

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

ACTA AGROPHYSICA

64

Józef Łukaszuk, Józef Horabik

**WYZNACZANIE
KĄTA TARCIA WEWNĘTRZNEGO
ROŚLINNYCH MATERIAŁÓW SYPKICH**

Monografia

Lublin 2002

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny - prof. dr hab. Jan Gliński, czł. rzeczn. PAN

Z-cy Redaktora Naczelnego:

prof. dr hab. Ryszard T. Walczak, czł. koresp. PAN - fizyka środowiska

prof. dr hab. Bogusław Szot - fizyka materiałów roślinnych

prof. dr hab. Ryszard Dębicki - gleboznawstwo

Rada Redakcyjna

prof. dr hab. J. Haman, czł. rzeczn. PAN - przewodniczący

prof. dr hab. T. Brandyk

prof. dr hab. J. Laskowski

prof. dr hab. I. Dechnik

prof. dr hab. P.P. Lewicki

prof. dr hab. D. Drozd

prof. dr hab. S. Nawrocki, czł. rzeczn. PAN

prof. dr hab. F. Dubert

prof. dr hab. E. Niedźwiecki

prof. dr hab. J. Fornal

prof. dr hab. J. Sielewiesiuk

prof. dr hab. E. Kamiński

prof. dr hab. W. Stępniewski

prof. dr hab. A. Kędziora

prof. dr hab. Z. Ślipek

prof. dr hab. T. Kęsik

prof. dr hab. S. Zawadzki, czł. rzeczn. PAN

prof. dr hab. Cz. Koźmiński

Redaktor tomu

dr inż. Józef Łukaszuk

Opiniowała do druku

prof. dr hab. Krystyna Konstankiewicz

Adres redakcji

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201

20-290 Lublin 27, tel. (0-81) 744-50-61, e-mail: editor@demeter.ipan.lublin.pl

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

Publikacja indeksowana przez

Polish Scientific Journals Contents - Agric. & Biol. Sci. w sieci Internet

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

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2002

Publikację wykonano częściowo w ramach projektu badawczego 5 PO6F 021 17 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 1999-2002

ISSN 1234 - 4125

Wydanie I. Nakład 120 egz. Ark. wyd. 7,3

Skład komputerowy: dr Wanda Woźniak

Druk: Zakład Usług Poligraficznych TEKST s.c., ul. Wspólna 19, 20-344 Lublin

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIAJSZYCH OZNACZEŃ	5
1. WSTĘP	7
2. PRZEGLĄD LITERATURY	9
2.1. Właściwości materiałów sypkich	9
2.1.1. Gęstość	9
2.1.2. Porowatość	10
2.1.3. Tarcie	12
2.2. Charakterystyki mechaniczne	15
2.2.1. Naprężenie i odkształcenie.....	16
2.2.2. Model ciała idealnie plastycznego	18
2.2.3. Model plastyczności ze wzmocnieniem i osłabieniem gęstościowym	20
2.3. Metody doświadczalne	21
2.3.1. Przegląd metod i aparatury do pomiaru kąta tarcia wewnętrznego	22
2.3.2. Procedury wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego	26
2.3.3. Lokalizacja deformacji postaciowej	28
2.4. Czynniki wpływające na kąt tarcia wewnętrznego roślinnych materiałów sypkich	29
3. ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH	31
4. ANALIZA PROCESÓW POWSTAWANIA WARSTWY ŚCINANIA W TESTACH TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA I BEZPOŚREDNIEGO ŚCINANIA	32
4.1. Metoda i materiał.....	32
4.1.1. Test trójosiowego ściskania	32
4.1.2. Test bezpośredniego ścinania.....	36
4.2. Parametry swobodnie uformowanej warstwy ścinania	38
4.3. Ocena jakościowa powstawania warstwy ścinania w teście bezpośredniego ścinania	43
4.4. Wpływ wymiarów próbki i ziarna ośrodka na sposób wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego	45
5. POMIARY KĄTA TARCIA WEWNĘTRZNEGO	47
5.1. Metoda i materiał	48
5.1.1. Pomiar kąta tarcia wewnętrznego metodą trójosiowego ściskania	48

5.1.2. Kompensacja wpływu zmian pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki na kąt tarcia wewnętrznego wyznaczany w teście trójosiowego ściskania.....	52
5.1.3. Pomiary kąta tarcia wewnętrznego metodą bezpośredniego ścinania.....	53
5.2. Wpływ gęstości i wilgotności materiału na kąt tarcia wewnętrznego wyznaczany metodą trójosiowego ściskania	54
5.3. Wpływ zmian pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki trójosiowego ściskania na wynik pomiaru kąta tarcia wewnętrznego.....	70
5.4. Wpływ wilgotności materiału na kąt tarcia wewnętrznego wyznaczany metodą bezpośredniego ścinania	75
5.5. Propozycja dostosowania metody bezpośredniego ścinania do pomiaru kąta tarcia wewnętrznego roślinnych materiałów sypkich w poszerzonym zakresie wilgotności	82
6. PODSUMOWANIE	83
7. PIŚMIENNICTWO.....	88
8. STRESZCZENIE	94
9. SUMMARY	94

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- A – pole powierzchni przekroju poprzecznego [m^2];
 c – kohezja [kPa];
 D – średnica próbki [m];
 d – średni wymiar ziarna ośrodka [m];
 F – siła normalna [N];
 H – wysokość próbki [m];
 h – głębokość wnikania [m];
 i – indeks płynięcia;
 k – iloraz naporu poziomego do pionowego;
 k_x – współczynnik przyrostu więzi adhezyjnej ze wzrostem nacisku;
 k_1 – współczynnik zależny od rodzaju deformacji;
 M – moment obrotowy [Nm];
 n – liczba nasion;
 P – porowatość [%];
 p_r – naprężenie normalne na powierzchni kontaktu [MPa];
 r – promień krzywizny nierówności [m];
 r_w – promień wewnętrzny [m];
 r_z – promień zewnętrzny [m];
 T – siła styczna [N];
 u_ξ – przemieszczenie styczne [m];
 u_η – przemieszczenie normalne [m];
 du_ξ/d_η – gradient przemieszczenia stycznego wzdłuż kierunku prostopadłego do kierunku warstwy ścinania;
 v – prędkość [m/s];
 V – objętość [m^3];
 V_0 – objętość początkowa [m^3];
 α – kąt pochylenia osi warstwy ścinania [deg];
 α_i – współczynnik strat histerezy;
 δ – efektywny kąt tarcia wewnętrznego [deg];
 ε_1 – odkształcenie względne;
 ε_v – odkształcenie objętościowe;
 φ – kąt tarcia wewnętrznego [deg];
 φ_1 – kąt tarcia wewnętrznego rozpoczynającego się płynięcia [deg];
 φ_{st} – kąt tarcia wewnętrznego ustalonego płynięcia [deg];
 γ – odkształcenie postaciowe;

μ – współczynnik tarcia;

μ_a – składowa więzi adhezyjnej współczynnika tarcia;

μ_d – składowa więzi deformacyjnej współczynnika tarcia;

ρ - gęstość [kg/m^3];

ρ_k – gęstość krytyczna [kg/m^3];

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – naprężenia główne [MPa];

σ_n – naprężenie normalne [MPa];

τ – naprężenie styczne [MPa].

1. WSTĘP

Rolnictwo i przemysł spożywczy to obok przemysłu chemicznego i farmaceutycznego najwięksi producenci i przetwórcy materiałów sypkich. Jedną z większych grup materiałów sypkich w rolnictwie stanowi ziarno zbóż i nasiona roślin oleistych. Zboża i rośliny oleiste należą do najważniejszych roślin uprawianych rolniczo w skali światowej, europejskiej i polskiej. W Polsce produkuje się rocznie około 27 mln ton zboża, co stanowi około 1,3% produkcji światowej [3, 80]. Wartość żywieniowa ziarna zbóż i nasion roślin oleistych zależy od ich składu chemicznego [31]. W większości przypadków zboże jest surowcem wyjściowym do produkcji żywności i podlega dalszemu przetwarzaniu w wielu złożonych procesach technologicznych. Rosnące zapotrzebowanie na produkty żywnościowe o najwyższej jakości wymusza na producentach stosowanie takich procesów technologicznych, które w możliwie najmniejszym stopniu obniżają wartość biologiczną nasion i tym samym gwarantują wysoką jakość i opłacalność produkcji.

Materiał sypki jest układem trójfazowym - ziarna ośrodka tworzą szkielet, którego pory wypełnione są gazem lub cieczą (najczęściej powietrze i woda). Ziarno zbóż, ze specyficznymi właściwościami fizycznymi charakterystycznymi dla grupy materiałów pochodzenia roślinnego, jest typowym przykładem materiału sypkiego. W tym przypadku szkielet tworzą ziarna zbóż lub nasiona roślin, a woda na ogół nie wypełnia porów, lecz związana jest z nasionami siłami cząsteczkowymi.

Cykliczny charakter produkcji roślinnej powoduje, że zachodzi konieczność magazynowania nasion, dla których właściwy dobór warunków przechowywania wciąż stwarza wiele problemów. Podczas magazynowania materiału dużą rolę odgrywają takie jego właściwości, jak: higroskopijność, gęstość, ściśliwość, wytrzymałość mechaniczna, współczynnik tarcia, kohezja i iloraz naporu. Wpływają one zarówno na jakość magazynowanego materiału jak i na bezpieczeństwo i ekonomikę wykonywanych operacji technologicznych.

Przemieszczanie, suszenie, czyszczenie, sortowanie i magazynowanie to etapy, w których mogą wystąpić straty ilościowe i jakościowe nasion. Należy pamiętać, że są to organizmy żywe, w których zachodzą złożone procesy biochemiczne [23]. W normalnych warunkach nasiona znajdują się w równowadze biologicznej, a procesy w nich zachodzące są znacznie spowolnione. Zmiana warunków zewnętrznych, wywołana głównie wzrostem wilgotności i temperatury, intensyfikuje te procesy i istotnie wpływa na właściwości materiału.

Najczęściej powtarzaną operacją jest transport i przemieszczanie, często dużych mas materiału (przenośniki, zsypy, załadunek oraz opróżnianie zbiorników i silosów). Przepływ tych materiałów ma najczęściej charakter dynamiczny. Reologiczne własności roślinnych materiałów sypkich komplikują próby opisu przebiegu rzeczywistych procesów z ich udziałem i powodują, że wiele z nich pozostaje nadal niewyjaśnionych.

Kąt tarcia wewnętrznego jest podstawowym parametrem mechanicznym ośrodka sypkiego wykorzystywanym m.in. przy projektowaniu konstrukcji zbiorników i silosów. Zależy on zarówno od cech pojedynczych nasion, jak i od struktury geometrycznej ośrodka. Podstawowe cechy nasion to: chropowatość powierzchni, kształt i wymiary oraz zdolność do odkształceń. Są one modyfikowane przez przynależność gatunkową i odmianę, a przede wszystkim przez wilgotność. Struktura geometryczna zależy od wzajemnego położenia nasion w ośrodku - czyli orientacji, oraz od gęstości upakowania.

Materiały sypkie pochodzenia roślinnego cechuje duża rozpiętość wartości parametrów mechanicznych oraz ich zmienność w czasie. Wywołane jest to zróżnicowaniem właściwości fizycznych samych nasion oraz wpływem czynników zewnętrznych. Wyrażnie utrudnia to wyznaczanie takich parametrów jak kąt tarcia wewnętrznego. Podstawowy problem, wiążący się z dokładnością wyników pomiarów, stanowi długa droga dochodzenia tych materiałów do granicznego stanu naprężeń. Spowodowane jest to rosnącą wraz z wilgotnością odkształcalnością nasion, co sprawia, że nie jest możliwe automatyczne przeniesienie dobrze poznanych i sprawdzonych metod badawczych dla innych materiałów (np. budowlanych) i wykorzystanie ich w pomiarach materiałów roślinnych.

Wyniki badań prowadzonych w skali modelowej oraz na obiektach o naturalnej wielkości wskazują, że napór materiałów sypkich na konstrukcje silosów może w pewnych warunkach znacznie przewyższać wartości przewidywane przez stosowne normy budowlane. Przyjmowanie na „wzrost” współczynników gwarantujących bezpieczeństwo tych konstrukcji wiąże się z ponoszeniem zwiększonych nakładów inwestycyjnych. Optymalizacja procesów technologicznych wymaga więc prowadzenia ciągłych prac badawczych zmierzających do pełniejszego poznania właściwości roślinnych materiałów sypkich. Ścisły związek mają z tym prace związane z doskonaleniem metod wyznaczania parametrów mechanicznych tych materiałów.

1. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. Właściwości materiałów sypkich

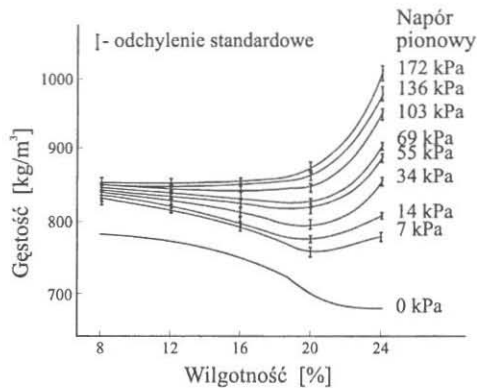
2.1.1. Gęstość

Miarą gęstości luźnej warstwy materiału sypkiego jest gęstość w stanie usypnym. Pomiar polega na określeniu masy materiału nasypanego swobodnie do cylindrycznego pojemnika o stałej objętości - zwykle 0,25 lub 1 dm³ wg. ściśle określonej procedury [12, 68, 69]. Gęstość złoża materiału sypkiego zależy od wielu czynników, spośród których najistotniejszymi są: właściwości poszczególnych nasion, ilość zanieczyszczeń, napór, wilgotność oraz sposób napełniania.

Inną miarą gęstości materiału sypkiego jest gęstość w stanie utrzęsonym. Dostarcza ona informacji o podatności materiału na zagęszczanie w warunkach wstrząsów. Pomiar, zgodnie z normą, polega na doprowadzeniu znanej masy materiału do najmniejszej objętości poprzez zastosowanie drgań o stałej amplitudzie i częstotliwości [68]. Gęstość utrzęsona ziarna zbóż jest większa od gęstości w stanie usypnym nawet o około 30 - 40% [94].

Gęstość materiału sypkiego jest nieliniową, monotonicznie rosnącą funkcją naporu. Do opisu tej zależności najczęściej stosowana jest funkcja potęgowa, wykładnicza bądź logarytmiczna [26]. Wilgotność wpływa na gęstość materiału. Z jej wzrostem rośnie odkształcalność nasion. Rośnie także ich objętość wywołana pęcznieniem. W konsekwencji prowadzi to do spadku gęstości właściwej materiału. Skutkiem tego ze wzrostem wilgotności maleje również gęstość w stanie usypnym.

Thompson i Ross [97] analizowali zależność gęstości złoża ziarna pszenicy klasy soft red winter od naporu oraz wilgotności (Rys. 1). Krzywa oznaczona na tym rysunku 0 kPa ilustruje omawiany wcześniej spadek gęstości usypnej ze wzrostem wilgotności. Autorzy stwierdzili, że w zakresie wilgotności ziarna od 8 do 12% połowa zmiany gęstości pochodziła od reorientacji ziarniaków, a połowa od ich sprężystej deformacji. Wzrost wilgotności powodował wzrost udziału deformacji ziarniaków w zmianie gęstości ośrodka. Przy wilgotności ziarna wynoszącej 24% udział deformacji ziarniaków stanowił około 70% zmian gęstości. Dla naporu poniżej 100 kPa autorzy stwierdzili istnienie wyraźnego minimum gęstości dla wilgotności w zakresie 20 do 24%. Wraz ze wzrostem naporu minimum to nieznacznie przesunęło się w stronę niższych wilgotności (Rys. 1). Autorzy zaproponowali nieliniową funkcję empiryczną opisującą zależność gęstości od naporu i wilgotności. Podobnego typu empiryczną zależność znaleźli Clower i in. [11] dla złoża ziarna kukurydzy.



Rys. 1. Zależność gęstości złoża ziarna pszenicy od wilgotności i naporu [97].

Fig.1. The bulk density of wheat as a function of moisture content and pressure [97].

2.1.2. Porowatość

Z gęstością materiału sypkiego ściśle związana jest porowatość. Czynniki wpływające na zmienność gęstości wpływają również na zmienność porowatości. Porowatość określana jest stosunkiem objętości przestrzeni między nasionami do całkowitej objętości ośrodka:

$$P = \frac{V - V_z}{V} \quad (1)$$

gdzie: V – całkowita objętość ośrodka,
 V_z – objętość nasion.

Porowatość można również wyznaczyć wykorzystując gęstość właściwą i gęstość w stanie usypnym materiału:

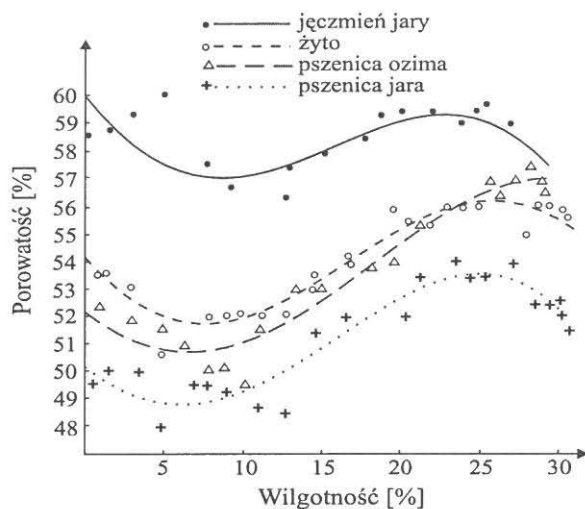
$$P = \frac{\rho - \rho_v}{\rho} \quad (2)$$

gdzie: ρ – gęstość właściwa materiału,
 ρ_v – gęstość w stanie usypnym.

Nasiona o wyrównanej wielkości i szorstkiej powierzchni mają większą porowatość. [37, 50]. Z tego względu porowatość ziarna pszenicy wynosząca około 50% jest większa niż porowatość nasion rzepaku wynosząca około 40%. Przy wilgotności 12% średnia porowatość warstwy ziarna pszenicy ozimej wynosi

52%, jarej - 49%, jęczmienia jarego – 60%, żyta – 53% [102]. Zależność porowatości warstwy ziarna od wilgotności jest nieliniowa. W przedziale wilgotności 0 do 10% maleje, następnie w przedziale 10 do 25% rośnie, po czym, ze wzrostem wilgotności powyżej 25% ponownie maleje (Rys. 2). Woźniak [102] interpretuje taki charakter zmian porowatości wpływem różnego rodzaju wiązania wody w ziarnie oraz występowaniem charakterystycznych zjawisk powierzchniowych. Dla wilgotności mniejszych od 10% kąt tarcia wewnętrznego jest stały, a wzrost porowatości, w miarę wysuszania ziarna, wynika głównie z powstawania zagłębień i nierówności na powierzchni ziarniaków.

Nawilżanie powyżej wilgotności kondycjonalnej likwiduje wszelkie zagłębienia na powierzchni ziarniaków i wygładza ich powierzchnię. W tym przedziale wilgotności wzrost porowatości ze wzrostem wilgotności wynika głównie ze wzrostu kąta tarcia wewnętrznego oraz sił kohezji. Wzrost sił tarcia i spójności występuje do pewnej granicy ustalającej się przy wilgotności około 26 do 28%. Powyżej tej wilgotności porowatość zaczyna maleć ze względu na inny charakter wiązania wody na powierzchni ziarniaków i dużą ich odkształcalność.



Rys. 2. Porowatość warstwy ziarna zbóż [102].

Fig. 2. Porosity of cereal grains [102].

2.1.3. Tarcie

Tarcie występujące w materiałach sypkich dzieli się umownie na tarcie zewnętrzne i wewnętrzne. Mimo pewnych zastrzeżeń podział ten jest powszechnie akceptowany [95]. Za tarcie zewnętrzne uznaje się tarcie występujące na styku materiału sypkiego i elementów konstrukcyjnych maszyn i urządzeń. Za tarcie wewnętrzne uznaje się tarcie występujące w obrębie jednego ośrodka. Aby możliwy był ruch nasion w ośrodku, w którym występuje określony stan naprężeń, muszą być pokonane opory tarcia i sił spójności między nasionami. Kąt tarcia wewnętrznego wyznacza maksymalną wartość naprężenia stycznego, przy której następuje wyczerpanie wytrzymałości mechanicznej ośrodka i rozpoczyna się plastyczne płynięcie. Kohezja określa maksymalną wartość naprężenia stycznego przenoszonego przez ośrodek przy braku naporu normalnego.

Często wyznaczanym parametrem materiałowym jest kąt naturalnego usypu. Wyraża on graniczną wartość kąta nachylenia zbocza usypanego materiału, której przekroczenie powoduje poślizg [69, 72, 77]. Znajomość wartości kąta naturalnego usypu umożliwia obliczanie pojemności zbiorników i silosów oraz wydajności przenośników transportowych. Dzięki prostocie pomiarowej kąt usypu może, w niektórych przypadkach, służyć do oszacowania kąta tarcia wewnętrznego - chociaż jest od niego nieco wyższy.

Wspólną cechą materiałów sypkich jest znikoma wartość sił spójności. Wynika z tego, że przemieszczają się one stosunkowo łatwo i posiadają zdolność do wypełniania pojemników o różnych kształtach [39, 72]. Uproszczoną miarą sypkości jest kąt naturalnego usypu.

Materiały sypkie pochodzenia roślinnego charakteryzuje „silna zależność właściwości fizycznych od wilgotności, znaczna ściśliwość oraz wzrost wytrzymałości na ścinanie ze wzrostem gęstości. Tę ostatnią cechę można wytłumaczyć zaklinowywaniem się nasion oraz powstawaniem wiązań adhezyjnych w miejscach ich styku. Wiązania te powstają m. in. w wyniku działania sił van der Waalsa i sił walencyjnych pomiędzy cząsteczkami, a także wywołane są występowaniem napięć powierzchniowych oraz warstw adsorbcyjnych w wilgotnym ośrodku [87, 92]. W niektórych przypadkach między nasionami mogą tworzyć się silne wiązania powstałe w wyniku krystalizacji rozpuszczalnych substancji np. soli lub osadzania cząstek koloidalnych. Wszystkie te siły rosną wraz ze wzrostem powierzchni kontaktu i nacisku pomiędzy nasionami. Przy odkształceniu ścinającym wiązania ulegają destrukcji i spójność materiału maleje [62].

Komórkowa budowa materiałów sypkich pochodzenia roślinnego, silna zależność cech od wilgotności oraz ich zmienność w czasie stwarzają wiele trudności przy prowadzeniu badań zjawisk fizycznych zachodzących w tych materiałach.

Materiał sypki może przyjmować, w ograniczonym zakresie, właściwości ciała stałego, cieczy a nawet gazu. Swoj „stan skupienia” może zmieniać pod wpływem nawet niewielkich zmian zewnętrznego obciążenia. Ze wzrostem kąta tarcia wewnętrznego i sił spójności między elementami materiał nabiera cech ciała stałego, natomiast wraz ze zmniejszaniem się kąta tarcia wewnętrznego i sił spójności materiał nabiera cech cieczy. Z kolei podczas fluidyzacji, gdzie własności mechaniczne ośrodka zależą istotnie od prędkości i ciśnienia przepływającego gazu, do opisu zachowania materiału stosuje się teorię ośrodków dwufazowych o zmiennej porowatości [60].

Z kątem tarcia wewnętrznego związany jest iloraz naporu poziomego do pionowego zwany współczynnikiem k lub stałą Janssena. Określa on proporcję pomiędzy naporem w kierunku poziomym i naporem w kierunku pionowym w materiale sypkim zgromadzonym w silosie [82]. W cieczy idealnej iloraz naporu wynosi 1 ponieważ cząsteczki cieczy wywierają jednakowe ciśnienie we wszystkich kierunkach. Im więcej cech ciała stałego posiada ośrodek sypki, czyli im większy jest kąt tarcia wewnętrznego i kohezja, tym mniejszy jest iloraz naporu. W ciele sztywnym wynosi on zero.

Przyjmując dla typowego przypadku magazynowania materiału sypkiego w smukłym zbiorniku, że w złożu materiału panuje czynny stan naprężenia (naprężenie w kierunku pionowym jest większe od naprężenia w kierunku poziomym) oraz, że naprężenia główne są skierowane pionowo i poziomo, iloraz naporu można wyrazić jako funkcję kąta tarcia wewnętrznego [35]:

$$k = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (7)$$

gdzie: σ_1 – napór pionowy (większe naprężenie główne),
 σ_3 – napór poziomy (mniejsze naprężenie główne),
 φ – kąt tarcia wewnętrznego.

Norma Eurocode 1 [19] zaleca wyznaczyć iloraz naporu z uproszczonej zależności:

$$k = 1,1(1 - \sin \varphi) \quad (8)$$

Badania zjawiska tarcia w obszarze elementarnego kontaktu stykających się ciał wskazują, że molekularno - mechaniczny model tarcia sformułowany przez Kragielskiego [45] zastosowany do opisu tarcia w roślinnym materiale sypkim pozwala na poprawną interpretację oddziaływań ciernych [55, 95]. Według tego modelu na elementarnej powierzchni styku wzajemnie przemieszczających się ciał występują opory ruchu wywołane powstawaniem więzi adhezyjnej oraz ścieraniem się mikronierówności powierzchni. Wypadkowy współczynnik tarcia μ pojedynczej nierówności jest sumą dwóch składowych: więzi adhezyjnej μ_a oraz deformacyjnej μ_d :

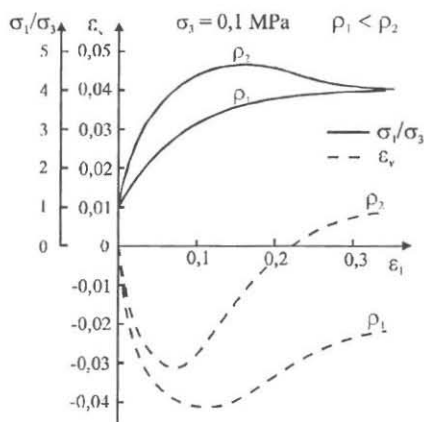
$$\mu = \mu_a + \mu_d = \frac{\tau_0}{p_r} + k_x + k_1 \alpha_i \sqrt{\frac{h}{r}} \quad (12)$$

gdzie: τ_0 – wytrzymałość więzi adhezyjnej na ścinanie,
 p_r – naprężenie normalne na powierzchni kontaktu,
 k_x – współczynnik przyrostu więzi adhezyjnej ze wzrostem nacisku,
 k_1 – współczynnik zależny od rodzaju deformacji,
 α_i – współczynnik strat histerezy,
 h – głębokość wnikania nierówności w płaską powierzchnię,
 r – promień krzywizny nierówności.

Model ten pozwala na poprawną interpretację oddziaływań, których nie można było wyjaśnić na gruncie prostszych modeli ze względu na dwoistą naturę tarcia. Pozwala on przewidzieć między innymi nieliniową zależność współczynnika tarcia od mikrotwardości powierzchni oraz nacisku normalnego. Szczegółowe badania procesu tarcia wykazały, że zastosowany model opisuje poprawnie tarcie materiałów pochodzenia roślinnego o powierzchni konstrukcyjne oraz tarcie wewnętrzne. Pierwszy składnik więzi adhezyjnej, uwzględniający „szczepność” trących powierzchni zależy od rzeczywistej powierzchni kontaktu oraz mikrotwardości powierzchni, nie zależy natomiast od nacisku normalnego. Drugi składnik więzi adhezyjnej jest potęgową funkcją nacisku normalnego. Uwzględnia on wzajemne przyciąganie stykających się powierzchni i zależy od prędkości poślizgu, czasu trwania kontaktu ciernego oraz mikrotwardości powierzchni materiału roślinnego. Natomiast składowa deformacyjna współczynnika tarcia zależy od stałych materiałowych trących powierzchni oraz zawartości wody w materiale roślinnym i jest wprost proporcjonalna do nacisku normalnego.

2.2. Charakterystyki mechaniczne

Swobodnie upakowany materiał sypki podczas testu ścinania zagęszcza się a naprężenie ścinające rośnie do pewnej granicznej wartości odpowiadającej dużym deformacjom postaciowym (Rys. 3). Jeżeli natomiast próbie ścinania poddany jest materiał wstępnie zagęszczony, to po krótkiej fazie dalszego zagęszczania jego gęstość spada do pewnej charakterystycznej gęstości występującej przy ustalonym plastycznym płynięciu. Naprężenie ścinające początkowo gwałtownie rośnie a po osiągnięciu maksymalnej wartości, gdy materiał zaczyna się rozluźniać, maleje do wartości granicznej odpowiadającej zaawansowanemu płynięciu. Graniczna wartość naprężenia ścinającego w warunkach ustalonego płynięcia nie zależy od początkowej gęstości materiału, która podczas ścinania dąży do wartości krytycznej ρ_k .



Rys. 3. Charakterystyki mechaniczne ziarna jęczmienia w teście trójosiowego ściskania [55].

Fig. 3. Mechanical characteristics of barley in the triaxial compression test [55].

Istnienie gęstości krytycznej, przy której zachodzi ustalone plastyczne płynięcie, wykorzystywane jest przy wyznaczaniu kąta tarcia wewnętrznego, zwanego kątem tarcia ustalonego płynięcia φ_{st} . Hesse i Hoffmann [29] wprowadzili bardzo użyteczne pojęcie kąta tarcia wewnętrznego rozpoczynającego się płynięcia φ_i . Reprezentuje ono chwilową wartość kąta tarcia wewnętrznego zależną od wielkości deformacji plastycznej i gęstości.

Ze wzrostem gęstości materiału wzrasta kąt tarcia wewnętrznego φ_i . Kąt φ_i zmienia się w szerokim zakresie, podczas gdy kąt tarcia wewnętrznego ustalonego płynięcia przyjmuje stałą wartość. Wartości kątów φ_i oraz φ_{st} wyznaczone dla ziarna zbóż za pomocą aparatu pierścieniowego przedstawia Tabela 1.

Tabela 1. Kąt tarcia wewnętrznego ustalonego płynięcia φ_{st} oraz kąt tarcia wewnętrznego rozpoczynającego się płynięcia φ_i [27]

Table 1. The angle of internal friction of stationary flow φ_{st} and the angle of initial flow φ_i [27]

Materiał	Kąt tarcia wewnętrznego ustalonego płynięcia φ_{st} [deg]	Kąt tarcia wewnętrznego rozpoczynającego się płynięcia φ_i [deg]
Jęczmień	29-31	23-47
Kukurydza	30	28-40
Owies	26-27	21-39
Pszenica	25-28	20-39
Żyto	28-31	23-43

W przypadku materiału wstępnie silnie zagęszczonego kąt φ_i bardzo szybko osiąga maksimum, a następnie, w miarę rozluźniania się struktury maleje, zmierzając do charakterystycznej dla danego materiału wartości kąta tarcia wewnętrznego ustalonego płynięcia. Jeśli natomiast gęstość początkowa jest mniejsza od gęstości krytycznej, przy której nie zachodzi odkształcenie objętościowe, to w trakcie testu ścinania kąt tarcia wewnętrznego wzrasta monotonicznie do wartości kąta ustalonego płynięcia φ_{st} .

2.2.1. Naprężenie i odkształcenie

Do opisu zachowania się materiałów sypkich powszechnie stosowany jest formalizm mechaniki ośrodków ciągłych. W podejściu tym przyjmuje się, że materia rozłożona jest równomiernie w rozpatrywanym obszarze. Jeżeli założy się, że niejednorodność materiału oraz pory są małe w stosunku do analizowanego obszaru, to z pewnym przybliżeniem można uznać go za ośrodek ciągły. Takie uproszczenie pozwala na operowanie, przy opisie cech mechanicznych tych materiałów, pojęciami naprężenie i odkształcenie – w sensie mechaniki ośrodków ciągłych.

Naprężeniem w danym punkcie pola przekroju elementu jest granica, do której dąży iloraz siły przenoszonej przez ten przekrój i elementu pola, gdy to ostatnie dąży do zera. Wartość naprężenia w dowolnym punkcie przekroju zależy od kierunku przekroju. Wynika z tego, że dla określenia naprężenia należy znać nie tylko jego wartość, kierunek i zwrot ale także kierunek płaszczyzny, na którą działa to naprężenie. Po rozłożeniu siły przenoszonej przez rozpatrywany przekrój na składowe: normalną i styczną - można określić naprężenie normalne,

które jest graniczną wartością stosunku składowej normalnej siły, działającej na nieskończenie mały element przekroju, do pola powierzchni przekroju:

$$\sigma_n = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A} \quad (3)$$

oraz naprężenie styczne, które jest graniczną wartością stosunku składowej stycznej siły, działającej na nieskończenie mały element przekroju, do pola powierzchni przekroju:

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A}, \quad (4)$$

gdzie: N – siła normalna,

T – siła styczna,

A – pole powierzchni przekroju.

W praktyce zamiast punktu rozpatruje się bardzo małą powierzchnię, dla której przyjmuje się stałą wartość naprężenia lub wartość naprężenia zmieniającą się w sposób ciągły [15, 21].

Przez każdy punkt ciała można przeprowadzić trzy wzajemnie prostopadłe płaszczyzny, na których wartość naprężeń stycznych jest równa zero. Płaszczyzny te i naprężenia na nich występujące nazywane są głównymi. W odróżnieniu od mechaniki ciała stałego w mechanice materiałów sypkich naprężenia ściskające przyjmuje się jako dodatnie [21]. Wszystkie składowe naprężenia w danym punkcie określają stan naprężenia w tym punkcie ośrodka.

Wprowadzenie pojęcia odkształcenia oparte jest na tych samych założeniach ciągłości ośrodka jak pojęcie naprężenia. Wydłużeniem nazywamy odkształcenie powstałe w wyniku naprężeń rozciągających, skróceniem - powstałe w wyniku naprężeń ściskających. Odkształcenie nazywa się sprężystym, jeśli zanika całkowicie po usunięciu obciążenia. W przeciwnym przypadku odkształcenie nosi nazwę plastycznego. W przypadku, gdy zmiana odległości dl pomiędzy środkami każdego dwóch sąsiednich i nieskończenie małych elementów objętości ciała ciągłego jest bardzo mała w porównaniu z początkową ich odległością l_0 , stosunek przyrostu dl do odległości początkowej l_0 przyjmuje się jako odkształcenie umowne (względne wydłużenie lub skrócenie):

$$\varepsilon = \frac{dl}{l_0}. \quad (5)$$

Ciała podlegają zarówno odkształceniom objętościowym jak i postaciowym. Odkształcenie objętościowe to względna zmiana objętości ciała, którą w przypadku nieskończenie małych przyrostów można zapisać:

$$\varepsilon_v = \frac{dV}{V_o}, \quad (6)$$

gdzie: dV – przyrost objętości ciała,

V_o – objętość początkowa.

W przypadku bardzo małych odkształceń miarą odkształcenia postaciowego jest zmiana kątów między kierunkami xy , zx i yz podczas deformowania ciała. Istnieją trzy wzajemnie do siebie prostopadłe osie wyznaczające kierunki, w których nie występują odkształcenia postaciowe. Kierunki te noszą nazwę kierunków głównych dla odkształcenia.

2.2.2. Model ciała idealnie plastycznego

Jednym z podstawowych zagadnień występujących w badaniach materiałów sypkich jest wyznaczanie warunku plastyczności, tzw. funkcji materiałowej określającej przejście ze stanu sprężystego lub sztywnego w stan plastyczny. Dopóki stan naprężenia nie osiągnie przyjętego warunku plastyczności to materiał zachowuje się jak ciało sprężyste lub sztywne, zaś z chwilą osiągnięcia stanu granicznego rozpoczyna się niczym nie ograniczona plastyczna deformacja. Początkowo model ten był stosowany tylko do metali. Do materiałów ziarnistych po raz pierwszy zastosowali go Drucker i Prager [16]. W modelu tym pomija się wpływ gęstości materiału i zakłada, że deformacja plastyczna zachodzi przy stałej wartości naprężenia stycznego. Dla dowolnego stanu naprężenia warunek plastyczności można w ogólnej postaci wyrazić jako pewną funkcję stanu naprężenia:

$$f(\sigma_{ij}) = 0. \quad (9)$$

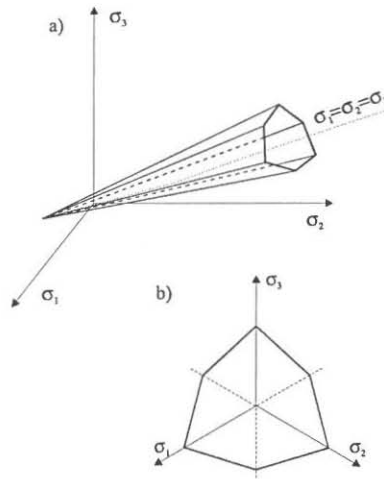
W wielu zagadnieniach, do rozwiązania których stosuje się model ciała idealnie plastycznego, zakłada się dla uproszczenia, że gęstość w obszarze ścinania jest stała. Przyjęcie tego modelu dla stanów na linii krytycznej lub stanów maksimum w obszarze rozluźniania prowadzi do sztywnego zachowania się materiału w każdym innym stanie. Przy pomocy tego modelu niemożliwy jest więc opis odkształceń objętościowych materiału sypkiego towarzyszących ścinaniu. Pomimo tych ograniczeń model ciała idealnie plastycznego - ze względu na to, że jest matematycznie znacznie prostszy niż model ze wzmocnieniem i osłabieniem - może być stosowany w wielu inżynierskich zagadnieniach np. przy określaniu parć w zbiornikach [15].

Do opisu reakcji materiałów sypkich na obciążenia mechaniczne bardzo często stosowany jest warunek plastyczności Coulomba-Mohra, zgodnie z którym o wytrzymałości na ścinanie decyduje tylko relacja pomiędzy największym i najmniejszym naprężeniem głównym. Warunek plastyczności Coulomba-Mohra wyrażony poprzez naprężenia główne można zapisać jako układ sześciu równań, z których dwa pierwsze mają postać:

$$\begin{aligned}\sigma_1 - \sigma_2 &= (\sigma_1 + \sigma_2)\sin\varphi + 2c\cos\varphi, \\ \sigma_2 - \sigma_3 &= (\sigma_2 + \sigma_3)\sin\varphi + 2c\cos\varphi,\end{aligned}\quad (10)$$

gdzie: φ – kąt tarcia wewnętrznego,
 c – kohezja.

W przestrzeni naprężeń głównych warunek plastyczności Coulomba-Mohra ma kształt ostrosłupa o potrójnej symetrii osiowej, którego oś pokrywa się z osią naprężeń izotropowych (Rys. 4a). Przekrój płaszczyzną oktaedryczną jest sześciokątem (Rys. 4b).



Rys. 4. Warunek plastyczności Coulomba-Mohra w przestrzeni naprężeń głównych.
Fig. 4. Coulomb-Mohr failure surface in the principal stresses space.

W przypadku dwuwymiarowym [15, 24] warunek plastyczności Coulomba-Mohra wygodniej jest zapisać w postaci:

$$\tau = \sigma_n \tan\varphi + c, \quad (11)$$

gdzie: τ – naprężenie ścinające,
 σ_n – naprężenie normalne.

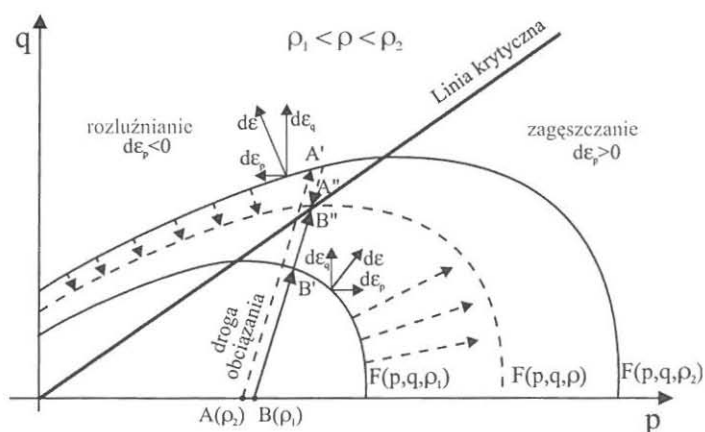
Związek (11) oznacza, że z chwilą wyczerpania wytrzymałości mechanicznej ośrodka, naprężenie styczne τ pokonuje opory wynikające z tarcia wewnętrznego reprezentowanego przez kąt tarcia wewnętrznego φ i kohezję c . Warunek plastyczności Coulomba-Mohra znajduje zastosowanie zarówno do wyznaczania stanów ustalonego płynięcia, jak również stanów odpowiadających maksymalnej wytrzymałości.

2.2.3. Model plastyczności ze wzmocnieniem i osłabieniem gęstościowym

Jednym z modeli matematycznych, opisujących cechy materiałów sypkich jest model plastyczności ze wzmocnieniem i osłabieniem gęstościowym [79]. Zgodnie z tym modelem warunek plastyczności jest funkcją nie tylko stanu naprężenia ale również pewnego parametru związanego z powstałymi w materiale odkształceniami plastycznymi. Jest to parametr wzmocnienia. Jedną z możliwości jest założenie, że parametrem tym jest aktualna gęstość materiału jednoznacznie związana z odkształceniem objętościowym. Założenie to potwierdzają doświadczenia wykazujące, że wzmocnieniu lub osłabieniu materiału towarzyszy zmiana gęstości [15]. Zamiast gęstości jako parametr wzmocnienia może być stosowana również porowatość materiału. Największy wkład w rozwój modelu materiału sypkiego ze wzmocnieniem i osłabieniem wniósł Roscoe [78]. W modelu tym dla poszczególnych gęstości ρ (Rys. 5) otrzymujemy na płaszczyźnie (p, q) krzywe uplastycznienia oddzielające stany plastyczne materiału od stanów sprężystych. Ponieważ większej gęstości odpowiada większa wytrzymałość, więc warunek plastyczności jest monotonicznie rosnącą funkcją gęstości. Dla ustalonej gęstości ρ warunek plastyczności przedstawia w przestrzeni naprężeń zamkniętą, obrotową powierzchnię, w przypadku materiału bezkohezyjnego przechodzącą przez początek układu współrzędnych, której osią symetrii jest oś naprężenia izotropowego. W ogólności warunek plastyczności dla materiału ze wzmocnieniem można zapisać jako związek pomiędzy składowymi stanu naprężenia, którego parametrem jest gęstość:

$$f(\sigma_{ij}, \rho) = 0. \quad (13)$$

Na Rys. 5 linia krytyczna oddziela obszar zagęszczania, w którym odkształceniom plastycznym towarzyszy wzrost gęstości ρ , a więc rozszerzanie się powierzchni plastyczności, od obszaru rozluźniania, gdzie odkształceniom postaciowym towarzyszy rozluźnianie materiału, zmniejszanie się gęstości ρ i w efekcie, kurczenie się powierzchni plastyczności.



Rys. 5. Model ośrodka sypkiego ze wzmocnieniem gęstościowym.

Fig. 5. Model of granular material with density hardening.

Dla wartości naprężenia mniejszej od granicznej materiał zachowuje się jak ciało sztywne. Następnie deformacja postaciowa zachodzi przy rosnącym lub malejącym naprężeniu zależnie od tego czy $\rho < \rho_k$, czy też $\rho > \rho_k$. Dla gęstości próbki $\rho = \rho_k$ materiał zachowuje się jak ciało idealnie plastyczne i taki stan naprężenia określany jest jako krytyczny stan naprężenia, a odpowiadająca temu stanowi gęstość ρ_k jako gęstość krytyczna. Linia krytyczna reprezentuje stan naprężenia w materiale powodujący plastyczne odkształcenie bez zmian gęstości - odpowiada więc ustalonemu plastycznemu płynięciu. Powyższy model obejmuje wzmocnienie ($\rho < \rho_k$), osłabienie ($\rho > \rho_k$) bądź nieograniczone plastyczne płynięcie w krytycznym stanie naprężenia.

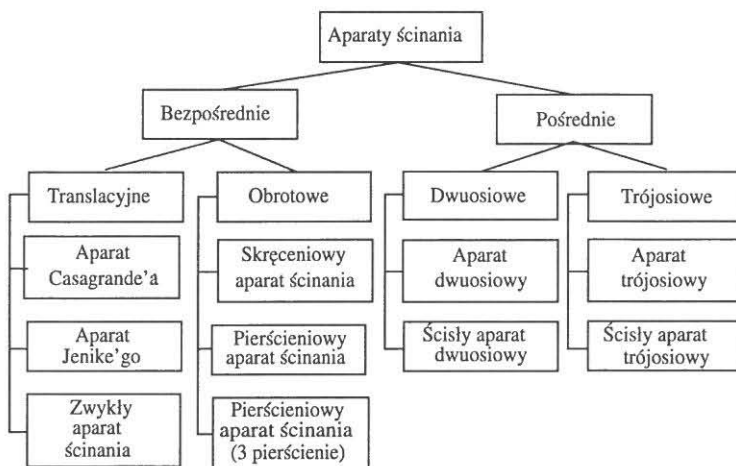
2.3. Metody doświadczalne

Badania doświadczalne pozwalające określić plastyczno-sprężyste własności materiałów sypkich można podzielić na dwie podstawowe grupy. Do pierwszej zalicza się badania prowadzone na próbkach wykonanych z materiałów sypkich. Pozwalają one uzyskać bezpośrednie informacje o własnościach materiału, jego cechach plastycznych i sprężystych i ich wzajemnym powiązaniu. Do drugiej grupy zalicza się doświadczenia, w których o własnościach materiału można się dowiedzieć w sposób pośredni poprzez porównanie wyników badań z wynikami uzyskanymi z rozwiązania pewnego teoretycznego zagadnienia opartego na założeniach o własnościach materiału.

Wyniki badań otrzymane z doświadczeń prowadzonych na próbkach materiału obarczone są różnego rodzaju błędami. Wynikają one z niedoskonałości metod badawczych jak również z idealizacji warunków doświadczenia. Z inżynierskiego punktu widzenia o przydatności określonego modelu matematycznego materiału decyduje jedynie możliwość jego sprawdzenia w konkretnym zadaniu. Obie grupy doświadczeń należy uznać za wzajemnie uzupełniające się [59, 100].

2.3.1. Przegląd metod i aparatury do pomiaru kąta tarcia wewnętrznego

Dotychczas opracowano wiele metod pomiarowych i skonstruowano wiele aparatów, zwanych aparatami ścinania, które zastosowano w badaniach właściwości mechanicznych materiałów sypkich (Rys. 6). Ogólnie aparaty te dzieli się na aparaty bezpośredniego i pośredniego ścinania. Zróżnicowanie konstrukcyjne nadaje indywidualne cechy tym aparatom i umożliwia wybór odpowiedniej metody badawczej w zależności od przyjętego programu badań. W aparatach bezpośredniego ścinania płaszczyzna ścinania wymuszona jest poślizgiem obu części aparatu względem siebie, natomiast w aparatach pośredniego ścinania strefa ta formuje się swobodnie w zależności od właściwości ośrodka i przykładanej kombinacji obciążeń zewnętrznych. Kierunki naprężeń głównych w aparatach bezpośrednich podlegają obrotowi przy przejściu od stanu konsolidacji do stanu ścinania, podczas gdy w aparatach pośrednich są one ustalone i stałe w czasie badania. Aparaty bezpośredniego ścinania dzieli się na aparaty translacyjne i obrotowe.



Rys. 6. Klasyfikacja aparatów ścinania [43].

Fig. 6. Classification of shear testers [43].

W Tabeli 2 przedstawiono charakterystyczne cechy poszczególnych aparatów według oceny Schwedesa [86]. Wynika z niej, że nie ma uniwersalnej metody ścinania materiałów sypkich. Metodę należy dobrać stosownie do rozważanego zagadnienia.

Tabela 2. Porównanie aparatów ścinania [43]

Table 2. Comparison of shear testers [43]

	Kąt tarcia wewnętrznego	Kąt tarcia kontaktowego	Wytrzymałość na ścinanie i ściskanie	Czas konsolidacji	Rozkład naprężeń	Odształcenie jednorodne	Ogólny stan naprężenia	Ogólny stan odkształcenia	Odpowiedni do sprężystych materiałów ziarnistych	Odpowiedni do materiałów gruboziarnistych (> 10	Odpowiedni do niskiego poziomu parcia (< 1N/cm ²)	Niezbędny czas na badanie ścinania	Koszt wyposażenia
Casagrande'a	x	x	x	(x)	(x)	-	-	-	-	-	x	x	x
Jenike'go	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	x	x	x
Zwykły	x	-	x	-	x	x	x	x	(x)	(x)	x	-	-
Skęceniowy	(x)	x	(x)	(x)	-	-	-	-	x	(x)	x	x	x
Pierścieniowy	x	x	x	(x)	-	-	-	(x)	x	x	x	x	x
(3 pierścienie)	x	(x)	x	-	(x)	-	-	(x)	x	x	x	(x)	-
Dwuosiowy	x	-	x	-	(x)	(x)	x	(x)	(x)	x	-	(x)	(x)
Ścisły dwuosiowy	x	-	x	-	x	x	x	x	x	x	x	-	-
Trójosiowy	x	-	x	-	(x)	(x)	x	(x)	x	x	-	(x)	x
Ścisły trójosiowy	x	-	x	-	x	x	x	x	x	x	-	-	-

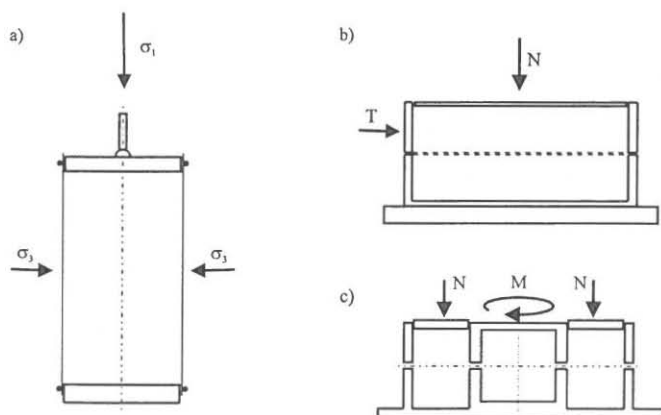
Uwaga: Symbol x oznacza „odpowiedni”.

Wyróżnić można trzy obszary zastosowań:

- ◆ Badania naukowe ukierunkowane na wyznaczenie zależności napężenie-odkształcenie. Najbardziej przydatny w tych badaniach jest zwykły aparat ścinania, aparat dwuosiowy oraz ścisły aparat trójosiowy. Wymienione metody są bardzo pracochłonne i wymagają drogiego oprzyrządowania.
- ◆ Praktyczne problemy inżynierskie. Odpowiedni do tych zastosowań jest aparat Jenike'go oraz aparat pierścieniowy. Aparaty: trójosiowy i aparat Casagrande'a są powszechnie stosowane w badaniach właściwości mechanicznych gruntów. Aparat trójosiowego ściskania jest zwykle używany przy ciśnieniu przewyższającym zakres stosowany w technologii materiałów sypkich.
- ◆ Porównania jakościowe materiałów sypkich. Największe zastosowanie znajduje tu skręcienny aparat ścinania. Czas pomiaru jest bardzo krótki. Aparat może być obsługiwany nawet przez niewykwalifikowany personel. Ilościowa ocena wyników jest trudna.

W badaniach właściwości mechanicznych materiałów sypkich największe zastosowanie znalazły aparaty: trójosiowego ściskania, bezpośredniego ścinania i aparat pierścieniowy (Rys. 7).

Wielu badaczy wyraża pogląd, że metodą najbardziej przydatną do określania parametrów płynięcia materiałów sypkich w zbiornikach jest metoda bezpośredniego ścinania [15, 43, 85, 86]. Mimo pewnych wad umożliwia ona określenie bardzo wielu parametrów materiałów ziarnistych oraz proszków z wystarczającą dla praktycznych zastosowań dokładnością [75]. Z kolei aparaty pośredniego ścinania (trójosiowe i dwuosiowe) z uwagi na ich główną zaletę, jaką jest możliwość realizowania różnych dróg obciążania, należą do najczęściej stosowanych tego typu przyrządów w badaniach właściwości mechanicznych gruntów. Jednak ze względu na czasochłonność badań i koszt wyposażenia nie są zbyt często stosowane do pomiaru parametrów płynięcia materiałów sypkich. Znajdują natomiast zastosowanie w badaniach naukowych ukierunkowanych na precyzyjne wyznaczenie zależności napężenie-odkształcenie na różnych drogach obciążania [4, 6, 7, 43, 91].



Rys. 7. Metody pomiaru parametrów plastycznego płynięcia materiałów sypkich: a) trójosiowego ściskania, b) bezpośredniego ścinania, c) ścinania w aparacie pierścieniowym.

Fig. 7. Methods of determination of yield locus parameters of granular materials: a) triaxial compression, b) direct shearing, c) shearing in ring shear tester.

Zaletą aparatów obrotowych jest nieograniczona droga ścinania. W przypadku roślinnych materiałów sypkich, charakteryzujących się długą drogą ścinania, może się okazać konieczne zastosowanie aparatu pierścieniowego [83]. Poważną jego wadą jest nieokreślony i zależny od promienia rozkład naprężeń ścinających. Podczas testu mierzy się moment M obracający ze stałą prędkością kątową ω obrotowy pierścień aparatu. W tym przypadku średnią wartość naprężenia ścinającego τ określa się ze wzoru:

$$\tau = \frac{3M}{2\pi(r_z^3 - r_w^3)}, \quad (14)$$

gdzie: M – moment obrotowy,

r_z – promień zewnętrzny pierścienia,

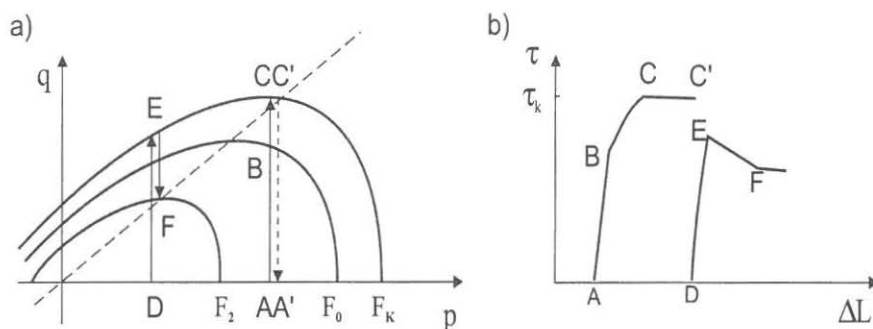
r_w – promień wewnętrzny pierścienia.

Aby rozkład naprężenia wzdłuż promienia był w przybliżeniu stały, szerokość pierścienia powinna być mała w stosunku do promienia. Jednak zbyt mała szerokość pierścienia uniemożliwia zastosowanie aparatu do badań materiałów o dużych wymiarach ziarna.

2.3.2. Procedury wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego

Na bazie tworzonych modeli teoretycznych oraz opracowanych metod eksperymentalnych powstały standardowe procedury wyznaczania parametrów plastycznego płynięcia. Na podstawie przebiegu krzywej uplastycznienia wyznacza się następujące parametry: kąt tarcia wewnętrznego φ , efektywny kąt tarcia wewnętrznego δ oraz kohezję c .

Do wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego materiałów sypkich normy zalecają stosować metodę bezpośredniego ścinania z wykorzystaniem aparatu Jenike'go [19, 36]. Najbardziej rozpowszechniona procedura wykonywania pomiarów aparatem bezpośredniego ścinania opracowana została przez Jenike'go [35]. W celu skrócenia drogi ścinania konsolidacja próbek podzielona została na dwa etapy: wstępną konsolidację - pod działaniem obciążenia normalnego, połączoną z wykonaniem trzech obrotów pokrywą aparatu w obu kierunkach o kąt 10° oraz wstępne ścinanie, przy tym samym obciążeniu normalnym, aż do uzyskania stanu ustalonego płynięcia. Następnie próbka jest odciązana i następuje właściwe ścinanie przy niższym naprężeniu normalnym (Rys. 8a, b - punkty D, E, F). Zgodnie z tą procedurą każdy pomiar pozwala na wyznaczenie tylko dwóch punktów (C i E) leżących na krzywej uplastycznienia. Do określenia kolejnych punktów leżących na tej samej krzywej uplastycznienia, a więc dla tej samej gęstości materiału $\rho(\sigma)$, należy dla każdego z nich powtórzyć całą procedurę przy tej samej wartości naprężenia konsolidującego σ_n , lecz innej wartości naprężenia normalnego podczas właściwego ścinania. Powtórzenie całej procedury dla różnych obciążeń konsolidujących daje w rezultacie rodzinę krzywych uplastycznienia. Ponieważ większej gęstości odpowiada większa wytrzymałość, zatem im wyższe obciążenie konsolidujące - tym wyżej leży krzywa uplastycznienia (Rys. 8).



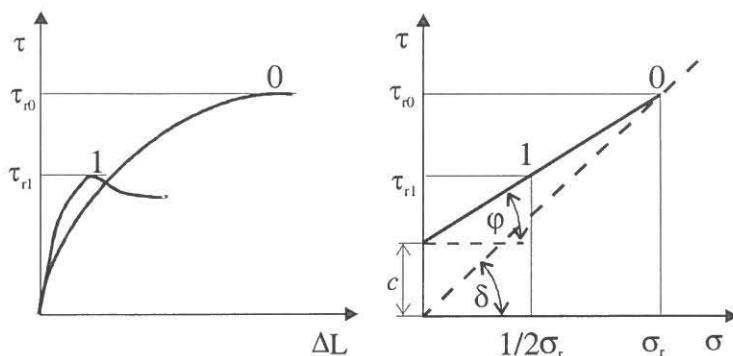
Rys. 8. Procedura Jenike'go wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego [38].

Fig. 8. Procedure of determination of the angle of internal friction according to Jenike [38].

Zalecane przez normę Eurocode 1 [19] i w ślad za nią, aktualnie nowelizowaną, Polską Normę PN-89/B-03262 [66] uproszczenie procedury Jenike'go polega na:

- ◆ wstępnej konsolidacji materiału sypkiego wsypanego swobodnie do formy (bez wibracji i innych sił zagęszczających) naporem normalnym równym wartości naprężenia pionowego w zbiorniku (zalecane 100 kPa) oraz wykonanie trzech obrotów pokrywą górną aparatu w obu kierunkach o kąt 10° w celu dodatkowej konsolidacji,
- ◆ ścięciu próbki obciążonej zalecanym naprężeniem odniesienia σ_r ,
- ◆ ścięciu próbki wstępnie identycznie skonsolidowanej a następnie obciążonej połową zastosowanego naprężenia konsolidującego σ_r .

Norma Eurocode 1 zaleca, aby do obliczania parametrów materiału sypkiego używać maksymalnej wartości naprężenia ścinającego powstającego przy przemieszczeniu poziomym ΔL nie przekraczającym 5% średnicy D komory pomiarowej aparatu. Średnica komory ścinania powinna być co najmniej 40 razy większa od maksymalnego wymiaru ziarna ośrodka, a wysokość H powinna zawierać się w przedziale 0,3 do 0,4 D . Parametry materiału należy obliczać wykorzystując wyznaczone zgodnie z powyższą procedurą dwa punkty należące do warunku plastyczności: dla naprężenia normalnego σ_r oraz $1/2\sigma_r$ (Rys. 9).



Rys. 9. Procedura wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego zalecana przez normę Eurocode 1 [19].

Fig. 9. Procedure of determination of the angle of internal friction according to Eurocode 1[19].

W zależności od położenia i kształtu krzywej uplastycznienia materiały sypkie podzielić można na trzy grupy [76, 79].

1. Bezkohezyjne materiały doskonale sypkie, dla których warunek uplastycznienia reprezentuje prosta przechodząca przez początek układu współrzędnych:

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi. \quad (15)$$

W materiałach tych kąt tarcia wewnętrznego φ równy jest efektywnemu kątowi tarcia wewnętrznego δ .

2. Materiały posiadające pewną kohezję c . Warunek uplastycznienia reprezentuje wówczas równanie:

$$\tau = \sigma_n \tan\varphi + c, \quad (16)$$

a kąt tarcia wewnętrznego φ jest różny od efektywnego kąta tarcia δ .

3. Materiały silnie adhezyjne, dla których warunek uplastycznienia jest nieliniowy.

2.3.3. Lokalizacja deformacji postaciowej

W trakcie wykonywania testów na próbkach materiału sypkiego deformacja materiału lokalizuje się w jego niewielkim obszarze. Gdy naprężenie jest bliskie stanu granicznego deformacja materiału sypkiego traci swoją początkową jednorodność i powstaje wyraźnie wyodrębniona warstwa ścinania oddzielająca sztywne bloki materiału [34]. Podobne zjawisko występuje bardzo często w trakcie wykonywania wielu operacji związanych z magazynowaniem, przemieszczaniem i transportem materiałów sypkich [40, 84]. Przyczyną są zarówno uwarunkowania zewnętrzne przeprowadzanych operacji, jak również właściwości mechaniczne samych materiałów.

Nieliczne badania doświadczalne przeprowadzane głównie dla piasku wskazują, że grubość warstwy ścinania jest rzędu kilkunastu średnich wymiarów ziarna materiału sypkiego [65, 78, 88]. Vardoulakis i Graf [100] stwierdzili na podstawie zdjęć rentgenowskich próbki, że w wyniku dwuosiowego ściskania powstaje warstwa ścinania o szerokości równej około 16 średnich średnic ziarna. W modelach ośrodków sypkich formułowanych w ramach teorii plastyczności szerokość warstwy ścinania jest zredukowana do zera. Skutkiem tego rozkład przemieszczenia występujący w rzeczywistości na grubości warstwy ścinania jest również zredukowany do zera. Dopiero teoria Cosseratów, uwzględniająca w równaniach ruchu ośrodka przemieszczenia oraz obroty ziaren, pozwala analizować rozkład naprężenia i odkształcenia na przekroju warstwy ścinania [63]. Badania teoretyczne dopiero kilkanaście lat temu były w stanie przewidzieć grubość warstwy ścinania (8-10 średnich wymiarów ziarna ośrodka) po uwzględnieniu elementarnych oddziaływań między ziarnami ośrodka w ramach metody elementów dyskretnych oraz teorii ośrodków mikropolarnych [2, 41, 63, 96].

Pogłębiona wiedza o warunkach i oddziaływaniach prowadzących do uformowania się obszaru ruchu w ośrodku sypkim jest niezbędna zarówno do właściwego zaplanowania warunków testów ścinania mających określić parametry materiałów, jak również do prawidłowego sterowania procesami technologicznymi związanymi z przemieszczaniem tych materiałów. Jednym z przykładów praktycznego wykorzystania rozważań dotyczących powstawania warstwy ścinania jest analiza błędów skali towarzyszących przenoszeniu wyników badań prowadzonych w skali modelowej na obiekty naturalnej wielkości. Badania te wykazały, że zbiorniki modelowe na ogół zawyżają wartość dynamicznych przeciążeń jakie występują podczas opróżniania obiektów rzeczywistych. Przeciążenie zbiornika wywołane jest dylatacją zachodzącą w warstwie ścinania wzdłuż szorstkiej ściany zbiornika. Przypuszcza się, że grubość przyściennej warstwy materiału sypkiego, w której zachodzi ścinanie, jest stała i nie zależy od wymiarów zbiornika [2, 105]. Oznacza to, że wraz ze wzrostem wymiarów zbiornika powinien maleć wpływ przyściennej warstwy na jego przeciążenie [64].

2.4. Czynniki wpływające na kąt tarcia wewnętrznego roślinnych materiałów sypkich

W materiałach sypkich pochodzenia roślinnego, np. ziarno zbóż, kąt tarcia wewnętrznego zależy od właściwości pojedynczych ziarniaków oraz od struktury złoża [55, 62]. Najlepiej poznany jest wpływ gęstości upakowania, który omówiony został w poprzednich rozdziałach. Czynniki modyfikującymi właściwości mechaniczne nasion są: wilgotność, temperatura, gatunek, odmiana, stan dojrzałości oraz warunki uprawy [13, 20, 22, 57, 89, 99, 101, 103]. Czynniki modyfikującymi gęstość upakowania oraz przestrzenną strukturę wzajemnego ułożenia nasion są: sposób formowania złoża materiału sypkiego, wilgotność, ciśnienie oraz czas składowania [5, 56, 58, 61, 93]. Powietrznie suche ziarno zbóż na ogół nie posiada kohezji. Siły kohezji pojawiają się natomiast przy większej wilgotności ziarna i długim czasie składowania [5, 81, 104].

Istotnym parametrem, decydującym zarówno o oporach tarcia, jak i o odkształcalności poszczególnych nasion, jest wilgotność [74, 90]. Ze wzrostem wilgotności materiału rośnie kąt tarcia wewnętrznego [24, 46, 47, 49, 53, 54]. W szerokim zakresie zmian wilgotności zależność ta jest nieliniowa. 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% [24, 27, 55]. W przedziale wilgotności ziarna poniżej 11% kąt tarcia wewnętrznego

nieznacznie maleje ze wzrostem wilgotności. W przedziale wilgotności ziarna od 11 do 24% następuje szybki wzrost kąta tarcia wewnętrznego. Wzrost wilgotności wywołuje zwiększoną odkształcalność ziarniaków. Ziarniaki deformują się w punktach wzajemnego kontaktu, w wyniku czego rośnie opór tarcia. Przedział trzeci obejmuje wilgotność powyżej 24%. Zachodzi w nim jakościowa zmiana właściwości materiału. Ziarniaki deformują się bardzo łatwo już przy niewielkim nacisku. Przy dalszym wzroście wilgotności między ziarniakami pojawia się wolna woda, która osłabia wytrzymałość wiązania ciemnego. Konsekwencją tego jest spadek wartości kąta tarcia wewnętrznego. W zależności od wilgotności deformacja ziarniaków może mieć charakter sprężysty, lepko-sprężysty bądź plastyczny [73]. Zatem również wypadkowe odkształcenie materiału sypkiego powstające w wyniku złożenia przemieszczeń, obrotów i deformacji poszczególnych ziarniaków ulega jakościowej zmianie wraz ze zmianą wilgotności. Stanowiąc to może istotny problem podczas wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego standardowymi metodami przystosowanymi do badania materiałów składających się z nieodkształcalnych cząstek [32].

Wpływ struktury upakowania dobrze ilustruje anizotropia właściwości mechanicznych. Wyróżnienie pewnej uprzywilejowanej orientacji przestrzennej ziaren w złożu materiału sypkiego sprawia, że posiada on różną wytrzymałość na ścinanie w różnych kierunkach. Anizotropia może powstawać podczas staczania się ziaren ośrodka po powierzchni stożka naturalnego usypu. Ziarna układają się wtedy na ogół najdłuższą ośią wzdłuż tworzącej stożka. Pomiaru kąta tarcia wewnętrznego ziarna zbóż przeprowadzone metodą trójosiowego ściskania oraz bezpośredniego ścinania wykazały, że kąt tarcia wewnętrznego rośnie ze wzrostem kąta zawartego między kierunkiem orientacji ziarniaków a kierunkiem poślizgu [1, 55, 56].

Podsumowanie przeglądu literatury

Roślinne materiały sypkie wykazują cechy sprężyste, lepkie i plastyczne. Ponadto charakteryzuje je duża zmienność cech w czasie. Podstawowym elementem składowym materiałów roślinnych jest żywa komórka, która szczególnie przy zwiększonej wilgotności ulega deformacji już przy niewielkim obciążeniu. Wartość kąta tarcia wewnętrznego zależy od właściwości ziaren oraz od struktury geometrycznej ośrodka. Właściwości nasion to: chropowatość i falistość powierzchni, ich kształt i wymiary oraz zdolność do odkształceń. Właściwości mechaniczne zależą od gatunku i odmiany materiału roślinnego i są bardzo wyraźnie modyfikowane przez wilgotność. Struktura geometryczna ośrodka zależy od gęstości upakowania oraz od wzajemnego ułożenia ziaren

w ośrodku. Wyróżniona orientacja upakowania wywołuje anizotropię właściwości mechanicznych, która w dużym stopniu zależy od kształtu ziaren tworzących ośrodek. Z tego powodu struktura ośrodka jaką tworzą np. ziarniaki pszenicy jest bardziej zróżnicowana niż struktura utworzona z nasion rzepaku [56].

Teorie tarcia i metody pomiarowe stosowane w przypadku roślinnych materiałów sypkich wywodzą się z mechaniki gruntów, gdzie ich głównym zastosowaniem są badania wytrzymałościowe [42, 44, 73]. Właściwości mechaniczne sypkich materiałów mineralnych, jak np. piasku czy żwiru, różnią się istotnie od właściwości mechanicznych roślinnych materiałów sypkich [28, 30, 48, 66, 79]. W związku z tym inna jest reakcja tych materiałów na działanie sił zewnętrznych.

Obowiązujące w krajach Unii Europejskiej i aktualnie wprowadzane w naszym kraju standardy projektowania konstrukcji na materiały sypkie proponują, aby właściwości mechaniczne składowanych materiałów wyznaczać indywidualnie dla poszczególnych realizacji technicznych na podstawie dość ogólnych zaleceń metodycznych [17, 19, 36, 70]. Metody te nie uwzględniają specyficznych właściwości niektórych grup materiałów, jak np. materiałów pochodzenia roślinnego. Stąd też powstaje pilna potrzeba uwzględnienia w zalecanych przez normy metodach badawczych specyfiki badanych materiałów w celu zwiększenia dokładności i powtarzalności wyników pomiarów.

3. ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH

Bogata literatura, coraz dokładniej wyjaśniająca zjawiska fizyczne zachodzące w materiałach sypkich w warunkach złożonych obciążeń mechanicznych, zachęca do podjęcia próby włączenia i szerszego wykorzystania zawartych w niej rozważań teoretycznych do praktycznego ich wykorzystania w metodyce badawczej. Przykładem takiego podejścia, wykorzystującego istniejący bogaty materiał teoretyczny, jest opracowanie ujednocionej metodyki wyznaczania parametrów mechanicznych materiałów sypkich [17, 19].

Ciągły postęp w dziedzinie badań oraz coraz pełniejsze poznanie właściwości fizycznych materiałów sypkich stwarzają podstawę dostosowania metodyki badawczej do specyficznych właściwości fizycznych poszczególnych grup materiałów sypkich nie naruszającej jednak ogólnych zaleceń metodycznych odnośnych norm. Roślinne materiały sypkie są jedną z grup materiałów, których specyficzne właściwości powinny być uwzględniane w metodyce badawczej [51].

Badania własne obejmowały analizę czynników wpływających na dokładność pomiarów kąta tarcia wewnętrznego roślinnych materiałów sypkich prowadzonych metodą trójosiowego ściskania i bezpośredniego ścinania. Analizą objęto:

- procedurę przygotowania próbki,
- zakres stosowalności wymienionych metod,
- możliwość prowadzenia pomiarów w poszerzonym zakresie wilgotności materiału.

Badania podzielono na dwa etapy. W pierwszym badano proces formowania się warstwy ścinania w roślinnym materiale sypkim. Otrzymane wyniki wykorzystano następnie w drugim etapie badań do optymalizacji metodyki wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego roślinnych materiałów sypkich.

Zakres badań własnych obejmował analizę:

- procesu formowania się warstwy ścinania w roślinnym materiale sypkim,
- wpływu wymiarów próbki i ziarna ośrodka na sposób wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego,
- wpływu zmiany pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki w trakcie jej deformacji na wynik pomiaru,
- wpływu gęstości i wilgotności materiału sypkiego na pomiar kąta tarcia wewnętrznego,
- zakresu wilgotności materiału, dla którego możliwy jest pomiar kąta tarcia wewnętrznego zastosowanymi metodami.

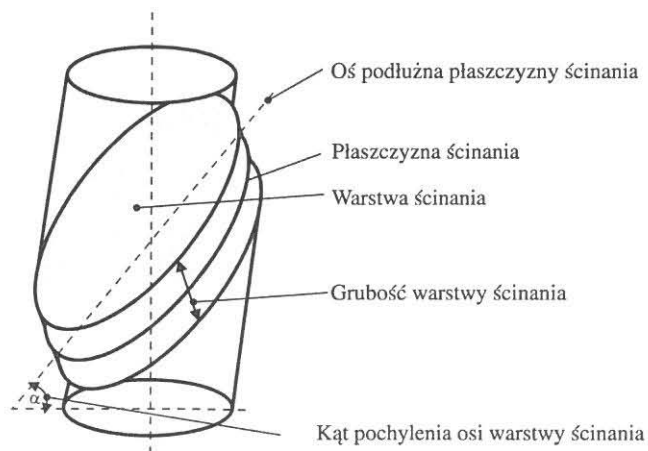
4. ANALIZA PROCESU POWSTAWANIA WARSTWY ŚCINANIA W TESTACH TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA I BEZPOŚREDNIEGO ŚCINANIA

Analizę procesu powstawania warstwy ścinania w próbce sypkiego materiału roślinnego podczas testów trójosiowego ściskania i bezpośredniego ścinania przeprowadzono wykorzystując rozkłady przemieszczeń nasion na powierzchniach przekrojów odpowiednio przygotowanych próbek przed i po deformacji.

4.1. Metoda i materiał

4.1.1. Test trójosiowego ściskania

Formowanie się warstwy ścinania w teście trójosiowego ściskania zależy wyłącznie od właściwości ośrodka i stanu naprężenia jaki w nim występuje. Tę zaletę metody trójosiowego ściskania wykorzystano do przeprowadzenia doświadczalnej analizy procesu lokalizacji deformacji postaciowej w materiale sypkim podczas dużych odkształceń plastycznych (Rys. 10).

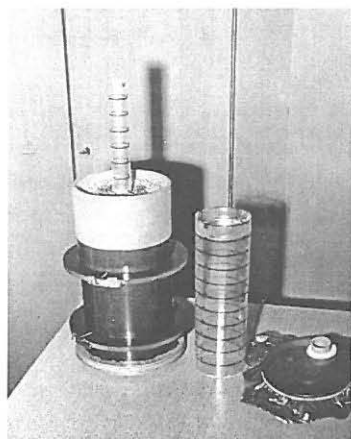


Rys. 10. Warstwa ścinania w próbce materiału sypkiego w czasie testu trójosiowego ściskania.

Fig. 10. Shear band in a sample of granular material during triaxial compression test.

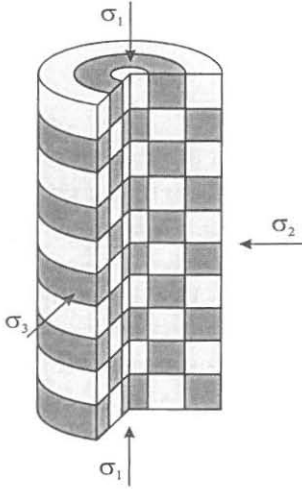
Ze względu na osiową symetrię stanu naprężenia nie ma możliwości przewidzenia kierunku ścicia próbki. Przyjęty sposób wykonania próbek miał na celu umożliwienie wyznaczenia rozkładu przemieszczenia nasion na przekroju warstwy ścinania niezależnie od kierunku jej formowania.

W cylindrycznej, dwudzielnej formie o średnicy 0,15 m i wysokości 0,30 m, z wyłożoną od wewnątrz cienką osłoną gumową, umieszczano koncentrycznie dwa pomocnicze cylindry o średnicach 0,03 m i 0,09 m wykonane z cienkiej, bezbarwnej folii poliestrowej (Rys. 11). Powstałe w ten sposób trzy komory wypełniano warstwami nasion o wysokości 0,03 m każda. Warstwy na przemian różniły się kolorem nasion, co w przekroju podłużnym próbki tworzyło dwubarwną szachownicę 50 kwadratowych pól (10×5) o boku 0,03 m (Rys. 12).



Rys. 11. Etapy formowania próbki.

Fig. 11. A sample formation process.

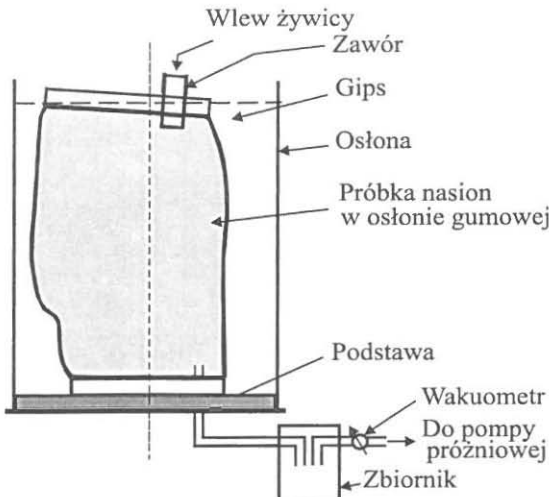


Rys. 12. Próbką trójosiowego ściskania z siatką kwadratowych pól [33].

Fig. 12. Triaxial compression sample with a network of square areas [33].

zabezpieczającym. W celu zmniejszenia lepkości żywicy rozcieńczano ją acetonem (10%). Po spolimeryzowaniu żywicy usuwano z próbki płaszcz gipsowy i gumową osłonę (Rys. 14).

Wartości większego naprężenia głównego σ_1 i odkształcenia ε_1 podczas deformacji rejestrowano za pośrednictwem systemu akwizycji danych Hewlett Packard 75000. Po uzyskaniu przyjętego odkształcenia ε_1 utrwalano kształt i strukturę wewnętrzną próbki wypełniając jej pory żywicą epoksydową (Rys. 13). W tym celu obniżano w próbce ciśnienie (pompa próżniowa dołączona poprzez zbiornik zabezpieczający) i montowano na niej cylindryczną osłonę. Przestrzeń między próbką i osłoną wypełniano zalewą gipsową. Znajdujący się w górnej podstawie próbki króciec zalewano żywicą epoksydową [52]. Po przebicciu znajdującej się w króćcu gumowej przepony, spełniającej rolę zaworu, do próbki wprowadzano żywicę epoksydową. Żywicę wprowadzano do chwili pojawienia się jej w zbiorniku



Rys. 13. Utrwalanie kształtu i struktury wewnętrznej próbki [52].

Fig. 13. Fixation of shape and internal structure of a sample [52].



Rys. 14. Utrwalona próbka ziarna pszenicy z usuniętym płaszczem gipsowym.

Fig. 14. Fixed sample of wheat grain with removed external cover.

Utrwalone próbki przecinano wzdłuż kierunku prostopadłego do powierzchni ścinania. Porównywanie przekrojów próbek przed i po deformacji umożliwiało przeprowadzenie analizy rozkładu przemieszczenia nasion. W tym celu przekroje próbek skanowano i następnie, korzystając z pomocy programu CorelDraw, wyznaczano rozkłady przemieszczenia nasion łącząc odpowiadające sobie punkty siatki przekrojów próbki przed i po deformacji. Wektory wypadkowego przemieszczenia rozkładano na składową styczną i normalną do kierunku warstwy ścinania [33].

W celu określenia wpływu wymiarów, kształtu oraz stosunku wielkości próbki do wielkości ziaren ośrodka na parametry warstwy ścinania przeprowadzono badania dla nasion rzepaku o wilgotności 9%, gorzycy białej o wilgotności 7%, grochu o wilgotności 12% i ziarna pszenicy o wilgotności 13% [67].

Ze względu na bardzo dużą prędkość przygotowania próbek jedynie w przypadku nasion gorzycy białej pomiary przeprowadzono dla kilku wartości odkształcenia ε_1 : 0,06, 0,1, 0,17 i 0,25. W przypadku pozostałych nasion strukturę próbek utrwalano tylko dla odkształcenia, przy którym występowała wyraźnie uformowana warstwa ścinania.

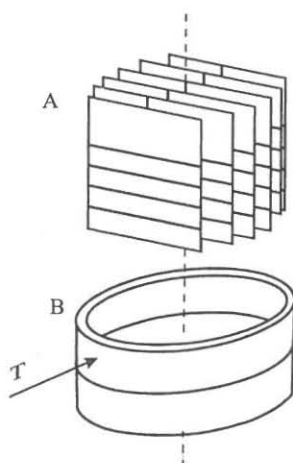
W celu zróżnicowania ośrodka, część nasion barwiono na kolor zielony w wodnym roztworze barwnika „Fast Green FCF”. Nasiona przeznaczone do barwienia wsypywano do szklanego naczynia z roztworem barwnika pozostawiając nad nimi wolną przestrzeń. Przy pomocy pompy próżniowej obniżano

w naczyniu ciśnienie. Wstrząsając naczyniem usuwano powietrze z mikroporów nasion. Dzięki temu łatwiej wchłaniały one barwnik i bardziej kontrastowały z nasionami niebarwionymi. Następnie nasiona suszono w suszarce laboratoryjnej i przetrzymywano przez 4 tygodnie w pomieszczeniu, w którym znajdowały się pozostałe przeznaczone do badań nasiona.

W celu sprawdzenia ewentualnego wpływu barwienia nasion na ich właściwości mechaniczne wykonano pomiary kąta tarcia wewnętrznego φ metodą trójosiowego ściskania oddzielnie dla nasion barwionych i niebarwionych. W przypadku barwionych nasion gorczyicy białej uzyskano kąt tarcia wewnętrznego $\varphi = 24^\circ$, zaś w przypadku nasion niebarwionych kąt tarcia wewnętrznego $\varphi = 27^\circ$. Nie stwierdzono różnicy w powstawaniu warstwy ścinania obserwując oddzielnie jej formowanie się w złożu nasion barwionych i niebarwionych. Uznano zatem, że różnica w wartości kąta tarcia wewnętrznego pomiędzy nasionami barwionymi i niebarwionymi nie będzie miała istotnego znaczenia dla przebiegu formowania się warstwy ścinania w próbce.

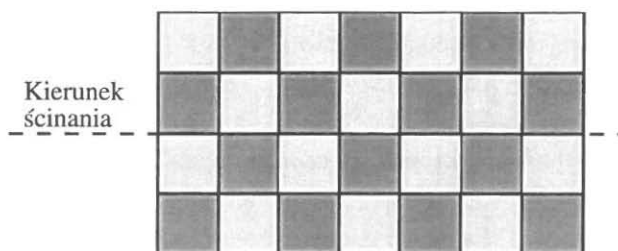
4.1.2. Test bezpośredniego ścinania

W metodzie bezpośredniego ścinania kierunek ścięcia próbki jest jednoznacznie określony kierunkiem wzajemnego przemieszczania się dwóch części aparatu. Zatem do wykonania analizy pola przemieszczenia nasion, metodą analogiczną jak w przypadku trójosiowego ściskania, wystarczyło uformować próbkę dającą tylko w jednej płaszczyźnie przekroju dwukolorową szachownicę. Do formowania próbki zastosowano przyrząd pomocniczy (szablon) wykonany z cienkiej blachy stalowej, który na czas formowania próbki umieszczano we wnętrzu komory pomiarowej aparatu (Rys. 15). Dzielił on komory aparatu bezpośredniego ścinania, o średnicy 0,21 m i wysokości 0,12 m, na siedem obszarów o grubości 0,03 m każdy. Szablon ustawiano prostopadle do kierunku przemieszczenia komory aparatu ścinania. Do powstałych w ten sposób obszarów nasypywano cztery warstwy nasion o wysokości 0,03 m każda, różniące się na przemian barwą, zarówno w kierunku poziomym jak i pionowym, tworzące w przekroju podłużnym próbki (równoległym do kierunku przemieszczenia) szachownicę 28 (7x4) kwadratowych pól (Rys. 16).



Rys. 15. Sposób formowania próbki: a) szablon, b) komora aparatu ścinania.

Fig. 15. Procedure of sample formation: a) mould, b) chamber of a shearing apparatus.



Rys. 16. Siatka 28 pól próbki bezpośredniego ścinania.

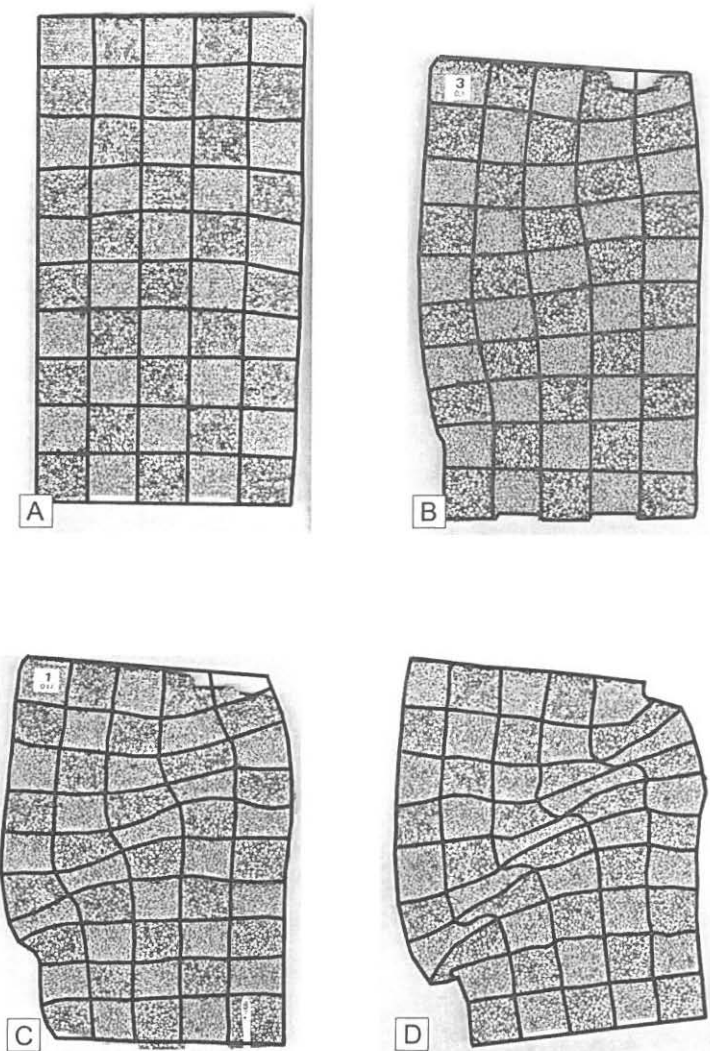
Fig. 16. Network of 28 areas of a sample of direct shearing.

Komorę aparatu i płytę górną zabezpieczono przed żywicą epoksydową cienką folią polietylenową. Badania wykonano dla nasion gorczycy białej o wilgotności 7%. Nasiona barwiono analogicznie jak w przypadku trójosiowego ściskania. Po uformowaniu próbki usuwano szablon i wykonywano test ścinania zgodnie z zalecaną przez normę Eurocode 1 procedurą pomiarową przy naporze normalnym 80 kPa. Zdeformowaną próbkę wypełniano żywicą epoksydową. Po utwardzeniu żywicy usuwano obie części komory ścinania a próbkę przecinano wzdłuż kierunku ścinania. Porównanie zdeformowanej siatki poszczególnych pól przekroju z siatką wyjściową umożliwiło analizę rozkładu przemieszczenia nasion, podobnie jak w przypadku trójosiowego ściskania.

4.2. Parametry swobodnie uformowanej warstwy ścinania

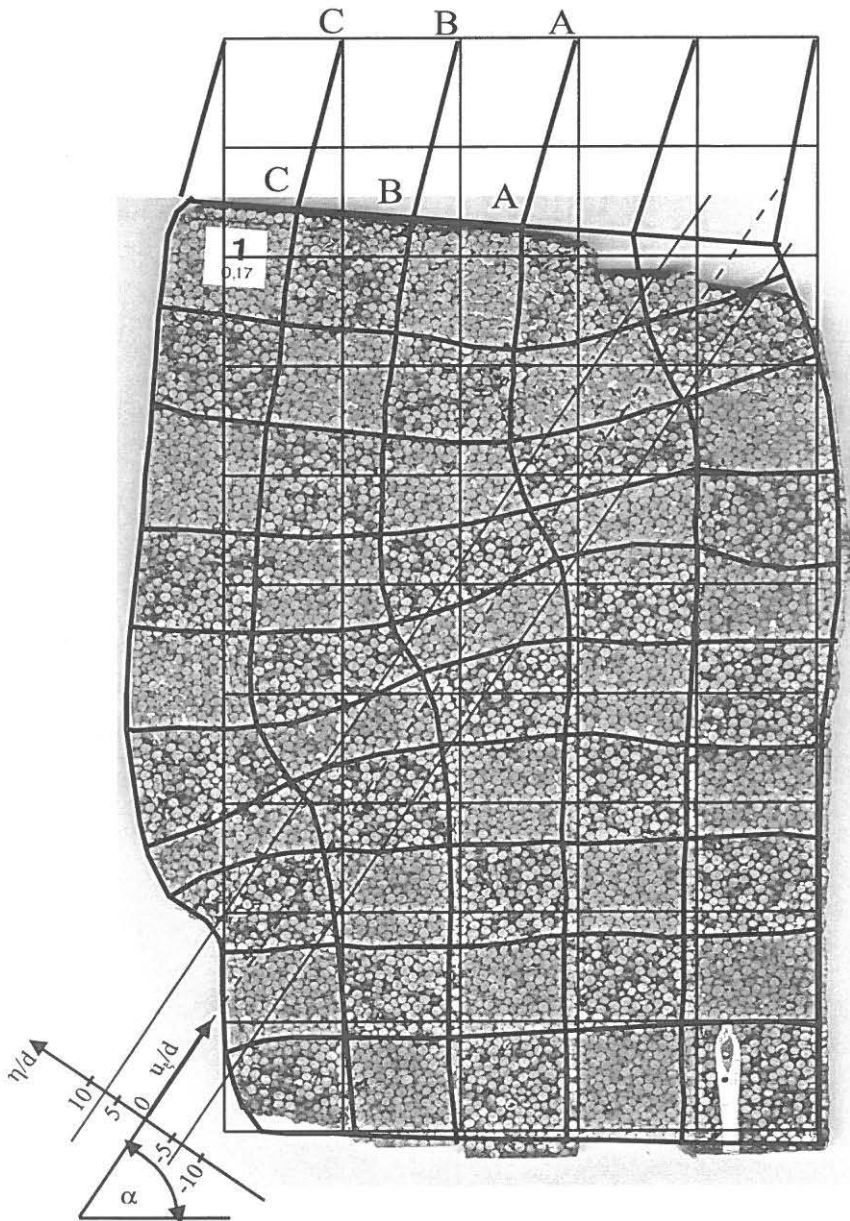
Rysunek 17 przedstawia przekroje próbek nasion gorczycy białej wykonane dla 4 wartości odkształcenia ε_1 . Gęstość początkowa próbek wynosiła 680 kg/m^3 . Przy odkształceniu $\varepsilon_1 = 0,06$ deformacja próbki była jeszcze jednorodna. Deformacja zaczęła się lokalizować wzdłuż ukośnie nachylonego pasa materiału przy odkształceniu $\varepsilon_1 = 0,1$. W miarę dalszego wzrostu odkształcenia lokalizacja deformacji stawała się coraz bardziej wyraźna. Szczegóły analizy procesu formowania się warstwy ścinania zilustrowano na przykładzie dwóch próbek nasion gorczycy białej dla $\varepsilon_1 = 0,10$ i $0,17$. Maksymalna wartość naprężenia σ_1 odpowiadająca tym wartościom odkształcenia wynosiła odpowiednio 170 i 185 kPa.

Rysunek 18 przedstawia przekrój próbki nasion gorczycy białej wykonany przy odkształceniu $\varepsilon_1 = 0,17$ z naniesionym oznaczeniem warstwy ścinania. Kąt nachylenia osi warstwy ścinania α do kierunku mniejszego naprężenia głównego σ_3 wyznaczano z zależności: $\alpha = \pi/4 + \varphi/2$ (rys. 24). Do obliczenia kąta α przyjęto średnią wartość kąta tarcia wewnętrznego $\varphi = 25,5^\circ$ (średni kąt tarcia wewnętrznego dla nasion barwionych i niebarwionych). Analiza rozkładu przemieszczenia stycznego u_ξ oraz normalnego u_η wzdłuż kierunku prostopadłego do kierunku warstwy ścinania η na przekrojach poszczególnych próbek materiału sypkiego pozwoliła określić grubość warstwy ścinania. Grubość tę zdefiniowano jako grubość obszaru, w którym gradient przemieszczenia stycznego $du_\xi/d\eta$ w kierunku prostopadłym do kierunku warstwy ścinania η był największy i w przybliżeniu stały. Na przekroju w pełni uformowanej warstwy ścinania gradient ten wynosił około 1. Oznacza to, że sąsiadujące ze sobą warstwy ośrodka przesunęły się względem siebie o odległość równą wymiarowi jednego ziarna ośrodka. W początkowej fazie odkształcania próbki deformacja była jednorodna. W przypadku próbki gorczycy białej warstwa ścinania pojawiała się przy odkształceniu ε_1 około 0,1, natomiast w przypadku ziarna pszenicy i nasion grochu dopiero przy odkształceniu większym niż 0,2. Warstwa ścinania początkowo obejmowała szeroki pas materiału, po czym, ze wzrostem odkształcania, grubość jej szybko malała do kilkunastu wymiarów ziarna ośrodka i była stała na całej swojej długości. Grubość warstwy ścinania stabilizowała się, gdy większe naprężenie główne σ_1 osiągało maksymalną wartość. Rysunki 19 i 20 przedstawiają rozkłady przemieszczenia nasion na przekroju warstwy ścinania dla wybranych linii (A, B, C) przy odkształceniu próbki $\varepsilon_1 = 0,1$ i $0,17$ [33].

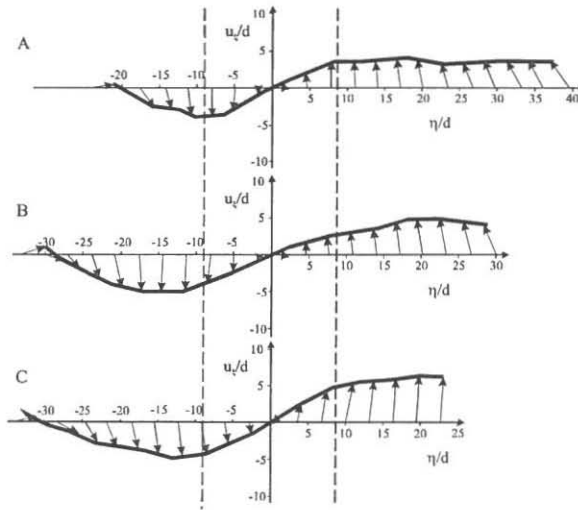


Rys. 17. Przekroje próbek nasion gorczycy białej poddanych testowi trójosiowego ściskania wykonane przy następujących wartościach odkształcenia ϵ_1 : A-0,06, B-0,10, C-0,17, D-0,25.

Fig. 17. Cross-sections of the samples of mustard seeds after the triaxial compression test for the following values of the axial strain ϵ_1 : A-0.06, B-0.10, C-0.17, D-0.25.

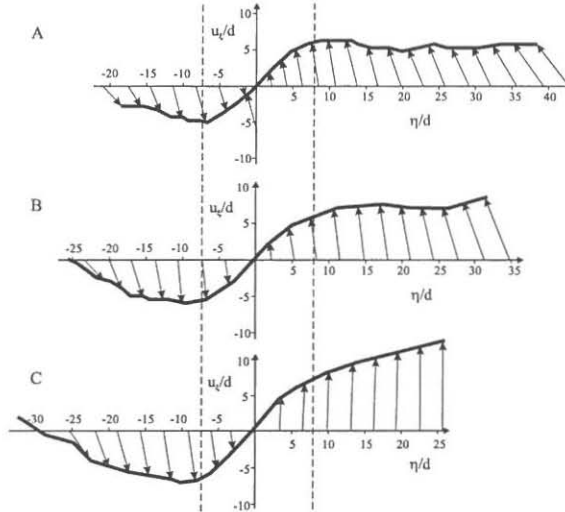


Rys. 18. Przekrój próbki nasion gorczycy białej poddanej testowi trójosiowego ściskania ($\epsilon_1 = 0,17$).
Fig. 18. Cross-section of the sample of mustard seeds after the triaxial compression test ($\epsilon_1 = 0.17$).



Rys. 19. Rozkłady przemieszczenia nasion gorczycy białej w warstwie ścinania przy odkształceniu próbki $\varepsilon_1 = 0,1$ [33].

Fig. 19. Distribution of displacement of mustard seeds across the shear band for strain $\varepsilon_1 = 0.1$ [33].



Rys. 20. Rozkłady przemieszczenia nasion gorczycy białej w warstwie ścinania przy odkształceniu próbki $\varepsilon_1 = 0,17$ [33].

Fig. 20. Distribution of displacement of mustard seeds across the shear band for strain $\varepsilon_1 = 0.17$ [33].

Przyrost przemieszczenia normalnego na przekroju warstwy ścinania był na granicy rozdzielczości metody - nie przekraczał jednego wymiaru ziarna ośrodka. Znaczna deformacja objętościowa występowała natomiast poza obszarem warstwy.

Dla wszystkich badanych materiałów sypkich grubość warstwy ścinania zawierała się w przedziale 12 do 16 średnich wymiarów ziarna ośrodka. Przy stałych wymiarach próbki odkształcenie, przy którym się ona pojawiała, rosło ze wzrostem wymiarów nasion - Tabela 3.

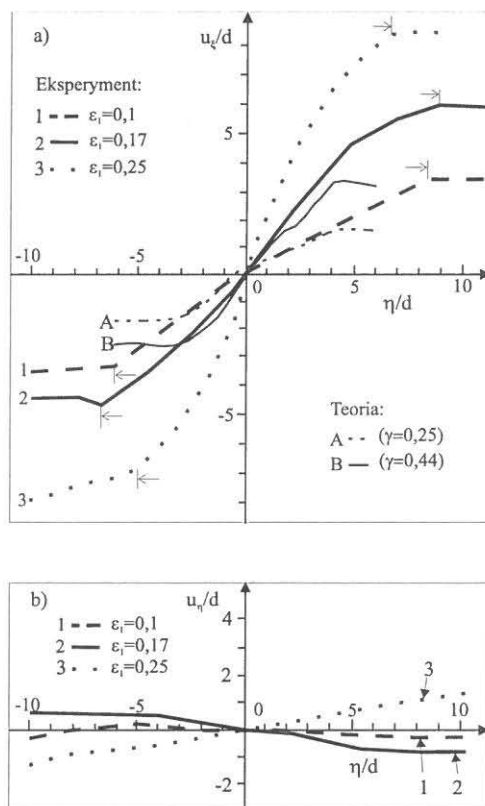
Tabela 3. Parametry materiałów sypkich oraz warstwy ścinania

Table 3. Parameters of granular materials and the shear band

Materiał	Kąt tarcia wewnętrznego [deg.]	Średni wymiar nasion* [mm]	Odkształcenie ε_1 [-]	Grubość warstwy ścinania [-]
Rzepak	24,3±0,7	2,0±0,02	0,08	12
Gorczyca biała	26,0±0,7	2,5±0,02	0,1	12-16
Pszenica	24,6±0,8	4,0±0,03	0,17	14
Groch	28,8±0,5	6,1±0,06	0,25	12

*Średnia geometryczna trzech wymiarów ziarna ośrodka.

Rysunek 21 przedstawia porównanie eksperymentalnych rozkładów przemieszczenia stycznego nasion gorczycy białej na przekroju warstwy ścinania z wynikami symulacji komputerowej Bardeta i Proubeta [2] wykonanej przy zastosowaniu modelu ośrodka mikropolarnego dla dwóch wartości odkształcenia postaciowego $\gamma = 0,25$ i $0,44$ ($\varepsilon_1 = 0,125$ i $0,22$) w płaskim stanie odkształcenia. Rysunek wskazuje na jakościową zgodność eksperymentalnych i teoretycznych przebiegów rozkładu przemieszczenia stycznego na przekroju warstwy ścinania [34]. Jednakże istniejąca rozbieżność ilościowa pomiędzy eksperymentalnym (12 do 16) i teoretycznym (7 do 8) oszacowaniem grubości warstwy ścinania wskazuje na potrzebę dalszych badań, które pozwolą na pełniejszą interpretację mechanizmów prowadzących do lokalizacji deformacji w materiałach sypkich. Proces lokalizacji deformacji postaciowej - przebiegający podobnie w różnych materiałach: wyidealizowanym układzie sztywnych ciał, piasku a także nasionach, zarówno w płaskim jak i przestrzennym stanie odkształcenia - jest bardzo dobrym przykładem uniwersalności uczestniczących w nim oddziaływań [2, 63, 64, 98].

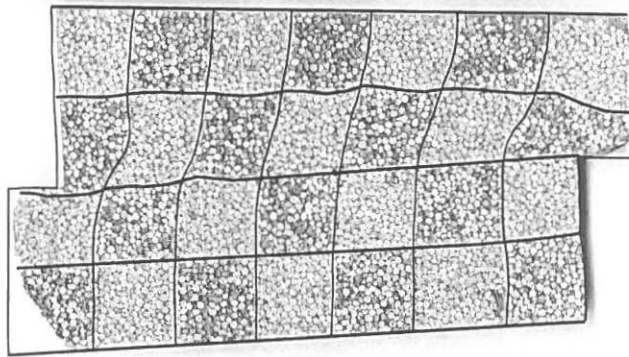


Rys. 21. Rozkłady przemieszczenia nasion gorczycy białej na przekroju warstwy ścinania: a) składowa styczna – wyniki eksperymentalne oraz symulacja komputerowa Bardeta i Proubeta [2], b) składowa normalna [34].

Fig. 21. Distribution of displacement of mustard seeds across the shear band: a) tangent component – experimental results and computer simulation of Bardet and Proubet [2], b) normal component [34].

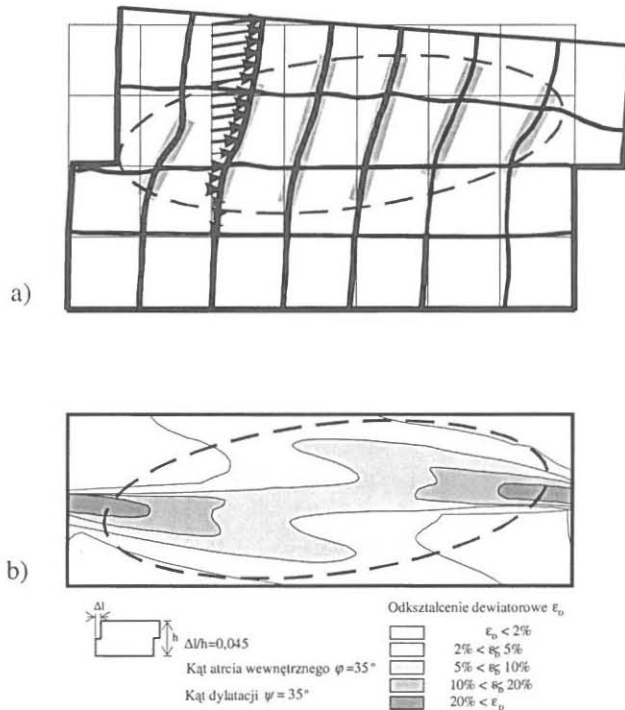
4.3. Ocena jakościowa powstawania warstwy ścinania w teście bezpośredniego ścinania

Analiza rozkładu przemieszczenia nasion w przekroju podłużnym próbkę wykazała, że podczas testu bezpośredniego ścinania deformacja materiału koncentruje się, w przeciwieństwie do testu trójosiowego ściskania, w obszarze o kształcie soczewki (Rys. 22). Deformacja postaciowa jest największa w obszarach soczewki sąsiadujących bezpośrednio ze ścianą komory aparatu ścinania. Oś podłużna soczewki odchylna jest o pewien kąt od osi podłużnej aparatu.



Rys. 22. Przekrój ściętej próbki nasion gorczycy białej.

Fig. 22. Cross-section of a sample of mustard seeds after shearing.



Rys. 23. Rozkład przemieszczenia na przekroju warstwy ścinania: a) wyniki badań eksperymentalnych, b) symulacja komputerowa Douniasa i Potts [14].

Fig. 23. Displacement distribution across the shear band: a) experimental results, b) computer simulation of Dounias and Potts [14].

Jakościowo podobny rozkład przemieszczenia uzyskali Dounias i Potts [14] w wyniku komputerowej symulacji procesu bezpośredniego ścinania materiału sypkiego spełniającego warunek plastyczności Coulomba-Mohra i wykazującego efekt dylatacji (Rys. 23b). Wydaje się, że to właśnie dylatacja materiału jest przyczyną odchylenia osi podłużnej soczewki, w której koncentruje się deformacja, od osi aparatu ścinania.

4.4. Wpływ wymiarów próbki i ziarna ośrodka na sposób wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego

Analiza rozkładów przemieszczenia w obszarze warstwy ścinania wskazuje, że graniczny stan naprężenia związany jest ściśle z etapem formowania się warstwy ścinania i może występować przy różnym odkształceniu zależnie m.in. od stosunku wymiaru próbki do wymiaru ziarna. Znając parametry warstwy ścinania w granicznym stanie naprężenia (grubość, orientację, rozkład przemieszczenia) oraz wymiary próbki i ziarna ośrodka można przewidzieć odkształcenie, przy którym powstanie stan graniczny [33]. Część wypadkowego odkształcenia ε_1 , związaną bezpośrednio z formowaniem się warstwy ścinania ε_{1s} , można wyrazić przy pomocy następujących wielkości: pochodnej cząstkowej przemieszczenia stycznego w kierunku normalnym do warstwy ścinania $\frac{\partial u_\xi}{\partial \eta}$, grubości warstwy ścinania nd i kąta α jaki tworzy oś podłużna warstwy ścinania z płaszczyzną działania naprężenia normalnego:

$$\varepsilon_{1s} = \frac{\frac{\partial u_\xi}{\partial \eta} nd \sin \alpha}{H} \quad (17)$$

gdzie: n - liczba nasion na grubości przekroju warstwy ścinania,

d - średni wymiar nasion (średnia średnica),

H - wysokość próbki,

α - kąt nachylenia osi warstwy ścinania do płaszczyzny działania naprężenia σ_1 .

W przypadku testu wykonanego dla nasion gorczycy białej wypadkowemu odkształceniu $\varepsilon_1 = 0,17$ odpowiadało odkształcenie $\varepsilon_{1s} = 0,106$. Oznacza to, że 60% odkształcenia osiowego ε_1 związane było bezpośrednio z formowaniem się warstwy ścinania zaś pozostałe 40% związane było z przygotowaniem warunków dla jej powstania (zmianą gęstości).

Określenie właściwych rozmiarów próbki nabiera szczególnego znaczenia w przypadku badań własności mechanicznych materiałów gruboziarnistych. Ze wzrostem wymiaru ziarna ośrodka w stosunku do wysokości próbki wzrasta odkształcenie względne, przy którym osiągnany jest graniczny stan naprężenia. Dokładność wyników pomiarów maleje ze wzrostem tego odkształcenia, ponieważ jednocześnie ulega zmianie pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki, względem którego liczone jest większe naprężenie główne.

Zależność (17) może być wykorzystana do optymalizacji wymiarów próbki materiału sypkiego uwzględniającej wymiar ziarna ośrodka. Mając narzuconą wartość odkształcenia, przy której próbka materiału powinna osiągnąć stan graniczny, stosunek wysokości próbki do średnicy ziarna (H/d) może być określony na podstawie tej zależności jako funkcja grubości warstwy ścinania (wyrażonej iloczynem średniej średnicy nasion d i liczby nasion n w warstwie) kąta pochylenia osi warstwy ścinania α do płaszczyzny działania większego naprężenia głównego σ_1 i odkształcenia ε_{1s} (części odkształcenia ε_1 wykorzystanej do uformowania warstwy ścinania o ustabilizowanej grubości):

$$\frac{H}{d} = \frac{\frac{\partial u_{\zeta}}{\partial \eta} n \sin \alpha}{\varepsilon_{1s}} \quad (18)$$

W przypadku próbki nasion gorczycy białej odkształconej do wartości $\varepsilon_1 = 0,17$, w zależności od liczby nasion n wyrażającej grubość warstwy ścinania, stosunek H/d wynosił 96 dla $n = 12$ oraz 128 dla $n = 16$. Stosunek ten był zatem kilkakrotnie wyższy niż jego graniczna (minimalna) wartość 40 zalecana przez normę Eurocode 1. Stosunek ten byłby jeszcze wyższy, gdyby rygorystycznie zastosować ograniczenie odkształcenia ε_1 do zalecanej przez normę wartości 0,05. Wymiary nasion wybranych do analizy procesu powstawania warstwy ścinania umożliwiały uzyskanie stosunku H/d w zakresie od 50 do 150 (Tabela 1). Oznacza to, że w przypadku nasion rzepaku oraz gorczycy białej stosunek ten odpowiadał oszacowanej wartości niezbędnej do pełnego uformowania się warstwy ścinania, zaś w przypadku pszenicy i grochu był jedynie zbliżony do zalecanej przez normę Eurocode 1 [19] wartości. Zastosowanie w praktyce uzyskanej z powyższych rozważań wartości stosunku wymiaru próbki do wymiaru ziarna ośrodka wymuszałoby stosowanie, w przypadku materiałów gruboziarnistych, próbek o bardzo dużych rozmiarach. Wiązałoby się to z poważnymi trudnościami natury technicznej podczas wykonywania testów.

Uznano zatem za bardziej właściwe ograniczenie stosunku wymiaru próbki do wymiaru ziarna ośrodka do zalecanej przez normę wartości $H/d = 40$, a w zamian za to poszukiwano innych dróg zmniejszenia błędu pomiaru wynikającego z nieuniknionego przekroczenia zalecanej przez normę wartości odkształcenia $\varepsilon_1 = 0,05$, przy którym osiągany zostaje graniczny stan naprężenia.

5. POMIARY KĄTA TARCIA WEWNĘTRZNEGO

Uwzględniając wyniki badań wpływu stosunku wymiaru próbki do wymiaru ziarna ośrodka na sposób wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego oraz istniejące różnicowanie wielkości, kształtu i właściwości powierzchniowych nasion - uznano, że wybór ziarna pszenicy i nasion rzepaku do pomiarów kąta tarcia wewnętrznego będzie wystarczająco odzwierciedlał duże różnicowanie właściwości fizycznych materiału. Przeprowadzenie badań na tych materiałach umożliwiło ponadto uzyskanie stosunku wymiaru próbki do wymiaru ziarna ośrodka w pobliżu (pszenica) oraz zdecydowanie powyżej (rzepak) zalecanej przez normę Eurocode 1 wartości 40.

- Zakres wymiarów dla ziarniaków pszenicy ozimej wynosi:

długość

najczęściej 5 mm,

między odmianami 3,7 do 7,2 mm,

szerokość

najczęściej 2,4 do 3,9 mm,

między odmianami 2 do 4 mm,

grubość

najczęściej 1,7 do 3,2 mm,

między odmianami 1,4 do 3,6 mm.

- Zakres wymiarów nasion rzepaku (średnica) wynosi: 1,2 do 2,8 mm, najczęściej 1,4 do 2,5 mm.

W testach bezpośredniego ścinania zbadano wpływ wilgotności na długość drogi dochodzenia materiału do granicznego stanu naprężenia. Do realizacji zadania zastosowano standardową metodę zalecaną przez normę Eurocode 1. Upraszcza ona metodykę pomiaru zaproponowaną przez Jenike'go i określa sposób konsolidacji próbki, który zastosowano w badaniach.

5.1. Metoda i materiał

5.1.1. Pomiar kąta tarcia wewnętrznego metodą trójosiowego ściskania

Celem tego etapu badań było określenie wpływu wilgotności i gęstości materiału na wartość odkształcenia niezbędnego do wytworzenia granicznego stanu naprężenia w materiale próbki. W tym przypadku norma Eurocode 1 [19] nie podaje warunków wstępnych dotyczących zagęszczania. Zaleca, aby warunki wstępne ustalać w zależności od przyjętego programu badań.

Testy trójosiowego ściskania przeprowadzono na ziarnie pszenicy ozimej odmiany Begra o wilgotności 10, 13, 15, 18, 20 i 22% oraz nasionach rzepaku jarego odmiany Licosmos o wilgotności: 7, 9, 12, 14 i 16%. Próbkę trójosiowego ściskania miały wysokość 0,30 m i średnicę 0,15 m.

Określenie wpływu gęstości na wartość odkształcenia, a tym samym na dokładność wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego, wymagało odpowiedniego zróżnicowania gęstości próbek. W takim bowiem przypadku, po analizie przebiegów naprężenie - odkształcenie, istniała możliwość stwierdzenia, jak dalece wyjściowa gęstość próbki różniła się od gęstości krytycznej.

Formowano próbki o kilku różnych gęstościach upakowania. Gęstość minimalną uzyskiwano napełniając formę równomiernym strumieniem nasion wzdłuż jej osi z najniższej możliwej wysokości przy pomocy leja nasypowego o średnicy otworu wylotowego 0,04 m. Pozostałe gęstości uzyskiwano poprzez wibracyjne zagęszczanie. Sinusoidalne drgania o częstotliwości 30 Hz i amplitudzie 5 mm przyłożone były prostopadle do osi podłużnej formy próbki. Czas wibracji dobierano tak, aby określona masa nasion wypełniła całkowicie objętość formy. Taki sposób postępowania umożliwiał utrzymanie stałości gęstości we wszystkich powtórzeniach. W przypadku ziarna pszenicy o wilgotności 22% zagęszczanie wibracyjne okazało się nieskuteczne, wobec czego gęstość maksymalną uzyskiwano zagęszczając kolejno dosypywane warstwy ziarna, o początkowej wysokości 0,06 m każda, poprzez sztywną pokrywę formy, do której przykładano siłę normalną 2 kN.

Wilgotność ziarna określano zgodnie z normą PN-91/A-74010 [71]. Zróżnicowanie wilgotności uzyskano przez dodawanie wody do materiału, który następnie mieszano przez 24 godziny w wolnoobrotowym mieszadle bębnowym. Porowatość warstwy ziarna wyznaczano piknometrem powietrznym.

Zestawienie parametrów próbek ziarna pszenicy i nasion rzepaku wszystkich wariantów eksperymentu, dla których wykonano testy trójosiowego ściskania, zamieszczono w Tabelach 4 i 5.

Gęstość usypną i utrżęszą ziarna pszenicy oraz nasion rzepaku określano zgodnie z normą PN-73/R-74007 [68]. Wyniki zamieszczono w Tabelach 6 i 7.

Tabela 4. Gęstość i porowatość próbek ziarna pszenicy

Table 4. Bulk density and porosity of samples of wheat grain

Gęstość ρ [kg/m ³]		Wilgotność [%]					
		Porowatość p [%]		10	13	15	18
Min. (A)	ρ	757,0	729,0	730,0	690,0	690,0	647,0
	p	46,9	41,8	47,6	53,5	51,7	55,3
Pośr. (P1)	ρ	790,0	750,0				
	p	44,6	40,1				
Pośr. (P2)	ρ		780,0				
	p		37,7				
Maks. (B)	ρ	826,0	822,0	822,0	770,0	766,0	840,0
	p	42,1	34,4	41,0	48,1	46,4	41,9

Tabela 5. Gęstość i porowatość próbek nasion rzepaku

Table 5. Bulk density and porosity of samples of rape seeds

Gęstość ρ [kg/m ³]		Wilgotność [%]				
		Porowatość p [%]		7	9	12
Min. (A)	ρ	670,0	676,2	687,0	680,0	675,1
	p	43,5	41,5	40,2	42,0	42,8
Maks. (B)	ρ	693,0	682,1	695,0	692,5	690,0
	p	41,9	41,5	42,75	42,0	42,8

Z porównania danych zamieszczonych w Tabelach 4 i 6 oraz 5 i 7 wynika, że zastosowane w badaniach skrajne wartości gęstości próbek były zbliżone do gęstości usypnej oraz gęstości utrżęsjonej.

Tabela 6. Gęstość usypna i utrząsiona ziarna pszenicy**Table 6.** Uncompacted bulk density and tapped density of wheat grain

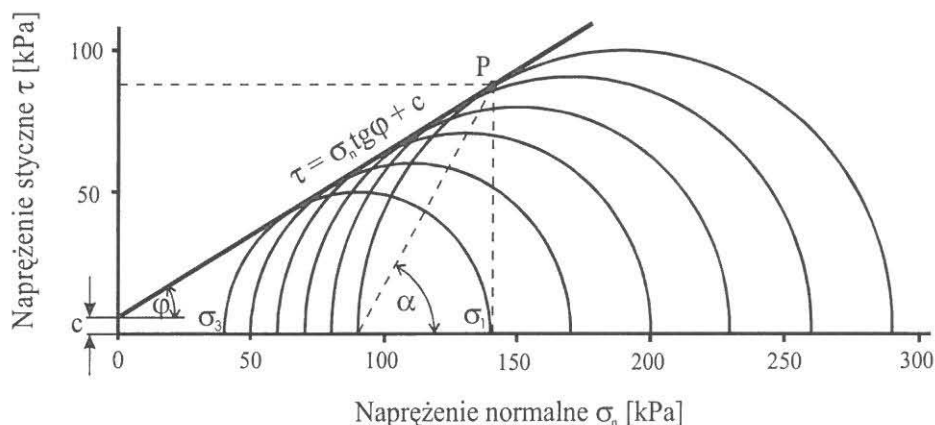
Gęstość [kg/m ³]	Wilgotność [%]					
	10	13	15	18	20	22
Usypna	770,2	763,2	694,4	704,8	713,5	652,2
Utrząsiona	871,0	860,8	861,0	868,3	823,7	757,4

Tabela 7. Gęstości usypna i utrząsiona nasion rzepaku**Table 7.** Uncompacted bulk density and tapped density of rape seeds

Gęstość [kg/m ³]	Wilgotność [%]				
	7	9	12	14	16
Usypna	650,0	661,0	655,0	660,0	668,0
Utrząsiona	657,0	761,0	760,0	759,0	760,0

Prędkość deformacji próbek podczas testu trójosiowego ściskania wynosiła 45 mm/min. Z metodycznego punktu widzenia powinna ona być na tyle mała, aby nie zachodziły w materiale zjawiska dynamiczne. Przyjęta prędkość deformacji nawiązywała do typowych prędkości przepływu materiału przy ścianie silosu (około 50 mm/min). W przypadku ziarna pszenicy pomiary przeprowadzono dla sześciu wartości mniejszego naprężenia głównego σ_3 w zakresie od 30 do 80 kPa, co 10 kPa. W przypadku nasion rzepaku pomiary przeprowadzono dla naprężeń σ_3 w zakresie od 40 do 90 kPa (Rys. 24). Wartości mniejszego naprężenia głównego σ_3 dobrano tak, aby odpowiadały zakresowi naporu występującego w silosach.

Każdy pomiar wykonywano w trzech powtórzeniach. Siłę pionową, wywołującą deformację próbki, mierzono przy pomocy głowicy tensometrycznej o zakresie 10 kN z dokładnością ± 10 N, a przemieszczenie przy pomocy czujnika indukcyjnego o zakresie 0,1 m z dokładnością $\pm 0,2 \cdot 10^{-3}$ m. Przemieszczenie oraz siłę normalną rejestrowano za pośrednictwem systemu akwizycji danych Hewlett Packard 75000. Dla każdego wariantu eksperymentu (Tabele 4 i 5) kąt tarcia wewnętrznego wyznaczano na podstawie obwiedni 18 kół Mohra (6 wartości naprężenia σ_3 razy 3 powtórzenia). W sumie, dla 25 wariantów eksperymentu, wykonano 450 testów trójosiowego ściskania.



Rys. 24. Kąt tarcia wewnętrznego wyznaczany na podstawie nachylenia obwiedni kół Mohra.

Fig. 24. Angle of internal friction determined from the envelop of Mohr circles.

Kąt tarcia wewnętrznego φ i kohezję c wyznaczono na podstawie warunku plastyczności Coulomba-Mohra (Rys. 24):

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi + 2c \cos \varphi \quad (19)$$

Zapisanie równania (19) w postaci liniowej zależności $\sigma_1(\sigma_3)$ oraz wyznaczenie parametrów A i B regresji liniowej:

$$\sigma_1 = A \sigma_3 + B \quad (20)$$

dla danych pomiarowych σ_1 i σ_3 spełniających warunek plastyczności (19) pozwoliło wyznaczyć kąt tarcia wewnętrznego i kohezję z następujących zależności:

$$\varphi = \arcsin \frac{A-1}{A+1}, \quad c = \frac{B}{2\sqrt{A}} \quad \text{dla } A \geq 1 \quad (21)$$

Do obliczeń przyjmowano maksymalną wartość naprężenia σ_1 , co oznacza, że wyznaczano maksymalną wartość kąta tarcia wewnętrznego. Wyznaczane parametry φ i c odpowiadały zatem warunkowi plastyczności, który nie zawsze pokrywał się z warunkiem plastyczności reprezentującym ustalone płynięcie.

Odchylenie standardowe kąta tarcia wewnętrznego $\Delta\varphi$ oraz kohezji Δc wyznaczano na podstawie różniczek zupełnych znając wartość odchyżeń standardowych parametrów A i B prostej regresji:

$$\Delta\varphi = \left| \frac{\partial\varphi}{\partial A} \right| \Delta A \quad (22)$$

$$\Delta c = \left| \frac{\partial c}{\partial B} \right| \Delta B + \left| \frac{\partial c}{\partial A} \right| \Delta A \quad (23)$$

z następujących zależności:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta A}{\sqrt{A(A+1)}} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (24)$$

$$\Delta c = \frac{1}{2\sqrt{A}} \Delta B + \frac{B}{4A^{1.5}} \Delta A \quad (25)$$

gdzie: ΔA i ΔB – odchylenia standardowe parametrów prostej regresji.

Istotność różnic pomiędzy porównywanymi wartościami kąta tarcia wewnętrznego oraz kohezji badano stosując test identyczności prostych regresji [18].

5.1.2. Kompensacja wpływu zmian pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki na kąt tarcia wewnętrznego wyznaczany w teście trójosiowego ściskania

Wzrost wilgotności zwiększa podatność nasion na odkształcenia, co sprawia, że wytworzenie granicznego stanu naprężeń w materiale wilgotnym wymaga dużo większego odkształcenia próbki niż w materiale suchym. W konsekwencji, w trakcie deformacji próbki wzrasta również pole powierzchni przekroju poprzecznego prostopadłego do kierunku działania większego naprężenia głównego σ_1 . Powiększa to błąd pomiaru kąta tarcia wewnętrznego, gdyż do wyliczenia naprężenia σ_1 stosowana jest nominalna wartość pola powierzchni przekroju próbki (przed testem). W celu ograniczenia tego wpływu wprowadzono korekcję polegającą na uwzględnieniu zmiany pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki w obliczaniu większego naprężenia głównego σ_1 .

Zakładając, że objętość próbki V nie ulega zmianie w trakcie deformacji:

$$V = H(1 - \varepsilon_1)S_1 = HS = \text{const.} \quad (26)$$

średnie pole powierzchni S_1 przekroju poprzecznego odkształconej próbki można wyrazić jako funkcję odkształcenia ε_1 :

$$S_1 = \frac{S}{1 - \varepsilon_1} \quad (27)$$

Uzyskaną w ten sposób średnią wartość pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki zastosowano do wyznaczenia skorygowanej wartości większego naprężenia głównego σ_{1k} :

$$\sigma_{1k} = \sigma_3 + \frac{S(\sigma_1 - \sigma_3)}{S_1} = \sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \varepsilon_1), \quad (28)$$

którą użyto następnie do wyznaczenia kąta tarcia wewnętrznego korzystając z zależności (20).

5.1.3. Pomiary kąta tarcia wewnętrznego metodą bezpośredniego ścinania

Wykonując badania bezpośredniego ścinania szczególną uwagę zwrócono na długość drogi dochodzenia materiału do granicznego stanu naprężenia. Pomiary wykonano zgodnie z procedurą zalecaną przez normę Eurocode 1 [19] upraszczającą metodykę pomiaru zaproponowaną przez Jenike'go.

Pomiary kąta tarcia wewnętrznego przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania o średnicy komory pomiarowej $D = 0,21$ m i wysokości złoża ziarna $H = 0,08$ m. Średnicę komory pomiarowej dobrano tak, aby został spełniony, zalecany przez norę Eurocode 1, warunek – stosunek średnicy komory pomiarowej aparatu do maksymalnego wymiaru ziarna ośrodka (w tym przypadku ziarniaka pszenicy) wynosił co najmniej 40. Spełnienie tego warunku, zarówno dla ziarna pszenicy jak i dla nasion rzepaku, pozwoliło odstąpić od badania wpływu wielkości próbki (skrzynek, komór pomiarowych) na wyniki pomiarów. Wysokość złoża nasion również spełniała zalecany przez wspomnianą normę przedział ($H = 0,3$ do $0,4 D$). Aby uniknąć powstawania drgań ciernych w trakcie ścinania, które w przypadku ziarna pszenicy zanikają powyżej prędkości 10 mm/min [9], oraz ze względów technologicznych, przyjęto wartość prędkości ścinania równą 21 mm/min. Zgodnie z zaleceniem normy Eurocode 1 nasiona nasypywano do formy bez wibracji i innych sił zagęszczających,

a następnie przykładano obciążenie normalne $\sigma_n = 100$ kPa i wykonywano trzy standardowe obroty pokrywą komory aparatu o kąt 10° , w obu kierunkach, w celu konsolidacji próbki. Pomiar kąta tarcia wewnętrznego przeprowadzono w trzech powtórzeniach dla pięciu wartości naprężenia normalnego σ_n : 20, 40, 60, 80 i 100 kPa. W czasie pomiarów rejestrowano zależność naprężenia ścinającego od przemieszczenia $\tau(\Delta L)$. Siłę styczną mierzono przy pomocy głowicy tensometrycznej o nominalnej wartości 2 kN z dokładnością ± 4 N [51]. Kąt tarcia wewnętrznego i kohezję obliczono z zależności:

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + c \quad (29)$$

gdzie: τ - naprężenie ścinające,
 σ_n - naprężenie normalne,
 c - kohezja,
 φ - kąt tarcia wewnętrznego.

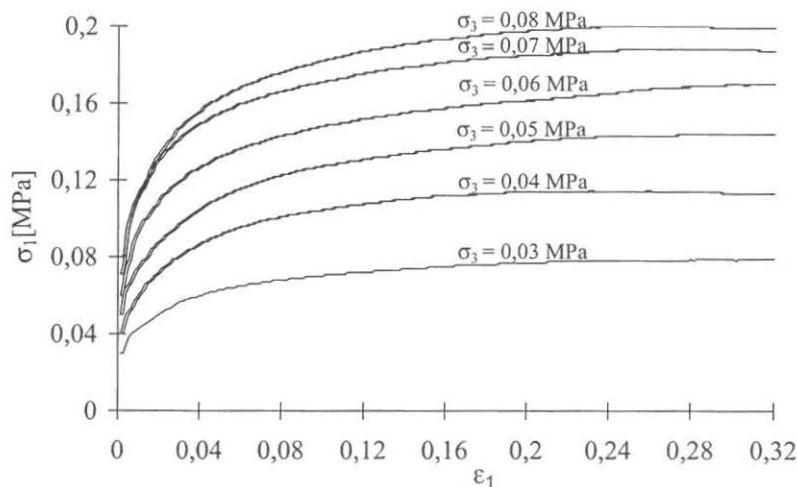
Kąt tarcia wewnętrznego wyznaczano wykorzystując maksymalną wartość naprężenia ścinającego τ . Badania przeprowadzono dla ziarna pszenicy odmiany Begra i nasion rzepaku odmiany Licosmos o pięciu wartościach wilgotności. Wilgotność ziarna pszenicy wynosiła: 10, 12, 15, 18 i 20% a nasion rzepaku: 7, 12, 14 i 16%.

5.2. Wpływ gęstości i wilgotności materiału na kąt tarcia wewnętrznego wyznaczany w teście trójosiowego ściskania

Pszenica

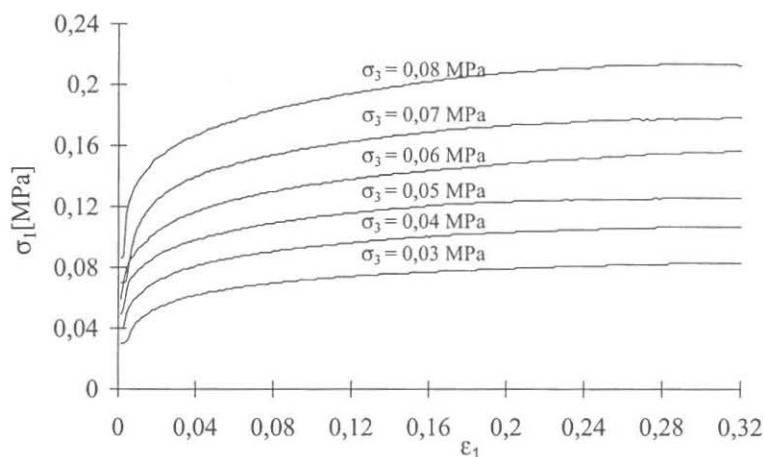
Rysunki 25 do 28 przedstawiają przebiegi zależności naprężenia σ_1 od odkształcenia ε_1 dla próbek ziarna pszenicy o wilgotności 13% i czterech wartościach gęstości. Wzrost gęstości próbek zmniejszał wartość odkształcenia ε_1 , przy którym przebiegi $\sigma_1(\varepsilon_1)$ osiągały maksima. Natomiast w znacznie mniejszym stopniu wpływał na maksymalną wartość naprężenia σ_1 .

Rysunki 29 do 34 przedstawiają wybrane przebiegi zależności naprężenia σ_1 od odkształcenia ε_1 dla próbek ziarna pszenicy o wszystkich przyjętych do badań wartościach wilgotności, dla skrajnych wartości mniejszego naprężenia głównego σ_3 oraz gęstości: minimalnej (A) i maksymalnej (B) - Tabela 4.



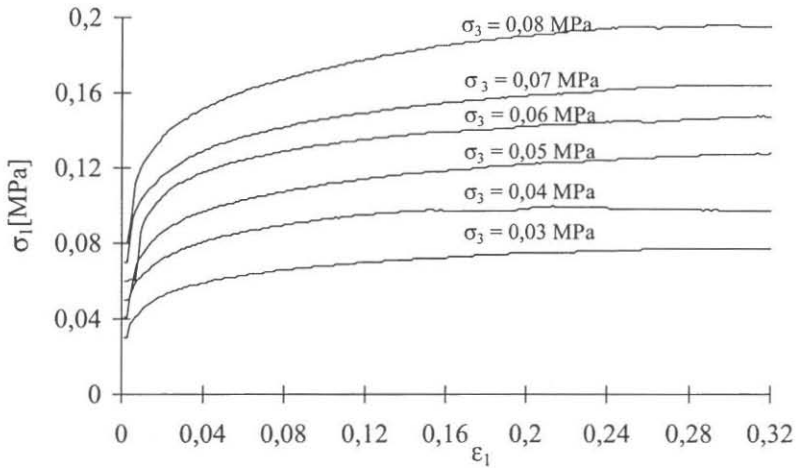
Rys. 25. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\varepsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 13% i gęstości $\rho = 729 \text{ kg/m}^3$ (A).

Fig. 25. Stress-strain relationships $\sigma_1(\varepsilon_1)$ for the wheat grain samples variety Begra of the moisture content of 13% and the bulk density $\rho = 729 \text{ kg/m}^3$ (A).



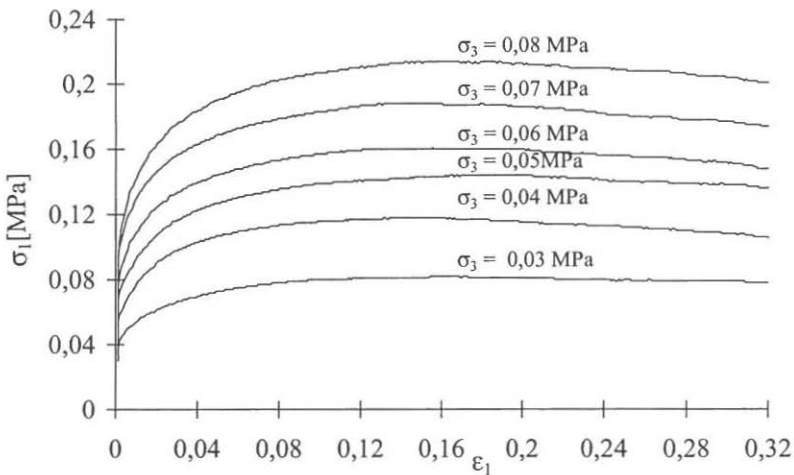
Rys. 26. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\varepsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 13% i gęstości $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$ (P1).

Fig. 26. Stress-strain relationships $\sigma_1(\varepsilon_1)$ for the wheat grain samples variety Begra of the moisture content of 13% and the bulk density $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$ (P1).



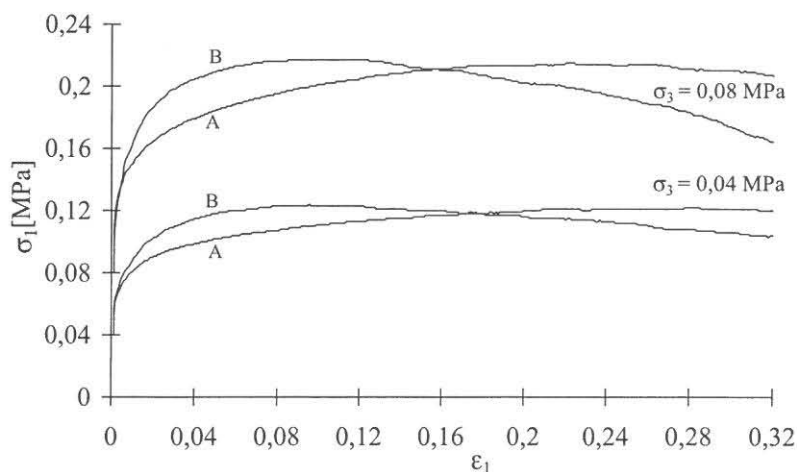
Rys. 27. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\varepsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 13% i gęstości $\rho = 780 \text{ kg/m}^3$ (P2).

Fig. 27. Stress-strain relationships $\sigma_1(\varepsilon_1)$ for the wheat grain samples variety Begra of the moisture content of 13% and the bulk density $\rho = 780 \text{ kg/m}^3$ (P2).



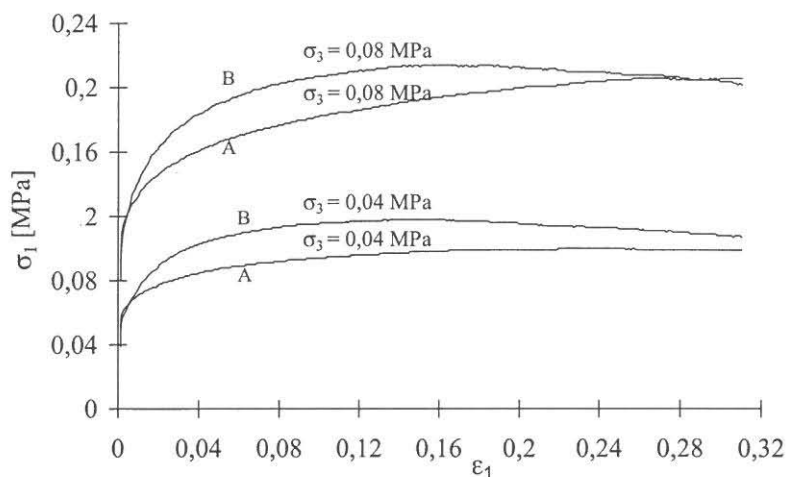
Rys. 28. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\varepsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 13% i gęstości $\rho = 822 \text{ kg/m}^3$ (B).

Fig. 28. Stress-strain relationships $\sigma_1(\varepsilon_1)$ for the wheat grain samples variety Begra of the moisture content of 13% and the bulk density $\rho = 822 \text{ kg/m}^3$ (B).



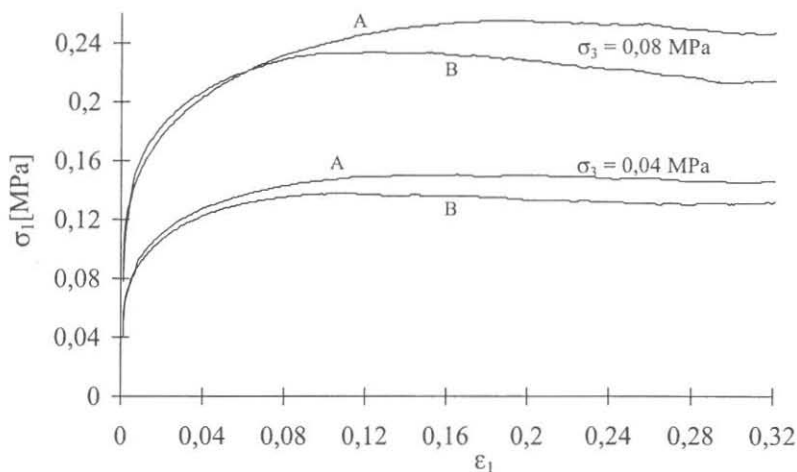
Rys. 29. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\epsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 10% i gęstości $\rho = 757 \text{ kg/m}^3$ (A) oraz 826 kg/m^3 (B).

Fig. 25. Stress-strain relationships $\sigma_1(\epsilon_1)$ for the wheat grain samples variety Begra of the moisture content of 10% and the bulk density $\rho = 757 \text{ kg/m}^3$ (A) and 826 kg/m^3 (B).



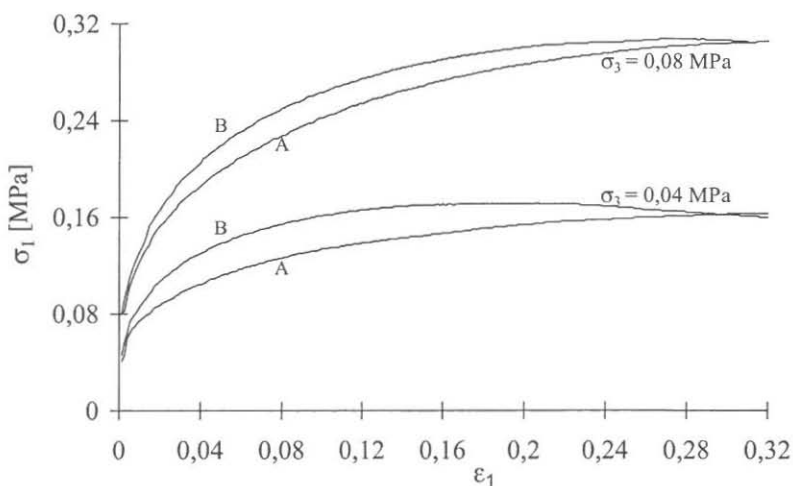
Rys. 30. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\epsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 13% i gęstości $\rho = 729 \text{ kg/m}^3$ (A) oraz 780 kg/m^3 (P2).

Fig. 30. Stress-strain relationships $\sigma_1(\epsilon_1)$ for the wheat grain samples variety Begra of the moisture content of 13% and the bulk density $\rho = 729 \text{ kg/m}^3$ (A) and 780 kg/m^3 (P2).



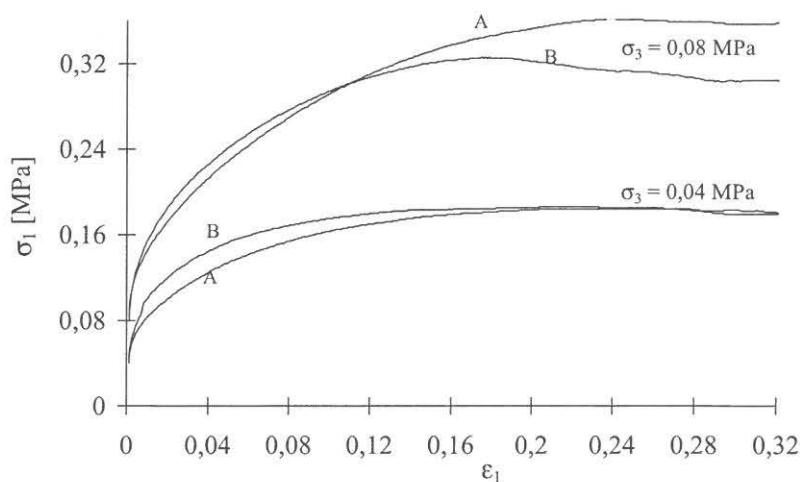
Rys. 31. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\varepsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 15% i gęstości $\rho = 730 \text{ kg/m}^3$ (A) oraz 822 kg/m^3 (B).

Fig. 31. Stress-strain relationships $\sigma_1(\varepsilon_1)$ for the wheat grain samples variety Begra of the moisture content of 15% and the bulk density $\rho = 730 \text{ kg/m}^3$ (A) and 822 kg/m^3 (B).



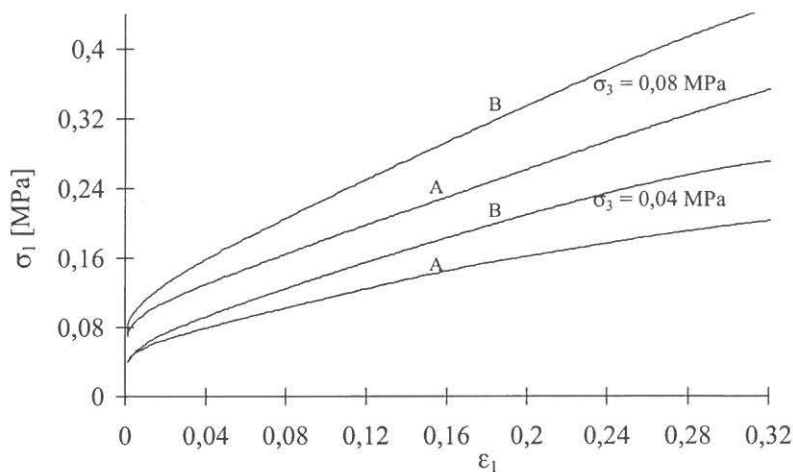
Rys. 32. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\varepsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 18% i gęstości $\rho = 690 \text{ kg/m}^3$ (A) oraz 770 kg/m^3 (B).

Fig. 32. Stress-strain relationships $\sigma_1(\varepsilon_1)$ for the wheat grain samples variety Begra of the moisture content of 18% and the bulk density $\rho = 690 \text{ kg/m}^3$ (A) and 770 kg/m^3 (B).



Rys. 33. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\varepsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 20% i gęstości $\rho = 690 \text{ kg/m}^3$ (A) oraz 766 kg/m^3 (B).

Fig. 33. Stress-strain relationships $\sigma_1(\varepsilon_1)$ for the wheat grain samples variety Begra of the moisture content of 20% and the bulk density $\rho = 690 \text{ kg/m}^3$ (A) and 766 kg/m^3 (B).

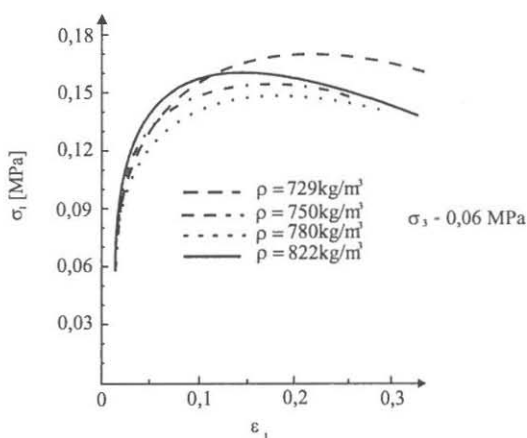


Rys. 34. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\varepsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 22% i gęstości $\rho = 647 \text{ kg/m}^3$ (A) oraz 840 kg/m^3 (B).

Fig. 34. Stress-strain relationships $\sigma_1(\varepsilon_1)$ for the wheat grain samples variety Begra of the moisture content of 22% and the bulk density $\rho = 647 \text{ kg/m}^3$ (A) and 840 kg/m^3 (B).

Przebiegi σ_1 - ε_1 zależą od wilgotności i gęstości nasion oraz od wartości mniejszego naprężenia głównego σ_3 . W przypadku próbek zagęszczonych ze wzrostem wilgotności w przedziale 10 do 20% odkształcenie ε_1 , przy którym naprężenie σ_1 osiągało maksimum, rosło w zakresie od około 0,1 do 0,2. W przypadku próbek niezagęszczonych naprężenie σ_1 osiągało maksimum jedynie dla ziarna o wilgotności 10% i występowało przy odkształceniu $\varepsilon_1 = 0,24$. Dla wyższych wilgotności ziarna naprężenie σ_1 wzrastało do ustalonej wartości bądź, w przypadku ziarna o wilgotność 22%, ciągle rosło nie osiągając wartości ustalonej. W przypadku próbek zagęszczonych, wraz ze wzrostem mniejszego naprężenia głównego σ_3 , rosło odkształcenie ε_1 , przy którym naprężenie σ_1 osiągało maksimum.

Porównanie przebiegów σ_1 - ε_1 dla próbek zagęszczonych i niezagęszczonych wskazuje, że gęstość próbek zagęszczonych była wyższa od krytycznej, zaś niezagęszczonych niższa. Zmiany gęstości w pobliżu gęstości krytycznej powodują jakościową zmianę właściwości mechanicznych próbki. W zakresie zmian gęstości rozważanych w niniejszej pracy, wzrost gęstości próbek powodował ilościową zmianę właściwości materiału wpływając na wartość $\sigma_{1\max}$. Wzrost gęstości powodował również, że maksimum naprężenia $\sigma_{1\max}$ przesuwało się w stronę coraz mniejszego odkształcenia $\varepsilon_{1\max}$ (Rys. 35; $\varepsilon_{1\max} = 0,1$ dla $\rho = 822\text{kg/m}^3$ oraz $\varepsilon_{1\max} = 0,22$ dla $\rho = 729\text{kg/m}^3$). Miało to bezpośredni wpływ na dokładność wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego.



Rys. 35. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\varepsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Bagra o wilgotności 13% i czterech wartościach gęstości ρ .

Fig. 35. Stress-strain relationships $\sigma_1(\varepsilon_1)$ for the wheat grain samples variety Bagra of the moisture content of 13% and four values of the bulk density ρ .

Efekt redukcji drogi dochodzenia próbki do granicznego stanu naprężenia, uzyskany dzięki przyjętemu sposobowi zagęszczania, malał ze wzrostem wilgotności. Przyczyną była zmiana charakteru deformacji ze wzrostem wilgotności. W powstawaniu deformacji materiału sypkiego uczestniczą przemieszczenia, obroty oraz deformacje poszczególnych ziaren [4]. Ich udział zależy od właściwości materiału sypkiego oraz stanu naprężenia. Ze wzrostem wilgotności ziarna rosło odkształcenie próbki konieczne do powstania warstwy ścinania. Wywołane to było coraz większym udziałem odkształceń pojedynczych ziarniaków. Dla ziarna o wilgotności 22% udział odkształceń poszczególnych ziarniaków w wypadkowym odkształceniu próbki był na tyle duży, że uniemożliwił wytworzenie w materiale granicznego stanu naprężenia (Rys. 34).

Przeprowadzone badania wykazały, że metoda trójosiowego ściskania pozwala na poprawny pomiar kąta tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy, gdy jej wilgotność nie przekracza 20%. Wyznaczone wartości kąta tarcia wewnętrznego i kohezji zamieszczono w Tabeli 8.

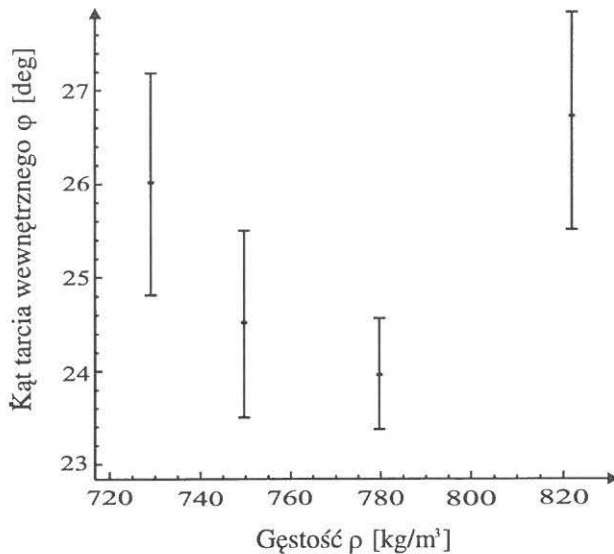
Tabela 8. Średnie wartości (z odchyleniem standardowym) kąta tarcia wewnętrznego i kohezji dla różnych wilgotności i gęstości próbek ziarna pszenicy

Table 8. Mean values (with standard deviation) of the angle of internal friction and cohesion for different levels of the moisture content and the bulk density of wheat grain samples

Gęstość	Kąt tarcia wewn φ [deg]	Wilgotność [%]					
		Kohezja c [kPa]	10	13	15	18	20
Min. (A)	φ		24,0 ±0,9	25,9 ±0,9	24,0 ±1,2	35,9 ±0,9	38,9 ±0,6
	c		9,0 ±1,8	2,1 ±1,4	21,0 ±2,8	2,7 ±2,7	3,0 ±1,8
Pośr. (P1)	φ		24,5 ±0,9	24,5 ±0,5			
	c		4,0 ±1,8	3,4 ±0,9			
Pośr. (P2)	φ			24,0 ±0,3			
	c			1,9 ±0,5			
Maks. (B)	φ		23,3 ±0,4	26,7 ±0,6	26,5 ±0,7	33,2 ±0,6	35,3 ±0,8
	c		11,0 ±1,3	1,6 ±1,0	10,0 ±2,8	10,0 ±1,5	9,5 ±2,4

Współczynniki determinacji R^2 prostych regresji, na podstawie których wyznaczano kąt tarcia wewnętrznego i kohezję (równanie 20), były nie mniejsze niż 99% [18]. Otrzymane wyniki wskazują, że kohezja była na ogół istotnie różna od zera. W tabeli pominięto wyniki dla ziarna o wilgotności 22%, gdyż w tym przypadku naprężenie monotonicznie rosło wraz ze wzrostem odkształcenia ε_1 nie osiągając stanu granicznego, a zatem brak było kryterium pozwalającego stwierdzić czy materiał osiągnął stan uplastycznienia.

Wpływ gęstości na wartość kąta tarcia wewnętrznego wygodnie jest prześledzić na przykładzie ziarna o wilgotności 13% (Rys. 36). W przypadku próbki uformowanej luźno (bez zagęszczania) kąt tarcia wewnętrznego φ jest zbliżony do kąta uzyskanego dla próbki maksymalnie zagęszczonej. Obie te wartości są istotnie większe od minimum uzyskanego dla gęstości 780 kg/m^3 . W przypadku próbki maksymalnie zagęszczonej wzrost wartości kąta tarcia wewnętrznego należy tłumaczyć przeksolidowaniem materiału powyżej gęstości krytycznej.

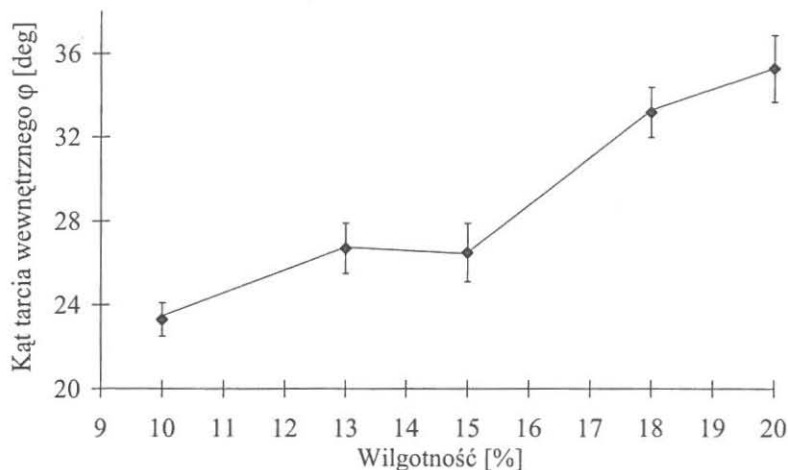


Rys. 36. Średnie wartości kąta tarcia wewnętrznego (oraz 95% przedziały ufności) próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 13% i czterech poziomach gęstości wyznaczone w teście trójosiowego ściskania.

Fig. 36. Mean values of the angle of internal friction (with 95% confidence intervals) of the wheat grain samples variety Begra of the moisture content of 13% and four levels of the bulk density determined in the triaxial compression test.

Model ośrodka sypkiego ze wzmocnieniem gęstościowym wyjaśnia przyczynę wzrostu kąta tarcia wewnętrznego ze wzrostem gęstości powyżej gęstości krytycznej [60]. Z kolei wzrost kąta tarcia wewnętrznego w miarę zmniejszania gęstości poniżej gęstości krytycznej tłumaczyć należy błędem systematycznym pomiaru wzrastającym w miarę zmniejszania gęstości. Błąd ten wynika z wydłużenia drogi ścinania próbki w miarę zmniejszania jej gęstości. Oznacza to, że najlepsze warunki pomiaru kąta tarcia wewnętrznego ustalonego płynięcia występują przy takiej gęstości próbki, przy której uzyskuje się najmniejszą wartość kąta tarcia wewnętrznego. Wówczas próbka nie jest ani przekonsolidowana, co mogłoby prowadzić do wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego dla stanu maksymalnej wytrzymałości, ani zbyt luźna, co z kolei może wprowadzać znaczny błąd pomiaru.

Wpływ wilgotności najłatwiej jest prześledzić na podstawie próbek maksymalnie zagęszczonych. Zależność kąta tarcia wewnętrznego od wilgotności dla próbek zagęszczonych przedstawia Rys. 37. Można przyjąć, że w zakresie wilgotności 10 do 20% kąt tarcia wewnętrznego rośnie liniowo ze wzrostem wilgotności.



Rys. 37. Średnie wartości kąta tarcia wewnętrznego (oraz 95% przedziały ufności) dla zagęszczonych próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o pięciu poziomach wilgotności wyznaczone w teście trójosiowego ściskania.

Fig. 37. Mean values of the angle of internal friction (with 95% confidence intervals) of compacted samples of wheat grain variety Begra for five levels of the moisture content determined in the triaxial compression test.

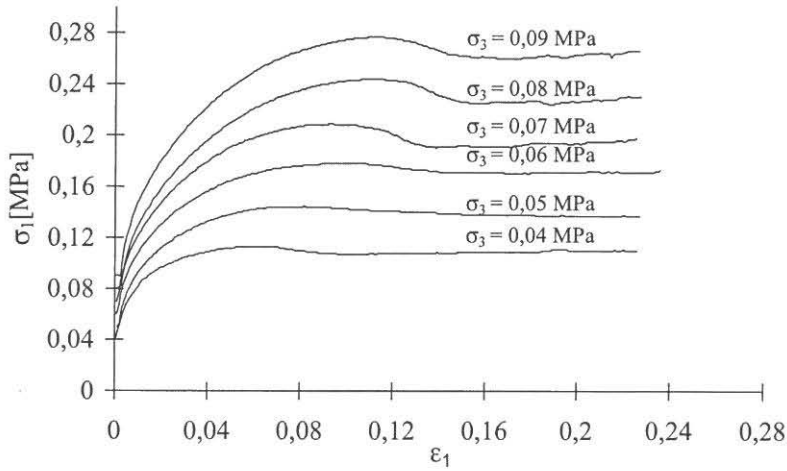
W przypadku ziarna o wilgotności powyżej 20 % najwłaściwsze wydaje się oszacowywanie kąta tarcia wewnętrznego na podstawie pomiaru kąta naturalnego usypu. W metodzie tej naprężenie w złożu materiału jest najmniejsze spośród wszystkich innych metod [10]. Dzięki temu istotnie redukuje się odkształcenie ziarniaków utrudniające pomiar innymi metodami. Zmierzony kąt naturalnego usypu dla ziarna o wilgotności 22% wyniósł $39,3^\circ$, co dobrze korespondowało z omawianym zakresem zmian wartości kąta tarcia wewnętrznego.

Rzepak

Rysunki 38 do 39 przedstawiają przebiegi zależności naprężenia σ_1 od odkształcenia ε_1 dla próbek nasion rzepaku o wilgotności 9% oraz dwóch wartości gęstości. Dla próbek zagęszczonych maksimum naprężenia σ_1 występowało przy odkształceniu zbliżonym do występującego w przypadku próbek niezagęszczonych. Wzrost mniejszego naprężenia głównego σ_3 - zarówno dla przypadku próbek zagęszczonych, jak i niezagęszczonych - powodował, że rosło odkształcenie ε_1 , przy którym naprężenie σ_1 osiągało maksimum.

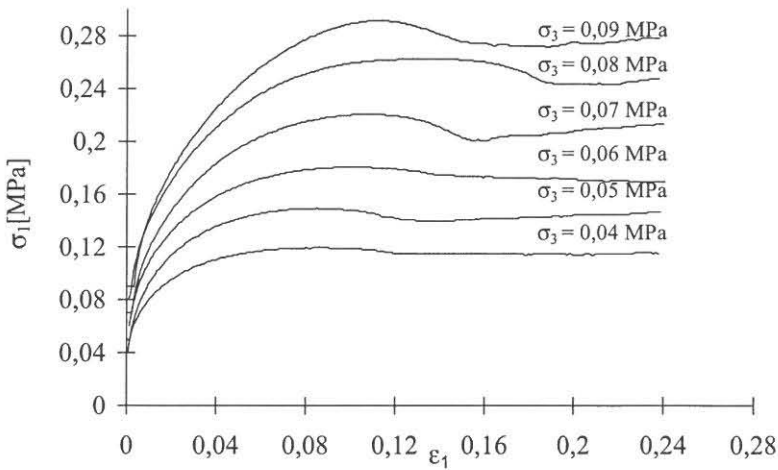
Rysunki 40 do 44 przedstawiają wybrane przebiegi zależności naprężenia σ_1 od odkształcenia ε_1 dla próbek nasion rzepaku uzyskane przy skrajnych wartościach mniejszego naprężenia głównego σ_3 dla dwóch gęstości (A) i (B) – Tabela 5.

Ze wzrostem wilgotności próbek zagęszczonych rosło odkształcenie ε_1 , przy którym naprężenie σ_1 osiągało maksimum. Przy wilgotności 7% odkształcenie wynosiło 0,08, zaś przy wilgotności 16% 0,22. W przypadku próbek niezagęszczonych o wilgotności 7% naprężenie σ_1 wzrastało monotonicznie do pewnej ustalonej wartości. Natomiast w przypadku wyższych wilgotności naprężenie σ_1 osiągało wyraźne maksimum. Oznaczać to może, że wyjściowa gęstość próbek niezagęszczanych o wilgotności 7% była zbliżona do gęstości krytycznej, o czym świadczy asymptotyczne dochodzenie naprężenia σ_1 do stabilnej wartości. W przypadku wilgotności 9% gęstość wyjściowa - zarówno próbek niezagęszczanych jak i zagęszczanych - była wyższa od gęstości krytycznej, co powodowało, że można było obserwować występowanie wyraźnego maksimum naprężenia σ_1 .



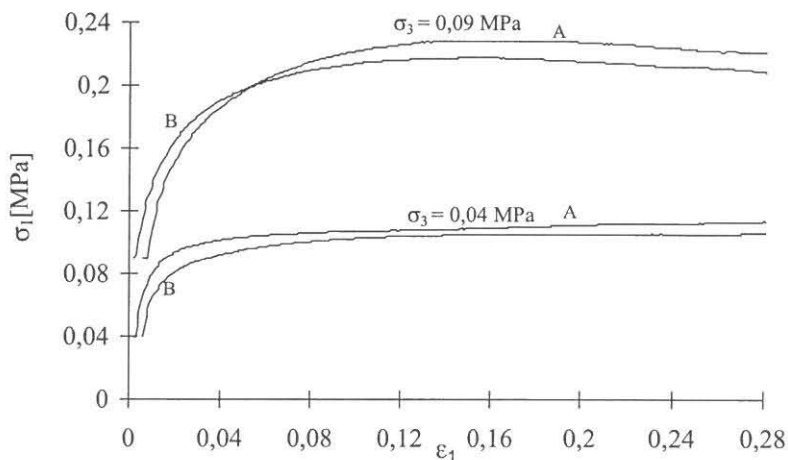
Rys. 38. Zależności napężenie-odkształcenie $\sigma_1(\epsilon_1)$ dla próbek nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności 9% i gęstości 676 kg/m^3 (A).

Fig. 38. Stress-strain relationships $\sigma_1(\epsilon_1)$ for the rape seeds samples variety Licosmos of the moisture content of 9% and the bulk density of 676 kg/m^3 (A).



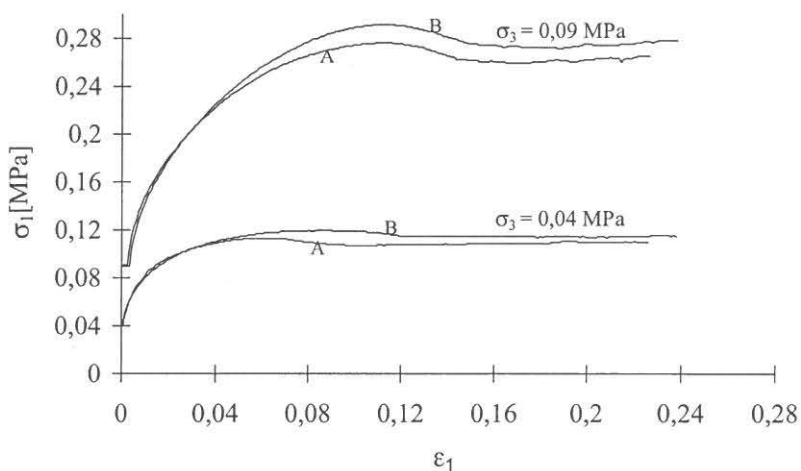
Rys. 39. Zależności napężenie-odkształcenie $\sigma_1(\epsilon_1)$ dla próbek nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności 9% i gęstości 682 kg/m^3 (B).

Fig. 39. Stress-strain relationships $\sigma_1(\epsilon_1)$ for the rape seeds samples variety Licosmos of the moisture content of 9% and the bulk density of 682 kg/m^3 (B).



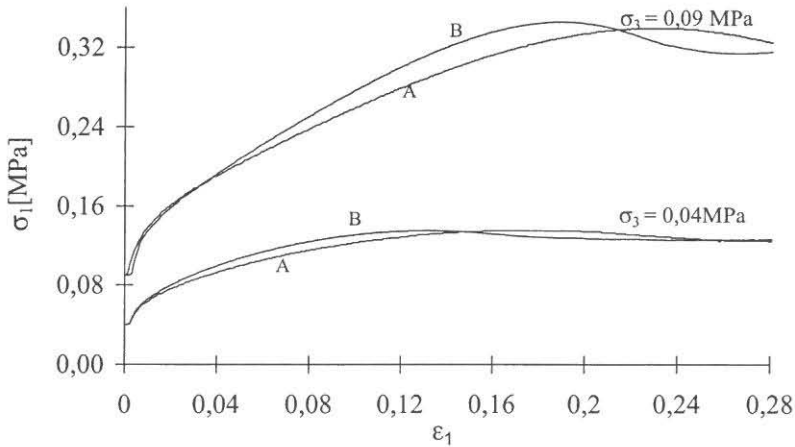
Rys. 40. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\epsilon_1)$ dla próbek nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności 7% i gęstości 670 kg/m^3 (A) oraz 693 kg/m^3 (B).

Fig. 40. Stress-strain relationships $\sigma_1(\epsilon_1)$ for the rape seeds samples variety Licosmos of the moisture content of 7% and the bulk density of 670 kg/m^3 (A) and 693 kg/m^3 (B).



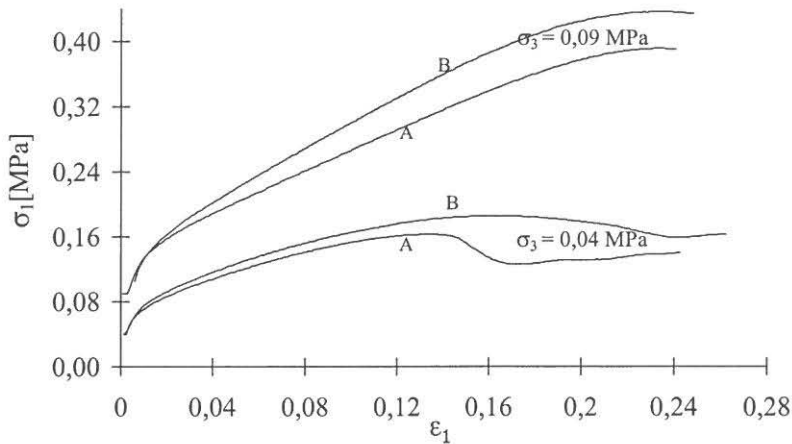
Rys. 41. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\epsilon_1)$ dla próbek nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności 9% i gęstości 676 kg/m^3 (A) oraz 682 kg/m^3 (B).

Fig. 41. Stress-strain relationships $\sigma_1(\epsilon_1)$ for the rape seeds samples variety Licosmos of the moisture content of 9% and the bulk density of 676 kg/m^3 (A) and 682 kg/m^3 (B).



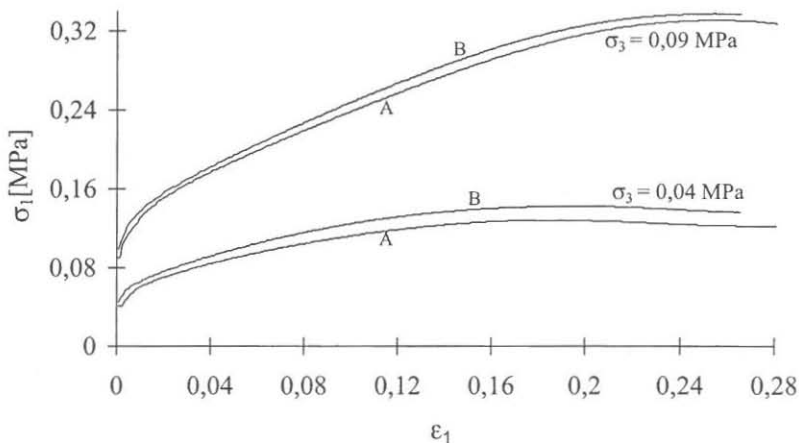
Rys. 42. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\epsilon_1)$ dla próbek nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności 12% i gęstości 687 kg/m³ (A) oraz 695 kg/m³ (B).

Fig. 42. Stress-strain relationships $\sigma_1(\epsilon_1)$ for the rape seeds samples variety Licosmos of the moisture content of 12% and the bulk density of 687 kg/m³ (A) and 695 kg/m³ (B).



Rys. 43. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\epsilon_1)$ dla próbek nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności 14% i gęstości 680 kg/m³ (A) oraz 692 kg/m³ (B).

Fig. 43. Stress-strain relationships $\sigma_1(\epsilon_1)$ for the rape seeds samples variety Licosmos of the moisture content of 14% and the bulk density of 680 kg/m³ (A) and 692 kg/m³ (B).



Rys. 44. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\varepsilon_1)$ dla próbek nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności 16% i gęstości 675 kg/m^3 (A) oraz 690 kg/m^3 (B).

Fig. 44. Stress-strain relationships $\sigma_1(\varepsilon_1)$ for the rape seeds samples variety Licosmos of the moisture content of 16% and the bulk density of 675 kg/m^3 (A) and 690 kg/m^3 (B).

Wzrost gęstości nasion rzepaku miał niewielki wpływ na zmianę ich właściwości mechanicznych. Wynikało to prawdopodobnie ze zbyt małej różnicy pomiędzy gęstościami A i B (rzędu 3%) uzyskanej zastosowaną metodą zagęszczania. Wyraźny był natomiast wpływ wilgotności na wartość kąta tarcia wewnętrznego. W miarę wzrostu wilgotności rosło odkształcenie próbki potrzebne do powstania warstwy ścinania. Przyczyną był rosnący udział odkształceń pojedynczych nasion w wypadkowym odkształceniu próbki wraz ze wzrostem wilgotności. Przy wilgotności 14 oraz 16% gwałtownie wzrastało odkształcenie ε_1 , przy którym próbka osiągała stan graniczny, ze względu na dużą odkształcalność nasion. Powiększało to błąd oszacowania kąta tarcia wewnętrznego z powodu dużej zmiany pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki. Dla materiału o wilgotności 16% udział odkształceń poszczególnych nasion był na tyle duży, że graniczny stan naprężenia powstawał dopiero przy odkształceniu większym od 0,2 dla wszystkich wartości mniejszego naprężenia głównego σ_3 (Rys. 44). Ponieważ ze wzrostem wilgotności wzrastało odkształcenie próbki niezbędne do wytworzenia granicznego stanu naprężenia, wzrastał więc równocześnie systematyczny błąd oszacowania kąta tarcia wewnętrznego.

W przypadku próbek nasion rzepaku o wilgotności 16% odkształcenie było na tyle duże ($\varepsilon_1 > 0,2$), że przeprowadzony pomiar odbiegał zbyt daleko od metodyki pomiaru zalecanej przez normy. W związku z tym dla nasion rzepaku o wilgotności przekraczającej 16% (podobnie jak w przypadku ziarna pszenicy o wilgotności przekraczającej 20%) najwłaściwsze wydaje się oszacowywanie wartości kąta tarcia wewnętrznego na podstawie pomiaru kąta naturalnego usypu lub też stosowanie metod pomiarowych o nieograniczonej drodze ścinania (aparatus pierścieniowy).

Wyznaczone wartości kąta tarcia wewnętrznego i kohezji zamieszczono w Tabeli 9. Kąt tarcia wewnętrznego rósł ze wzrostem wilgotności nasion osiągając maksimum przy wilgotności 14%, a następnie malał.

Wyznaczona wartość parametru B regresji liniowej (równanie 20) była bardzo mała. Kumulacja błędów metodycznych i obliczeniowych powodowała, że wartość ta, oscylując w pobliżu zera, przyjmowała również wartości ujemne. Wyznaczona na tej podstawie kohezja na ogół nie różniła się istotnie od zera.

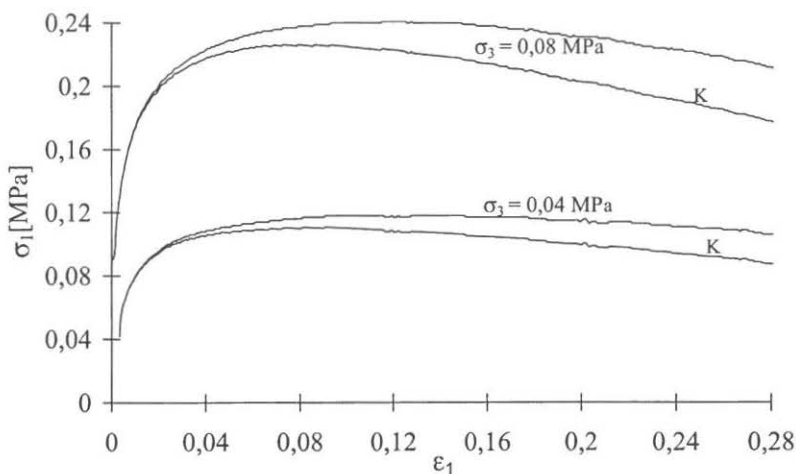
Tabela 9. Średnie wartości (z odchyleniem standardowym) kąta tarcia wewnętrznego oraz kohezji dla różnych wilgotności i gęstości próbek nasion rzepaku

Table 9. Mean values (with standard deviation) of the angle of internal friction and cohesion for different levels of the moisture content and the bulk density of rape seeds samples

Gęstość	Kąt tarcia wewn. φ [deg]	Wilgotność [%]				
		7	9	12	14	16
Min. (A)	Kohezja c [kPa]					
	φ	24,5 ± 1,22	31,9 ± 0,3	36,5 ± 0,5	41,7 ± 0,7	36,8 ± 1,0
Maks. (B)	c	3,5 ± 2,5	4,7 ± 0,8	-6,1 ± 2,7	-7,0 ± 3,3	-7,0 ± 4,7
	φ	19,32 ± 1,7	34,2 ± 0,7	38,6 ± 0,4	41,82 ± 0,4	35,7 ± 0,5
	c	1,2 ± 0,3	7,6 ± 2,0	-8,0 ± 4,3	-4,0 ± 3,5	-3,0 ± 2,4

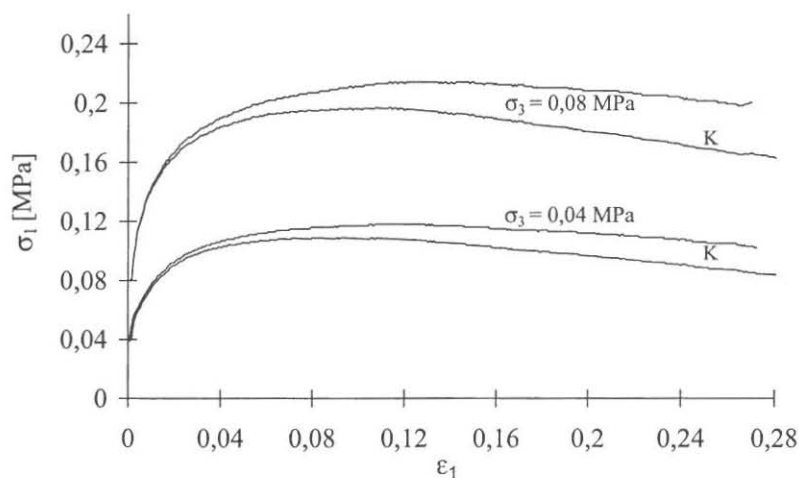
5.3. Wpływ zmian pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki trójosiowego ściskania na wynik pomiaru kąta tarcia wewnętrznego

Konsekwencją wprowadzenia korekcji zmian pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki do obliczeń naprężenia σ_1 w trakcie trójosiowego ściskania był spadek wartości naprężenia skorygowanego σ_{1k} w stosunku do wartości nominalnej naprężenia σ_1 (odnoszonej do początkowego pola powierzchni przekroju próbki) – tym większy, im większe było odkształcenie ε_1 (równanie 28). Rysunki 45 do 49 przedstawiają porównanie przebiegów zależności naprężenia σ_1 od odkształcenia ε_1 dla zagęszczonych próbek ziarna pszenicy o wilgotności 10 do 20%, z korekcją (K) i bez korekcji. Analogiczne porównanie przebiegów eksperymentalnych, z korekcją (K) i bez korekcji, dla zagęszczonych próbek nasion rzepaku o skrajnych wartościach wilgotności (7 i 16%) przedstawiają Rys. 50 i 51. Skorygowane przebiegi zależności $\sigma_1(\varepsilon_1)$ uwiadczniają maksima naprężenia σ_1 pojawiające się przy mniejszych odkształceniach ε_1 niż na przebiegach nieskorygowanych.



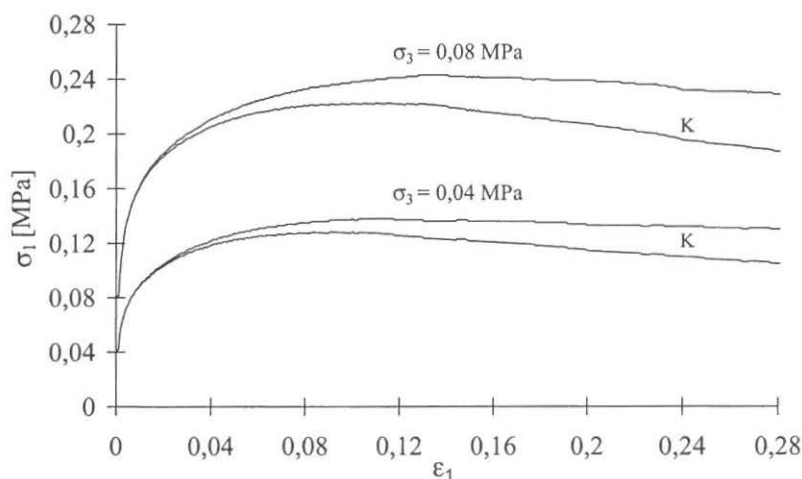
Rys. 45. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\varepsilon_1)$ dla zagęszczonych próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 10% z korekcją (K) i bez korekcji.

Fig. 45. Stress-strain relationships $\sigma_1(\varepsilon_1)$ for compacted samples of wheat grain variety Begra of the moisture content of 10% with correction (K) and without.



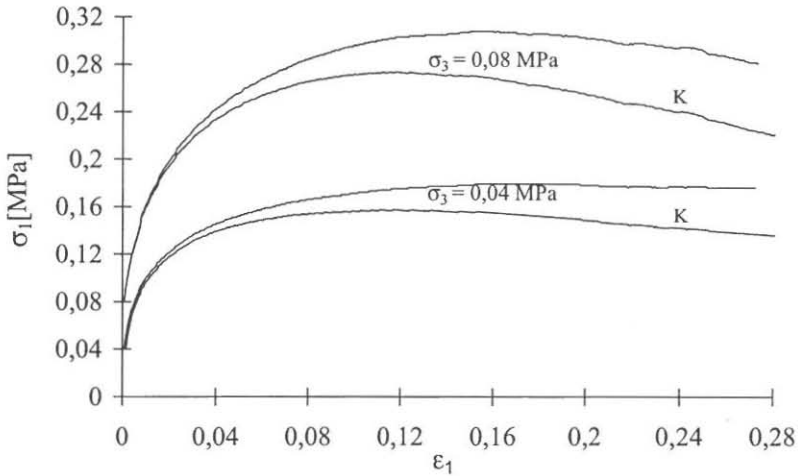
Rys. 46. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\epsilon_1)$ dla zagęszczonych próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 13% z korekcją (K) i bez korekcji.

Fig. 46. Stress-strain relationships $\sigma_1(\epsilon_1)$ for compacted samples of wheat grain variety Begra of the moisture content of 13% with correction (K) and without.



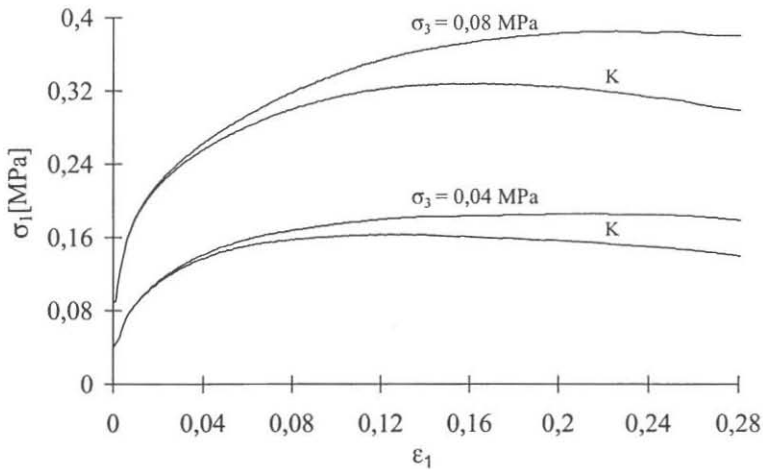
Rys. 47. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\epsilon_1)$ dla zagęszczonych próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 15% z korekcją (K) i bez korekcji.

Fig. 47. Stress-strain relationships $\sigma_1(\epsilon_1)$ for compacted samples of wheat grain variety Begra of the moisture content of 15% with correction (K) and without.



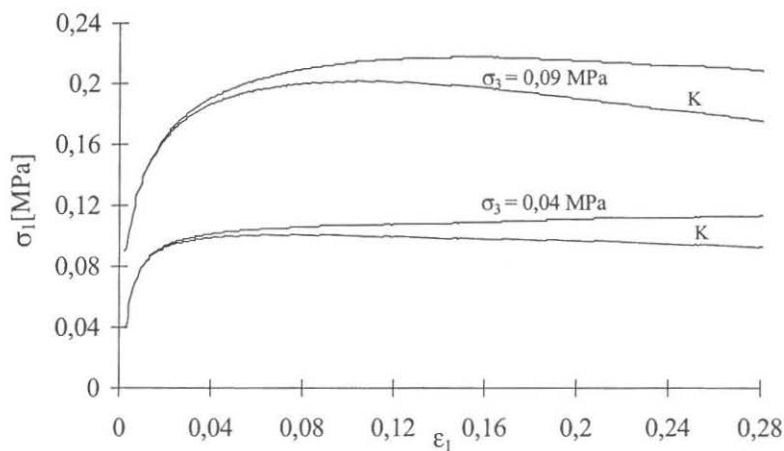
Rys. 48. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\epsilon_1)$ dla zagęszczonych próbek ziarna pszenicy odmiany Bega o wilgotności 18% z korekcją (K) i bez korekcji.

Fig. 48. Stress-strain relationships $\sigma_1(\epsilon_1)$ for compacted samples of wheat grain variety Bega of the moisture content of 18% with correction (K) and without.



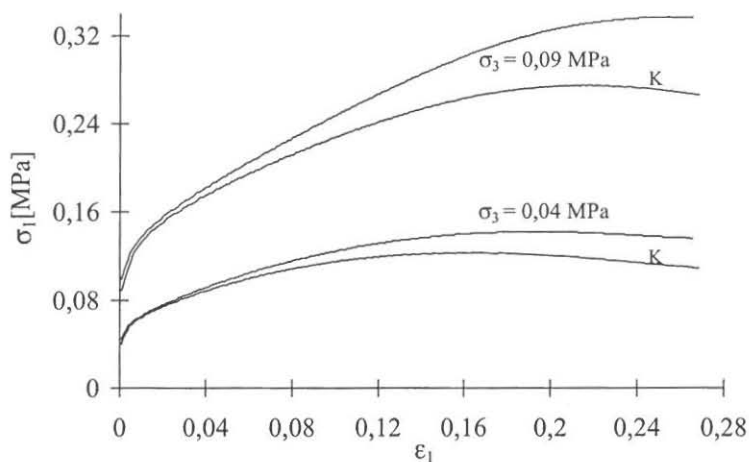
Rys. 49. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\epsilon_1)$ dla zagęszczonych próbek ziarna pszenicy odmiany Bega o wilgotności 20% z korekcją (K) i bez korekcji.

Fig. 49. Stress-strain relationships $\sigma_1(\epsilon_1)$ for compacted samples of wheat grain variety Bega of the moisture content of 20% with correction (K) and without.



Rys. 50. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\epsilon_1)$ dla zagęszczonych próbek nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności 7% z korekcją (K) i bez korekcji.

Fig. 50. Stress-strain relationships $\sigma_1(\epsilon_1)$ for compacted samples of rape seeds variety Licosmos of the moisture content of 7% with correction (K) and without.

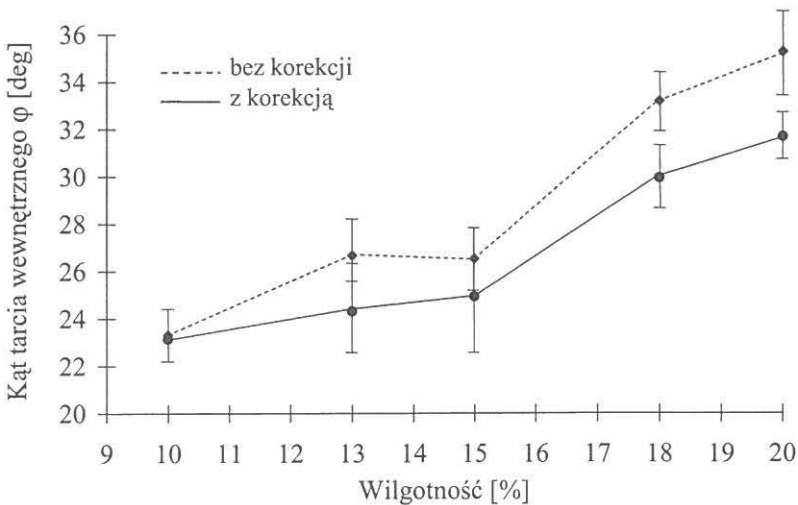


Rys. 51. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma_1(\epsilon_1)$ dla zagęszczonych próbek nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności 16% z korekcją (K) i bez korekcji.

Fig. 51. Stress-strain relationships $\sigma_1(\epsilon_1)$ for compacted samples of rape seeds variety Licosmos of the moisture content of 16% with correction (K) and without.

W przypadku dużej wilgotności nasion nieskorygowany przebieg $\sigma_1(\varepsilon_1)$ nie posiada maksimum ze względu na wzrost pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki w miarę wzrostu deformacji (Rys. 49 i 51). W przypadku przebiegów skorygowanych maksimum naprężenia σ_1 występowało przy odkształceniu ε_1 na ogół nie większym niż 0,1, a w skrajnym przypadku (próbka ziarna pszenicy o wilgotności 20%, $\sigma_3 = 80$ kPa) odkształcenie nie przekraczało 0,15.

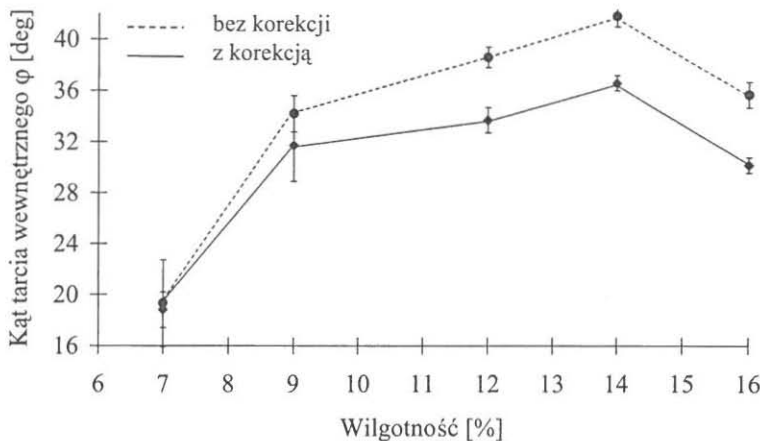
Rysunek 52 przedstawia średnie wartości kąta tarcia wewnętrznego zagęszczonych próbek ziarna pszenicy wyznaczone na podstawie skorygowanych i nieskorygowanych przebiegów zależności $\sigma_1(\varepsilon_1)$ dla pięciu poziomów wilgotności. W przypadku ziarna o wilgotności 10% nie stwierdzono jakiegokolwiek różnicy. Wynikało to z niewielkiej wartości odkształcenia ε_1 , przy której próbka o tej wilgotności osiągała graniczny stan naprężenia (Rys. 45). Wprowadzenie korekcji zmieniło istotnie wartości kąta tarcia wewnętrznego dla dwóch najwyższych poziomów wilgotności.



Rys. 52. Średnie wartości kąta tarcia wewnętrznego (oraz 95% przedziały ufności) dla zagęszczonych próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o pięciu poziomach wilgotności wyznaczone na podstawie skorygowanych i nieskorygowanych przebiegów $\sigma_1(\varepsilon_1)$.

Fig. 52. Mean values of the angle of internal friction (with 95% confidence intervals) of compacted samples of wheat grain variety Begra for five levels of the moisture content determined from corrected and not corrected $\sigma_1(\varepsilon_1)$ relationships.

Na Rys. 53 przedstawiono zależność kąta tarcia wewnętrznego od wilgotności dla zagęszczonych próbek nasion rzepaku wyznaczoną na podstawie skorygowanych i nieskorygowanych przebiegów $\sigma_1(\varepsilon_1)$. Dla próbek o wilgotności 7% różnica wartości kąta tarcia wewnętrznego była znikoma. Wynikało to, podobnie jak w przypadku ziarna pszenicy, z niewielkiej wartości odkształcenia ε_1 , przy której próbka osiągała graniczny stan naprężenia (Rys. 50). Podobnie jak w przypadku ziarna pszenicy wpływ korekcji rósł ze wzrostem wilgotności nasion. Począwszy od wilgotności 12% skorygowane wartości kąta tarcia wewnętrznego różniły się istotnie od wartości wyznaczanych bez korekcji naprężenia σ_1 .



Rys. 53. Średnie wartości kąta tarcia wewnętrznego (oraz 95% przedziały ufności) dla zagęszczonych próbek nasion rzepaku odmiany Licosmos o pięciu poziomach wilgotności wyznaczone na podstawie skorygowanych i nieskorygowanych przebiegów $\sigma_1(\varepsilon_1)$.

Fig. 53. Mean values of the angle of internal friction (with 95% confidence intervals) of compacted samples of rape seeds variety Licosmos for five levels of the moisture content determined from corrected and not corrected $\sigma_1(\varepsilon_1)$ relationships.

5.4. Wpływ wilgotności materiału na kąt tarcia wewnętrznego wyznaczany metodą bezpośredniego ścinania

Pszenica

Analiza zależności naprężenie ścinające - przemieszczenie $\tau(\Delta L)$ pozwoliła stwierdzić, że dla niskich wilgotności ziarna i dla naprężeń normalnych σ_n wyraźnie mniejszych od naprężenia konsolidującego, naprężenie styczne

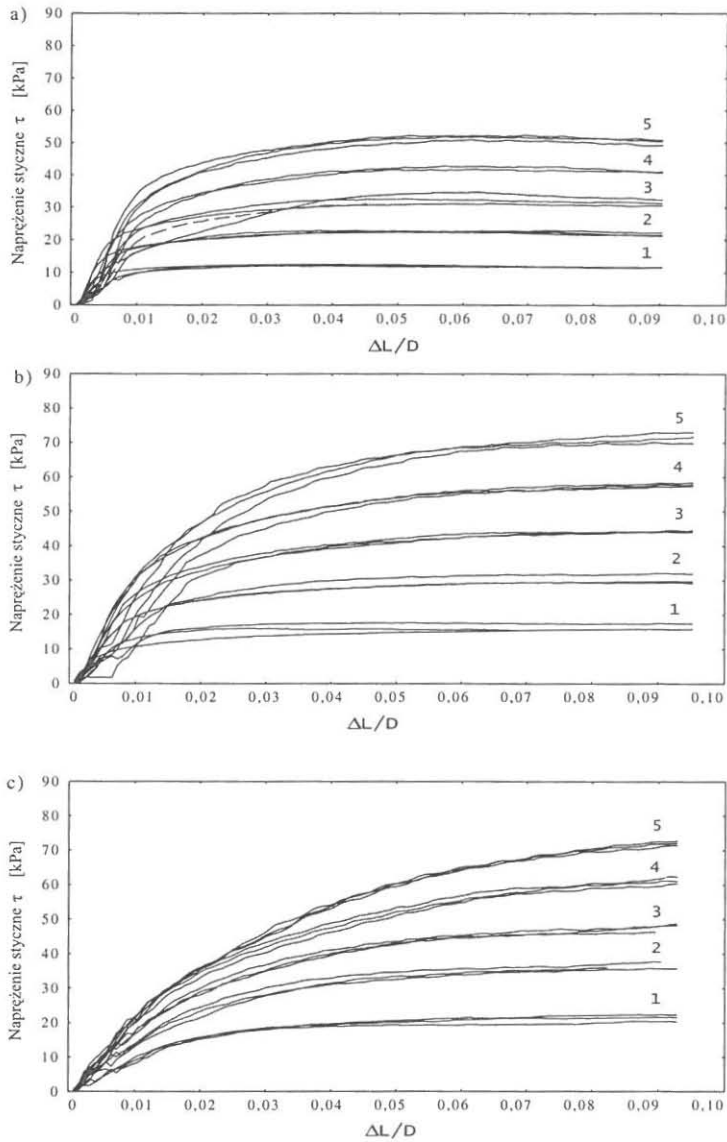
τ stabilizowało się przy niewielkim przemieszczeniu. Stosunek długości drogi ścinania do średnicy próbki $\Delta L/D$, przy którym następowała stabilizacja naprężenia τ , był mniejszy od 5% średnicy próbki, a zatem mieścił się w przedziale zalecanym przez normę Eurocode 1 [19] (Rys. 54a). Wzrost wilgotności ziarna wydłużał drogę ścinania. W przypadku wilgotności 20% stabilizacja naprężenia ścinającego, przy naporze normalnym 100 kPa, występowała przy przemieszczeniu wyraźnie wyższym od 5% średnicy próbki (Rys. 54b). W przypadku wilgotności ziarna 22% stabilizację naprężenia ścinającego uzyskano jedynie dla dwóch najniższych wartości naporu normalnego przy przemieszczeniu wynoszącym około 10% średnicy próbki (Rys. 54c), co nie dawało możliwości prawidłowego wyznaczenia kąta tarcia wewnętrznego. Wyniki badań bezpośredniego ścinania zestawiono w Tabeli 10.

Tabela 10. Średnie wartości (z odchyleniem standardowym) kąta tarcia wewnętrznego, kohezji oraz gęstości skonsolidowanych próbek ziarna pszenicy

Table 10. Mean values (with standard deviation) of the angle of internal friction, cohesion and compacted bulk densities of wheat grain samples

	Wilgotność [%]	Kąt tarcia Wewnętrznego φ [deg.]	Kohezja c [kPa]	Gęstość ρ [kg/m ³]
Pszenica Begra	10	25,7 ± 0,3	0,9 ± 0,5	867 ± 4
	12	26,2 ± 0,4	2,8 ± 0,5	858 ± 6
	15	27,0 ± 0,5	2,1 ± 0,7	890 ± 6
	18	33,0 ± 1,0	5,1 ± 0,5	802 ± 10
	20	35,5 ± 0,5	2,3 ± 0,9	819 ± 12

Współczynniki determinacji R^2 prostych regresji, na podstawie których wyznaczano kąt tarcia wewnętrznego i kohezję (równanie 29), były nie mniejsze niż 99%.

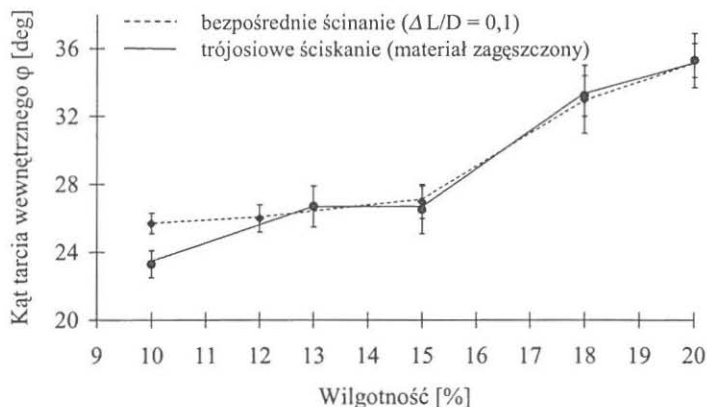


Rys. 54. Zależność naprężenia stycznego τ od ilorazu: przemieszczenie - średnica próbki $\Delta L/D$ dla ziarna pszenicy o wilgotności: a - 12%, b - 20%, c - 22%, przy następujących wartościach naprężenia normalnego σ_n : 1 - 20 kPa, 2 - 40 kPa, 3 - 60 kPa, 4 - 80 kPa, 5 - 100 kPa.

Fig. 54. Shear stress τ versus ratio of the displacement to the sample diameter $\Delta L/D$ for wheat grain of the following moisture contents: a - 11,7%, b - 20,0%, c - 22,0%, for the following values of the normal stress σ_n : 1 - 20 kPa, 2 - 40 kPa, 3 - 60 kPa, 4 - 80 kPa, 5 - 100 kPa.

Zalecana przez normę Eurocode 1 [19] procedura wstępnej konsolidacji materiału jest powtarzalna i łatwa do wykonywania. Spowodowany tą konsolidacją wzrost gęstości materiału redukował drogę ścinania. W pełnym zakresie zmian wilgotności ziarna kąt tarcia wewnętrznego rósł istotnie wraz ze wzrostem wilgotności. Kohezja była istotnie większa od zera i wykazywała tendencję wzrostu ze wzrostem wilgotności. Mimo to stosunek wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie do maksymalnej wartości większego naprężenia głównego, zwany indeksem płynięcia [39], na ogół był mniejszy niż 0,1, a zatem materiał taki można określić jako swobodnie płynący. Potwierdza to powszechnie akceptowany pogląd, że materiały sypkie o wielkości ziarna powyżej 0,25 mm na ogół płyną swobodnie [5, 43].

Rysunek 55 przedstawia porównanie wyznaczonych wartości kąta tarcia wewnętrznego z wartościami uzyskanymi metodą trójosiowego ściskania.



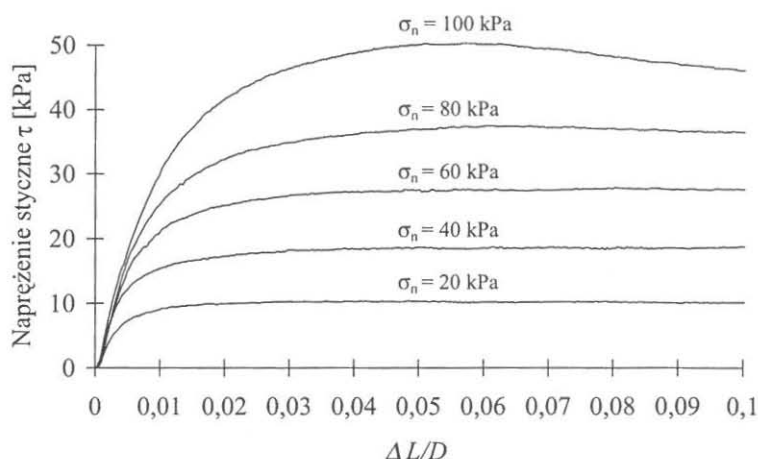
Rys. 55. Średnie wartości (wraz z 95% przedziałami ufności) kąta tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy o pięciu poziomach wilgotności wyznaczone metodą bezpośredniego ścinania i trójosiowego ściskania.

Fig. 55. Mean values (with 95% confidence intervals) of the angle of internal friction of wheat grain for five levels of the moisture content measured with the direct shear and the triaxial compression tests.

Wysoką zgodność wartości kąta tarcia wewnętrznego wyznaczanych dwoma metodami uzyskano dzięki rygorystycznemu i zgodnemu z przyjętymi normami przestrzeganiu procedury przygotowania próbek trójosiowego ścinania oraz rozszerzeniu w metodzie bezpośredniego ścinania zakresu przemieszczenia, w którym określane było maksimum naprężenia stycznego.

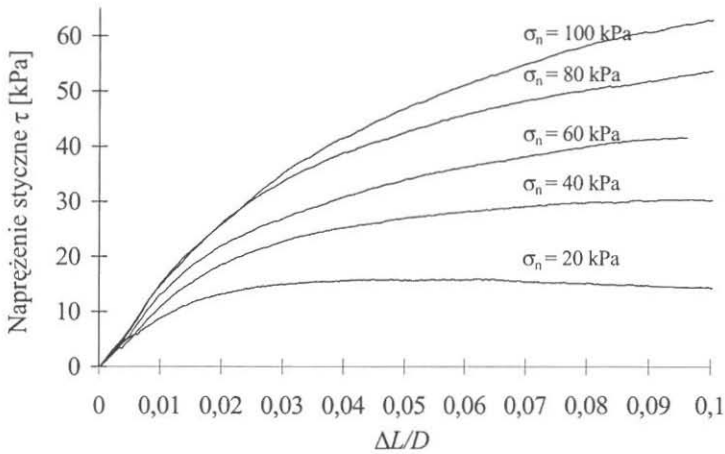
Rzepak

Dla niskiej wilgotności nasion (6%) stabilizacja naprężenia stycznego τ następowała już przy niewielkim stosunku przemieszczenia do średnicy próbki $\Delta L/D$ wynoszącym około 0,03 przy naprężeniu normalnym $\sigma_n = 20$ kPa i około 0,05 przy naprężeniu $\sigma_n = 100$ kPa (Rys. 56). Przemieszczenie to nie przekraczało wartości zalecanej przez normę Eurocode 1 (5% średnicy próbki). W miarę wzrostu wilgotności stabilizację naprężenia stycznego τ obserwowano tylko przy coraz niższych wartościach naprężenia normalnego. Przy naprężeniu normalnym zbliżonym do naprężenia konsolidacji przebiegi $\tau(\Delta L/D)$ nie osiągały stabilizacji nawet w zakresie przemieszczenia $\Delta L/D = 0,1$ (Rys. 57 i 58). Wartość kąta tarcia wewnętrznego dla próbek o wilgotności wyższej od 6% wyznaczono wykorzystując wartość naprężenia stycznego τ występującą przy przemieszczeniu $\Delta L/D = 0,1$.



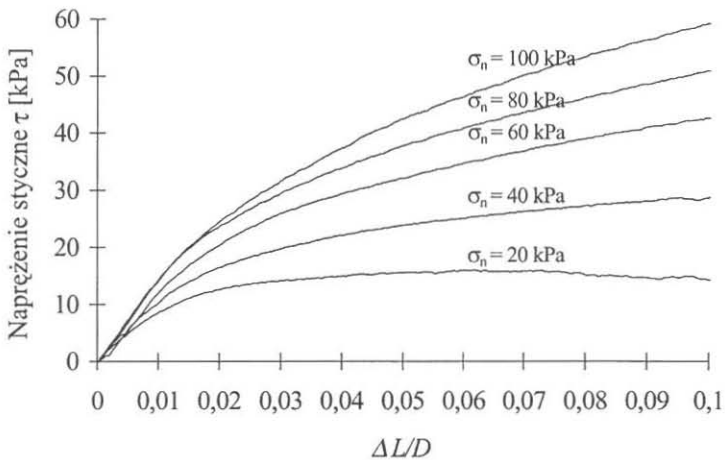
Rys. 56. Zależność naprężenia stycznego τ od ilorazu przemieszczenie - średnica próbki $\Delta L/D$ dla nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności 6%.

Fig. 56. Shear stress τ versus ratio of the displacement to the sample diameter $\Delta L/D$ for rape seeds variety Licosmos of the moisture content of 6%.



Rys. 57. Zależność naprężenia stycznego τ od ilorazu przemieszczenie - średnica próbki $\Delta L/D$ dla nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności 9%.

Fig. 57. Shear stress τ versus ratio of the displacement to the sample diameter $\Delta L/D$ for rape seeds variety Licosmos of the moisture content of 9%.



Rys. 58. Zależność naprężenia stycznego τ od ilorazu przemieszczenie - średnica próbki $\Delta L/D$ dla nasion rzepaku odmiany Licosmos o wilgotności 16%.

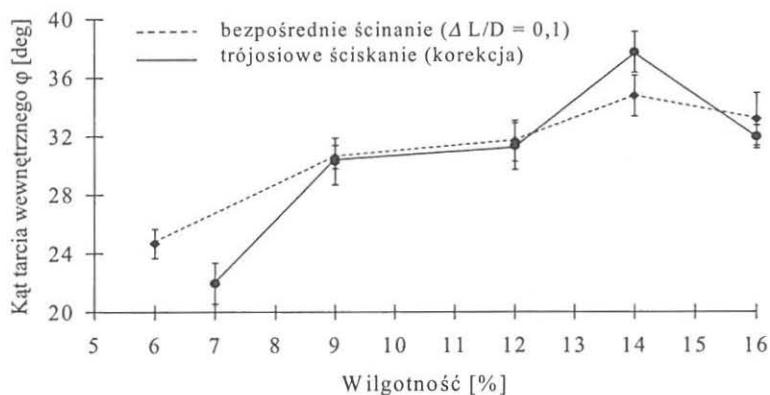
Fig. 58. Shear stress τ versus ratio of the displacement to the sample diameter $\Delta L/D$ for rape seeds variety Licosmos of the moisture content of 16%.

W Tabeli 11 przedstawiono średnie wartości kąta tarcia wewnętrznego, kohezji oraz gęstości złoza nasion po konsolidacji wraz z odchyleniami standardowymi. Współczynniki determinacji R^2 prostych regresji, na podstawie których wyznaczano kąt tarcia wewnętrznego i kohezję (równanie 29), były nie mniejsze niż 99%.

Tabela 11. Średnie wartości (wraz z odchyleniem standardowym) kąta tarcia wewnętrznego, kohezji oraz gęstości skonsolidowanych próbek nasion rzepaku

Table 11. Mean values (with standard deviation) of the angle of internal friction, cohesion and compacted bulk densities of rape seeds samples

	Wilgotność [%]	Kąt tarcia wewnętrznego φ [deg.]	Kohezja c [kPa]	Gęstość ρ [kg/m ³]
Rzepak Licosmos	6	24,7 ±0,5	1,3 ±0,7	658 ±10
	9	30,6 ±0,4	2,1 ±0,5	666 ±2
	12	31,7 ±0,7	7,5 ±0,9	697 ±2
	14	34,8 ±0,7	7,7 ±0,9	705 ±3
	16	33,2 ±0,9	12,5 ±1,2	734 ±9



Rys. 59. Średnie wartości (wraz z 95% przedziałami ufności) kąta tarcia wewnętrznego nasion rzepaku odmiany Licosmos o pięciu poziomach wilgotności wyznaczone metodą bezpośredniego ścinania i trójosiowego ściskania.

Fig. 59. Mean values (with 95% confidence intervals) of the angle of internal friction of rape seeds variety Licosmos for five levels of the moisture content measured with the direct shear and the triaxial compression tests.

Rysunek 59 przedstawia porównanie wyników pomiarów kąta tarcia wewnętrznego nasion rzepaku otrzymanych metodą trójosiowego ściskania i bezpośredniego ścinania. Z analizy tego wykresu wynika, że największa zbieżność wyników występuje dla wilgotności w zakresie 9 do około 13%. Rozbieżność wyników przy wyższej wilgotności może wynikać między innymi ze sposobu analizy wyników testu bezpośredniego ścinania. Przy wyższej wilgotności stabilizacja naprężenia stycznego τ występowała bowiem tylko przy naprężeniu normalnym niższym niż naprężenie konsolidacji. Zatem przyjęte do wyznaczenia kąta tarcia wewnętrznego wartości naprężenia stycznego, występujące przy przemieszczeniu $\Delta L/D = 0,1$, mogły być istotnie niższe od wartości ustalonej, która prawdopodobnie pojawiłaby się przy wyższej wartości przemieszczenia.

5.5. Propozycja dostosowania metody bezpośredniego ścinania do pomiaru kąta tarcia wewnętrznego roślinnych materiałów sypkich w poszerzonym zakresie wilgotności

Wartość odkształcenia, przy którym osiągnąony jest graniczny stan naprężenia, zależy między innymi od wilgotności materiału i stosunku wymiarów próbki do wymiarów ziarna ośrodka. Norma Eurocode 1 [19] zaleca, aby iloraz ten wynosił co najmniej 40, a przemieszczenie było nie większe niż 5% średnicy próbki. Przy dużej wilgotności sypkich materiałów roślinnych, mimo spełnienia pierwszego warunku, nie zawsze jest możliwe osiągnięcie granicznego stanu naprężeń w zalecanym zakresie przemieszczenia. Rygorystyczne przestrzeganie zalecanej przez normy granicznej wartości przemieszczenia (5%) niezależnie od tego, czy naprężenie styczne osiągnęło maksimum czy też nie, prowadzi do błędnych wartości kąta tarcia wewnętrznego. W związku z tym, chcąc uniknąć nadmiernie dużych rozmiarów komory pomiarowej oraz poszukując możliwości dostosowania procedury wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego roślinnych materiałów sypkich do szerszego zakresu wilgotności i wielkości ziarna, zaproponowano poszerzenie przedziału stosunku $\Delta L/D$, w którym wyznaczane jest maksimum naprężenia stycznego z 5 do 10% średnicy próbki. Z analizy wyników badań uzyskanych w tej pracy oraz wyników badań innych autorów [38, 48,] można wnioskować, że w większości przypadków stabilizacja naprężenia stycznego następuje przy wartości stosunku $\Delta L/D$ mniejszej niż 10% średnicy próbki. Zatem przyjęcie granicznej wartości tego stosunku równej 10%, zamiast zalecanych przez normy 5%, dawałoby większą gwarancję, że przyjmowana do obliczeń kąta

tarcia wewnętrznego wartość naprężenia stycznego odpowiada ustalonemu płynięciu. Pozwoliłoby to na przeprowadzanie pomiarów kąta tarcia wewnętrznego większości materiałów sypkich pochodzenia roślinnego według jednolitej procedury w poszerzonym zakresie wilgotności materiału a także wielkości nasion [51].

6. PODSUMOWANIE

W ostatnich latach wzrasta zapotrzebowanie wielu gałęzi przemysłu i rolnictwa na informacje o podstawowych parametrach fizycznych materiałów sypkich. Wynika z tego wzmożone zainteresowanie metodami szybkiego ich określania. Kąt tarcia wewnętrznego, kąt tarcia zewnętrznego, gęstość i iloraz naporu to podstawowe parametry materiałów sypkich powszechnie wykorzystywane do projektowania operacji technologicznych. Zgodnie z aktualnymi zaleceniami formułowanymi w normach dotyczących projektowania silosów parametry materiałowe należy wyznaczać eksperymentalnie dla każdej konkretnej realizacji technicznej [17, 19].

Zalecenia metodyczne polskiej normy [17], aktualnie dostosowywanej do standardów europejskich [19], dotyczące wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego materiałów sypkich sformułowane są ogólnie i nie uwzględniają specyfiki poszczególnych rodzajów materiałów. Dotyczy to między innymi materiałów sypkich pochodzenia roślinnego, których specyficzne właściwości należy uwzględniać w metodyce pomiarowej. Materiały te charakteryzuje duża rozpiętość wymiarów nasion oraz ich odkształcalność zależna od wilgotności. W związku z tym droga dochodzenia tych materiałów do warunków ustalonego płynięcia jest stosunkowo długa. Stwarza to poważne utrudnienia pomiarowe oraz wpływa na dokładność wyników.

Procedura formowania próbek trójosiowego ściskania i bezpośredniego ścinania jest bardzo istotnym elementem badań wpływającym na wyniki prowadzonych eksperymentów. Znajomość złożonych procesów fizycznych zachodzących w badanych materiałach jest niezbędna przy doborze parametrów testu, który powinien możliwie najwierniej odzwierciedlać zjawiska zachodzące w warunkach naturalnych.

Z przeprowadzonych w rozdziale 4 badań wynika, że grubość warstwy ścinania powstającej w próbach poddawanych testom trójosiowego ściskania wynosi kilkanaście średnich wymiarów ziaren ośrodka. Gdy warstwa ścinania jest w pełni uformowana (jak podczas ustalonego płynięcia) gradient przemieszczenia

stycznego na przekroju tej warstwy wynosi około 1. Wynika z tego, że zalecana przez normy wartość stosunku wysokości próbki do maksymalnego wymiaru ziarna ośrodka wynosząca 40 jest zbyt mała, aby mogła powstać w pełni uformowana warstwa ścinania.

W przeprowadzonych badaniach stosunek wysokości próbki do maksymalnego wymiaru ziarniaków pszenicy, wynoszący około 40, mieścił się w zakresie zalecanym przez normy.

Aby uniknąć nadmiernego powiększania wymiarów próbki w przypadku materiałów o dużych wymiarach nasion należy poszukiwać sposobów pozwalających na skrócenie drogi dochodzenia materiału sypkiego do stanu granicznego. Wymiary próbki, gęstość i wilgotność materiału to główne czynniki wpływające na jej długość.

Jedną z możliwości jest taki dobór gęstości próbki, aby była ona maksymalnie zbliżona do gęstości krytycznej w rozważanym zakresie ciśnienia. Zastosowany w pracy wibracyjny sposób zagęszczanie próbek poddawanych trójosiowemu ścisnaniu pozwalał zmniejszyć odkształcenie względne, przy którym powstawał w materiale graniczny stan naprężeń.

Istnieje możliwość przyjęcia innych warunków wstępnych dla badanych próbek materiałów niż zastosowane w pracy. Grochowicz i inni [25] badając przydatność aparatu trójosiowego ścisnania do wyznaczania właściwości mechanicznych ziarna jęczmienia zastosowali trzy sposoby przygotowania próbek: swobodne formowanie, zagęszczanie poprzez wibracje oraz zagęszczanie ciśnieniem hydrostatycznym. Dla próbek zagęszczonych uzyskali wyraźne zmniejszenie odkształcenia ε_1 . Przy naprężeniu głównym $\sigma_3 = 100$ kPa uzyskali następujące wartości odkształceń ε_1 : dla próbki formowanej swobodnie 0,30, dla próbki zagęszczonej wibracyjnie 0,18 oraz dla próbki zagęszczonej ciśnieniem hydrostatycznym (0,2 MPa) 0,12. Dla obu przypadków zagęszczania gęstości wyjściowe próbek były wyższe od krytycznych. Dla próbki zagęszczonej wibracyjnie przy naprężeniu $\sigma_3 = 50$ kPa maksimum naprężenia σ_1 wystąpiło przy najmniejszym odkształceniu ($\varepsilon_1 = 0,15$). W tym przypadku gęstość wyjściowa próbki była wyższa od gęstości krytycznej. Otrzymane zależności przebiegów σ_1 - ε_1 były zbliżone do uzyskanych w niniejszej pracy.

Przyjęty w pracy wibracyjny sposób zagęszczania próbek był jednym z możliwych, który pozwolił na realizację zadania. Jego zaletą było to, że naprężenia powstające w materiale podczas zagęszczania były na tyle niskie, że nie powodowały deformacji nasion. Wibracyjny sposób zagęszczania wpływał, w pewnym stopniu, szczególnie w przypadku ziarna pszenicy, na zmianę orientacji przestrzennej nasion i tym samym na strukturę geometryczną materiału.

Struktura geometryczna ośrodka zależy od gęstości upakowania i od ułożenia nasion w ośrodku (orientacji). Niejednorodność upakowania zależy m.in. od kształtu i zróżnicowania wymiarów nasion i wywołuje anizotropię właściwości mechanicznych ośrodka. Wymienione cechy są charakterystycznymi dla konkretnych ośrodków i wpływają na wartość kąta tarcia wewnętrznego. W warunkach rzeczywistych praktycznie zawsze mamy do czynienia ze zróżnicowaniem wymiarów nasion tworzących ośrodek sypki, nawet w ramach tego samego gatunku czy odmiany, a także w przypadku ośrodków rozdrobnionych i mieszanek [8]. Metodyka badawcza dla tych materiałów nie powinna jednak odbiegać od ogólnych standardów.

Wibracyjne zagęszczanie próbek ziarna pszenicy wyraźnie zbliżało ich gęstości początkowe do gęstości krytycznej. Natomiast gęstości uzyskane dla nasion rzepaku, zarówno dla próbek zagęszczonych jak i niezagęszczonych, były zbliżone do krytycznych. Zastosowany sposób zagęszczania, skuteczny dla ziarna pszenicy, w przypadku nasion rzepaku wywoływał zbyt małe różnice w wartościach gęstości i nie wpływał istotnie na przebieg zależności $\sigma_1(\varepsilon_1)$.

Różnica w podatności na wibracyjne zagęszczanie ziarna pszenicy i nasion rzepaku wynika z odmiennych właściwości fizycznych nasion tych materiałów. Różnią się one przede wszystkim kształtem, wymiarami i właściwościami ciernymi powierzchni. W związku z tym wymiar próbki (wysokość = 0,3 m) wpływał w różny sposób na samozagęszczanie się materiału (gęstość minimalna A) w trakcie formowania próbek. Dla pszenicy wpływ ten był znikomy, natomiast dla rzepaku mógł być istotny. Z analizy zależności naprężenia σ_1 od odkształcenia ε_1 wynika, że otrzymana w wyniku przyjętego sposobu formowania gęstość próbek nasion rzepaku o wilgotności 7% była zbliżona do krytycznej (Rys. 40). Dla pozostałych wilgotności otrzymane gęstości były wyższe od krytycznych (Rys. 41 do 44). Wynika z tego, że przy wyznaczaniu kąta tarcia wewnętrznego nasion rzepaku metodą trójosiowego ściskania przy wymiarach próbki przyjętych w pracy nie zachodzi potrzeba wstępnego zagęszczania próbek.

W przypadku testów bezpośredniego ścinania droga dochodzenia materiału próbki do warunków ustalonego płynięcia jest krótsza niż w przypadku trójosiowego ściskania. Wynika to z odmiennych warunków brzegowych. W niektórych przypadkach droga dochodzenia próbki do stanu ustalonego płynięcia była nawet o około 50% krótsza niż podczas testu trójosiowego ściskania. W większości przypadków droga ta nie przekraczała 10% średnicy próbki. Ponadto malała ona w miarę wzrostu różnicy między naprężeniem normalnym podczas ścinania a naprężeniem konsolidującym. Przeprowadzone

badania potwierdziły bardzo dużą użyteczność zalecanej przez normę Eurocode 1 procedury konsolidacji próbek bezpośredniego ścinania poprzez wykonywanie standardowych obrotów pokrywą aparatu, przy naprężeniu normalnym równym naprężeniu odniesienia (w tym przypadku 100 kPa). Procedura ta jest łatwa do wykonania i pozwala uzyskać dużą powtarzalność wyników.

Wilgotność nasion wpływa istotnie na właściwości mechaniczne materiału. Kąt tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy na ogół rośnie ze wzrostem wilgotności. W szerokim zakresie zmian wilgotności zależność ta jest nieliniowa [80, 81]. Z przeprowadzonych w pracy badań wynika, że w przedziale wilgotności ziarna pszenicy 10 do 20% występuje szybki wzrost kąta tarcia wewnętrznego. Ze wzrostem wilgotności rośnie odkształcalność ziarniaków. Deformują się one w punktach wzajemnego kontaktu w wyniku czego wzrasta opór tarcia. Wraz ze wzrostem odkształcalności ziarniaków wydłuża się droga dojścia materiału do warunków ustalonego płynięcia, co wpływa na dokładność wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego. W przypadku metody trójosiowego ściskania dla wilgotności ziarna pszenicy wyższej od 20% odkształcenia pojedynczych ziarniaków i deformacja całej próbki są tak duże, że nie można uzyskać stanu ustalonego płynięcia przy odkształceniu ε_1 próbki mniejszym od 0,2. W tym przypadku należy stosować inne metody pomiarowe, które nie mają ograniczonej drogi ścinania, na przykład pomiar w aparacie pierścieniowym lub pomiar kąta naturalnego usypu.

Wzrost drogi ścinania wywołuje zmianę pola powierzchni przekroju próbki - wzrost w teście trójosiowego ściskania i spadek w teście bezpośredniego ścinania. Zalecaną przez normy wartość stosunku $\Delta L/D = 0,05$ dla metody bezpośredniego ścinania osiągnano jedynie dla materiału suchego. Dla wyższych wilgotności stan ustalonego płynięcia osiągnano na ogół przy przemieszczeniu nie przekraczającym 10% średnicy próbki. Przyjęcie granicznej wartości przemieszczenia równego 10% średnicy próbki, zamiast zalecanych 5%, pozwoliłoby na przeprowadzanie pomiarów kąta tarcia wewnętrznego większości materiałów sypkich pochodzenia roślinnego według jednolitej procedury w poszerzonym zakresie wilgotności materiału.

W odróżnieniu od metody bezpośredniego ścinania, w metodzie trójosiowego ściskania stan ustalonego płynięcia uzyskiwano przy dużo większym odkształceniu (nawet $\varepsilon_1 > 0,2$ dla materiału wilgotnego). Skupiono zatem uwagę na poszukiwaniu sposobu skompensowania wpływu zmian pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki w trakcie deformacji na wynik pomiaru. Uwzględnienie tych zmian (korekcja) pozwoliło precyzyjnie określić maksimum przebiegu $\sigma_1(\varepsilon_1)$, które bez uwzględnienia kohezji występowało przy dużo większym odkształceniu bądź w ogóle było niewidoczne na skutek zmiany pola

powierzchni przekroju próbki. Dzięki temu możliwe było przeprowadzenie pomiarów kąta tarcia wewnętrznego w poszerzonym zakresie wilgotności (do 16% dla nasion rzepaku i 20% dla ziarna pszenicy) przy odkształceniu ϵ_1 rzędu 0,1.

Podjęte w pracy poszukiwania optymalnych warunków wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy i nasion rzepaku wykazały, że metody pomiarowe, które można by zalecić do szerszego zastosowania dla tych materiałów różniły się w pewnych szczegółach. Jest to zrozumiałe przy uwzględnieniu dużego zróżnicowania ich właściwości fizycznych. Wydaje się jednak, że przeprowadzona w pracy szczegółowa analiza czynników wpływających na sposób i dokładność wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego może przyczynić się do optymalizacji warunków jego wyznaczania.

Uzyskane wyniki potwierdziły trafność podjęcia problematyki związanej z wyznaczaniem kąta tarcia wewnętrznego roślinnych materiałów sypkich. Przeprowadzona analiza czynników dowiodła, że przy wyznaczaniu kąta tarcia wewnętrznego należy uwzględniać specyficzne właściwości materiałów. Uogólniając - można przyjąć, że w przypadku materiałów suchych (o wilgotności kondycjonalnej) wystarczy stosować ogólne zalecenia norm. Dla materiałów o podwyższonej wilgotności konieczne jest jednak uwzględnianie zmiany ich właściwości fizycznych i odpowiednie korygowanie metod pomiarowych.

Zastosowane w pracy dodatkowe zabiegi metodyczne nie naruszające ogólnych zaleceń metodycznych norm [17, 19], uwzględniające specyficzne właściwości ziarna pszenicy i nasion rzepaku, zwiększyły dokładność pomiarów kąta tarcia wewnętrznego. Stwarza to podstawę do zaproponowania, aby przyjęty w pracy sposób postępowania rozpowszechnić do szerszego stosowania przy wyznaczaniu kąta tarcia wewnętrznego dla całej grupy sypkich materiałów roślinnych. W celu określenia zakresu stosowalności tych zabiegów koniecznym jest dalsze prowadzenie prac badawczych. Otrzymane z badań własnych wyniki pozwoliły na sprecyzowanie wniosków ogólnych oraz wniosków szczegółowych dotyczących badanych materiałów:

1. Wibracyjne zagęszczanie próbek ziarna pszenicy umożliwia uzyskanie gęstości zbliżonej do gęstości krytycznej, co zwiększa dokładność wyników pomiarów kąta tarcia wewnętrznego metodą trójosiowego ściskania. W przypadku nasion rzepaku wibracyjne zagęszczanie próbek nie wpływa istotnie na wyniki pomiarów.
2. Efektywny pomiar kąta tarcia wewnętrznego metodą trójosiowego ściskania jest możliwy, gdy wilgotność ziarna pszenicy nie przekracza 20% a nasion rzepaku 16%.

26. **Gu Z.H., Arnold P.C., McLean A.G.:** Consolidation - related density and permeability models for bulk solids. *Powder Technology*, 72, 39-44, 1992.
27. **Haman J., Grochowicz M.:** Methodology of the internal friction coefficient of grain layer at increased strains. *ZPPNR*, 203, 153-159, 1978.
28. **Hesse T.:** Das spitzendrucksondieren-ein mezerfahren zur bestimmung der druckverteilung in einem Schüttgut-Silo. *Grundl. der Landtechnik*, 26(3), 73-78, 1976.
29. **Hesse T. Hoffmann O.-H.:** Scherverhalten körniger landwirtschaftlicher Haufwerke. *Grundl. der Landtechnik*, 27(6), 205-213, 1977.
30. **Hoffmann O.-H.:** Neuere grundlagen der mechanik körniger haufwerke. *Grundl. der Landtechnik*, 25(2), 48-59, 1975.
31. **Herse J.** (red.): *Szczegółowa uprawa roślin*. PWN, Warszawa 1976.
32. **Horabik J., Łukaszuk J.:** Pomiar kąta tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy metodą trójosiowego ściskania. *Acta Agrophysica*, 37, 39-49, 2000.
33. **Horabik J., Łukaszuk J., Grochowicz M.:** Formation of shear band in a granular material during triaxial compression test. *International Agrophysics*, 14, 273-278, 2000.
34. **Horabik J., Łukaszuk J.:** Analiza doświadczalna powstawania warstwy ścinania w złożu nasion. *Inżynieria Rolnicza*, 2(22), 85-91, 2001.
35. **Horabik J., Rusinek R.:** Wyznaczanie ilorazu naporu w roślinnych materiałach sypkich. Cz. I. Rozważania teoretyczne. Cz. II. Badania doświadczalne. *Acta Agrophysica*, 2000.
36. **ISO 11697:** Bases for design of structures - Loads due to bulk materials. 1995 (E).
37. **ISO 3535:** Continuous mechanical handling equipment-classification and symbolization of bulk materials. International Organization for Standardization, Genewa, 1997.
38. **Jenike A.W.:** Storage and flow of solids. *Bull. 123, Eng. Expt. Sta., Utah State Univ.*, 1964.
39. **Jurga R.:** Słowniczek wybranych terminów zbożowo-młynarskich. *Przegląd zbożowo-młynarski*, 9, 88-89, 1999.
40. **Kamiński M., Wirska E.:** Modelling of powder flow in silos with flexible walls. *Powder handling & processing*. 9(4), 329-334, 1997.
41. **Kazuyoschi I., Oda M.:** Micro-deformation mechanism of shear banding process based modified distinct element method. *Powder technology*, 109, 192-205, 2000.
42. **Kezdi A.:** *Handbook of soil mechanics*. Akademia Kiado. Budapest 1974.
43. **Kobielak S.:** Przyrządy i metodyka pomiaru parcia materiałów rozdrobnionych w zbiornikach. *Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej nr 58*, 1990.
44. **Konstankiewicz K.:** Wpływ prędkości odkształceń na charakterystyki mechaniczne gleb. *Problemy Agrofizyki*, 51, 1987.
45. **Kragielskij I.W., Dobyczin M.N., Komalów W.S.:** *Osnovy rasczetow na trienie i iznos*. Moskwa, Maszynostrojenie 1977.
46. **Laskowski J., Skonecki S.:** Influence of moisture on the physical properties and parameters of the compression process of cereal grains. *International Agrophysics*, 13(4), 477-486, 1999.
47. **Laskowski J., Skonecki S.:** Pomiar współczynnika tarcia wewnętrznego pszenicy o różnej wilgotności i stopniu rozdrobnienia. *Acta Agrophysica*, 46, 95-104, 2001.

48. **Lawton P.J., Marchant J.A.:** Direct shear testing of seeds in bulk. *J. Agric. Eng. Res.*, 25, 189-201, 1980.
49. **Li Y., Zang Q., Puri V.M., Manbeck H.B.:** Physical properties effect on stress-strain behavior of wheat en masse-part 1, load response dependence on initial bulk density and moisture content. *Trans. of the ASAE*, 32(1), 194-202, 1989.
50. **Lityński M.:** Biologiczne podstawy nasiennictwa. PWN, II, 144, Warszawa, 1982.
51. **Łukaszuk J.:** Metodyczne aspekty wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego roślinnych materiałów sypkich na przykładzie ziarna pszenicy i nasion rzepaku. Praca doktorska, Instytut Agrofizyki PAN, Lublin, 2002.
52. **Łukaszuk J., Grochowicz M., Horabik J.:** Sposób utrwalania kształtu i struktury wewnętrznej próbki z materiału sypkiego poddawanej trójosiowemu ściskaniu. Patent, nr zgł. 328205, 1998.
53. **Łukaszuk J., Stasiak M., Rusinek R., Horabik J.:** Wpływ wilgotności na kąt tarcia wewnętrznego ziarna zbóż. *Acta Agrophysica*, 46, 105-113, 2001.
54. **Metzger T.:** Analiza wpływu wybranych cech fizycznych ziarna kukurydzy na wartość współczynnika tarcia wewnętrznego. Praca doktorska, AR Wrocław 1985.
55. **Molenda M., Horabik J., Grochowicz M., Szot B.:** Tarcie ziarna pszenicy. *Acta Agrophysica*, 4, 1995.
56. **Molenda M.:** Wpływ struktury złoża nasion na stan naprężenia. *Acta Agrophysica*, 12, 1998.
57. **Mohsenin N.N.:** Physical properties of plant and animal materials. 2nd Ed. New York, Gordon and Beach Science Publishers, 1986.
58. **Moysey E.B., Hiltz S.:** Friction properties of fertilizer. *Canadian Agric. Eng.*, 27(2), 79-84, 1984.
59. **Mróz Z., Drescher A., Hueckel T.:** Doskonalenie metod badania parametrów płynięcia materiałów ziarnistych. *Prace IPPT PAN*, 54, 1973.
60. **Mróz Z., Drescher A.:** Podstawy teorii plastyczności ośrodków rozdrobnionych. Wydawnictwo PAN, 1972.
61. **Muir W.E., Jayas D.S., Britton M.G., Sinha R.N., White N.D.G.:** Interdisciplinary grain storage research. *Powder Handling and Processing*, 1(3), 281-295, 1989.
62. **Müller G.E.:** Angular void fraction distribution in randomly packed fixed beds of uniformly sized spheres in cylindrical containers. *Powder Technology*, 77, 313-319, 1993.
63. **Mühlhaus H.B., Vardoulakis I.:** The thickness of shear bands in granular materials. *Géotechnique*, 37(3), 271-283, 1987.
64. **Münch-Andersen J.:** The boundary layer in rough silos. *Transaction of the Inst. of Engineers, Australia ME* 12(3), 167-170, 1987.
65. **Nedderman R.M., Laohakul C.:** The thickness of the shear zone of flowing granular materials. *Powder Technology*, 25, 91-100, 1980.
66. **Peschl I.A.S.Z.:** Equipment for the measurement of mechanical properties of bulk materials. *Powder Handling and Processing*, 1(1), 73-81, 1989.
67. **Polska Norma PN-70/R-74010:** Ziarno zbóż i nasiona strączkowe jadalne. Pobieranie próbek.

68. **Polska Norma PN-73/R-74007:** Ziarno zbóż. Oznaczanie gęstości.
69. **Polska Norma PN-74/Z-04002:** Ochrona czystości powietrza. Badania fizycznych własności pyłów. 01. Oznaczanie bezwzględnej gęstości pyłów. 02. Oznaczanie gęstości pozornych oraz statycznych porowatości warstwy pyłu. 07. Oznaczanie kąta nasypu pyłu. 08. Oznaczanie kąta zsypania pyłu.
70. **Polska Norma PN-89/B-03262:** Zbiorniki żelbetowe na materiały sypkie i kisonki. Obliczenia statyczne i projektowanie.
71. **Polska Norma PN-91/A-74010:** Ziarno zbóż i przetwory zbożowe. Oznaczanie wilgotności (rutynowa metoda odwoławcza).
72. **Puchalski Cz.:** Co wpływa na kąt zsypania naturalnego ziarna? Przegląd zbożowo-młynarski, Nr 8, 25-27, 1980.
73. **Pukos A.:** Odkształcenia gleby w zależności od rozkładów wielkości porów i cząstek fazy stałej. Problemy Agrofizyki, Ossolineum, Wrocław, 61, 1990.
74. **Pukos A., Grundas S., Horabik J., Konstankiewicz K.:** On the identification of elasto-plastic and elasto-viscous phenomena in the mechanics of soil and plant materials. ZPPNR, 245, 87-96, 1984.
75. **Rademacher F.J.C., Haaker G.:** Possible deviations in the determination of bulk-solid characteristics caused by the loading mechanism of the Jenike shear cell. VDI Forschungsheft, 629, 1-32, 1985.
76. **Reimbert M., Reimbert A.:** Determination of the mechanical properties of cohesive and non-cohesive powdered materials. *Buld Solids Handling*, 1(1), 37-41, 1981.
77. **Reimbert M., Reimbert A.:** Characteristic friction angles of non-cohesive granular materials compared with the angle of repose. *Powder Handling & Processing*, 8(2), 155-157, 1996.
78. **Roscoe K.H., Poorooshasb H.B.:** A theoretical and experimental study of strains in triaxial compression test on normally consolidated clays. *Géotechnique*, 13, 12-38, 1963.
79. **Roscoe K.H.:** The influence of strains in soil mechanics. 10th Rankine Lecture. *Géotechnique*, 20(2), 127-170, 1970.
80. **Rosiak E.:** Sytuacja na rynku rzepaku – stan i prognozy na sezon 1999/2000. *Rośliny oleiste. Instytut Hodowli i Akimatyzacji Roślin. Tom XX, Zeszyt 1*, 3-8. Poznań 1999.
81. **Runge J.:** The time consolidation of bulk solids on the example of viscoelastic granules. *Powder handling & processing*, 9(1), 59-62, 1997.
82. **Rusinek R., Horabik J.:** Określenie wpływu wilgotności ziarna zbóż na iloraz naporu. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Żywność człowieka”, 63-67, Bydgoszcz, 2001.
83. **Schulze D.:** Flowability and time consolidation measurements using a ring shear tester. *Powder Handling and Processing*, 8(3), 221-226, 1996.
84. **Schwedes J.:** Fließverhalten von Shüttgütern in Bunkeren. Verlag Chemie, 1970.
85. **Schwedes J.:** Shearing behaviour of slightly compressed cohesive granular materials. *Powder Technology*, 11, 59-67, 1975.
86. **Schwedes J.:** Evolution of bulk solids technology since 1974. *Bulk Solids Handling*, 3(1), 143-147, 1983.

87. **Schwedes J.:** Flow properties of bulk solids and their use in solving industrial problems. XI Konferencja „Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze”, 25-39, Świeradów Zdrój, 2000.
88. **Scrappeli G., Wood D.M.:** Experimental observations of shear band patterns in direct shear test. Deformation and Failure of Granular Media. A.A. Balkema, Rotterdam, 473-484, 1982.
89. **Stępniewski A.:** Wpływ wilgotności i temperatury na zmienność właściwości mechanicznych nasion rzepaku. Praca doktorska, Instytut Agrofizyki PAN, Lublin 1997.
90. **Stasiak M., Molenda M.:** Analiza wpływu wilgotności złoza ziarna pszenicy na przebieg zależności: naprężenie – odkształcenie. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Żywnienie człowieka”, 75-80, Bydgoszcz, 2001.
91. **Suchnicka A.:** Problemy określania wytrzymałości gruntów. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki Politechniki Wrocławskiej, 30, 31-35, 1979.
92. **Szot B., Horabik J.:** Zagadnienia mechaniki ośrodków sypkich pochodzenia roślinnego. Problemy Agrofizyki, z. 33, 1980.
93. **Szwed G.:** Wpływ czasu przechowywania na zmianę oporu przepływu powietrza przez warstwę nasion rzepaku. Acta Agrophysica, 37, 225-235, 2000.
94. **Ślaska-Grzywna B.:** Metoda wyznaczania granicznych wartości zagęszczenia materiałów sypkich. Praca doktorska. Akademia Rolnicza w Lublinie, 1995.
95. **Ślipek Z., Kaczorowski J., Frączek J.:** Analiza teoretyczno-doświadczalna tarcia materiałów roślinnych. PTIR Kraków 1999.
96. **Tejchman J., Wu W.:** Numerical study on patterning of shear bands in Cosserat continuum. Acta Mechanica, 99, 61-74, Karlsruhe, 1993.
97. **Thompson S.A., Ross I.J.:** Compressibility and frictional coefficient of wheat. Trans. of the ASAE, 26(4), 1171-1176, 1983.
98. **Tomczyk S.:** Magazyny ziarna i innych nasion. PWRiL, Warszawa 1970.
99. **Tys J., Rybacki R.:** Rzepak – jakość nasion, technologia zbioru, suszenia i przechowywania. Acta Agrophysica, 44, 2001.
100. **Vardoulakis I., Graf B.:** Calibration of constitutive models of granular materials using data from biaxial experiments. Géotechnique 35(3), 299-317, 1985.
101. **Willett J.L.:** Packing characteristics of starch granules. American Association of Cereal Chemistry, 78(1), 64-68, 2001.
102. **Woźniak W.:** Wpływ czynników agrofizycznych na zmienność porowatości masy ziarna zbóż. ZPPNR, z. 316, 257-278, 1987.
103. **Woźniak W.:** The effect of moisture treatment on mechanical properties of wheat grain. Proceedings of the Ninth Seminar “Properties of water in foods”, 62-70, Zakopane, 1998.
104. **Zenkow R.L.:** Mechanika nasypnych gruzów. Izdatielstwo Maszynostrojenie. Moskwa 1964.
105. **Zhang Q., Britton M.G., Kieper R.J.:** Interactions between wheat and a corrugated steel surface. Trans. ASAE, 37(3), 951-956, 1994.

8. STRESZCZENIE

W pracy przeprowadzono analizę czynników wpływających na sposób wyznaczania i dokładność pomiarów kąta tarcia wewnętrznego roślinnych materiałów sypkich. Do badań wykorzystano metodę trójosiowego ściskania i bezpośredniego ścinania. Przeprowadzono analizę doświadczalną procesu formowania się warstwy ścinania. Określono wpływ stosunku wielkości próbki do wielkości ziarna ośrodka na wynik pomiaru. Określono wpływ gęstości i wilgotności materiału na wynik pomiaru kąta tarcia wewnętrznego. Uwzględniono wpływ zmiany pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki w trakcie jej deformacji na wynik pomiaru. Określono górną granicę wilgotności materiału, dla której możliwy był pomiar kąta tarcia wewnętrznego zastosowanymi metodami. Uzyskane wyniki pozwoliły doprecyzować ogólne zalecenia pomiarowe aktualnych norm i dostosować je do wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego roślinnych materiałów sypkich stosownie do ich specyficznych właściwości fizycznych.

Słowa kluczowe: kąt tarcia wewnętrznego, materiał sypki, test trójosiowego ściskania, test bezpośredniego ścinania, warstwa ścinania, gęstość krytyczna.

9. SUMMARY

DETERMINATION OF THE ANGLE OF INTERNAL FRICTION OF PLANT GRANULAR SOLIDS

Factors influencing procedure and accuracy of determination of the angle of internal friction of plant granular materials were analyzed using an example of wheat grain and rape seeds. The triaxial compression test and the direct shear test were used for investigations. Formation of the shear band was experimentally analyzed. The influence of the ratio of sample size to grain size was studied. Influence of the bulk density and the moisture content on measurement of the angle of internal friction was determined. Correction of change of the sample cross-section was considered. Upper limit of the grain moisture content allowing for determination of the angle of internal friction with applied methods was determined. Obtained results allowed to specify general recommendations of current standards concerning procedures of determination of the angle of internal friction of plant granular materials considering their particular physical properties.

Key words: angle of internal friction, granular material, triaxial compression test, direct shear test, shear band, critical density.

Adresy Autorów:

Józef Łukaszuk
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego
Polska Akademia Nauk
ul. Doświadczalna 4
P.O. BOX 201, 20-290 Lublin 27
tel. (0-81) 7445061, fax. (081) 7445067
e-mail:jlukas@demeter.ipan.lublin.pl

Józef Horabik
Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego
Polska Akademia Nauk
ul. Doświadczalna 4
P.O. BOX 201, 20-290 Lublin 27
tel. (0-81) 7445061, fax. (081) 7445067
e-mail:jhorabik@demeter.ipan.lublin.pl