

DOSKONALENIE PROCEDURY WYZNACZANIA
KĄTA TARCIA WEWNĘTRZNEGO ZIARNA ZBÓŻ
METODĄ TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA*

J. Horabik, J. Łukaszuk

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

Streszczenie. W pracy wykazano, że uwzględnienie zmiany pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki ziarna zbóż w trakcie testu trójosiowego ściskania zwiększa dokładność wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego. Testy przeprowadzono dla próbek ziarna pszenicy o średnicy 0,15 m i wysokości 0,30 m dla sześciu poziomów wilgotności ziarna, w przedziale od 10 do 22%. Stwierdzono, że zastosowanie do obliczeń kąta tarcia wewnętrznego skorygowanej wartości większego naprężenia głównego w znaczący sposób zwiększyło dokładność pomiarów. Wyniki badań mogą stanowić podstawę właściwego doboru parametrów próbki materiału sypkiego podczas wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego.

Słowa kluczowe: materiał sypki, test trójosiowego ściskania, kąt tarcia wewnętrznego.

WSTĘP

Ziarno zbóż stanowi w rolnictwie jedną z większych grup materiałów. W większości przypadków podlega ono dalszemu przetworzeniu w różnych procesach technologicznych. Przemieszczanie, czyszczenie, sortowanie i magazynowanie to etapy, w których występuje przepływ materiału [15]. Każdemu przepływowi materiału towarzyszą opory tarcia.

* Pracę wykonano w ramach projektu badawczego 5 P06F 021 17 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 1999-2002.

Cykliczny charakter produkcji zmusza producentów do magazynowania nasion, dla których dobór właściwych warunków przechowywania wciąż stwarza wiele problemów. Podczas magazynowania dużą rolę odgrywają takie właściwości materiału, jak: higroskopijność, gęstość, ściśliwość, wytrzymałość mechaniczna, kąt tarcia wewnętrznego, kąt tarcia zewnętrznego, kohezja i iloraz naporu [1,5,6,9,14,17,18]. Właściwości te wpływają zarówno na jakość magazynowanego materiału, jak i na przebieg operacji technologicznych. Precyzyjne określenie parametrów tarcia ma istotne znaczenie w pracach projektowych konstrukcji silosów i procesów technologicznych.

Miarą tarcia wewnętrznego jest kąt tarcia wewnętrznego i kohezja. Wyznaczają one maksymalną wartość naprężenia stycznego, przy której następuje wyczerpanie wytrzymałości mechanicznej materiału i rozpoczyna się jego płynięcie. Kąt tarcia wewnętrznego zależy od właściwości mechanicznych materiału, o których decydują głównie cechy pojedynczych nasion (wymiary, właściwości powierzchniowe, skład chemiczny, odkształcalność) a także gęstość i struktura upakowania ośrodka. Kohezja określa maksymalną wartość naprężenia stycznego przenoszonego przez ośrodek przy braku naporu normalnego.

Właściwości mechaniczne roślinnych materiałów sypkich zależą od wilgotności i stanu naprężenia. Ze wzrostem wilgotności wzrasta podatność ziarniaków na odkształcenia i wydłuża się droga dojścia materiału do granicznego stanu naprężenia. Horabik i Łukaszuk [11] stwierdzili, że w przypadku ziarna pszenicy o wilgotności wyższej od 20% odkształcenia pojedynczych ziarniaków i w ślad za tym deformacja próbki podczas testu trójosiowego ściskania są tak duże, że nie udaje się uzyskać krytycznego stanu naprężenia przy odkształceniu mniejszym od 0,2.

Jedną z możliwości ograniczenia drogi dochodzenia materiału do granicznego stanu naprężenia jest taki dobór gęstości próbki, aby była ona zbliżona do gęstości krytycznej w rozważanym zakresie ciśnienia. Zastosowane w pracy [11] wstępne zagęszczanie próbek trójosiowego ściskania, pozwoliło zmniejszyć odkształcenie, przy którym powstawał w materiale graniczny stan naprężenia. Korzystny wpływ zagęszczania miał jednak ze wzrostem wilgotności materiału, na co wpływała zwiększona odkształcalność ziarniaków.

Jeden ze sposobów poprawy dokładności wyznaczania charakterystyk mechanicznych materiałów sypkich metodą trójosiowego ściskania polega na uwzględnieniu korekcji zmian pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki podczas deformacji [8]. Procedura ta uwzględnia w wyliczaniu pola powierzchni przekroju próbki, zarówno odkształcenie objętościowe ϵ_v , jak i odkształcenie liniowe ϵ_l .

Odształcenie objętościowe materiałów sypkich jest na ogół niewielkie. Grochowicz i inni [7] zarejestrowali podczas testów trójosiowego ściskania zagęszczonych wibracyjnie próbek ziarna jęczmienia o wilgotności 13% odształcenie objętościowe ε_v poniżej 5% przy mniejszym naprężeniu głównym σ_3 w zakresie 20 do 100 kPa,

W pracy rozważono możliwość poprawienia dokładności wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego ziarna zbóż metodą trójosiowego ściskania poprzez uwzględnienie zmiany pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki w trakcie deformacji.

MATERIAŁ I METODA

Analizę wpływu zmiany pola powierzchni przekroju próbki na wartość i dokładność wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego przeprowadzono na przykładzie testów trójosiowego ściskania próbek ziarna pszenicy odmiany Bega omówionych w pracy [11]. Próbki miały wysokość $H = 0,30$ m i średnicę $D = 0,15$ m. Testy wykonywane były przy mniejszym naprężeniu głównym σ_3 w zakresie od 40 do 90 kPa. Próbki zagęszczano wibracyjnie w celu zbliżenia ich gęstości do gęstości krytycznej. Pozwoliło to na istotne skrócenie drogi dochodzenia materiału do stanu ustalonego płynięcia. Korekcja polegała na zastąpieniu w obliczeniach kąta tarcia wewnętrznego nominalnej wartości naprężenia σ_1 skorygowanym naprężeniem σ_{1k} . W Tabeli 1 zamieszczono parametry próbek, dla których przeprowadzono analizę wpływu korekcji na wynik pomiaru.

Tabela 1. Parametry próbek ziarna pszenicy [11]

Table 1. Parameters of wheat grain samples [11]

Parametr	Wilgotność [%]					
	10,0	13,2	15,2	18,5	20	22,3
Gęstość ρ [kg·m ⁻³]	826,0	822,0	822,0	770,0	766,0	840,0
Porowatość p [%]	42,1	34,4	41,0	48,1	46,4	41,9

Przyjmując w uproszczeniu, że objętość V próbki w czasie deformacji nie ulega zmianie

$$V = H(1 - \varepsilon_1)S_1 = HS = const. \quad (1)$$

gdzie:

H - wysokość próbki,

S - pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki przed testem,

S_1 - średnie pole powierzchni przekroju poprzecznego zdeformowanej próbki,

ε_1 - odształcenie liniowe próbki,

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

$$S_1 = \frac{S}{1 - \varepsilon_1}. \quad (2)$$

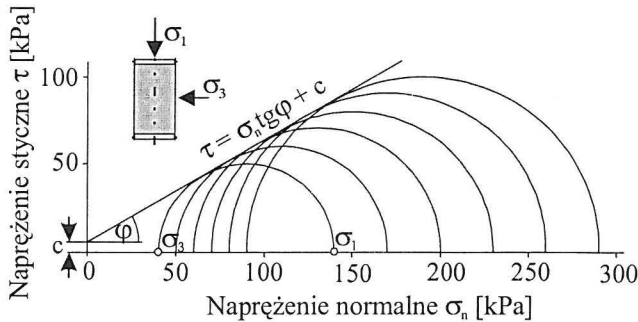
Uzyskaną w ten sposób średnią wartość pola powierzchni przekroju próbki S_1 zastosowano do korekcji większego naprężenia głównego σ_{1k}

$$\sigma_{1k} = \sigma_3 + \frac{F}{S_1} = \sigma_3 + \frac{F}{S}(1 - \varepsilon_1) \quad (3)$$

gdzie F - siła normalna w kierunku osi próbki.

Kąt tarcia wewnętrznego φ i kohezję c określono na podstawie warunku plastyczności Coulomba-Mohra (Rys. 1) wyznaczając styczną do 18 kół Mohra (6 wartości naprężenia $\sigma_3 \times 3$ powtórzeń):

$$\sigma_{1k} - \sigma_3 = (\sigma_{1k} + \sigma_3) \sin \varphi + 2c \cos \varphi. \quad (4)$$



Rys. 1. Kąt tarcia wewnętrznego wyznaczany na podstawie obwiedni kół Mohra.

Fig.1. Angle of internal friction determined from envelope of Mohr circles.

Zapisanie równania (4) w postaci

$$\sigma_{1k} = \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (5)$$

oraz wyznaczenie parametrów A i B równania regresji liniowej

$$\sigma_{1k} = A\sigma_3 + B \quad (6)$$

dla punktów pomiarowych (σ_{1k} , σ_3) spełniających warunek plastyczności (5) pozwala wyznaczyć kąt tarcia wewnętrznego i kohezję z następujących zależności:

$$\varphi = \arcsin \frac{A-1}{A+1}, \quad c = \frac{B}{2\sqrt{A}} \quad \text{dla } A \geq 1. \quad (7)$$

Do obliczeń przyjmowano maksymalną wartość naprężenia σ_{1k} , co oznacza, że wyznaczano maksymalną wartość kąta tarcia wewnętrznego. Parametry φ i c opisują zatem stan maksymalnej wytrzymałości, który nie zawsze pokrywa się ze stanem ustalonego płynięcia. Taki sposób postępowania przyjęto ze względu na małą (około 40) wartość stosunku wysokości próbki do wymiaru ziarna ośrodka. Mimo, że mieścił się on w zakresie zalecanym przez normy [4,19], był jednak zbyt mały, aby ustalone płynięcie materiału powstało przy odkształceniu próbki rzędu kilku procent.

Odchylenie standardowe kąta tarcia wewnętrznego $\Delta\varphi$ oraz kohezji Δc wyznaczono na podstawie błędów standardowych parametrów A i B prostej regresji z następujących zależności:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta A}{\sqrt{A(A+1)}} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (8)$$

$$\Delta c = \frac{1}{2\sqrt{A}} \Delta B + \frac{B}{4A^{1.5}} \Delta A \quad (9)$$

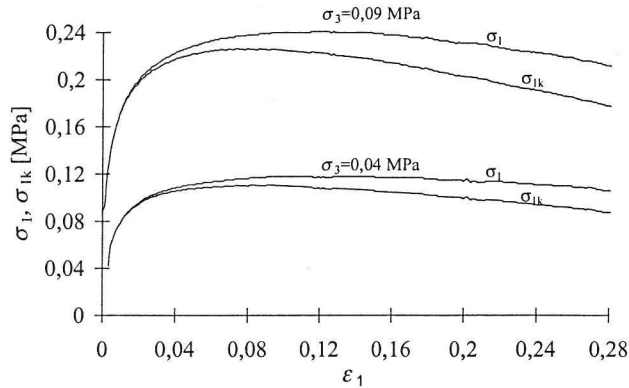
gdzie: ΔA i ΔB - błędy standardowe.

Istotność różnic pomiędzy wartościami kąta tarcia wewnętrznego oraz kohezji badano stosując test identyczności prostych regresji [3].

WYNIKI

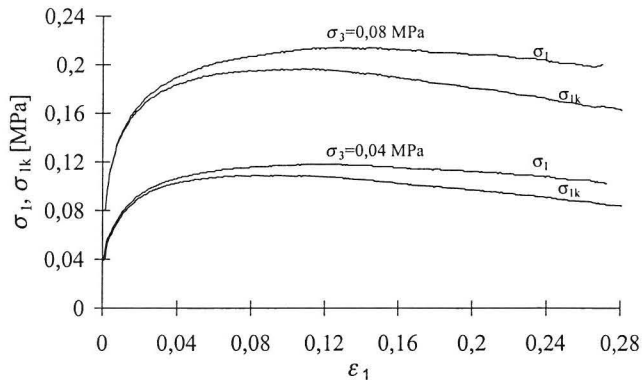
Konsekwencją wprowadzenia korekcji zmian pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki w trakcie testu trójosiowego ściskania jest spadek wartości naprężenia skorygowanego σ_{1k} w stosunku do wartości nominalnej σ_1 . Różnica pomiędzy naprężeniem nominalnym σ_1 i skorygowanym σ_{1k} wzrasta liniowo ze wzrostem odkształcenia ε_1 (równanie 3). Rysunki 2 do 7 przedstawiają porównanie przebiegów zależności naprężeń σ_1 i σ_{1k} od odkształcenia ε_1 dla próbek ziarna pszenicy w przedziale wilgotności od 10 do 22,3%. Skorygowane przebiegi zależności $\sigma_{1k}(\varepsilon_1)$ uwidaczniają maksimum naprężenia pojawiające się przy mniejszej wartości odkształcenia ε_1 niż w przypadku przebiegów nie skorygowanych. Dla przebiegów skorygowanych maksimum naprężenia σ_{1k} pojawiało się na ogół przy odkształceniu ε_1 nie większym niż 0,1, a w przypadku próbki ziarna

pszenicy o wilgotności 20% i $\sigma_3 = 80$ kPa – odkształcenie ε_1 nie przekraczało wartości 0,15. W skrajnym przypadku (próbka ziarna o wilgotności 22,3%, $\sigma_3 = 70$ kPa) odkształcenie $\varepsilon_1 = 0,26$ przekraczało granicę akceptowanych wartości. W przypadku nie skorygowanych przebiegów zależności $\sigma_1(\varepsilon_1)$ maksimum naprężenia σ_1 występowało przy odkształceniu ε_1 mniejszym od 0,1 tylko dla najniższej wartości naprężenia $\sigma_3 = 40$ kPa i wilgotności ziarna nie przekraczającej 15%. Dla wilgotności 20% odkształcenie ε_1 wynosiło około 0,2. Dla najwyższej wartości naprężenia $\sigma_3 = 90$ kPa i wszystkich poziomów wilgotności ziarna, maksimum naprężenia σ_1 występowało przy odkształceniu ε_1 większym od 0,1.



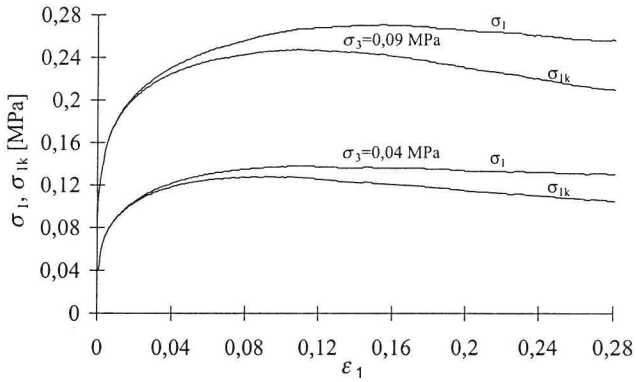
Rys. 2. Zależności $\sigma_1(\varepsilon_1)$ i $\sigma_{1k}(\varepsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 10%.

Fig. 2. Stress-strain relationships $\sigma_1(\varepsilon_1)$ and $\sigma_{1k}(\varepsilon_1)$ for samples of wheat grain variety Begra of the moisture content of 10%.



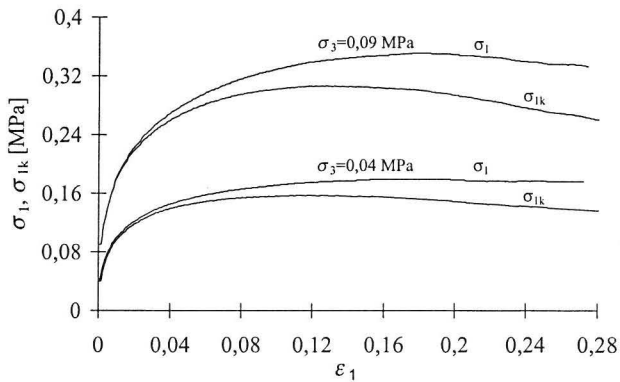
Rys. 3. Zależności $\sigma_1(\varepsilon_1)$ i $\sigma_{1k}(\varepsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 13,2%.

Fig. 3. Stress-strain relationships $\sigma_1(\varepsilon_1)$ and $\sigma_{1k}(\varepsilon_1)$ for samples of wheat grain variety Begra of the moisture content of 13.2%.



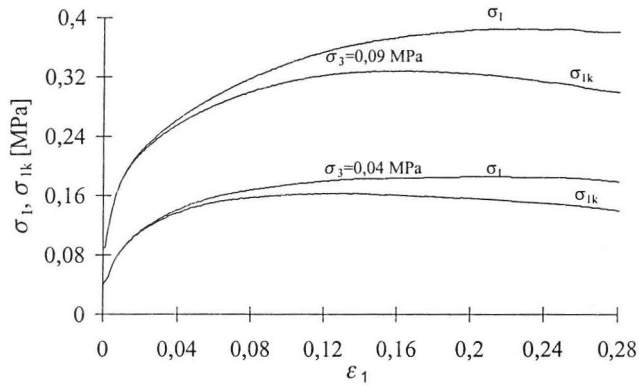
Rys. 4. Zależności $\sigma_1(\epsilon_1)$ i $\sigma_{1k}(\epsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 15,2%.

Fig. 4. Stress-strain relationships $\sigma_1(\epsilon_1)$ and $\sigma_{1k}(\epsilon_1)$ for samples of wheat grain variety Begra of the moisture content of 15.2%.



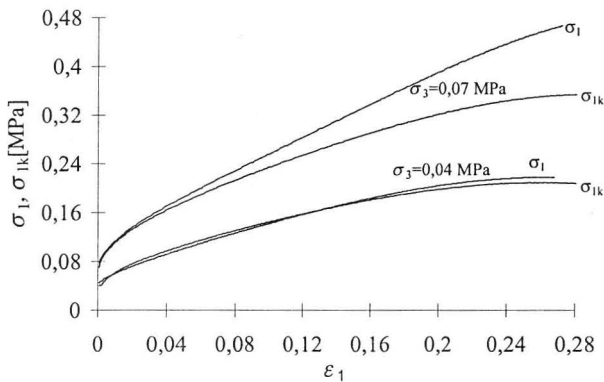
Rys. 5. Zależności $\sigma_1(\epsilon_1)$ i $\sigma_{1k}(\epsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 18,5%.

Fig. 5. Stress-strain relationships $\sigma_1(\epsilon_1)$ and $\sigma_{1k}(\epsilon_1)$ for samples of wheat grain variety Begra of the moisture content of 18.5%.



Rys. 6. Zależności $\sigma_1(\varepsilon_1)$ i $\sigma_{1k}(\varepsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 20%.

Fig. 6. Stress-strain relationships $\sigma_1(\varepsilon_1)$ and $\sigma_{1k}(\varepsilon_1)$ for samples of wheat grain variety Begra of the moisture content of 20.0%.



Rys. 7. Zależności $\sigma_1(\varepsilon_1)$ i $\sigma_{1k}(\varepsilon_1)$ dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o wilgotności 22,3%.

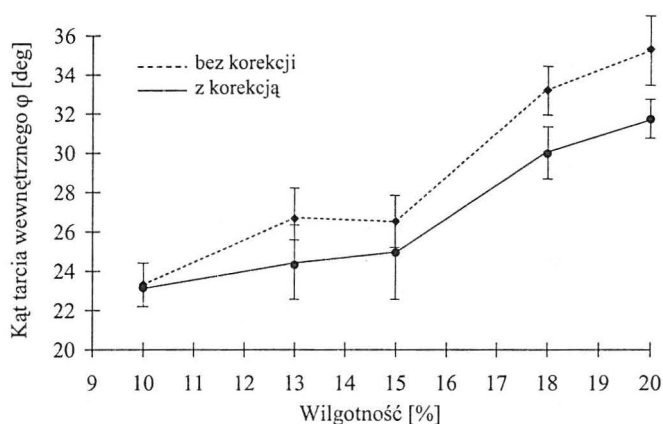
Fig. 7. Stress-strain relationships $\sigma_1(\varepsilon_1)$ and $\sigma_{1k}(\varepsilon_1)$ for samples of wheat grain variety Begra of the moisture content of 22,3%.

Tabela 2. Kąt tarcia wewnętrznego i kohezja (wraz z odchyleniem standardowym) dla 6 poziomów wilgotności ziarna pszenicy wyznaczone na podstawie skorygowanych przebiegów $\sigma_{1k}(\varepsilon_1)$

Table 2. Angle of internal friction and cohesion (with standard deviation) for 6 levels of moisture content of wheat grain determined from corrected relationships $\sigma_{1k}(\varepsilon_1)$

Parametr	Wilgotność [%]					
	10,0	13,2	15,2	18,5	20,0	22,3
Kąt tarcia wewn. φ [deg]	$23,1 \pm 0,4$	$24,0 \pm 0,5$	$24,9 \pm 0,6$	$29,9 \pm 0,4$	$31,7 \pm 0,5$	$40,2 \pm 0,5$
Kohezja c [kPa]	$7,1 \pm 1,1$	$6,2 \pm 1,6$	$9,7 \pm 2,8$	$10,3 \pm 0,8$	$9,2 \pm 1,4$	$6,6 \pm 1,2$

W Tabeli 2 zamieszczono wartości kąta tarcia wewnętrznego i kohezji wyznaczone na podstawie skorygowanych przebiegów $\sigma_{1k}(\varepsilon_1)$, zaś Rys. 8 przedstawia zależność kąta tarcia wewnętrznego od wilgotności wyznaczonego na podstawie nie skorygowanych i skorygowanych przebiegów $\sigma_1(\varepsilon_1)$. Jedynie w przypadku ziarna o wilgotności 10% nie stwierdzono istotnej różnicy. Wynikało to z niewielkiego odkształcenia ε_1 (około 0,05), przy którym próbka o tej wilgotności osiągała graniczny stan naprężenia (Rys. 2). We wszystkich pozostałych przypadkach wprowadzenie korekcji zmniejszało wartość kąta tarcia wewnętrznego. Różnica pomiędzy wartościami kąta tarcia wewnętrznego wyznaczonymi na podstawie nie skorygowanych i skorygowanych przebiegów naprężenia σ_1 rosła wraz z wilgotnością materiału. Procentowa różnica w wartości kąta tarcia wewnętrznego, odniesiona do kąta wyznaczonego dla przebiegów nie skorygowanych, wynosiła od 6% przy wilgotności ziarna 15,2% do 11,4% przy wilgotności 20%. Odchylenia standardowe kąta tarcia wewnętrznego, wyznaczonego na podstawie przebiegów skorygowanych, były niższe o 0, 20, 14, 33 i 38% niż kąta tarcia wyznaczonego na podstawie przebiegów nie skorygowanych - odpowiednio dla kolejnych poziomów wilgotności. Kohezja wyznaczona na podstawie przebiegów skorygowanych była istotnie różna od zera, a w przypadku ziarna o wilgotności 15,2% nie różniła się istotnie od wyznaczonej na podstawie przebiegów nie skorygowanych.



Rys. 8. Średnie wartości kąta tarcia wewnętrznego (oraz 95% przedziały ufności) dla próbek ziarna pszenicy odmiany Begra o pięciu poziomach wilgotności wyznaczone na podstawie skorygowanych i nie skorygowanych przebiegów $\sigma_1(\varepsilon_1)$.

Fig. 8. Mean values of the angle of internal friction (with 95% confidence intervals) of wheat grain samples variety Begra for five levels of the moisture content determined from corrected and not corrected $\sigma_1(\varepsilon_1)$ relationships.

DYSKUSJA

Zgodnie z aktualnymi zaleceniami formułowanymi w normach dotyczących projektowania silosów parametry materiałowe należy wyznaczać indywidualnie dla każdej realizacji technicznej [2,4,19]. Zalecenia dotyczące wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego materiałów sypkich formułowane są w sposób ogólny i nie uwzględniają specyficznych właściwości poszczególnych rodzajów materiałów. Dotyczy to między innymi roślinnych materiałów sypkich, których duża odkształcalność ma wpływ na dokładność pomiarów. Wraz ze wzrostem odkształcalności ziaren ośrodka wydłuża się droga dojścia materiału do warunków ustalonego płynięcia, co istotnie komplikuje pomiary. Wzrost drogi ścinania pociąga za sobą wzrost pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki, co powiększa błąd systematyczny, jakim obarczona jest wartość większego naprężenia głównego σ_1 . Zaniedbanie tego błędu powoduje zawyżanie wartości kąta tarcia wewnętrznego w przypadku ziarna o dużej wilgotności.

Grubość warstwy ścinania powstająca podczas testu trójosiowego ściskania wynosi kilkanaście średnich wymiarów ziarna ośrodka [10]. Gdy warstwa ścinania jest w pełni uformowana (jak np. podczas ustalonego płynięcia) gradient przemieszczenia stycznego na przekroju tej warstwy wynosi około 1 [12]. Wynika z tego, że zalecana przez normy [4,19] wartość stosunku wysokości próbki do maksymalnego wymiaru ziarna ośrodka, wynosząca 40, jest w przypadku dużej wilgotności materiału zbyt mała, aby umożliwić pełne uformowanie się warstwy ścinania przy odkształceniu ϵ_1 rzędu kilku procent. Aby uniknąć nadmiernego powiększania wymiarów próbki, zwłaszcza w przypadku materiałów o dużych wymiarach ziarna, należy poszukiwać sposobów pozwalających na skrócenie drogi dochodzenia materiału do granicznego stanu naprężenia. Wymiary próbki, gęstość i wilgotność materiału to główne czynniki wpływające na jej długość. Zastosowane w pracy [11] wstępne zagęszczanie próbek pozwoliło zbliżyć gęstość wyjściową do gęstości krytycznej i tym samym ograniczyć odkształcenie niezbędne do uzyskania stanu ustalonego płynięcia. Kolejnym krokiem umożliwiającym zwiększenie dokładności wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego ziarna zbóż metodą trójosiowego ściskania jest uwzględnienie zmian pola powierzchni przekroju próbki podczas deformacji.

WNIOSKI

1. Korekcja zmian pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki roślinnego materiału sypkiego podczas testu trójosiowego ściskania istotnie zwiększa dokładność wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego.
2. W przypadku ziarna pszenicy korekcja jest niezbędna przy wilgotności powyżej 13% i stosunku wysokości próbki do wymiaru ziarna rzędu 40.

PIŚMIENNICTWO

1. **Drescher A.:** Metody obliczeń parć i przepływu materiałów ziarnistych w zbiornikach. PWN Warszawa-Poznań, 1983.
2. **Dyduch M., Kamiński M., Łapko A., Runkiewicz L.:** Nowelizacja normy PN-89/B-03262 „Żelbetowe zbiorniki na materiały sypkie i kisonki. Obliczenia statyczne i projektowanie”. XI Konferencja „Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze”, 65-69, Świeradów Zdrój, 2000.
3. **Elandt R.:** Statystyka matematyczna w zastosowaniu do doświadczalnictwa rolniczego. PWN, Warszawa, 1964.
4. Eurocode 1: Basis of design and actions on structures. Part 4. Actions in silos and tanks. DD ENV 1991-4: 1996.
5. **Frączek J.:** Tarcie ziarnistych materiałów roślinnych. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie, Nr 252, Kraków, 1999.
6. **Grochowicz M.:** Wpływ niektórych czynników fizycznych na tarcie wewnętrzne materiału ziarnistego. Praca doktorska, Akademia Rolnicza w Lublinie, 1986.
7. **Grochowicz M., Horabik J., Molenda M.:** Zastosowanie aparatu trójosiowego ściskania do badania właściwości mechanicznych ośrodków rozdrobnionych pochodzenia roślinnego. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 320, 107-114, 1987.
8. **Head K. H.:** Manual of soil laboratory testing. Vol. 3. Effective stress tests. Pentech Press London, 1986.
9. **Horabik J.:** Wpływ właściwości mechanicznych ziarna pszenicy na rozkład obciążenia w zbiorniku. *Acta Agrophysica*, 1, 1994.
10. **Horabik J., Łukaszuk J.:** Analiza doświadczalna powstawania warstwy ścinania w złożu nasion. *Inżynieria Rolnicza*, 2(22), 85-91, 2001.
11. **Horabik J., Łukaszuk J.:** Pomiar kąta tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy metodą trójosiowego ściskania. *Acta Agrophysica*, 37, 39-50, 2000.
12. **Horabik J., Łukaszuk J., Grochowicz M.:** Formation of shear band in a granular material during triaxial compression test. *International Agrophysics*, 14, 273-278, 2000.
13. **ISO 3535:** Continuous mechanical handling equipment-Classification and symbolization of bulk materials. International Organization for Standardization, Genewa, 1977.
14. **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.
15. **Laskowski J., Skonecki S.:** Pomiar współczynnika tarcia wewnętrznego pszenicy o różnej wilgotności i stopniu rozdrobnienia. *Acta Agrophysica*, 46, 95-104, 2001.
16. **Lityński M.:** Biologiczne podstawy nasiennictwa. PWN Warszawa, 1982.

17. **Łukaszuk J., Stasiak M., Rusinek R., Horabik J.:** Wpływ wilgotności na kąt tarcia wewnętrznego ziarna zbóż. *Acta Agrophysica*, 46, 105-113, 2001.
18. **Molenda M., Horabik J., Grochowicz M., Szot B.:** Tarcie ziarna pszenicy. *Acta Agrophysica*, 4, 1995.
19. Polska Norma PN-B-033333254-2002: Silosy żelbetowe na materiały sypkie. Obliczenia statyczne, projektowanie, wykonawstwo i eksploatacja.

IMPROVING OF THE PROCEDURE OF DETERMINATION
OF THE ANGLE OF INTERNAL FRICTION OF CEREAL GRAIN
IN TRIAXIAL COMPRESSION TEST

J. Horabik, J. Łukaszuk

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27
e-mail: jhorabik@demeter.ipan.lublin.pl

Summary. The possibility of improving the procedure of determination of the angle of internal friction of cereal grain in the triaxial compression test by considering the change of sample cross-section during deformation was analysed. The triaxial compression tests were performed for samples of wheat grain of 0.15 m in diameter and 0.3 m high for six levels of the moisture content in the range from 10 to 22%. Application of the corrected value of the major principal stress increased significantly accuracy of determination of the angle of internal friction. Obtained results can be useful for proper selection of parameters of the triaxial compression sample for the determination of the angle of internal friction.

Key words: granular material, triaxial compression test, angle of internal friction.