KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY

Publikacja współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Rozwój potencjału innowacyjnego członków Sieci Naukowej „Agroinżynieria dla rozwoju zrównoważonego rolnictwa, przemysłu rolno-spożywczego i obszarów wiejskich”

Ekspertyza

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE SYPKICH AGROMATERIAŁÓW I PROSZKÓW SPOŻYWCZYCH. METODY WYZNACZANIA I PROGNOZA KIERUNKÓW STANDARYZACJI

Prof. dr hab. inż. Marek Molenda
Instytut Agrofizyki
Polskiej Akademii Nauk
Lublin 2009

Publikacja dostępna w serwisie: www.agengpol.pl

Spis treści

1. Wstęp 3
2. Metody badawcze i aparatura 4
   2.1. Aparat trójosiowego ściskania 4
   2.2. Aparat bezpośredniego ścinania 6
   2.3. Aparat pierścieniowy 7
   2.4. Aparat prostego ścinania 8
3. Parametry i procedury standardowe 9
4. Wskaźniki technologiczne 11
5. Podsumowanie i prognozy 14
6. Literatura 15

1. Wstęp

Materiały ziarniste złożone są z dwu lub trzech faz: ziaren fazy stałej oraz gazu i/lub cieczy wypełniających pory między ziarnami. W odróżnieniu od płynu materiał ziarnisty posiada zdolność przenoszenia naprężeń stycznych. Mówimy, iż materiał ziarnisty charakteryzuje się tarciem wewnętrznym. Niektóre materiały ziarniste posiadają zdolność utrzymywania nadanego im kształtu, jak na przykład glina uformowana w surową cegłę. Materiał taki, w którym występują siły spójności między cząstkami nazywany jest kohezyjnym. Materiał ziarnisty pozbawiony kohezji to materiał sypki. Kolejna ważna różnica między płynem a materiałem sypkim ujawnia się w warunkach płynięcia - naprężenie styczne w materiale sypkim zależy wówczas od naprężenia normalnego, zaś w płynie zależy od prędkości przepływu.

W ostatnich dziesiątkach lat nastąpił wzrost zainteresowania badaniem materiałów rozdrobnionych. W tej formie naturalnie występuje wiele surowców przemysłowych. Równocześnie globalizacja prowadzi do wzrostu skali produkcji przemysłowej i upowszechnienia automatyzacji. Surowce i produkty w formie sypkiej łatwiej stosować w technologiach masowych, dlatego szybko rośnie ich udział w rynku. Materiały sypkie są używane w wielu przemysłach m. in. chemicznym, kosmetycznym, farmaceutycznym, biotechnologicznym, ceramicznym, spożywczym, wydobywczym, energetycznym, papierniczym, metalurgicznym, tworzyw sztucznych, cementu, szkła, minerałów czy towarów konsumpcyjnych. Najważniejsze technologie inżynierii procesowej z udziałem materiałów rozdrobnionych wymieniane w portalu „Powder, bulk solids" to: transport pneumatyczny, redukcja rozmiaru, sferoidyzacja, przesiewanie, pokrywanie powierzchni, mieszanie, segregacja, utrzymanie konsystencji, ważenie, porcjowanie, pakowani, przechowalnictwo, usuwanie kurzu, automatyzacja i sterowanie; podawanie, kontrola jakości. Każda z wymienionych operacji wykorzystuje odpowiednie urządzenia. I tak na przykład urządzenia służące do zwiększania rozmiaru i formowania to: aglomeratory fluidyzacyjne, obrotowe, rozpyłowe wibracyjne, zwilżające; ekstrudery, granulatory, instantyzery, maszyny do powlekania, odpylania, zagęszczania - dyskowe i bębnowe, maszyny do zamykania kapsułek i powlekania tabletek, miksery palcowe, misy grudkujące, płatkownice bębnowe, powlekacze proszkowe, tabletkarki, ugniatarki, prasy do proszków, rolkowe i tabletkowe, sita, sferoidyzatory, zamrażacze rozpyłowe.

W technologiach masowego przetwarzania nieznaczna zmiana warunków procesu czy właściwości materiału może drastycznie zmienić przebieg procesu. Choć materiały sypkie wydają się na pierwszy rzut oka proste do opisu wykazują zadziwiająco wiele skomplikowanych zjawisk, które dotychczas zbadano w niewielkim stopniu. Badania prowadzone szczególnie intensywnie w okresie ostatnich 50. lat 20. wieku przyniosły wiele osiągnięć teoretycznych, a także wiele nowych technologii. Problemy pojawiające się w praktyce stwarzają pilną potrzebę szukania rozwiązań w sferze techniki i teorii oraz badania relacji stosowanych surowców sypkich z materiałami konstrukcyjnymi. Szczególnie dużego znaczenia nabiera doskonalenie metod pomiaru i poprawa dokładności wyznaczania właściwości fizycznych. Mimo znacznego postępu w rozwoju metod pomiarowych wyniki badań prowadzonych w różnych laboratoriach często różnią się znacznie między sobą. Istotnym źródłem rozrzutu wyników jest zbyt duża ilość rozpowszechnionych metod pomiarowych oraz brak ujednoliconej procedury pomiarowej. Ponadto częstym źródłem zmienności jest również nie w pełni kontrolowany wpływ takich czynników, jak: wilgotność, gęstość i struktura upakowania oraz historia obciążenia. Normy projektowania zbiorników na materiały sypkie jak np. Eurocode 1 (2003) zalecają wyznaczać parametry materiałów sypkich dla poszczególnych realizacji technicznych według ściśle określonych procedur pomiarowych.

Sypkie materiały pochodzenia rolniczego i proszki spożywcze stanowią osobną grupę materiałów o rosnącym znaczeniu rynkowym i specyficznej charakterystyce. Wyróżniają je przede wszystkim większe niż w innych grupach materiałów odkształcalność pod obciążeniem oraz silny wpływ wilgotności na właściwości mechaniczne. Tak jak w innych grupach materiałów ziarnistych właściwości mechaniczne znajdują najczęściej trzy zastosowania: a) jako parametry materiałowe dla projektowania maszyn i technologii, b) jako

parametry sterowania procesami przechowywania i przetwarzania oraz c) jako wskaźniki jakości surowca i produktu. Niniejsze opracowanie zawiera opis aktualnego stanu rozwoju metod wyznaczania właściwości mechanicznych sypkich agromateriałów i proszków spożywczych oraz prognozę kierunków standaryzacji w najbliższym czasie.

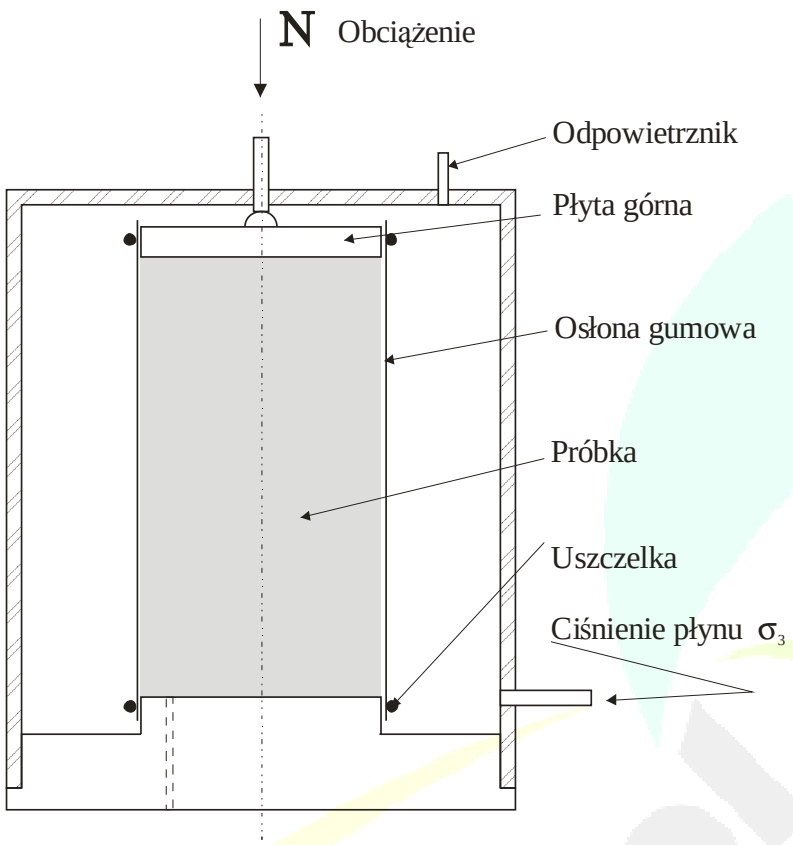
2. Aparatura badawcza

Określenie wytrzymałości materiału sypkiego w większości przypadków sprowadza się do wyznaczenia warunku płynięcia materiału. Najczęściej wystarczająco dokładny jest liniowy warunek stanu granicznego Mohra - Coulomba. Do jego wyznaczania opracowano wiele metod pomiarowych wykorzystujących różnego typu aparaty ścinające. Można tu rozróżnić aparaty pośredniego i bezpośredniego ścinania. W aparatach bezpośredniego ścinania sama konstrukcja determinuje położenie strefy ścinania, zaś w aparatach pośredniego ścinania strefa ta nie jest wymuszona przez konstrukcję lecz formuje się zgodnie ze stanem naprężenia w próbce. W aparatach bezpośredniego ścinania największe naprężenie główne obraca się w czasie testu. W aparatach pośredniego ścinania kierunki naprężeń głównych pozostają w czasie trwania testu niezmienne. W grupie aparatów bezpośredniego ścinania wyróżnić można urządzenia o ruchu postępowym i obrotowym. Aparaty pośredniego ścinania podzielić można na grupy dwuosiowych i trójosiowych. Wybór typu aparatu zależy od celu pomiarów, do których ma być zastosowany. Najogólniej wyróżnić można trzy rodzaje zastosowań: badania naukowe dla określenia zależności naprężenie - odkształcenie, praktyczne zagadnienia inżynierskie np. wymiarowanie silosów oraz porównanie materiałów sypkich (często dla oceny jakości).

2.1 Aparat trójosiowego ściskania

Do wyznaczania parametrów teoretycznych i empirycznych modeli opisujących zależność naprężenie-odkształcenie bardzo często stosowana jest metoda trójosiowego ściskania. Metodę tą zastosowali np. Zhang i inni (1991) do wyznaczenia parametrów sprężysto-plastycznych modeli do opisu zależności naprężenie-odkształcenie w ziarnie zbóż. Z kolei Ziolkowski i inni (1985) zastosowali aparat trójosiowego ściskania jako kolumnę rezonansową do wyznaczenia modułu sprężystości postaciowej oraz charakterystyk tłumienia drgań w ziarnie pszenicy. Aparat trójosiowego ściskania jest powszechnie stosowany w badaniach gruntu i gleboznawstwie .

Schemat aparatu przedstawiono na rys. 1. Osiowo-symetryczny stan naprężenia wytwarzany jest poprzez umieszczenie walcowej próbki badanego ośrodka (w osłonce gumowej) w komorze ciśnieniowej oraz obciążenie próbki siłą N wzdłuż jej osi symetrii. Naprężenie σ_1 jest sumą ciśnienia hydrostatycznego σ_3 oraz naprężenia wynikającego z przyłożonej siły N. Aparat trójosiowego ściskania umożliwia realizowanie wielu różnych schematów obciążania próbki, co pozwala wyznaczyć wiele stałych materiałowych ośrodka (np. Bishop i Henkel, 1974). W przypadku wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego metodą trójosiowego ściskania w praktyce rejestrowany jest przebieg naprężenia σ_1 w miarę wzrostu odkształcenia próbki wzdłuż jej osi symetrii ε_1 przy stałej wartości naprężenia σ_3. Odkształcenie ε_1 kontynuowane jest do momentu uzyskania maksymalnej bądź ustalonej wartości naprężenia σ_1 lub też do momentu zaobserwowania wyraźnej płaszczyzny poślizgu. Kąt tarcia wewnętrznego wyznaczany jest z nachylenia obwiedni kół Mohra reprezentujących stan naprężenia w chwili płynięcia ośrodka dla kilku różnych wartości naprężenia σ_3. Pomiar poziomu cieczy w kapilarze połączonej z komorą trójosiowego ściskania umożliwia wyznaczenie odkształcenia objętościowego ε_v.



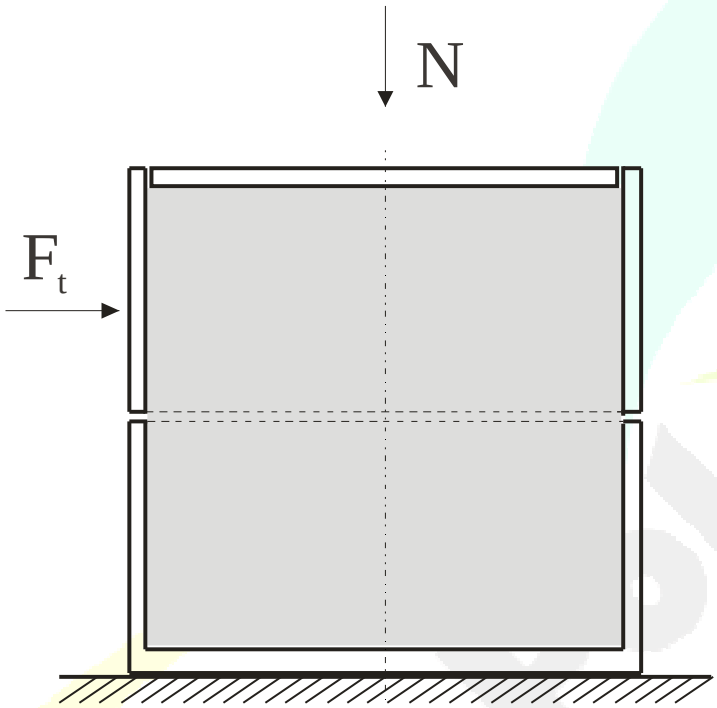
Rys. 1. Aparat trójosiowego ściskania

Próbka materiału w typowych zastosowaniach ma kształt cylindryczny o stosunku średnicy do wysokości równym 1:2. W powszechnie stosowanych w Polsce aparatach bada się próbki gruntu o średnicy 36 mm i wysokości 72 mm. W badaniach naukowych (np. Bishop i Henkel, 1974) stosowali aparat o średnicy próbki 100 x 200 mm (4”x 8”), a Horabik i Molenda (1984) także próbki 150 x 300 mm. Ze wzrostem wielkości próbki przebiegi eksperymentalne są coraz gładsze. Do badania hydrostatycznego zagęszczania ośrodka lepsze okazały się próbki o większej niż 1:2 wartości stosunku średnicy do wysokości. Większość badań prowadzonych w aparacie trójosiowego ściskania dotyczy gruntów spoistych, chociaż w ostatnich latach aparat ten jest coraz powszechniej stosowany do badania roślinnych materiałów ziarnistych.

Wielu autorów podkreśla zalety metody trójosiowego ściskania w stosunku do innych metod pomiarowych. Szczególnie istotny jest fakt, że powierzchnia poślizgu nie jest wymuszana przez konstrukcję aparatu, a formuje się odpowiednio do właściwości materiału i panującego w nim stanu naprężenia. Cechę tą maja aparaty, w których naprężenia w próbce ośrodka zadawane są w sposób niezależny z dwu, lub trzech wzajemnie prostopadłych kierunków tzn. aparaty dwuosiowego i trójosiowego ściskania. W aparacie dwuosiowego ściskania próbka ma kształt sześcianu lub prostopadłościanu. Wysokość próbki w kierunku pionowym jest stała, ograniczona dwoma poziomymi ścianami aparatu. W poziomych kierunkach x i y próbka ograniczona jest ścianami w postaci prostokątnych stalowych płyt łożyskowanych w prowadnicach. Każda para przeciwległych pionowych ścian może przemieszczać się ku wnętrzu próbki napędzana przez popychacze poruszające się ze stałą prędkością. W trakcie obciążania pionowa oś symetrii utrzymywana jest w stałym położeniu. Aparat dwuosiowego ściskania nie znalazł szerszego zastosowania prawdopodobnie ze względu na swoją skomplikowaną i kosztowną konstrukcję mechaniczną, przy walorach podobnych do mniej skomplikowanego konstrukcyjnie aparatu trójosiowego ściskania.

2.2 Aparat bezpośredniego ścinania

Jenike (1961) w badaniach materiałów sypkich stosował aparat bezpośredniego ścinania o kołowym przekroju komory pomiarowej (rys. 2). Jest to pionowo ustawiony cylinder (o średnicy D = 95 mm) podzielony na dwa pierścienie prostopadle do osi. Dolny pierścień umocowany jest do podłoża. Badanym materiałem napełnia się cylinder i obciąża siłą normalną N.



Rys. 2. Aparat bezpośredniego ścinania

Następnie górny pierścień przesuwa się prostopadle do osi symetrii, rejestrując siłę styczną F_t. Dzieląc siłę normalną i styczną przez pole powierzchni przekroju poziomego próbki uzyskujemy naprężenie normalne σ:

$$\sigma = \frac{N}{S}$$

oraz naprężenie styczne τ w płaszczyźnie ścinania:

$$\tau = \frac{F_t}{S}$$

Wyniki otrzymane dla kilku różnych naprężeń normalnych naniesione na płaszczyznę Mohra wyznaczają krzywą τ = f(σ) zwaną przez Jenikego graniczną krzywą płynięcia. Kąt zawarty między osią σ, a styczną do krzywej jest kątem tarcia wewnętrznego φ. Według Mroza i in. (1973) powyższa interpretacja będzie poprawna, jeśli wymuszona w aparacie płaszczyzna ścięcia jest nachylona względem płaszczyzny większego naprężenia głównego σ_1 pod kątem π/4 + φ/2. Założenie to, przyjmowane powszechnie w badaniach bezpośredniego ścinania jest jednak dyskusyjne, gdyż ścięcie materiału nie musi zachodzić dokładnie wzdłuż tej płaszczyzny. Badania eksperymentalne i rozważania teoretyczne prowadzone przez wielu autorów wykazały, że wokół przyjętej płaszczyzny poślizgu tworzy się obszar soczewkowatego odkształcenia. W materiale powstaje więc zróżnicowana gęstość. Na podstawie zmiany wysokości próbki można sądzić o zmianie średniej gęstości w czasie ścinania, co nie daje jednak pełnego obrazu rozkładu gęstości i pola deformacji w strefie poślizgu.

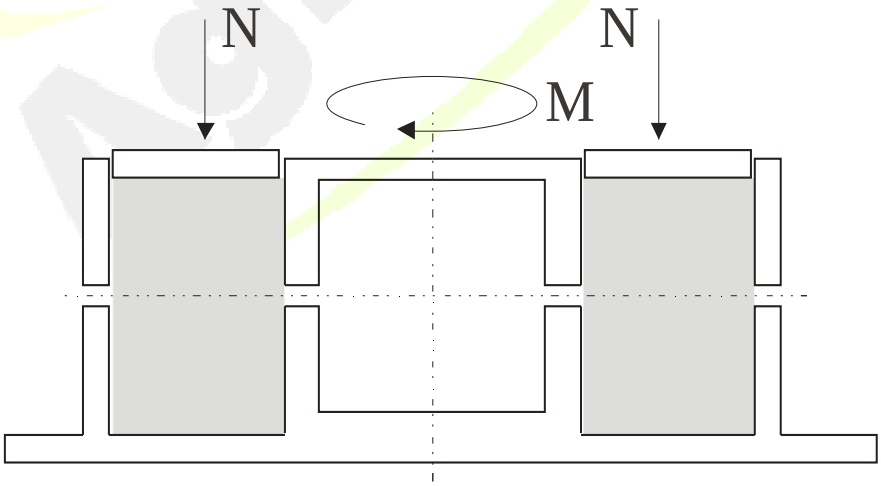
Na podobnej zasadzie działają stosowane w gruntoznawstwie i gleboznawstwie, aparaty bezpośredniego ścinania, w których przekrój poziomy komory pomiarowej ma kształt kwadratu lub prostokąta. Pomiary wykonywane w aparacie o wymiarach próbki 60 x 60 x 50 mm, są uznawane w Polsce jako standardowe próby techniczne dla określenia wytrzymałości gruntów. Do badań materiałów roślinnych Molenda i in. (1998) stosowali aparat o wymiarach próbki D= 210 i H=120 mm.

W oparciu o wyniki pomiarów uzyskanych aparatem bezpośredniego ścinania o wymiarach próbki 400 x 200 x 60 mm Hesse i Hoffman (1977) stwierdzili, że rolnicze materiały ziarniste w przeciwieństwie do gruntów, wymagają dużych przemieszczeń do osiągnięcia naprężenia granicznego, dochodzących często do 20% przekroju próbki. W czasie pomiaru następuje istotne zmniejszenie się powierzchni czynnej ścinania a ponadto zaznacza się silny wpływ wnikania krawędzi skrzynki w próbkę. Przeprowadzone przez tych autorów badania rozkładu naprężeń normalnych w komorze pomiarowej przyrządu wykazały, że przy ścinaniu rozkład naprężeń nad dnem nie jest stały. Wady te utrudniają prawidłową interpretację uzyskanych wyników. Dzięki łatwości formowania próbek oraz prostej konstrukcji aparat jest nadal chętnie stosowany. Odmiany aparatu stosowane w różnych laboratoriach różnią się kształtem komory pomiarowej, sposobem napędu dwudzielnej skrzynki pomiarowej oraz stosowaniem różnego rodzaju przegród. Takie niewielkie zmiany nie mają jednak decydującego wpływu na interpretację wyników.

2.3 Aparat pierścieniowy

Stosunkowo niewielkie (4 - 6 mm) przemieszczenie warstw próbki w aparatach z ruchem postępowym ogranicza ich zastosowanie do materiałów drobnoziarnistych. Dla materiałów gruboziarnistych projektowano aparaty ścinające z ruchem obrotowym. Do badań właściwości mechanicznych materiałów roślinnych stosowane są często aparaty pierścieniowe (np. Peschl, 1989a,b; Schulze, 1996). Różnią się one od omówionych wcześniej sposobem realizacji naprężeń ścinających, które w tym przypadku są wymuszane momentem skręcającym (rys. 3.). Zapewniają one stałą wielkość powierzchni ścinania, ale nie eliminują niejednorodności stanu naprężeń w próbce, co wynika z zasady działania i zastosowanej konstrukcji.

Korzystne rozwiązanie stanowi aparat pierścieniowo – obrotowy opracowany przez Hessego i Hoffmanna (1977). Kanał ścinania w kształcie pierścienia kołowego ograniczony jest podstawą, pierścieniami nastawczymi wewnętrznymi i zewnętrznymi oraz tłokiem połączonym z kołem. Przez zmianę ustawienia pierścieni można osiągnąć różne kształty próbek. Przy założeniu, że składowa promieniowa naprężenia jest mała w porównaniu do składowej obwodowej, można przyjąć że w kanale pierścieniowym występuje płaski stan naprężenia. Konstrukcja aparatu umożliwia pomiar zmiany wysokości próbki w czasie ścinania.



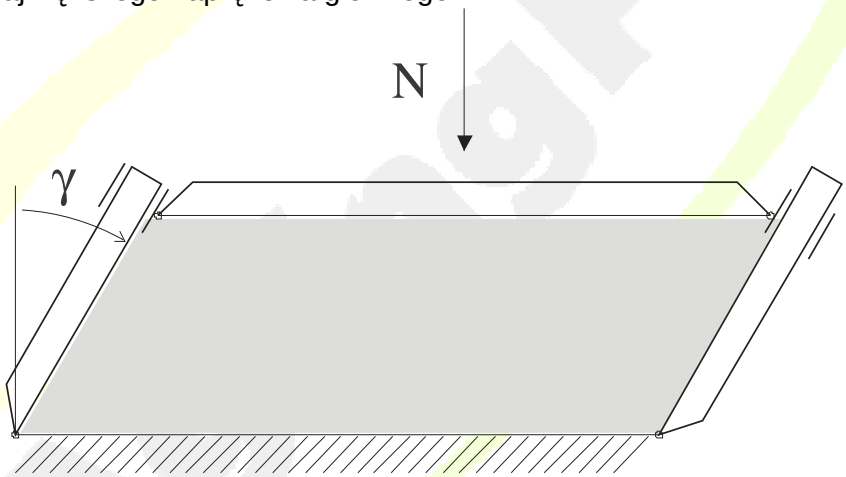
Rys. 3. Aparat pierścieniowo – obrotowy

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

W literaturze dotyczącej badań ośrodków sypkich wykazano, że aparaty o wymuszonej płaszczyźnie ścinania, wprowadzają znaczne niejednorodności gęstości i naprężeń w badanym materiale. Otrzymanie powtarzalnych wyników badań wymaga ścisłego przestrzegania ustalonych procedur pomiaru (Peschl, 1989; Schwedes, 2003).

2.4 Aparat prostego ścinania

Roscoe (1970) w swoich badaniach gruboziarnistego bezkohezyjnego piasku stosował aparat o ruchomych ścianach bocznych, przez które przekazywane było obciążenie ścinające, tzw. aparat prostego ścinania (rys. 4). Aparat ten adaptowany i zastosowany przez Schwedesa (2003) do pomiarów drobnoziarnistych kohezyjnych proszków okazał się bardzo użyteczny również dla tej grupy materiałów. Najważniejszą zaletą tego urządzenia jest w pełni określony stan naprężenia. Próbka w aparacie odkształca się tak samo jak odkształcałaby się nieograniczona jego ścianami. Strefa, w której struktura ośrodka podlega odkształceniu rozciąga się w tym przypadku na całą próbkę. Za pomocą badań rentgenowskich wykazano, że płaszczyzny poślizgu w tym urządzeniu tworzą się równolegle do podstaw. Z wyników pomiarów można wyznaczyć równocześnie i niezależnie koła Mohra dla odkształcenia i naprężenia oraz położenie płaszczyzny poślizgu względem płaszczyzny największego naprężenia głównego.



Rys. 4. Aparat prostego ścinania

Badania ziarna zbóż przeprowadzone na tego typu aparacie przez Hessego i Hoffmanna (1977) wykazały, że przy długich drogach ścinania, wymaganych dla roślinnych materiałów sypkich, występują znaczne nierównomierności rozkładu naprężenia ściskającego podobne do obserwowanych w aparacie bezpośredniego ścinania. Zdaniem autorów aparat prostego ścinania może mieć bardzo ograniczony zakres stosowania przy badaniu tych materiałów. Cechą niekorzystną tego aparatu jest również brak możliwości realizowania dowolnych schematów obciążeń badanej próbki.\

3. Parametry i procedury standardowe

Standardowe procedury wyznaczania właściwości mechanicznych materiałów sypkich poza dziedziną mechaniki gruntów znajdujemy w normach projektowania silosów na materiały sypkie. Do lat dziewięćdziesiątych normy posługiwały się stabelaryzowanymi wartościami parametrów. Autorzy norm mieli przy tym świadomość, że skojarzenie nazwy materiału z wartością parametru może dawać błędne rezultaty obliczeń. I tak autorzy ACI 313-91 (1995) ostrzegają, że podstawowe parametry projektowe: dla obliczeń naporu - gęstość, kąt tarcia wewnętrznego i kąt tarcia o ścianę zależą od stanu materiału oraz od warunków eksploatacji silosu. Schwedes (2003) zaleca, aby jeśli możliwe wyznaczać parametry dla każdego przypadku projektowania z materiałem uczestniczącym w procesie i w warunkach tego procesu. Wydaje się, że taka tendencja przeważa w ostatnich nowelizacjach norm projektowania. Metody wyznaczania właściwości mechanicznych zawarte są w dodatkach do najnowszych norm ISO 11697: 1995(E), ENV 1991-4 (European Standard), AS 3774-1996 (australijska) oraz w projekcie PN-B-03254. Projekty w tym fragmencie powołują się na wcześniejszą rekomendację EFCE (1989). Członkowie Grupy Roboczej Europejskiego Stowarzyszenia Inżynierii Chemicznej (EFCE) zalecili dla wyznaczania parametrów projektowych metodę bezpośredniego ścinania zwaną też metodą Janikego. Niżej przedstawiono procedury pomiarowe za Eurocode 1 (2003).

Próbki

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

Ciężar właściwy materiału skonsolidowanego, γ

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

Kąt tarcia o ścianę dla zapewnienia wypływu φ_s

Pomiar wykonywany jest w aparacie bezpośredniego ścinania (rys. 2). Próbka materiału sypkiego ślizga się po powierzchni odpowiadającej materiałowi ściany silosu z prędkością 0,04 m/s. Siła normalna jest niewielka tak, że odpowiada niskiemu poziomowi naporu jaki występuje w sąsiedztwie otworu wysypowego silosu.

Współczynnik tarcia o ścianę, μ - do wyznaczania obciążeń

Zasada pomiaru jest identyczna jak w przypadku kąta tarcia o ścianę. Pomiar (ścięcie próbki) prowadzi się jednak przy wyższym poziomie obciążenia – odpowiadającym naporowi na ścianę. Stosuje się aparat bezpośredniego ścinania o średnicy *D* nie mniejszej niż 40 krotność największego wymiaru cząstki i o wysokości *H* w zakresie od 0,15*D* do 0,20*D*. Przed ścinaniem materiał podlega konsolidacji jak opisano dla przypadku wyznaczania gęstości skonsolidowanej. Siła normalna N ma wartość jaka wytwarza naprężenie

odniesienia σ_r równe maksymalnej wartości naporu poziomego p_h, albo 50 kPa (jeśli nie jest znane naprężenie odniesienia). Następnie włączany jest napęd i komora aparatu przesuwa się ruchem prostoliniowym z prędkością 0,04 m/s. Współczynnik tarcia μ wyznaczany jest z uzyskanej po większym przemieszczeniu *w* stabilnej wartości siły tarcia F_1.

Iloraz naporu poziomego do pionowego $K_{s,m}$

Wartość tego parametru otrzymuje się w drodze bezpośredniego pomiaru, albo oblicza z zależności od kąta tarcia wewnętrznego. W przypadku pomiaru wyznaczana jest wartość w warunkach ściany gładkiej $K_{s,m0}$. Obciążenie pionowe jest przykładane do górnej powierzchni próbki, która nie ma możliwości przemieszczenia poziomego. Mierzone są napór poziomy σ_2 i pionowy σ_1, a z wartości ich przyrostów obliczany iloraz naporu $K_{s,m0}$ (K_{s0} wg PN-B-03202). Geometria aparatu pomiarowego i procedura wstępnego przygotowania próbki są identyczne jak w przypadku wyznaczania gęstości skonsolidowanej. Dno aparatu jest oddzielone od ściany, aby umożliwić pomiar naporu poziomego. Z pomiaru wyznaczany jest przebieg zależności $\Delta\sigma_2(\Delta\sigma_1)$, i dalej iloraz naporu $K_{s,m0}$. Wartość średnią ilorazu naporu oblicza się jako $K_{s,m} = 1{,}1\ K_{s,m0}$. Wartość $K_{s,m}$ dla warunków napełniania i przechowywania (spoczynku) można także wyliczyć z zależności od kąta tarcia wewnętrznego φ :

$$K_{s,m} = 1{,}1(1 - \sin\varphi) \qquad (1)$$

Parametry wytrzymałościowe c, φ oraz φ_c

Przyjmuje się, że wytrzymałość materiału sypkiego można wyrazić za pomocą trzech parametrów kohezji – *c*, efektywnego kąta tarcia wewnętrznego - φ oraz kąta tarcia wewnętrznego próbki - φ_c. Warunek płynięcia wyznaczany jest metodą bezpośredniego ścinania (rys. 2). Średnica komory aparatu *D* jest co najmniej 40 razy większa od wymiaru największego ziarna, zaś jej wysokość zawiera się w przedziale od 0,3*D* do 0,4*D.* Wstępne przygotowanie próbki, napór odniesienia σ_r i prędkość ścinania są identyczne ja opisano dla przypadku wyznaczania współczynnika tarcia o ścianę. Do obliczenia parametrów *c*, φ i φ_c przyjmuje się maksymalną wartość naporu ścinania τ_f jaka wystąpiła przed osiągnięciem poziomego przemieszczenia komory aparatu *w* = 0,05*D*. Zaleca się wykonanie dwu testów w warunkach jak przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Zalecane warunki eksperymentu.

Pomiar	Obciążenie Wstępne	Obciążenie pomiarowe	Wynik τ_f
1	σ_r	σ_r	τ_{f0}
2	σ_r	$0{,}5\sigma_r$	τ_{f1}

Wartości wyznaczanych parametrów oblicza się korzystając z zależności:

$$\varphi_c = arctan\frac{\tau_{f0}}{\sigma_r} \qquad (2)$$

$$\varphi_c = arctan\frac{\tau_{f0} - \tau_{f1}}{0{,}5\sigma_r} \qquad (3)$$

$$c = \sigma_r\left(tan\varphi - tan\varphi_c\right) \qquad (4)$$

Materiały bezkohezyjne (dla których *c*=0) są charakteryzowane tylko przez kąt tarcia wewnętrznego φ, który jest w tym przypadku równy φ_c.

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

4. Wskaźniki technologiczne

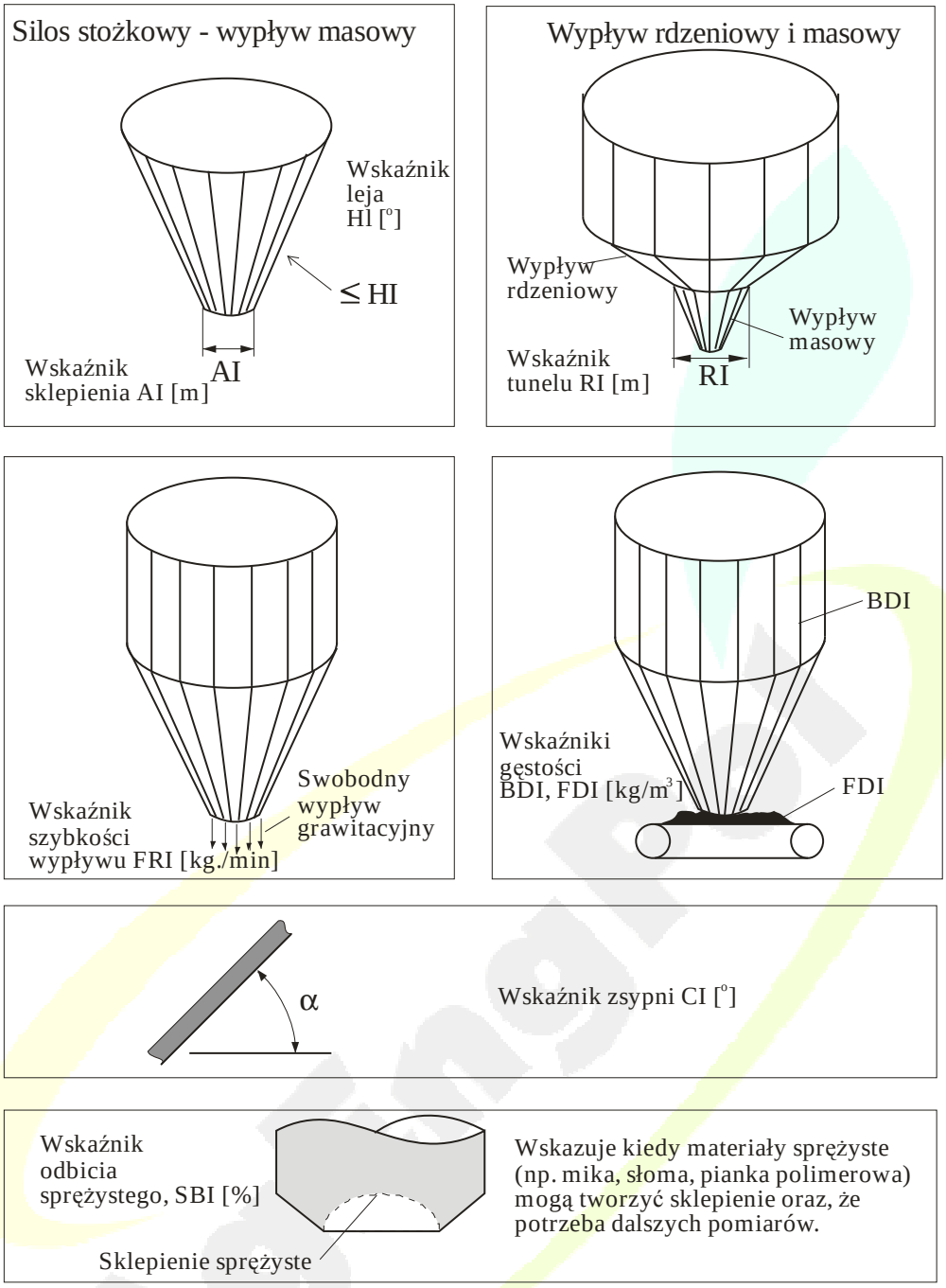
Aktualny stan wiedzy o mechanice materiałów ziarnistych nie pozwala jeszcze na szeroką standaryzację metod i parametrów. Przemysł potrzebuje jednak parametrów projektowych i miar jakości produktów. Powstają więc firmy konsultingowe oferujące usługi w zakresie wyznaczania właściwości i rekomendacji rozwiązań konstrukcyjnych. Największą wiarygodność na rynku uzyskują firmy założone i prowadzone przez specjalistów o ugruntowanej wcześniej renomie. Prawdopodobnie dobrą ilustracją zapotrzebowania przemysłu i proponowanych rozwiązań będzie analiza oferty firm Jenike and Johanson, Inc. oraz JR Johanson Inc. przedstawionych w Internecie (www.jenike.com oraz www.jrjohanson.com). Założyciele tych firm to byli pracownicy uniwersytetów, specjaliści najwyższej światowej klasy o niekwestionowanej reputacji. Pierwsza z wymienionych firm adresuje swoją ofertę do zakładów przemysłów: chemicznego, ochrony środowiska, spożywczego, szklarskiego, metalowego, produktów mineralnych, górniczego, papierniczego, farmaceutycznego, tworzyw sztucznych i proszków metali. Jenike and Johanson w zasadniczym swym profilu proponuje testy standardowe dla wyznaczania: kohezji, tarcia o ścianę, ściśliwości, przepuszczalności oraz kąta nachylenia rynny zsypowej zapewniającego stabilny wypływ. W razie potrzeby proponuje się wyznaczanie właściwości materiałów w zależności od: czasu spoczynku, naporu, temperatury i wilgotności powietrza otoczenia. Stosowana aparatura to przede wszystkim aparat Jenikego (1961, 1964 - aparat bezpośredniego ścinania) ze stanowiskiem do konsolidacji próbek. Ostatnio wprowadzono również aparat pierścieniowy, który oprócz zastosowań typowych dla aparatu Jenikego umożliwia także pomiar zużycia ciernego materiału. W sytuacjach kiedy wyznaczenie właściwości nie zapewnia wystarczającej informacji dla zaprojektowania przebiegu procesu firma proponuje wykonanie badań na modelu.

JR Johanson Inc. proponuje badania materiałów w szerokim zakresie temperatury i wilgotności. W standardowych testach proponuje się wyznaczanie gęstości, przepuszczalności, wytrzymałości oraz katów tarcia i adhezji. W zakresie usług jest także wyznaczanie wskaźników płynięcia zaproponowanych przez Johansona. Właściwości do wyznaczania wskaźników mierzone są przy naporach i współczynnikach skali odpowiadających rozmiarom urządzeń uczestniczących w rozważanym procesie. Niektóre wskaźniki mają wymiar fizyczny wyrażony w jednostkach USA z racji ich występowania na tym rynku. Zestaw wskaźników z ilustracją ich interpretacji fizycznej przedstawiono na rysunku 5 (Johanson, 2000). Wartości wskaźników wyznaczane są pod określonym naporem i stosownie do skali urządzeń technologicznych rozważanego procesu. Wartości cytowane niżej obowiązują dla średnicy silosu D = 10 ft (3,05 m) i średnicy otworu wysypowego d = 1 ft (0,305 m).

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

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

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



Rys. 5. Wskaźniki technologiczne Johansona (2000)

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

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

Wskaźnik zsypni CI (Chute Index) to zalecany kąt nachylenia rynny zsypowej w obszarach udarowego kontaktu z materiałem. Przyjmuje wartość CI = ASC +10°, gdzie ASC to kąt tarcia ślizgowego po płaskiej powierzchni próbki dociśniętej naporem 4700 N/m^2 i odciążonej przed nachyleniem powierzchni dla wyznaczenia ASC.

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

Znajomość charakterystyki materiału wyrażonej w wartościach wskaźników pozwala zaprojektować proces technologiczny o przewidywalnym przebiegu. Johanson (1996) przedstawia przykład wykorzystania znajomości wskaźników materiałów dla zapewnienia przebiegu procesu mieszania bez segregacji składników mieszanki .

Obiecującą propozycję obrotowego aparatu pomiarowego przedstawił Peschl (1989a) formułując również metodę wyznaczania właściwości mechanicznych (Peschl, 1989b) oraz metodę kontroli jakości proszków do zastosowania w przemyśle (Peschl, 1989c). Autor analizował znane aparaty ścinające. Stwierdził, że niektóre aparaty zawyżają wartości parametrów materiałowych w stosunku do teorii, inne zaś zaniżają wartości parametrów. Uznał, że obrotowy aparat ścinający o dwudzielnej komorze daje wartości parametrów materiałowych bliskie nominalnym. Potwierdził słuszność swych rozważań eksperymentami. W aparacie Peschla materiał ścinany jest w wyniku ruchu obrotowego dolnej części komory aparatu względem części górnej. Powierzchnia przekroju poziomego próbki wynosi 30 cm^2, a objętość 45 cm^3. W efekcie zastosowania ruchu obrotowego nie ma ograniczenia długości drogi ścinania, a w wyniku poziomego podziału komory płaszczyzna ścięcia formuje się w środku wysokości próbki, gdzie najsłabsze są zakłócenia od poziomych granic próbki. Autor zaleca taki wybór procedury pomiarowej by możliwie najbliżej oddawała warunki procesu, dla którego wyznaczane są parametry. Autor woli nie formułować procedury standardowej, ale daje możliwość zaprogramowania przebiegu ścinania w automatycznie sterowanym aparacie. W trakcie analizy wyników można wybrać liniową albo wykładniczą aproksymację warunku plastyczności. Dla większości materiałów swobodnie płynących i słabo kohezyjnych wystarczająca jest aproksymacja liniowa. Wówczas parametry materiałowe mają znaną zrozumiałą interpretację. Niektóre materiały charakteryzuje warunek płynięcia silnie nieliniowy w zakresie niskich naporów. Wtedy Peschl (1989b) proponuje aproksymację liniową w dwu przedziałach. Z prostej dla wyższego zakresu naporu wyznacza się większe naprężenie główne σ_1, a z przebiegu dla niższego zakresu naporu wyznacza się kohezję *c* i dalej wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie σ_c. Jeżeli powyższe metody nie dają wystarczającej dokładności opisu warunku płynięcia konieczna jest aproksymacja funkcją wykładniczą. Metoda aproksymacji nie może być narzucona z góry, musi ona wynikać z rozważenia konkretnego przypadku. Peschl (1989c) uważa, że zaproponowana przez niego metoda daje możliwość symulowania wszystkich praktycznie występujących warunków, prawidłowego wyznaczenia parametrów, a zatem właściwego funkcjonowania instalacji przemysłowych. Technologia proszków osiągnęła poziom nauki inżynierskiej i umożliwia już projektowanie instalacji przemysłowych bez uprzedniego eksperymentowania z urządzeniami i instalacją.

Bardzo ważną właściwością materiałów sypkich o wciąż rosnącym znaczeniu jest płynność. Jest to cecha determinująca jakość materiału. Klient oczekuje niezmiennej sypkości zakupionego proszku do prania, cukru czy mleka w proszku. W procesie mieszania i pakowania stabilna sypkość decyduje o prawidłowym przebiegu procesu i stabilnych właściwościach produktu (np. leku). Peschl sprawdził swój aparat w testach produktów przemysłu farmaceutycznego i węglowego (1989c) i zaleca jego stosowanie do kontroli jakości. Mierzone parametry to: napór konsolidacji (σ_1), kąt tarcia wewnętrznego (φ), kohezja (*c*) oraz wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (σ_c). Materiał swobodnie płynący charakteryzowany jest jedynie przez kąt tarcia wewnętrznego. Materiał kohezyjny charakteryzowany jest przez kohezję i kąt tarcia wewnętrznego. Napór konsolidacji σ_1

(odpowiada większemu naprężeniu głównemu) w trakcie pomiaru powinien być porównywalny z naporem jakiemu podlega materiał w warunkach procesu. Kąt tarcia wewnętrznego związany jest z wartościami σ_1 oraz σ_c. Jako bezwymiarowy parametr autor proponuje „płynność bezwzględną" - FLA :
gdzie, oprócz wymienionych parametrów: σ_2 – mniejsze naprężenie główne oraz γ_w - gęstość wody.

$$FLA = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)\cdot\gamma}{\sigma_c \gamma_w} \qquad (5)$$

Amerykańskie Stowarzyszenie Badania Materiałów (ASTM) wprowadziło standard wyznaczania właściwości materiałów sypkich (ASTM D6393-08) zwanych wskaźnikami Carra (Carr indices). Metoda ma zastosowanie do materiałów swobodnie płynących oraz o niewielkiej kohezji, przy maksymalnym wymiarze ziarna nie większym niż 2 mm. Materiał w stanie napowietrzonym musi wypływać przez otwór wysypowy o średnicy 7mm ± 1mm. Na metodę składa się osiem testów. Wyznacza się z nich dziesięć następujących wskaźników (wskaźniki są mierzone z wyjątkiem C i F, które są wyliczane):

A. Kąt nasypu Carra (Carr Angle of Repose)
B. Kąt zsypu Carra (Carr Angle of Fall)
C. Kąt różnicy Carra (Carr Angle of Difference)
D. Luźna gęstość Carra (Carr Loose Bulk Density)
E. Gęstość upakowana Carra (Carr Packed Bulk Density)
F. Ściśliwość Carra (Carr Compressibility)
G. Kohezja Carra (Carr Cohesion)
H. Jednorodność Carra (Carr Uniformity)
I. Kat łopatki Carra (Carr Angle of Spatula)
J. Rozproszenie Carra (Carr Dispersibility)

5. Podsumowanie i prognozy

Dwa fundamentalne opracowania opublikowane przed ponad pięćdziesięciu laty dały podstawy rozwoju mechaniki ośrodków rozdrobnionych pochodzenia roślinnego. To podsumowanie własnych wyników A. W. Jenike "Storage and Flow of Solids" z 1961 roku oraz wyczerpujący opis ówczesnego stanu wiedzy N.N. Mohsenina "Physical Properties of Plant and Animal Materials" z 1970 roku. Od tego czasu nie nastąpił większy postęp w badaniach teoretycznych, wprowadzono natomiast do praktycznego wykorzystania nowe osiągnięcia technologii informatycznych i elektronicznych, które pozwalają szybciej i taniej wyznaczać parametry materiałowe.

Postęp techniki komputerowej i oprogramowania umożliwił efektywną analizę ogromnych zbiorów danych oraz zastosowanie algorytmów, niestosowanych wcześniej ze względu na niewystarczającą szybkość obliczeń (np. metoda DEM). Modelowanie numeryczne stało się metodą badawczą o potężnych możliwościach. Obserwowane w praktyce przemysłowej zjawiska, których nie można było opisać metodami mechaniki ośrodków ciągłych (jak np. lawiny, segregacja w mieszaninach płynącego materiału, dynamiczny skok naporu w silosie w momencie uruchomienia wypływu) można obserwować i projektować w eksperymencie numerycznym.

Stosunkowo słabe rozpoznanie mechaniki materiałów rozdrobnionych i ostra konkurencja na globalnym rynku tworzą pole dla przyspieszonego rozwoju technologii z zastosowaniem automatyzacji i sterowania, które wymagają precyzyjnych metod charakteryzowania. Optymalne sterowanie procesem wymaga ciągłego pomiaru parametrów na linii produkcyjnej i szybkiej reakcji systemu sterowania tak by zapewnić utrzymanie założonych właściwości produktu.

Nowym polem o ogromnym potencjale rynkowym, także w odniesieniu do proszków spożywczych i sypkich agromateriałów jest nanotechnologia. Także w tej dziedzinie materiały o niespotykanie dotychczas drobnych cząstkach dają zupełnie nowe możliwości. W

fazie wstępnych opracowań są nanostruktury oparte na surowcach biologicznych, jak np. nanowąsy budowane z łańcuchów celulozy. Na przykład w uniwersytet NDSU prowadzi projekt dotyczący uruchomienia pilotowej produkcji nanowąsów ze słomy pszenicznej, z których po uzupełnieniu biologicznym polimerem wytwarzano by biodegradowalne włókna zastępujące włókno szklane.

W ostatnim dwudziestoleciu XX wieku, przede wszystkim opracowywano nowe metody pomiarowe oraz doskonalono metody znane, aby dać interpretację efektów dotychczas niewyjaśnionych oraz uprościć żmudne i czasochłonne procedury pomiarowe. W zakresie wyznaczania parametrów materiałowych szeroko zaakceptowano i wpisano do norm projektowania różne adaptacje metody Jenikego (1961). Uzgodnienie nomenklatury i standardów ponad podziałami branżowymi wciąż pozostaje aktualnym problemem.

Spośród licznych wcześniejszych opracowań aparat pierścieniowy prawdopodobnie na trwale pozostanie wśród uznanych technik pomiarowych. Jego przewaga nad innymi urządzeniami uwidacznia się zwłaszcza w badaniach materiałów roślinnych i produktów spożywczych. Materiały te z powodu odkształcalności granul wymagają stosunkowo długiej drogi ścinania, zaś ta w aparacie pierścieniowym jest nieograniczona. Druga istotna zaleta aparatu pierścieniowego to możliwość badań przy niskich poziomach obciążenia. Pionowe obciążenie próbki odniesione do stosunkowo dużej powierzchni poziomego przekroju kanału aparatu daje niewielkie wartości naporu pionowego. Rozpoznanie mechanicznego zachowania się materiałów ziarnistych pod niskim poziomem naporu jest aktualnie szczególnie oczekiwane przez praktykę. Obie wymienione zalety otwierają szerokie pole zastosowań aparatu pierścieniowego oraz możliwość zrozumienia niewyjaśnionych dotychczas zjawisk.

W najbliższej perspektywie należy oczekiwać rozszerzenia standaryzacji metod charakteryzowania proszków tak w sensie stanowienia standardów międzynarodowych (jak np. Eurocode) jak i w sensie stanowienia standardów wspólnych dla różnych branż. Metody charakteryzowania materiałów włóknistych pozostają we wcześniejszej fazie rozwoju uniemożliwiającej szerszą standaryzację.

Znamiennym trendem ostatnich lat w technologii materiałów ziarnistych było poszukiwanie metod badania i wskaźników jakości. W sensie mechaniki badanie jakości materiału sprowadza się do wyznaczenia jego płynności. Miarą płynności w rozumieniu teorii Jenike (1961) jest funkcja płynięcia $ff = \sigma_c(\sigma_1)$ – zależność wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie od większego naporu konsolidującego. Metoda Jenike ma jednak w odniesieniu do zastosowań praktycznych istotne wady. Badania są żmudne i czasochłonne. Opracowanie i interpretacja wyników wymagają znacznej wiedzy. Praktycy przemysłu oczekują więc szybkiej i prostej metody oraz jednoznacznego i zrozumiałego wskaźnika jakości materiału. Placówki naukowe oraz firmy doradcze przedstawiają kolejne propozycje. Wciąż jednak nie można mówić o opracowaniu metody, która uzyskałaby powszechną akceptację. Wydaje się, że w środowisku inżynierii procesów chemicznych przyjął się zestaw wskaźników Johansona (2000). Należy oczekiwać tworzenia standardów specyficznych dla poszczególnych branż przemysłu opartych na szybkich i zautomatyzowanych pomiarach.

6. Literatura

AS 3774-1996. *Loads on bulk solids containers*. Standards Australia. 1 The Crescent, Home bush, NSW 2140

ASTM D6393 – 08. 2008. *Standard Test Method for Bulk Solids Characterization by Carr Indices*

Bishop M.A., Henkel D.J. *The measurement of soil properties in the triaxial test.* London 1974

D6393-99 Standard Test Method for Bulk Solids Characterization by Carr Indices. 2000. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

EFCE – European Federation of Chemical Engineering. 1989. *Glossary of terms on storage and flow of particulate solids.* Strona http://magis.cz/efce/3/under.htm

Eurocode 1: Actions on structures – Part 4. Actions in silos and tanks. EN 1991-4. 2003. European Committee for Standarization. Brussels, Belgium.

ISO 11697:1995(E). *Bases for design of structures – Loads due to bulk materials.* International Standard. ISO.

Hesse, T., Hoffmann O.H.: Scherverhalten körniger landwirtschaftlicher Haufwerke. Grundl. Landtechnik Bd. 27(6), 205-213, 1977.

Horabik J., **Molenda M.**: Die Anwendung des Dreiachsenapparats zur Untersuchung mechanischer Eigenschaften der Kornmasse. 3 Wissenschaftlichten Tagung Agrophysik, Reinhardsbrunn, NRD, 1984, 355 - 358

Jenike A.W. 1961. *Gravity Flow of Bulk Solids.* Bulletin of the University of Utah (52)29, Salt Lake City, Utah.

Johanson J.R. 2000. *Smooth out solids blending problems.* Chemical Engineering Progress (96) 4 str.: 21 – 37

Mohsenin N.N. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach, 1970.

Molenda M., J. Horabik, Ross I.J.: Stress and deformation of wheat in direct shear test. International Agrophysics, 12(2), 115-118, 1998.

Peschl I.A.S.Z. 1989a. *Equipment for the measurement of mechanical properties of bulk materials.* Powder Handling and Processing, (1) 1: 73-81.

Peschl I.A.S.Z. 1989b. *Measurement and evaluation of mechanical properties of powders.* Powder Handling and Processing, (1) 2: 135-141.

Roscoe K.H. 1970. *The influence of strains in soil mechanics.* Tenth Rankine Lecture, Geotechgnique, 20, 129-170.

Schwedes J.: 1983. *Evolution of bulk solids technology since 1974.* Bulk Solids Handling, (3)1: 143 – 147.

Schwedes J. 2003. *Review on testers for measuring flow properties of bulk solids*. Granular Matter 5, 1 – 43.

Schulze D.: *Flowability and time consolidation measurements using a ring shear tester*. Powder Handling and Processing, 8(3), 221-226, 1996.

Zhang, Q., Britton M.G. and Jaremek R. 1991: Discharge loads in smooth and corrugated walled model bins for wheat, barley and canola. ASAE Paper No. 914063. St. Joseph, MI.

Ziolkowski D.P., Hardin B.O. Schwab C.V., Ross I.J. 1985. *Shear Modulus of Wheat at Low Strain Amplitude.* Transactions of the ASAE, 28(3), 884-888.

KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY

Publikacja współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Rozwój potencjału innowacyjnego członków Sieci Naukowej „Agroinżynieria dla rozwoju zrównoważonego rolnictwa, przemysłu rolno-spożywczego i obszarów wiejskich”
Nr umowy: **UDA-POKL.04.02.00-00-014/08-00** z dn. 16.10.2008