

**Anna DOBROWOLSKA\* , Piotr KOWALEWSKI\* , Anita PTAK\***

## **WPLYW NACISKU JEDNOSTKOWEGO NA WSPÓLCZYNNIK TARCIA STATYCZNEGO WYBRANYCH PAR ŚLIZGOWYCH METAL- -POLIMER**

### **THE INFLUENCE OF A UNIT LOAD ON THE STATIC FRICTION COEFFICIENT VALUE OF SELECTED METAL- -POLYMER FRICTION PAIRS**

#### **Słowa kluczowe:**

współczynnik tarcia statycznego, tworzywa sztuczne, kompozyty, polimery, termoplasty, PEEK, POM, PTFE, PSU, PA6, PET, PE-UHMW

#### **Key words:**

static friction coefficient, COF, plastics, composites, polymers, thermoplastics, PEEK, POM, PTFE, PSU, PA6, PET, PE-UHMW

#### **Streszczenie**

Tematem przeprowadzonych badań było tarcie spoczynkowe występujące w typowych skojarzeniach ślizgowych metal-polimer. W pracy opisano procedurę badawczą oraz wyniki badań statycznego współczynnika tarcia  $\mu_0$ . Polimery poddane badaniom to przede wszystkim polimery ślizgowe stosowane

---

\* Politechnika Wroclawska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii, ul. I. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław, Polska.

w budowie maszyn na łożyska, prowadnice i uszczelnienia. Wyselekcjonowane materiały opisane w pracy to: polieteroeteroketon (PEEK), polieteroeteroketon z włóknami węglowymi (PEEK BG), poliamid (PA 6), polietylen o ultrawysokim ciężarze cząsteczkowym (PE-UHMW), polioksymetylen (POM), polioksymetylen z 40% dodatkiem włókna szklanego (POM + 40GF), polioksymetylen z 10% dodatkiem proszku politetrafluoroetyleny (POM + 10% PTFE), politetrafluoroetylen (PTFE), politetrafluoroetylen z 40% dodatkiem proszku brązu (PTFE +40% Brąz), politereftalanetyleny (PET) i polisulfon (PSU). W ramach badań współpracowały one ze stalami: C45, hardox 500 oraz AISI 316L. Badania prowadzono w ruchu liniowym, przemiennym dla węzła tarcia typu trzpień-płytki. Eksperyment uwzględniał stałą wartość chropowatości powierzchni elementu stalowego oraz czas spoczynku pomiędzy cyklami ruchowymi. Dla badanych par ślizgowych zostały wyznaczone charakterystyki zależności współczynnika tarcia statycznego  $\mu_0$  od nacisku jednostkowego  $p$  w zakresie 0,1÷3,0 MPa. Uzyskane wyniki wyraźnie wykazują duży wpływ nacisku jednostkowego na wartość współczynnika tarcia statycznego.

## WPROWADZENIE

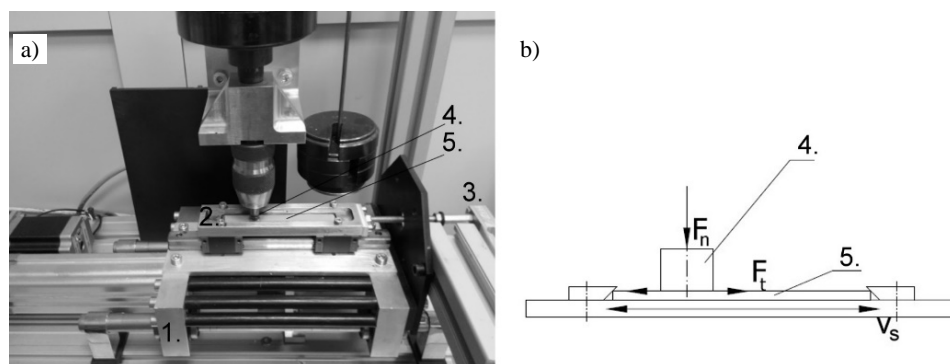
Znajomość oraz umiejętność wpływania na wartość współczynnika tarcia statycznego jest niezwykle istotna podczas projektowania węzłów ślizgowych maszyn [L. 2, 4]. Posiadając podstawowe charakterystyki tribologiczne, można ograniczać straty wynikające z negatywnych przejawów występowania tarcia [L. 3]. W szczególności dotyczy to układów łożyskowych, uszczelnień, ale również skojarzeń ciernych, i połączeń spoczynkowych. Jako że skojarzenie metal polimer jest powszechnie stosowane na elementy współpracujące tarcio-wo w niemal wszystkich gałęziach przemysłu, autorzy artykułu swoją uwagę postanowili skupić na tych materiałach, które wykorzystywane są najczęściej.

## OPIS METODY BADAWCZEJ

Badania tarcia statycznego w ruchu posuwisto-zwrotnym przeprowadzono na skonstruowanym w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej stanowisku badawczym (Rys. 1a), którego zasada działania została opisana w pracy [L. 1]. Urządzenie umożliwia prowadzenie badań tarcia ślizgowego w ruchu przemiennym. W trakcie przeprowadzonych badań próbka w postaci polimerowego trzpienia dociskana była siłą  $F_n$  do płytki stalowej poprzez ciężarki. Do testów jako próbek użyto tworzyw sztucznych takich jak: PEEK, PEEK BG, PA 6, PE-UHMW, POM, POM + 40GF, POM + 10% PTFE, PTFE, PTFE +40% Brąz, PET i PSU, natomiast jako przeciwpróbki zastosowano płytki z następujących rodzajów stali: C45, AISI 316L oraz Hardox. Badania przeprowadzono w warunkach tarcia suchego. Średnią wartość chropowatości

stalowych przeciwelementów przyjęto jako wartość stałą wynoszącą odpowiednio: dla stali C45 –  $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ , 316L –  $0,4 \mu\text{m}$  oraz dla stali hardox –  $0,46 \mu\text{m}$ .

Układ poruszający płytkę stalową składał się z dwóch leżących na sobie wózków, łożyskowanych tak, aby mogły one poruszać się w tym samym kierunku. Napędem zespołu był siłownik elektryczny składający się z silnika krokowego oraz przekładni śrubowej. Siłownik podczas wysuwu porusza większy wózek, na którym znajduje się wózek mniejszy. Siła ruchu przekazywana była z wózka większego na wózek mniejszy poprzez tensometryczny czujnik siły. Zakres ruchomości wózka mniejszego względem większego jest równy wartości ugięcia się czujnika siły oraz elementów mocujących pod wpływem siły tarcia  $F_t$ .



**Rys. 1. a) stanowisko badawcze zastosowane do wyznaczenie siły tarcia statycznego w ruchu posuwistym; b) schemat kinematyczny stanowiska z układem przystosowanym do badania tarcia statycznego ruchu posuwistym. Elementy: 1 – wózek dolny, 2 – wózek górny, 3 – czujnik siły tarcia, 4 – próbka (polimerowy sworzeń), 5 – przeciwpółka (stalowa płytka)**

**Fig. 1. a) picture of a testing stand for research of static friction in case of reciprocating movement; b) kinematic scheme of testing stand with system adjusted for friction measurements in reciprocating movement. Elements: 1 – lower platform, 2 – upper platform, 3 – friction force sensor, 4 – sample (polymer pin), 5 – counterspecimen (steel plate)**

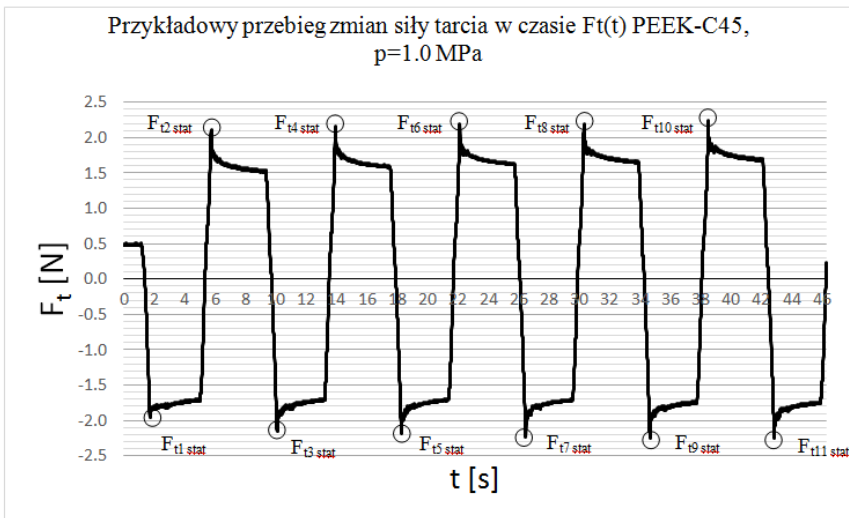
Stanowisko badawcze umożliwiło wywołanie ustalonego ruchu płytki stalowej względem próbki polimerowej z określoną prędkością  $v_s$  i przemieszczeniem  $s$ . Siła powodująca ruch  $F_t$  była rejestrowana z częstotliwością 100 Hz. Schemat pary trącej zastosowany podczas badań został przedstawiony na **Rys. 1b**.

Dla każdego skojarzenia materiałowego wykonano trzy serie powtórzeń pomiarów. Podczas każdej serii pomiarowej płytka stalowa mocowana na ruchomym wózku wykonywała serię 20 cykli ruchowych. Cykl ruchowy składał się z dwóch powolnych ruchów ( $v_s = 1 \text{ mm/s}$ ) w obydwu kierunkach. Pomiędzy ruchami występowała przerwa równa 2 s. Długości ruchu w poszczególnych kierunkach były różne: 2 mm i 2,5 mm, co powodowało zmianę punktu zerwania przyczepności dla każdego z cykli pomiarowych. Elastomerowe pod-

kładki zastosowane pomiędzy czujnikiem a ciągnem poruszającym mniejszy wózek z płytką stalową powodowały, że podczas ruchu wartość siły wymuszającej narastała stopniowo. W momencie uzyskania przez siłę tarcia  $F_t$  wartości równej sile tarcia statycznego  $F_{t0}$  pomiędzy badanymi materiałami następował między nimi ruch względny. Przejście tarcia statycznego w kinetyczne powodowało natychmiastowe zmniejszenie wartości mierzonej siły.

Uzyskane wykresy zmian rejestrowanej siły pozwoliły na wyznaczenie wartości szczytowej siły tarcia, które zostały przyjęte jako siła tarcia statycznego  $F_{t0}$ . Każdorazowo zarówno próbki, jak i przeciwpróbki przed zamocowaniem na stanowisku badawczym były odfluszczone i oczyszczone za pomocą etanolu.

Przykładowy przebieg zmian siły tarcia dla badanej pary trącej PEEK-C45 przy nacisku jednostkowym  $p = 1$  MPa, przedstawiony został na **Rys. 2**. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów z jednej serii pomiarowej uzyskiwano 34 wartości siły tarcia statycznego  $F_{t0}$ , w dwóch różnych kierunkach. Jako wartość siły tarcia statycznego  $F_{t0}$  dla jednej serii przyjęto wartość średnią z 30 pomiarów po odrzuceniu 4 najbardziej skrajnych pomiarów.



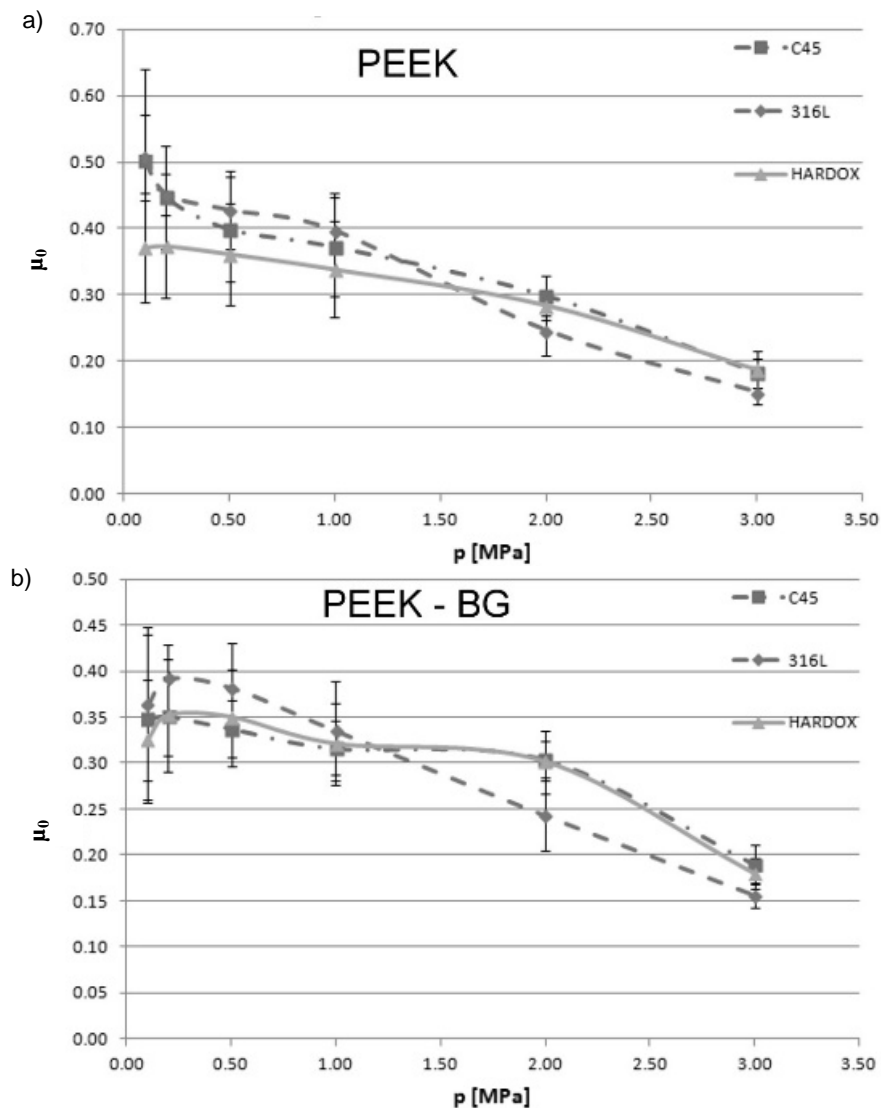
**Rys. 2.** Przykładowy przebieg zmian wartości siły tarcia  $F_t$  zarejestrowanej na stanowisku badawczym dla pary trącej PEEK – stal C45 przy nacisku jednostkowym  $p = 1$  MPa. Wartości skrajne reprezentują wartości siły tarcia statycznego w danym miejscu próbki

**Fig. 2.** An exemplary diagram of friction force  $F_t$  which shows how it changes in time. Examined friction pair: PEEK – steel C45 under unit load  $p = 1$  MPa. Peaks are the values of a static friction force

Średnie wartości siły tarcia statycznego  $F_{t0}$  zostały wykorzystane do wyliczenia współczynników tarcia statycznego  $\mu_0$ .

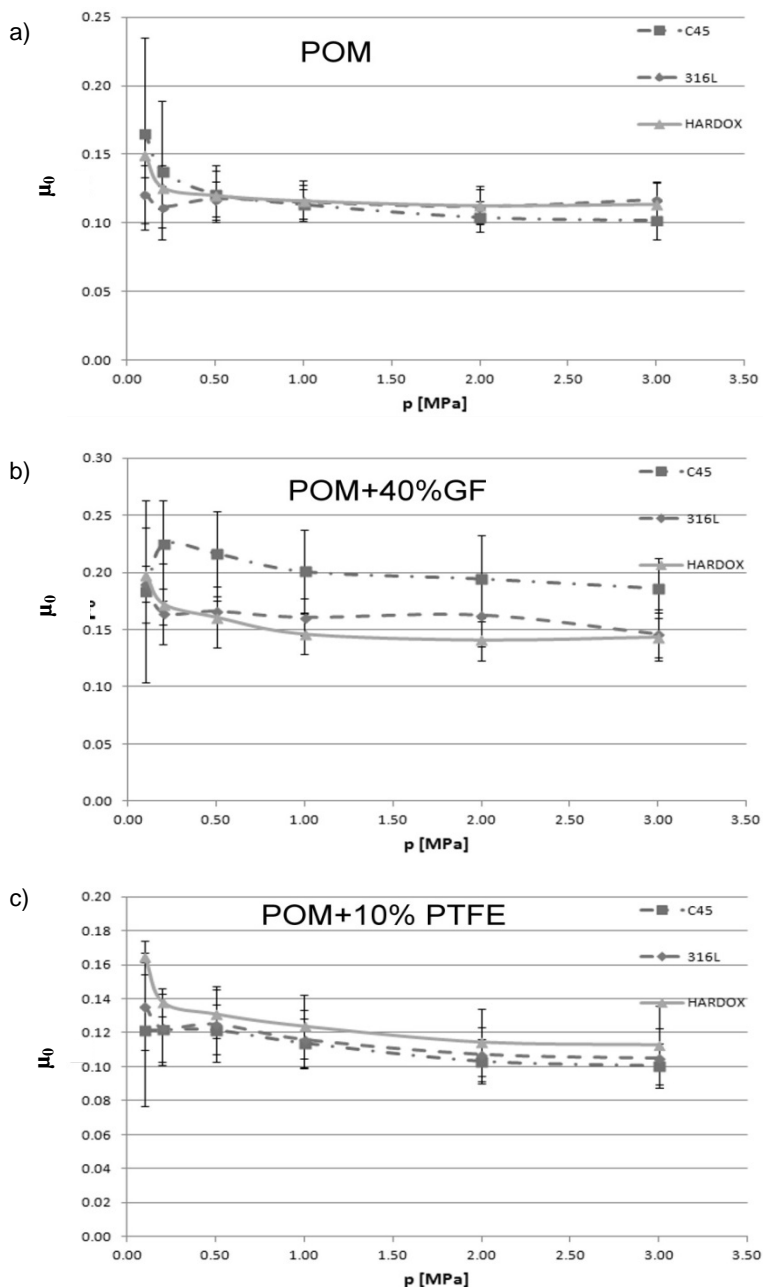
## WYNIKI BADAŃ

Wyniki pomiarów w postaci średnich wartości współczynnika tarcia statycznego i wyznaczonych przedziałów ufności przedstawiono na wykresach zestawionych na **Rysunkach 3–6**.



**Rys. 3. Porównanie wartości współczynników tarcia statycznego dla materiałów na bazie PEEK współpracujących ze stalami: C45, 316L oraz Hardox**

Fig. 3. Comparison of the static friction coefficient values of PEEK polymers which have collaborated with steel C45, 316L and Hardox



Rys. 4. Porównanie wartości współczynników tarcia statycznego dla materiałów na bazie POM współpracujących ze stalami: C45, 316L oraz Hardox

Fig. 4. Comparison of the static friction coefficient values of POM polymers which have collaborated with steel C45, 316L and Hardox

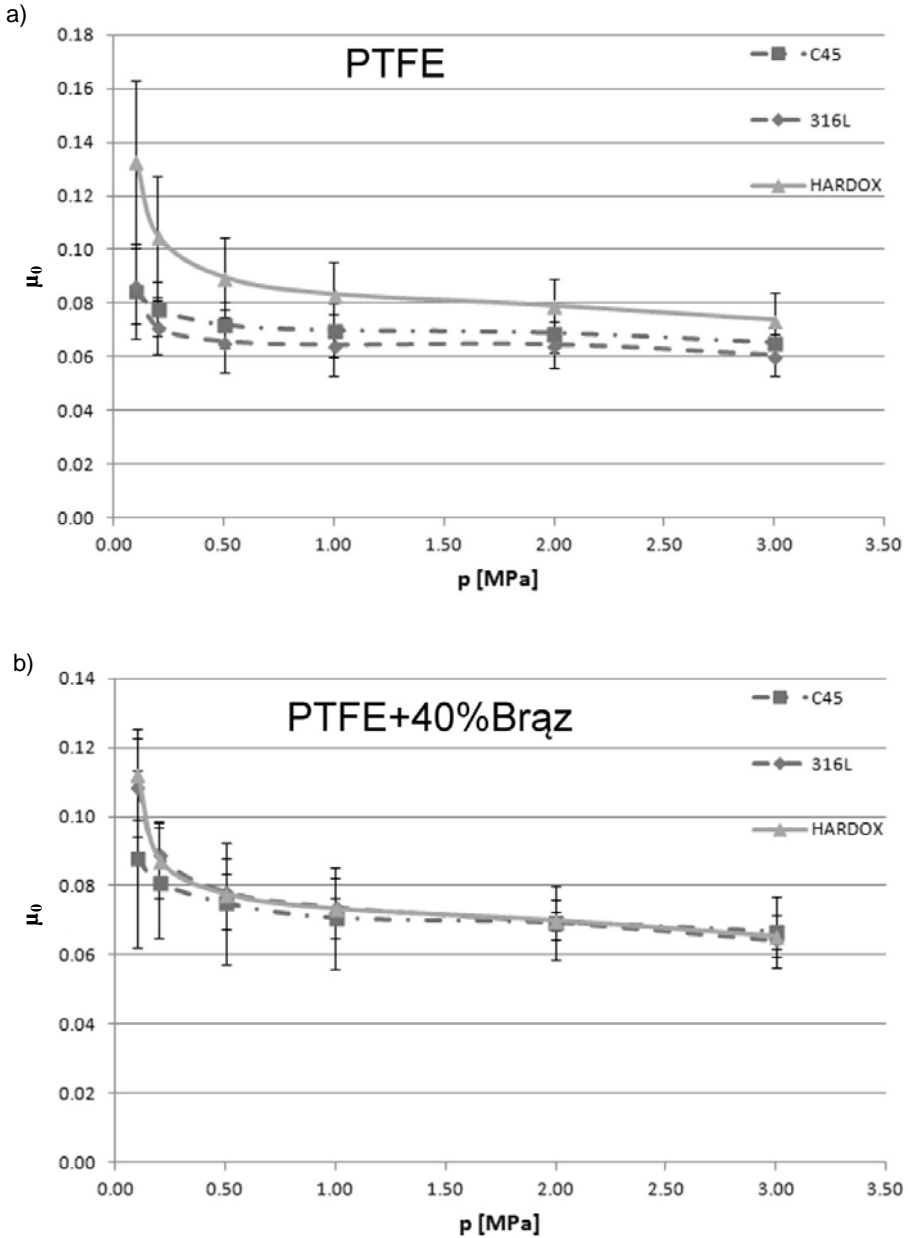
W przypadku badań polieteroeteroketonu (PEEK) w postaci niemodyfikowanej oraz z włóknami węglowymi można zauważyć, iż modyfikacja tego polimeru wpływa na zmniejszenie, praktycznie w całym zakresie i dla wszystkich rodzajów stali, wartości tarcia statycznego (**Rys. 3a i b**). Na odnotowanie zasługują duże wartości uzyskanego współczynnika tarcia statycznego  $\mu_0 = 0,15 \div 0,5$  dla par trących PEEK – stal i PEEK-BG – stal przy małych naciskach jednostkowych ( $p < 1$  MPa). Spadek wartości współczynnika tarcia statycznego  $\mu_0$  jest praktycznie proporcjonalny do wzrostu nacisku jednostkowego  $p$ .

Wyniki uzyskane dla materiałów na bazie polioksymetylenu (POM) wykazują różnorodny wpływ napełniaczy na opory tarcia statycznego. Dla czystego POM niewidoczny jest wpływ gatunku stali zastosowanej na przeciwielement 4a. Widoczny jest natomiast dodatek włókna szklanego do POM, który powoduje zwiększenie oporów oraz zróżnicowanie wartości  $\mu_0$  dla różnych stali 4b. Zmiany te mogą być spowodowane zahaczaniem i wbijaniem się twardych włókien szklanych o podłoże. Można zauważyć tendencję wzrostu wartości współczynnika tarcia odwrotnie proporcjonalną do twardości stali. Co ciekawe, dodatek proszku PTFE w praktycznie nie wpłynął na zmiany wartości współczynnika tarcia statycznego  $\mu_0$  (**Rys. 4c**).

Analizując wyniki dla materiałów na bazie PTFE, można zauważyć wyraźny wpływ nacisku jednostkowego  $p$  na wartości współczynnika tarcia statycznego. Dla wszystkich badanych skojarzeń charakterystyki mają podobny przebieg oraz wartości (**Rys. 5 a i b**).

Na uwagę zasługuje wyjątek od opisanej powyżej prawidłowości, mianowicie opory występujące w przypadku skojarzenia PTFE ze stalą hardox. Dla tego przypadku opory są wyraźnie większe w całym zakresie badanego nacisku jednostkowego. Co ciekawe, w przypadku kompozytu PTFE z brązem nie występuje wzrost oporów przy współpracy ze stalą hardox.

Analizując wykresy zmian współczynnika tarcia statycznego od nacisku jednostkowego  $p$ , pozostałych termoplastów podczas współpracy z różnymi gatunkami stali (**Rys. 6a–d**), można zauważyć znaczące różnice uzyskanych wartości. Należy zwrócić uwagę na bardzo małe opory tarcia dla polietylenu (PE-UHMW) przy współpracy ze wszystkimi badanymi gatunkami stali ( $\mu_0 < 0,12$ ). Dla skojarzeń ciernych z polisulfonem (PSU) wartości zmierzonego współczynnika tarcia statycznego są z kolei ekstremalnie wysokie ( $\mu_0 = 0,5 \div 0,7$ ) przy naciskach  $p < 1$  MPa. Duża rozpiętość występujących oporów tarcia statycznego daje możliwość swobodnego kształtowania połączeń statycznych typu polimer–stal pod kątem występujących oporów tribologicznych. Zestawienie zakresu występujących wartości współczynnika tarcia statycznego  $\mu_0$  dla różnych tworzyw polimerowych przy współpracy ze stalą C45 przedstawiono na **Rys. 7**.

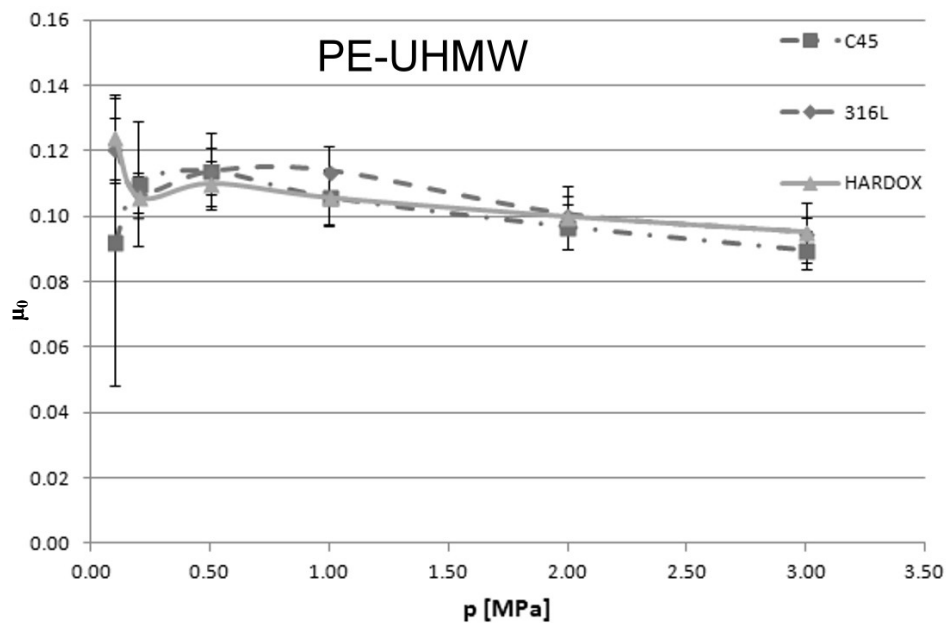


Rys. 5. Porównanie wartości współczynników tarcia statycznego dla materiałów na bazie PTFE współpracujących ze stalami: C45, 316L oraz Hardox

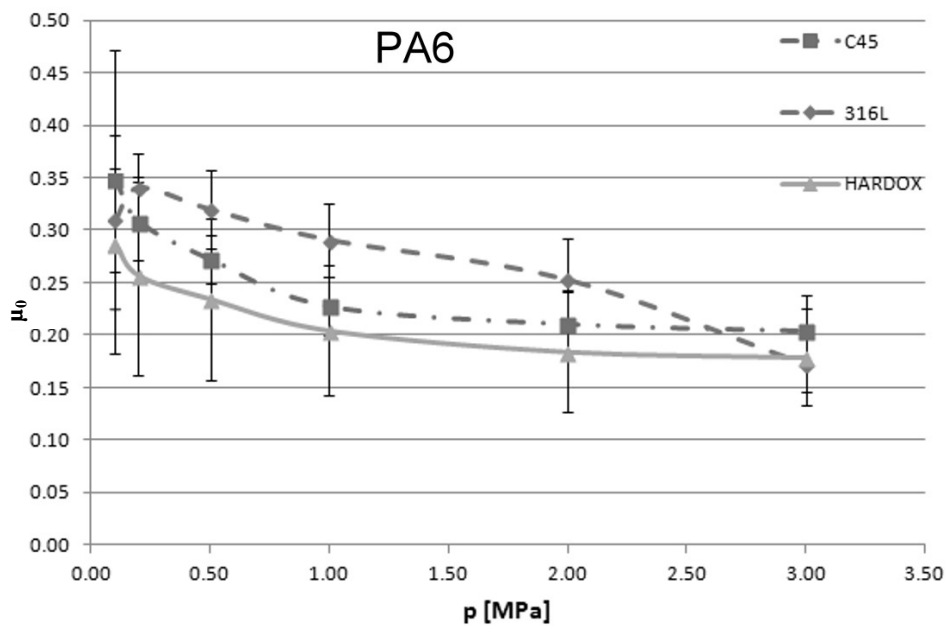
Fig. 5. Comparison of the static friction coefficient values of PTFE polymers which have collaborated with steel C45, 316L and Hardox

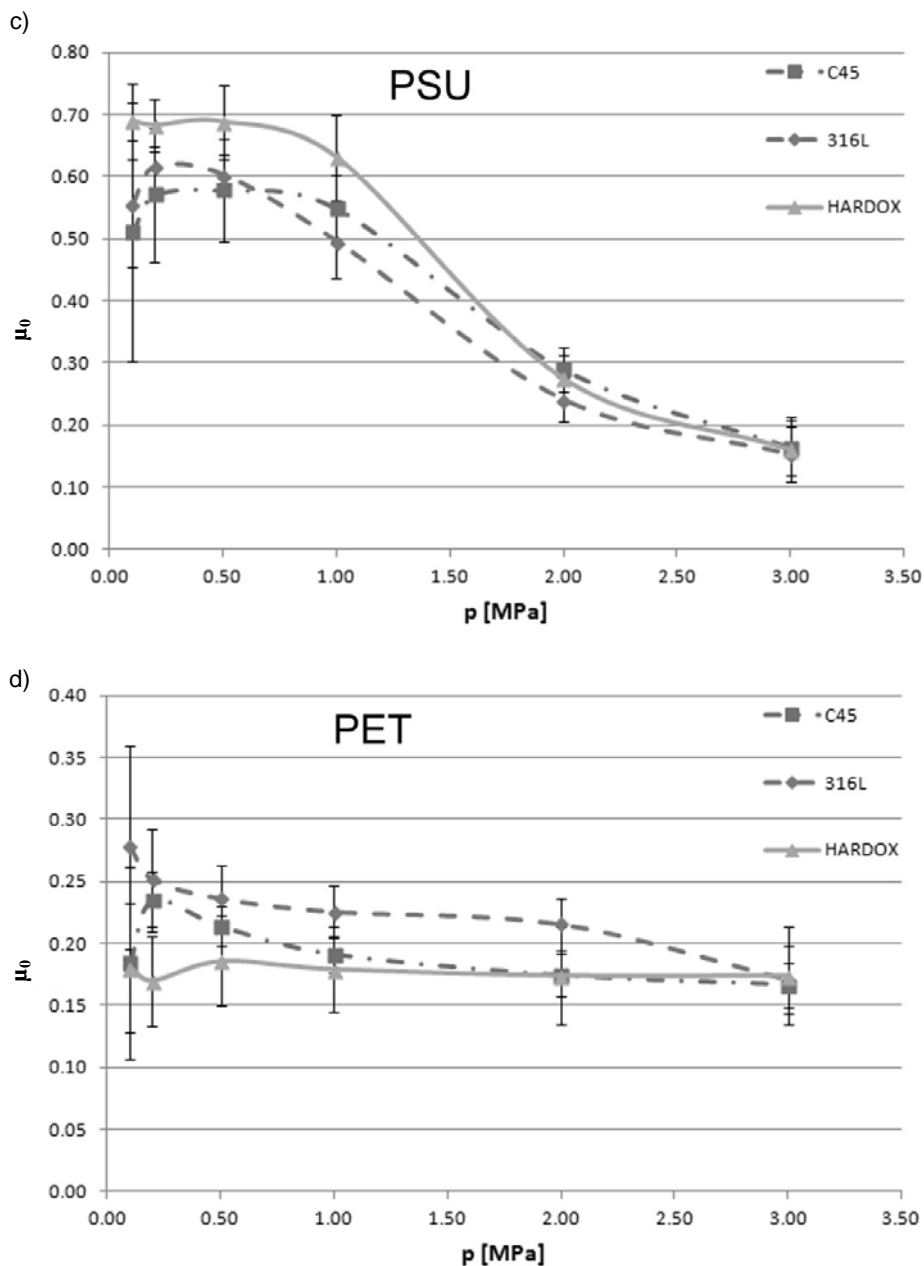


a)



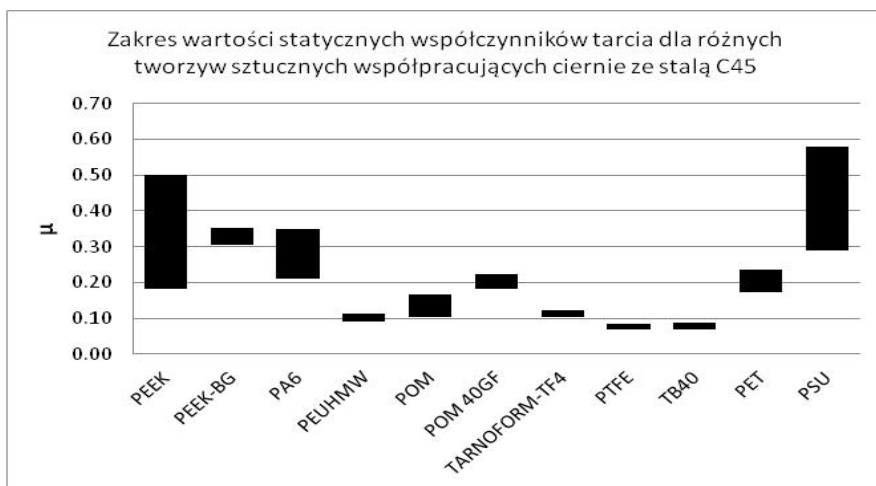
b)





Rys. 6. Porównanie wartości współczynników tarcia statycznego dla pozostałych materiałów termoplastycznych współpracujących ze stalami: C45, 316L oraz Hardox: a) PE-UHMW, b) PA6, c) PSU, d) PET

Fig. 6. Comparison of the static friction coefficient values of other thermoplastic polymers which have collaborated with steel C45, 316L and Hardox: a) PE-UHMW, b) PA6, c) PSU, d) PET



**Rys. 7. Zbiornicze zestawienie zakresu wartości przyjmowanych przez statyczny współczynnik tarcia dla badanych par materiałów przy naciskach jednostkowych z zakresu  $p = 0,1-3,0$  MPa**

Fig. 7. Statement of the range of static friction coefficient values of selected friction pairs determined for the range  $p = 0.1-3.0$  MPa of unit pressure

## DYSKUSJA I WNIOSKI

- Uzyskane wyniki pomiarów wyraźnie wykazują duży wpływ nacisku jednostkowego na wartość współczynnika tarcia statycznego.
- Dla badanych materiałów zaobserwowano spadek wartości statycznego współczynnika tarcia wraz ze wzrostem nacisku jednostkowego. Najwyższe wartości statycznych współczynników tarcia zaobserwowano dla tworzyw PSU (0,5–0,69) i PEEK (0,4–0,51). Występują one przy niskich wartościach nacisków jednostkowych (do 1 MPa)
- Jednocześnie to właśnie w przypadku tych materiałów obserwuje się największą różnicę pomiędzy wartościami współczynnika tarcia statycznego dla poszczególnych wartości nacisków jednostkowych. Różnica ta dla PEEK wynosiła 0,32 przy współpracy cierniej ze stalą C45, 0,35 przy współpracy ze stalą 316L oraz 0,19 przy współpracy ze stalą Hardox. Dla PSU natomiast różnice te były jeszcze większe i wynosiły odpowiednio: 0,29 dla C45, 0,37 dla 316L i 0,41 dla Hardox.
- Można zatem sądzić, że tworzywa te są najbardziej wrażliwe, a co za tym idzie również i najmniej stabilne pod względem wartości współczynnika tarcia statycznego przy zmieniających się naciskach jednostkowych (przynajmniej w badanym zakresie obciążeń). Bardziej znaczący spadek tej wartości dla wspomnianych tworzyw odnotowywano dopiero po przekroczeniu krytycznej wartości nacisku jednostkowego  $p = 1$  MPa.

- Dla każdej z badanych grup polimerów potrzebne jest prowadzenie dalszych badań pozwalających na odkrycie zjawisk wpływających na wykazane zmiany wartości oporów tarcia statycznego.

## LITERATURA

1. Kowalewski P., Wieleba W.: Stanowisko do badania tarcia w złożonym ruchu toczno-ślizgowym. P382893 Polska, 11 lipiec 2007.
2. Jeremic B., Vukelic D., Todorovic P.M., Macuzic I., Pantic M., Dzunic D., Tadic B.: Static friction at high contact temperatures and low contact pressure. *Journal of Friction and Wear*. 2013, Vol. 34, 2, pp. 114–119.
3. Lawrowski Z.: *Tribologia. Tarcie, zużycie i smarowanie*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2008.
4. Dunkin J.E., Kim D.E.: Measurement of static friction coefficient between flat surfaces. *Wear*. 1996, 193, 186–192.

## Summary

The main goal of the experiments was to determine the value of a static friction coefficient for particular friction pairs. Each friction couple consists of a plastic sample and a steel countersample. Pairs of materials that were chosen for the tests are ones most frequently used for friction nodes in machine design and many another branches of industry. Understanding and ability to influence the value of COF allow the reduction of energy losses and the design of more robust products. This article contains the results of studies and the description of a static friction coefficient  $\mu_0$  testing procedure.

The selected plastics were PEEK, PEEK BG, PA 6, PE-UHMW, POM, POM + 40GF, POM + 10% PTFE, PTFE, PTFE +40% Bronze, PET and PSU (as a group of materials commonly used for bearings, guides and gaskets etc.); and during the investigations, they rubbed together with steels C45, Hardox 500, and AISI 316L. Each test consists in an induction of reciprocating movement between the friction pair pin-plate-type. The experiment assumed that the value of a steel element surface roughness and the rest time between the cycles are constant. Characteristics describing the dependence between the static friction coefficient and the unit pressure (of range 0.1 – 3.0 MPa) were prepared for all selected rubbing pairs. The results clearly indicate a meaningful influence of unit pressure on the value of static COF.