

WPLYW DODATKU MODYFIKATORA OPARTEGO NA SKŁADNIKU MoS_2 NA CHARAKTERYSTYKĘ TRIBOLOGICZNĄ STOPU AlSi6Cu4 W ŚRODOWISKU OLEJU MINERALNEGO

Praca przedstawia wyniki badań tribologicznych stopu aluminium w warunkach tarcia ze smarowaniem w postaci różnych środowisk. Bazowy środek smarny stanowił olej mineralny Lotos o charakterystyce 15W40. Taki sam olej, z dodatkiem modyfikatora Liqui Moly opartego na składniku MoS_2 , stanowił drugi środek smarny. Pomiar współczynnika tarcia wykonano na triboteście typu „ball-on-disc” z przeciwpróbkami (ball) w postaci kulek o średnicy 6 mm wykonanych ze stali 100Cr6 o twardości 64HRC. Badania tribologiczne realizowano pod obciążeniem 10N z prędkością liniową 5 cm/s na promieniu 5 mm. Badano współczynnik zużycia i współczynnik tarcia próbki, a ślady zużycia poddano obserwacjom SEM. Ocenę istotności zmian współczynnika zużycia przeprowadzono testem t-Studenta. Najmniejszy współczynnik tarcia i zużycia zaobserwowano dla środowiska z dodatkiem modyfikatora Liqui Moly.

WSTĘP

Budowa pojazdów to szukanie innowacyjnych rozwiązań w zakresie wytwarzania materiałów, technologii i zarządzania produkcją oraz badań empirycznych i stochastycznych [1]. Ciągły rozwój techniki motoryzacyjnej wymaga poprawy charakterystyk eksploatacyjnych stosowanych wyrobów w budowie silników spalinowych [2]. Stopy odlewnicze Al-Si, ze względu na dobre właściwości fizyko-mechaniczne i leżność są bardzo popularne w przemyśle motoryzacyjnym [3].

Wśród stopów odlewniczych Al-Si popularnym dla zastosowań motoryzacyjnych stał się podeutektyczny stop AlSi6Cu4 stosowany na odlewy umiarkowanie silnie obciążone [4]. Obecnie wytwarza się z niego w przemyśle motoryzacyjnym: bloki silników, głowice cylindrów, tłoki oraz obudowy sprzęgieł itp. Stop AlSi6Cu4 stosowany jest m. in. przez takie koncerny motoryzacyjne jak: Kia, Skoda, BMW, Fiat i Citroen [5, 6].

W ostatnich latach obserwuje się trend polegający na dodawaniu modyfikatorów i różnego rodzaju dodatków syntetycznych do oleju celem obniżenia tarcia oraz poprawy sprawności eksploatacyjnej elementów składowych silnika. Z reguły, modyfikatory oferowane są jako dodatek do oleju przeznaczony do starszych silników, ze znacznym przebiegiem i mocno wyeksploatowanych, w celu przywrócenia ich sprawności i poprawy charakterystyk pracy [7].

W przypadku niektórych materiałów dodatek modyfikatora do oleju niekoniecznie wykazuje poprawę charakterystyk tribologicznych [7, 8], a na rynku motoryzacyjnym istnieje wielu producentów mających w swojej ofercie modyfikatory niekoniecznie spełniające pod względem eksploatacyjnym oczekiwania potencjalnych klientów. Uzupełniając dotychczasowe rozważania dodać trzeba, że warunki, w jakich jest prowadzony proces identyfikacji modelu rozwiązania mogą dość istotnie różnić się od zwykłych warunków pracy [9].

W związku z tym w pracy podjęto próbę określenia wpływu dodatku modyfikatora opartego na MoS_2 na zużycie tribologiczne stopu AlSi6Cu4 w środowisku silnikowego oleju mineralnego.

1. PRZEDMIOT I METODYKA BADAŃ

Przedmiot badań stanowił podeutektyczny odlewniczy stop aluminium AlSi6Cu4 . Próbkę użyte do badań tribologicznych miały kształt krążków o średnicy \varnothing 25 mm i grubości 6 mm. Podano je szlifowaniu na wodnych papierach ściernych o ziarnistości odpowiednio 300, 600 i 1200. Następnie próbki polerowano mechanicznie przy użyciu zawiesziny diamentowej 3 μm i zawiesziny tlenków 0,05 μm , a po zakończeniu polerowania przemywano je acetonem i suszono w strumieniu ciepłego powietrza.

Testy pomiarowe współczynnika tarcia realizowano na triboteście typu „ball-on-disc” firmy CSM Instruments. Jako przeciwpróbki (ball) użyto kulek o średnicy 6 mm (firmy CSM Instruments) wykonanych ze stali 100Cr6 o twardości 64HRC. Badania tribologiczne realizowano pod obciążeniem 10N z prędkością liniową 5 cm/s na promieniu 5 mm. Badanie przeprowadzono w dwóch różnych środowiskach. Pierwsze środowisko stanowił czysty olej mineralny o charakterystyce określonej jako 15W40 (firmy Lotos). Kolejnym środowiskiem był olej mineralny Lotos 15W40 z dodatkiem modyfikatora Liqui Moly opartego na składniku MoS_2 . Udział modyfikatora w środowisku badawczym był zgodny z zaleceniami producenta tego dodatku, określonymi dla silników spalinowych. Całkowita droga testu, podczas której rejestrowano zmianę współczynnika tarcia wynosiła 500 m.

$$K = \frac{\text{Zużycie objętościowe}}{\text{Siła obciążająca} \times \text{droga testu (dystans)}} \quad [\text{mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}] \quad (1)$$

Miarą zużycia był ubytek objętościowy próbki powstały jako ślad wytarcia w wyniku współpracy próbki i przeciwpróbki. W tym celu za pomocą profilometru stykowego Dektak 150 firmy Veeco Instruments, po obwodzie próbki (w 12 miejscach) mierzono pole profilu wytarcia próbki. Promień zaokrąglenia igły pomiarowej wynosił 2 μm . Zużycie objętościowe wyznaczono, jako iloczyn średniej wartości pola wytarcia próbki i obwodu koła śladu wytarcia powstałego w teście ball-on-disc. Następnie wyznaczono tzw. współczynnik

zużycia K , który obok zużycia objętościowego uwzględniał obciążenie oraz przebieg dystansu stosowany podczas testu:

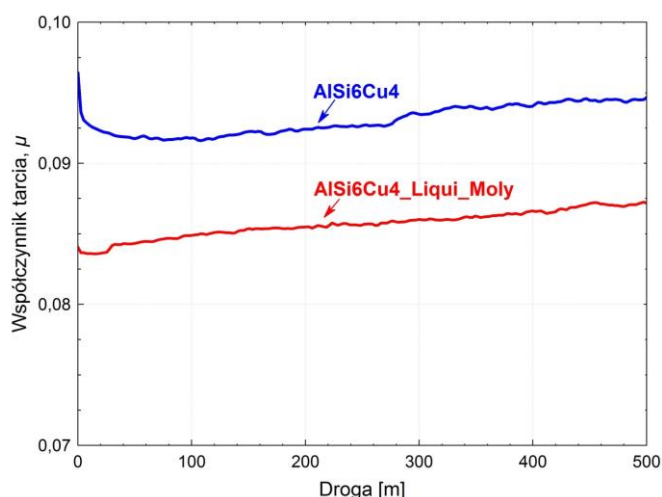
Powierzchnię po testach tribologicznych poddano analizie na mikroskopie skaningowym Phenom X pro.

2. REZULTATY BADAŃ I DYSKUSJA

Wartości zarejestrowanych współczynników tarcia zamieszczono w tab. 1, a interpretację graficzną w funkcji drogi przedstawiono na rys. 1. Analiza porównawcza współczynników tarcia wykazała, że najniższy współczynnik tarcia odnotowano dla stopu aluminium w środowisku oleju mineralnego z dodatkiem modyfikatora Liqui Moly. Ponadto przebieg współczynnika tarcia dla badanych materiałów wskazuje na lekką tendencję wzrastającą współczynnika niezależnie od środowiska. Łagodny wzrost krzywej określającej zmiany współczynnika tarcia związany jest ze zwiększającym się polem kontaktu pomiędzy współpracującymi powierzchniami. Niekiedy produkty zużycia wtórnego dostają się na tor bezpośredniej współpracy próbki z przeciwpróbką i wówczas obserwują się chwilowy wzrost współczynnika tarcia.

Tab. 1. Zestawienie wyznaczonych wartości współczynników tarcia badanych materiałów we współpracy z przeciwpróbką ze stali 100Cr6

| Materiał | Średni współczynnik tarcia μ | Odchylenie standardowe |
|---------------------|----------------------------------|------------------------|
| AlSi6Cu4 | 0,094 | 0,002 |
| AlSi6Cu4_Liqui_Moly | 0,085 | 0,001 |



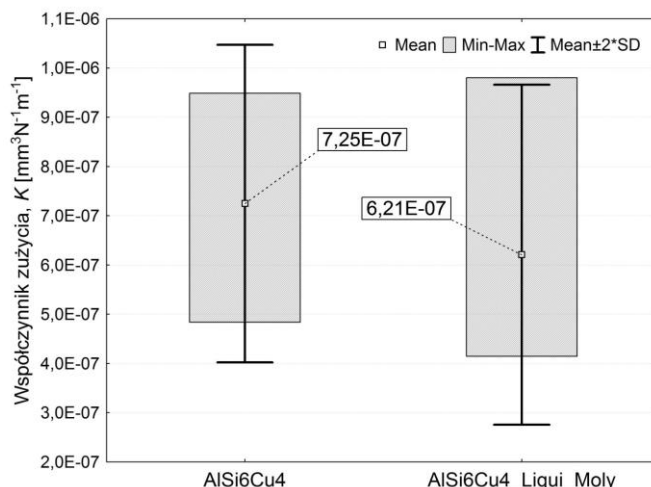
Rys. 1. Wykres zmian współczynnika tarcia w funkcji przebytej drogi przy obciążeniu 10N

W przypadku stopu AlSi6Cu4 dodatek modyfikatora do oleju mineralnego oprócz redukcji współczynnika powoduje dodatkowo podwyższenie odporności na zużycie (rys. 2).

Badania realizowane przez Koshy i współ. [10] dowodzą również, że dodatek nanocząstek MoS₂ do oleju powoduje zmniejszenie współczynnika tarcia i zużycia dla pary stop Al-Si – stal narzędziowa (EN-31) podczas testów pin-on-disc.

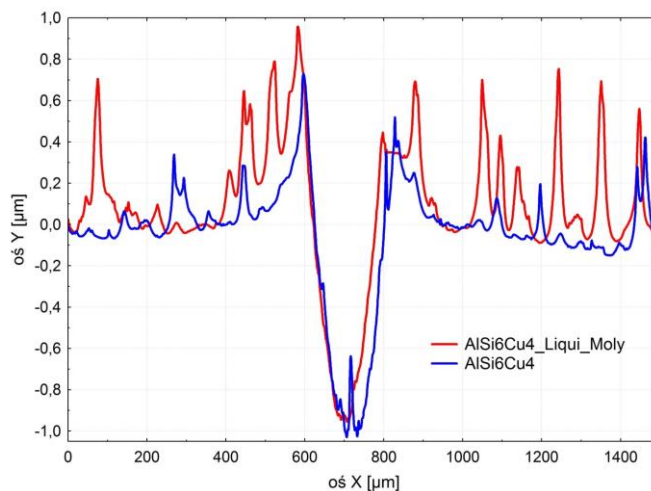
W celu weryfikacji czy otrzymane zmiany są istotnie statystycznie wykonano programem STATISTICA analizę z udziałem testów parametrycznych dla prób niezależnych. Analiza statystyczna testem Shapiro-Wilka pomiaru współczynnika zużycia wykazała, że otrzymane wyniki mają rozkład normalny $p > 0,05$ (przy założeniu $\alpha = 0,05$). Zatem $p > \alpha$ i nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o rozkładzie normalnym badanej cechy. Świadczyć to może o dużej jednorodności strukturalnej badanych materiałów. Pomimo tego, że dla stopu aluminium pracującego w środowisku oleju mineralnego z

dodatkiem modyfikatora uzyskano średnią wartość współczynnika zużycia niższą o blisko 15% to test istotności t-Studenta (dla $\alpha = 0,05$) wykazał, że różnice w zużyciu są nieistotne statystycznie ($p > 0,05$).



Rys. 2. Wykres wyznaczonych wartości współczynników zużycia K

Analiza profili poprzecznych (rys. 3) wykazała, że dno śladu zużycia w przypadku stopów aluminium pracujących w środowisku wzbogaconym modyfikatorem Liqui Moly wskazuje na inny przypadek mechanizmu zużycia (nie nosi śladów wyżłobień), niż ma to miejsce w środowisku samego oleju mineralnego (dno toru jest gładziej). Dodatkowo spiętrzeniu ulegają obrzeża krawędzi torów zużycia. Widoczne na profilach występy i nierówności wznoszące się ponad poziom zerowy odniesienia związane są z występowaniem w strukturze drobno iglastej eutektyki $\alpha(\text{Al}) + \beta(\text{Si})$ na tle roztworu stałego krzemu w aluminium $\alpha(\text{Al})$. Podczas polerowania próbek (na etapie przygotowania to testów), plastyczna osnowa $\alpha(\text{Al})$ łatwiej ulega ścieraniu niż ziarna krzemu. Stąd też w początkowej fazie testu ulegają ścinaniu wierzchołki profilu chropowatości. Dlatego w przypadku testów stopu AlSi6Cu4 w samym oleju mineralnym początkowe wartości współczynników tarcia są dużo wyższe (rys. 1). Natomiast w przypadku testów w środowisku oleju z dodatkiem modyfikatora początkowe wartości współczynnika tarcia nie są już takie wysokie, gdyż cząsteczki MoS₂ wypełniają te nierówności, znacznie redukując tarcie w fazie początkowej testu.



Rys. 3. Reprezentatywne profile śladów zużycia po teście ball-on-disc

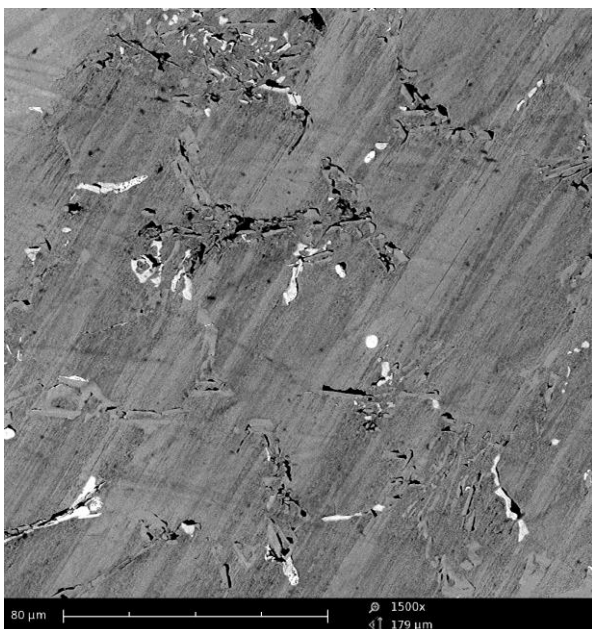
Badania Rahmati i współ. [11] wskazują, że w przypadku powierzchni o odpowiednim stopniu rozwinięcia zawartości nanocząstek MoS₂ już na poziomie 0,5% wag. co stanowi optymalne warunki dla utworzenia się cienkiego film zmniejszającego tarcie w odniesieniu do powierzchni gładkich.

Analiza SEM powierzchni torów zużycia (rys. 4) wskazuje, że w obydwu przypadkach dominującym mechanizmem jest zużycie ściernie. Intensyfikującym czynnikiem jest mikro skrawanie. Występują wówczas wzdłuż torów zużycia ślady w postaci ciągłych rys, wynikające z przemieszczających się produktów zużycia wtórnego.

a)



b)



Rys. 4. Reprezentatywne mikrostruktury SEM śladów zużycia stopu AISi6Cu4 po testach tribologicznych w środowisku: a) samego oleju mineralnego b) oleju mineralnego z dodatkiem modyfikatora Liqui Moly.

Wydzielenia krzemu stanowią naturalną przeszkodę dla materiału przeciwności. Z czasem dochodzi do wyrwania cząstek krzemu i intensyfikacji procesu zużycia przez ich dodatkowe oddziaływanie z powierzchniami trącymi. Takie zachowanie skutkuje

zwiększeniem efektu zużycia ściernego badanych stopów lub luźnym przetaczaniem się twardych cząstek krzemu między współpracującymi powierzchniami próbki i przeciwności. Wówczas przetaczana cząstka może powodować powstawanie zarysowań na powierzchni współpracującej próbki lub plastyczną deformację roztworu stałego α(Al) pozostawiając charakterystyczne ślady w postaci bruzd. Ponadto powierzchnia stopu po testach w ośrodku z dodatkiem modyfikatora wydaje się być mniej porysowana.

Dane literaturowe [8, 10, 11] wskazują na ścierny charakter zużycia w przypadku materiałów współpracujących w środowisku płynnych olejów lub smarów z dodatkiem MoS₂.

PODSUMOWANIE

Testy tribologiczne wykazały, że dodatek modyfikatora Liqui Moly do oleju mineralnego oprócz redukcji współczynnika powoduje dodatkowo podwyższenie odporności na zużycie stopu AISi6Cu4. Charakter zużycia podeutektycznego stopu Al-Si wskazuje na typowy ścierny mechanizm zużycia, intensyfikowany przez mikro skrawanie. Dno toru zużycia stopu aluminium pracującego w środowisku oleju mineralnego z dodatkiem modyfikatora wykazuje mniej intensywne ślady zużycia - jest gładziej bez głębokich bruzd. Cząsteczki MoS₂ powodują znaczną redukcję współczynnika tarcia w początkowej fazie testów tribologicznych.

Podsumowując, dodatek modyfikatora opartego na składniku MoS₂ może wpływać na wzrost właściwości eksploatacyjnych i odporności na zużycie ściernie podeutektycznych stopów aluminium, co z kolei może przekładać się na podniesienie wydajności pracy silnika.

BIBLIOGRAFIA

- Caban J., Drożdżel P., Seńko J., *Wybrane materiały konstrukcyjne w budowie pojazdów samochodowych*, „Logistyka” 2014, nr 3, s. 946-953.
- Walczak M., Bienias J., Sidor-Walczak J., *Badania korozyjne aluminiowych kompozytów zbrojonych SiC wykorzystywanych do produkcji tarcz hamulcowych*, „Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe”, Nr 6, CD, 2010, s. 1-7.
- Walczak M., Pieniak D., Zwierzchowski M.; *The tribological characteristics of SiC particle reinforced aluminium composites*, „Archives of Civil and Mechanical Engineering”, 2015, Vol. 15, No 1, pp. 116-123.
- Medlen D., Bolibruchová D., *The Influence of Remelting on the Properties of AISi6Cu4 Alloy Modified by Antimony*, „Archives of Foundry Engineering”, 2012, Vol. 12, No 1, 2012, pp. 81-86.
- Medlen D., Bolibruchová D., *Theoretical studies of AISi6Cu4 alloys*, „Technológ”, 2010, No 2, 151-156. (in Slovak).
- Medlen D., Nová I., Bolibruchová D., Urgela D., *Influence of Sb on gas content and flowability of alloy AISi6Cu4*, „ACC Journal, XVII”, 2011, No 1.
- Walczak M., Drozd K., *Wpływ modyfikacji oleju mineralnego na charakterystykę tribologiczną kompozytu na osnowie aluminium*, „Logistyka”, 2014, Nr 3, CD nr 1, s. 6548-6553.
- Xie H., Jiang B., He J., Xia X., Pan F., *Lubrication performance of MoS₂ and SiO₂ nanoparticles as lubricant additives in magnesium alloy-steel contacts*, „Tribology International”, 2016, Vol. 63, pp. 63-70.
- Tomporowski A., Opielak M., *Structural features versus multi-hole grinding efficiency*, „Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability” 2012, Vol. 14 (3), pp. 222-227.
- Koshy Ch.P., Rajendrakumar P.K., Thottackad M.V., *Evaluation of the tribological and thermo-physical properties of coconut*

oil added with MoS₂ nanoparticles at elevated temperatures, „Wear”, 2015, Vol. 330-331, pp. 288-308.

11. Rahmati B., Sarhan A.A.D., Sayuti M., *Morphology of surface generated by end milling AL6061-T6 using molybdenum disulfide (MoS₂) nanolubrication in end milling machining*, „Journal of Cleaner Production”, 2014, Vol. 66, pp.685-691.

The effect of modifier addition which is based on MoS₂ on tribological characteristic of AlSi6Cu4 alloy in environmental mineral oil

The paper presents results of tribology studies of aluminium alloy (AlSi6Cu4) in conditions of friction with different medium as lubricant. The base lubricant was Lotos mineral oil of the characteristics 15W40. The same oil with the addition of modifier Liqui Moly which is based on MoS₂ was the second lubricant. Friction coefficient measurements were

performed on "ball-on-disc" tribotester with ball of 6 mm in diameter made of steel 100Cr6 with a hardness of 64HRC. The testing was carried out under a load of 10 N at a linear velocity of 5 cm/s at 5 mm radius. Were rate an coefficient of friction of the sample were tested the signs of wear was SEM observation. The evaluation of the significance of changes in consumption coefficient was conducted by t-Student's test. The lowest coefficient of friction and the lowest wear rate were observed for the environment with the addition of Liqui Moly modifier.

Autorzy:

dr hab. inż. **Mariusz Walczak** – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej, m.walczak@pollub.pl

mgr inż. **Jacek Caban** – Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Maszyn Rolniczych i Transportowych, jacek.caban@up.lublin.pl