

**Małgorzata Łągiewka\*, Katarzyna Gielezy, Zbigniew Konopka, Andrzej Zyska, Maciej Nadolski**

*Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej*

*Katedra Odlewnictwa, al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, Poland*

*\* Corresponding author: E-mail: cis@wip.pcz.pl*

Otrzymano (Received) 04.02.2010

## ZUŻYCIE ŚCIERNE KOMPOZYTÓW NA OSNOWIE STOPU CuPb30 ZBROJONYCH CZĄSTKAMI GRAFITU

Celem pracy była ocena stopnia zużycia kompozytów na osnowie stopu miedzi zbrojonych cząstkami grafitu. Kompozyty wytworzone były na osnowie stopu CuPb30. Wytworzono kompozyty o zmiennym udziale objętościowym cząstek grafitu, który wynosił 5, 10 15 i 20% obj. Kompozyty zostały wykonane metodą mieszania mechanicznego ciekłego stopu z jednoczesnym wprowadzeniem określonej ilości cząstek grafitu. Stosowano grafit o średniej wielkości cząstek od 100 do 160  $\mu\text{m}$ . W celu usunięcia wilgoci grafit wyżarzano w temperaturze 250°C. Zarówno zawiesiny kompozytowe, jaki i stop osnowy odlewano grawitacyjnie do form metalowych. Powstałe odlewy miały kształt walca o średnicy 15 mm. Z odlewów tych zostały wycięte próbki do badań zużycia ściernego oraz próbki do wykonania zglądów metalograficznych. Obserwując mikrostruktury badanych kompozytów, stwierdzono, że parametry wytwarzania kompozytów zostały dobrane prawidłowo, cząstki grafitu rozmieszczone były równomiernie, a próbki nie posiadały wad typowych dla metalowych materiałów kompozytowych, takich jak: skupiska cząstek, porowatość czy wtrącenia tlenkowe. Zużycie ściernie kompozytów i stopu osnowy badano jako ubytek masy próbki poddawanej procesowi tarcia suchego przy zadanym obciążeniu i prędkości tarcia po przebyciu drogi 3000 m. Pomiarów ubytku masy dokonywano co 500 m. Aby określić wpływ obciążenia próbki na wielkość zużycia badanych materiałów, próbki poddawane były procesom zużycia przy zmiennym obciążeniu. Zastosowano trzy obciążenia: 10, 20 i 30 N. Dla celów porównawczych badaniom zużycia poddano również stop osnowy. Z przeprowadzonych badań wynika, że wprowadzenie cząstek grafitu do stopu CuPb30 spowodowało znaczne zmniejszenia stopnia zużycia badanych materiałów. Wraz ze wzrostem udziału objętościowego grafitu zużycie ściernie kompozytu maleje. Stwierdzono również, że zwiększenie obciążenia powoduje znaczne zwiększenie zużycia kompozytów i stopu osnowy, jednak wraz ze wzrostem udziału objętościowego cząstek grafitu wpływ ten jest zdecydowanie większy. Dla stopu osnowy zwiększenie obciążenia z 10 do 30 N spowodowało zwiększenie zużycia 12 razy w końcowym etapie tarcia, natomiast dla kompozytu zawierającego 30% cząstek zwiększenie obciążenia trzykrotnie spowodowało zwiększenie zużycia o około 600 razy.

Słowa kluczowe: kompozyt, zużycie ściernie, stopy miedzi

## ABRASIVE WEAR CuPb30 ALLOY MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH GRAPHITE PARTICLES

Evaluation of the abrasive wear of copper alloy matrix composites reinforced with graphite particles was the aim of this study. CuPb30 alloy matrix composites with variable volume content of graphite particles, namely 5, 10, 15 and 20 vol. %, were produced. Composites were made by mechanical mixing of the liquid alloy with simultaneous introduction of a specified quantity of graphite particles, the average particle size ranging from 100 to 160  $\mu\text{m}$ . Graphite was previously annealed at a temperature of 250°C in order to remove moisture. Composite suspensions and the alloy matrix were gravity cast to a metal mould. The resulting castings were of cylindrical shape with a diameter of 15 mm. The samples for abrasive wear test and the samples for metallographic examinations were cut out of the castings. Examining the microstructure of the studied composites, it was found that the parameters of the composite production had been chosen properly, the graphite particles were distributed evenly, and the sample did not have defects typical for metal matrix composites such as clusters of particles, porosity or oxide inclusions. Abrasive wear of composites and the matrix alloy has been measured as a weight loss of the sample undergoing a process of dry friction after passing 3000 m at a given load and rate of counter-sample turning. Mass loss measurements were made every 500 m. The samples were subjected to wear processes under variable load, namely 10, 20 or 30 N, to determine the effect of sample load on the magnitude of wear for the investigated materials. Also the matrix alloy was tested for comparison purposes. The studies show that the introduction of graphite particles to the CuPb30 alloy results in significant reduction of wear of the investigated material. The abrasive wear of composite material decreases with the increase in volume content of graphite. It was also found that increasing the load causes a significant increase in wear of both the composites and the matrix alloy, and with increasing volume content of graphite particles this effect is much greater. For the matrix alloy, increasing the load from 10 to 30 N increased the abrasive wear by 12 times in the final stage of the wear process, while for the composite containing 30% of graphite particles this increase in load increased the abrasive wear by about 600 times.

Keywords: composite, abrasive wear, copper alloys

## WPROWADZENIE

Istnieje wiele czynników mających wpływ na intensywność zużywania części maszyn i urządzeń, jednak największe znaczenie w procesach zużywania mają takie parametry, jak: prędkość przesuwania się trących powierzchni, temperatura pracy zużywanych części, obciążenie i materiał, z którego wykonane są części pracujące w warunkach tarcia. Pod wpływem ciepła, które związane jest z prędkością tarcia podczas zużywania, zachodzą zmiany własności mechanicznych, fizycznych i chemicznych w warstwie wierzchniej. Wraz ze wzrostem temperatury maleje twardość, co zasadniczo wpływa na przebieg odkształceń warstwy wierzchniej [1]. Intensywność zużywania jest proporcjonalna do siły normalnej, co wyraża się wzorem [2]:

$$I = Kp^x \quad (1)$$

gdzie:  $K$  - współczynnik proporcjonalności,  $p$  - nacisk normalny,  $x$  - wykładnik potęgowy zależny od rodzaju materiału.

Wraz ze wzrostem obciążenia wartość wykładnika  $x$  ulega zmniejszeniu, natomiast wartość współczynnika  $K$  wzrasta. Wynika z tego, że przy małych naciskach intensywność zużywania jest silnie zależna od obciążenia, lecz jej wartość rośnie ze zwiększeniem nacisku spowodowanym zwiększeniem współczynnika  $K$ .

Właściwości materiału kompozytowego są wynikiem lub sumą nie tylko właściwości komponentów, z których jest zbudowany, ale także ich udziałów objętościowych oraz ich rozmieszczenia w zbrojonej osnowie [3]. W przypadku kompozytów odlewanych największą uwagę zwraca się na uzyskanie odpowiedniego udziału objętościowego cząstek w objętości osnowy oraz równomiernego rozmieszczenia zbrojenia w osnowie [4, 5]. Równie ważny jest dobór odpowiedniego materiału na osnowę kompozytu oraz wielkość i kształt cząstek ceramicznych [6].

Miedź i jej stopy nie budziły zbyt dużego zainteresowania jako materiał osnowy w kompozytach przede wszystkim ze względu na trudności technologiczne związane wytworzeniem takiego kompozytu. Wytwarzanie tych kompozytów jest trudne z powodu podatności tych stopów na tzw. chorobę wodorową wywołującą mikropęknięcia [7]. Stopy miedzi umacniane cząstkami faz ceramicznych wykazują ciekawą kombinację właściwości wytrzymałościowych, plastycznych oraz odporności na zużycie ścierne. Ich cechą charakterystyczną jest również wysoka przewodność elektryczna i cieplna.

## DOBÓR MATERIAŁU I ZAKRES BADAŃ

Celem pracy było określenie odporności na zużycie ścierne kompozytów na osnowie stopu miedzi (CuPb30) zbrojonego cząstkami grafitu. Badano kompozyty zawierające różne udziały objętościowe cząstek grafitu:

- 1) CuPb30 + 5% C<sub>gr</sub>,
- 2) CuPb30 + 10% C<sub>gr</sub>,

- 3) CuPb30+ 15% C<sub>gr</sub>,
- 4) CuPb30 + 20% C<sub>gr</sub>.

W celach porównawczych wykonano badania zużycia ściernego nieuzbrojonego stopu osnowy. Kompozyty Cu-Pb-grafit otrzymano z następujących składników: miedzi hutniczej, ołowiu, miedzi fosforowej, grafitu. Do wytwarzania kompozytów zastosowano grafit VA o zawartości węgla 99,5÷99,9%. Cząstki grafitu frakcjonowano na sitach, a do sporządzenia kompozytów zastosowano wielkości cząstek z przedziału 100÷160 μm. W celu usunięcia wilgoci cząstki grafitu wyżarzano w temperaturze 250°C. Wytworzony stop przegrzewano do temperatury 1470 K, a następnie wprowadzano do niego odpowiednią ilość cząstek grafitu. Po wymieszaniu zawiesinę odlewano grawitacyjnie do uprzednio przygotowanych form.

Badania własności tribologicznych przeprowadzono na urządzeniu testowym T-05. Jest to tester typu rolka-klocek produkcji Międzyresortowego Centrum Naukowego Eksploatacji Majątku Trwałego w Radomiu (obecnie Instytutu Technologii Eksploatacji).

Badania przeprowadzono w następujących warunkach pracy:

- obciążenie próbki - 10, 20 i 30 N,
- droga tarcia - 3000 m,
- rodzaj tarcia - ślizgowe,
- prędkość tarcia - 5 obr,
- częstotliwość - 50 Hz,
- środowisko - powietrze, ok. 20°C,
- próbka z wklęsłą powierzchnią tarcia, szerokość 6,35 mm, styk rozłożony o polu powierzchni 100 mm,
- przeciwpróbka - stalowa rolka o średnicy 35 mm, wykonana ze stali NC10 o twardości 58÷63 HRC.

Ocenę zużycia ściernego badanych kompozytów przeprowadzono poprzez określenie ubytku masy na drodze tarcia. W celu dokładnego zbadania kinetyki ścierania pomiary ubytku masy dokonywane były co 500 m.

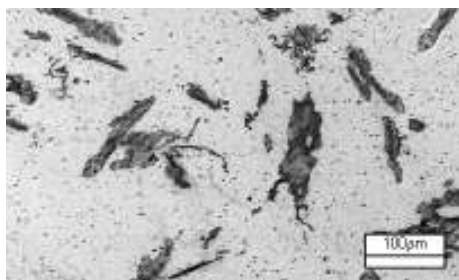
## METODYKA I WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 1 przedstawiono mikrostrukturę stopu CuPb30 stanowiącego osnowę badanych kompozytów, natomiast na rysunkach 2-5 pokazano mikrostruktury badanych kompozytów.

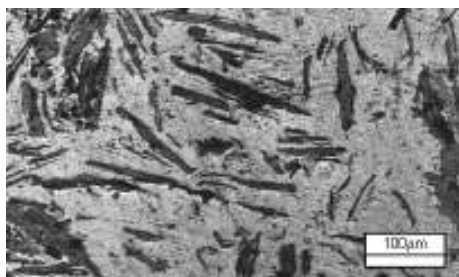


Rys. 1. Mikrostruktura stopu CuPb30

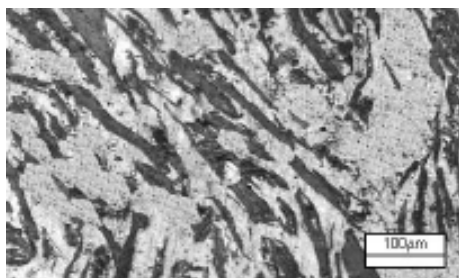
Fig. 1. Microstructure of CuPb30 alloy



Rys. 2. Mikrostruktura kompozytu CuPb30+5% C<sub>gr</sub>  
Fig. 2. Microstructure of CuPb30+5% C<sub>gr</sub> composite



Rys. 3. Mikrostruktura kompozytu CuPb30+10% C<sub>gr</sub>  
Fig. 3. Microstructure of CuPb30+10% C<sub>gr</sub> composite



Rys. 4. Mikrostruktura kompozytu CuPb30+15% C<sub>gr</sub>  
Fig. 4. Microstructure of CuPb30+15% C<sub>gr</sub> composite

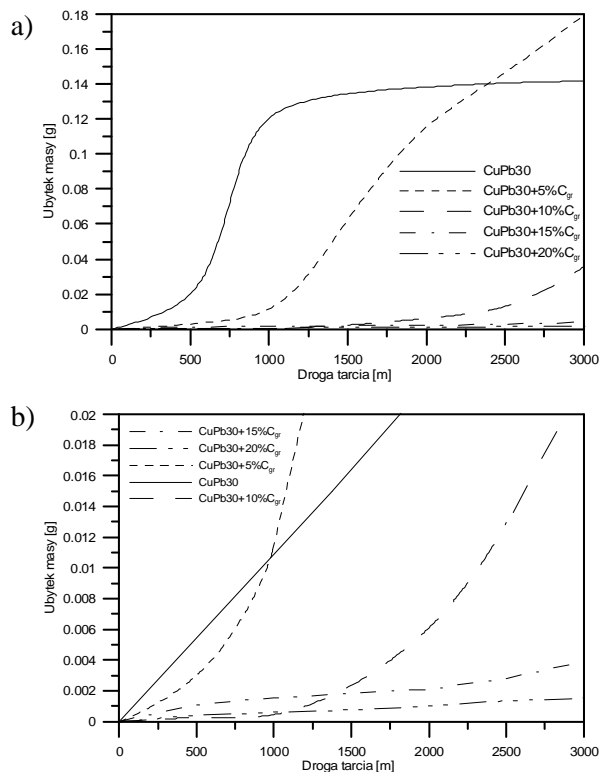


Rys. 5. Mikrostruktura kompozytu CuPb30+20% C<sub>gr</sub>  
Fig. 5. Microstructure of CuPb30+20% C<sub>gr</sub> composite

Otrzymane wyniki badań zużycia ściernego przedstawiono również w postaci graficznej na rysunkach 6-8.

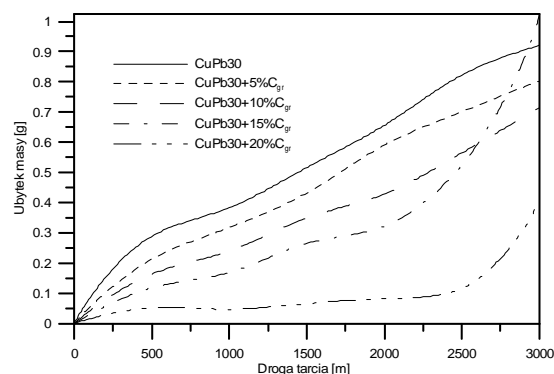
Na rysunku 6 pokazano zużycie ściernie osnowy CuPb30 oraz kompozytów zawierających różną zawartość grafitu przy obciążeniu 10N. Na rysunku 6b dla lepszego zobrazowania różnic w wartościach ubytku masy materiału pokazano ubytek masy do 0,02 g. Jak widać z rysunków, największym ubytkiem masy charakteryzuje się stop CuPb30. Najmniejszy ubytek masy zaobserwowano podczas ścierania kompozytu zawierającego 20% C<sub>gr</sub>, co dowodzi, iż odporność na zużycie

ściernie rośnie wraz z zawartością grafitu. Wszystkie krzywe kompozytu zbrojonego cząstkami grafitu mają charakterystyczny przebieg różniący się od przebiegu krzywej zużycia stopu osnowy. Podobnie wygląda ubytek masy w przypadku ścierania pod obciążeniem 20 N (rys. 7).



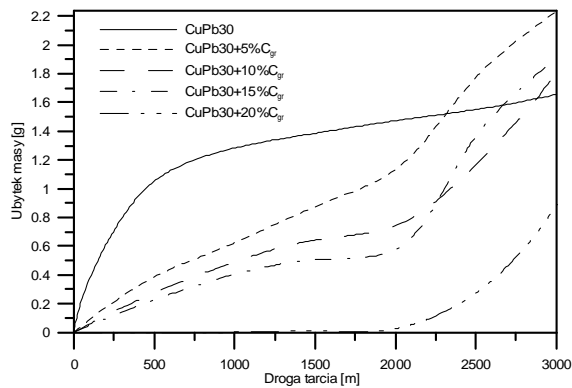
Rys. 6. Zużycie ściernie badanych kompozytów przy obciążeniu 10 N: a) pełny wykres, b) fragment wykresu dla zakresu ubytku masy 0÷0,02 g

Fig. 6. Abrasive wear of composites tested at 10 N load: a) full diagram, b) part of diagram for mass decrement range 0÷0.02 g



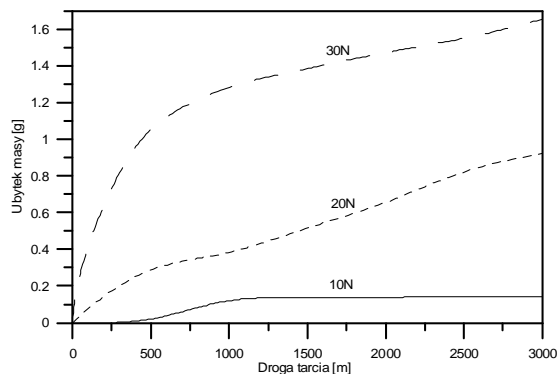
Rys. 7. Zużycie ściernie badanych kompozytów przy obciążeniu 20 N  
Fig. 7. Abrasive wear of composites tested at 20 N load

Na rysunku 8 pokazano zużycie ściernie kompozytów zawierających różną zawartość grafitu oraz osnowy CuPb30 przy obciążeniu 30 N. W początkowym etapie ścierania największym ubytkiem masy charakteryzuje się osnowa. Do około 2000 m zużycie ściernie kompozytów zbrojonych cząstkami grafitu jest niewielkie, lecz po przekroczeniu tej granicy rośnie ono we wszystkich przypadkach niezależnie od zawartości grafitu.



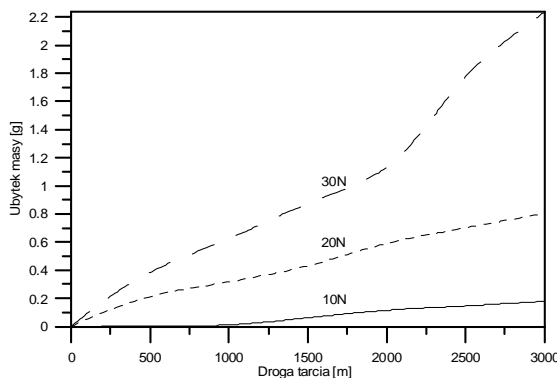
Rys. 8. Zużycie ściernie badanych kompozytów przy obciążeniu 30 N  
Fig. 8. Abrasive wear of composites tested at 30 N load

Na kolejnych rysunkach przedstawiono zużycie badanego materiału w zależności od zastosowanego obciążenia. Na rysunku 9 pokazano wpływ obciążenia na zużycie ściernie stopu CuPb30. Jak widać z rysunku, największym zużyciem charakteryzuje się próbka badana pod obciążeniem 30 N. Zwiększenie obciążenia z 10 do 30 N spowodowało 12 razy większe zużycie próbki po całym cyklu ścierania. Różnice uwidaczniają się już po pierwszych metrach. Wszystkie trzy krzywe mają charakterystyczny przebieg. Do ok. 500 m następuje proces tzw. docierania - na tym etapie obserwuje się dosyć znaczne ubytki masy. Po przekroczeniu tej drogi następuje spowolnienie zużycia.



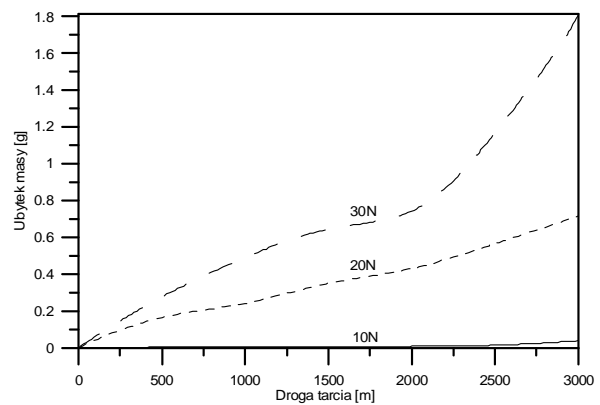
Rys. 9. Zużycie ściernie stopu CuPb30 w zależności od zastosowanego obciążenia

Fig. 9. Abrasive wear of CuPb30 alloy depending on the applied load



Rys. 10. Zużycie ściernie stopu CuPb30 zawierającego 5%  $C_{gr}$  w zależności od zastosowanego obciążenia

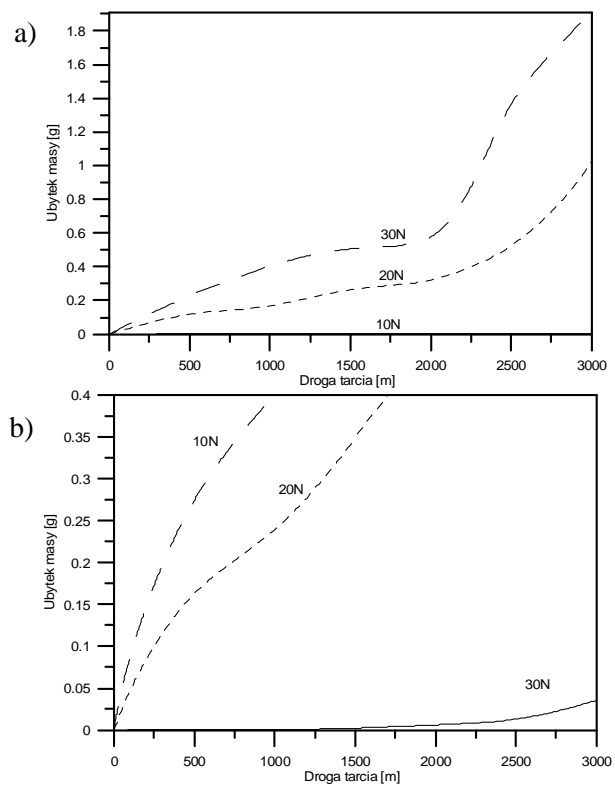
Fig. 10. Abrasive wear of CuPb30 alloy containing 5%  $C_{gr}$  depending on the applied load



Rys. 11. Zużycie ściernie stopu CuPb30 zawierającego 10%  $C_{gr}$  w zależności od zastosowanego obciążenia

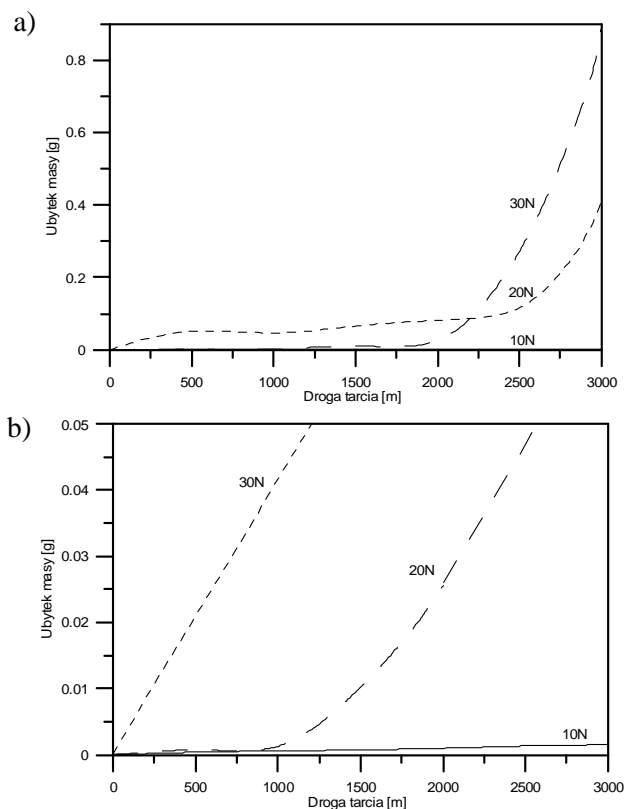
Fig. 11. Abrasive wear of CuPb30 alloy containing 10%  $C_{gr}$  depending on the applied load

Na rysunkach 10-13 pokazano wpływ obciążenia na zużycie ściernie kompozytu zawierającego 5, 10, 15 i 20%  $C_{gr}$ . Największym zużyciem charakteryzują się próbki badane pod obciążeniem 30 N. Zwiększenie obciążenia z 10 do 30 N w przypadku kompozytu zawierającego 5%  $C_{gr}$  spowodowało 13 razy większe zużycie próbki po całym cyklu ścierania, kompozytu zawierającego 10%  $C_{gr}$  spowodowało 50 razy większe zużycie próbki, kompozytu zawierającego 15%  $C_{gr}$  - 480 razy, a kompozytu zawierającego 20%  $C_{gr}$  spowodowało 590 razy większe zużycie próbki.



Rys. 12. Zużycie ściernie stopu CuPb30 zawierającego 15%  $C_{gr}$  w zależności od zastosowanego obciążenia: a) pełny wykres, b) fragment wykresu dla zakresu ubytku masy 0÷0,4 g

Fig. 12. Abrasive wear of CuPb30 alloy containing 15%  $C_{gr}$  depending on the applied load: a) full diagram, b) part of diagram for mass decrement range 0÷0,4 g



Rys. 13. Zużycie ściernie stopu CuPb30 zawierającego 20%  $C_{gr}$  w zależności od zastosowanego obciążenia: a) pełny wykres, b) fragment wykresu dla zakresu ubytku masy  $0 \div 0,05$  g

Fig. 13. Abrasive wear of CuPb30 alloy containing 20%  $C_{gr}$  depending on the applied load: a) full diagram, b) part of diagram for mass decrement range  $0 \div 0,05$  g

## PODSUMOWANIE

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, iż niewielki dodatek cząstek grafitu do stopu CuPb30 wyraźnie poprawia jego odporność na zużycie ściernie. W miarę wzrostu udziału objętościowego cząstek grafitu w kompozycie zużycie ściernie zmniejsza się. We wszystkich przypadkach, niezależnie od zastosowanego obciążenia oraz drogi tarcia, zaobserwowano, iż kompozyt zawierający 20% grafitu charakteryzuje się największą odpornością na zużycie ściernie. Na uzyskanych wykresach tarcia zaobserwować można wyraźną różnicę w przebiegu krzywych tarcia osnowy i kompo-

zytu zbrojonego cząstkami grafitu. Krzywe ścierania kompozytu przedstawiają niewielki wzrost zużycia ściernego w zależności od drogi. W przypadku kompozytów w początkowym etapie ścierania można zaobserwować proces, w którym ubytek masy w zależności od drogi tarcia jest stosunkowo niewielki. Dopiero po przebyciu drogi około 2000 m następuje gwałtowny wzrost zużycia. W przypadku osnowy najbardziej gwałtowne zużycie następuje w początkowej fazie tarcia, po około 500 m. Po przekroczeniu tego odcinka zużycie rośnie już nieznacznie w miarę zwiększania drogi tarcia. Niezależnie od rodzaju kompozytu największe zużycie ściernie zaobserwowano przy największym obciążeniu, tj. 30 N. Wzrost zużycia ściernego następował proporcjonalnie do wzrostu obciążenia. Dodatkową zaletą zbrojenia w postaci grafitu jest to, że dodatek grafitu, którego cząstki mają własności smarujące do stopu CuPb30 powoduje zmniejszenie destrukcyjnego działania kompozytu na współpracujące powierzchnie w procesach tarcia.

## LITERATURA

- [1] Lawrowski Z., Tribologia - tarcie, zużywanie i smarowanie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
- [2] Ślęziona J., Podstawy technologii kompozytów, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
- [3] Nowacki J., Materiały kompozytowe, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1993.
- [4] Łągiewka M., Konopka Z., Zyska A., Balawejder R., Rozmieszczenie cząstek ceramicznych w kompozytach na osnowie stopu AlMg10, Archiwum Odlewnictwa 2006, 6, 18, 273-278.
- [5] Konopka Z., Cisowska-Łągiewka M., Zyska A., Właściwości trybologiczne kompozytu AK9-Pb, VI Międzynarodowa Sesja Naukowa Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej, Częstochowa 2005, 161-164.
- [6] Braszczyńska K.N., Bochenek A., Problemy z korelacją pomiędzy strukturą a własnościami odlewanych kompozytów metalowych umacnianych cząstkami ceramicznymi, Kompozyty (Composites) 2001, 1, 1, 28-31.
- [7] Juszczyk B., Ciura L., Malec W., Czepelak M., Cwolek B., Marchewka Ł., Kształtowanie struktury i właściwości spiekanych materiałów kompozytowych na osnowie miedzi umacnianych dyspersyjnie, Kompozyty (Composites) 2008, 2.