

Tadeusz LEŚNIEWSKI\*, Michał KRAWIEC\*

## WPLYW MODYFIKACJI OLEJU NANOCZĄSTECZKAMI MIEDZI NA JEGO EFEKTYWNOŚĆ SMAROWANIA

### THE EFFECT OF THE OIL MODIFICATION BY NANOPARTICLES OF COPPER ON ITS LUBRICATION EFFICIENCY

#### Słowa kluczowe:

tribologia, charakterystyki tribologiczne, olej, dodatki

#### Key words:

tribology, tribological characteristics, oil, additives

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono wpływ nanocząstek miedzi na efektywność smarowania oleju. Jako bazowy przyjęto olej parafinowy AP/E Core 600. Olej bazowy zmodyfikowano, tworząc kompozycje smarowe zawierające dodatek 0,02%Cu lub 0,25%Cu granulacji 40 nm oraz dodatek 0,02%Cu/CuO lub 0,25%Cu/CuO granulacji 100 nm. Do realizacji założonego celu przyjęto następujący program badań: 1) Ocena skuteczności działania olejów według dwóch kryteriów: obciążenia zespawania  $F_z$  i charakterystyki zużycia w funkcji obciążenia nadanego

---

\* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Polska, tel. 048 71 320 40 31, tadeusz.lesniewski@pwr.edu.pl.

$d = f(F)$ , 2) Ocena skuteczności działania dodatków smarnościowych zawartych w oleju na podstawie granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz/40}$ . Wszystkie badania prowadzone były na standardowym aparacie czterokulowym. Etap pierwszy zrealizowany został z zastosowaniem wytycznych normy PN-76/C-04147 „Badania własności smarnych olejów i smarów”. Na etapie drugim określono graniczne obciążenie zużycia  $G_{oz/40}$ , zgodnie z metodyką opisaną w WTWT-94/MPS-025. Przyjęto obciążenie 40 daN, czas biegu 3600 s i prędkość obrotową kulki górnej  $n = 500$  obr./min. Im wyższa wartość wskaźnika  $G_{oz/40}$ , tym lepsza jest skuteczność badanego środka smarnego w zmniejszaniu zużycia. Testy na każdym etapie i dla każdego punktu pomiarowego były zawsze powtarzane minimum pięciokrotnie. Wyniki opracowano statystycznie przy poziomie ufności 95%, stosując test t-Studenta.

## WPROWADZENIE

Procesy tarcia i zużywania elementów są procesami, których nie można uniknąć. W urządzeniach najniebezpieczniejszy jest proces tarcia powodujący intensywne zużywanie się powierzchni części, objawiające się dużym ubytkiem materiału albo wyraźnym pogorszeniem jakości powierzchni trących. Aby zapobiec negatywnym skutkom tarcia, wykonuje się elementy z coraz lepszych materiałów lub wprowadza między trące powierzchnie tych elementów środki smarne, których zadaniem jest wyeliminowanie lub obniżenie tarcia. Smar zmniejsza opory ruchu przemieszczających się elementów oraz obniża ich zużycie, a poprzez to istotnie wpływa na trwałość maszyny. Środek smarny jest zatem istotnym materiałem konstrukcyjnym, którego wybór do węzła ślizgowego musi być poparty odpowiednimi argumentami wynikającymi z badań doświadczalnych lub wcześniejszych zastosowań praktycznych. Szczególnie istotne jest to w przypadku węzłów pracujących w zakresie tarcia mieszanego.

Zagadnieniem zwiększenia odporności materiałów na zużycie oraz obniżenia współczynnika tarcia zajmuje się wielu badaczy. Sposobów podejścia do tych zagadnień jest bardzo dużo. Miedzy innymi autorzy pracy wielokrotnie poruszali już problem wpływu różnych środków smarnych na charakterystyki tribologiczne węzłów trących. W swych pracach wskazywali niejednokrotnie różne sposoby zwiększenia efektywności smarów, m.in. poprzez wprowadzenie do smaru dodatków zwiększających efektywność działania bazowego środka smarnego dzięki wytwarzaniu warstwy granicznej o zwiększonej trwałości, co skutkuje obniżeniem współczynnika tarcia między elementami [L. 1–4].

Od kilku lat powszechnie obecne są nanomateriały i dużo prac badawczych dotyczy prób ich uzyskiwania oraz aplikacji w węzłach trących [L. 5, 6].

Celem poniższych badań była analiza właściwości tribologicznych olejów z dodatkiem nanocząsteczek miedzi, uzyskanych na drodze syntezy plazmowej, podczas stosowania ich do smarowania stalowych węzłów ślizgowych. Do realizacji założonego celu przyjęto następujący program badań:

1. Ocena skuteczności działania dostarczonych olejów według dwóch kryteriów: obciążenia zespawania  $F_z$ , charakterystyki zużycia w funkcji obciążenia nadanego  $d = f(F)$ .

2. Ocena skuteczności działania dodatków smarowościowych zawartych w oleju na podstawie granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz/40}$ .

## MATERIAŁY I ICH KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA

Do badań użyte były materiały:

1. Olej bazowy oznaczony na wykresach jako OB1, na który wybrano olej parafinowy AP/E Core 600;
2. Kompozycje smarowe zawierające:
  - olej bazowy OB1 z dodatkiem 0,02% Cu granulacji 40 nm,
  - olej bazowy OB1 z dodatkiem 0,25% Cu granulacji 40 nm,
  - olej bazowy OB1 z dodatkiem 0,02% Cu/CuO granulacji 100 nm,
  - olej bazowy OB1 z dodatkiem 0,25% Cu/CuO granulacji 100 nm;
3. Kulki łożyskowe o średnicy 12,7 mm, wykonane ze stali łożyskowej 100Cr6 wykonane w 16 klasie dokładności i grupie wymiarowej  $S = 0 \mu\text{m}$ , o chropowatości powierzchni wyrażonej parametrem  $R_a$  równej  $0,032 \mu\text{m}$ . Twardość kulek użytych w badaniach wynosiła  $60 \pm 2$  HRC.

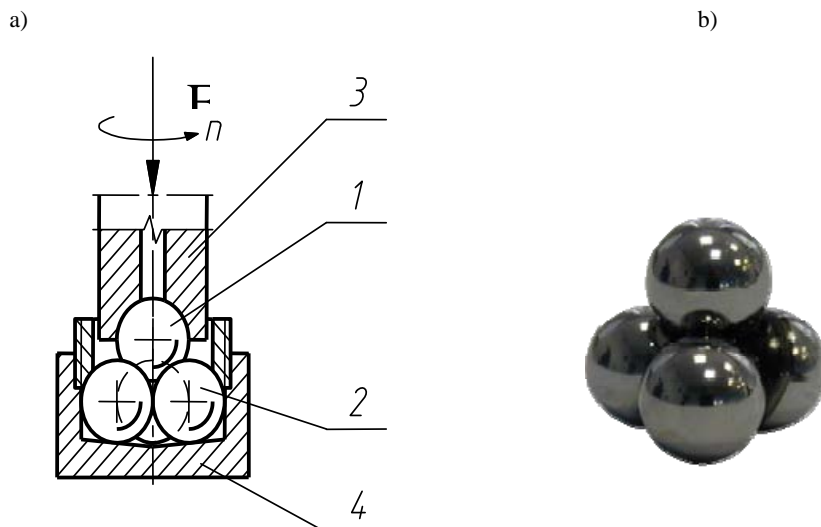
## Metoda i warunki badań

Wszystkie badania prowadzone były na standardowym aparacie czterokulowym produkcji Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu.

Węzeł tarcia w aparacie czterokulowym przedstawiony modelowo na **Rys. 1a** tworzyły cztery kulki ułożone w formie czworościanu foremego. Trzy dolne kulki (2) są nieruchome w uchwycie (4), a czwarta górna (1) jest dociskana do nich pod nadanym obciążeniem  $F$  i wprawiana w ruch obrotowy z prędkością  $n = 1450$  obr./min lub  $n = 500$  obr./min. Widok kulek w węźle przedstawia **Rys. 1b**. W czasie testu dolne kulki (nieruchome) były całkowicie zanurzone w badanym oleju.

Etap pierwszy badań zrealizowany został z zastosowaniem wytycznych normy PN-76/C-04147 „Badania własności smarnych olejów i smarów”. Kryteria przyjęte do oceny skuteczności smarowania dostarczonych olejów zostały zaczerpnięte z ww. normy.

Charakterystykę zużycia od obciążenia nadanego  $d = f(F)$  wyznaczono na podstawie 10-sekundowych biegów zespołu czterech kulek stalowych zanurzonych w badanym oleju. Prędkość obrotowa kulki górnej była stała i wynosiła 1450 obr./min. Pierwszy test wykonano przy obciążeniu nadanym  $F = 63$  daN. Następne testy prowadzono przy zwiększającym się obciążeniu, stopniowanym zgodnie z wymogami wspomnianej polskiej normy, aż do obciążenia, przy którym następowało zespawanie obracającej się kulki z trzema kulkami nieruchomymi.



**Rys. 1. Modelowy, czterokulowy węzeł tarcia do testów zacierania: a) schemat: 1 – kulka górna, 2 – kulki dolne, 3 – uchwyt kulki górnej, 4 – uchwyt kulek dolnych, b) zdjęcie węzła**

Fig. 1. Friction node of four-ball tester: a) scheme: 1 – upper ball, 2 – lower balls, 3 – grip rotating with upper ball 4 – grip immobilizing lower balls; b) picture of the node

Na etapie drugim określono graniczne obciążenie zużycia  $G_{oz/40}$ . Oznaczenie  $G_{oz/40}$  przeprowadzono zgodnie z metodyką zawartą w p. 2.3 normy PN/C-04147 i modyfikacją opisaną w WTWT-94/MPS-025 [L. 7]. Przyjęto obciążenie 40 daN, czas biegu 3600 s i prędkość obrotową kulki górnej  $n = 500$  obr./min (prędkość poślizgu  $v = 0,19$  m/s). Wskaźnik  $G_{oz/40}$  obliczono z zależności:

$$G_{oz/40} = 0,52 \frac{F}{d^2} \quad [\text{N/mm}^2],$$

gdzie:  $F$  – obciążenie nadane = 400 [N],  
 $d$  – średnica śladu zużycia [mm].

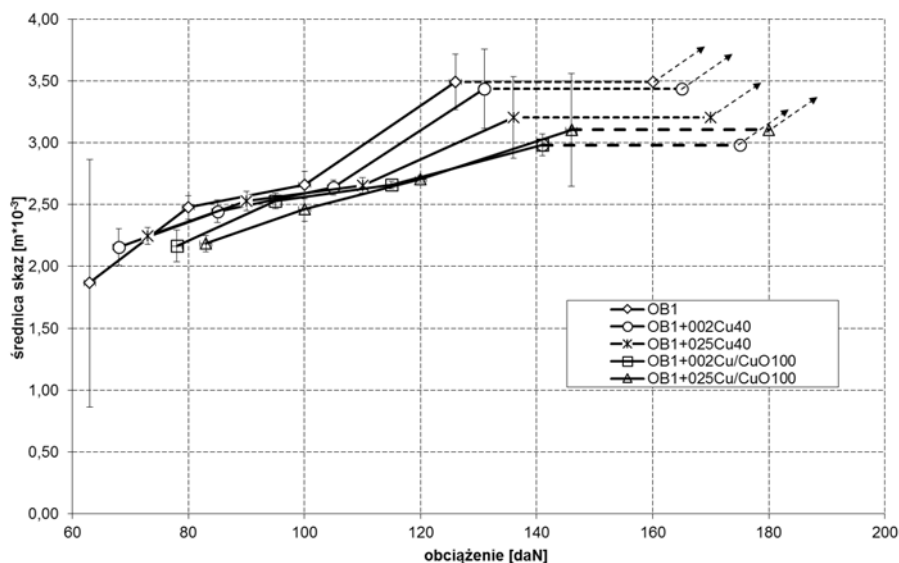
Wskaźnik ten służy do scharakteryzowania właściwości przeciwzużyciowych. Im wyższa wartość wskaźnika  $G_{oz/40}$ , tym lepsza jest skuteczność badanego środka smarnego w zmniejszaniu zużycia [L. 8, 9].

Pomiaru zużycia kulek dokonywano w kierunku równoległym i prostopadłym do śladu zużycia. Ślady mniejsze od 1 mm mierzono pod mikroskopem z dokładnością do 0,01 mm, a pozostałe za pomocą lupki z dokładnością do 0,1 mm.

Testy na każdym etapie i dla każdego punktu pomiarowego były zawsze powtarzane minimum pięciokrotnie. Wyniki opracowano statystycznie przy poziomie ufności 95%, stosując test t-Studenta.

## OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Zależność zużycia kulek od obciążenia nadanego  $d = f(F)$  przy smarowaniu dostarczonymi środkami smarnymi przedstawiono na **Rys. 2**. Na rysunku tym, aby ułatwić jego czytelność, wprowadzono pewne zmiany. Ponieważ w graficznej ilustracji zależności zużycia od obciążenia nadanego  $d = f(F)$  obliczone przedziały ufności nachodziły na siebie, dlatego na **Rys. 2** przesunięto punkty pomiarowe poszczególnych środków smarnych odpowiednio o 5, 10, 15 lub 20 daN tak, aby pokazać różnice w otrzymanych wartościach zużycia. **Rysunek 2** przedstawia więc zależność  $d = f(F)$  dla badanych olejów już z nienachodzącymi na siebie przedziałami ufności, dzięki czemu można je dokładniej odczytać. Na wykresie tym widać obciążenie zespawania  $F_z$ , czyli obciążenie przy którym zachodzi zespawanie kulek (wartość  $F_z$  ilustruje punkt początkowy wektora rysowanego linią przerywaną).



**Rys. 2. Zależność zużycia kulek od obciążenia nadanego**

Fig. 2. Wear (scar diameter) vs. load

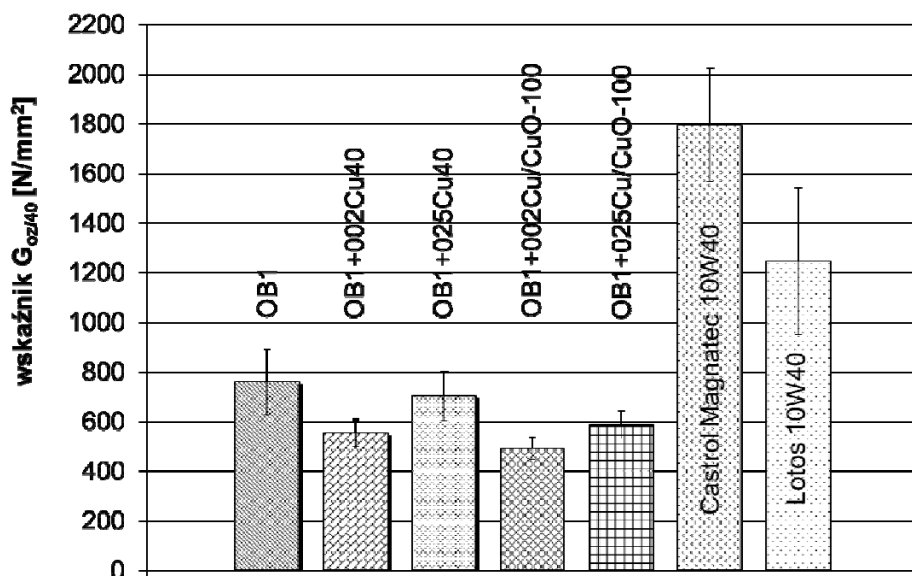
Z przebiegu przedstawionych na **Rys. 2** zależności zużycia od obciążenia nadanego widać, że wpływ analizowanych dodatków miedzi w olejach bazowych nie powoduje istotnego obniżenia zużycia – wszelkie polepszenie charakterystyk następuje w obszarze przedziału ufności, a więc dopuszczalnego błędu pomiarowego. Można jedynie stwierdzić, że dodatek miedzi przy obciążeniu 63 daN powoduje nieznaczne zwiększenie zużycia kulek. Wpływ ten jest jednak różny i zależy od użytego dodatku. Przykładowo dodatek zarówno Cu40, jak i Cu/CuO100 do oleju bazowego nie powoduje istotnego polepszenia charakte-

rystyk tribologicznych. Przy wyższych obciążeniach nawet dla wartości średnich różnice nie są już wyraźnie widoczne.

Różnice widoczne przy obciążeniu 126 daN wynikają ze stanu kulek po przeprowadzonym badaniu. Powierzchnie kulek wskazywały na zatarcie wężła, ale kulki nie ulegały trwałemu połączeniu. Zastosowane środki zapobiegały więc zatarciu, ale powodowały duże zużycie kulek. Otrzymane średnice skaz mają różne wartości, ale nie można na ich podstawie wnioskować o poprawie właściwości smarnych środka. Wartości zużycia kulek mierzono po odsłonięciu skaz poprzez usunięcie wypłynięcia metalu. Nie zawsze można było zrobić to poprawnie. W wielu wypadkach średnica skaz przed oczyszczeniem była większa od 4 mm, a wtedy zgodnie z normą wartość skaz większa od 4 mm pozwala przyjąć obciążenie, przy którym zaszło takie zużycie za obciążenie zespawania i nie można brać wartości skaz do dalszych analiz. Inaczej było tylko w przypadku dodatku Cu/CuO, gdzie otrzymywano powierzchnie ładne i niewymagające oczyszczania krawędzi skaz.

Odnośnie do drugiego kryterium, tj. obciążenia zespawania  $F_z$ , to nie odnotowano poprawy charakterystyk.

Na **Rys. 3** przedstawiono w formie słupkowej wartości granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz/40}$ .



**Rys. 3.** Wskaźnik granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz/40}$  dla badanych środków smarnych

Fig. 3. Limit wear load index  $G_{oz/40}$

W celu porównania badanych środków smarnych z produktami handlowymi wskaźnik  $G_{oz/40}$  określono również dla dwóch olejów najczęściej kupowanych

w Polsce. Do testów wytypowano olej Castrol Magnatec 10W40 oraz Lotos 10W40. Jak widać, uszlachetnienie badanych olejów bazowych dodatkiem miedzi nie spowodowało istotnego wzrostu wskaźnika granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz/40}$ , a widoczne różnice mieszczą się w zakresie przedziału ufności. Przedstawione wartości  $G_{oz/40}$  uzyskane dla oleju Magnatec 10W40 i Lotos 10W40 pokazują wymagania stawiane środkom smarnym wchodzącym na rynek.

## PODSUMOWANIE

Badania tribologiczne na aparacie czterokulowym nad wpływem modyfikacji oleju bazowego nanocząsteczkami miedzi i tlenku miedzi o granulacji 40 i 100 nm można podsumować następująco:

Modyfikacja oleju bazowego przedmiotowymi nanocząsteczkami miedzi dodawanymi w ilości 0,02% i 0,25% masowo, nie powoduje istotnego polepszenia charakterystyk tribologicznych stalowych węzłów tarcia, tj. zmniejszenia ich zużycia i zwiększenia odporności na zatarcie.

Dokonując oceny przedmiotowych olejów i ich modyfikacji według granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz/40}$ , ale obowiązującego w maszynach przemysłu spożywczego, to olej bazowy ma bardzo dobre właściwości przeciwzużyciowe ( $G_{oz/40} > 600 \text{ N/mm}^2$ ) [L. 10].

Otrzymane wyniki obowiązują dla zastosowanego oleju bazowego, dlatego Autorzy planują sprawdzić wpływ nanocząsteczek miedzi dla innych nośników bazowych, dzięki czemu wpływ platerowania cząsteczkami miedzi może być bardziej widoczny i korzystny. Dodatkowo planowane są badania nad nanocząsteczkami miedzi uzyskanymi różnymi metodami syntezy (chemicznej, plazmowej lub elektrochemicznej) niż dotychczas stosowana oraz z nanocząsteczkami stabilizowanymi.

Zauważona po badaniach sedymentacja (opadanie cząstek dodatku zawieszzonego w oleju bazowym pod wpływem siły ciężkości) świadczy o braku tworzenia związku koloidalnego i dyskwalifikuje badany środek smarny jako materiał smarny węzła ślizgowego.

## LITERATURA

1. Krawiec St., Krawiec M., Leśniewski T.: Wpływ dodatków uszlachetniających w smarze plastycznym na efektywność smarowania jego kompozycjami z PTFE, Cu. Tribologia, 2014, R. 45, nr 3, s. 109–117.
2. Krawiec M., Leśniewski T.: Badanie efektywności smarowania litowego smaru plastycznego napełnionego azotkiem boru, Górnictwo Odkrywkowe. 2013, R. 54, nr 3/4, s. 82–86.
3. Leśniewski T.: Badania porównawcze oleju silnikowego Castrol Magnatec Diesel 10W-40 bez i z dodatkiem 10% środka Motonova, Tribologia. 2008, R. 39, nr 3, s. 71–77.

4. Leśniewski T., Krawiec M., Kowalewski P., Paszkowski M.: Wpływ dodatku na zużycie węzłów trących pracujących w obszarze tarcia mieszanego, *Tribologia*. 2012, R. 43, nr 4, s. 133–139.
5. Vadiraj A., Manivasagam G., Kamani K., Sreenivasan V.S.: Effect of Nano Oil Additive Proportions on Friction and Wear Performance of Automotive Materials, *Tribology in Industry*, Vol. 34, No 1, 2012.
6. Choi Y., Lee C., Hwang Y., Park M., Lee J., Choi C., Jung M.: Tribological behavior of copper nanoparticles as additives in oil, *Current Applied Physics* 9, 2009.
7. WTWT-094/MPS-025. Olej przekładniowo-hydrauliczny.
8. Piekoszowski W., Tuszyński W.: Właściwości przeciwwzrostowe, przeciwzatarciowe i trwałość zmęczeniowa węzła tarcia jako efekt rodzaju i stężenia dodatków smarnościowych w oleju. *Tribologia*, nr 5, 2003, s. 203–219.
9. Marczak R., Marczak M., Ludew R., Guzik J., Wojtyniak M.: Metody badania smarności i ich rozdzielczość. *Tribologia*, nr 4, 2003, s. 327–336.
10. Kozdrach R.: Wpływ nanododatków ceramicznych na charakterystyki tribologiczne biodegradalnych smarów plastycznych, *Tribologia* nr 4, 2012 (244), s. 75–88.

## Summary

**The paper presents the effect of nanoparticles of copper on the effectiveness of lubrication oil. Paraffin oil AP/E Core 600 was selected as the base oil. This was modified with an ingredient to form a lubricating additive of 0.02% Cu and 0.25% Cu with a granulation of 40 nm with the addition of 0.02% Cu/CuO or 0.25% Cu/CuO with a granulation 100 nm. The following program was applied for the studies: (1) the assessment of the effectiveness of the oil according to two criteria: seizure load  $F_z$  and wear characteristics as a function of the load  $d = f(F)$ ; and, (2) the assessment of the effectiveness of the lubricity of additives contained in the oil based on the limit wear load index  $Goz/40$ . All tests were conducted on a standard four-ball tester. The first stage was realized with the guidelines of the PN-76/C-04147 „Research lubricating properties of oils and lubricants”. A second step determined the limit wear load index  $Goz/40$ , according to the methodology described in WTWT-94 / MPS-025. The adopted load was 40 daN, with a run time of 3600 s and the speed of the upper balls was  $n = 500$  rpm. The higher ratio  $Goz/40$ , the better was the effectiveness of the test lubricant to reduce wear. Tests in each stage and for each measurement point were always repeated at least five times. The results were statistically within a confidence level of 95% using Student's t-test.**