesbergen B.: *The significance of moisture content, 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.
36. Lambe T.W., Whitman R.V.: *Mechanika gruntów*, t. I, Arkady, Warszawa 1977.
37. Li Y., Zhang Q., Puri V.M., Manbeck H.B.: *Physical properties effect on stress-strain behaviour of wheat en masse*, Part I. *Load response dependence on initial bulk density and moisture content*, Transactions of the ASAE, 32(1), 194-202, 1989.
38. Manbeck H., Nelson G.L.: *Methods and instrumentation for evaluating the stress strain behaviour of wheat en masse*, Transactions of the ASAE, 15(5), 919-923, 1972.
39. Metzger T.: *Analiza wpływu wybranych cech fizycznych ziarna kukurydzy na wartość współczynnika tarcia wewnętrznego*, Praca doktorska, AR Wrocław, 1985.
40. Mohsenin N.N.: *Physical properties of plant and animal materials*, Vol. 1, Gordon and Breach. Science Publishers, New York 1970.
41. Moysey E.B.: *The effect of grain spreaders on grain friction and bin wall pressures*, J. agric. Engng Res. 30(2), 149-156, 1984.
42. Mróz Z., Drescher A.: *Podstawy teorii plastyczności ośrodków rozdrobionych*, Ossolineum, Wrocław 1972.
43. Mróz Z., Drescher A., Hueckel T.: *Doskonalenie metod badania parametrów płynięcia materiałów ziarnistych*, Prace IPPT PAN, 54/73, 1973.
44. Nielsen J.: *Load distribution in silos influenced by anisotropic grain behaviour*, International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation, Newcastle, 1983.
45. Oda M.: *Deformation mechanism of sand in triaxial compression tests*, Soil and Foundations, 12(4), 45-63, 1972.
46. Oda M.: *Fabrics and their effects on the deformation behaviours of sand*, Dept. Found. Engng. Fac. Engng. Saitama University, Special Issue, 1976.
47. Oda M.: *Significance of fabric in granular mechanics*, Proc. US-Japan Seminar, Sendai, Japan, 7-26, 1978.
48. PN-88/B-04481. Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu.
49. PN-91/M-04301. Tribologia. Terminologia podstawowa.
50. Procter D.C., Barton R.R.: *Measurements of the angle of interparticle friction*, Geotechnique, 24(4), 581-604, 1974.
51. Pukos A.: *Podstawy teoretyczne badania właściwości mechanicznych gleb*, Problemy Agrofizyki, z. 7, 1973.
52. Pukos A.: *Interpretacja termodynamiczna odkształceń ośrodka glebowego*, Praca doktorska, AR Lublin, 1977.
53. 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*, VD1-Forschungsheft, 629, 1-32, 1985.
54. Reimbert M. and A.: *Determination of the mechanical properties of cohesive and non-cohesive powdered materials*, Bulk Solids Handling, 1(1), 37-41, 1981.
55. Rooda J.E.: *A numerical method for the calculation of the powder flow properties obtained with the Jenike flow factor tester*, Powder Technol., 12, 97-102, 1975.

56. Roscoe K.H.: *An apparatus for the application of simple shear to soil samples*, Proc. 3rd Inter. Conf. Soil Mech. Zurich, Vol. 1, 1953.
57. Roscoe K.H.: *Contribution to the discussion of soil properties*, Proc. 6th Inter. Conf. Soil Mech., Montreal, Vol. 3, 1965.
58. Rosiński B.: *Badanie własności mechanicznych gruntów*, Zakłady Aparatury Naukowej. Uniwersytet Jagielloński, Kraków 1955.
59. 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.
60. Scherer R., Kutzbach H.D.: *Mechanische Eigenschaften von Körnerfrüchten*, Grundl. Landtechnik, 28(1), 6-12, 1978.
61. Schofield A., Wroth P.: *Critical state soil mechanics*, McGraw-Hill, New York-London 1968.
62. Schwedes J.: *Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern*, Verlag Chemie GmbH 1970.
63. Schwedes J.: *Vergleichende Betrachtungen zum Einsatz von Schergeräten zur Messung von Schüttguteigenschaften*, Inst. für Mech. Verfahrenstechnik Technische Universität Braunschweig, 1976.
64. Schwedes J.: *Shearing behaviour of slightly compressed cohesive granular materials*, Powder Technol., 11, 59-67, 1975.
65. Stafford J.V., Audsley E., Sharp J.R.: *The determination of best fit linear failure envelopes to Mohr circles*, J. agric. Engng Res., 33(1), 33-38, 1986.
66. Suchnicka H.: *Problemy określenia wytrzymałości gruntów*, Prace Naukowe Instytutu Geotechniki Pol. Wrocławskiej, 30/9, Wrocław 1979.
67. Szot B., Horabik J.: *Zagadnienia mechaniki ośrodków sypkich pochodzenia roślinnego*, Problemy Agrofizyki, z. 33, 1980.
68. 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.
69. Thompson S.A., Ross I.J.: *Compressibility and frictional coefficient of wheat*, Transactions of the ASAE, 26(4), 1171-1176, 1983.
70. Turski R., Domżał H., Słowińska A.: *Zależność tarcia wewnętrznego od wilgotności gleb wytworzonych z różnych skal macierzystych*, Roczn. Gleboznawcze, t.XXIII, z. 1, 15-28, 1972.
71. Vyalov S.S.: *Rheological fundamentals of soil mechanics. Developments in geotechnical engineering*, Elsevier, Amsterdam 1986.
72. Wilms H.: *Criteria for evaluation of silo design codes*, Bulk Solids Handling, 11(1), 55-61, 1991.
73. Wilms H., Schwedes J.: *Interpretation of ring shear tests*, Bulk Solids Handling, 5(5), 1017-1020, 1985.
74. Woźniak W.: *Wpływ czynników agrofizycznych na zmienność porowatości warstwy nasion różnych gatunków i odmian zbóż*, Praca doktorska, IHAR Radzików 1982.
75. Yamada Y.: *Deformation characteristics of sand in three dimensional stress state*, Proc. of the U.S. - Japan Seminar on Continuum - Mechanical and Statistical Approaches in the Mechanics of Granular Materials, Gakujutsu Bunken Fukyu-kai, Tokyo 1978, 91-97.
76. Yokimi Y., Oh-Oka H.: *A ring torsion apparatus for simple shear tests*, Proc. 8th Inter. Conf. Soil Mech., Vol. 12, Moscow 1973.
77. Zenkow R.L.: *Mechanika nasypnych gruzow*, Izdatielstwo Maszynostrojnie, Moskwa 1964.
78. 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.
79. 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.
80. Zhang Y.H., Jofriet J.C.: *Equivalent stress-strain relationship for soybean and corn*, ASAE Paper No. 934506. ASAE, St. Joseph, MI 49085.
81. 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.

## 2. TARCIE ZEWNĘTRZNE

Zjawisko tarcia w rzeczywistych warunkach sprzętu zbóż, transportu, składowania i przetwarzania jest jednym z czynników determinujących przebieg procesu technologicznego. Wszędzie tam, gdzie występuje ruch ziarna względem części maszyny czy zbiornika magazynowego, reakcja materiału pozostaje pod wpływem tarcia. Złożoność zjawiska tarcia zewnętrznego spowodowała powstanie licznych modeli teoretycznych, bądź empirycznych znanych w trybologii, a obowiązujących w wąskim zakresie warunków eksperymentu [9, 17, 19, 30, 31, 32, 34, 43, 56, 62, 66]. Niewielka zmiana warunków eksperymentu lub składu chemicznego trących powierzchni powoduje niekiedy zasadniczą zmianę rodzaju składowych zjawisk fizycznych. Z tego powodu modele dotyczą zwykle określonych par materiałów i ściśle ograniczonych warunków badań. Od lat 60-tych w wielu laboratoriach na świecie prowadzone są liczne badania w zakresie tarcia zewnętrznego zbóż. Dotychczas brak jednak danych katalogowych opisujących parametry procesu jak i niekwestionowanej jego teorii [32]. W tej sytuacji zaleca się wykonywanie pomiarów współczynnika tarcia dla każdego poszczególnego projektu technologii czy konstrukcji [50, 52]. W konkretnym przypadku projektowania silosów zbożowych trudności w ustanowieniu standardu nie wynikają z niezgody co do koncepcji projektowania, lecz raczej z braku zrozumienia właściwości fizycznych ziarna i sposobu, w jaki wpływają one na obciążenie konstrukcji [60, 64]. Bliższe poznanie zjawiska tarcia zewnętrznego zbóż jest zatem drogą do optymalizacji procesów technologicznych stosowanych w rolnictwie, obniżenia strat materiałów roślinnych i oszczędności energii.

### 2.1 Przegląd piśmiennictwa

#### 2.1.1 Teorie tarcia

Tarciem nazywamy zespół zjawisk występujących w obszarze kontaktu dwóch przemieszczających się względem siebie ciał, w wyniku których powstają opory ruchu. Miarą tarcia jest opór równoważony wypadkową siłą styczną podczas przemieszczania jednego ciała względem drugiego [19]. W pierwszych badaniach tarcia wyjaśniano to zjawisko koniecznością unoszenia jednego ciała na nierównościach drugiego (Perent, 1704; Euler, 1748). Współczynnik tarcia był w tym ujęciu równy tangensowi kąta nachylenia pojedynczej nierówności. Pierwsze szersze badania tarcia wykonał Amontons. W swojej publikacji z 1699 r. ponownie formuluje dwa zapomniane prawa tarcia podane przez Leonarda da Vinci w połowie XV wieku. Pierwsze z nich mówi, że siła tarcia jest proporcjonalna do siły normalnej; drugie, że tarcie jest niezależne od wymiarów ciała. Prawo tarcia, znane pod nazwą wzoru Amontonsa:

$$T = \mu N \quad 2.1$$

gdzie  $N$  – siła normalna,  $T$  – siła tarcia,  $\mu$  – współczynnik tarcia, jest do dzisiaj stosowane jako dobre przybliżenie robocze [3].

Zupełnie inne spojrzenie na mechanizm tarcia przedstawił w 1724 r. Desaguliers. Wykazał on, że „płaskie powierzchnie metali, lub innych ciał mogą być tak wypolerowane, że spowoduje to wzrost tarcia”. Zachowanie to przypisywał adhezji w obszarach rzeczywistego kontaktu. Od tego czasu rozpoczyna się spór pomiędzy zwolennikami mechanicznych i molekularnych teorii tarcia. W 1781 r. Coulomb opublikował swoją „Teorię maszyn prostych”. Uznawał on, że adhezja może mieć wpływ na tarcie. Za główną przyczynę tarcia uważał jednak konieczność wykonania pracy przy przesuwaniu nierówności jednej powierzchni względem drugiej. Prawo tarcia wyraził wzorem:

$$T = \mu N + C \quad 2.2$$

gdzie  $C$  – stała zależna od „szczepności” (molekularnego oddziaływania) powierzchni trących.

Coulomb przyjął, że wartość  $C$  jest stała dla płaskich powierzchni, niezależnie od nacisku normalnego, ani od jakości kontaktu. Leslie, krytykując w 1804 roku teorię Coulomba uważał, że teoria tarcia musi uwzględniać odkształcanie nierówności powierzchni, gdyż tylko wtedy mogą występować straty energii. Spostrzeżenie to znalazło potwierdzenie w pracach Bowdena [3], który stwierdził, że charakter współoddziaływania trących powierzchni zależy od stosunku ich twardości, a przy dużych wartościach pracy tarcia, również od temperatury obszaru kontaktu i temperatury topnienia trących materiałów. Siła tarcia wg Bowdena składa się z siły niezbędnej do ścięcia powstających połączeń metalicznych  $P$  i siły  $P_w$  niezbędnej do wyciśnięcia bruzdy w bardziej miękkim metalu, zatem  $T = P + P_w$ . Siły składowe wyrażają się wzorami:

$$P_s = S\tau_p$$

$$P_w = S_w p_w$$

gdzie:  $\tau_p$  – wytrzymałość na ścinanie połączeń metalicznych,  $S$  – powierzchnia kontaktu,  $S_w$  – przekrój poprzeczny bruzdy tarcia,  $p_w$  – średni jednostkowy opór na wyciskanie metalu (zbliżony wartością do granicy plastyczności metalu).

Przyjmując konkretny kształt geometryczny pary trącej, ze wzorów można obliczyć siłę tarcia. Teoria Bowdena nie uwzględnia molekularnego oddziaływania powierzchni, ani wpływu chropowatości, zakłada czysto mechaniczny model tarcia uwzględniający właściwości fizyczne ciał trących. Rozwój technologii obróbki pozwolił na uzyskiwanie znacznych gładkości powierzchni, nie nastąpiło przy tym wyeliminowanie znacznych oporów tarcia. Podważyło to przekonanie o mechanicznym pochodzeniu tarcia. Tomlison (1929) podał teorię, w której przyjął, że tarcie jest rezultatem adhezji pomiędzy

powierzchniami trących ciał [19]. Rozpraszanie energii w tarcniu zachodzi na skutek nieustannej zmiany par oddziałujących cząsteczek i tworzenia wciąż nowych wiązań molekularnych. Wynikający z tej teorii wzór na współczynnik tarcia przyjmuje postać:

$$\mu = f(S_r) E b / l N$$

gdzie:  $E$  – energia niezbędna do rozerwania pary cząsteczek,  $b$  – współczynnik poprawkowy,  $l$  – odległość pomiędzy środkami par cząsteczek,  $N$  – obciążenie normalne,  $f(S_r)$  – funkcja zależna od rzeczywistej powierzchni kontaktu.

Na podstawie licznych eksperymentów Tomlison podał zależność empiryczną na obliczenie współczynnika tarcia:

$$\mu = 0,18 \cdot 10^8 \cdot (A_k + A_p)^{2/3}$$

gdzie:  $A_k$  i  $A_p$  – moduły zależne od właściwości mechanicznych materiałów.

Kolejną teorię molekularną sformułował Dieriagin (1934) [30]. Stwierdza on, że tarcie jest związane z molekularną chropowatością ciała, zależną od struktury materiału. Z uwzględnieniem sił adhezji prawo tarcia wyraża się wzorem:

$$T = (N + N_0) \mu$$

gdzie  $N_0$  – siła przyciągania molekularnego.

Przyjmując  $N_0 = p_0 S_r$ :  $T = \mu (N + p_0 S_r)$ , gdzie  $p_0$  – jednostkowa siła przyciągania molekularnego. Opisany przez Dieriagina mechanizm tarcia jest słuszny przy idealnym ślizganiu, nie uwzględnia jednak niszczenia powierzchni tarcia (ścieranie, szczepianie, odkształcanie nierówności) [19]. W 1939 r. Kragielski podaje podstawy teorii molekularno – mechanicznej wyrażając przekonanie o „podwójnej naturze” sił tarcia. Sformułował on następujące wnioski [30]:

1. Oddziaływanie ciał stałych przy tarcniu zachodzi wewnątrz objętości materiału i zależy od jego właściwości lepko-sprężystych. Obszar oddziaływania można uznać za „trzecie ciało”.

2. Właściwości „trzeciego ciała” zależne są od stanu powierzchni, ciśnienia, czasu kontaktu i szybkości przyłożenia obciążenia.

3. Przy wzajemnym przemieszczaniu ciał trących zachodzi niszczenie i równoczesne tworzenie „trzeciego ciała”.

4. Ciśnienie w obszarze kontaktu istotnie wpływa na współczynnik tarcia.

Należy wyróżnić siły styczne zależne od nacisku normalnego i siły niezależne od niego („szczepność” wg Coulomba). Zmiany wartości współczynnika tarcia ze wzrostem ciśnienia zależne są od względnego udziału tych sił w tarcniu.

5. Charakter przyrostu siły tarcia w zależności od czasu kontaktu wyraża się równaniem:

$$T = T_0[\alpha - (\alpha - 1)\exp(-\beta t)]$$

gdzie  $T_0$  – siła tarcia przy czasie kontaktu równym 0,  $\alpha = T/T_0$ ,  $T$  – siła tarcia przy nieskończonej długości czasu kontaktu,  $t$  – czas,  $\beta$  – stała.

6. Przy niewielkich prędkościach przemieszczenie przebiega skokowo. Wynika to z lepko-sprężystych właściwości kontaktu ciernego.

7. Siła tarcia zmienia się ze wzrostem prędkości poślizgu i zazwyczaj przechodzi przez maksimum.

Energia w procesie tarcia rozprasza się na dwa strumienie: pokonanie oddziaływań molekularnych i odkształcenie warstwy powierzchniowej materiału. Poza tymi dwoma, w procesie tarcia biorą udział jeszcze inne zjawiska, jednak ich udział jest pomijalnie mały. Sumaryczny współczynnik tarcia pojedynczej nierówności wyraża się równaniem:

$$\mu = \frac{\tau_0}{p_r} + k_x + k_1 \alpha \sqrt{\frac{h}{r}} \quad 2.3$$

gdzie:  $\tau_0$  – wytrzymałość więzi adhezyjnej na ścinanie,  $p_r$  – napężenie normalne na powierzchni kontaktu,  $k_x$  – współczynnik ujmujący przyrost wytrzymałości wiązania adhezyjnego na ścinanie ze wzrostem nacisku,  $h$  – głębokość wnikania nierówności w płaską powierzchnię,  $r$  – promień krzywizny nierówności,  $k_1$  – współczynnik zależny od rodzaju deformacji w strefie kontaktu,  $\alpha$  – współczynnik strat histerezy.

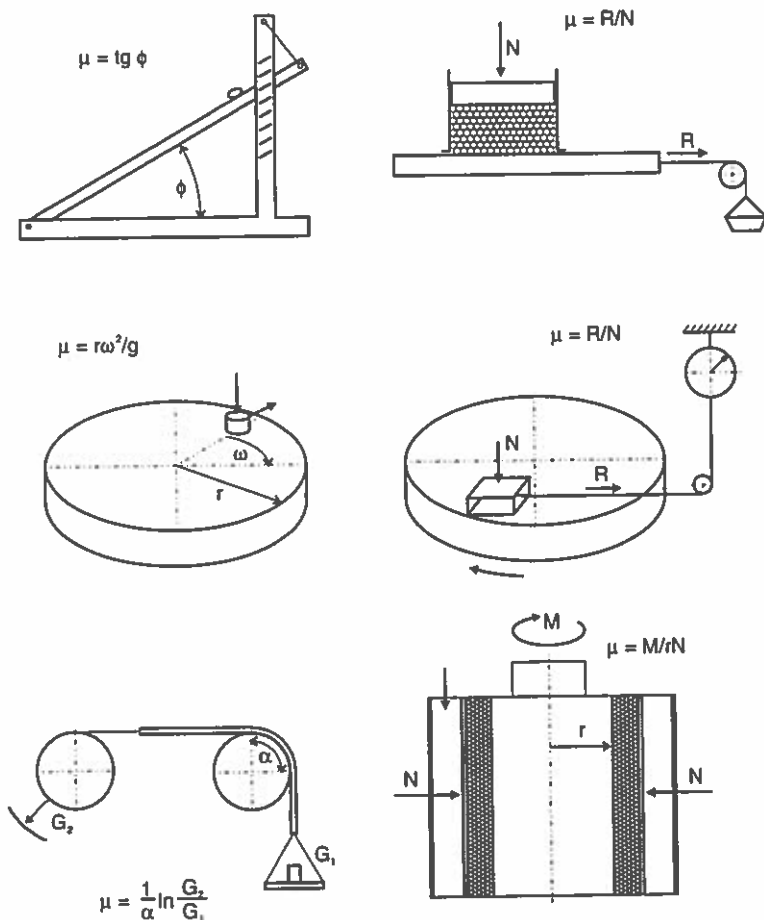
Procesy oddziaływania molekularnego przebiegają w obszarze „ciała trzeciego” tzn. w warstwie grubości setnych części mikrometra. Oddziaływania mechaniczne występują w warstwie o grubości powyżej dziesiątych części mikrometra. Różnica w poziomach, na których występują pozwala sumować je w pierwszym przybliżeniu tzn.  $T = T_a + T_d$ . W pracach Kragielskiego i innych badaczy można znaleźć zależności empiryczne pozwalające wyliczyć współczynnik tarcia zależnie od specyficznych warunków tarcia, formy kontaktu i ciśnienia rzeczywistego [9, 25, 30, 31, 43].

Wobec tak licznych, uwzględniających różnorodność oddziaływania, modeli tarcia Leszek i Zwierzycki [34] konkludują, że w chwili obecnej nie jest potrzebne formułowanie nowych teorii tarcia, a jedynie precyzyjne określenie zakresów słuszności dotychczas sformułowanych modeli. Badania w tym kierunku w odniesieniu do ziarna zbóż prowadził Molenda i w następnych rozdziałach przedstawiono główne tezy jego pracy doktorskiej [40].

### 2.1.2 Metody pomiarowe i aparatura

Pomiar siły tarcia wymaga urządzenia, w którym odbywa się ruch względny warstwy ziarna i powierzchni trącej. Ruch względny powierzchni trących może być prostoliniowy lub obrotowy. Przy ruchu prostoliniowym powierzchnia trąca ma kształt płaskiej płyty lub taśmy, przy ruchu obrotowym jest to tarcza albo walec. Na rysunku

2.1 przedstawiono schematycznie układy pomiarowe prezentowane w publikacjach [2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 15, 18, 20, 32, 36, 41, 42, 44, 45, 46, 48, 53, 54, 59, 60, 64]. Wybór kształtu powierzchni trącej decyduje o ważnych cechach pomiaru. Układy z płaską płytą (rys. 2.1 a,b) charakteryzują się równomiernym rozkładem prędkości poślizgu na powierzchni, równomiernym naciskiem powierzchniowym i łatwością wymiany powierzchni trącej. Zastosowanie tej postaci próbki ogranicza jednak maksymalną prędkość poślizgu i drogę tarcia. Zastosowanie taśmy w obiegu ciągłym (rys 2.1 e) daje możliwość uzyskania równomiernego rozkładu prędkości i równomiernego nacisku powierzchniowego przy wyższych wartościach prędkości poślizgu i nieograniczonej drodze tarcia. Element tej postaci jest jednak podatny na drgania i nie każdy materiał można zastosować w formie taśmy (np. drewno).



Rys. 2.1. Schematy układów pomiarowych do wyznaczania współczynnika tarcia materiałów rozdrobnionych

Powierzchnia trąca w formie walca (rys 2.1 f) zapewnia równomierny rozkład prędkości poślizgu, lecz rozkład nacisku normalnego jest nierównomierny. Trudne konstrukcyjnie jest uzyskanie wymienności powierzchni trącej. Tarcza obracająca się wokół osi pionowej (rys. 2.1 c, d) daje łatwość wymiany powierzchni trącej, nieograniczoną drogę tarcia, dużą maksymalną wartość prędkości poślizgu i równomierny nacisk powierzchniowy. Zmienna jest jednak prędkość poślizgu wzdłuż promienia tarczy.

Współczynnik tarcia materiałów roślinnych zależy od licznych czynników, przy czym za najważniejsze uważa się wilgotność materiału, nacisk normalny, prędkość poślizgu, strukturę powierzchni i warunki otoczenia [32, 37, 54, 58]. Te właśnie czynniki uwzględniano również w badaniach tarcia ziarna zbóż.

### 2.1.3 Czynniki determinujące tarcie zewnętrzne ziarna zbóż

#### 2.1.3.1 Wilgotność

Już we wczesnych badaniach tarcia uznano, że wilgotność materiału jest jednym z najważniejszych czynników, które należy uwzględnić w pomiarach. Autorzy Canadian Farm Building Code [7] zwracają uwagę, że wzrost wilgotności suchego ziarna powoduje sześciokrotny wzrost naporu na ściany siłosu. Richter [47] w swoich badaniach tarcia słomy, kiszonki i traw stwierdza przyrost współczynnika tarcia ze wzrostem wilgotności materiału. Taką samą tendencję obserwują Brubaker i Pos [4] dla pszenicy ozimej trącej o cztery różne materiały konstrukcyjne. Wskazują oni, że szczególnie szybki przyrost współczynnika tarcia następuje po przekroczeniu około 13% wilgotności ziarna. Jedynie w przypadku powierzchni teflonowej wartość współczynnika tarcia maleje z przyrostem wilgotności. Szczególnie interesujące spostrzeżenia przynosi praca Snydera i in. [55]. Ich pomiary tarcia ziarna pszenicy o powierzchni różnych materiałów były pierwszymi przeprowadzonymi w komorze klimatyzacyjnej. Tak przyrost wilgotności ziarna, jak i przyrost wilgotności względnej powietrza otoczenia powodowały przyrost współczynnika tarcia. Autorzy zwracają uwagę na decydujące znaczenie równowagi wilgotności ziarna i wilgotności względnej otoczenia. W warunkach nierównowagi powierzchnia ziarniaka wykazuje stan właściwy dla zupełnie innej wilgotności ziarna niż jego mierzona wilgotność globalna. Hanzelik i in. [18] nie stwierdzili wpływu wilgotności na współczynnik tarcia pszenicy o różne materiały konstrukcyjne. Autorzy tłumaczą to niewielkimi różnicami wilgotności używanego ziarna. Można jednak przypuszczać, że stosowany przez nich trybometr nachylny i wynikające z jego konstrukcji niewielkie naciski nie pozwalają obserwować tego efektu. Stewart i in. [57] badali tarcie ziarna sorgo o różne powierzchnie metalowe. I ten eksperyment prowadzono w komorze klimatyzacyjnej. Potwierdzono wcześniej relacjonowany przyrost współczynnika tarcia z przyrostem wilgotności ziarna, zwła-



szcza powyżej poziomu 13%. Wykazano szczególnie silny wpływ wilgotności powierzchniowej ziarna na tarcie o powierzchnie o niewielkich nierównościach. Thompson i Ross mierzyli tarcie ziarna pszenicy o galwanizowaną powierzchnię stalową [60]. Zaobserwowali przebieg zależności współczynnika tarcia od wilgotności z maksimum dla 20% wilgotności ziarna. Różnica wartości  $\mu$  dla wilgotności 8% i 12% jest stosunkowo niewielka. Według tych autorów ziarna w tym stanie są twarde i nie deformują się wokół nierówności powierzchni. Kiedy wilgotność wzrasta do 16% i 20% ziarna mięknią i odkształcają się wokół nierówności, rosną więc siły niezbędne do zerwania tak powstałych wiązań, rośnie również współczynnik tarcia. Przy dalszym wzroście wilgotności zaobserwowano spadek współczynnika tarcia. Przyczyną jest (wg tych autorów) wolna woda pojawiająca się pomiędzy powierzchniami, która osłabia wytrzymałość na ścinanie powstałego wiązania. Generalny przyrost współczynnika tarcia ze wzrostem wilgotności ziarna wykazali również Tsang-Mui-Chung [67], Balassy [2], Frontczak i Metzger [12], Scherer i Kutzbach [48]. W zgodzie z wyżej cytowanymi pozostaje Lawton [33], konkludując, że współczynnik tarcia ziarna pszenicy na ogół rośnie ze wzrostem wilgotności, chociaż dla niektórych materiałów występuje minimum przy ok. 15% wilgotności.

#### 2.1.3.2 Nacisk normalny

Następnym ważnym w procesie tarcia parametrem jest nacisk powierzchniowy. Richter [47] stwierdza spadek wartości współczynnika tarcia statycznego ciętej trawy i kiszonki kukurydzianej ze wzrostem nacisku jednostkowego. Ponieważ nie obserwuje podobnego efektu w przypadku suchej słomy i siana, wnioskuje, że przyczyną zaobserwowanego zjawiska są siły adhezji mające większy wpływ przy niewielkich naciskach i wysokiej wilgotności materiału. Nie stwierdza wpływu nacisku na współczynnik tarcia kinetycznego. Thompson i Ross [60] stosowali ciśnienia w zakresie od 7 do 172 kPa i zaobserwowali zmniejszenie wartości współczynnika tarcia kinetycznego ze wzrostem nacisku. Autorzy tłumaczą ten efekt mniejszym niż wprost proporcjonalny przyrostem naprężenia kontaktowego przy rosnącym nacisku normalnym. Z teorii Hertza [37, 64] wynika, że przy rosnącej sile normalnej  $N$  naprężenie kontaktowe wzrasta jak  $N^{1/3}$ . Tak więc siły tarcia, które są proporcjonalne do obciążeń normalnych w mikroobszarach kontaktu, są słabsze niż wskazywałby ogólny przyrost ciśnienia. W ten sposób, zdaniem autorów, wzór Hertza pozwala pośrednio przewidzieć spadek współczynnika tarcia z przyrostem ciśnienia. Tę samą tendencję potwierdzają: Fiala [11] dla różnych materiałów rolniczych, Lobotka [36] dla ziarna kukurydzy, oraz Schwab [49], Zhang i in. [70] w przypadku ziarna pszenicy. Moore i in. [40] stwierdzają natomiast przyrost współczynnika tarcia ziarna pszenicy ze wzrostem ciśnienia bocznego w zbiorniku z blachy falistej. Ważną wydaje się propozycja Balassy'ego, by

rozróżnić czynnik tarcia (*friction factor*) i współczynnik tarcia (*friction coefficient*) [1, 2]. Jeżeli mianowicie wyniki pomiaru siły tarcia w funkcji nacisku normalnego opiszemy prostą regresji postaci  $T = M(x)N + K(x)$ , gdzie  $x$  – przemieszczenie trącej próbki, a  $M(x)$  i  $K(x)$  – parametry, to iloraz  $T/N$  (nazwany czynnikiem tarcia) przybiera postać hiperboli o równaniu  $\text{tg}\alpha(x, N) = M(x) + K(x)/N$ . Hiperbola ta ma przebieg malejący ze wzrostem  $N$  przy  $K(x)$  dodatnim i rosnący przy  $K(x)$  ujemnym. Powyższe spostrzeżenie uwypukla znaczenie kohezji i zwraca uwagę na konieczność uściślenia nomenklatury dotyczącej pomiarów tarcia. Inne bowiem będą wnioski o przebiegu zależności współczynnika tarcia od nacisku w przypadku, gdy liczony jest on z definicji Amontonsa  $\mu = T/N$  niż kiedy określany jest z prostej regresji  $T = \mu N + C$ . Jeżeli przyjmując aproksymację wzorem Coulomba traci sens rozważanie zależności współczynnika tarcia od nacisku. Pojawia się w jego miejsce problem istnienia, bądź nieistnienia kohezji.

### 2.1.3.3 Prędkość poślizgu

Wobec przekonania o lepko-sprężystym charakterze mechanizmu tarcia w obszarze kontaktu, badacze tego procesu mieli świadomość znaczenia prędkości dla jego przebiegu. Prędkość była więc zazwyczaj kontrolowanym parametrem pomiarów. Nie znajdujemy jednak w literaturze przekonywującego wyjaśnienia wpływu prędkości na tarcie materiałów pochodzenia roślinnego. Uogólniając spostrzeżenia różnych autorów stwierdzić można, że współczynnik tarcia wzrasta z prędkością w zakresie małych prędkości poślizgu [4, 8, 40, 48, 54, 60, 64]. W przedziale wartości ok. 1 m/s osiąga maksimum, a powyżej tej prędkości maleje, albo po krótkim spadku, znów wzrasta [10, 11, 32, 36].

### 2.1.3.4 Stan powierzchni materiału trącego

Materiał, o który tarła próbka ziarna, wybierano zazwyczaj spośród materiałów stosowanych aktualnie w konstrukcji silosów zbożowych i maszyn rolniczych. We wczesnych badaniach były to: drewno, stal, stal cynkowana i guma, później wprowadzono teflon, polietylen, aluminium i beton. Brak dokładnej charakterystyki stanu warstwy powierzchniowej w relacjonowanych opisach badań wynika ze złożoności technik badawczych zjawisk powierzchniowych. Opublikowane prace zawierają najczęściej nazwę handlową użytego materiału i niekiedy wartość parametru chropowatości powierzchni. I tak np. Cyrus [8] stwierdza przyrost współczynnika tarcia pojedynczego ziarna pszenicy o powierzchnię stalową, gdy parametr chropowatości  $R_a$  rośnie w przedziale 0,9 do 11  $\mu\text{m}$ . Istotną trudnością badań tarcia jest zmieniający się w czasie pomiarów stan powierzchni trącej. Richter [47] zaobserwował, że współczynnik tarcia maleje z ilością powtórzeń pomiarów. Polerował więc powierzchnię badanego materiału

do chwili, gdy wartość współczynnika tarcia osiągnęła minimum i dopiero wtedy prowadził pomiary porównawcze. Thompson i Ross [60] wykazali, że występują istotne różnice współczynnika tarcia o próbki blachy stalowej cynkowanej pochodzącej z pięciu różnych źródeł. W ich pomiarach oraz w pomiarach Schwaba [49] wartość współczynnika tarcia i jego odchylenie standardowe malały w kolejnych testach. Snyder i in. [55] stwierdzili przyrost współczynnika tarcia w kolejnych testach. Zmywanie powierzchni trącej czterochlorkiem węgla powodowało powrót współczynnika tarcia do wartości początkowej. Analiza spektrofotometryczna pozwoliła ustalić, że jest to kutyna, podobna do wosku substancja znajdująca się na powierzchni ziarniaków. Wpływ kutyny wzrastał zwłaszcza w czasie dłuższych przerw między pomiarami. Thompson i inni [63] wykazali, że w przypadku wielokrotnego poślizgu ziarna wzdłuż tej samej powierzchni współczynnik tarcia zmalał o blisko 40%. Autorzy zbadali dokładnie skład chemiczny warstwy osadzającej się na powierzchni poślizgu stwierdzając, że jest to głównie kutyna pokrywająca początkowo powierzchnię ziarna. W efekcie długiej drogi tarcia kutyna zmienia w sposób istotny stan struktury powierzchni poślizgu, co objawia się bardzo dużym obniżeniem wartości współczynnika tarcia oraz niwelacją różnic we współczynniku tarcia wynikających ze zróżnicowanych początkowych stanów powierzchni [62].

W większości cytowanych prac porównywano również współczynnik tarcia ziarna o różne materiały konstrukcyjne. Wyniki tych badań, niewątpliwie ważne dla obliczeń konstrukcyjnych, nie pozwalają jednak dociec przyczyn różnic otrzymywanych wartości. Stosowane w pomiarach powierzchnie różniły się bowiem równocześnie składem chemicznym i chropowatością, a stan warstwy powierzchniowej nie był opisywany. Z powyższym zastrzeżeniem można zestawić w kolejności malejącego współczynnika tarcia typowe materiały konstrukcyjne: beton, folia polietylenowa, stal węglowa, drewno, stal cynkowana, teflon [33].

W doborze ziarna do badań autorzy kierowali się rozpowszechnieniem danego gatunku i odmiany w obszarze i czasie ich działania. W przypadku autorów amerykańskich były to zwykle: kukurydza, soja [4, 64], a najczęściej pszenica ozima [4, 6, 40, 48, 54, 60, 69]. Hanzelik i in. [18] użyli dwóch odmian pszenicy: Diana I i Koszutska. W ciągu trwających dwa lata badań otrzymali wyższe wartości współczynnika tarcia dla odmiany Diana I. Autorzy wnioskują, że ziarna dwu odmian pszenicy różniły się chropowatością. Ta zaś, ich zdaniem, zależy od odmiany pszenicy i warunków jej dojrzewania. Większość badaczy nie podaje nazwy odmiany, posługując się tylko nazwą gatunku. Ogólnie stwierdzić można, że w obrębie danego gatunku odmiany istotnie wpływają na wartość współczynnika tarcia. Dostępne w literaturze dane nie pozwalają jednak wnioskować o pochodzeniu obserwowanych różnic. Szczegółowe zestawienie zakresów wartości współczynnika tarcia otrzymanych przez różnych

autorów zawiera praca Kutzbacha [32]. Zestawienie to obrazuje jak duże jest zróżnicowanie wyników spowodowane znanymi i nieznanymi czynnikami wpływającymi na proces tarcia ziarna zbóż i innych nasion. Jest to więc dziedzina wiedzy zbyt mało dotychczas poznana, szczególnie w odniesieniu do materiałów roślinnych, które z uwagi na skomplikowaną budowę i stały postęp hodowlany, wykazują duże zróżnicowanie właściwości fizycznych, w tym także ciernych.

## 2.2 Badania własne

### 2.2.1 Zastosowane metody pomiarowe

Na podstawie analizy literatury i wstępnych badań własnych [15, 23, 24, 38, 39] za czynniki determinujące tarcie uznano:

- wilgotność ziarna,
- chropowatość ziarna i powierzchni poślizgu,
- strukturę wewnętrzną ziarniaka (za jej przejaw uznano tutaj szklistość bądź mączystość ziarna),
- wpływ kutyny,
- materiał powierzchni poślizgu (zastosowano stal i szkło),
- odmianę pszenicy,
- drogę tarcia.

Analiza wpływu wymienionych czynników na proces tarcia wymaga pomiaru przebiegu zależności: powierzchni kontaktu ziarna z płaską powierzchnią od siły normalnej, siły tarcia od siły normalnej na pojedynczej powierzchni kontaktu i siły tarcia warstwy ziarna. Niezbędne są ponadto pomiary wilgotności ziarna i chropowatości powierzchni poślizgu.

#### 2.2.1.1 Metoda pomiaru chropowatości powierzchni

Chropowatość badanej powierzchni mierzono za pomocą mikroskopu podwójnego typu BK 70x50 (prod. NRD). Pomiar polega na odwzorowaniu profilu nierówności za pomocą płaskiej wiązki światła. Mierzona jest, widoczna w okularze, pozorną wysokość chropowatości, która jest następnie przeliczana na wartość wyznaczaną  $R_t$ . Zakres pomiarowy mikroskopu wynosi od 0,5  $\mu\text{m}$  do 100  $\mu\text{m}$ . Norma DIN 4762 zaleca wykonanie pięciu pomiarów i podanie jako wyniku ich średniej.

Wysokość nierówności  $R_t$  powierzchni poślizgu określano zgodnie z normą; pomiar chropowatości ziarniaków wymagał większej liczby powtórzeń, uwzględnienia kierunku pomiaru i krzywizny ziarniaka. Mierzono wysokość nierówności na pięćdziesięciu ziarnach po pięć powtórzeń na każdym. Pomiaru dokonywano na bocznej powierzchni ziarna, wzdłuż i w poprzek dłuższej osi ziarna.

### 2.2.1.2 Metody pomiaru pola powierzchni kontaktu i siły tarcia

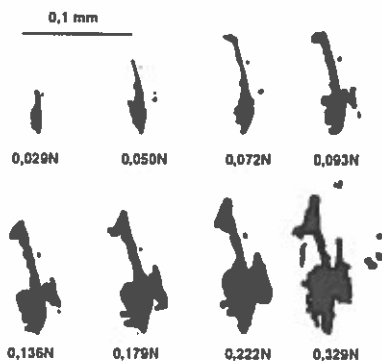
na rzeczywistym obszarze kontaktu

Wartości siły normalnej i siły stycznej (siły tarcia), którymi operowały pierwsze sformułowania praw tarcia nie dają pojęcia o warunkach obciążenia na rzeczywistym obszarze kontaktu. Współczesne wzory obliczeniowe na współczynnik tarcia uwzględniają wprost wartość rzeczywistej powierzchni kontaktu lub wartości naprężeń panujących w obszarze kontaktu. Dla potrzeb niniejszej pracy przygotowano metodę pomiaru rzeczywistej powierzchni kontaktu ziarniaka z płaską płytką szklaną. Schemat metody przedstawia rysunek 2.2. Metoda 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). Badane



Rys. 2.2. Schemat układu pomiarowego rzeczywistego powierzchni kontaktu

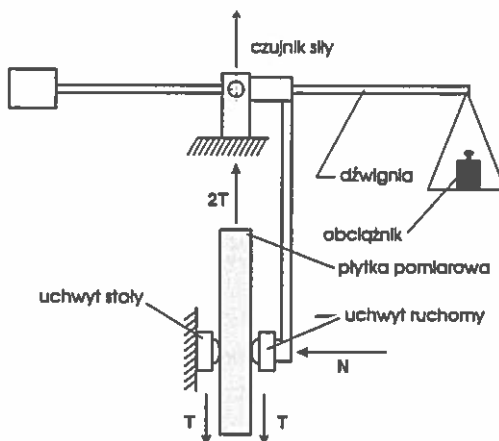
ziarno, umocowane w pojemniku za pomocą cementu dentystycznego umieszczone jest na stoliku mikroskopu pracującego w świetle odbitym. Górna powierzchnia ziarna przykrywana jest płytką szklaną, stanowiącą element układu obciążenia. Płytkę obciążana jest żądaną siłą. Powierzchnia kontaktu ziarna z płytką oświetlona jest równoległą wiązką światła poprzez obiektyw mikroskopu (powiększenie  $\times 5$  lub  $\times 10$ ), a promienie światła odbite od dolnej powierzchni płytki lub od powierzchni ziarna tworzą na matówce aparatu fotograficznego powiększony obraz powierzchni kontaktu. Promienie światła, które przeszły przez płytkę i odbiły się od jej dolnej, gładkiej powierzchni tworzą jasne pole widzenia, zaś promienie, które po przejściu przez płytkę odbiły się od powierzchni płytki będącej w bezpośrednim kontakcie z ziarnem ulegają rozproszeniu i tworzą ciemny obraz powierzchni kontaktu. Obraz rzeczywistej powierzchni kontaktu (powiększony 40–80 razy) jest fotografowany, a po wywołaniu kliszy powiększany i przenoszony na papier fotograficzny (rys. 2.3). Tak otrzymana



Rys. 2.3. Typowe obrazy obszaru kontraktu ziarna pszenicy z płytką szklaną (odmiana Panda, wilgotność ziarna 11%)

fotografia jest umieszczana w polu widzenia kamery miernika pola powierzchni. Obraz badanego obiektu jest przenoszony na ekran monitora telewizyjnego, którego układ elektroniczny sumuje ciemne punkty obrazu ekranu, dając w efekcie wartość pola powierzchni badanego obiektu. Metoda pozwala wyznaczyć pole powierzchni obszaru kontaktu z płaską płytką szklaną w zakresie od  $0,001 \text{ mm}^2$  do  $0,5 \text{ mm}^2$  z dokładnością 5%.

Wyznaczenie obciążeń na obszarze kontaktu wymagało pomiaru siły tarcia w kontakcie pojedynczego ziarna z płaską powierzchnią. W tym celu opracowano metodę pomiaru siły tarcia dwóch ziarn materialu granularnego o przesuwanej między nimi płytkę wykonaną z materialu badanego (rys. 2.4). Zastosowano dwa ziarna aby uniknąć, niezbędnego ze względów konstrukcyjnych, podpieraną płytki łożyskiem wzdłużnym wprowadzającym dodatkowe, zakłócające pomiar tarcia. Badane ziarna umieszczane są w cylindrycznych pojemnikach, zanurzone do połowy w cemencie dentystycznym. Jeden z pojemników z ziarnem umieszczony jest w uchwycie stałym, drugi zaś w uchwycie ruchomym.



Rys. 2.4. Schemat układu pomiarowego siły tarcia pary ziarn o płaską płytkę

Pomiędzy ziarnami umieszczana jest płytka pomiarowa wykonana z badanego materiału. Uchwyt ruchomy zamocowany jest do dźwigni dwustronnej, obciążany grawitacyjnie przez zawieszanie obciążników na końcu dźwigni. Płytkę pomiarową zawieszona jest na głowicy tensometrycznej zamocowanej do ruchomej belki maszyny wytrzymałościowej. Po włączeniu napędu belki płytka rozpoczyna ruch ku górze i równocześnie rejestrowany jest przebieg siły tarcia.

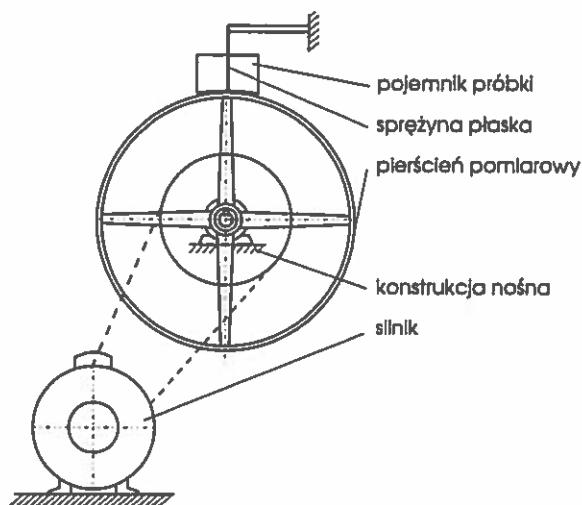
W celu przeprowadzenia pomiaru dwa pojemniki napełniano cementem dentystycznym do ok. 3/4 objętości. Z przygotowanej próbki ziarna o określonej wilgotności pobierano losowo dwa ziarna i za pomocą pęsety umieszczano w pojemnikach, tak by około połowa przekroju ziarna znajdowała się nad powierzchnią cementu. Czynność tę powtarzano do otrzymania założonej liczby par ziaren, równej liczbie powtórzeń pomiaru. Po stwardnieniu cementu pojemniki z wklejonymi ziarnami umieszczano w szczelnie zamkniętym słoju wraz z ziarnami całej próbki i pozostawiano w tym stanie na 12 godzin dla wyrównania wilgotności, która zmieniła się w czasie wklejania. Do pomiaru siły tarcia pobierano ze słoja parę ziarn w pojemnikach smarując dna pojemników klejem szybkoschnącym i umieszczano pojemniki w uchwytach aparatu. Pomiędzy ziarna wprowadzano płytkę pomiarową i prowadzono pomiar zgodnie z przyjętym programem obciążenia. Prędkość poślizgu w opisywanych pomiarach wynosiła 0,5 mm/min.

Po każdym pomiarze płytkę zmywano tkaniną bawełnianą nasączoną czterochlorkiem węgla w celu usunięcia zanieczyszczeń. Po serii pomiarów na danej płytce jej powierzchnię zmywano i pokrywano olejem wazelinowym, w celu ograniczenia zmian chemicznych powierzchni w czasie przechowywania.

### 2.2.1.3 Metoda pomiaru siły tarcia warstwy ziarna

W celu sprawdzenia czy i jak oddziaływania elementarne przenoszą się na powierzchnię tarcia warstwy ziarna wykonano pomiary tarcia próbki ziarna o cylindryczną powierzchnię stalową [14]. Istota metody pomiarowej (rys. 2.5) polega na wyposażeniu urządzenia w łożyskowany na wale pierścień pomiarowy. Pierścień napędzany jest przez silnik prądu stałego o regulowanej prędkości obrotowej. Nad pierścieniem pomiarowym umieszczony jest pojemnik próbki sztywno zamocowany do dolnych końców płaskich sprężyn, tworząc pomiędzy powierzchnią pierścienia i dolną krawędzią pojemnika szczelinę odpowiednią do granulacji badanego materiału. Górne końce sprężyn są sztywno zamocowane do konstrukcji nośnej.

Próbka jest obciążana grawitacyjnie przez obciążniki ustawiane na płytce położonej na górnej powierzchni materiału sypkiego. Do pomiaru siły tarcia służy tensometryczny zestaw pomiarowy z tensometrami naklejonymi na sprężynach. W celu przeprowadzenia pomiaru przygotowuje się ziarno o wymaganej wilgotności i granulacji. Ustawiana jest właściwa dla danej granulacji wielkość szczeliny pomiędzy pojemnikiem, a pierścieniem pomiarowym. Za pomocą pojemnika będącego w wyposażeniu urządzenia



Rys. 2.5. Schemat układu pomiarowego siły tarcia ziarna

z próby ziarna pobierana jest próbka, zasypywana następnie przez lejek do pojemnika próbki. Na powierzchni próbki układana jest płytka dociskowa, a na niej dodatkowe obciążniki. Następnie włączana jest aparatura rejestrująca i napęd pierścienia pomiarowego z założoną prędkością. Pomiar wykonywany jest na oddzielnych próbkach, w wymaganej ilości powtórzeń.

Metody pomiarowe: powierzchni kontaktu ziarna z płytką szklaną, siły tarcia dwu ziarn o płaską płytkę oraz siły tarcia warstwy ziarna zostały zaprojektowane i wykonane dla potrzeb opisywanego eksperymentu. Metoda pomiaru siły tarcia warstwy ziarna została opatentowana [15].

### 2.2.2 Przygotowanie materiału do badań

Obiektem badań były próbki ziarna pszenicy ozimej, które wybrano ze względu na liczne dotychczas prowadzone badania, jak i ze względu na duże znaczenie gospodarcze tego zboża w naszym kraju. Zasadniczą część badań prowadzono na odmianach Grana i Panda. Obie te odmiany były, w okresie badań, uprawiane w Polsce na znacznych arealach. Grana to pszenica typowo pastewna, zaś Panda wybitnie chlebowa. Czynniki szklistości/mączystości ziarna zostały wprowadzone ze względu na różnice właściwości mechanicznych obu typów. Hnilica i Grundas [21, 22] opisują istotne różnice udziału względnego, jak i formy, białka i skrobi w ziarnach szklistych względem mączystych. W serii pomiarów dotyczących wpływu struktury wewnętrznej ziarna wydzielano z próbki ziarna szkliste i mączyste, traktując te cechy jako zgrubne wyróżniki struktury. Szklistość ziarna wiąże się z zawartością białka, a specjaliści hodowli roślin zdecydowali się dać pierwszeństwo odmianom wysokobiałkowym, o wię-



kszym udziale ziarn szklistych Należy zatem spodziewać się wzrostu ich udziału w zasiewach. Niniejsze badania mogą wyjaśnić konsekwencje tego faktu dla procesów technologicznych w których występuje tarcie. Badania porównawcze tarcia warstwy ziarna prowadzono w celu ustalenia stopnia wpływu odmiany i siedliska uprawy na siłę tarcia. Do tych badań użyto dwu odmian ozimych (Jana i Rota), oraz dwu jarych (Jara i Kaspar), z sześciu Stacji Doświadczalnych Oceny Odmian.

Wilgotność ziarna mierzono metodą suszarkową z zastosowaniem aparatu firmy Brabender. Trzy próbki ziarna ważone są na wadze wchodzącej w skład zestawu pomiarowego i następnie umieszczane w komorze suszarki aparatu. Próbki suszone są przez trzy doby w temperaturze 105°C i powtórnie ważone. Wskaźnik aparatu wyświetla wynik w procentach wilgotności ziarna. Dla przygotowania próbki ziarna o żądanej wilgotności odważano potrzebną ilość ziarna o znanej wilgotności i dolewano odpowiednią ilość wody destylowanej do próbki umieszczonej w pojemniku z tworzywa sztucznego. Następnie szczelnie zamknięty pojemnik umieszczano w mieszkadle laboratoryjnym na 24 godziny. W tym czasie pojemnik był obracany przez 15 minut każdej godziny. Po wchłonięciu wody przez ziarno powtórnie mierzono wilgotność próbki. Po raz trzeci sprawdzano wilgotność ziarna próbki po zakończeniu serii pomiarów dla upewnienia się, że nie uległa ona zmianie. Metoda powyższa została sprawdzona i szczegółowo opisana w pracy Woźniak [69].

### 2.2.3 Program badań

Program badań realizowano w czterech etapach. Układ zasadniczych parametrów eksperymentu odpowiada kluczowym zagadnieniom, które wyjaśniano w kolejnych etapach badań. Program każdego następnego etapu badań korygowano eliminując czynniki, które okazały się mało istotne w poprzednich. Pomiary w etapach I, II i III prowadzono na pojedynczych ziarnach obserwując procesy na pojedynczych obszarach kontaktu. Etap I służył określeniu stopnia wpływu struktury ziarna i okrywającej je warstwy kutyny na powierzchnię kontaktu i siłę tarcia. Ponadto sprawdzano czy sposób przyłożenia obciążenia (od najniższego w górę lub od najwyższego w dół) wpływa na przebieg prostej regresji  $T = \mu N + C$ . W drugim etapie badano zależność powierzchni kontaktu od wilgotności oraz zależność siły tarcia od wilgotności ziarna i chropowatości szklanej powierzchni poślizgu. Zastosowano szeroki zakres chropowatości  $R_t = 0 - 100 \mu\text{m}$ . W trzecim etapie oceniano wpływ wilgotności ziarna i chropowatości powierzchni poślizgu na siłę tarcia ziarna o stal. Zastosowano zakres chropowatości  $R_t = 0 - 11 \mu\text{m}$ , gdyż w tym przedziale wartości w drugim etapie zaobserwowano największy wpływ chropowatości na siłę tarcia. Na podstawie wyników etapów II i III podjęto próbę interpretacji teoretycznej procesu tarcia w ujęciu teorii molekularno-mechanicznej.

Ponieważ większość dotychczas publikowanych informacji o tarcu pochodzi z eksperymentów na masie ziarna, w czwartym etapie badań zastosowano tę metodę, aby stwierdzić, na ile wyniki uzyskiwane z pomiarów tarcia pojedynczych ziarn są spójne z uzyskiwanymi z tarcia warstwy. Tą samą metodą badano zmienność oporu tarcia wynikającą z cech odmianowych ziarna i siedliska uprawy. W czasie wszystkich pomiarów temperatura w laboratorium wynosiła około 20°C, a wilgotność względna powietrza około 40%.

#### 2.2.4 Rzeczywista powierzchnia kontaktu

Pomiary przeprowadzono na ziarnie pszenicy odmiany Panda. Ziarno o wilgotności 11% przesiano przez sito o średnicy oczek 3,5 mm. Z ziarn pozostałych na sicie wybrano nieuszkodzone o regularnym kształcie. W następnej selekcji wybrano ziarna całkowicie szkliste i całkowicie mączyste. Połowę próbki ziarn szklistych i połowę próbki ziarn mączystych płukano w czterochlorku węgla przez 12 godzin w celu usunięcia okrywającej ziarna warstwy kutyny. Obserwowano pod mikroskopem obszar kontaktu ziarn z poszczególnych próbek z płytką szklaną przy obciążeniu 0,5 N. Stwierdzono, że tylko ziarna nie płukane pozostawiają na szkle ślady kutyny w formie drobnych kropli. Na podstawie fotografii obszaru kontaktu warstwy ziarna z powierzchnią szklaną stwierdzono, że na 1 cm<sup>2</sup> przypada około sześć ziarn pozostających w kontakcie z płaską powierzchnią. Zgodnie z zaproponowanym przez Hertza [65] rozwiązaniem zagadnienia sprężystego kontaktu kuli z płaską powierzchnią zależność powierzchni kontaktu ziarna od siły normalnej powinna przyjąć postać:

$$S = AN^B \quad 2.4$$

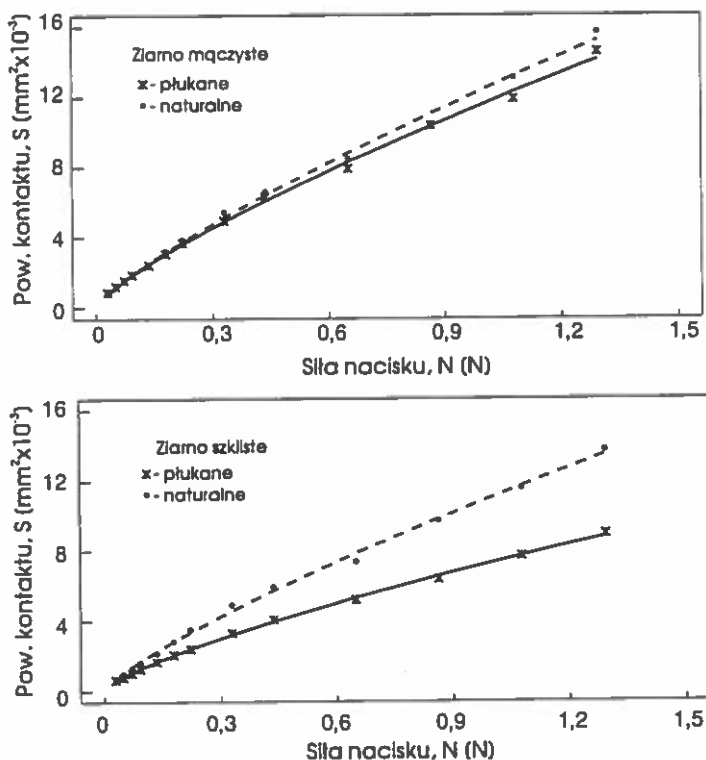
gdzie: S – powierzchnia kontaktu, N – siła normalna, A, B – parametry. Wyniki analizy regresji dla czterech wariantów eksperymentu wraz z ich ocenami statystycznymi przedstawiono w tabeli 1. Wartości otrzymane z eksperymentu dla siły normalnej powyżej 1,5 N wyraźnie odbiegają od krzywej Hertza, dając powierzchnię kontaktu znacznie wyższą. Należy przypuszczać, że powyżej tej wartości obciążenia oprócz odkształcenia nierówności powierzchni ziarniaka istotny staje się udział odkształcenia

Tabela 1. Parametry A i B wzoru Hertza (2.4) dla ziarna pszenicy odmiany Panda (wilgotność 11%)

| Rodzaj ziarna  | A<br>[mm <sup>2</sup> N <sup>-B</sup> ] | Błąd stand.<br>A | B     | Błąd stand.<br>B | Współcz det.<br>[%] |
|----------------|---|------------------|-------|------------------|---------------------|
| szkliste nat.  | 0,0112                                  | 0,0005           | 0,759 | 0,023            | 96,2                |
| szkliste płuk. | 0,0110                                  | 0,0005           | 0,764 | 0,024            | 95,3                |
| mączyste nat.  | 0,0114                                  | 0,0005           | 0,822 | 0,011            | 99,3                |
| mączyste płuk. | 0,0078                                  | 0,0005           | 0,731 | 0,017            | 97,9                |

wnętrza ziarna. Wartości parametrów krzywej regresji obliczono więc uwzględniając wyniki do wartości siły normalnej równej 1,5 N.

Przybliżenie wzorem Hertza opisuje zależność powierzchni kontaktu od siły normalnej ze współczynnikiem korelacji wyższym niż 95%, istotnym na poziomie 1%. Znalezione wartości wykładnika B są wyższe od wynikających z obliczeń Hertza (0,67) natomiast bliższe zalecanym przez Kragielskiego i Lankowa (0,82) w przypadku kontaktu powierzchni o znacznych chropowatościach [31]. Przebieg krzywych aproksymacji wraz ze średnimi wartościami eksperymentalnymi przedstawiono na rys. 2.6. Usunięcie kutyny z ziarna szklistego spowodowało znaczne obniżenie rzeczywistej powierzchni kontaktu. Nie zaobserwowano podobnej tendencji w przypadku ziarna mączystego. W wyższym zakresie obciążeń szybszy przyrost powierzchni kontaktu wystąpił w próbce ziarna mączystego. Efekt ten jest szczególnie wyraźny dla ziarna pozbawionego kutyny. Ta różnica w zachowaniu się ziarna szklistego i mączystego wynika prawdopodobnie z ich różnej sprężystości. Hnilica i Grundas [22] podają wartość modułu Younga endospermu ziarna szklistego  $E = 665$  MPa, zaś ziarna mączystego  $E = 481$  MPa.



Rys. 2.6. Zależność powierzchni kontaktu – S od siły normalnej – N dla pszenicy odmiana Panda (wilgotność ziarna – 11%)

Kołowca i Ślipek [28] również wykazują, że wytrzymałość mechaniczna ziarna pszenicy jest dodatnio skorelowana ze stopniem szklistości. Te spostrzeżenia potwierdzają hipotezę, że w zakresie niższych obciążeń powierzchnia kontaktu wzrasta głównie w wyniku odkształcenia nierówności powierzchni ziarniaka, podczas gdy w zakresie wyższych obciążeń istotny staje się udział odkształcenia wnętrza ziarna.

### 2.2.5 Tarcie pojedynczych ziarn o powierzchnię szklaną

Wybór szkła jako materiału trącego wynikał z równoczesnej możliwości pomiaru powierzchni kontaktu i obliczenia naprężeń na tej powierzchni. Ponadto niska aktywność chemiczna szkła zapewniła stabilność właściwości powierzchniowych w czasie pomiarów, a także przy zmywaniu powierzchni pomiarowej rozpuszczalnikiem.

#### 2.2.5.1 Struktura wewnętrzna ziarna i warstwa kutyny

Pomiary wpływu struktury ziarna i powierzchniowej warstwy kutyny na właściwości cierne przeprowadzono z ziarnem pszenicy ozimej odmiany Panda o wilgotności 11%. Było to ziarno pobrane z tej samej próby, która posłużyła do pomiarów powierzchni kontaktu. W każdym pomiarze rejestrowano wartości siły tarcia przy wzroście, a następnie przy zmniejszaniu obciążenia.

Do opisu zależności siły tarcia od siły normalnej przyjęto prawo tarcia w postaci (2.2) zaproponowanej przez Coulomba, szeroko stosowane jako przybliżenie robocze:

$$T = \mu N + C$$

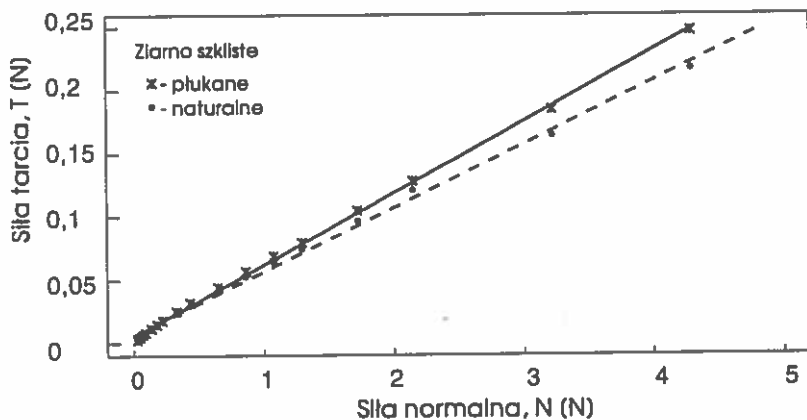
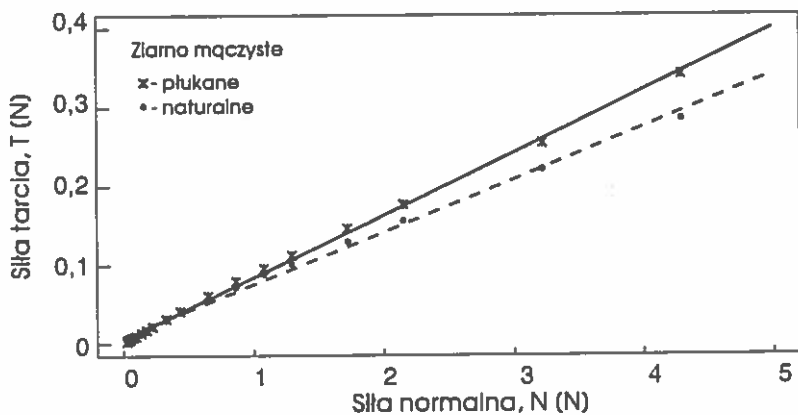
gdzie:  $T$  – siła tarcia,  $N$  – siła normalna,  $\mu$  – współczynnik tarcia,  $C$  – stała (kohezja). Otrzymane wartości parametrów wraz z ich ocenami statystycznymi zebrano w tabeli 2, a dopasowane proste regresji i średnie wartości z pomiarów przedstawia rysunek 2.7

Równanie (2.2) opisuje dane eksperymentalne ze współczynnikiem korelacji wyższym niż 99%, przy poziomie istotności poniżej 1%. Najwyższą wartość współczynnika tarcia  $\mu = 0,0776$  zaobserwowano w przypadku ziarna mączystego pozbawionego kutyny, następnie w porządku malejącym wartości wynoszą:  $\mu = 0,0661$  – ziarna mączyste w stanie naturalnym,  $\mu = 0,0570$  – ziarna szkliste pozbawione kutyny i  $\mu = 0,0508$  – ziarna szkliste w stanie naturalnym. Stwierdzono, że wystąpiły istotne różnice wartości współczynnika tarcia zależne od struktury ziarna, jak i zależne od warstwy kutyny. W obu typach struktury zmycie warstwy kutyny spowodowało istotny przyrost wartości współczynnika tarcia. Efekt ten może wynikać ze smarującego działania kutyny. Różne wartości współczynnika tarcia ziarna szklatego i mączystego mogą świadczyć o różnej budowie ich okrywy owocowo-nasiennej. Udział procentowy ziarn szklistych i mączystych w masie ziarna danej odmiany nie jest stały i zależy od warunków agrotekologicznych [16, 21], zmienne są zatem również właściwości cierne ziarna danej odmiany pod wpływem tych warunków.

Tabela 2. Wartości współczynnika tarcia i kohezji C ziarna pszenicy odmiany Panda (tarcie o gładką płytkę szklaną, wilgotność 11%)

| Rodzaj ziarna      | Komb. | Współ. tarcia $\mu$ | Błąd stand. | Kohezja C, [mN] | Błąd stand. | Współ. kor., [%] |
|--------------------|-------|---------------------|-------------|-----------------|-------------|------------------|
| mączyste naturalne | 1     | 0,0661              | 0,0013      | 10,0            | 2,0         | 99,3             |
|                    | 2     | 0,0668              | 0,0009      | 7,0             | 1,4         | 99,7             |
| mączyste płukane   | 1     | 0,0776              | 0,0004      | 1,4             | 0,6         | 99,9             |
|                    | 2     | 0,0807              | 0,0015      | 8,2             | 2,4         | 99,4             |
| szkliste naturalne | 1     | 0,0508              | 0,0011      | 8,3             | 1,7         | 99,2             |
|                    | 2     | 0,0458              | 0,0005      | 3,4             | 0,7         | 99,8             |
| szkliste płukane   | 1     | 0,0570              | 0,0007      | 6,2             | 1,1         | 99,7             |
|                    | 2     | 0,0565              | 0,0004      | 3,5             | 0,6         | 99,9             |

Objaśnienia: 1 – obciążanie, 2 – odciążanie



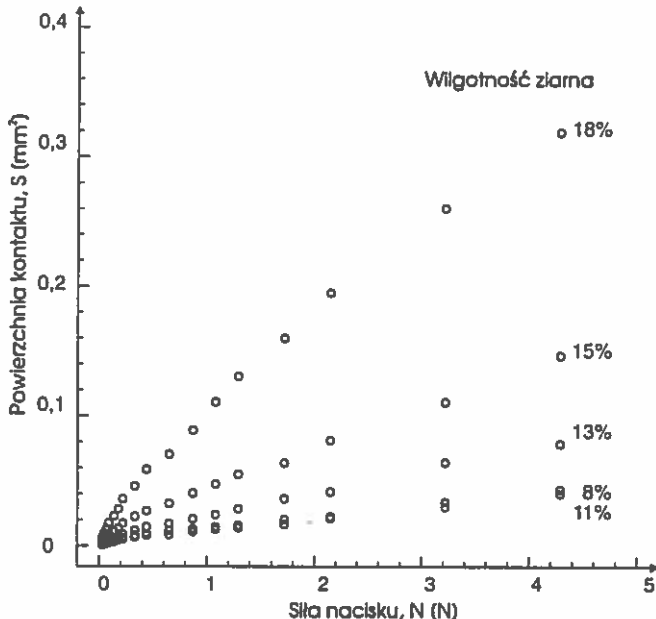
Rys. 2.7. Zależność siły tarcia – T od siły normalnej – N dla pszenicy odmiana Panda (wilgotność ziarna – 11%)

Nie stwierdzono istotnej zmiany zależności siły tarcia od siły normalnej przy rosnącym i malejącym obciążeniu (tab. 2). Brak histerezy wskazuje, że występująca deformacja nierówności powierzchni ziarna zawiera się w zakresie odkształceń odwracalnych.

Mimo wysokiego współczynnika korelacji (powyżej 99%) punkty eksperymentalne odbiegają od prostej regresji, zwłaszcza w przedziale najniższych obciążeń. Efekt ten jest najwyraźniej widoczny w przypadku ziarna mączystego w stanie naturalnym. Rzeczywisty przebieg procesu prawdopodobnie zaczyna się w początku układu współrzędnych, zaś występująca w równaniu regresji wartość kohezji –  $C$  jest parametrem sztucznym, zależnym od zastosowanego zakresu obciążeń.

### 2.2.5.2 Wilgotność ziarna i chropowatość powierzchni poślizgu

Pomiary dotyczące wpływu wilgotności na powierzchnię kontaktu oraz zależności tarcia od wilgotności i chropowatości przeprowadzono z ziarnem odmiany Grana, przy poziomach wilgotności 8%, 11%, 13%, 15% i 18%. Powierzchnie trące stanowiły: gładka płytka szklana, chropowata płytka szklana i trzy płytki pomiarowe ze szklanego papieru ściernego o różnej granulacji. Wysokość chropowatości płytek mierzono za pomocą mikroskopu podwójnego. Otrzymano wartości:  $R_t = 12,4 \mu\text{m}$  – dla chropowatej płytki szklanej i  $R_t = 8,4 \mu\text{m}$ ,  $R_t = 57,2 \mu\text{m}$  oraz  $R_t = 110,2 \mu\text{m}$  dla płytek wykonanych z papieru ściernego.



Rys. 2.8. Zależność powierzchni kontaktu  $S$  od siły normalnej  $N$  dla ziarna pszenicy odmiana Grana przy pięciu poziomach wilgotności

Zależność powierzchni rzeczywistego kontaktu od siły normalnej, przy pięciu poziomach wilgotności ziarna, przedstawiono na rysunku 2.8. Parametry krzywej regresji w postaci równania (2.4) zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Parametry A i B wzoru Hertza (2.4) dla ziarna pszenicy odmiany Grana przy pięciu poziomach wilgotności

| Wilgotność ziarna [%] | A [mm <sup>2</sup> N <sup>-B</sup> ] | B     | Współczynnik korel. [%] |
|-----------------------|--------------------------------------|-------|-------------------------|
| 8                     | 0,0145                               | 0,756 | 97,7                    |
| 11                    | 0,0128                               | 0,740 | 93,0                    |
| 13                    | 0,0250                               | 0,737 | 97,6                    |
| 15                    | 0,0467                               | 0,721 | 97,2                    |
| 18                    | 0,1041                               | 0,777 | 98,2                    |

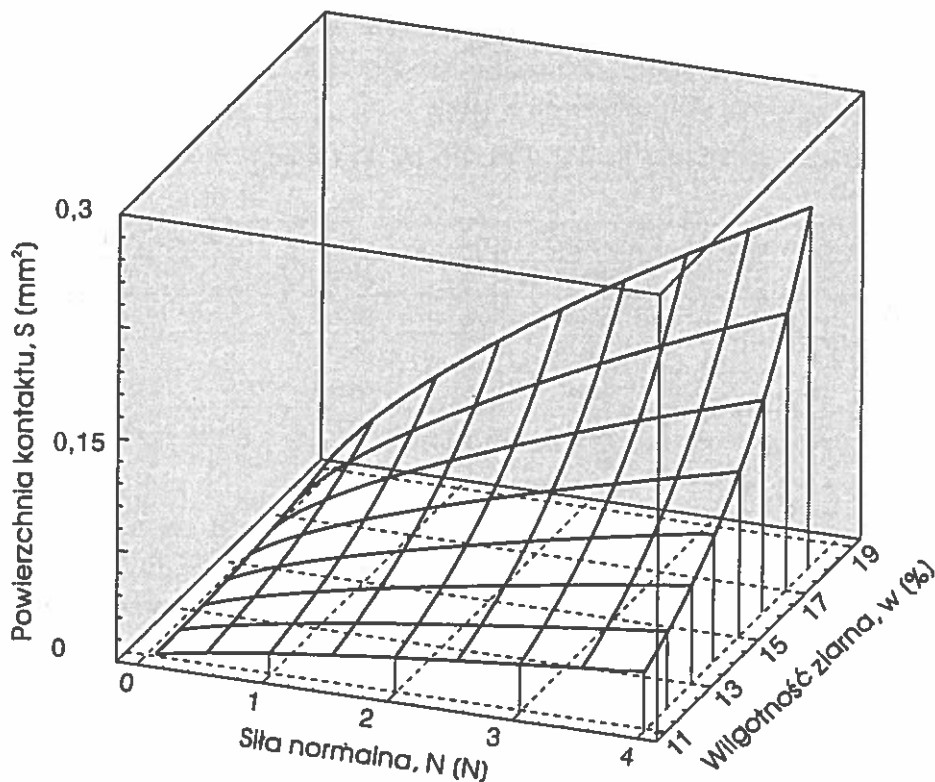
Równanie (2.4) opisuje zależność powierzchni kontaktu od siły normalnej ze współczynnikiem korelacji wyższym niż 93%, istotnym na poziomie 1%. Wykładnik B zmienia się ze wzrostem wilgotności nieznacznie (0,72–0,78). Stała równania regresji A szybko wzrasta po przekroczeniu 11% wilgotności ziarna.

Dla uwzględnienia równoczesnego wpływu wilgotności i siły normalnej na powierzchnię kontaktu zastosowano metodę regresji wielokrotnej i otrzymano następujące równanie empiryczne:

$$S = 584 \exp(0,285w) N^{0,703} 10^{-6} \quad 2.5$$

gdzie: w – wilgotność ziarna, %, S – rzeczywista powierzchnia kontaktu, mm<sup>2</sup>, N – siła normalna, N. Równanie to opisuje zależność mierzonych zmiennych w zakresie wilgotności od 11% do 18%, ze współczynnikiem korelacji równym 97,5%, istotnym na poziomie 1%. Graficzną ilustrację równania przedstawia rysunek 2.9.

Wyniki pomiarów tarcia przy pięciu poziomach R<sub>t</sub> i pięciu poziomach wilgotności zestawiono w tabeli 4. Porównanie wyników pomiarów tarcia na gładkiej płycie szklanej odmiany Panda (tab. 2) i odmiany Grana (tab. 4.) wskazuje, że współczynnik tarcia zależy od odmiany ziarna. Dla odmiany Panda wartości μ zawierały się w przedziale od 0,0508 do 0,0776, podczas gdy dla odmiany Grana, przy tej samej wilgotności (11%) otrzymano μ = 0,117 (tab. 4.). Wysokość nierówności R<sub>t</sub> mierzona w 100 powtórzeniach wzdłuż ziarna wynosiła w badanych wariantach: 6,8 μm – Grana mączyste, 6,2 μm – Grana szkliste i Panda mączyste, oraz 4,7 μm – Panda mączyste. W obserwacji mikroskopowej stwierdzono ponadto, że chropowatość powierzchni ziarn odmiany Grana ma kształt bardziej skomplikowany niż ziarn odmiany Panda. Parametr chropowatości R<sub>t</sub> nie oddaje jednak stopnia geometrycznej złożoności profilu.



Rys. 2.9. Ilustracja graficzna równania (2.5) opisującego zależność powierzchni kontaktu –  $S$  od siły normalnej –  $N$  i wilgotności –  $w$  dla ziarna pszenicy odmiana Grana

Współczynnik tarcia wyraźnie wzrasta z przyrostem wilgotności po przekroczeniu wartości 13%. Do tej wartości wilgotności współczynnik tarcia pozostaje stały. Po pomiarze nie obserwowano uszkodzeń okrywy owocowo-nasiennej ziarna, można więc przyjąć, że w przypadku tarcia o gładką płytkę szklaną opór tarcia pochodzi od sił adhezji. Przyrost współczynnika tarcia z przyrostem wilgotności wynika głównie z powiększenia powierzchni na której siły te działają.

Współczynnik tarcia rośnie z przyrostem wysokości nierówności. Największy przyrost nastąpił pomiędzy gładką płytką szklaną ( $R_t < 0,5 \mu\text{m}$ ) a chropowatą płytką szklaną ( $R_t = 12,4 \mu\text{m}$ ). Przy zwiększaniu wysokości nierówności, współczynnik tarcia nadal rósł, jednak znacznie wolniej i nie osiągnął wartości  $\mu = 1$ . Przy tarcu o powierzchnie chropowate występowały uszkodzenia okrywy owocowo-nasiennej ziarna. Można więc stwierdzić, że maksymalna wartość współczynnika tarcia zależy od wytrzymałości okrywy owocowo-nasiennej ziarna i od jego wilgotności.



Tabela 4. Wartości współczynnika tarcia  $\mu$  i kohezji C w zależności od wilgotności ziarna i wysokości nierówności  $R_t$  (ziarno odmiany Grana, tarcie o szkło i papier ścierny)

| $R_t$<br>[ $\mu\text{m}$ ] | Wilgotność ziarna<br>[%] | Współ. tarcia $\mu$ | Kohezja C [mN] | Współ. korel. [%] |
|----------------------------|--------------------------|---------------------|----------------|-------------------|
| <0,5                       | 8                        | 0,088               | 4              | 98,6              |
|                            | 11                       | 0,073               | 6              | 98,5              |
|                            | 13                       | 0,076               | 6              | 99,2              |
|                            | 15                       | 0,062               | 5              | 98,1              |
|                            | 18                       | 0,111               | 9              | 98,9              |
| 1,0                        | 8                        | 0,197               | 4              | 99,7              |
|                            | 11                       | 0,209               | 6              | 99,7              |
|                            | 13                       | 0,209               | 8              | 99,7              |
|                            | 15                       | 0,224               | -7             | 99,7              |
|                            | 18                       | 0,239               | -8             | 98,8              |
| 1,8                        | 8                        | 0,300               | -2             | 99,6              |
|                            | 11                       | 0,339               | 9              | 98,7              |
|                            | 13                       | 0,296               | -7             | 99,7              |
|                            | 15                       | 0,297               | 25             | 99,5              |
|                            | 18                       | 0,410               | -22            | 99,7              |
| 6,4                        | 8                        | 0,547               | -23            | 99,2              |
|                            | 11                       | 0,535               | -10            | 99,0              |
|                            | 13                       | 0,566               | -20            | 98,7              |
|                            | 15                       | 0,526               | 20             | 99,0              |
|                            | 18                       | 0,548               | -15            | 99,7              |
| 11,0                       | 8                        | 0,258               | -12            | 98,8              |
|                            | 11                       | 0,328               | -30            | 98,3              |
|                            | 13                       | 0,351               | -31            | 98,6              |
|                            | 15                       | 0,379               | -44            | 98,5              |
|                            | 18                       | 0,386               | -50            | 98,5              |

## 2.2.6 Tarcie pojedynczych ziarn o powierzchnię stalową

### 2.2.6.1 Chropowatość płytki i wilgotność ziarna

W tej serii pomiarów zastosowano płytki stalowe o pięciu różnych poziomach wysokości nierówności  $R_t$ . Trzy z nich szlifowano do osiągnięcia wysokości nierówności  $R_t = 1 \mu\text{m}$ ,  $R_t = 1,8 \mu\text{m}$  i  $R_t = 6,4 \mu\text{m}$ .

Tabela 5. Wartości współczynnika tarcia  $\mu$  i kohezji C w zależności od wilgotności ziarna i wysokości nierówności  $R_t$  (ziarno odmiany Grana, tarcie o powierzchnię stalową)

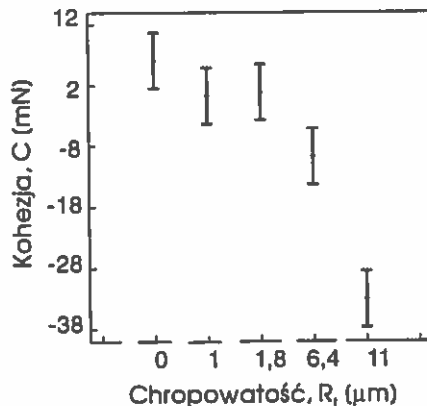
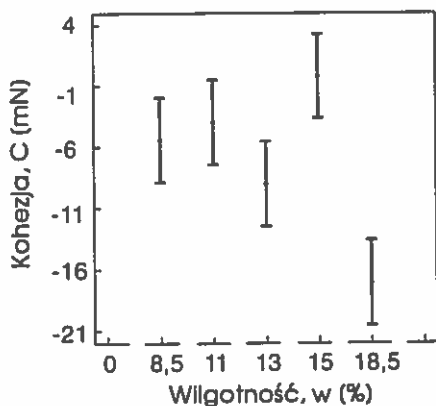
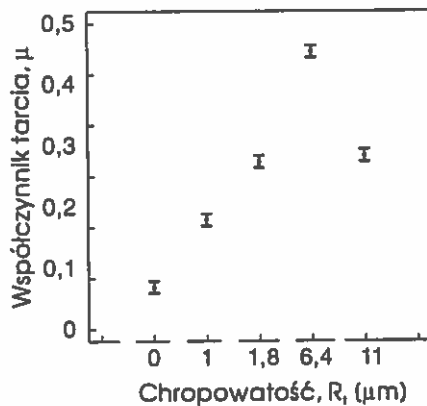
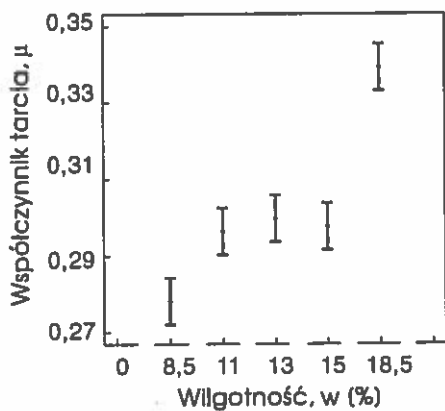
| $R_t$<br>[ $\mu\text{m}$ ] | Wilgotność ziarna<br>[%] | Wspól. tarcia $\mu$ | Kohezja C [mN] | Wspól. korel. [%] |
|----------------------------|--------------------------|---------------------|----------------|-------------------|
| <0,5                       | 8                        | 0,088               | 4              | 98,6              |
|                            | 11                       | 0,073               | 6              | 98,5              |
|                            | 13                       | 0,076               | 6              | 99,2              |
|                            | 15                       | 0,062               | 5              | 98,1              |
|                            | 18                       | 0,111               | 9              | 98,9              |
| 1,0                        | 8                        | 0,197               | 4              | 99,7              |
|                            | 11                       | 0,209               | 6              | 99,7              |
|                            | 13                       | 0,209               | 8              | 99,7              |
|                            | 15                       | 0,224               | -7             | 99,7              |
|                            | 18                       | 0,239               | -8             | 98,8              |
| 1,8                        | 8                        | 0,300               | -2             | 99,6              |
|                            | 11                       | 0,339               | 9              | 98,7              |
|                            | 13                       | 0,296               | -7             | 99,7              |
|                            | 15                       | 0,297               | 25             | 99,5              |
|                            | 18                       | 0,410               | -22            | 99,7              |
| 6,4                        | 8                        | 0,547               | -23            | 99,2              |
|                            | 11                       | 0,535               | -10            | 99,0              |
|                            | 13                       | 0,566               | -20            | 98,7              |
|                            | 15                       | 0,526               | 20             | 99,0              |
|                            | 18                       | 0,548               | -15            | 99,7              |
| 11,0                       | 8                        | 0,258               | -12            | 98,8              |
|                            | 11                       | 0,328               | -30            | 98,3              |
|                            | 13                       | 0,351               | -31            | 98,6              |
|                            | 15                       | 0,379               | -44            | 98,5              |
|                            | 18                       | 0,386               | -50            | 98,5              |

Wartość  $R_t = 11 \mu\text{m}$  uzyskano przez struganie, zaś wysokość nierówności płytki polerowanej do lustrzanego polysku była poniżej zakresu pomiarowego mikroskopu ( $R_t < 0,5 \mu\text{m}$ ) i będzie umownie oznaczana  $R_t = 0 \mu\text{m}$ . Do pomiarów użyto ziarna pszenicy odmiany Grana. Otrzymane wartości parametrów zawiera tabela 5.

W celu oceny wpływu chropowatości powierzchni płytki i wilgotności ziarna na zmiany parametrów prostej regresji przeprowadzono dwuczynnikową analizę wariancji. Analizie poddano wartości  $\mu$  i C obliczane dla każdego powtórzenia osobno (zn. każdy wariant wilgotność x chropowatość jest reprezentowany przez 10 par wartości parametrów). Wyniki przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Analiza wariancji współczynnika tarcia  $\mu$  i kohezji C w zależności od wilgotności ziarna i wysokości nierówności powierzchni  $R_t$

| Źródło zmienności         | Sumy kwadr. | Stopnie swobody | Średnie kwadraty | Wartość testu | Pdp. $P(F_1 > F_0)$ |
|---------------------------|-------------|-----------------|------------------|---------------|---------------------|
| Współczynnik tarcia $\mu$ |             |                 |                  |               |                     |
| Zmienność całkowita       | 6,2872      | 249             |                  |               |                     |
| Wilg. ziarna              | 0,1006      | 4               | 0,0252           | 17,71         | 0,00000             |
| Chrop.                    | 5,8442      | 4               | 1,4610           | 999,99        | 0,00000             |
| Kohezja C                 |             |                 |                  |               |                     |
| Zmienność całkowita       | 0,1163      | 249             |                  |               |                     |
| Wilg. ziarna              | 0,0082      | 4               | 0,0020           | 8,32          | 0,00000             |
| Chrop.                    | 0,0487      | 4               | 0,0002           | 49,48         | 0,00000             |



Rys. 2.10. Przedziały najmniejszych istotnych różnic ( $\alpha = 5\%$ ) dla średnich współczynnika tarcia  $\mu$  i kohezji  $C$

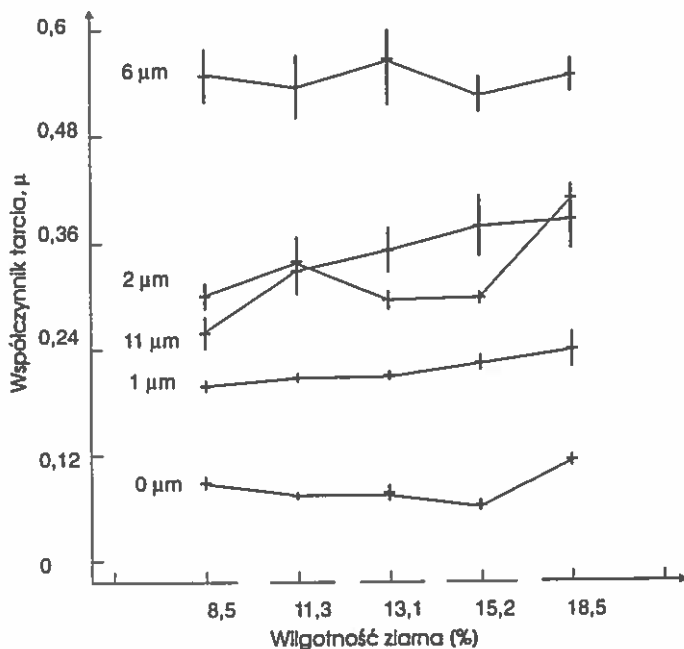
Chropowatość i wilgotność istotnie wpływają na zmiany tak współczynnika tarcia –  $\mu$  jak i kohezji –  $C$ . Wpływ chropowatości jest jednak zdecydowanie silniejszy. Z całkowitej sumy kwadratów odchyżeń  $\mu$  równej 6,287 zmiany chropowatości tłumaczą 5,844, zaś zmiany wilgotności 0,101. Podobnie jest w przypadku kohezji.

Na rysunku 2.10 a–d przedstawiono wartości parametrów wraz z przedziałami najmniejszych istotnych różnic (poziom ufności – 95%). Wartości  $\mu$  dla poziomów wilgotności 11%, 13% i 15% nie są istotnie różne. Wartość  $\mu$  dla wilgotności 8,5% jest od wymienionych istotnie niższa, zaś wartość  $\mu$  dla wilgotności 18% – istotnie wyższa od pozostałych. Silny wpływ chropowatości na współczynnik tarcia obrazuje rys. 2.10b. Wszystkie średnie są istotnie różne i oczywisty jest wzrost współczynnika tarcia ze wzrostem chropowatości. Wyjątkiem jest wartość  $\mu$  dla  $R_t = 11 \mu\text{m}$ , która jest niewiele wyższa od obserwowanej w przypadku  $R_t = 1,8 \mu\text{m}$ . Przyczyną tej anomalii jest inny kształt nierówności powierzchni struganej niż powierzchni szlifowanych. W obserwacji mikroskopowej stwierdzono, że profile powierzchni szlifowanych są geometrycznie podobne, z różnicą skali. Geometria śladów obróbki struganiem jest od nich zdecydowanie różna, zbocza nierówności są łagodniejsze, a ich odległości większe. Wysokość nierówności  $R_t$  nie jest więc wystarczającym wskaźnikiem chropowatości powierzchni w przypadku pomiarów tarcia. Wobec tej niekonsekwencji wartości parametrów tarcia dla  $R_t = 11 \mu\text{m}$  nie będą uwzględniane w dalszych rozważaniach tego rozdziału. Należy równocześnie wnioskować, że w przypadku tarcia o powierzchni chropowate, istotny wpływ na współczynnik tarcia mają oddziaływania nierówności kontaktujących się powierzchni.

Średnie wartości kohezji (rys. 2.10 c) nie różnią się istotnie przy poszczególnych poziomach wilgotności z wyjątkiem wartości  $C$  dla wilgotności 18,5%, która jest niższa od pozostałych. Niewielki jest również wpływ chropowatości na kohezję (rys. 2.10 d).

Dalszą analizę wyników prowadzono w poszczególnych grupach wariantów tzn. badano zmienność  $\mu$  i  $C$  dla danej chropowatości przy zmiennej wilgotności, a następnie dla danej wilgotności przy zmiennej chropowatości. Dla wszystkich badanych poziomów chropowatości zaobserwowano istotny i konsekwentny przyrost współczynnika tarcia z rosnącą wilgotnością. Wyniki analizy wpływu wilgotności przy ustalonych poziomach chropowatości nie przedstawiają tak wyraźnej tendencji (rys. 2.11).

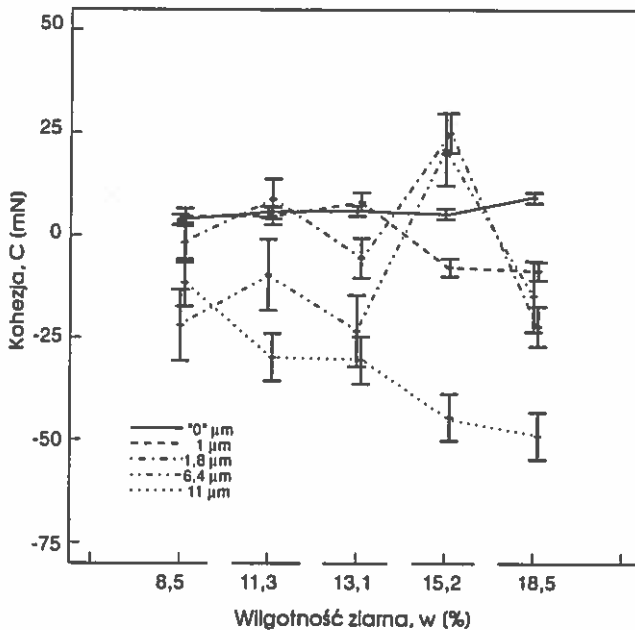
W przypadku powierzchni gładkiej najniższą wartość  $\mu = 0,061$  zaobserwowano przy wilgotności ziarna 15,2%. Przebieg zależności współczynnika tarcia od wilgotności –  $\mu(w)$  można by przybliżyć krzywą drugiego stopnia. Wielu autorów opisuje taki właśnie przebieg wyników badań eksperymentalnych [4, 33, 54, 60]. W przypadku płytki o wysokości nierówności  $R_t = 1 \mu\text{m}$  wartości  $\mu$  stale rosną ze wzrostem wilgotności i możliwy byłby opis zależności równaniem liniowym. Dla pozostałych poziomów chropowatości nie widać klarownej tendencji zmian  $\mu(w)$ , a dla  $R_t = 6,4 \mu\text{m}$



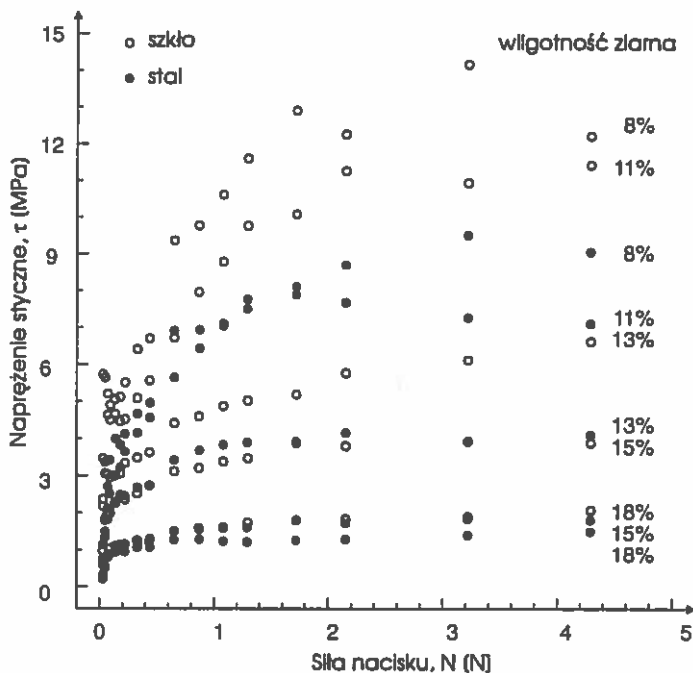
Rys. 2.11. Wartości współczynnika tarcia  $\mu$  w zależności od wilgotności ziarna dla pięciu poziomów wysokości nierówności  $R_t$  (n.i.r. dla  $\alpha = 5\%$ )

otrzymane wartości różnią się istotnie dopiero na poziomie istotności powyżej 40%. Opisane wyniki pomiarów świadczą o różnym udziale zjawisk składowych wpływających na zmienność współczynnika tarcia, w zależności od charakteru chropowatości. W przypadku tarcia o gładką płytkę, kiedy decyduje wpływ adhezji, obserwujemy przebieg z minimum. W miarę wzrostu chropowatości rośnie udział sił deformacyjnych i wynikających ze skrawania materiału. Przy wysokości nierówności  $R_t = 6,4 \mu\text{m}$  oddziaływania nierówności powierzchni na chaotycznie rozmieszczonych w przestrzeni mikroobszarach kontaktu dają duży rozrzut wartości wyników i brak istotnych różnic wartości średnich współczynnika tarcia. Rysunek 2.12 przedstawia rozkład wartości kohezji  $C$  w zależności od wilgotności przy poszczególnych poziomach chropowatości. Przy wszystkich poziomach chropowatości stwierdzono istotny wpływ wilgotności na wartość kohezji. Charakterystyczne jest jednak, że tylko w przypadku płytki gładkiej dla wszystkich poziomów wilgotności otrzymane średnie mają wartość dodatnią. Przy wzroście wilgotności coraz więcej średnich  $C(R_t)$  przyjmuje wartości ujemne. Świadczy to o zmianie charakteru zależności tzn. o zmianie kierunku odstawiania wartości  $T(N)$  od prostej Coulomba. Efekt ten jest analizowany w rozdziale 2.3.

Wyniki pomiarów tarcia na gładkiej płytce wykorzystano do obliczenia rzeczywistego naprężenia stycznego. W tym celu dzielono średnie wartości siły tarcia przez odpowiadające im średnie wartości powierzchni kontaktu. Wykresy naprężenia styczn-



Rys. 2.12. Wartości kohezji – C (wraz z n.i.r. dla  $\alpha = 5\%$ ) w zależności od wilgotności ziarna – dla pięciu poziomów chropowatości  $R_t$  (pszenica odmiana Grana, tarcie o płytkę stalową)



Rys. 2.13. Zależność napężenia stycznego  $\tau$  od siły normalnej N dla ziarna pszenicy odmiana Grana przy pięciu poziomach wilgotności

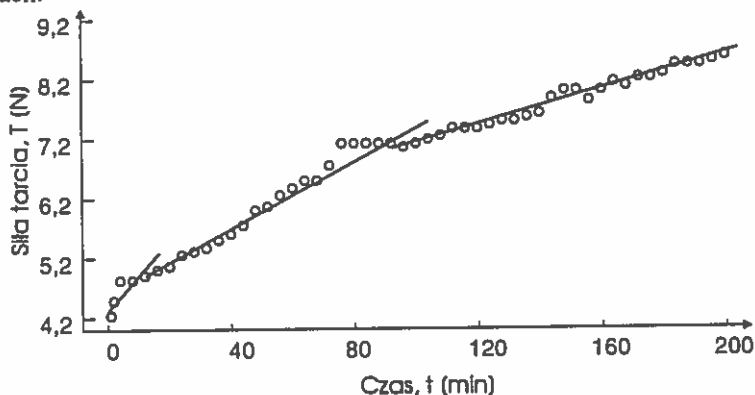
nego w zależności od siły normalnej przedstawia rysunek 2.13. Przyrost wilgotności powoduje znaczny spadek naprężenia stycznego, które jest miarą sił adhezji działających w obszarze kontaktu. Przy wszystkich poziomach wilgotności naprężenie styczne wzrasta z przyrostem siły normalnej do wartości 1,5 N; powyżej tej wielkości naprężenie styczne nie zmienia się lub nawet maleje. Należy przypuszczać, że dopóki przyrost powierzchni kontaktu zachodzi w wyniku odkształcania mikronierówności powierzchni ziarna, naprężenia normalne i styczne rosną. Kiedy istotny staje się udział odkształcania wnętrza ziarna, naprężenia normalne i styczne stabilizują się na osiągniętym poziomie.

## 2.2.7 Tarcie warstwy ziarna o powierzchnię stalową

### 2.2.7.1 Czas trwania pomiaru – droga tarcia

Mierzono przyrost siły tarcia w funkcji czasu pomiaru, co wobec stałości prędkości poślizgu równoważne jest zależności od drogi tarcia. Siła normalna wynosiła 9 N, a wilgotność ziarna około 10%. Uzyskany przebieg ilustruje rysunek 2.14. Zaobserwowano szybki przyrost siły tarcia w pierwszych minutach pomiaru. Równania prostych regresji dla poszczególnych przedziałów czasu:

$T = 0,051t + 4,4$  N, pierwsze 10 minut,  $T = 0,029t + 4,5$  N, w przedziale 10 – 100 minut oraz  $T = 0,015t + 5,6$  N, powyżej 100 minut pomiaru, gdzie  $t$  – czas pomiaru w minutach.



Rys. 2.14. Typowy przebieg siły tarcia  $T$  w zależności od czasu pomiaru  $t$

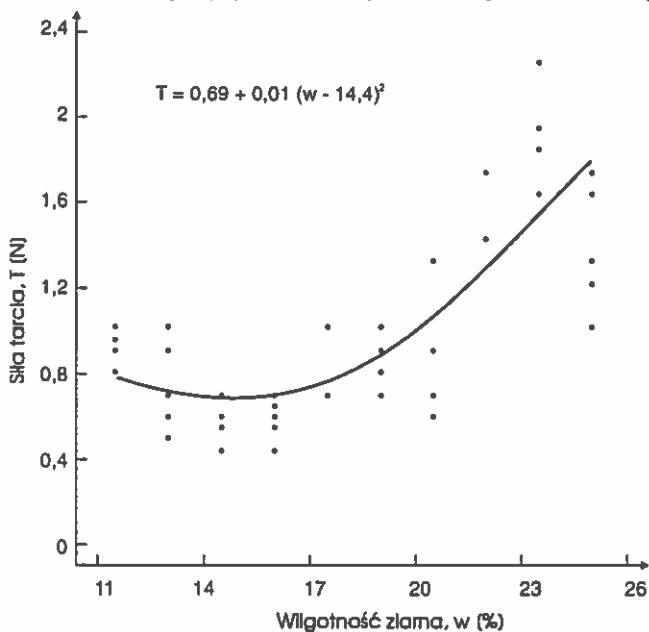
Pewna stabilizacja mierzonej siły tarcia następuje po kilkudziesięciu minutach poślizgu, a więc po czasie nie występującym w procesach rzeczywistych. Opiswane w literaturze pomiary prowadzono w pierwszym z wyróżnionych zakresów czasu pomiaru, w przedziale szybkiego przyrostu siły tarcia. Przedłużenie czasu pomiaru daje stabilizację mierzonego procesu, jednak po czasie tarcia zbyt długim z praktycznego punktu widzenia. Obserwowany przyrost siły tarcia może następować wskutek zmiany

wielkości obszaru kontaktu jak też zmian fizycznych i chemicznych na tym obszarze. Prawdopodobnie w pierwszym stadium procesu szybko przyrasta pole rzeczywistej powierzchni kontaktu w wyniku przyrostu ilości punktów kontaktu zachodzącego wraz z reorientacją ziarn przybierających położenie optymalne ze względu na stan energetyczny. W pomiarach wstępnych stwierdzono, że po kilku minutach tarcia, ziarna przy powierzchni pierścienia układają się dłuższą osią w kierunku ruchu i bruzdką ku powierzchni poślizgu. W dalszym przebiegu procesu uwidacznia się wpływ odkształceń nierówności powierzchni ziarn. Ponadto w miarę ścierania warstwy powierzchniowej ziarn następują zmiany właściwości fizycznych warstwy pośredniej (orientacja cząsteczek związków organicznych, przyrost ilości zanieczyszczeń itp. [67]).

### 2.2.7.2 Wilgotność ziarna

Wyznaczano zależność siły tarcia od siły nacisku normalnego przy zmiennej wilgotności pszenicy odmiany Grana. Zastosowano sześć poziomów nacisku normalnego: 1, 4, 6, 9, 11 i 14 N. Wilgotność próbek ziarna wynosiła 8%, 10%, 12%, 13%, 15% i 16%. Każdy wariant wilgotność x siła normalna powtarzano pięć razy. Na rysunku 2.15 przedstawiono typowe wyniki pomiaru dla stałej siły nacisku równej 6 N i dopasowaną krzywą regresji.

Zależności siły tarcia od siły nacisku dla poszczególnych poziomów wilgotności aproksymowano prostymi regresji postaci:  $T = \mu N + C$ . Wyniki obliczeń przedstawiono



Rys. 2.15. Zależność siły tarcia – T od wilgotności – w przy nacisku 6 N. Dane z pomiaru i dopasowana parabola



Tabela 7. Wartości współczynnika tarcia  $\mu$  i kohezji C w zależności od wilgotności ziarna (odmiana Grana, tarcie warstwy o powierzchnię stalową)

| Wilgotność ziarna [%] | Współczynnik tarcia $\mu$ | Kohezja C [N] | Współczynnik korel. [%] |
|-----------------------|---------------------------|---------------|-------------------------|
| 8                     | 0,133                     | 0,30          | 97,6                    |
| 10                    | 0,132                     | 0,17          | 99,5                    |
| 12                    | 0,127                     | 0,11          | 96,2                    |
| 13                    | 0,098                     | 0,17          | 99,1                    |
| 15                    | 0,110                     | 0,08          | 95,9                    |
| 16                    | 0,106                     | 0,21          | 99,3                    |

w tabeli 7. Wartość współczynnika tarcia osiąga minimum  $\mu = 0,098$  przy wilgotności ziarna równej 13%.

Poszukiwano również modelu uwzględniającego równocześnie wpływ nacisku i wilgotności ziarna. Wobec dobrego dopasowania równania liniowego do opisu zależności siły tarcia od siły normalnej i opisu równaniem drugiego stopnia zależności siły tarcia od wilgotności ziarna do wyników eksperymentu dopasowywano krzywą postaci:

$$T = b_1(w - b_2)^2 N + b_3$$

gdzie:  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  – parametry,  $N$  – nacisk w N,  $w$  – wilgotność ziarna w %. Po wyliczeniu wartości parametrów równanie przybiera postać:

$$T = 0,004(w - 12,8)^2 N + 0,78$$

Analiza wariancji wykazała istotność wpływu obu czynników na siłę tarcia na poziomie  $\alpha = 1\%$ , przy współczynniku determinacji  $R^2 = 0,87$ .

### 2.2.7.3 Odmiana i miejsce uprawy

Wilgotność ziarna we wszystkich przypadkach wynosiła około 10%. Pomiar w każdym wariancie odmiana x siedlisko powtarzano dziesięciokrotnie. Wyniki przedstawiono w tabeli 8. Dla żadnej z odmian nie wystąpiła istotna różnica przebiegu  $T(N)$  w zależności od miejsca uprawy.

Wystąpiły natomiast istotne różnice współczynnika tarcia pomiędzy odmianami. Równania regresji obliczone dla poszczególnych odmian (dane z obu stacji uprawy traktowane jako jeden zbiór) przybrały postaci:

$$T = 0,26N + 0,17 - \text{Jara,}$$

$$T = 0,20N + 0,12 - \text{Jana,}$$

$$T = 0,19N + 0,12 - \text{Kaspar,}$$

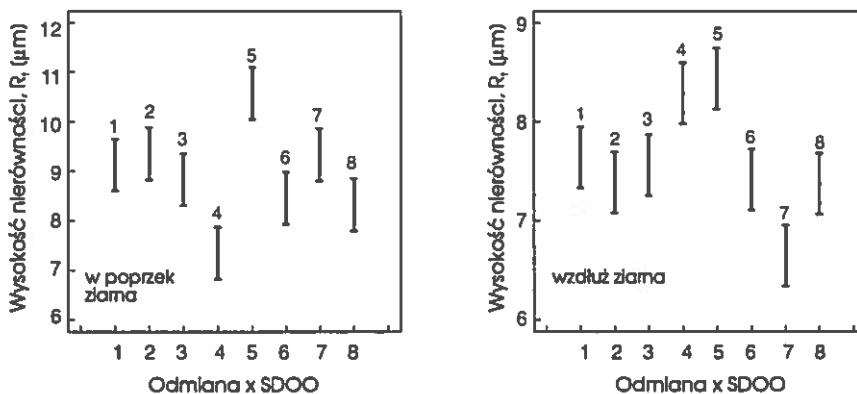
$$T = 0,14N + 0,19 - \text{Rota.}$$

Tabela 8. Wartości współczynnika tarcia  $\mu$  i kohezji C czterech odmian pszenicy pochodzących z sześciu różnych Stacji Doświadczalnych Oceny Odmian (tarcie warstwy ziarna o powierzchnię stalową)

| Odmiana | Miejsce uprawy | Wsp. tarcia $\mu$ | Kohezja C [N] | Wsp. korel. [%] |
|---------|----------------|-------------------|---------------|-----------------|
| Jara    | Bezek          | 0,250             | 0,15          | 98              |
|         | Grabownica     | 0,268             | 0,19          | 99              |
| Jana    | Lubliniec      | 0,189             | 0,067         | 98              |
|         | Zadąbrowie     | 0,211             | 0,155         | 99              |
| Kaspar  | Jarosławiec    | 0,194             | 0,12          | 98              |
|         | Lubliniec      | 0,187             | 0,13          | 98              |
| Rota    | Zadąbrowie     | 0,137             | 0,17          | 99              |
|         | Cicibór        | 0,150             | 0,10          | 99              |

#### 2.2.7.4 Chropowatość ziarna

Jednym z prawdopodobnych źródeł różnic właściwości ciernych pomiędzy ziarnem różnych odmian może być różnica chropowatości ziarna. Dla zweryfikowania tej hipotezy mierzono chropowatość 100 ziarn każdego wariantu odmiana x stacja uprawy. Wysokość nierówności  $R_t$  mierzono na powierzchni bocznej ziarna wzdłuż i w poprzek jego dłuższej osi. Średnia wysokość nierówności  $R_t$  dla wszystkich próbek mierzona wzdłuż ziarna wyniosła  $7,59 \pm 1,63 \mu\text{m}$  i była istotnie ( $\alpha = 5\%$ ) niższa niż mierzona w poprzek ziarna, równa  $8,92 \pm 2,8 \mu\text{m}$ . Średnie wyników poszczególnych pomiarów wraz z ich najmniejszymi istotnymi różnicami przedstawiono na rysunku 2.16. Wysokość nierówności  $R_t$  odmiany Jara z SDOO Grabownica jest istotnie wyższa od pozostałych, zaś  $R_t$  ziarna odmiany Rota z SDOO Zadąbrowie jest istotnie niższa od pozostałych,



Rys. 2.16. Wysokość nierówności  $R_t$  powierzchni ziarna pszenicy czterech odmian wraz z najmniejszymi istotnymi różnicami ( $\alpha = 5\%$ )

Oznaczenia: 1 – Kaspar Jarosławiec, 2 – Kaspar Lubliniec, 3 – Rota Cicibór, 4 – Rota Zadąbrowie, 5 – Jara Grabownica, 6 – Jara Bezek, 7 – Jana Lubliniec, 8 – Jana Zadąbrowie

dla obu kierunków pomiaru. Zestawienie odmian w malejącej kolejności wysokości nierówności: Jara, Kaspar i Jana (nie różniące się istotnie) oraz Rota, jest zgodne z zestawieniem odmian pod względem malejącego współczynnika tarcia (rozdz. 2.2.7.3). Zbieżność tendencji świadczy o tym, że siła oporu tarcia ziarna o stosunkowo gładką powierzchnię stalową zależy od chropowatości powierzchni ziarn. Ta zaś zależna jest od odmiany i warunków uprawy roślin.

### 2.3 Interpretacja fizyczna

Przytoczone wyniki pomiarów wskazują na współdziałanie w procesie tarcia ziarna zbóż oddziaływań kształtowych i powierzchniowych. Teoria molekularno-mechaniczna w ujęciu Kragielskiego może być zatem odpowiednią do opisu rozważanego procesu. Wyróżnia się dwie składowe siły oporu tarcia – deformacyjną (nazywaną też mechaniczną) i adhezyjną (nazywaną niekiedy molekularną). Dwa wymienione oddziaływania przebiegają na różnych poziomach wysokości nierówności i jako takie mogą być w pierwszym przybliżeniu sumowane. Oddziaływania adhezyjne zachodzą w warstwie grubości setnych części mikrometra, zaś oddziaływania mechaniczne w warstwie o grubości powyżej dziesiątych części mikrometra. W tym ujęciu wszystkie oddziaływania z zakresu fizyki zjawisk powierzchniowych są w tej pracy określane terminem oddziaływań adhezyjnych. Zachodzą one na poziomie chropowatości określanym tutaj jako  $0$  m t.zn. poniżej zakresu pomiarowego stosowanej w badaniach aparatury. Do analizy wyników zastosowano sformułowaną przez Kragielskiego trójczłonową zależność (2.3):

$$\mu = \frac{\tau_0}{p_r} + k_x + k_l \propto \sqrt{\frac{h}{r}}$$

Pierwsze dwa człony wzoru (2.3) stanowią składową adhezyjną, zaś trzeci składową deformacyjną współczynnika tarcia. Wzór (2.3) przekształcony do postaci zależności siły tarcia od siły normalnej może posłużyć do porównania opisu procesu z opisem za pomocą wzoru Coulomba. Przyjmując z definicji  $\mu = T/N$  i  $p_r = N/S_r$  otrzymujemy:

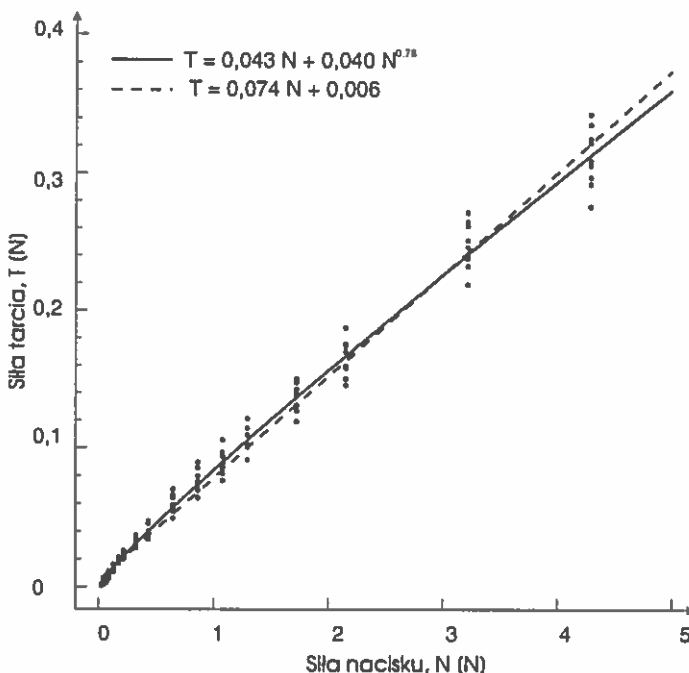
$$T = \tau_0 S_r + N (k_x + k_l \propto \sqrt{\frac{h}{r}}) \quad 2.6$$

W tej postaci pierwszy człon wzoru zależy od rzeczywistej powierzchni kontaktu, a drugi zależy liniowo od siły normalnej. Rzeczywistą powierzchnię kontaktu, zgodnie z wynikami rozdz. 2.2.4 można opisać wzorem Hertza  $S_r = A_1 N^B$ . Po oznaczeniu wyrażenia w nawiasie literą  $a$ , wykładnika  $B$  literą  $c$  i podstawieniu otrzymujemy  $T = \tau_0 A_1 N^c + aN$  oraz przyjmując  $b = \tau_0 A_1$ :

$$T = aN + bN^c$$

2.7

Pierwszy człon wzoru (2.7) jest identyczny z drugim członem wzoru Coulomba (2.2) i dalej będzie nazywany składową deformacyjną siły tarcia. Drugi, zależny potęgowo od siły normalnej jak i w ujęciu Coulomba, uwzględnia „przyciąganie się powierzchni” i będzie nazywany w tym tekście składową adhezyjną siły tarcia. W opisie procesu tarcia wzorem (2.7) dla siły normalnej równej zero nie występuje trudna w interpretacji siła kohezji. Ponadto przy obliczaniu współczynnika tarcia z definicji  $\mu = T/N$  nie otrzymujemy nienaturalnie wysokich wartości  $\mu$  w otoczeniu  $N = 0$ . Na rysunku 2.17 przedstawiono zależności  $T(N)$  dla opisu wyników pomiarów prostą Coulomba i równaniem (2.7). Rysunek przedstawia typowy przebieg wyników na przykładzie tarcia ziarn odmiany Grana o wilgotności 11% o gładką płytkę stalową. Obydwa przybliżenia wykazują wysoką korelację. Z punktu widzenia oceny statystycznej lepszy jest model liniowy, gdyż wprowadzenie nieliniowości komplikuje równanie nie poprawiając przy tym dopasowania równania modelu do wyników eksperymentu. Na wykresach ilustrujących wyniki można jednak zaobserwować, że w zakresie niewielkich nacisków prosta mocno odstaje od wyników pomiarów, podczas gdy krzywa (2.7) pokrywa się z przebiegiem punktów eksperymentalnych. Model krzywoliniowy bardziej wiernie opisuje wyniki eksperymentu niż model Coulomba.



Rys. 2.17. Wyniki pomiarów siły tarcia  $T$  w zależności od siły nacisku  $N$  oraz dopasowane linie:  $T = \mu N + C$  i  $T = aN + bN^c$

W celu zbadania wpływu wilgotności ziarna i chropowatości powierzchni poślizgu na parametry modelu krzywoliniowego zastosowano analizę regresji krzywoliniowej w odniesieniu do wyników pomiarów. Znalezione parametry modelu wraz z ocenami statystycznymi przedstawiono w tabeli 9. Wartości współczynnika determinacji  $R^2$  modelu krzywoliniowego są wyższe niż wartości kwadratu współczynnika korelacji  $R$ , uzyskane dla liniowego modelu Coulomba.

Analiza wariancji parametrów modelu wykazuje istotny przyrost parametrów  $a$  i  $b$  ze wzrostem chropowatości płytki. Szczególnie szybki jest przyrost tych parametrów w zakresie  $R_t$  0  $\mu\text{m}$  do 1  $\mu\text{m}$ . Parametr  $c$  rośnie istotnie z przyrostem  $R_t$  w zakresie

Tabela 9. Parametry modelu  $T = aN + bN^c$  obliczone metodą regresji krzywoliniowej w przypadku tarcia ziarna pszenicy odmiany Grana o powierzchnię stalową

| $R_t$ [ $\mu\text{m}$ ] | Wilg. z. [%] | Parametry modelu |             |           | Wspól. $R^2$ [%] |
|-------------------------|--------------|------------------|-------------|-----------|------------------|
|                         |              | $a$              | $b$         | $c$       |                  |
| < 0,5                   | 8            | -0,002±0,450     | 0,095±0,450 | 0,92±0,36 | 99,3             |
|                         | 11           | 0,044±0,034      | 0,040±0,035 | 0,78±0,21 | 99,4             |
|                         | 13           | 0,050±0,060      | 0,370±0,061 | 0,75±0,45 | 97,2             |
|                         | 15           | 0,044±0,030      | 0,026±0,031 | 0,71±0,37 | 98,0             |
|                         | 18           | 0,085±0,030      | 0,041±0,031 | 0,68±0,27 | 98,9             |
| 1,0                     | 8            | 0,104±0,464      | 0,104±0,464 | 0,91±0,40 | 99,7             |
|                         | 11           | -0,440±1,663     | 0,268±1,663 | 0,95±0,32 | 99,7             |
|                         | 13           | 0,109±0,293      | 0,115±0,293 | 0,89±0,29 | 99,7             |
|                         | 15           | 0,104±1,784      | 0,110±1,784 | 1,04±0,75 | 99,6             |
|                         | 18           | 0,105±31,80      | 0,128±31,80 | 1,01±3,34 | 98,5             |
| 1,8                     | 8            | 0,180±4,260      | 0,120±4,260 | 1,04±1,30 | 99,5             |
|                         | 11           | 0,080±2,760      | 0,290±2,760 | 0,93±0,71 | 98,4             |
|                         | 13           | 0,240±0,140      | 0,040±0,140 | 1,22±0,63 | 99,7             |
|                         | 15           | -0,170±0,960     | 0,510±0,950 | 0,92±0,15 | 99,7             |
|                         | 18           | 0,055±1,850      | 0,320±1,85  | 1,06±0,34 | 99,6             |
| 6,4                     | 8            | 0,296±0,950      | 0,208±0,950 | 1,14±0,57 | 99,1             |
|                         | 11           | 0,232±45,40      | 0,292±45,40 | 1,02±2,70 | 98,7             |
|                         | 13           | 0,370±0,960      | 0,163±0,960 | 1,16±0,89 | 98,5             |
|                         | 15           | 0,116±0,890      | 0,466±0,890 | 0,87±0,26 | 99,1             |
|                         | 18           | 0,322±2,810      | 0,206±2,820 | 1,06±0,82 | 99,5             |
| 11,0                    | 8            | 0,102±0,970      | 0,138±0,970 | 1,10±0,68 | 98,7             |
|                         | 11           | 0,179±0,085      | 0,088±0,085 | 1,50±0,37 | 98,3             |
|                         | 13           | 0,100±0,270      | 0,192±0,270 | 1,25±0,31 | 98,6             |
|                         | 15           | 0,186±0,126      | 0,108±0,123 | 1,42±0,36 | 98,4             |
|                         | 18           | 0,219±0,061      | 0,069±0,056 | 1,65±0,33 | 98,6             |

0–1  $\mu\text{m}$ , powyżej  $R_t = 1 \mu\text{m}$  nie zmienia się istotnie. Taki przyrost  $c$  z przyrostem wysokości nierówności pozostaje w zgodzie z wynikami badań Kragielskiego [31], który stwierdził, że wykładnik wzoru Hertza rośnie ze wzrostem stopnia skomplikowania kształtu nierówności kontaktujących się powierzchni. Taki charakter przyrostu pola powierzchni kontaktu przenosiłby się na zmiany siły tarcia. W badaniach Kragielskiego wykładnik równania zawierał się w przedziale 0,66 do 0,92.

W opisywanym eksperymencie wykładnik  $c$  w wyrażeniu potęgowym przyjmuje wartości od 0,65 ( blisko wyliczeń Hertza) do 1,65. Zmiana wartości  $c$  oznacza zmianę kształtu przebiegu od wypukłego ( $c < 1$ ), poprzez prostoliniowy ( $c = 1$ ), do wklęsłego ( $c > 1$ ). Przy opisie procesu modelem Coulomba ta zmiana kształtu krzywej  $T(N)$  przejawiała się zmianą znaku kohezji  $C$ . Dla wysokości nierówności  $R_t = 0 \mu\text{m}$  wartości  $C$  były dodatnie, przy  $R_t = 1 \mu\text{m}$  i wilgotnościach 15 i 18% pojawiły się ujemne wartości  $C$ , zaś powyżej  $R_t = 1 \mu\text{m}$  większość wyliczonych wartości  $C$  była mniejsza od zera. Należy sądzić, że przyczyną zmiany kształtu krzywej  $T(N)$  jest zmiana oddziaływań na obszarze kontaktu. W przypadku powierzchni gładkich decydujące znaczenie mają oddziaływania adhezyjne, których wielkość zależy od rzeczywistej powierzchni kontaktu. W tym zakresie chropowatości ( $R_t \leq 1$ ) wykładnik  $c$  jest bliski wartościom otrzymanym w pomiarach rzeczywistej powierzchni kontaktu (tabela 1), a wartości kohezji  $C$  w opisie Coulomba są większe od zera (tabele 4 i 5); z przyrostem siły normalnej siła tarcia rośnie wolniej niż liniowo (krzywa wypukła). Przyrost chropowatości powyżej  $R_t = 1 \mu\text{m}$  jest związany z rosnącym udziałem oddziaływań kształtowych i skrawania, a przyrost siły tarcia z rosnącą siłą normalną jest szybszy niż liniowy ( krzywa wklęsła). Wartość  $c$  rośnie z przyrostem chropowatości płytki dla wszystkich badanych poziomów wilgotności.

Współczynniki determinacji w tabeli 9 są wysokie, jednak wartości parametrów modelu obciążone są dużymi błędami standardowymi. Ponadto niewielkie zmiany wartości parametrów początkowych estymacji powodowały uzyskiwanie różnych zestawów parametrów bez zmiany jakości dopasowania modelu. Mamy tu do czynienia z sytuacją którą Linhart i Zucchini określają terminem „przepasowania” (*overfitting*) [35]. W takiej sytuacji przyjęcie stałej wartości jednego z parametrów poprawia stabilność modelu. W przypadku pomiarów na gładkiej płytce przyjęcie stałej wartości wykładnika  $c$  jest ponadto uzasadnione jego związkami ze składową adhezyjną, a zatem z powierzchnią kontaktu. Oszacowane wartości wykładnika wzoru Hertza (tab. 3) mieszczą się w zakresie od 0,72 do 0,78, zależnie od wilgotności ziarna. Stąd do dalszych obliczeń przyjęto pośrednią wartość z tego przedziału  $c = 0,75$ .

Jedynie w przypadku tarcia ziarna o gładką płytkę można siłę tarcia rozdzielić na składowe adhezyjną i mechaniczną. Przy większym skomplikowaniu kształtu kontaktujących się nierówności oddziaływania adhezyjne zachodzą w wielu, losowo roz-

mieszczonych w przestrzeni mikroobszarach kontaktu i aproksymacja wyników pomiarów oddaje tylko uśrednioną wartość tych oddziaływań. W przypadku powierzchni gładkich można rozdzielić składowe i wyliczyć wartości stałych a i b.

Do dopasowania modelu zastosowano metodę regresji wielokrotnej. Test Studenta wykazał, że we wszystkich wariantach eksperymentu istotny jest wkład obu czynników dwumianu w całkowitą sumę kwadratów. Wyliczone parametry równania zestawiono w tabeli 10. Tabela zawiera również wartości ilorazu b/a wyrażające stosunek składowej adhezyjnej siły tarcia do składowej deformacyjnej.

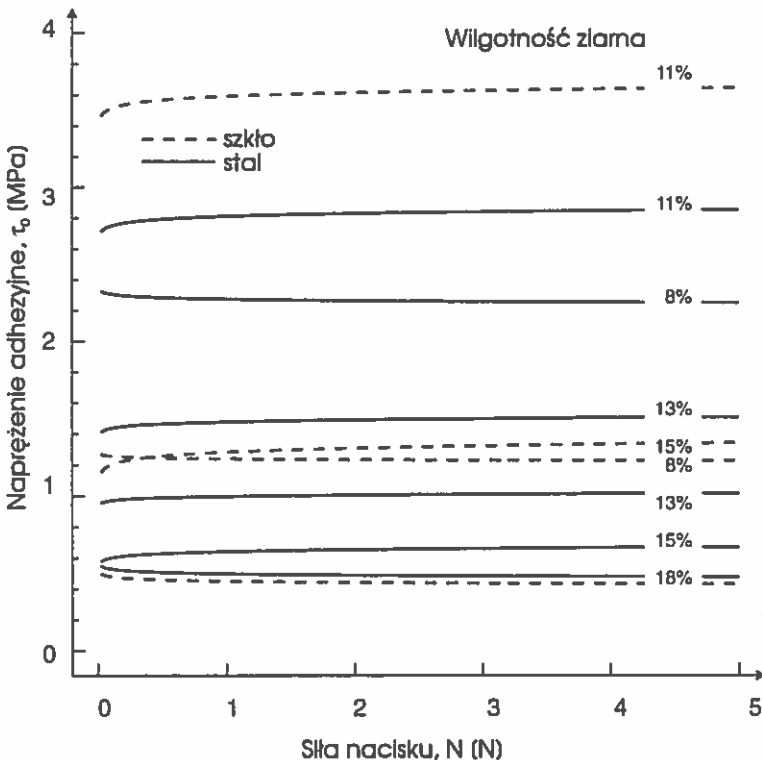
Tabela 10. Parametry modelu  $T = aN + bN^{0,75}$  obliczone metodą regresji wielokrotnej w przypadku tarcia ziarna pszenicy odmiany Grana o gładkie powierzchnie: szklaną i stalową

| Powierzchnia szklana |                  |              |      |                       |
|----------------------|------------------|--------------|------|-----------------------|
| Wilg. ziarna [%]     | Parametry modelu |              |      | Wspól. det. $R^2$ [%] |
|                      | a                | b            | b/a  |                       |
| 8                    | 0,103±0,0084     | 0,018±0,0108 | 0,18 | 98,6                  |
| 11                   | 0,084±0,0113     | 0,046±0,0144 | 0,55 | 97,0                  |
| 13                   | 0,098±0,0039     | 0,025±0,0050 | 0,26 | 99,7                  |
| 15                   | 0,092±0,0101     | 0,060±0,0129 | 0,65 | 98,2                  |
| 18                   | 0,120±0,0183     | 0,047±0,0236 | 0,39 | 95,5                  |
| Powierzchnia stalowa |                  |              |      |                       |
| 8                    | 0,064±0,0058     | 0,033±0,0074 | 0,52 | 98,6                  |
| 11                   | 0,048±0,0031     | 0,036±0,0040 | 0,75 | 99,5                  |
| 13                   | 0,050±0,0071     | 0,037±0,0092 | 0,74 | 97,2                  |
| 15                   | 0,041±0,0050     | 0,030±0,0064 | 0,75 | 98,0                  |
| 18                   | 0,075±0,0066     | 0,052±0,0085 | 0,69 | 98,9                  |

Otrzymane z obliczeń wartości ilorazu b/a są bliskie podawanym w literaturze [30] wartościom dla polietylenu czy teflonu (b/a). W przypadku metali iloraz b/a osiągał wartość 100 dla metali twardych i wartości niższe dla metali miękkich. Iloraz b/a jest na wszystkich badanych poziomach wilgotności wyższy dla płytki stalowej niż dla szklanej. Przy założeniu, że powierzchnia kontaktu jest równa w obu przypadkach stwierdzić można, że jednostkowy opór adhezyjny na stali jest wyższy niż na szkło.

Biorąc pod uwagę, że składowa adhezyjna siły tarcia wyraża się wzorem  $T_a = \tau_0 S$ , a pole powierzchni kontaktu zostało oszacowane eksperymentalnie, możliwe jest wyliczenie wartości oporu jednostkowego więzi adhezyjnej:  $\tau_0 = bN^{0,75}/AN^B$ . Przebiegi tak obliczonych zależności przedstawiono na rys. 2.18. Wynika z nich, że opór więzi adhezyjnej nie zależy od nacisku i wynosi około 1 N/mm<sup>2</sup>. Widoczna jest również tendencja zmniejszania wartości oporu adhezyjnego z przyrostem wilgotności.

Wyniki przeprowadzonych doświadczeń pozwalają podjąć próbę objaśnienia niektórych zaobserwowanych efektów w ujęciu teorii. Stwierdzono wyższe wartości powierzchni kontaktu pod równym naciskiem dla ziarna mączystego niż dla ziarna szklanego i równocześnie wyższe wartości siły tarcia ziarna mączystego. Szybszy przyrost powierzchni kontaktu ziarna mączystego wynika z większej odkształcalności (niższej wartości modułu Younga [21, 22, 26]). W wyniku wzrostu rzeczywistej powierzchni kontaktu nastąpił przyrost składowej adhezyjnej siły tarcia, wyrażanej we wzorze (2.6) iloczynem  $\tau_0 S_r$ . W obu badanych typach struktury zaobserwowano wyższe wartości siły tarcia po zmyciu kutyny z powierzchni ziarniaków. Należy wnioskować, że zabieg plukania spowodował wzrost wartości oporu więzi adhezyjnej  $\tau_0$  po zmniejszeniu lub zupełnym usunięciu warstwy kutyny. Kutyna jest substancją podobną do wosku [55], o stosunkowo słabo powiązanych cząsteczkach i bliższe – bez pośrednictwa kutyny – oddziaływanie ziarna z powierzchnią szklaną tworzy wiązanie silniejsze. Najniższe wartości siły tarcia zaobserwowano w przypadku ziarna szklanego z kutyną, a więc wtedy gdy najmniejszej powierzchni kontaktu towarzyszy najsłabszy opór na ścinanie więzi adhezyjnej.



Rys. 2.18. Zależność oporu więzi adhezyjnej  $\tau_0$  od siły nacisku  $N$  przy pięciu poziomach wilgotności ziarna pszenicy odmiana Grana



Na decydujące znaczenie stanu chemicznego i mikrotopografii powierzchni zwracali uwagę Procter i Barton w swoich badaniach tarcia pary ziarn mineralów (kwarc i szpat polny), kulek szklanych i stalowych. Parametry te, trudne do zmierzenia i opisanie na obszarze kontaktu, powodowały znaczny rozrzut wyników pomiarów utrudniając ich interpretację [44]. Przedstawiony tu opis mechanizmu tarcia pozostaje w zgodzie z interpretacją Buckleya [5], który stwierdza, że z przyrostem nacisku normalnego w obszarach rzeczywistego kontaktu powstają najpierw deformacje sprężyste, a następnie plastyczne. Stan równowagi ustala się, gdy powierzchnia kontaktu jest wystarczająco duża dla przeniesienia obciążenia. Siła tarcia jest związana z powierzchnią rzeczywistego kontaktu t.zn. im wyższa powierzchnia kontaktu, tym większy opór na ścinanie danej pary ciernej. Siły tarcia między powierzchniami ciał stałych zależą od stanu chemicznego i fizycznego kontaktujących się powierzchni. Wpływa na nie również skład atmosfery otoczenia, ponieważ błony powierzchniowe mogą istotnie zmieniać właściwości adhezyjne materiału.

## 2.4 Dyskusja wyników

Tarcie materiałów roślinnych jest przedmiotem rosnącego zainteresowania inżynierii rolniczej, a zainteresowanie badaczy skupiło się na określeniu parametrów tarcia dla potrzeb technologii konstrukcji [ 13, 32, 37, 54]. Rozpoznanie zjawisk składowych procesu tarcia jest centralnym zagadnieniem trybologii. Badania tej dziedziny wiedzy zaowocowały bogatą literaturą dotyczącą również tarcia w mikroskali obszaru rzeczywistego kontaktu [5, 9, 19, 30, 43, 64, 68]. Trybologia skoncentrowana jest na badaniu materiałów konstrukcyjnych, takich jak metale czy polimery, a materiały roślinne pozostawały na marginesie jej zainteresowania. Niniejsza praca w części dotyczącej aspektów technologicznych tarcia ziarna zbóż znajduje odniesienia w literaturze inżynierii rolniczej, zaś w zakresie prób poszukiwania źródeł zjawiska – w literaturze trybologii mechanicznej.

Chropowatość powierzchni poślizgu jest uznawana za ważny parametr tarcia ziarna [8, 46, 54], nie prowadzono jednak systematycznych badań wpływu chropowatości na siłę tarcia.

W przeprowadzonych pomiarach stwierdzono znaczny przyrost współczynnika tarcia z rosnącą chropowatością szklanej i stalowej powierzchni poślizgu, w zakresie 8–18% wilgotności ziarna. Poziom chropowatości wpływa na względny udział składowych adhezyjnej i deformacyjnej. Można tu wyróżnić trzy charakterystyczne zakresy wysokości nierówności:

1. Powierzchnia optycznie gładka (poniżej dolnego zakresu pomiarowego mikroskopu do pomiaru chropowatości  $R_1 = 0,5 \mu\text{m}$ ). Decydujący wpływ na siłę tarcia mają oddziaływania adhezyjne.

2. Wysokość nierówności w zakresie od 0,5  $\mu\text{m}$  do ok. 10  $\mu\text{m}$  – ze wzrostem chropowatości powierzchni poślizgu rośnie udział składowej deformacyjnej. Składowa deformacyjna wynika z wzajemnego poślizgu nierówności powierzchni oraz występującego równocześnie skrawania powierzchni ziarniaka przez twarde nierówności powierzchni poślizgu.

3. Powyżej wysokości nierówności ok. 10  $\mu\text{m}$  skrawanie przeważa nad pozostałymi oddziaływaniami i siła tarcia pozostaje praktycznie niezależna od chropowatości.

Uznając konieczność uwzględnienia wpływu chropowatości Komitet Standaryzacyjny DIN wyróżnił trzy kategorie współczynnika tarcia o ściany silosów [51]:  $\mu_1$  – powierzchnia bardzo chropowata (n.p. silos z blachy falistej),  $\mu_2$  – średnia chropowatość,  $\mu_3$  – powierzchnia bardzo gładka (n.p. metale, powierzchnie tworzyw sztucznych). Jest to klasyfikacja bardzo ogólna, daje jednak wyniki obliczeń znacznie bliższe rzeczywistości niż jedna wartość katalogowa. Analiza wyników pomiarów z rozdz. 2.2.5.2 i 2.2.6.1 wykazała wysoki przyrost współczynnika tarcia (w sensie Coulomba) ze wzrostem chropowatości powierzchni poślizgu od gładkiego szkła ( $\mu = 0,117$ ) do chropowatości szkła  $R_t = 12,4 \mu\text{m}$  ( $u = 0,702$ , wilgotność ziarna równa 11%). Znacznie mniejsze były zmiany wartości  $\mu$  w zakresie wysokości nierówności  $R_t$  od 12 do 110  $\mu\text{m}$ . Na powierzchni kontaktu ziarn z powierzchnią trącą obserwowano ślady ścierania okrywy owocowo nasiennej. Nie występowały one jedynie w przypadku gładkiej płytki szklanej. Można więc stwierdzić, że o maksymalnej wartości współczynnika tarcia decyduje wytrzymałość okrywy owocowo-nasiennej na ścinanie. W ujęciu teorii molekularno-mechanicznej mówi się o wytrzymałości na ścinanie słabszego materiału pary ciernej [30]. W opinii różnych autorów jednym z najważniejszych czynników modyfikujących siłę tarcia jest wilgotność ziarna. W większości prac stwierdzono przyrost współczynnika tarcia z rosnącą wilgotnością ziarna [2, 4, 7, 12, 46, 54, 57, 67]. Wyniki niektórych prac wskazują jednak odchylenia od tendencji ciągłego przyrostu. Obserwuje się: przyspieszenie szybkości przyrostu współczynnika tarcia po przekroczeniu ok. 13% wilgotności ziarna [4, 57], minimalną wartość współczynnika dla 15% wilgotności ziarna [33], maksymalną wartość współczynnika tarcia [61], czy brak wpływu wilgotności ziarna na wartość współczynnika tarcia [18]. Niespójność wyników ma swe źródło w zróżnicowaniu warunków eksperymentu, metod pomiarowych, cech fizycznych ziarna i materiałów trących.

Wilgotność ziarna wpływa na warunki w obszarze kontaktu w sposób złożony. Ze wzrostem wilgotności maleje pozorny moduł sprężystości ziarna [29] i równocześnie zwiększa się ilość wody słabo związanej w komórkach warstwy owocowo-nasiennej. Charakterystycznym punktem wilgotności ziarniaka zmieniającym jego właściwości cierne powinna być wilgotność równoważna.

Dla ziarna pszenicy przy wilgotności powietrza w zakresie 40–60% i temperaturze 20°C wynosi ona od 10,7% do 13,1% . Przy wilgotności 14–15%, nazywanej wilgotnością krytyczną, następuje silny wzrost intensywności oddychania ziarna; pojawia się wolna woda ( słabo, lub zupełnie nie związana z koloidami ziarna) [66]. W pomiarach tarcia w zależności od wilgotności ziarna istotnie zaobserwowano, że do wilgotności ok. 13% współczynnik tarcia jest stały, a powyżej tej wilgotności wykazuje tendencję rosnącą. Niektórzy badacze zaobserwowali zmiany stanu powierzchni poślizgu w czasie pomiarów wpływające na wielkość współczynnika tarcia. Stwierdzono, że są one wynikiem działania kutyny znajdującej się na powierzchni ziarna [49, 54, 60]. W niniejszej pracy badano równocześnie wpływ kutyny i typu struktury wewnętrznej ziarna (szkliste – mączyste) na współczynnik tarcia. W obu typach struktury usunięcie kutyny spowodowało przyrost współczynnika tarcia. Wartości  $\mu$  ziarn szklis-tych były wyższe niż w przypadku ziarn mączystych (tab. 2).

Wyniki eksperymentalne opublikowanych prac wskazują na zróżnicowanie współczynników tarcia różnych zbóż [7, 32, 37 54]. Nie uwzględniano w badaniach zróżnicowania odmianowego, gdyż jest to czynnik mało istotny z punktu widzenia technologii. W przeprowadzonym eksperymencie analizowano wpływ odmiany pszenicy i miejsca jej uprawy na właściwości cierne ziarna. Nie stwierdzono różnic współczynnika tarcia ziarna tych samych odmian pochodzących z różnych Stacji Doświadczalnych Oceny Odmian. Wystąpiły natomiast istotne różnice współczynnika tarcia pomiędzy odmianami. Można zatem przyjąć, że właściwości cierne ziarna są związane raczej z cechami genetycznymi niż z warunkami agroekologicznymi wegetacji. Podsumowując stwierdzić można, że siła tarcia ziarna pszenicy zależy przede wszystkim od chropowatości powierzchni poślizgu i wilgotności ziarna, jest jednak istotnie modyfikowana przez inne czynniki, w tym: cechy odmianowe i budowę wewnętrzną ziarna.

W zakresie badań rzeczywistej powierzchni kontaktu nie znaleziono bezpośrednich odniesień wyników tej pracy w piśmiennictwie dotyczącym materiałów roślinnych. Uzyskane wyniki są jednak zgodne z ogólnymi ustaleniami trybologii [5, 19, 30, 31, 34, 43, 55]. Wzór Hertza  $S = AN^B$ , stosowany w trybologii do opisu zależności powierzchni rzeczywistego kontaktu, okazał się odpowiedni również w przypadku ziarna pszenicy. Wartości wykładnika B otrzymane w niniejszej pracy (tab. 3) są bliskie zalecanej przez Kragielskiego [31], w przypadku kontaktu powierzchni o skomplikowanym kształcie, wartości  $B = 0,82$  .

Wyniki pomiarów powierzchni kontaktu ziarna z gładką płytą, w zakresie wilgotności ziarna 8–18%, pozwoliły wyliczyć wartości naprężenia stycznego  $\tau = T/S$ . Ustalono, że naprężenie styczne szybko przyrasta w zakresie najniższych obciążeń, a po osiągnięciu wartości siły normalnej ok. 1 N (zależnej od wilgotności), stabilizuje się. Należy wnosić, że powierzchnia kontaktu przyrasta początkowo wskutek odkształ-

ciania mikronierówności okrywy owocowo-nasiennej; z dalszym przyrostem obciążenia następuje odkształcanie wnętrza ziarna. Tłumaczy to nieliniowość zależności  $T(N)$  w dolnym zakresie nacisku.

Stwierdzono ponadto, że prawo tarcia Coulomba  $T = \mu N + C$  jest wystarczająco dokładnym opisem procesu z punktu widzenia zastosowań praktycznych. Opis równaniem teorii molekularno-mechanicznej  $T = aN + bN^c$  jest jednak bliższy przebiegowi rzeczywistego procesu. Pozwala uwzględnić zmienną nieliniowość przebiegu z rosnącą chropowatością powierzchni poślizgu oraz nieliniowość przebiegu w zakresie niskich obciążeń. Postulowany przez teorię [30] rozkład siły tarcia na składowe: adhezyjną i deformacyjną wnosi możliwość fizycznej interpretacji procesu. Uzyskany w niniejszych badaniach stosunek składowych jest porównywalny z podawanym w literaturze [30] dla materiałów konstrukcyjnych o niewielkim module sprężystości (miękkie polimery). Proponuje się, by w przypadkach gdzie opis Coulomba nie jest wystarczająco dokładny stosować równanie teorii molekularno-mechanicznej  $T = aN + bN^c$ .

## 2.5 Wnioski

1. Zastosowanie nowych, w zakresie tarcia zewnętrznego, metod eksperymentalnych pozwoliło otrzymać wyniki spójne z dotychczasową wiedzą i dało możliwość pogłębionego spojrzenia na następujące zależności:

- wpływu rzeczywistej powierzchni kontaktu ziarna z płaską powierzchnią na wartości współczynnika tarcia i kohezji;
- wpływu chropowatości okrywy owocowo-nasiennej ziarna na wartość współczynnika tarcia;
- wpływu struktury wewnętrznej ziarna na pole powierzchni kontaktu i siłę tarcia;
- wpływu wilgotności ziarna na pole powierzchni kontaktu i siłę tarcia ziarna;
- wpływu odmiany ziarna i miejsca uprawy na chropowatość okrywy nasiennej, i dalej, na siłę tarcia ziarna.

2. Obie metody pomiaru siły tarcia, pary ziarn i warstwy ziarna, dają porównywalne wyniki.

3. Uzyskano następujące informacje ważne z punktu widzenia zastosowań praktycznych:

- chropowatość powierzchni poślizgu najsilniej spośród badanych czynników wpływa na wartość współczynnika tarcia;
- współczynnik tarcia na ogół rośnie z przyrostem wilgotności, zwłaszcza po przekroczeniu wilgotności równoważnej ziarna;
- na powierzchniach gładkich ( $R_t < 1 \mu\text{m}$ ), gdzie większy jest udział składowej adhezyjnej oporu tarcia) powinien być uwzględniany wpływ czynników modyfikujących

właściwości powierzchniowe obszaru kontaktu np. droga tarcia, obecność kutyny, zanieczyszczenia, utlenianie;

- współczynnik tarcia zależy od rodzaju materiału powierzchni poślizgu;
- czynniki biologiczne takie jak: odmiana ziarna, powierzchniowa warstwa kutyny i struktura wewnętrzna ziarna istotnie wpływają na współczynnik tarcia.

4. Stwierdzono, że zależność pola powierzchni kontaktu pojedynczego ziarna z płaską, gładką płytą od siły nacisku normalnego jest poprawnie opisywana wzorem Herta dla wszystkich badanych zakresów wilgotności. Zaobserwowano dwie charakterystyczne fazy przyrostu powierzchni kontaktu ziarna z gładką płaszczyzną. Do osiągnięcia pewnej (ok. 1,5 N, dla suchego ziarna) siły nacisku powierzchnia kontaktu przyrasta w następstwie odkształcania nierówności okrywy nasiennej ziarna. Po przekroczeniu granicznej siły nacisku następuje deformacja wnętrza ziarna decydująca o dalszym przyroście powierzchni kontaktu.

5. Badania potwierdziły hipotezę, że prawo tarcia Coulomba wyrażone równaniem  $T = \mu N + C$  jest wystarczająco dokładnym modelem procesu z punktu widzenia standardowych obliczeń konstrukcyjnych.

6. Stwierdzono, że wyjaśnienia źródeł oporu tarcia należy poszukiwać na najniższym poziomie oddziaływań t.zn. przez rozpoznanie zjawisk zachodzących na elementarnym obszarze kontaktu. Działa tu wiele pozornie mało znaczących czynników, których udział łatwo przeoczyć w planowaniu eksperymentu. Aby uzyskać powtarzalne wyniki pomiarów siły tarcia należy zachować szczególną staranność w doborze i opisie warunków eksperymentu.

7. Z punktu widzenia wierności rzeczywistości przebiegowi procesu i udziału w nim zjawisk elementarnych teoria tarcia w ujęciu Kragielskiego daje dokładniejszy opis procesu tarcia ziarna pszenicy niż prawo tarcia Coulomba. Dotyczy to zwłaszcza zakresu niskich obciążeń, gdzie w ujęciu Coulomba występowała trudność interpretacji kohezji. W świetle przeprowadzonych badań uzasadnione i użyteczne dla interpretacji jest również rozdzielenie oporu tarcia na składowe: adhezyjną i deformacyjną, zwłaszcza w przypadku tarcia o gładką powierzchnię.

## 2.6 Literatura

1. Balassy Z., Horabik J., Molenda M.: *On friction properties of wheat grain*, Zeszyty Problemowe PNR, z. 378, 1989, str. 11-19.
2. Balassy Z.: *On friction properties of corn crops*, Sbornik '85 mechanizacni fakulty VSZ v Praze, 1985, pp. 27-32.
3. Bowden F.P., Tabor D.: *Wprowadzenie do trybologii*, Warszawa: WNT 1980.
4. Brubaker J.E., Pos J.: *Determining static coefficients of friction of grains on structural surfaces*, Transactions of the ASAE, vol 1, 1965, pp. 53-55.

5. Buckley D.H.: *Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication*, Amsterdam–Oxford–New York: Elsevier Scientific Publishing Company 1981.
6. Bucklin R.A., Thompson S.A., Ross I.J., Biggs R.H.: *Apparent coefficient of friction of wheat on bin wall material*, Transactions of the ASAE, vol. 5, 1989, pp. 1769-1773.
7. Canadian Farm Building Code. National Research Council of Canada, Ottawa 1977.
8. Cyrus P.: *Tribometer for measuring the friction coefficient of grain during the shearing on sliding support plate*, Sbornik '85 mechanizacní fakulty VSZ v Praze, 1985, pp. 17-23.
9. Drozdow J.N., Pawlow W.G., Puczkow W.N.: *Trieńie i iznos w ekstremalnych usłowiach*, Moskwa: Maszinoostrojenie 1986.
10. Ducho P., Lobotka J., Zahorsky J.: *Friction coefficient in lucerne and maize at way – milky maturity in motion*, Acta technologica agriculturae, Nitra 1967, pp. 93-105.
11. Fiala J.: *Treni zemedelskych materialu*, Zemedelska technika, nr 4, 1965, str. 205-220.
12. Frontczak J., Metzger T.: *The studies on the slip angle geometrical features of corn grain in the moisture function*, Sbornik '85 mechanizacní fakulty VSZ v Praze, 1985, pp. 225-238.
13. Grochowicz J.: *Maszyny do czyszczenia i sortowania nasion*, Warszawa: PWRiL 1971.
14. Grochowicz M., Grundas S., Molenda M.: *Urządzenie do pomiaru siły tarcia zewnętrznego materiałów sypkich, zwłaszcza ziarna zbóż*, Patent UP PRL nr 120183, Warszawa, 1983.
15. Grochowicz M., Grundas S., Molenda M.: *A device for the investigation of the external friction of a grain medium*, Proc. of the 2nd Intern. Conf. "Physical properties of agricultural materials", Godollo, Hungary, 1980, nr 12.
16. Grzesiuk S., Kulka K.: *Fizjologia i biochemia nasion*, Warszawa: PWRiL 1981.
17. Haman J.: *Rheological properties of cereals and their theoretical interpretation*, Zeszyty Problemowe PNR, z. 203, 1978, str. 107-122.
18. Hanzelik F., Keleman P., Tomovcik J.: *Deformation and friction of wheat grains*, Acta technologica agriculturae, Nitra 1968, pp. 30-42.
19. Hebda M., Wachal A.: *Trybologia*, Warszawa: PWN 1980.
20. Hendrick J.G., Bailey A.C.: *Determining components of soil – metal sliding resistance*, Transactions of the ASAE, 1982, pp. 845-849.
21. Hnilica P., Velikanov L.P., Grundas S.: *Distribuce hustoty a rentgenograficka studie lomu endospermu pšenice*, Zemedelska Technika, nr 8, Praha 1989, str. 471-484.
22. Hnilica P., Grundas S.: *Mereni dynamickeho Youngova modulu endospermu obili*, Zemedelska Technika, nr 3, Praha 1983, str. 65-80.
23. Horabik J., Molenda M.: *The true contact area between wheat grain and flat surface*, Zeszyty Problemowe PNR, z. 378, 1989 str. 63-68.
24. Horabik J., Molenda M.: *Force and contact area of wheat grain in friction*, J. agric. Engng Res. vol. 41, 1988, pp. 33-41.
25. Jaszczericyn P.I., Skorynin J.W.: *Robotosposobnost uzłow trienia maszin*, Minsk: Nauka i ticchnika 1984.
26. Katz R., Cardwell A.B., Collins N.D., Hostetter A.E.: *A new grain hardness tester*, Cereal Chemistry vol. 5, 1959, str. 393-401.
27. Kendall M.G., Buckland W.R.: *Słownik terminów statystycznych*, Warszawa: PWE 1986.
28. Kolowca J., Šlipek Z.: *The influence of glassiness on the mechanical resistance of wheat grain*, Zeszyty Problemowe PNR, z.203, 1878, str. 41-44.
29. Koper R.: *Determination of the mechanical properties of wheat grain by means of holographic interferometry*, Proc. of II. Int. Conf. „Physical prop. of agric. materials”, Gödöllő, Hungary, 1980, nr 107.
30. Kragielskij I.W., Dobyczin M.N., Kombalow W.S.: *Osnowy rasczetow na trienie i iznos*, Moskwa: Maszinoostrojenie 1977.

31. Kragielskij I.W., Lankow A.A.: *O primienimosti formul Gierca dla razczeta konturnoj ploszczadi. O prirodie trienija twiordych tiel*, Mińsk: Nauka i tiechnika, 1971. str. 307-315.
32. Kutzbach H.D., Scherer R.: *Das Reibverhalten von Kornerfruchten – Eine Schriftrumsübersicht*, Grundl. Landtechnik nr 6, 1977, str. 213-219.
33. Lawton P.J.: *Coefficients of friction between cereal grain and various silo wall materials*, J. agric. Engng Res. vol. 25, 1980, pp. 75-86.
34. Leszek W., Zwierzycki W.: *Współczesna interpretacja pojęć tarciowych i zużyciowych*, Trybologia nr 2, 1987, str. 4-7.
35. Linhart H., Zucchini W.: *Model selection*, New York: John Wiley and Sons 1986.
36. Lobotka J.: *Koeficienty trenia rezanej hmoty krmovin*, Zemedelska technika nr 13, 1967, str. 81-93.
37. Mohsenin N.N.: *Physical properties of plant and animal materials*, New York-London-Paris: Gordon and Breach Science Publishers 1978.
38. Molenda M.: *A method of determining friction coefficients of wheat grains on metal surfaces*, Zeszyty Problemowe PNR z.304, 1985, pp. 139-145.
39. Molenda M.: *Pomiar siły tarcia zewnętrznego warstwy ziarna pszenicy i pojedynczych ziarniaków o powierzchnię metalową*, Zeszyty Problemowe PNR, z.320, 1987, str. 159-168.
40. Molenda M.: *Identyfikacja elementarnych mechanizmów tarcia ziarna pszenicy*, Praca doktorska. Instytut Agrofizyki PAN. Lublin 1991.
41. Moore D.W., White G.M., Ross I.J.: *Friction of wheat on corrugated metal surfaces*, Transactions of the ASAE vol. 6, 1984, pp. 1842-1847.
42. Moysey E.B., Hiltz Shanc: *Friction properties of fertilizers*, Canadian Agricultural Engineering, nr 2, 1985, str. 79-83.
43. *O prirodie trienija twiordych tiel*, Praca zbiorowa, Mińsk: Nauka i tiechnika 1971.
44. Procter D.C., Barton R.R.: *Measurements of the angle of interparticle friction*, Geotechnique, nr 4, 1974, pp 581-604.
45. Rademacher F.J.C.: *Accurate measurement of the kinetic coefficient of friction between a surface and a granular mass*, Powder Technology, vol. 19, 1978, pp. 65-77.
46. Ralczew A., Barow W.: *Nowyj pribor dla opredelenija koeficienta wniesznozo trenija*, Problemy obrabotki poczwy, Sofia 1970, str. 169-177.
47. Richter D.W.: *Friction coefficients of some agricultural materials*, Agricultural Engineering, June 1954, pp. 411-413.
48. Scherer R., Kutzbach H.D.: *Mechanische Eigenschaften von Kornerfruchten*, Grundlagen Landtechnik nr 1, 1978, str. 6-12.
49. Schwab C.V.: *Grain pressure phenomenon in a circular flat bottom bin*, Praca doktorska, Uniwersytet Kentucky, Lexington 1989.
50. Schwedes J.: *Evolution of bulk solids technology since 1974*, Bulk Solids Handling, vol. 3, 1983, pp. 143-148.
51. Schwedes J.: *Influence of wall friction on silo design in process and structural engineering*, German Chemical Engineering, vol. 8, 1985, pp. 31-138.
52. Sharma V.K., Drew L.O., Nelson G.L.: *High frequency vibrational effects on soil – metal friction*, Transactions of the ASAE, 1977, pp. 46-51.
53. Singh Divgir, Moysey E.B.: *Grain bin wall pressures: Theoretical and experimental*, Canadian Agricultural Engineering vol. 1, 1985, pp. 43-48.
54. Sitkei G.: *Mechanics of agricultural materials*, Budapeszt: Akademiai Kiado 1986.
55. Snyder L.H., Roller W.L., Hall G.E.: *Coefficients of kinetic friction of wheat on various metal surfaces*, Transactions of the ASAE, vol. 3, 1967, pp. 411-419.
56. Solski P., Ziemia S.: *Zagadnienia tarcia suchego*, Warszawa: PWN 1965.

57. Stewart B.R., Hossain Q.A., Kunze O.R.: *Friction coefficients of sorghum grain on steel, teflon and concrete surfaces*, Transactions of the ASAE, vol. 4, 1969, pp. 415-418.
58. *Storage of cereal grains and their products*, Praca zbiorowa. St. Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists Inc. 1982.
59. Szot B.: *Metodyczne aspekty oceny cech fizycznych ziarna pszenicy*, Roczniki Nauk Rolniczych, seria D, tom 160. Warszawa: PWN 1976.
60. Szot B., Horabik J., Molenda M.: *The effect of the spatial orientation of cereal grain in bulk on its mechanical behaviour*, Sbornik '85 mechanizacni fakulty VSZ v Praze, 1985, pp. 873-878.
61. Thompson S.A., Ross I.J.: *Compressibility and frictional coefficients of wheat*, Transactions of the ASAE, vol. 4, 1983, pp. 1171-1180.
62. Thompson S.A., Ross I.J.: *Compressibility and frictional coefficient of wheat*, Transactions of the ASAE, 26(4), 1171-1176, 1983.
63. Thompson S.A., Bucklin R.A., Batich C.D., Ross I.J.: *Variation in the apparent coefficient of friction of wheat on galvanized steel*, Transactions of the ASAE, 31(5), 1518-1524, 1988.
64. *Teorija trienia i iznosa*, Praca zbiorowa. Moskwa: Nauka 1965.
65. Timoshenko S.P., Goodier J.N.: *Theory of elasticity*, Tokio: Kogakusha Company Ltd., 1970.
66. Tomczyk S.: *Magazyny ziarna i innych nasion*, Warszawa: PWRiL 1970.
67. Tsang-Mui-Chung M., Verma L. Lalit, Wright M.E.: *A device for friction measurement of grains*, Transactions of the ASAE, vol. 4, 1984, pp. 1938-1944.
68. Visser J.: *Adhesion of colloidal particles*, Surface and colloid science. New York: John Wiley and Sons 1976.
69. Woźniak W.: *Wpływ czynników agrofizycznych na zmienność porowatości masy ziarna*, Zeszyty Proble-mowe PNR , z. 316, 1987, str. 257-276.
70. Zhang Q., Puri V.M., Manbeck H.B.: *Model for frictional behaviour of wheat on structural materials*, Transactions of the ASAE, vol. 3, 1988, pp. 898-903.



# FRICION OF WHEAT GRAIN

## SUMMARY

All phases of particulate material industry, namely, storage, handling and processing are operations that require precise knowledge of the behaviour of the material to achieve the desired control. External and internal friction of particulate material greatly influence its mechanical behaviour. A lot of work was done on agricultural grain since 1960's. This work summarizes the methods and results of these studies and presents the results of the author's own experiments. It was divided into two parts: 1. Internal friction and 2. External friction. Own studies for the first section were performed using direct shearing box and triaxial compression chamber which dimensions were enlarged to regard the size of cereal grain. Density, moisture content of grain and its spatial orientation were taken into account as the most important factors for internal friction. All of them were found to influence significantly the angle of internal friction of grain. For the external friction section own method of measurements was applied. Friction coefficient was measured for a pair of wheat grains sliding against a steel or glass plate sandwiched between them. The true contact area of grain with a flat glass surface was measured with microscope photography in reflected light. The relations between tangential force and normal force on the one hand and the true contact area versus normal force on the other were obtained and examined. Parameters taken into account were: grain moisture content, type of endosperm, cutin cover, variety, location of cultivation, and roughness of sliding surface and that of grain itself. All these factors were found to influence significantly obtained frictional characteristics.

The obtained results pointed out to the fact that both internal and external friction of cereal grain depend on a number of factors which caused unexplained scatter of experimental results, and in a greater part of theoretical works were left out of account.

