

J. HORABIK, M. MOLENDĄ

**Opory tarcia i naprężenia w strefie kontaktu ziarniaka pszenicy  
z płaską powierzchnią**

WSTĘP

Tarcie jest jednym z czynników determinujących procesy sprzętu zbóż, transportu, składowania i przetwarzania ziarna. Złożoność zjawiska tarcia zewnętrznego spowodowała powstanie licznych modeli teoretycznych bądź empirycznych, obowiązujących w ściśle ograniczonych warunkach badań. W zakresie tarcia zewnętrznego ziarna zbóż od lat 60. prowadzone są liczne badania w wielu laboratoriach na świecie. Dotychczas brak jednak danych katalogowych opisujących parametry procesu, jak też niekwestionowanej jego teorii. Prezentowane w literaturze przedmiotu wyniki badań różnią się niekiedy znacznie, prawdopodobnie z powodu zmienności właściwości fizycznych ziarna, powierzchni trących, warunków eksperymentu i zróżnicowanych metod pomiarowych. Przyjęto założenie, że skrupulatnie przeprowadzony eksperyment na elementarnym obszarze kontaktu ziarna z płaską powierzchnią może dostarczyć informacji istotnych dla bliższego poznania zjawiska tarcia.

Celem tej pracy jest wyjaśnienie dwu spornych zagadnień: określenie zakresu stosowalności wzoru Hertza do opisu pola powierzchni kontaktu ziarna z płaszczyzną oraz oszacowanie zależności współczynnika tarcia od wilgotności ziarna i chropowatości powierzchni poślizgu. Wilgotność jest parametrem modyfikującym właściwości mechaniczne ziarna, a zatem rzeczywistą powierzchnię kontaktu i naprężenie kontaktowe oraz, z drugiej strony, opór ścinania okrywy nasiennej ziarna. Chropowatość powierzchni wpływa na składową deformacyjną siły tarcia poprzez kształt mikronierówności.

MATERIAŁ I METODY

Obiektem badań były próbki ziarna pszenicy ozimej, które wybrano ze względu na liczne odniesienia w literaturze, jak ze względu na duże znaczenie gospodarcze

tego zboża w naszym kraju. Użyto pszenicy odmiany Grana uprawianej w Polsce na znacznych arealach w okresie badań.

Materiały powierzchni poślizgu to stal i szkło. Wybór szkła jako materiału trącego wynikał z równoczesnej możliwości pomiaru powierzchni kontaktu i obliczenia naprężeń na tej powierzchni. Ponadto niska aktywność chemiczna szkła zapewniła stabilność właściwości powierzchniowych w czasie pomiarów, a także przy zmywaniu powierzchni pomiarowej rozpuszczalnikiem. Typowym materiałem konstrukcyjnym zbiorników magazynowych jest stal, dlatego pomiary prowadzono również na tym materiale. Wartości wysokości nierówności  $R_t$  powierzchni szklanej wynosiły:  $8,4 \mu\text{m}$ ,  $12,4 \mu\text{m}$ ,  $57,2 \mu\text{m}$  i  $110,2 \mu\text{m}$ , zaś  $R_t$  powierzchni stalowej:  $> 0,5 \mu\text{m}$ ,  $1 \mu\text{m}$ ,  $1,8 \mu\text{m}$ ,  $6,4 \mu\text{m}$  i  $11 \mu\text{m}$ .

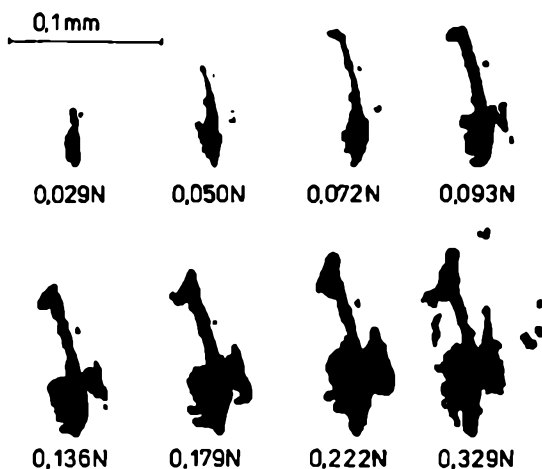
Założone cele wymagały pomiaru przebiegu zależności powierzchni kontaktu ziarna z płaską powierzchnią od siły normalnej i siły tarcia od siły normalnej na pojedynczej powierzchni kontaktu. Niezbędne były ponadto pomiary wilgotności ziarna i chropowatości powierzchni poślizgu. Chropowatość badanej powierzchni mierzono pod podwójnym mikroskopem typu BK  $70 \times 50$  (prod. NRD). Pomiar polega na odwzorowaniu profilu nierówności za pomocą płaskiej wiązki światła. Mierzona jest widoczna w okularze pozorna wysokość chropowatości, która jest następnie przeliczana na wartość wyznaczaną  $R_t$ . Zakres pomiarowy mikroskopu wynosi od  $0,5 \mu\text{m}$  do  $100 \mu\text{m}$ . Norma DIN 4762 zaleca wykonanie pięciu pomiarów i podanie jako wyniku ich średniej.



Ryc. 1. Schemat układu pomiarowego rzeczywistej powierzchni kontaktu

Wartość siły normalnej i siły stycznej (siły tarcia), którymi operowały pierwsze sformułowania praw tarcia nie dają pojęcia o warunkach obciążenia na rze-

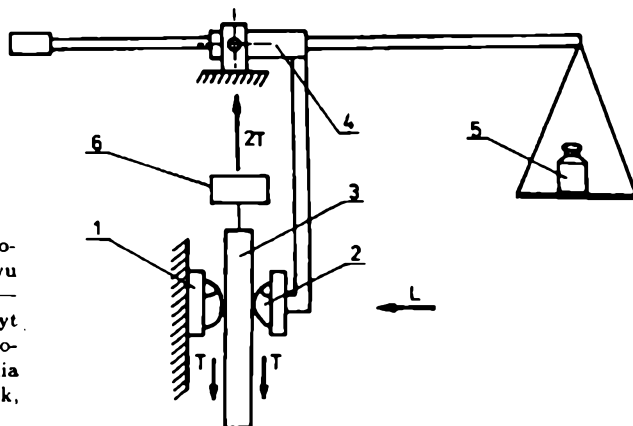
czywistym obszarze kontaktu. Nowsze wzory na współczynnik tarcia uwzględniają wprost wartość rzeczywistej powierzchni kontaktu lub wartości naprężeń panujących w obszarze kontaktu. Dla potrzeb niniejszej pracy przygotowano metodę pomiaru rzeczywistej powierzchni kontaktu ziarniaka z płaską płytką szklaną. Schemat metody przedstawia rycina 1. Metoda wykorzystuje zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia światła, fotografię mikroskopową w świetle odbitym oraz standardowy przyrząd do pomiaru pola powierzchni płaskich obiektów (aparat Delta T Area Meter). Badane ziarno, umocowane w pojemniku za pomocą cementu dentystrycznego umieszczano na stoliku mikroskopu pracującego w świetle odbitym. Górną powierzchnię ziarna przykrywano płytką szklaną, stanowiącą element układu obciążenia. Płytkę obciążano żądaną siłą. Powierzchnia kontaktu ziarna z płytką oświetlona jest równoległą wiązką światła poprzez obiektyw mikroskopu (powiększenie  $\times 5$  lub  $\times 10$ ), a promienie światła odbite od dolnej powierzchni płytki lub od powierzchni ziarna tworzą na matówce aparatu fotograficznego powiększony obraz powierzchni kontaktu. Promienie światła, które po przejściu przez płytkę odbiły się od powierzchni płytki będącej w bezpośrednim kontakcie z ziarnem ulegają rozproszeniu i tworzą ciemny obraz powierzchni kontaktu.



Ryc. 2. Typowe obrazy obszaru kontaktu ziarna pszenicy z płytką szklaną (wilgotność ziarna 11%)

Obraz rzeczywistej powierzchni kontaktu (powiększony 40—80 razy) był fotografowany, a po wywołaniu kliszy powiększany i przenoszony na papier fotograficzny (Ryc. 2). Tak otrzymaną fotografię umieszczano w polu widzenia kamery miernika pola powierzchni (Delta T Area Meter). Obraz badanego obiektu jest przenoszony na ekran monitora telewizyjnego, którego układ elektroniczny sumuje ciemne punkty obrazu ekranu, dając w efekcie wartość pola powierzchni badanego obiektu. Metoda pozwala wyznaczyć pole powierzchni obszaru kontaktu z płaską płytką szklaną w zakresie od  $0,001 \text{ mm}^2$  do  $0,5 \text{ mm}^2$  z dokładnością ok. 5%.

Wyznaczenie obciążeń na obszarze kontaktu wymagało pomiaru siły tarcia



Ryc. 3. Schemat układu pomiarowego siły tarcia dwu ziarn o płaską płytę, 1 — uchwyt stały, 2 — uchwyt ruchomy, 3 — płytka pomiarowa, 4 — dźwignia dwustronna, 5 — obciążnik, 6 — czujnik siły

w kontakcie pojedynczego ziarna z płaską powierzchnią. W tym celu opracowano metodę pomiaru siły tarcia dwóch ziarn materiału granularnego o przesuwaną między nimi płytkę wykonaną z badanego materiału (Ryc. 3). Badane ziarna umieszczano w cylindrycznych pojemnikach, zanurzone do połowy w cemencie dentystycznym. Ziarna wklejano dłuższą osią w kierunku ruchu, tak by powierzchnia boczna pozostawała w kontakcie z płytką pomiarową. Jeden z pojemników z ziarnem umieszczano w uchwycie stałym (1), drugi zaś w uchwycie ruchomym (2). Pomiędzy ziarnami umieszczano płytkę pomiarową (3) wykonaną ze szkła albo stali. Uchwyt ruchomy (2) zamocowany do dźwigni dwustronnej (4) obciążano grawitacyjnie przez zawieszanie obciążników (5) na końcu dźwigni. Płytkę pomiarową (3) zawieszano na głowicy tensometrycznej zamocowanej do ruchomej belki maszyny wytrzymałościowej. Po włączeniu napędu belki płytka poruszała się ku górze i równocześnie rejestrowano przebieg siły tarcia.

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

Wilgotność ziarna mierzono metodą suszarkową stosując aparat firmy Brabender. Trzy próbki ziarna ważono na wadze wchodzącej w skład zestawu pomiarowego i umieszczano w komorze suszarki aparatu. Próbkę suszono przez trzy doby w temperaturze 105°C i powtórnie ważono. Wskaźnik aparatu wyświetla wynik w pro-

centach wilgotności ziarna. Dla przygotowania próbki ziarna o żądanej wilgotności odważano potrzebną ilość ziarna o znanej wilgotności i dolewano odpowiednią ilość wody destylowanej do próbki umieszczonej w pojemniku z tworzywa sztucznego. Następnie szczelnie zamknięty pojemnik umieszczano w mieszadle laboratoryjnym na 24 godziny. W tym czasie pojemnik był obracany przez 15 minut każdej godziny. Po wchłonięciu wody przez ziarno powtórnie mierzono wilgotność próbki. Po raz trzeci sprawdzano wilgotność ziarna próbki po zakończeniu serii pomiarów dla upewnienia się, że nie uległa ona zmianie.

Pomiary powierzchni kontaktu i siły tarcia przeprowadzono w identycznych warunkach obciążenia. Zastosowano 17 poziomów obciążeń o wartościach: 0,03; 0,05; 0,072; 0,093; 0,136; 0,179; 0,222; 0,319; 0,469; 0,651; 0,865; 1,079; 1,294; 1,722; 2,151; 3,222 i 4,294 N. Przyjęto następujące poziomy wilgotności ziarna: 8, 11, 13, 15 i 18%.

W czasie wszystkich pomiarów temperatura w laboratorium wynosiła około 20°C, a wilgotność względna około 40%.

#### WYNIKI BADAŃ

Rzeczywista powierzchnia kontaktu.

Zgodnie z zaproponowanym przez Hertza [1] rozwiązaniem zagadnienia sprężystego kontaktu kuli z płaską powierzchnią zależność powierzchni kontaktu ziarna od siły normalnej powinna przyjąć postać:

$$S = AN^B, \quad (1)$$

gdzie:  $S$  — powierzchnia kontaktu,  $N$  — siła normalna,  $A$ ,  $B$  — parametry.

Wyniki analizy regresji dla pięciu poziomów wilgotności ziarna przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry  $A$  i  $B$  wzoru Hertza (11) dla ziarna pszenicy odmiany Grana przy pięciu poziomach wilgotności

| Wilgotność ziarna [%] | $A$ [ $\text{mm}^2 \text{N}^{-B}$ ] | $B$   | Współczynnik korelacji [%] |
|-----------------------|-------------------------------------|-------|----------------------------|
| 8                     | 0,0145                              | 0,756 | 97,7                       |
| 11                    | 0,0128                              | 0,740 | 93,0                       |
| 13                    | 0,0250                              | 0,737 | 97,6                       |
| 15                    | 0,0467                              | 0,721 | 97,2                       |
| 18                    | 0,1041                              | 0,777 | 98,2                       |

Równanie (1) opisuje zależność powierzchni kontaktu od siły normalnej ze współczynnikiem korelacji wyższym niż 93%, istotnym na poziomie 1%. Wykładnik  $B$  zmienia się ze wzrostem wilgotności nieznacznie (0,72—0,78). Znalezione wartości wykładnika  $B$  są wyższe od wynikających z obliczeń Hertza (0,67) natomiast bliższe zalecanym przez Kragielskiego i Lankowa (0,82) w przypadku kontaktu powierzchni o znacznych chropowatościach [3]. Stała równania regresji —  $A$  szybko wzrasta po przekroczeniu 11% wilgotności ziarna.

Dla uwzględnienia równoczesnego wpływu wilgotności i siły normalnej na powierzchnię kontaktu zastosowano metodę regresji wielokrotnej i otrzymano następującą zależność empiryczną:

$$S = 584 \exp(0,285w)N^{0,703}10^{-6}, \quad (2)$$

gdzie:  $w$  — wilgotność ziarna w procentach;  $S$  — rzeczywista powierzchnia kontaktu w  $\text{mm}^2$ ;  $N$  — siła normalna w N.

Funkcja ta opisuje zależność mierzonych zmiennych w zakresie wilgotności od 11% do 18%, ze współczynnikiem determinacji równym 97,5%, istotnym na poziomie  $\alpha = 1\%$ .

#### TARCIE POJEDYNCZYCH ZIARN O POWIERZCHNIĘ SZKLANĄ I STALOWĄ

Do opisu zależności siły tarcia od siły normalnej przyjęto prawo tarcia w postaci zaproponowanej przez Coulomba [2], szeroko stosowane jako przybliżenie robocze:

$$T = C + \mu N, \quad (3)$$

gdzie:  $T$  — siła tarcia,  $N$  — siła normalna,  $\mu$  — współczynnik tarcia,  $C$  — stała (kohezja).

Wyniki pomiarów tarcia na powierzchni szklanej dla pięciu poziomów wysokości nierówności i pięciu poziomów wilgotności zestawiono w tabeli 2.

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

Współczynnik tarcia rośnie z przyrostem wysokości nierówności. Największy przyrost tarcia zaobserwowano między pomiarami na gładkiej płytce szklanej ( $R_t < 0,5 \mu\text{m}$ ) a pomiarami na chropowatej płytce szklanej ( $R_t = 12,4 \mu\text{m}$ ). Przy zwiększaniu wysokości nierówności współczynnik tarcia nadal rósł, jednak znacznie wolniej i nie osiągnął wartości  $\mu = 1$ . Przy tarcu o powierzchni chropowate występowały uszkodzenia okrywy owocowo-nasiennej ziarna. Można więc stwierdzić, że maksymalna wartość współczynnika tarcia zależy od wytrzymałości okrywy owocowo-nasiennej ziarna i od jego wilgotności.

Trzy z płytek stalowych szlifowano do osiągnięcia wysokości nierówności  $R_t = 1 \mu\text{m}$ ,  $R_t = 1,8 \mu\text{m}$  i  $R_t = 6,4 \mu\text{m}$ . Wartość  $R_t = 11 \mu\text{m}$  uzyskano przez struganie, zaś wysokość nierówności płytki polerowanej do lustrzanego polysku była poniżej zakresu pomiarowego mikroskopu ( $R_t < 0,5 \mu\text{m}$ ). Otrzymane wartości parametrów równania regresji zawiera tabela 3.

W celu oceny wpływu chropowatości powierzchni płytki i wilgotności ziarna na zmiany parametrów prostej regresji przeprowadzono dwuczynnikową analizę wariancji. Analizie poddano wartości  $\mu$  i  $C$  obliczane dla każdego powtórzenia

Tab. 2. Wartości współczynnika tarcia  $\mu$  i kohezji  $C$  w zależności od wilgotności ziarna i wysokości nierówności  $R_t$  (ziarno odmiany Grana, tarcie o szkło i papier ścierny)

| $R_t$<br>[ $\mu\text{m}$ ] | Wilgotność<br>ziarna, [%] | Współczynnik<br>tarcia, $\mu$ | Kohezja<br>$C$ [mN] | Współczynnik<br>korelacji, [%] |
|----------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------|--------------------------------|
| < 0,5<br>(szkło)           | 8                         | 0,116                         | 3,3                 | 98,5                           |
|                            | 11                        | 0,117                         | 4,1                 | 98,7                           |
|                            | 13                        | 0,119                         | -1,2                | 97,9                           |
|                            | 15                        | 0,134                         | 11,3                | 98,3                           |
|                            | 18                        | 0,154                         | 7,6                 | 96,0                           |
| 12,4<br>(szkło)            | 8                         | 0,703                         | -3                  | 99,6                           |
|                            | 11                        | 0,702                         | -36                 | 99,6                           |
|                            | 13                        | 0,710                         | -24                 | 99,7                           |
|                            | 15                        | 0,728                         | -24                 | 99,7                           |
|                            | 18                        | 0,799                         | -64                 | 99,8                           |
| 8,4                        | 8                         | 0,681                         | 26                  | 99,4                           |
|                            | 11                        | 0,763                         | -29                 | 99,5                           |
|                            | 13                        | 0,674                         | -27                 | 99,3                           |
|                            | 15                        | 0,788                         | 42                  | 99,1                           |
|                            | 18                        | 0,773                         | 21                  | 99,0                           |
| 57,2                       | 8                         | 0,819                         | 34                  | 99,4                           |
|                            | 11                        | 0,766                         | 30                  | 99,5                           |
|                            | 13                        | 0,840                         | 30                  | 99,4                           |
|                            | 15                        | 0,886                         | 30                  | 99,4                           |
|                            | 18                        | 0,804                         | 53                  | 98,2                           |
| 110,2                      | 8                         | 0,840                         | 10                  | 99,7                           |
|                            | 11                        | 0,860                         | -1                  | 99,1                           |
|                            | 13                        | 0,863                         | 32                  | 99,0                           |
|                            | 15                        | 0,837                         | 25                  | 99,4                           |
|                            | 18                        | 0,940                         | 11                  | 99,6                           |

osobno, tzn. każda kombinacja wilgotności i chropowatości jest reprezentowana przez 10 par wartości parametrów. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Chropowatość i wilgotność istotnie wpływają na zmiany zarówno współczynnika tarcia —  $\mu$ , jak i kohezji —  $C$ . Wpływ chropowatości jest jednak zdecydowanie silniejszy. Ze zmienności całkowitej  $\mu$  równej 6,287 na zmiany chropowatości przypada 5,844, zaś na zmiany wilgotności — zaledwie 0,101. Podobnie jest w przypadku kohezji.

Na rycinie 4 przedstawiono wartości współczynnika tarcia  $\mu$  wraz z przedziałami najmniejszych istotnych różnic. Wartości  $\mu$  dla poziomów wilgotności 11, 13 i 15% nie są istotnie różne. Wartość  $\mu$  dla wilgotności 8,5% jest od wymienionych istotnie niższa, zaś wartość  $\mu$  dla wilgotności 18% — istotnie wyższa od pozostałych. Silny wpływ chropowatości na współczynnik tarcia obrazuje ryc. 4b. Wszystkie średnie są istotnie różne i oczywisty jest wzrost współczynnika tarcia ze wzrostem chropowatości. Wyjątkiem jest wartość  $\mu$  dla  $R_t = 11 \mu\text{m}$ , która jest niewiele wyższa od obserwowanej w przypadku  $R_t = 1,8 \mu\text{m}$ . Przyczyną tej anomalii jest inny kształt nierówności powierzchni struganej niż powierzchni szlifowanych. W obserwacji mikroskopowej stwierdzono, że profile powierzchni szlifowanych są geometrycznie podobne, z różnicą skali. Kształt śladów obróbki struganiem jest od nich zdecydowanie różny. Wysokość nierówności  $R_t$  nie jest więc wystarczającym wskaź-

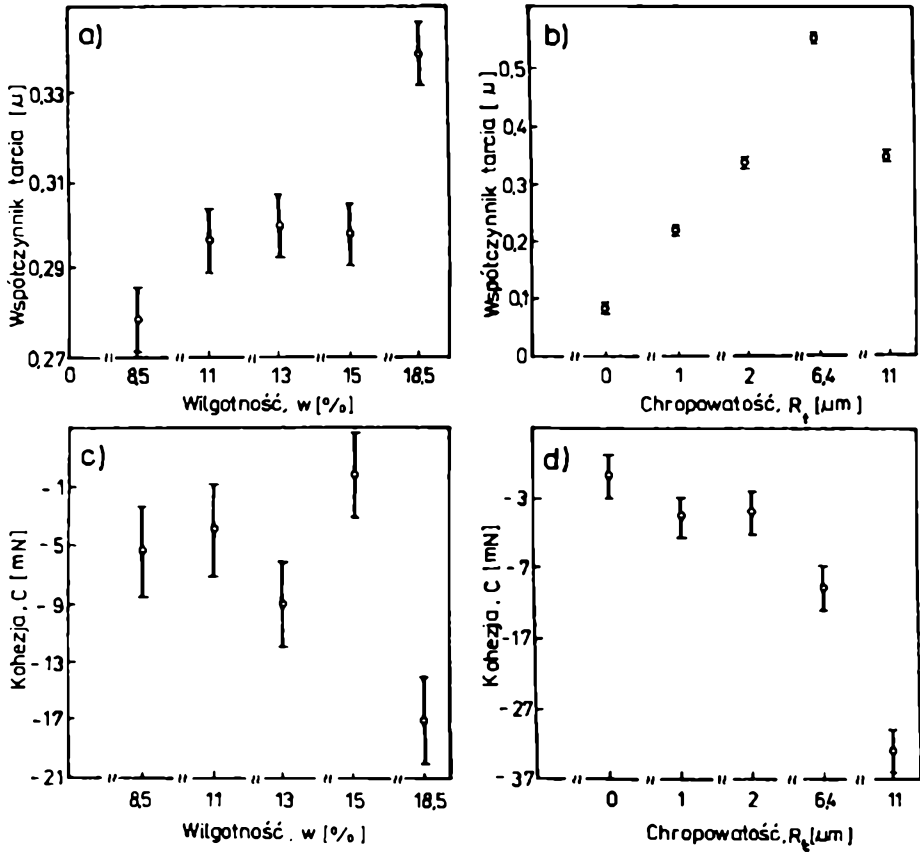
Tab. 3. Wartości współczynnika tarcia  $\mu$  i kohezji  $C$  w zależności od wilgotności ziarna i wysokości nierówności  $R_t$  (ziarno odmiany Grana, tarcie o powierzchni stalową)

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

Tab. 4. Analiza wariancji współczynnika tarcia  $\mu$  i kohezji  $C$  w zależności od wilgotności ziarna i wysokości nierówności powierzchni  $R_t$

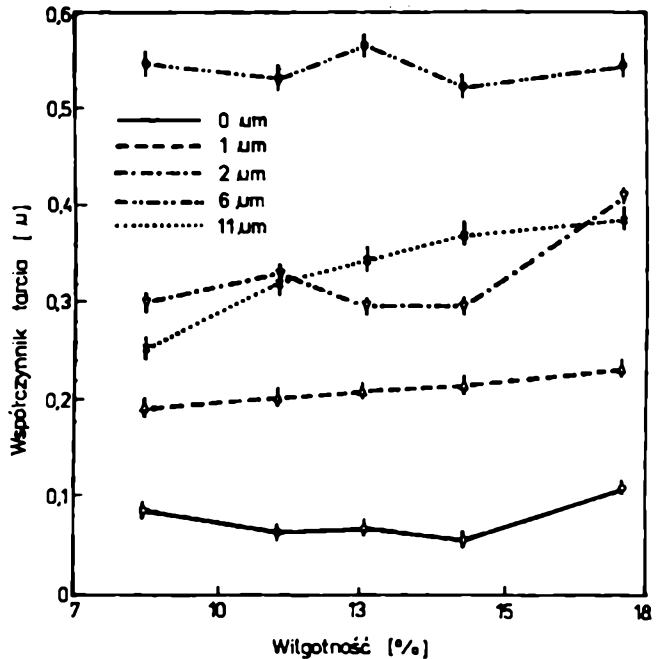
| Źródło<br>zmienności      | Sumy<br>kwadratów | Stopnie<br>swobody | Średnie<br>kwadraty | Wartość<br>testu F | Istotność |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-----------|
| Współczynnik tarcia $\mu$ |                   |                    |                     |                    |           |
| Zmienność całkowita       | 6,2872            | 249                |                     |                    |           |
| Wilgotność ziarna         | 0,1006            | 4                  | 0,0252              | 17,71              | 0,01      |
| Chropowatość              | 5,8442            | 4                  | 1,4610              | 999,99             | 0,01      |
| Źródło<br>zmienności      | Sumy<br>kwadratów | Stopnie<br>swobody | Średnie<br>kwadraty | Wartość<br>testu F | Istotność |
| Kohezja $C$               |                   |                    |                     |                    |           |
| Zmienność całkowita       | 0,1163            | 249                |                     |                    |           |
| Wilgotność ziarna         | 0,0082            | 4                  | 0,0020              | 8,32               | 0,01      |
| Chropowatość              | 0,0487            | 4                  | 0,0002              | 49,48              | 0,01      |





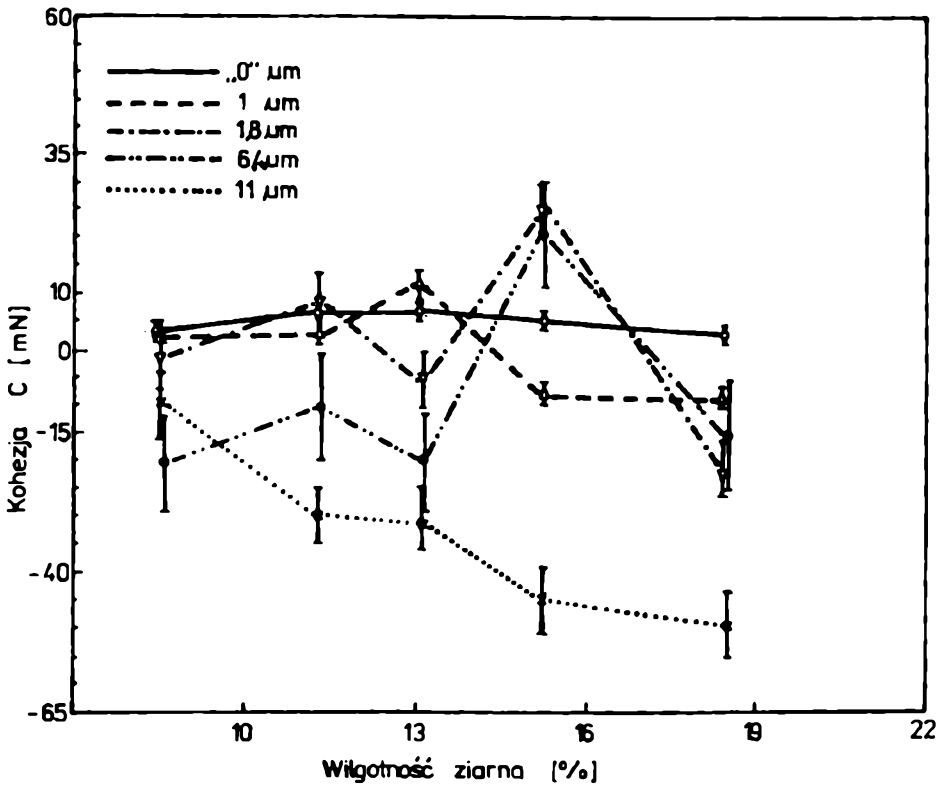
Ryc. 4. Przedziały najmniejszych istotnych różnic ( $\alpha = 5\%$ ) dla średnich współczynnika tarcia —  $\mu$  i kohezji —  $C$

nikiem chropowatości powierzchni w przypadku pomiarów tarcia. Dalszą analizę wyników prowadzono w poszczególnych grupach wariantów, tzn. badano zmienność  $\mu$  i  $C$  dla ustalonej chropowatości przy zmiennej wilgotności, a następnie dla ustalonej wilgotności przy zmiennej chropowatości. Dla wszystkich badanych poziomów chropowatości zaobserwowano istotne przyrosty współczynnika tarcia z rosnącą wilgotnością. Wyniki analizy wpływu wilgotności przy ustalonych poziomach chropowatości nie przedstawiają tak wyraźnej tendencji (Ryc. 5). W przypadku powierzchni gładkiej najniższą wartość  $\mu = 0,061$  zaobserwowano przy wilgotności ziarna 15%. Przebieg zależności współczynnika tarcia od wilgotności —  $\mu(w)$  można by przybliżyć krzywą drugiego stopnia. Wielu autorów opisuje taki właśnie przebieg wyników badań eksperymentalnych [4]. W przypadku płytki o wysokości nierówności  $R_t = 1 \mu\text{m}$  wartości  $\mu$  stale rosną ze wzrostem wilgotności i możliwy byłby opis zależności za pomocą równania liniowego. Dla pozostałych poziomów chropowatości nie obserwuje się klarownej tendencji zmian  $\mu(w)$ .



Ryc. 5. Wartości współczynnika tarcia  $\mu$  w zależności od wilgotności ziarna dla pięciu poziomów chropowatości (ziarna pszenicy odmiany Grana, tarcia o powierzchni stalową

Opisane wyniki pomiarów świadczą o różnym udziale zjawisk składowych wpływających na zmienność współczynnika tarcia, w zależności od charakteru chropowatości. W przypadku tarcia o gładką płytkę, kiedy decyduje wpływ adhezji, na krzywej  $\mu(w)$  obserwujemy minimum. W miarę wzrostu chropowatości rośnie udział sił deformacyjnych i wynikających ze skrawania materiału. Przy wysokości nierówności  $R_t = 6,4 \mu\text{m}$  oddziaływania nierówności powierzchni na chaotycznie rozmieszczonych w przestrzeni mikroobszarach kontaktu dają duży rozrzut wartości wyników i brak istotnych różnic wartości średnich współczynnika tarcia.

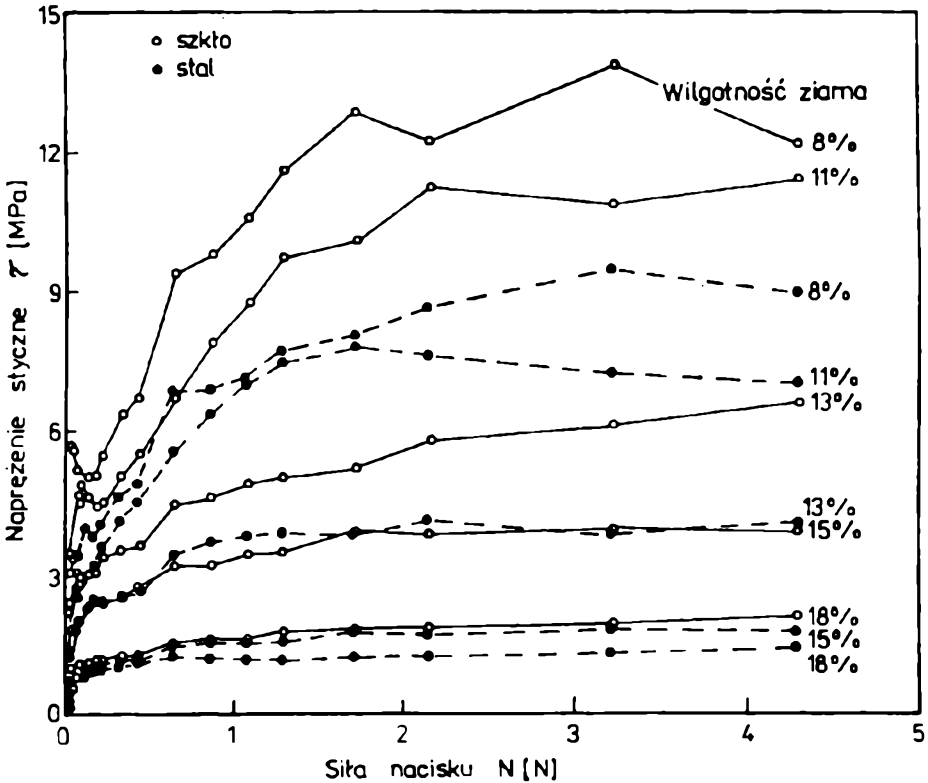


Ryc. 6. Wartość kohezji  $C$  w zależności od wilgotności ziarna dla pięciu poziomów chropowatości (ziarno pszenicy odmiany Grana, tarcie o powierzchnię stalową)

Rycina 6 przedstawia rozkład wartości kohezji  $C$  w zależności od wilgotności przy poszczególnych poziomach chropowatości. Przy wszystkich poziomach chropowatości stwierdzono istotny wpływ wilgotności na wartość kohezji. Charakterystyczne jest jednak, że tylko w przypadku płytki gładkiej dla wszystkich poziomów wilgotności otrzymane średnie mają wartość dodatnią. Przy wzroście wilgotności coraz więcej średnich  $C(R_t)$  przyjmuje wartości ujemne. Świadczy to o zmianie charakteru zależności tzn. o zmianie kierunku odstawiania wartości  $T(N)$  od prostej Coulomba.

Wyniki pomiarów tarcia ziarna o gładką płytkę wykorzystano do obliczenia rzeczywistego naprężenia stycznego —  $\tau$ . W tym celu dzielono średnie wartości siły tarcia przez odpowiadające im średnie wartości powierzchni kontaktu. Wykresy naprężenia stycznego w zależności od siły normalnej przedstawia rycina 7.

Przyrost wilgotności powoduje znaczny spadek naprężenia stycznego, które jest



Ryc. 7. Zależność naprężenia stycznego  $\tau$  do siły normalnej dla ziarna pszenicy odmiany Grana przy pięciu poziomach wilgotności

miarą sił adhezji działających w obszarze kontaktu. W przedziale niskich obciążeń naprężenie styczne szybko rośnie, by po przekroczeniu siły nacisku w zakresie od ok. 0,5 N (wilgotność ziarna 18%) do ok. 1,5 N (wilgotność ziarna 8%) osiągnąć stabilną wartość. Należy przypuszczać, że dopóki przyrost powierzchni kontaktu następuje w wyniku odkształcania mikronierówności powierzchni ziarna, naprężenia normalne i styczne rosną. Kiedy istotny staje się udział odkształcania wnętrza ziarna, naprężenia normalne i styczne stabilizują się na osiągniętym poziomie.

#### WNIOSKI

1. Chropowatość powierzchni poślizgu najsilniej spośród badanych czynników wpływa na wartość współczynnika tarcia. Najszybszy wzrost współczynnika tarcia zaobserwowano w przedziale wysokości nierówności  $R_t$  od 0  $\mu\text{m}$  do ok. 10  $\mu\text{m}$ . Na

powierzchni szklanej współczynnik tarcia ziarna o wilgotności 8% wynosił  $\mu = 0,12$  dla  $R_t < 0,5 \mu\text{m}$  i  $\mu = 0,8$  dla  $R_t = 12,4 \mu\text{m}$ ; zaś na powierzchni stalowej  $\mu = 0,09$  dla  $R_t < 0,5 \mu\text{m}$  i  $\mu = 0,55$  dla  $R_t = 6,4 \mu\text{m}$ .

2. Współczynnik tarcia na ogół rośnie z przyrostem wilgotności, zwłaszcza po przekroczeniu wilgotności równoważnej ziarna. Na gładkiej powierzchni szklanej otrzymano  $\mu = 0,13$  przy wilgotności ziarna 15% i  $\mu = 0,15$  przy wilgotności ziarna 18%. Na gładkiej powierzchni stalowej otrzymano  $\mu = 0,06$  i  $\mu = 0,11$ , na tych samych poziomach wilgotności ziarna.

3. Stwierdzono, że zależność pola powierzchni kontaktu pojedynczego ziarna z płaską, gładką płytą od siły nacisku normalnego jest poprawnie opisywana wzorem Hertza,  $S = AN^B$ , dla wszystkich badanych zakresów wilgotności. Wykładnik  $B$  wynosi około 0,75 niezależnie od wilgotności ziarna. Parametr  $A$  rośnie od 0,015 do 0,1 przy wilgotności ziarna wzrastającej do 8% do 18%.

Zaobserwowano dwie charakterystyczne fazy przyrostu powierzchni kontaktu ziarna z gładką płaszczyzną. Do osiągnięcia pewnej (ok. 1,5 N dla suchego ziarna) siły nacisku powierzchnia kontaktu przyrasta w następstwie odkształcania nierówności okrywy nasiennej ziarna. Po przekroczeniu granicznej wartości siły nacisku następuje deformacja wnętrza ziarna decydująca o dalszym przyroście powierzchni kontaktu.

4. Naprężenie styczne na powierzchni kontaktu ziarna z gładką płytką rośnie z przyrostem siły normalnej do wartości granicznej zależnej od wilgotności ziarna. Powyżej tej wartości siły normalnej powierzchnia kontaktu przyrasta proporcjonalnie do przyrostu obciążenia i naprężenie styczne stabilizuje się na osiągniętym poziomie.

#### LITERATURA

- [1] Timoshenko S. P., Goodier J. N., *Theory of elasticity*, Int. Student Edition, Kogalusha Company Ltd., 1970.
- [2] Hebda M., Wachal A., *Trybologia*, WNT, Warszawa 1980.
- [3] Kragielskij I W., Lankow A. A., *O prirodie trienija twiordych tiel*, Nauka i tiechnika. Mińsk 1971.
- [4] Lawton P. J., *J. agric. Eng. Res.*, 25, 1 (1980).

