

METODA WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA POMIĘDZY DWOMA METALOWYMI I ORGANICZNYMI OBIEKTAMI

Józef Łukaszuk, Marek Molenda, Józef Horabik, Joanna Wiącek

Institut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: j.wiacek@ipan.lublin.pl

Streszczenie. Opracowano metodę wyznaczania współczynnika tarcia pomiędzy dwoma ziarnami o kształcie bliskim bryły obrotowej. Metoda opiera się na równoczesnym wyznaczaniu siły tarcia i względnego przemieszczenia pionowego dwóch nasion obciążonych siłą normalną z wymuszonym ruchem w kierunku poziomym. Weryfikowano przydatność metody mierząc tarcie dwóch płytek stalowych i dwóch kulek łożyskowych o średnicy 5 mm. Ustalono warunki konieczne dla uzyskiwania wiarygodnych i powtarzalnych wyników. Wyznaczano współczynniki tarcia powierzchni metalowych oraz dwóch nasion grochu, pszenicy i rzepaku o wilgotności równowagowej. W przypadku nasion rzepaku obciążenie normalne wynosiło 0,59 N, zaś dla pozostałych próbek 0,98 N. Najwyższą powtarzalność wyników otrzymywano w przypadku tarcia płaskich powierzchni stalowych. W testach tarcia kulek stalowych otrzymywano większe rozrzuty wartości siły tarcia. Wyniki pomiarów siły tarcia ziaren grochu, pszenicy i rzepaku wykazały jeszcze większe rozrzuty wartości, będące wynikiem zmienności kształtu chropowatości ich powierzchni oraz nieodwracalnej deformacji w obszarze kontaktu. Wydaje się, że katalogi powinny prezentować możliwy zakres wartości współczynnika tarcia, a projektanci urządzeń przemysłowych wybierać wartości stosownie do warunków występujących w rozpatrywanym przypadku.

Słowa kluczowe: tarcie ziaren, współczynnik tarcia, kąt tarcia wewnętrzny, kąt usypu

WSTĘP

Tarcie to zespół zjawisk występujących w obszarze styku dwóch badanych obiektów. W zależności od stanu, charakteru ruchu obiektu oraz rodzaju powierzchni będących w kontakcie rozróżnia się kilka rodzajów tarcia (statyczne, kinetyczne, toczne, poślizgowe) (Hebda i Wachal 1980). Podejmowane od wielu lat próby matematycznego opisu zjawiska nie dostarczyły ogólnego modelu, jednak zaowocowały modelami efektywnymi w ograniczonym zakresie zastosowań.

Tarcie jako proces złożony z wielu współzależnych zjawisk jest trudne do opisu już w przypadku płaskich powierzchni. Próby opisu tarcia w kontaktach ziaren roślin uprawnych napotykać nowe trudności wynikające z krzywizny powierzchni.

Na deformacje (płynięcie) materiału sypkiego składają się ruch postępowy i ruch obrotowy cząstek. Skinner (1969) w testach bezpośredniego ścinania z suchymi i mokrymi kulkami szklanymi wykazał, że przyrost kąta tarcia φ_{pp} pomiędzy tymi obiektami nie przenosi się monotonicznie na kąt tarcia wewnętrznej warstwy tych obiektów. Blisko pięciokrotny przyrost wartości φ_{pp} nie powodował zmiany wytrzymałości próbki. Autor konkludował, że w deformacji złóż ziaren o niskim tarcu dominują wzajemne poślizgi, zaś przy wyższym φ_{pp} większy jest udział obrotów. Większy udział obrotów towarzyszy także deformacji ze zmianą objętości oraz z udziałem drgań ciernych.

Procter i Barton (1974) wyznaczyli kąt tarcia pomiędzy dwiema kulami szklanymi i stalowymi oraz obiektami wykonanymi z kwarcu i szpatu polnego. W eksperymentach wystąpiła duża zmienność wyników, większa w przypadku elementów suchych niż w przypadku wilgotnych. Wykazano, że φ_{pp} jest nie tylko funkcją składu chemicznego minerału, ale pozostaje pod silnym wpływem kształtu obszaru kontaktu, chropowatości powierzchni oraz warunków otoczenia. Różne materiały różnie reagują na warunki otoczenia obszaru kontaktu, np. wilgotność nie miała wpływu na tarcie kulek stalowych, a wpływała bardzo silnie na tarcie minerałów. W podsumowaniu wyników testów autorzy stwierdzają, że zasadniczo wytrzymałości warstwy nie można wyprowadzić z zachowania dwóch ziaren. Rekomendują, aby dla wyznaczania kąta tarcia φ_{pp} stosować pomiar na wielu kontaktach równocześnie. Taki pomiar zawierałby wpływ wszystkich zmiennych efektów dając wartość przeciętną, a nie właściwości jednego punktu, które mogą być nie reprezentatywne dla zachowania w masie.

Walton (1994) badał w symulacjach numerycznych związek współczynnika tarcia pomiędzy ziarnami z dynamicznym kątem usypu φ_r . Symulacje modelowały zachowanie się materiału w bębnie obrotowym o osi poziomej przy współczynnikach tarcia ziarna o ziarno μ_{pp} w zakresie od 0,02 do 1,0. Autor wykazał, że dynamiczny kąt usypu φ_r zależy od μ_{pp} głównie w zakresie wartości poniżej 0,05. Przy tak niskich oporach tarcia nie występuje istotny udział obrotów w deformacji warstwy i kąt usypu wzrasta prawie proporcjonalnie z przyrostem μ_{pp} . Od momentu gdy μ_{pp} osiąga wartość wystarczająco wysoką by wywołać obroty cząstek dalszy jego przyrost powoduje jedynie niewielki przyrost φ_r . Symulacje wykazały, że nie ma takiej zmiany μ_{pp} , która sprawiłaby, że zbiór elementów kulistych zachowywałby się podobnie jak zbiór elementów niekulistych. Kąty usypu obiektów φ_r o wartości powyżej 31° Walton zaobserwował jedynie w symulacjach z elementami niekulistymi.

Horabik i Molenda (1988) wykazali znaczne zróżnicowanie wartości współczynnika tarcia wyznaczonego podczas poślizgu dwóch ziaren pszenicy o różnej wilgotności o płytkę szklaną i stalową o różnej chropowatości, w konsekwencji zróżnicowanej struktury geometrycznej ich powierzchni. Wśród czynników mających istotny wpływ na tarcie w obszarze kontaktu ziaren ośrodka sypkiego pochodzenia biologicznego oraz w punkcie styku cząstek z konstrukcją urządzenia za najważniejsze uznaje się: rodzaj i szorstkość powierzchni, nacisk normalny, drogę poślizgu, prędkość poślizgu, wilgotność, orientację ziaren i inne (Horabik 2001).

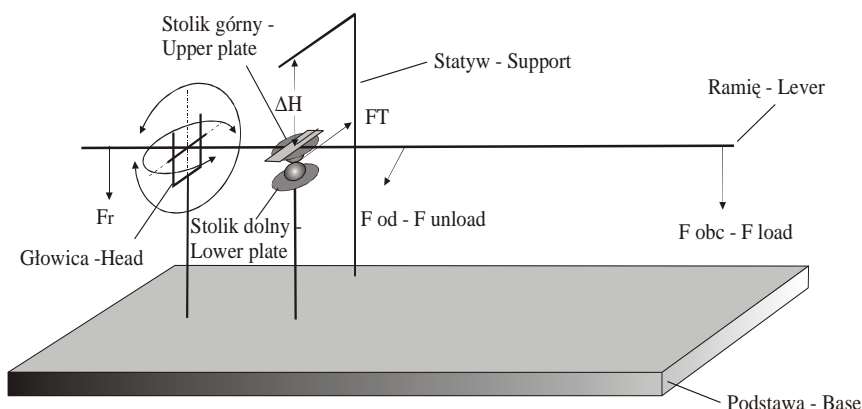
Wydaje się, że zastosowanie symulacji numerycznych jest jednym z bardziej obiecujących podejść do zagadnienia opisu związku tarcia na indywidualnych obszarach kontaktu z oporem tarcia warstwy ziaren. Wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów w ciągu ostatnich kilku dekad rośnie skala wykorzystania metod numerycznych w badaniu własności materiałów ziarnowych, opartych na modelach kontaktu uwzględniających zjawisko tarcia w obszarze ich kontaktu. Procedura obliczeniowa wymaga zadania parametrów materiałowych modelowanych ziaren badanego ośrodka, zaś te muszą być wyznaczone eksperymentalnie.

Celem podjętych badań było opracowanie i weryfikacja metody wyznaczenia współczynnika tarcia między ziarnami, która dostarczyłaby wiarygodnych wartości parametru dla symulacji numerycznych metodą elementów dyskretnych.

MATERIAŁ I METODY

Na podstawie analizy literatury oraz wcześniejszych doświadczeń własnych autorów skonstruowano aparat do wyznaczenia współczynnika tarcia pomiędzy dwoma ziarnami, którego schemat przedstawia rysunek 1. Na płaskiej płycie podstawy, na wysięgniku o stałej wysokości, umieszczono głowicę obrotową umożliwiającą obrót ramienia w płaszczyznach pionowej i poziomej. Na ramieniu, w odległości 30 mm od osi obrotu zamocowano stolik górny, do którego mocowano jedno z ziaren badanej pary. W odległości 30 mm od osi obrotu ramienia, na kolumnie o regulowanej wysokości, umieszczono stolik dolny, do którego mocowano drugie ziarno. Na ramieniu, w pięciu punktach (1n do 5n) w odległościach co 30 mm, wykonano nacięcia, które wyznaczają miejsca przyłożenia siły normalnej. Na krótszym odcinku ramienia umieszczono przesuwany obciążnik, który równoważy inne niż celowo nakładane obciążenia dwóch ziaren. Siłę styczną przykładano za pośrednictwem linki przez przetwornik tensometryczny LCL-227G zamocowany do siłownika o nastawnej prędkości. W trakcie wzajemnego poślizgu ziaren i pomiaru siły stycznej mierzono równocześnie pionowe przemieszczenie stolika górnego za pomocą czujnika indukcyjnego (HBM W5K). Czujnik przemieszczenia, zamocowany na statywie, zasilano napięciem o częstotliwości 5 kHz. Przetwornik siły (LCFA 150 Omega Engng.) zasilano napięciem stałym 10V,

a sygnał wyjściowy wzmacniano przez wzmacniacz pomiarowy. Sygnały z przetworników siły i przemieszczenia rejestrowano w pamięci komputera za pośrednictwem układu akwizycji danych (USB-1408FS, Measurement Computing Corp.).



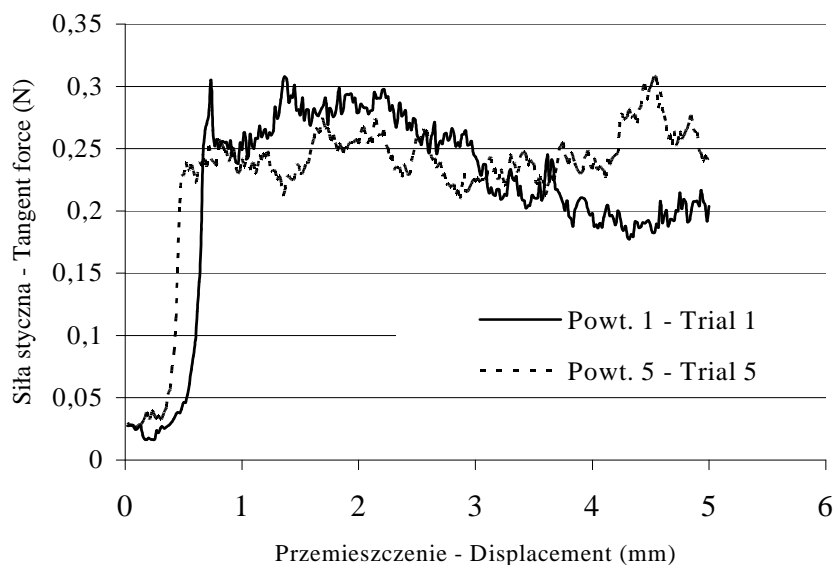
Rys. 1. Schemat aparatu do wyznaczania współczynnika tarcia pomiędzy ziarnami
Fig. 1. Schematic of apparatus for measurement of coefficient of inter-grain friction

Metodę pomiarową sprawdzano mierząc tarcie w kilku układach elementów, tj. dla par płaskich powierzchni stalowych 10x10 mm, stalowych kulek łożyskowych o średnicy 5 mm smarowanych i nie smarowanych oraz dla par ziaren grochu, pszenicy i rzepaku. Pomiar na ziarnach rzepaku wykonano pod obciążeniem normalnym 0,59N, zaś dla pozostałych próbek pod obciążeniem normalnym 0,98N.

WYNIKI I DYSKUSJA

Tarcie płaskich powierzchni stalowych i mosiężnych

Na rysunku 2 przedstawiono typową zależność siły tarcia T od przemieszczenia Δl otrzymaną w pomiarze tarcia między dwoma płaskimi płytkami stalowymi pod obciążeniem normalnym 0,98 N. Zarejestrowane przebiegi $T(\Delta l)$ wykazują fluktuacje wartości typowe dla procesów z udziałem tarcia. Przy średniej wartości siły tarcia w przybliżeniu równej 0,25 N amplituda drgań wynosiła około 0,02 N tj. około 3%. Zależności $T(\Delta l)$ w kolejnych powtórzeniach wykazują też nieregularne zróżnicowanie przebiegu, sięgające kilku procent w odniesieniu do średniej, powstające prawdopodobnie w wyniku niemożności idealnego odtworzenia warunków tarcia w kolejnych pomiarach. Przy przemieszczeniu od 2 do 3 mm otrzymano współczynniki tarcia dla mosiądzu i stali, odpowiednio $0,16 \pm 0,014$ oraz $0,25 \pm 0,000$.

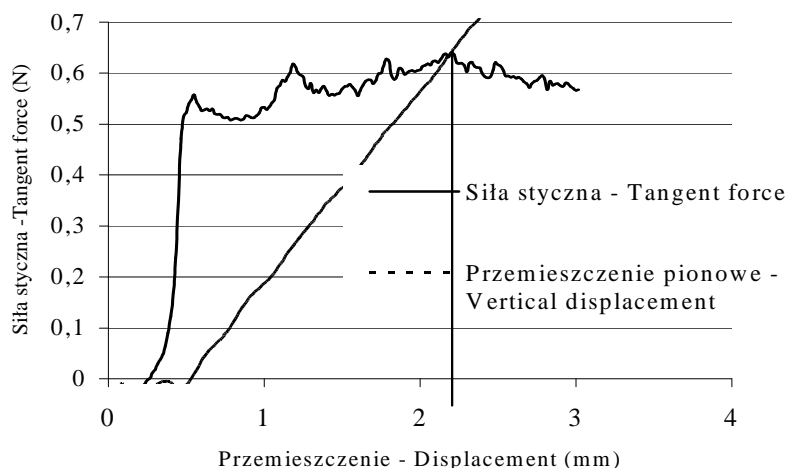


Rys. 2. Przebiegi zależności siły tarcia T od przemieszczenia poziomego Δl dla pierwszego i piątego powtórzenia testu tarcia między dwoma płaskimi płytkami stalowymi pod obciążeniem normalnym 0,98 N

Fig. 2. Force of friction T versus horizontal displacement l for first and fifth repetition of test measuring coefficient of friction between two steel plates under normal load of 0.98 N

Tarcie kulki stalowej o nachyloną powierzchnię stalową

Dla zobrazowania wpływu nachylenia powierzchni kontaktu na siłę styczną przeprowadzono próby poślizgu kulki stalowej o powierzchnię stalową nachyloną pod kątem 20° . Na rysunku 3 przedstawiono typowy przebieg $T(\Delta l)$ pod obciążeniem normalnym 0,98 N. Po gwałtownym wzroście siła tarcia stabilizuje się na poziomie około 0,6 N z niewielkimi nieregularnymi wahaniami oddającymi prawdopodobnie niedokładność płaskości powierzchni pozostających w kontakcie. Współczynnik tarcia „ μ ” wyznaczony w opisanych warunkach wyniósł $0,63 \pm 0,03$, zaś kąt tarcia $\arctan(„\mu”)$ wynosi 32° . Kąt tarcia wyznaczony z μ_{pp} dla stali, równego 0,25, wynosi $\arctan(0,25)$ tj. 14° , co wraz z kątem nachylenia płytki równym 20° daje 34° – wartość bliską wartości $\arctan(„\mu”)$ wyznaczonej w eksperymencie. Zatem aparatura poprawnie oddaje styczny opór ruchu jako sumę wpływu siły tarcia oraz siły wynikającej z nachylenia równi pochyłej, wzdłuż której odbywa się poślizg.



Rys. 3. Typowy przebieg zależności siły tarcia T od przemieszczenia poziomego Δl dla testu tarcia kulki stalowej o płaską płytkę stalową nachyloną pod kątem 20° , pod obciążeniem normalnym $0,98\text{ N}$
Fig. 3. Relationship between force of friction T and horizontal displacement Δl obtained from test measuring coefficient of friction between steel ball and steel plate at an inclination angle of 20° , under normal load of 0.98 N

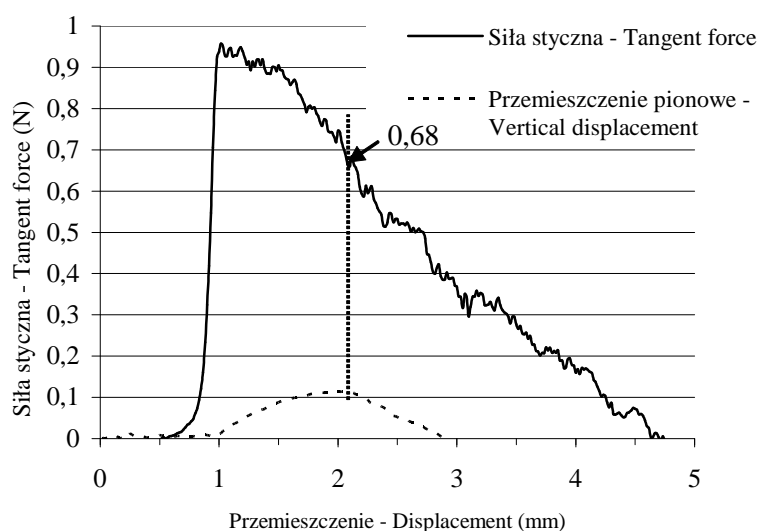
Tarcie stalowych kulek łożyskowych

Typowy przebieg zależności siły tarcia T i przemieszczenia pionowego Δl_v od przemieszczenia poziomego Δl pod obciążeniem normalnym $0,98\text{ N}$ przedstawia rysunek 4. W przypadku regularnego układu kulek o średnicach 5 mm na powierzchni 1 m^2 mieści się ich 40000 , zatem takie obciążenie odpowiada w przybliżeniu naporowi 40 kPa . Taka wielkość naporu normalnego na dno jest wytwarzana w silosie o gładkiej ścianie przez warstwę pszenicy o wysokości około 8 m . Zasadniczy wpływ na zależność $T(\Delta l)$ ma składowa siły oporu ruchu pochodząca od kształtu granul. Pozioma siła wymuszająca ruch jest sumą siły niezbędnej do pokonania lokalnego nachylenia powierzchni górnej kulki względem dolnej i siły oporu tarcia. Kształtowa składowa oporu ruchu osiąga wartość zero w momencie przejścia przez szczyt wzniesienia, wówczas przemieszczenie Δl_v zmienia zwrot i składowa kształtowa siły oporu ruchu zaczyna działać przeciw sile tarcia. Teoretycznie moment osiągnięcia maksimum Δl_v odpowiada sytuacji gdy siła styczna to tylko siła tarcia. W rzeczywistości ruch kulek nie odbywa się po maksymalnych południkach i siła pozioma nie działa idealnie stycznie do kierunku ruchu.

W opisywanym projekcie nie znaleziono sposobu na uwzględnienie tej składowej, starano się jednak ograniczyć jej wpływ przez możliwie dokładne ustawianie kulek przed pomiarem. Czynnikiem zakłócającym pomiar jest także sprę-

zystość elementów układu pomiarowego pozwalająca na akumulację i uwalnianie energii. Właśnie ten efekt widoczny jest na rysunku 3 jako skokowy przyrost siły tarcia przy niewielkim przemieszczeniu na początku ruchu. Na skok wartości siły tarcia składa się także efekt działania tarcia statycznego, które jest wyższe niż tarcie kinetyczne, tzn. potrzeba większej siły dla rozpoczęcia ruchu niż dla jego kontynuacji. W dalszym przebiegu $T(\Delta l)$ siła tarcia malała monotonicznie z niewielkimi fluktuacjami charakterystycznymi dla poślizgu z tarcem.

Do wyznaczania współczynnika tarcia między kulkami μ_{pp} brano wartość siły tarcia zmierzoną w momencie maksimum przemieszczenia pionowego Δl_v , jednak i to nie dawało jednoznacznej interpretacji w sytuacji gdy moment ten pokrywał się z gwałtownym skokiem wartości T . W takich sytuacjach przyjmowano do obliczeń wartość siły tarcia zmierzoną przed gwałtownym spadkiem. W sześciu powtórzeniach testu otrzymano wartości współczynnika tarcia od 0,69 do 0,50 a średnia i odchylenie standardowe wyniosły $0,52 \pm 0,04$.



Rys. 4. Przebiegi zależności siły tarcia T oraz przemieszczenia pionowego Δl_v od przemieszczenia poziomego Δl dla testu tarcia pary kulek stalowych o średnicy 5 mm

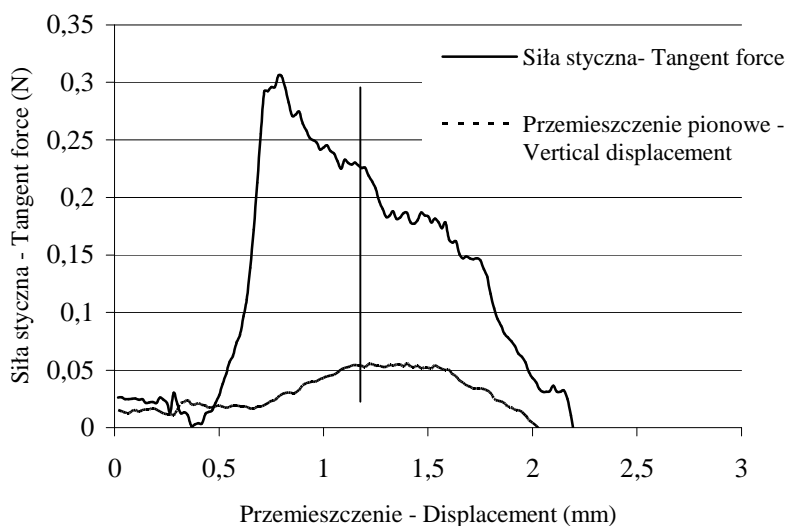
Fig. 4. Relationships of force of friction T and vertical displacement Δl_v compared to horizontal displacement Δl for the test measuring coefficient of friction between two steel balls of diameter of 5 mm

Wykonano ponadto serię testów tarcia powtarzając pomiar bez zmiany pary kontaktujących się kulek. Wartości współczynnika tarcia μ_{pp} malały w kolejnych testach w efekcie „docierania się” powierzchni. Działanie obciążenia normalnego i stycznego prowadzi do zmian stanu powierzchni, co skutkuje zmianami siły tarcia. Wydłużanie

serii powtórzeń prowadzi niekiedy do stabilizacji wartości mierzonej jak np. w pomiarach pionowego obciążenia ściany silosu (Molenda i in. 1996) jednak następuje to w warunkach, które nie występują w rzeczywistych procesach.

Tarcie stalowych kulek łożyskowych smarowanych

Pomiary siły tarcia wykonano także z parami kulek łożyskowych smarowanych. Typową zależność siły tarcia T od przemieszczenia Δl dla pierwszego powtórzenia pomiaru na kulkach smarowanych przedstawia rysunek 5. Obecność oleju na powierzchni kontaktu powodowała obniżenie wartości maksymalnej siły oporu ruchu do wartości w zakresie 0,2 do 0,3 N ponad dwukrotnie w odniesieniu do kulek niesmarowanych, gdzie przyjmowała ona wartości od 0,5 N do 0,7 N. Także przebieg zależności $T(\Delta l)$ miał inny charakter. Siła malała wolniej, przy słabszych drganiach ciennych, ale przy większych odstępstwach od przebiegu monotonicznego.



Rys. 5. Przebiegi zależności siły tarcia T oraz przemieszczenia pionowego Δl_v od przemieszczenia poziomego Δl dla pary kulek stalowych o średnicy 5 mm smarowanych olejem

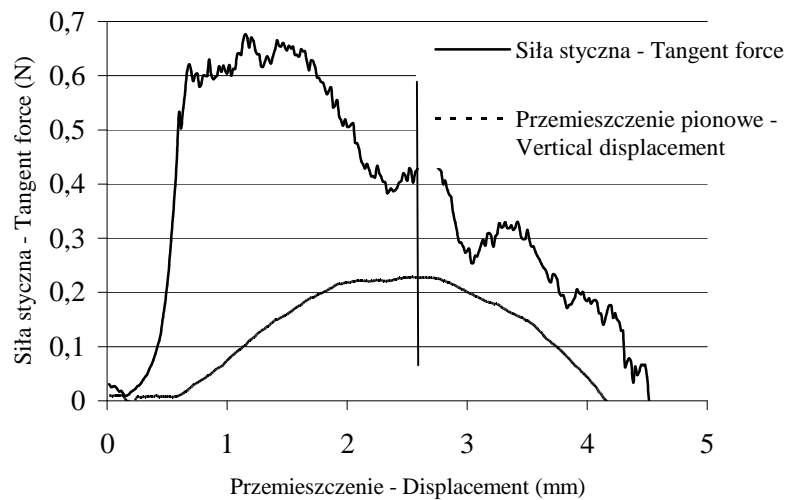
Fig. 5. Relationships of force of friction T and vertical displacement Δl_v compared to horizontal displacement Δl for two smooth steel balls of diameter of 5 mm

Współczynnik tarcia w kolejnych powtórzeniach wahał się w zakresie od 0,21 do 0,16, a średnia wyniosła $0,19 \pm 0,01$. Wyniki pomiarów z kulkami smarowanymi wskazują na bardzo silny wpływ warunków w mikroskopijnym obszarze kon-

taktu. Powierzchnia określana jako „smarowana” może mieć różne właściwości cierne i nie ma aktualnie prostego sposobu oszacowania współczynnika tarcia na podstawie dostępnych charakterystyk powierzchni.

Tarcie ziaren grochu, pszenicy i rzepaku

Przebiegi zależności siły tarcia T od przemieszczenia poziomego Δl otrzymane dla pary ziaren grochu, pszenicy i rzepaku przyjmowały kształt podobny do krzywych otrzymanych w testach tarcia par kulek łożyskowych, jednak ze znacznie większymi zakłóceniami. Na rysunku 6 przedstawiono typową charakterystykę $T(\Delta l)$ dla ziaren grochu, w których przypadku zaobserwowano najsilniejsze, w porównaniu do pozostałych ziaren, zakłócenia przebiegu. W przypadku ziaren rzepaku zakłócenia były najslabsze, a sama charakterystyka najbliższa kształtem wynikom pomiarów na kulkach stalowych. Nieregularne, silne odstępstwa przebiegu $T(\Delta l)$ od linii monotonicznie malejącej oddają prawdopodobnie nierówności topografii powierzchni kontaktujących się ziaren. Kiedy w poślizgu natrafiają na siebie dwie nierówności o znacznym nachyleniu następuje gwałtowny wzrost siły stycznej, zaś po pokonaniu nierówności jej gwałtowny spadek.



Rys. 6. Typowa krzywa $T(\Delta l)$ dla pary ziaren grochu

Fig. 6. Relationship between force of friction T and horizontal displacement Δl for pair of pea grains

Wyznaczone wartości współczynników tarcia badanych materiałów i ich odchylenia standardowe przedstawia tabela 1. Szersze, niż w przypadku próbek

metalowych, rozrzuty wartości współczynnika tarcia ziaren badanych roślin mierzone w poślizgu dwóch obiektów względem siebie są efektem naturalnych różnic stanu ich powierzchni oraz trudności identycznego powtórzenia warunków obciążenia w strefie kontaktu. W odniesieniu do modelowania metodą DEM procesów w materiale ziarnistym nie można na podstawie eksperymentu na dwóch ziarnach jednoznacznie oszacować wartości μ_{pp} . Wartości współczynnika tarcia między ziarnami zmierzone na różnych parach obiektów tego samego gatunku, jak i mierzone w różnych miejscach na ich powierzchniach mogą być bardzo różne.

Tabela 1. Wartości współczynników tarcia i ich odchylenia standardowe otrzymane w badaniach tarcia próbek metalowych oraz nasion grochu, pszenicy i rzepaku

Table 1. Coefficients of friction and standard deviations of metal objects, pea, wheat and rapeseed grains

Material – Material	Współczynnik tarcia Coefficient of friction	Odchylenie standardowe Standard deviation
Błacha mosiężna Brass plate	0,16	0,01
Błacha stalowa Steel plate	0,25	0,01
Kulki stalowe niesmarowane Rough steel ball	0,52	0,04
Kulki stalowe smarowane Smooth steel ball	0,19	0,01
Groch Pea	0,29	0,09
Pszenica Wheat	0,15	0,05
Rzepak Rapeseed	0,23	0,03

W starannie zaplanowanym eksperymencie można osiągnąć wysoką powtarzalność wyników, jednak kosztem ujednorodnienia warunków kontaktu w stopniu jaki nie występuje w naturze. Uśrednienie statystyczne wyników testów na parach ziaren wymagałoby ogromnej liczby powtórzeń, dlatego wydaje się niepraktyczne. Należy zatem rozważyć eksperymentalne wyznaczanie przeciętnej wartości μ_{pp} na próbie o większej liczebności. Jedną z możliwości byłoby estymowanie μ_{pp} z kąta tarcia wewnętrznego lub z kąta naturalnego usypu.

WNIOSKI

Wyniki prezentowanego projektu pozwoliły sformułować następujące wnioski szczegółowe:

1. Pomiary siły tarcia płaskich powierzchni metalowych wykazały wysoką powtarzalność; w sześciu powtórzeniach otrzymano wartości współczynnika tarcia równe $0,16 \pm 0,01$ oraz $0,25 \pm 0,01$ odpowiednio dla mosiądzu i stali.

2. Pomiary tarcia kulek stalowych o nachyloną płaską powierzchnie stalową wykazały, że aparatura poprawnie mierzy siłę styczną jako złożenie siły tarcia i składowej kształtowej.

3. W przypadku tarcia stalowych kulek suchych wystąpiły większe różnice wartości współczynników tarcia wyznaczanych w poszczególnych powtórzeniach w zakresie od 0,44 do 0,56; otrzymano średnią i odchylenie standardowe $0,52 \pm 0,04$. Różnice te wynikają prawdopodobnie z niepowtarzalności warunków punktowego kontaktu, tak ze względu na nierównomierny rozkład właściwości ciernych powierzchni kul, jak i z niemożności idealnego powtórzenia warunków obciążenia. W przypadku kulek pokrytych cienką warstwą smaru rozrzut wyników był niższy. Otrzymano średnią i odchylenie standardowe $0,19 \pm 0,01$.

4. Pomiary współczynników tarcia ziaren grochu, pszenicy i rzepaku wykazały jeszcze większe rozrzuty wartości. Do czynników zakłócających opisanych w przypadku kulek stalowych dołączają dodatkowo zmienność kształtu powierzchni ziaren oraz nieodwracalna deformacja w obszarach kontaktu. Pozornie nieznaczne nierówności powierzchni kontaktujących się ziaren powodują gwałtowne zatrzymanie poślizgu i skokowy przyrost siły stycznej, które może nie powtórzyć się w następnym pomiarze, jeśli poślizg nastąpi nieznacznie inną drogą. Średnie wartości μ_{pp} i odchylenia standardowe wyniosły dla ziaren grochu, pszenicy i rzepaku odpowiednio: $0,29 \pm 0,09$, $0,15 \pm 0,05$ oraz $0,23 \pm 0,03$.

5. Wydaje się, że naturalna zmienność właściwości rzeczywistych materiałów pochodzenia biologicznego powinna być uwzględniana w symulacjach numerycznych jako losowy rozkład parametrów w poszczególnych punktach kontaktu. Dla potrzeb projektowania urządzeń i procesów katalogi powinny podawać średnią i zakres wartości, zaś wybór wartości obliczeniowej należałoby pozostawić doświadczeniu projektanta stosownie do konkretnych warunków obciążenia.

PIŚMIENNICTWO

- Hebda M., Wachal A., 1980. Trybologia, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Horabik J., 2001. Charakterystyka właściwości fizycznych roślinnych materiałów sypkich istotnych w procesach składowania, *Acta Agrophysica*, 54.
- Horabik J., Molenda M., 1988. Force and contact Area of wheat grain friction, *J. Agric. Engng. Res.*, 42, 33-42.

- Lumay G., Ludewig F., Vandewalle N., 2006. Comparison of granular materials: experiment and contact dynamics simulations, *Journal of Physics: conference series*, 40, 133-143.
- Molenda M., Horabik J. and I.J. Ross, 1996. Wear-in effects on loads and flow in a smooth wall bin. *Transactions of the ASAE*, 39(1), 225-231.
- Procter D.C., Barton R.R., 1974. Measurements of the angle of interparticle friction, *Géotechnique* 24(4), 581-604.
- Skinner A.E., 1969. A note on the influence of interparticle friction on the shearing strength of a random assembly of spherical particles. *Geotechnique*, 19, 150-157.
- Walton O.R., 1994. Effects of interparticle friction and particle shape on dynamic angles of repose via particle-dynamics simulation, *Mechanics and Statistical Physics of Particulate Materials*, June 8-10, La Jolla, California.

METHOD OF MEASUREMENT OF COEFFICIENT OF FRICTION BETWEEN PAIRS OF METALLIC AND ORGANIC OBJECTS

Józef Łukaszuk, Marek Molenda, Józef Horabik, Joanna Wiącek

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Science
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: j.wiacek@ipan.lublin.pl

Abstract. A method for determining the coefficient of friction between pairs of metallic and organic objects of approximately spherical shape was elaborated. The method consists of simultaneous determination of force of friction and relative displacement of pair of grains under normal load. The method was verified through measurement of friction between pair of steel plates and pair of steel balls of diameter of 5 mm. The optimal conditions ensuring high accuracy and repeatability were established. Coefficients of friction of objects made of steel, and pea, wheat and rapeseed grains at equilibrium moisture content were determined. In the case of rapeseed grains normal load equalled 0.59 N, while the normal load of 0.98 N for other samples was applied. The highest repeatability of results was obtained for steel plates. Repeatability was much lower in the tests where steel balls were used, which resulted from non-repeatability of contact conditions due to both inhomogeneous distribution of friction properties of surface and impossibility of repetition of load conditions. It was found that scatter of force of friction was the highest for pea, wheat and rapeseed grains due to variability of shape, roughness of surface and irreversible deformation in contact. The range of values of coefficient of friction should undoubtedly be presented in design standards and designers should adopt values reflecting conditions of operation.

Key words: inter-grain friction, coefficient of friction, internal friction angle, angle of repose