

Łubiński J. I. *, Druet K. *, Serbiński W. *

**BADANIA TRIBOLOGICZNE W WARUNKACH
POSUWISTO – ZWROTNEGO ŚLIZGANIA STOPU
AK12 (ALSI13MG1CUNI) PO OBRÓBCE
LASEROWEJ W WARUNKACH KRIOGENICZNYCH**

**TRIBOLOGICAL TESTING OF THE RECIPROCATING
SLIDING OF AK12 (ALSI13MG1CUNI) ALLOY LASER
PROCESED IN CRYOGENIC CONDITIONS**

Słowa kluczowe:

stopy aluminium, tarcie ślizgowe, ruch posuwisto – zwrotny, zużycie, obróbka laserowa, kriogenika

Key – words:

aluminium alloys, sliding friction, reciprocating motion, wear, laser processing, cryogenics

Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań tribologicznych skojarzenia: żeliwo szare 300 i stop odlewniczy aluminium AK12 (AlSi13Mg1CuNi) o powierzchni obrobionej metodą laserowego przetapiania w środowisku ciekłego azotu. Na tribometrze TPZ – 1 wykonano serię badań opisanego

* Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny.

skojarzenia w warunkach ślizgania w ruchu posuwisto zwrotnym, przy smarowaniu olejem silnikowym SAE 20W/40. Zarejestrowano przebieg oporów tarcia w funkcji czasu (drogi tarcia) oraz zużycia mierzonego w czasie rzeczywistym.

Porównano opory ruchu skojarzenia i odporność próbek na zużycie, w zależności od parametrów technologii obróbki powierzchni próbek wykonanych ze stopu Al – Si.

TECHNOLOGIA OBRÓBKŁ LASEROWEJ POWIERZCHNI PRÓBEK Z MATERIAŁU AK12

Celem obróbki laserowej było zwiększenie odporności na zużycie poprzez zmianę struktury warstwy wierzchniej materiału. Materiał obrabiany jest zanurzony w ciekłym azocie i naświetlany przez warstwę cieczy wiązką lasera impulsowego z głowicą skanującą, która pozwala na dokonanie w kolejnych przejściach przetopienia całej powierzchni próbki. Obróbkę wykonano przy różnych mocach wiązki laserowej, różnych rozmiarach pola przetwarzanego w jednym impulsie i różnych prędkościach posuwu skanowania. Częstotliwość pulsacji lasera wynosiła 10 000 Hz. W celu poprawy pochłaniania promieniowania przez powierzchnie próbek nałożono na nie warstwę specjalnego absorbera opracowanego w Politechnice Śląskiej. Taki zabieg zwiększa stopień wykorzystania energii wiązki laserowej i zmniejsza nagrzewanie głowicy skanującej lasera pod wpływem promieniowania odbitego.

Obróbkę laserową wykonywano przy ośmiu kombinacjach parametrów pracy lasera, posuwów i grubości materiału surowego. Błąd! Nie można odnaleźć źródła odsyłacza. zawiera zestawienie danych o parametrach obróbki laserowej 8 różnych próbek ze stopu AK12.

W wyniku obróbki dochodzi do korzystnego rozdrobnienia ziarna w strukturze materiału w pobliżu powierzchni. Ponadto dochodzi do zmiany rozkładu stężeń składników stopowych w kierunku prostopadłym do powierzchni oraz do wytworzenia struktur amorficznych na powierzchni materiału. Przemiany fazowe w warstwie wierzchniej powodują pojawienie się naprężeń ściskających i przyczyniają się do zwiększenia mikrotwardości powierzchni materiału od ok. 100 HV_{0,05} do ok. 210 HV_{0,05}.

Powierzchnia materiału surowego przeznaczona do obróbki laserowej była dokładnie frezowana ($R_a \approx 1,25 \mu\text{m}$). Wymiary powierzchni wynosiły 100x100 mm. W wyniku naprężeń pojawiających

się po przetopieniu laserowym powierzchni próbek doszło do odkształceń, których rozmiary można ocenić na podstawie wartości falistości (W_a) i chropowatości (R_a) powierzchni zestawionych w Błąd! Nie można odnaleźć źródła odsyłacza. wraz z odpowiednimi parametrami obróbki laserowej.

Z materiału obrobionego laserowo wycięto próbki odpowiadające wymaganiom stanowiska badawczego. Powierzchni przetopionej nie obrabiano ponieważ jej niewielka grubość (około 0,2 mm) dawała niewielkie możliwości wykonania wykańczającej obróbki skrawaniem. Ponadto zdecydowano, że z uwagi na struktury występujące na powierzchni materiału po obróbce laserowej (np. wydzielienia tlenkowe) należy wykonać badania „surowej” powierzchni z uwagi na wartości poznawcze.

Przeciwpółki wykonano z żeliwa 300 poprzez obróbkę skrawaniem. Ostateczną obróbką ich powierzchni roboczych było polerowanie na szlifierce do zgładów metalograficznych. Osiągnięto chropowatość wyjściową poniżej R_a 0,32 μm .

Tablica 1 Parametry laserowego przetapiania powierzchni stopu AK12 w warunkach kriogenicznych

Table 1 Laser processing conditions used for the AK12 alloy under cryogenic conditions

Oznaczenie kodowe partii próbek	Parametry obróbki laserowej				Grubość materiału [mm]
	Wymiary wiązki [mm]	Moc wiązki laserowej [kW]	Prędkość przesuwu płytki [m/min]	Posuw skanowania [mm]	
101	3	1,5	0,5	1	13
300	3	1,5	1,0	1	13
112	1x20	6,0	1,0	10	13
023	1x20	5,0	1,0	10	13
081	1x20	4,0	1,0	10	13
005	1x20	5,0	1,0	10	7
118	1x20	4,0	1,0	10	7
004	3	1,5	0,5	1	7

Tablica 2 Wartość średnia W_a i R_a dla powierzchni stopu AK12 przetopionych w warunkach kriogenicznych

Table 2 Average values of surface waviness (W_a) and (R_a) for AK12 alloy after laser processing under cryogenic conditions

Moc wiązki laserowej [W]	Wymiary wiązki laserowej [mm]	Prędkość przesuwu płytki [m/min]	Parametry struktury geometrycznej powierzchni	
			Średnie arytmetyczne odchylenie profilu falistości W_a [μm]	Średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości R_a [μm]
3000	1x20	0,5	3,62	5,32
4000	1x20	1,0	3,30	2,27
5000	1x20	1,0	24,72	7,71
6000	1x20	1,0	12,15	5,43
1500	Ø3	0,5	24,98	7,86
	Ø3	1,0	10,86	9,76

STANOWISKO BADAWCZE I PRZYGOTOWANIE MATERIAŁÓW DO BADAŃ

Stanowisko TPZ-1 skonstruowano z myślą o badaniach tarcia na modelach skojarzeń ślizgowych o ruchu posuwisto-zwrotnym, szczególnie skojarzeń typu tuleja cylindrowa-pierścień tłokowy w maszynie tłokowej, np. w silniku spalinowym.

Szczegóły konstrukcyjne i zasady działania poszczególnych układów tribometru zostały opisane we wcześniejszych publikacjach [L.4-L.7].

Na Błąd! Nie można odnaleźć źródła odsyłacza. przedstawiono widok ogólny głowicy stanowiska TPZ – 1. Strzałką pionową oznaczono kierunek i zwrot siły docisku próbki górnej osadzonej na popychaczu (1). Strzałką pozioma wskazuje kierunek ruchu posuwisto – zwrotnego suwaka (2), który mieści komorę próbki dolnej, pod którą w suwak wbudowany jest grzejąco – chłodzący układ elementów półprzewodnikowych działających w oparciu o odwrotne zjawisko termoelektryczne (efekt Peltiera). Próbki są zatem skojarzone wg schematu z Błąd! Nie można odnaleźć źródła odsyłacza.. Komora próbki, w razie potrzeby wypełniana substancją smarową, jest zaizolowana termicznie, zaś ciepło jest pobierane z otaczającego powietrza lub do otoczenia przekazywane poprzez uźebrowany wymiennik ciepła

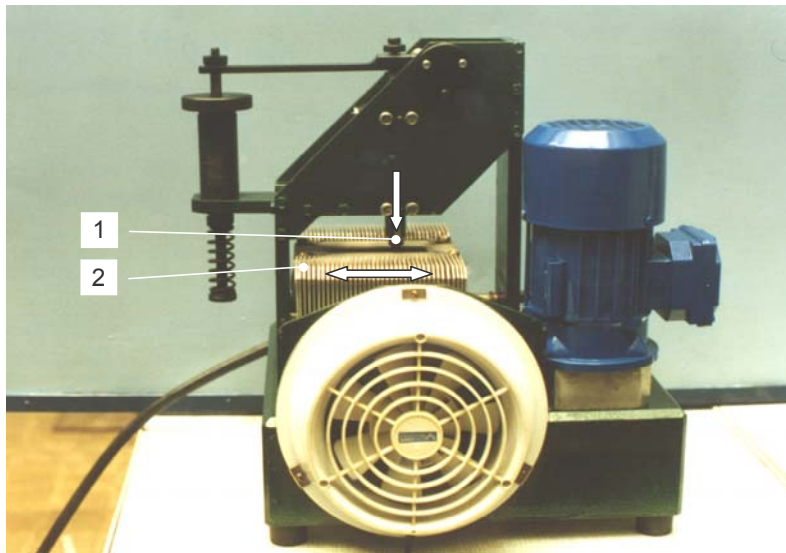
integralnie związany z suwakiem. Zwiększoną intensywność opływu powietrza względem wymiennika ciepła zapewnia wentylator osadzony w korpusie stanowiska (widoczny na Błąd! Nie można odnaleźć źródła odsyłacza.).

Komputer sterujący stanowiskiem umożliwia uzyskiwanie programowanych przebiegów temperatury i prędkości ślizgania. Obciążenie jest zadawane ręcznie przed rozpoczęciem próby.

W podstawowym wariacie pracy komputer tak reguluje prędkość obrotową, by prędkość ślizgania była stała na odcinku ponad połowy skoku suwaka. W okolicy punktów zwrotnych prędkość ma przebieg sinusoidalny.

Podczas badań następujące wielkości są mierzone w sposób ciągły i rejestrowane w postaci cyfrowej:

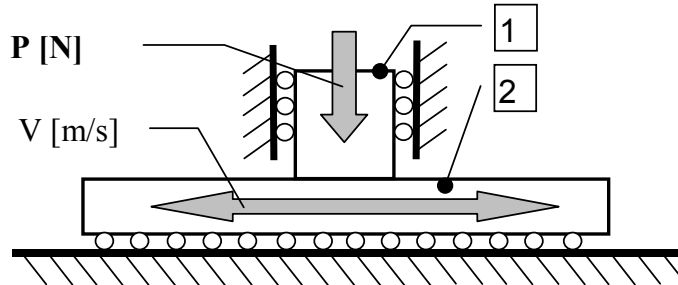
- Liniowe zużycie sumaryczne obu próbek
- Temperatura próbek i środka smarowego
- Siła tarcia
- Przemieszczenie próbki górnej (pionowe i poziome)



Rys. 1 Głowica badawcza tribometru TPZ. Strzałkami oznaczono kierunek i zwrot obciążenia przekazywanego za pośrednictwem popychacza (1) do próbki oraz kierunek ruchu posuwisto – zwrotnego sań (2) z przeciwpróbką.

Fig. 1 The test head of the TPZ-1 tribometer. Vertical arrow indicate the direction and orientation of load exerted via a plunger (1) onto the specimen. Horizontal arrow indicates the direction of motion of the slider accommodating the counter – specimen (2).

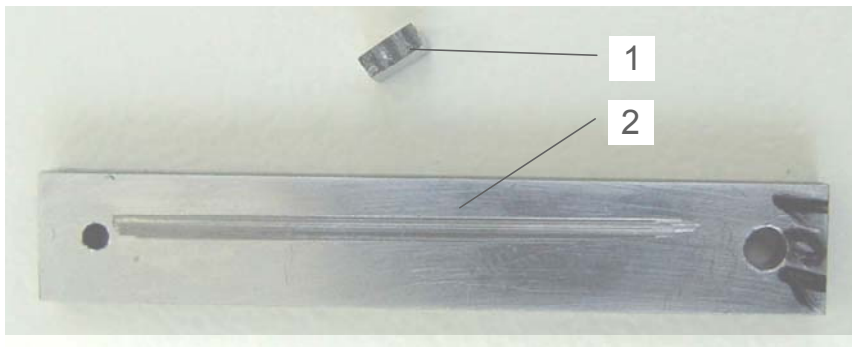
Na Błąd! Nie można odnaleźć źródła odsyłacza. przedstawiono schemat skojarzenia próbki nieruchomej (1) z przeciwpróbką ruchomą w tribometrze TPZ-1. Zarówno próbka, jak i przeciwpróbka są podparte w liniowych łożyskach tocznych, odpowiednio popychacza i suwaka. Strzałkami zaznaczono kierunek i zwrot działania obciążenia (P) i ruchu przeciwpróbki (V).



Rys. 2 Schemat skojarzenia ciernej próbki (1) – przeciwpróbka (2) w tribometrze TPZ-1.

Fig. 2 Schematic of the reciprocating sliding friction contact between the aluminium specimen (1) and cast iron counter - specimen (2) on TPZ-1 reciprocating tribometer..

Na Błąd! Nie można odnaleźć źródła odsyłacza. przedstawiono rzeczywisty zestaw próbka (1) z materiału AK12 – przeciwpróbka z żeliwa Z300 (2). Próbkę sfotografowano po zakończonym teście na tribometrze TPZ-1. Na przeciwpróbce widoczny jest ślad zużycia pozostawiony przez próbkę aluminiową (1).



Rys. 3 Próbkę ze stopu aluminium AK12 (1) i przeciwpróbka z żeliwa 300 (2) po teście na Tribometrze TPZ-1. Widok na powierzchnie robocze próbek. Kod materiału 101

Fig. 3. AK12 aluminum alloy specimen (1) and 300 grade cast iron counter – specimen (2) after testing on TPZ-1 tribometer. A view of the working surfaces of the specimens. Material code 101

WARUNKI BADAŃ I METODYKA POMIARÓW

Badania prowadzono z zastosowaniem smarowania olejem silnikowym Petro-Oil Selektol Special 20W/40 API SD produkcji Orlen Oil Sp. z O. O. Smarowanie realizowano poprzez zalanie olejem pojemnika mieszczącego zamocowaną w uchwycie przeciwpróbkę żeliwną.

Badania wykonano w następujących warunkach:

- nacisk nominalny w strefie styku: stały, 10 MPa, (100 N na powierzchni 10 mm²)
- prędkość ślizgania: stała (poza punktami zwrotnymi), 0,1 ± 0,02 m/s,
- temperatura kąpieli smarowej: stała, 70 ± 5 °C.

Przed rozpoczęciem badań próbki i pozostałe elementy układu badawczego myto w benzynie ekstrakcyjnej i acetonie. Zmontowany układ badawczy zalewano olejem, a następnie doprowadzano do zadanej temperatury.

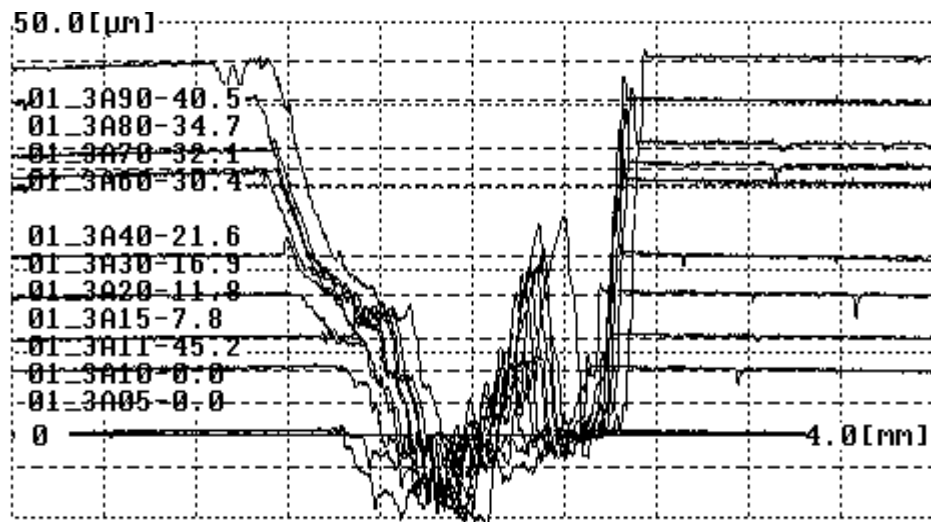
Każda pojedyncza próba trwała w sumie 9 godzin z zatrzymaniem i pomiarem zużycia przeciwpróbki żeliwnej – najpierw co 30 minut (4 razy), a następnie co 60 minut. Konstrukcja stanowiska TPZ-1 pozwala na prosty demontaż i ponowny montaż przeciwpróbki w tej samej pozycji, bez ryzyka utraty dokładności pomiaru zużycia. Do pomiarów wykorzystano skomputeryzowany profilografometr typu PGM-1C produkcji Instytutu Obróbki Skrawaniem z Krakowa. Profil powierzchni próbki był rejestrowany w pięciu przejściach w poprzek ścieżki tarcia i w jednym przejściu wzdłuż ścieżki tarcia. Dane pomiarowe archiwizowano w postaci cyfrowej do późniejszej obróbki.

W trakcie próby prowadzona była ciągła rejestracja przemieszczenia suwaka, obciążenia, siły tarcia oraz temperatur próbki i przeciwpróbki oraz sumarycznego zużycia liniowego skojarzenia ciernego.

OBRÓBKA WYNIKÓW POMIARÓW ZUŻYCIA

Na podstawie zarejestrowanych profili powierzchni próbek wykonano pomiary głębokości rowka wytartego w powierzchni przeciwpróbki przez próbkę górną. Do pomiarów wykorzystano program autorstwa dr inż. B. J. Siwka (pracownika Katedry Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn WM PG). Program ten oblicza głębokość wytarcia względem

powierzchni nieużytych. Wyniki pomiarów obliczeń są zapisywane w postaci plików tekstowych zawierające wartości głębokości zmierzone po kolejnej części próby oraz rysunków z wykreślonymi nałożonymi na siebie profilami powierzchni. Na Błąd! Nie można odnaleźć źródła odsyłacza. przedstawiony jest przykładowy rysunek wygenerowany przez omawiany program. Na osi poziomej odłożony jest podstawowy odcinek pomiarowy (4 mm), na osi pionowej głębokość śladu zużycia wyskalowana w μm . W takim układzie współrzędnych wykreślone są i nałożone na siebie kolejne profile powierzchni po kolejnych częściach próby. Po lewej stronie w kolumnie podane są wartości odpowiadających im głębokości śladu tarcia.



Rys. 4 Widok zbiorczy profilu dna śladu zużycia z 11 pomiarów wykonanych po kolejnych częściach testu. Materiał 101, naciski 10 MPa, prędkość ślizgania 0,1 m/s, smar – olej silnikowy, temp. 70□50C. Linie poziome ciągle odpowiadają położeniu nieużytej powierzchni przeciwpróbki.

Fig. 4 A composite graph of 11 cross – sectional profiles of the wear scar on the cast iron counter – specimen. Profiles taken after subsequent time segments of a test carried out on material 101. Conditions: lubrication SAE 20W/40 motor oil, sliding velocity 0,1 m/s, temp. 70□50C. Horizontal continuous lines represent the unworn surfaces of the specimen.

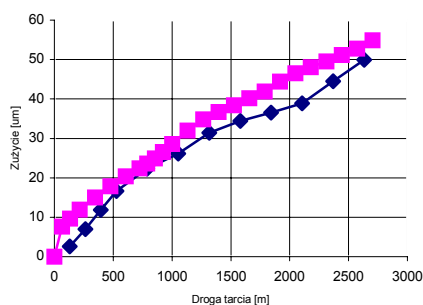
Godny zauważenia jest fakt, że kształt przekroju dna rowka tworzonego w przeciwpróbce żeliwnej przez próbkę górną jest bardzo zbliżony we wszystkich pomiarach. Można stwierdzić, że w prezentowanym przypadku próbka górna zużywała się w nieznacznym

stopniu, dzięki czemu jej kształt nie zmieniał się istotnie w miarę trwania testu. Profilu powierzchni roboczej próbki ze stopu AK12 nie mierzono.

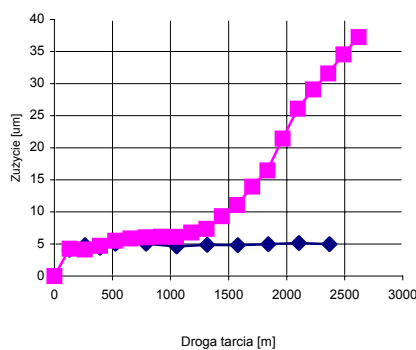
Dzięki pomiarowi zużycia sumarycznego i zużycia przeciwpróbki możliwe jest pośrednie wyznaczenie zużycia próbki aluminiowej. Bezpośrednie wyznaczenie zużycia próbki jest utrudnione z uwagi na małe rozmiary próbki.

WYNIKI POMIARÓW ZUŻYCIA

a) materiał 101



b) materiał 081



◆ - zużycie przeciwpróbki, ■ - zużycie sumaryczne

Rys. 5 Wykresy zużycia sumarycznego (■) oraz zużycia przeciwpróbki (◆) dla materiałów 101 (wykres a) i 081 (wykres b).

Fig. 5 Graphical representation of overall wear (■) and the wear of the counter-specimen (◆) for materials 101 (graph a) and 081 (graph b).

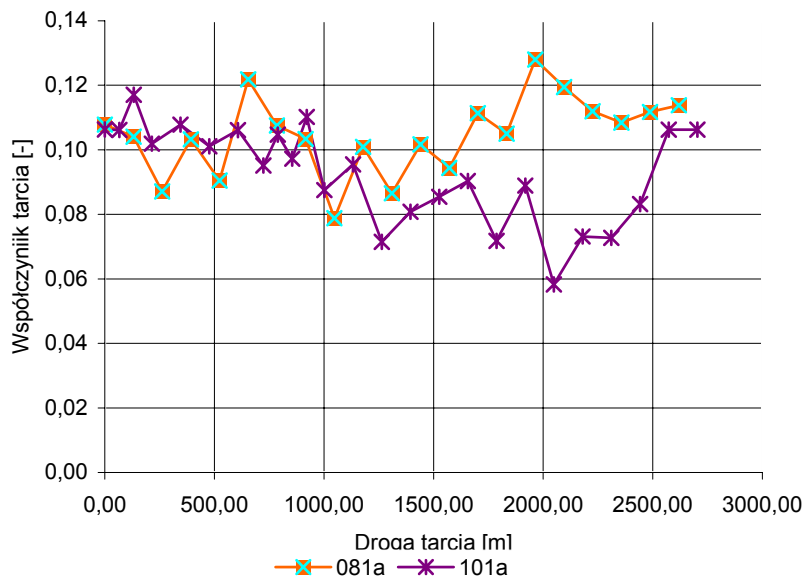
Zaobserwowano znaczne zróżnicowanie przebiegów zużycia sumarycznego w funkcji drogi tarcia zależnie od warunków obróbki laserowej próbek ze stopu AK12. Na Błąd! Nie można odnaleźć źródła odsyłacza. przedstawiono przykładowe zestawienie wyników pomiarów zużycia podczas badań próbek z materiału 101 i 081. Na wykresie a) zestawiono wyniki pomiaru zużycia przeciwpróbki i zużycia sumarycznego uzyskane podczas testu materiału 101. Przebieg obu krzywych jest bardzo podobny, a wartości zużycia sumarycznego i przeciwpróbki różnią się od siebie jedynie nieznacznie. Można więc stwierdzić, że przeważająca część zużycia przypada na przeciwpróbkę żeliwną. Odmienną sytuację można zaobserwować na wykresie b), na którym zestawiono wyniki pomiaru zużycia przeciwpróbki i zużycia

sumarycznego uzyskane podczas testu próbki oznaczonej kodem 081. Po początkowym szybkim zużyciu do wartości około $5 \mu\text{m}$ dochodzi do zahamowania zużycia przeciwpróbki przy wolno postępującym zużyciu próbki aluminiowej. Po przekroczeniu około 1300 m drogi tarcia dochodzi do gwałtownego przyspieszenia zużycia próbki aluminiowej (081) przy niezauważalnym postępie zużycia przeciwpróbki.

Jak widać materiał o oznaczeniu 101 wykazał podczas testów znacznie większą odporność na zużycie niż materiał o oznaczeniu 081. Jednocześnie wykazano, że przeciwpróbka żeliwna w skojarzeniu z materiałem o oznaczeniu 101 zużywa się znacznie szybciej niż w skojarzeniu z materiałem o oznaczeniu 081.

WYNIKI POMIARU WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów siły tarcia i siły normalnej wyznaczono przebiegi współczynników tarcia. Ze względu na znaczne wahania uzyskanych wartości o cyklicznym charakterze spowodowane posuwisto – zwrotnym ruchem przeciwpróbki ze zbiorów danych pomiarowych wyodrębniono obszary, w których prędkość ślizgania była w przybliżeniu stała. Dla tych przedziałów wyznaczono wartości średnie



Rys. 6 Przebieg wartości średniej współczynnika tarcia w funkcji drogi tarcia dla próbek 081 i 101.

Fig. 6 Average friction coefficient versus sliding distance for materials 081 and 101.

współczynnika tarcia (w każdym cyklu). Tak przygotowane przebiegi wartości współczynnika tarcia dla testów z materiałami 081 i 101 przedstawiono w postaci wykresów w funkcji drogi tarcia na Błąd! Nie można odnaleźć źródła odsyłacza.. Widoczny jest przebieg wartości współczynnika tarcia z widocznymi zmianami wartości o chaotycznym charakterze. Po około 1600 m drogi tarcia dochodzi do zwiększenia wartości współczynnika tarcia dla materiału 081 (od ok. 0,1 do ok. 0,13) i zmniejszenia współczynnika tarcia dla materiału 101 (od ok. 0,09 do ok. 0,06). Dla każdego z dwóch opisywanych materiałów wartość współczynnika tarcia zmienia się do około 0,11, przy czym nie można na obecnym etapie badań jednoznacznie stwierdzić, że zmiany wartości współczynnika tarcia mają związek z wielkością bądź szybkością zużycia.

WNIOSKI

W wyniku badań tribologicznych, którym poddano skojarzenia laserowo zmodyfikowanego stopu aluminium AK12 i żeliwa 300 stwierdzono istotne zróżnicowanie występującego zużycia próbek z obu materiałów w zależności od zastosowanych parametrów obróbki laserowej próbek aluminiowych. Zarejestrowano kinetykę i wartości zużycia każdego ze skojarzeń modyfikowanego powierzchniowo stopu aluminium z żeliwną przeciwpróbką. Wyznaczono również przebiegi wartości współczynników tarcia w funkcji drogi tarcia. Nie stwierdzono zależności między przebiegiem zużycia a rejestrowanymi wartościami współczynnika tarcia.

Uzyskane wyniki eksperymentalne pozwalają na analizę wpływu parametrów obróbki laserowej na odporność na zużycie i na doskonalenie tej technologii.

Potwierdzono w praktyce przydatność do opisanego typu badań tribometru TPZ-1 i metodyki obróbki danych pomiarowych.

BIBLIOGRAFIA

1. MIYOSHI K.: Fundamental considerations in adhesion, friction and wear of ceramic -metals contacts. *Wear*, 1990, 141, s. 35-44
2. ZOZULJA V. D., SVEDKOV F. L., ROVINSKIJ D. JA.: *Slovar-spravocnik po treniju, iznosu i smazke detalej masin*. Kiev 1990.
3. *Friction and wear testing. Source book of selected references from ASTM standarts and ASM handbooks*. ASTM, ASM 1997.

4. Druet K., Łubiński J. I., Grymek S.: Stanowisko do badania tarcia ślizgowego w ruchu posuwisto-zwrotnym. J. of KONES 2002 vol. 9 nr 1-2 s. 72-79.
5. Druet K.: Urządzenie do badania tarcia ślizgowego w ruchu prostoliniowym. XXIII Jesienna Szkoła Tribologiczna – Kształtowanie tribologicznych właściwości węzłów tarcia. Teoria i praktyka. Zielona Góra -Lubiatów, wrzesień 1999, s. 29-34.
6. Druet K., Król M.: Tribometr TPZ. III Międzynarodowe Sympozjum INSYCONT. Materiały. Wydawnictwo AGH, Kraków 1990, s. 617-621.
7. Druet K., Łubiński T., Łubiński J. I.: Reciprocating motion tribometer. Abstracts of papers from 2nd World Tribology Congress. Vienna, Austria, 3-7 September 2001, s. 663.

Recenzent:
Marian SZCZEREK

Summary

Results are presented from tribological research of a conformal flat reciprocating sliding contact of 300 grade cast iron and AK12 aluminum alloy (AlSi13Mg1CuNi), which was subjected to laser remelting of the working surface under cryogenic conditions. A series of tests was carried out on TPZ – 1 reciprocating tribometer, with SAE 20W/40 grade mineral motor oil. Data on friction and wear (measured continuously) as a function of sliding distance was recorded.

An assessment of relation between tribological performance of the tested materials and the parameters of laser processing was carried out.