

## MECHANICAL AND ABRASIVE WEAR PROCESS IN THE RING TO RING TRIBOLOGICAL SYSTEM IN THE MODELLING CONDITION

### Summary

*The paper presents some results of model investigations of mechanical and abrasive wear. The research was carried out for different shape of sliding surface. The tests were carried out in two methodical variants. In the first one wear was the effect of mechanical wear only (without abrasive) and in the second one abrasive was introduced to the friction connection as a friction factor. The wear characteristics were compared.*

## PROCES ZUŻYWANIA ŚCIERNO-MECHANICZNEGO W SYSTEMIE TRIBOLOGICZNYM TYPU PIERŚCIEŃ-PIERŚCIEŃ W WARUNKACH MODELOWYCH

### Streszczenie

*Eksperyment miał na celu porównanie skutków zużycia mechanicznego i ścierno-mechanicznego węzła tribologicznego przy zastosowaniu dwóch rodzajów próbek różniących się kształtem powierzchni roboczej. Badania przeprowadzono w dwóch etapach, pierwszym, w którym wartość zużycia była rezultatem zużycia tylko mechanicznego i drugim, w którym do układu jako dodatkowy czynnik ścierny, dodano ścierniwo, a efektem tego procesu było zużycie ścierno-mechaniczne.*

### 1. Wprowadzenie

Utrata zdolności eksploatacyjnej węzła tarcia może nastąpić na skutek zmian właściwości warstwy wierzchniej wywołanych tarciami, a prowadzących do wzrostu oporów ruchu, czy do gwałtownej destrukcji (np. zacierania), bez wcześniejszego wyraźnego ubytku materiału lub zmiany wymiarów nominalnych współpracujących elementów. W większości przypadków jest ona jednak skutkiem zmniejszenia wymiarów liniowych elementów trących [3].

Podczas testowych badań procesów tribologicznych najczęściej są monitorowane zmiany następujących charakterystycznych je wielkości: sił tarcia, momentów tarcia, zużycia oraz temperatury tarcia. Spośród skutków najczęściej jest oceniane zużycie końcowe [5]. Znacznie rzadziej analizuje się zmiany zachodzące w warstwach wierzchnich, takie jak: cechy makro- i mikrogeometryczne (chropowatość powierzchni, mikrostruktura), twardość, naprężenia własne czy udziały poszczególnych faz materiałów [4].

Wiele czynników wpływających na zjawiska tarcia powoduje, że jest to proces bardzo złożony i trudny do poznania. Stąd często badacze w sposób świadomy uciekają się do prowadzenia tribologicznych badań porównawczych w sterowanych warunkach modelowych (odnoszących się zarówno do wymagań, jak i wymiarów czy kształtu elementów węzłów tarcia). Zmieniając parametry wejściowe, można spowodować wzrost intensywności zjawisk zużyciowych i uzyskać informacje o ich skutkach (np. zużyciu) w krótszym czasie. Jednak stosowanie badań przyspieszonych w tribologii wymaga bardzo starannego opracowania metod badawczych ze względu na wyjątkową wrażliwość zjawisk tarciovych na zmienione warunki.

W niniejszej pracy przedstawiono rezultaty oryginalnych badań modelowych wykonanych z myślą o wyborze odpowiedniej uniwersalnej metodyki eksperymentalnej dla poznania skutków złożonych procesów tribologicznych – zużycia z udziałem ścierniwa. Poznanie tych procesów, występujących w maszynach i urządzeniach przemysłu spożywczego, leży w obszarze badań naukowych prowa-

dzonych w Zakładzie Maszyn i Urządzeń Przemysłu Spożywczego Politechniki Poznańskiej.

Eksperyment metodyczny miał na celu ocenę wpływu zróżnicowanych sposobów podawania ścierniwa do strefy styku tarciovego na skutki procesów zużycia tribologicznego. Aby uzyskać zamierzony efekt przyspieszenia badań, zmieniono stosowany dotychczas kształt powierzchni roboczej elementów modelowanego węzła tarcia (próbek). Z założenia powinno to prowadzić do zwiększenia ilości ścierniwa w strefie styku tarciovego i zintensyfikować proces.

### 2. Metodyka badań

Badania prowadzono dla dwóch wariantów metodycznych. W pierwszym zużycie było rezultatem tylko zużycia mechanicznego (bez udziału ścierniwa) natomiast w drugim, w którym do węzła tarcia jako dodatkowy czynnik ścierny wprowadzono ścierniwo, było ono efektem zużycia ścierno-mechanicznego. Wykonano je na maszynie tarcioviej UMT 2168 (rys. 1) z zastosowaniem węzła kinematycznego typu pierścień-pierścień (próbka i przeciwpróbka). Wymiary próbek podano na rys. 3. Współpracowały one ze sobą czołowo w specjalnie do tego celu zaprojektowanej komorze (rys. 2), umożliwiającej ciągle doprowadzanie ścierniwa z wykorzystaniem cieczy modelowej.

Jeden z pierścieni (próbka) był unieruchomiony, natomiast drugi (przeciwpróbka) obracał się z ustaloną prędkością ślizgania  $n$  i zmieniającą się w zależności od zastosowanego nacisku siły  $N$ .

Wymiary próbki i przeciwpróbki przedstawiono na rys. 3a i b, a ich widok na rys. 4a i b. Oceny wartości zużycia tribologicznego dokonano na wadze analitycznej z dokładnością  $\pm 0,1$  mg. Rezultat końcowy był średnią sumy zużycia próbki i przeciwpróbki, a szczegółowe dane dotyczące warunków współpracy podano w tab. 1.

Węzeł tarcia był zanurzony w cieczy modelowej, którą była woda destylowana. Ciecz podawano do układu w sposób ciągły, zapewniając tym samym stałą temperaturę

współpracy wężła. Jako ścierniwa użyto piasku krzemowego o frakcji ziarna 0,2–0,3 mm i twardości  $995 \pm 10\%$  HV, a natężenie dopływu ścierniwa ustalono na poziomie  $0,5 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ . Piasek dobrano tak, aby kształt jego ziaren (stopień obtoczenia), wymiary, skład oraz twardość spełniały wymagania podobieństwa do piasków glebowych (rys. 5) [2, 4].

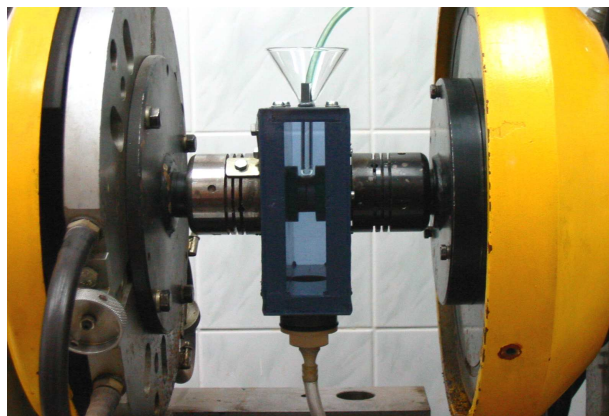
Temperaturę procesu tribologicznego kontrolowano za pomocą termopary umieszczonej w pobliżu strefy styku tarcowego i utrzymywano na stałym poziomie ( $23^\circ\text{C} \pm 3$ ) przez regulację dopływu cieczy we wszystkich wariantach eksperymentu. Czas trwania procesu destrukcyjnego dla każdej pary kinematycznej wynosił 1800 s. Powierzchnie

robocze próbek i przeciwpróbek zostały obrobione szlifowaniem, przez co uzyskano porównywalne początkowe parametry chropowatości dla wszystkich powierzchni współpracujących próbek i przeciwpróbek.

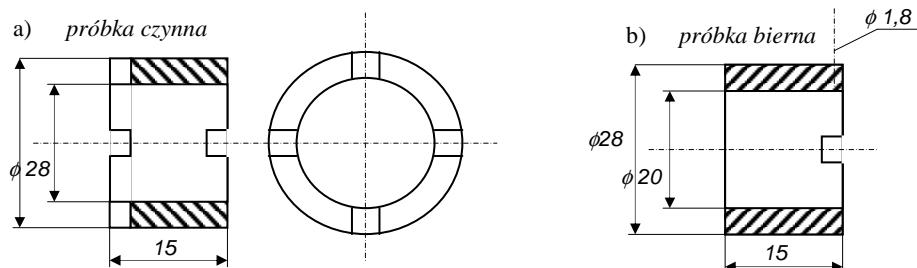
Próbki i przeciwpróbki wykonano ze stali 45. Materiał ten bardzo często jest stosowany w modelowych badaniach tribologicznych. Jest to stal węglowa, konstrukcyjna wyższej jakości, ogólnego przeznaczenia. Skład chemiczny oraz właściwości mechaniczne tej stali podano w tab. 2 i 3. Stal ta ma strukturę ferrytyczno-perlityczną, a udział obu faz jest podobny.



Rys. 1. Maszyna tarcowa UMT 2169  
Fig. 1. Friction machine UMT 2168



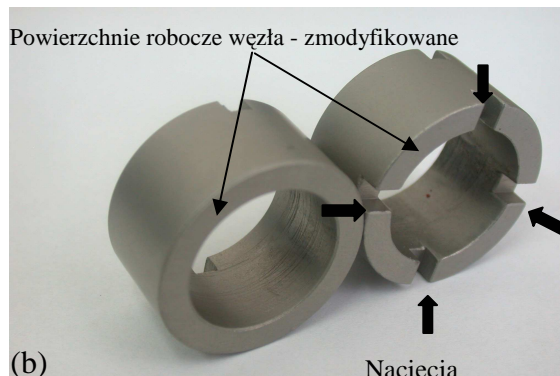
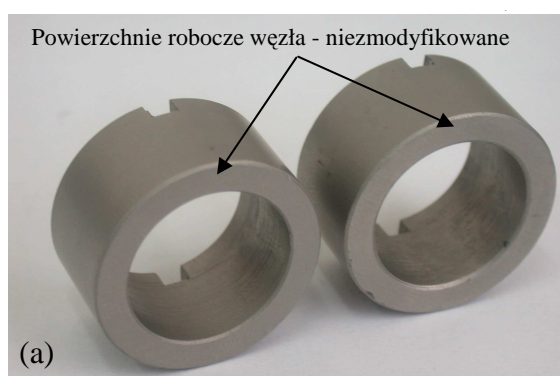
Rys. 2. Komora badawcza  
Fig. 2. Test chamber



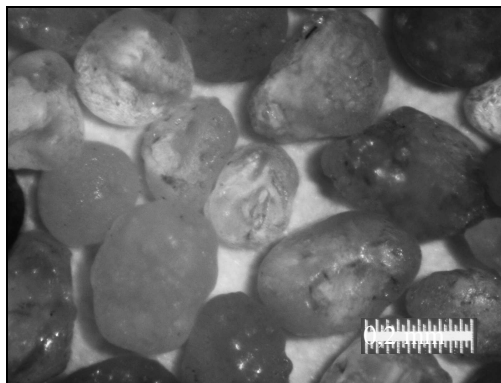
Rys. 3. Wymiary próbek: a) próbka czynna (opcja z nacięciami), b) próbka bierna (opcja bez nacięć)  
Fig. 3. Scheme of samples: a) a sample with cuts, b) counter-sample having no cuts

Tab. 1. Charakterystyka warunków współpracy wężła kinematycznego  
Table 1. Characteristics of mating conditions

Siła docisku $P$ [N]	Prędkość obwodowa $v$ [m/s]	Prędkość obrotowa $n$ [obr/min]	Frakcja ścierniwa $d$ [mm]	Temperatura $T$ [°C]	Czas $t$ [s]	Natężenie dopływu ścierniwa $Q$ [ $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ]
20–160	0,2	160	0,2–0,3	$23 \pm 3$	1800	0,5



Rys. 4. Pary skojarzeniowe: a) model bez nacięć, b) model z nacięciami  
Fig. 4. Photos of connections: a) model without cuts, b) model with cuts



Rys. 5. Kształt i wielkość ścierniwa  
Fig. 5. Shape and size of abrasive

Tab. 2. Skład chemiczny stali 45  
Table 2. Chemical analysis of steel 45

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
0,45–0,50	0,50–0,58	0,17–0,37	≤0,04	≤0,04	≤0,30	≤0,30	≤0,10	≤0,30

Tab. 3. Własności mechaniczne stali 45  
Table 3. Mechanical properties of steel 45

Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ [MPa]	Granica plastyczności $R_e$ [MPa]	Wydłużenie A [%]	Udarność KU [J]	Twardość $HV_{0,1}$
≥600	≥355	16	≥32	241

### 3. Wyniki badań

Przeprowadzone badania potwierdziły znany fakt, że wartości zużycia mechanicznego (bez udziału ścierniwa) –  $I_{M(B)}$ ,  $I_{M(N)}$  są znacznie mniejsze od wartości otrzymanych dla węzłów gdzie zastosowano ścierniwo –  $I_{SM(N)}$ ,  $I_{SM(B)}$ . Zależność ta dotyczy obu rozpatrywanych wariantów, a więc zarówno próbek z nacięciami, jak i bez nacięć. Uśrednione wartości zużycia dla poszczególnych eksperymentów przedstawiono w tab. 4.

Na rys. 6 przedstawiono w sposób graficzny zależność zużycia od obecności ścierniwa. Zarówno dla próbek z nacięciami, jak i dla próbek bez nacięć większe wartości zużycia odnotowano w eksperymentach z udziałem ścierniwa, czyli:  $I_{SM(B)} > I_{M(B)}$  oraz  $I_{SM(N)} > I_{M(N)}$  (1)

przy czym dla wariantów bez ścierniwa ( $I_M$ ) w obydwu rozpatrywanych węzłach tarcia (próbki z nacięciami i próbki bez nacięć) jest widoczna niewielka tendencja wzrostu wartości zużycia w zakresie obciążeń od 20 do 80 N. Przy obciążeniach powyżej 80 N tempo wzrostu wartości zużycia dla obu przypadków jest szybsze.

W wariantach ze ścierniwem ( $I_{SM}$ ) w przypadku węzła niepoddanego modyfikacji ( $I_{SM(B)}$ ) zarysowuje się tendencja wzrostowa podobna do obserwowanej w odniesieniu do wariantów bez udziału ścierniwa, natomiast tempo zużywania węzła o zmodyfikowanym kształcie  $I_{SM(N)}$  dla kolejnych, wzrastających wartości obciążenia jest znacznie większe. Eksperyment miał też przynieść odpowiedź na zasadnicze pytanie: jaki wpływ na zużycie wywiera zmiana sposobu podawania ścierniwa, otrzymana w wyniku modyfikacji kształtu powierzchni roboczej próbki za pomocą nacięć. Otrzymane dane odniesiono do wartości uzyskanych dla węzła, gdzie powierzchnia robocza była płaska (tab. 4).

Dla doświadczenia, w którym do węzła kinematycznego nie dostarczano ścierniwa ( $I_M$ ), uzyskane wartości zużycia, dla obydwu rozpatrywanych przypadków ( $I_{M(B)}$ ,  $I_{M(N)}$ ) przy niższych obciążeniach w zakresie od 20 do 80 N, są porównywalne (rys. 7a), a przy większych obciążeniach od 100 do 160 N, nieznacznie większe wartości zużycia otrzymano dla próbek z nacięciami.

W eksperymentach, w których podawano ścierniwo ( $I_{SM}$ ), zarysowuje się wyraźna różnica w zużyciu próbek z nacięciami i bez nacięć (rys. 7b). Wartości te są około 1,5–2 razy większe dla próbek z nacięciami ( $I_{SM(N)}$ ) dla takich samych warunków wymuszeń, niż wartości uzyskane dla próbek, których powierzchnia robocza nie została zmodyfikowana ( $I_{SM(B)}$ ), tak więc:

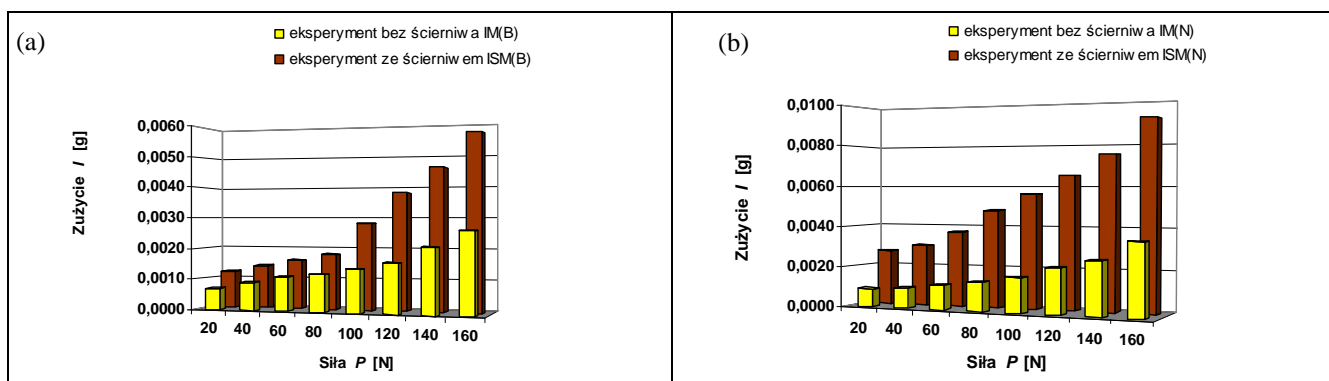
$$I_{M(N)} > I_{M(B)} \quad \text{oraz} \quad I_{SM(N)} > I_{SM(B)} \quad (2)$$

Fakt ten można wytłumaczyć tym, że ściśle przylegające do siebie powierzchnie robocze próbek bez nacięć nie pozwalały na przedostawanie się ścierniwa pomiędzy nie na całej szerokości współpracującej powierzchni. Zmniejszało to ilość ścierniwa biorącego bezpośrednio udział w procesie zużywania i wpłynęło na uzyskane wartości zużycia.

Można zatem stwierdzić, że w wariantach, w którym zastosowano tylko wymuszenia mechaniczne ( $I_M$ ), pomimo znacznie większych nacisków jednostkowych wywieranych na próbki z nacięciami ( $I_{M(N)}$ ), uzyskano porównywalne wartości zużycia, czyli modyfikacja powierzchni nie wpłynęła znacząco na efekt końcowy. W wariantach ze ścierniwem ( $I_{SM}$ ) natomiast, rezultaty uzyskane dla próbek z nacięciami ( $I_{SM(N)}$ ) świadczą o znacznie większym tempie ich zużywania. Było to spowodowane łatwiejszym przedostawaniem się ścierniwa w obszar współpracujących powierzchni. To z kolei powodowało zużywanie się trących powierzchni roboczych na całym ich obszarze.

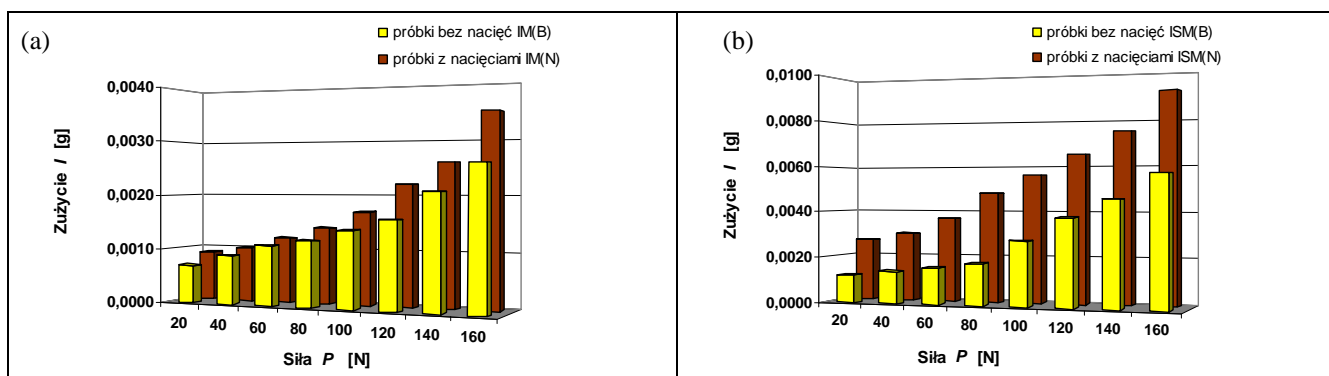
Tab. 4. Wartości zużycia  $I$  [g] w zależności od zastosowanego wariantu  
 Table 4. Wear values  $I$  [g] depending on the applied variant

Siła $P$ [N]	Eksperyment bez ścierniwa $I_M$		Eksperyment ze ścierniwem $I_{SM}$	
	próbki bez nacięć $I_{M(B)}$	próbki z nacięciami $I_{M(N)}$	próbki bez nacięć $I_{SM(B)}$	próbki z nacięciami $I_{SM(N)}$
20	0,0007	0,0009	0,0012	0,0027
40	0,0009	0,0010	0,0014	0,0030
60	0,0011	0,0012	0,0016	0,0037
80	0,0012	0,0014	0,0018	0,0048
100	0,0014	0,0017	0,0028	0,0056
120	0,0016	0,0022	0,0038	0,0065
140	0,0021	0,0026	0,0046	0,0075
160	0,0026	0,0035	0,0057	0,0092



Rys. 6. Wpływ ścierniwa na zużycie: a) próbki bez nacięć, b) próbki z nacięciami

Fig. 6. The influence of abrasive on degree of wear: a) samples without cuts, b) samples with cuts



Rys. 7. Wpływ kształtu powierzchni kontaktu na zużycie: a) bez udziału ścierniwa, b) ze ścierniwem

Fig. 7. The influence of the shape on degree of wear: a) abrasive is not used, b) abrasive is used

Na rys. 8 dla wszystkich badanych wariantów wymuszeń mechanicznych i ściernych zaprezentowano wyniki badań zużywania przedstawione w postaci funkcji wykładniczych opisanych wzorem (3). Zamieszczono na nim także przedziały ufności na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  dla funkcji aproksymującej.

$$I(P) = a \cdot e^{bP} \quad (3)$$

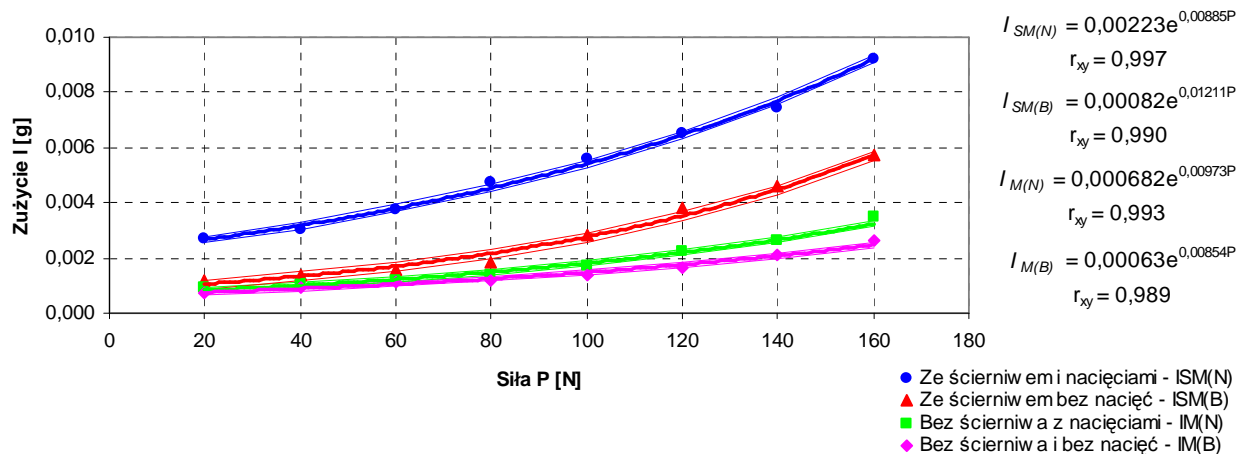
gdzie:  $I$  – zużycie,  
 $a, b$  – wartości stałe,  
 $e$  – podstawa logarytmu naturalnego,  
 $P$  – siła docisku.

Zaobserwowano różnice w wartościach zużycia dla próbek z nacięciami i bez nacięć potwierdzają także zmiany topografii, które przeanalizowano dla wariantów z użyciem ścierniwa i siły docisku wynoszącej 160 N. Z przeprowadzonej analizy stanu powierzchni kontaktu (ślady tarcia) wykonanej na współpracujących powierzchniach (rys. 9a i

b), można wnioskować, że dla obydwu rozpatrywanych wariantów skojarzeń, proces zużywania powierzchni roboczych zachodził w odmienny sposób.

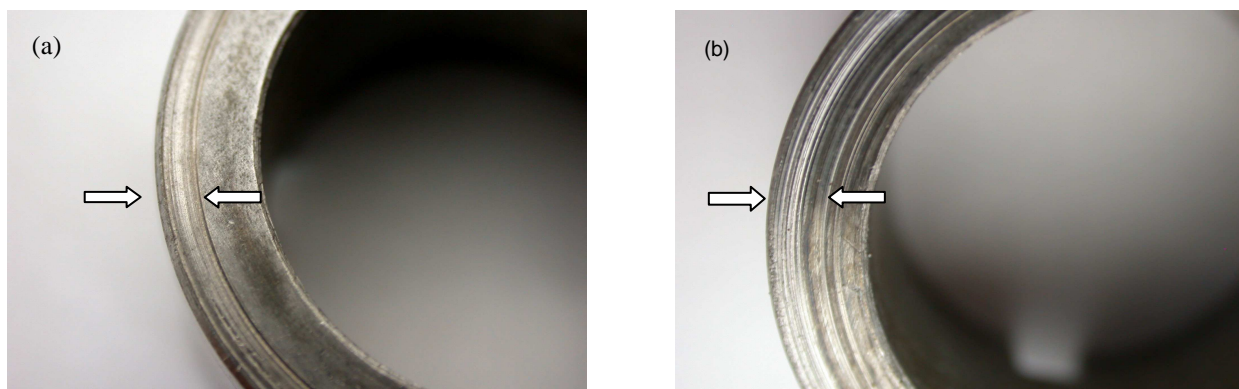
Dla próbek gdzie współpracująca próbka nie została poddana modyfikacji kształtu (rys. 9a), głębokie ślady zużycia powstałe pod wpływem dostawania się twardego ścierniwa pomiędzy współpracujące powierzchnie są widoczne tylko od zewnętrznej strony ściany próbki, a więc od strony dostarczania ścierniwa. Można to tłumaczyć tym, że ściśle przylegające do siebie powierzchnie próbki i przeciwpróbki, utrudniały dostawanie się ścierniwa do wnętrza, tym samym zmniejszając wartość całkowitego zużycia.

Natomiast w drugim przypadku, gdzie zastosowano nacięcia, powierzchnia wykazuje głębokie ślady zużycia na całym przekroju poprzecznym (rys. 9b). Można zatem sądzić, że zużywanie ściernie zachodzące na całej powierzchni roboczej przyczyniło się zarówno do zwiększenia wartości zużycia jak i zmiany topografii powierzchni.



Rys. 8. Wyniki badań zużycia dla wymuszeń mechanicznych i ściernych wraz z funkcją aproksymującą i przedziałami ufności na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$

Fig. 8. Comparison of the influence of the connection shape on mechanical wear values



Rys. 9. Ślady zużycia: a) próbka bez nacięć, b) próbka z nacięciami

Fig. 9. Traces of wear: a) samples without cuts, b) samples with cuts

Wszystkie spostrzeżenia dotyczące topografii powierzchni, świadczą tylko o tym, albo aż o tym, że udało się w sposób odpowiedni dostarczyć do strefy kontaktu tarcowego ścierniwo, którego dostarczanie odbywa się na całej szerokości powierzchni roboczej.

Uzyskane rezultaty pozwalają na sformułowanie następujących wniosków szczegółowych:

- niezależnie od wariantu wraz ze wzrostem siły wykładniczo rośnie zużycie,
- obecność ścierniwa wyraźnie zwiększa wartości zużycia próbek,
- nacięcia na próbkach ułatwiają doprowadzanie ścierniwa w strefę tarcia co intensyfikuje zużywanie ściernie,
- nacięcia nie wpływają w sposób istotny na zużywanie mechaniczne (bez ścierniwa) pomimo większych o 21% nacisków jednostkowych.

#### 4. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że modyfikacja kształtu powierzchni roboczej w rozpatrywanym skojarzeniu tribologicznym (dodatkowe nacięcia) istotnie wpłynęła na wzrost wartości zużycia w porównaniu z eksperymentem, w którym nie zastosowano ścierniwa. Zaobserwowane różnice są spowodowane łatwiejszym dostępem ścierniwa

do strefy styku. Nacięcia powodują, że znacznie większa ilość ścierniwa bierze bezpośredni udział w zużyciu. Ma to wpływ na wartość zużycia całkowitego. Można zatem stwierdzić, że w tym przypadku zużywanie ściernie zachodzi z większą intensywnością niż w skojarzeniu niepoddanym modyfikacji.

Podsumowując można stwierdzić, iż zamierzony cel został osiągnięty. Osiągnięto dużą powtarzalność wyników oraz opracowano metodykę badań zużycia ściernomechanicznego cechującą się łatwością równomiernego doprowadzania ścierniwa do strefy kontaktu. To z kolei powoduje, że proces zachodzi na całej powierzchni styku tarcowego. Uzyskana w ten sposób intensyfikacja tribologicznych procesów destrukcyjnych pozwala na skrócenie czasu badań potrzebnego do lepszego poznania tych zjawisk. Jednocześnie należy mieć na uwadze, że proces ten przebiega w nieco odmienny sposób niż w węzle, który nie został poddany modyfikacji kształtu i cechy te należy uwzględnić przy jego dalszym modelowaniu.

#### 5. Literatura

- [1] Nadolny K., Selech J., The influence of modification of surface shape of mating working elements of friction con-

- nection on tribological characteristics, *Acta Mechanica Slovaca*, 2004, 3-B s. 129–138.
- [2] PN-EN 933-8: 2001 Badania geometrycznych właściwości kruszyw.
- [3] Szczerek M.: Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych, Radom, Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji 1997.
- [4] Śłużyński E., Badanie zużycia łożysk ślizgowych w warunkach ciągłego dopływu ścierniwa, przy zmiennej częstotliwości smarowania, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska 1967 (maszynopis).
- [5] M. Szczerek, M. Wiśniewski (red.): *Tribologia i tribotechnika Radom*, Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, 2000, ISBN 83-7204-199-7.