

Beata LESZCZYŃSKA-MADEJ*, Marcin MADEJ**

WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE ALUMINIUM OTRZYMANEGO NA DRODZE KONSOLIDACJI PLASTYCZNEJ PROSZKÓW

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF THE PLASTICALLY CONSOLIDATED ALUMINIUM POWDERS

Słowa kluczowe:

konsolidacja plastyczna, właściwości tribologiczne, aluminium

Key words:

plastic consolidation, tribological properties, aluminium

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości tribologicznych aluminium Al99,7 wytwarzanego na drodze konsolidacji plastycznej szybko krystalizowanych proszków. Uzyskane wyniki odniesiono do litego aluminium w tym samym gatunku. Badanie odporności na zużycie ścierne oraz wyznaczenie współczynnika tarcia przeprowadzono z zastosowaniem testera T-05. Testy

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Metali Nieżelaznych, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: 48 12 617 35 73, e-mail.: bleszcz@agh.edu.pl.

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. 48 12 617 25 86, e-mail.: mmadej@agh.edu.pl.

przewodzący przy ruchu postępowym w styku ślizgowym, w warunkach tarcia technicznie suchego oraz z użyciem środka smarnego (smar OCG 1000) na początku procesu. Zastosowano przeciwpróbkę ze stali łożyskowej 100 Cr6 oraz dla porównania ze stopu 7075.

Uzyskane wyniki wskazują na znacznie większe zużycie materiałów poddanych badaniom w warunkach tarcia technicznie suchego w porównaniu z tarciem z zastosowaniem smaru OCG 1000. Również zastosowanie przeciwpróbki ze stopu 7075 skutkowało większym zużyciem zarówno materiału próbki, jak i przeciwpróbki.

WPROWADZENIE

Tradycyjne metody stosowane od lat do wytwarzania aluminium i jego stopów są niewystarczające w kontekście nowych wymagań stawianych materiałom konstrukcyjnym. Alternatywę stanowić może zastosowanie aluminium bądź jego stopów w postaci szybko krystalizowanych proszków. Różnorodność technik wytwórczych stosowanych w metalurgii proszków daje możliwość sterowania właściwościami gotowych wyrobów, a co za tym idzie osiągnięcie lepszych właściwości użytkowych w porównaniu z materiałami wytwarzanymi metodami tradycyjnymi [L. 1, 2].

Bardzo ważna z punktu widzenia aplikacyjności materiału jest jego odporność na zużycie. Zużycie materiału można ograniczyć przez zastosowanie smaru bądź poprzez modyfikację składu materiału lub jego właściwości, a także poprzez zmianę prędkości węzła tarcia [L. 3, 4].

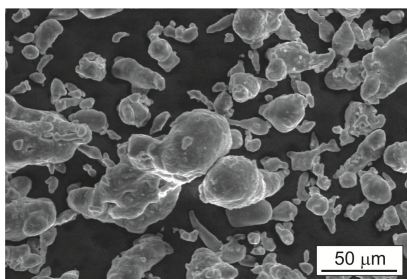
Autorzy pracy [L. 5] badali odporność na ścieranie aluminiowanych taśm i rur stalowych z powłoką Al-Si o zaw. 9–12% Si nakładaną ogniowo w warunkach tarcia suchego oraz z zastosowaniem różnych środków smarnych. Badania prowadzono na testerze T05. Dowiedziono, że dodatek emulsji do wody zmniejsza w dużym stopniu zużycie powłoki. Podobnie wyniki przedstawione w pracach L. 4, 6 i przeprowadzone na testerze „pin on disc” dowodzą znacznie mniejszego zużycia stopów aluminium (Al - Ca 313, Al - Si) i stopów magnezu (AZ 91 i AS 21) w warunkach tarcia z zastosowaniem smaru.

Praca miała na celu określenie właściwości tribologicznych aluminium Al99,7 wytwarzanego przez konsolidację plastyczną różnych rodzajów proszków. Uzyskane wyniki odniesiono do aluminium litego w tym samym gatunku. Testy tribologiczne prowadzono zarówno w warunkach tarcia technicznie suchego, jak i z zastosowaniem smaru OCG 1000 stosowanego w przewodach.

METODY BADAŃ. MATERIAŁ STOSOWANY DO BADAŃ

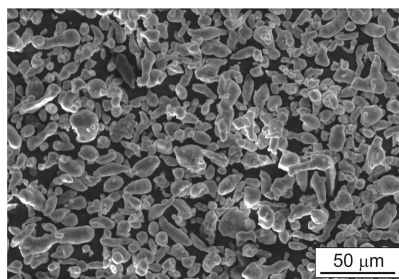
Materiał do badań stanowił proszek aluminium rozpylany argonem (A) oraz mieszanka proszku rozpylanego azotem (N) z dodatkiem 25% płatków aluminiowych po mieleniu w młynie kulowym (M). Czystość proszków wynosiła

99,7% dla aluminium, co odpowiada aluminium w gatunku 1070. Z danych dostarczonych przez producenta proszków wynika, że wyjściowa wielkość cząstek proszku aluminium rozpylanego azotem wynosiła poniżej 32 μm , natomiast rozpylanego argonem poniżej 63 μm . Materiałem referencyjnym było lite aluminium (L) w tym samym gatunku 1070, które jest stosowane na przewody. Morfologię cząstek proszku rozpylanego argonem przedstawiono na **Rys. 1**, z kolei rozpylanego azotem na **Rys. 2**.



Rys. 1. Morfologia cząstek proszku rozpylanego argonem

Fig. 1. Morphology of the argon atomized powders



Rys. 2. Morfologia cząstek proszku rozpylanego azotem

Fig. 2. Morphology of the nitrogen atomized powders

Proszek aluminium rozpylany argonem charakteryzuje się kształtem globularnym oraz w miarę gładką powierzchnią, natomiast proszek rozpylany azotem można opisać jako kształt pośredni między globularnym a płatkowym, cząstki proszku również mają gładką powierzchnię.

KONSOLIDACJA PLASTYCZNA

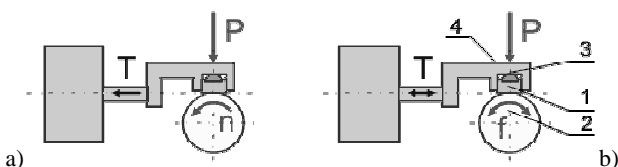
Proszki poddano wstępnemu zagęszczeniu na prasie hydraulicznej o nacisku 30 ton. W wyniku tej operacji otrzymano wypraski o średnicy $D = 38,5$ mm oraz o długości $L = 25 - 35$ mm. Kolejno wypraski wyciskano współbieżnie na poziomej prasie hydraulicznej ze stożkową matrycą, uzyskując końcową średnicę 10 mm. Przed procesem wyciskania wsad wygrzewano w temperaturze 300°C przez 20 minut. Proces wyciskania realizowano ze stałą prędkością wynosząca 0,5 mm/s w temperaturze 375°C. Szczegółowy opis konsolidacji plastycznej wyżej opisanych proszków można znaleźć w pracy [L. 7]. Proces wytwarzania polegający na prasowaniu i kolejno wyciskaniu powoduje deformację kształtu cząstek aluminium, cząstki są wydłużone w kierunku wyciskania, co widoczne jest na **Rys. 15**.

W dalszej części pracy dla przejrzystości prezentowanych wyników używane będą oznaczenia próbek: **L10**, **M10** i **A10** dla opisanego kolejno próbek wyciskanych na średnicę 10 mm z: litego aluminium, mieszanki proszków, proszków rozpylanych argonem.

BADANIE ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIE ŚCIERNE

Badanie odporności na zużycie ścierne oraz wyznaczenie współczynnika tarcia przeprowadzono na próbkach o wymiarach 20 x 5 x 5 mm. Badanie było prowadzone z zastosowaniem testera T-05. Tester T-05 pozwala na przeprowadzanie badań zgodnie z metodami określonymi w normach amerykańskich: ASTM D 2714, D 3704, D 2981 i G 77. Zasadę działania testera T-05 przedstawiono na **Rys. 3**.

Samonastawne zamocowanie klocka (1), które stanowi uchwyt próbki (4) oraz wkładka półkulista (3) zapewniają dobre przyleganie klocka do rolki (2) i równomierne rozłożenie nacisków w styku. Rolka może poruszać się ze stałą prędkością obrotową n (**Rys. 3 a**) lub ruchem oscylacyjnym z częstotliwością f (**Rys. 3 b**).



Rys. 3. Zasada działania testera T-05: w ruchu obrotowym, b) w ruchu oscylacyjnym

Fig. 3. Tribosystem T05; a) at the rotating ring, b) at the oscillating ring

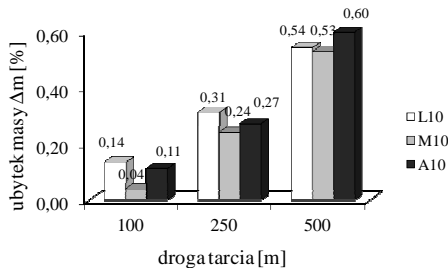
Badanie było prowadzone przy ruchu postępowym w styku ślizgowym, przy użyciu środka smarnego (smar OCG 1000) na początku procesu oraz w warunkach tarcia technicznie suchego. Smar OCG 1000 jest stosowany w przewodach linii energetycznych. Przeciwpółka była wykonana ze stali 100 Cr6, obrobiona cieplnie, obroty wrzeciona wynosiły 60 obr./min, a nacisk 50 N. Na podstawie wcześniejszych doświadczeń testy przeprowadzono na następujących drogach tarcia: 100 m, 250 m oraz 500 m. Dla celów porównawczych przeprowadzono badanie właściwości tribologicznych w zestawieniu z przeciwpółką ze stopu 7075. Badanie prowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego na drodze tarcia 100 m. Środek smarny OCG 1000 stosowano do smarowania węzła tarcia przed rozpoczęciem testu. W czasie testu tribologicznego nie stosowano dodatkowego smarowania.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Uzyskane wyniki badań przedstawiono graficznie na **Rys. 4–9**. Wyniki badań wskazują na znacznie większe zużycie materiałów poddanych badaniom w warunkach tarcia suchego w porównaniu z tarciem z zastosowaniem smaru OCG 1000.

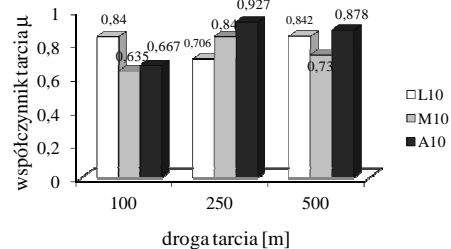
Miarą odporności na ścieranie jest względny ubytek masy badanych materiałów w odniesieniu do drogi tarcia i zastosowanego obciążenia. W próbkach

z litego aluminium wydłużenie drogi tarcia ze 100 m do 250 m powoduje ponad 2-krotne zwiększenie ubytku masy w przypadku tarcia w warunkach na sucho. Na drodze 500 m wartości ubytku masy są zbliżone dla próbek L10 i M10 i wynoszą około 0,54% (**Rys. 4**). W kształtkach wykonanych na drodze konsolidacji plastycznej mieszanki proszków zastosowanie smaru spowodowało czterokrotne obniżenie ubytku masy na drodze tarcia 250 m i 500 m (**Rys. 6**). Nieznacznie większe wartości ubytku masy zaobserwowano w próbkach wytworzonych na drodze konsolidacji plastycznej proszku rozpylanego argonem. W kształtkach tych również zastosowanie smaru OCG 1000 zgodnie z oczekiwaniem spowodowało znaczne obniżenie ubytku masy (**Rys. 6**). We wszystkich przypadkach wydłużenie drogi tarcia powodowało zwiększenie ubytku masy.



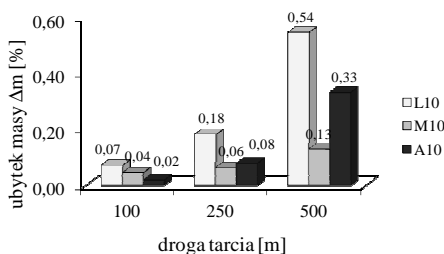
Rys. 4. Ubytek masy w zależności od drogi tarcia w warunkach tarcia technicznie suchego, przeciwpróbka 100 Cr6

Fig. 4. Loss of sample mass; dry friction, rotating ring 100 Cr6



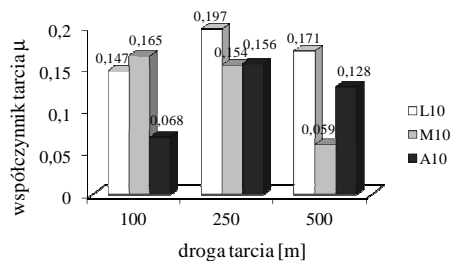
Rys. 5. Współczynnik tarcia w zależności od drogi w warunkach tarcia technicznie suchego, przeciwpróbka 100 Cr6

Fig. 5. Coefficient of friction; dry friction, rotating ring 100 Cr6



Rys. 6. Ubytek masy w zależności od drogi tarcia w warunkach zastosowania smaru na początku procesu, przeciwpróbka 100 Cr6, smar OCG 1000

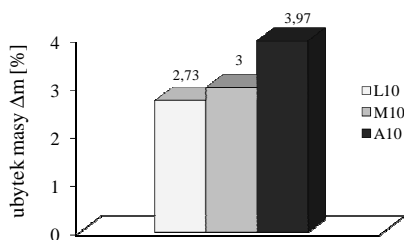
Fig. 6. Loss of sample mass; application of the fluid at the beginning of the process, rotating ring 100 Cr6, OCG 1000 lubricant



Rys. 7. Współczynnik tarcia w zależności od drogi w warunkach zastosowania smaru na początku procesu, przeciwpróbka 100 Cr6, smar OCG 1000

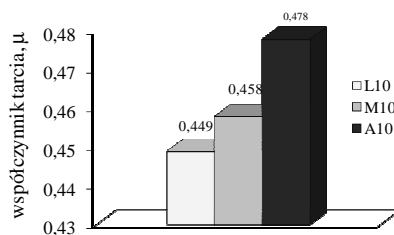
Fig. 7. Coefficient of friction; application of the fluid at the beginning of the process, rotating ring 100 Cr6, OCG 1000 lubricant

Wyznaczone wartości współczynnika tarcia μ dla wszystkich próbek w warunkach tarcia technicznie suchego są wysokie i mieszczą się w zakresie 0,635–0,927. Tak wysokie wartości współczynnika tarcia świadczą o występowaniu złożonych mechanizmów tarcia, w tym zjawiska adhezji oraz pękania. Zastosowanie smaru OCG 1000 spowodowało znaczne obniżenie wartości współczynnika tarcia. Wyznaczone wartości współczynnika tarcia μ dla wszystkich próbek w warunkach tarcia z stosowaniem smaru mieszczą się w zakresie 0,059–0,197. Największe wartości współczynnika tarcia posiadała próbka z litego aluminium – $\mu = 0,147 - 0,197$. W większości przypadków zwiększenie drogi tarcia nie skutkowało znacznymi zmianami wartości współczynnika tarcia (**Rys. 5, 7**). Zaobserwowano także, że zastosowanie smaru w początkowym etapie testu powoduje brak mierzalnego zużycia się materiału przeciwpróbki, co miało miejsce w warunkach tarcia technicznie suchego, nie zauważono jednak istotnego wpływu wydłużenia drogi tarcia w warunkach tarcia z zastosowaniem smaru na analizowane parametry. Badanie właściwości tribologicznych próbek w warunkach tarcia suchego z zastosowaniem przeciwpróbki wykonanej ze stopu 7075 dowiodło znacznie większego zużycia zarówno materiału próbki, jak i przeciwpróbki (**Rys. 8, 9**). Przeciwpróbka w kontakcie z badaną próbką ulegała „mikroskrawaniu”. Materiały te we wzajemnym kontakcie ulegały zacieraniu.



Rys. 8. Ubytek masy w zależności od drogi w warunkach tarcia technicznie suchego, przeciwpróbka 7075, droga tarcia 100 m

Fig. 6. Loss of sample mass; dry friction, rotating ring 7075, sliding distance 100 m

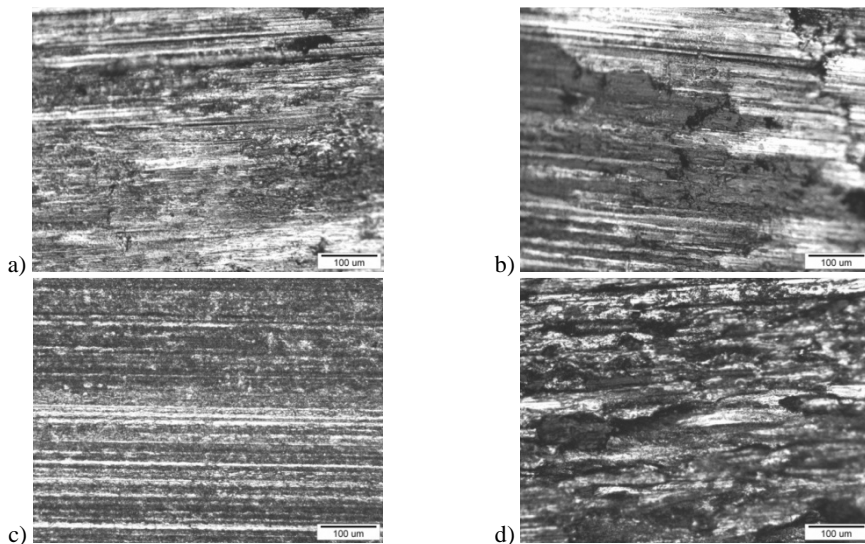


Rys. 9. Współczynnik tarcia w zależności od drogi w warunkach tarcia technicznie suchego, przeciwpróbka 7075, droga tarcia 100 m

Fig. 7. Coefficient of friction; dry friction, rotating ring 7075, sliding distance 100 m

Analiza powierzchni po tarcii kształtek wykonanych przez konsolidację plastyczną proszku rozpylanego argonem A w warunkach tarcia suchego w zestawieniu z przeciwpróbką wykonaną ze stali 100Cr6 wskazuje, że na drodze tarcia 100 m głównym mechanizmem zużycia jest zużycie ścierne, przede wszystkim poprzez mikroskrawanie oraz pęknięcie po granicach ziarn i wykruszenie fragmentów materiału (**Rys. 10a**). Wydłużenie drogi tarcia

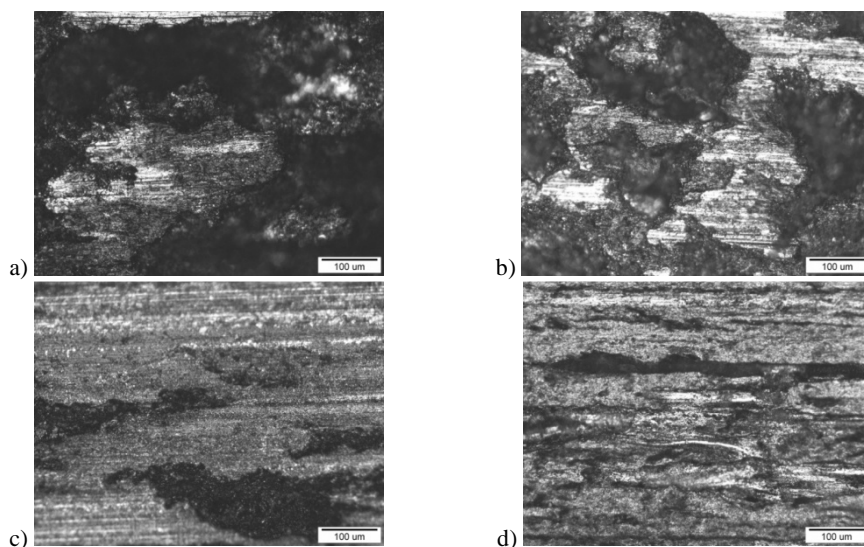
do 250 m nie zmieniło zasadniczo mechanizmu zużycia. Dalsze wydłużenie drogi tarcia do 500 m pozwala zaobserwować mikroobszary, w których lokalnie występuje zużycie adhezyjne. Dominujące jest jednak zużycie ściernie przez mikroskrwanie i rysowanie. Nadal występuje pęknięcie na powierzchni (**Rys. 10b**).



Rys. 10. Powierzchnie po tarcii kształtek wykonanych poprzez konsolidację plastyczną aluminium rozpylanego argonem A, przeciwpróbka 100Cr6; a) droga tarcia 100 m, tarcie technicznie suche, b) droga tarcia 500 m, tarcie technicznie suche, c) droga tarcia 100 m, smar podawany na początku procesu, d) droga tarcia 500 m, smar podawany na początku procesu

Fig. 10. The samples surfaces after tribological tests, powders atomized by argon A, rotating ring 100Cr6; a) sliding distance 100 m, dry friction, b) sliding distance 500 m, dry friction, c) sliding distance 100 m, application of the fluid at the beginning of the process, d) sliding distance 500 m, application of the fluid at the beginning of the process

Zastosowanie smaru OCG 1000 jako środka poślizgowego w zestawieniu: kształtka wykonana z proszku rozpylanego argonem A – przeciwpróbka ze stali 100 Cr6 spowodowało silne ograniczenie wykruszania materiału próbki (**Rys. 10c**). Wydłużenie drogi tarcia do 250 m skutkowało pojawieniem się pierwszych wykruszeń materiału, ale w znacznie mniejszych obszarach niż bez zastosowania smaru, dominującym jest zużycie ściernie. Na drodze tarcia 500 m, w początkowym czasie, podczas działania smaru następuje umocnienie warstwy wierzchniej związane z podatnością aluminium do umacniania pod wpływem działania naprężeń, później w miarę zmniejszania się udziału smaru rośnie udział adhezji w mikroobszarach, ale nie wywołuje to wykruszania dużych fragmentów. Wykruszenia są małe i rozproszone. Ich wielkość i rozproszenie wynika z faktu, że jest to materiał wytworzony z proszku (**Rys. 10d**).



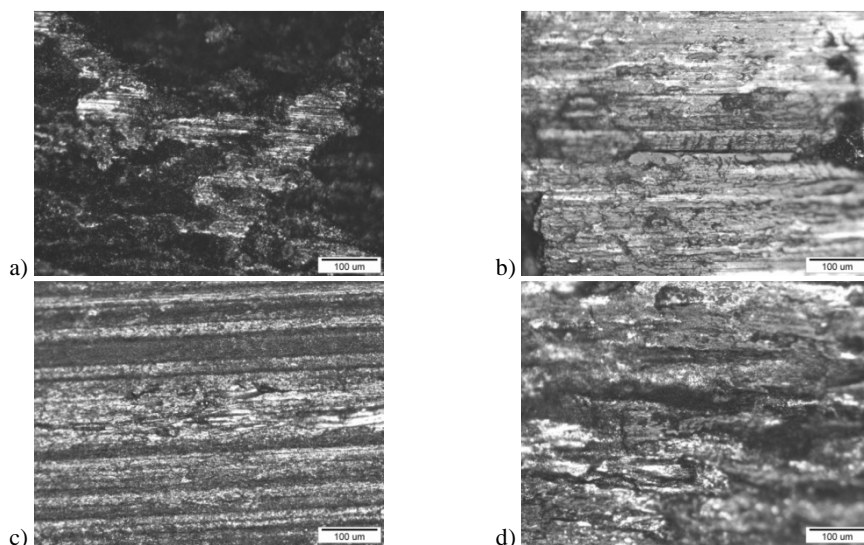
Rys. 11. Powierzchnie po tarciu kształtek wykonanych poprzez konsolidację plastyczną mieszanki proszków M, przeciwpróbka 100Cr6; a) droga tarcia 100 m, tarcie technicznie suche, b) droga tarcia 500 m, tarcie technicznie suche, c) droga tarcia 100 m, smar podawany na początku procesu, d) droga tarcia 500 m, smar podawany na początku procesu

Fig. 11. The samples surfaces after tribological tests, powders mixture M, rotating ring 100Cr6; a) sliding distance 100 m, dry friction, b) sliding distance 500 m, dry friction, c) sliding distance 100 m, application of the fluid at the beginning of the process, d) sliding distance 500 m, application of the fluid at the beginning of the process

Obserwacja powierzchni po tarciu kształtek wykonanych poprzez konsolidację plastyczną mieszanki proszków M w warunkach tarcia suchego w zestawieniu z przeciwpróbką wykonaną ze stali 100 Cr6 wskazuje, że na drodze 100 m następuje zużycie poprzez wykruszanie i przemieszczanie dużych fragmentów materiału. Część materiału po przemieszczeniu zostaje na powierzchni tarcia, wtedy ulega zużyciu wskutek mechanizmu ściernego (**Rys. 11a**). Ze zwiększeniem drogi tarcia (czasu kontaktu próbka – przeciwpróbka) pozostaje więcej wykruszonego materiału. Jego zużycie zachodzi wskutek mechanizmu ściernego poprzez rysowanie i mikroskrabanie. Na drodze tarcia 500 m nastąpiła stabilizacja wykruszania się materiału, materiał pozostały na powierzchni ulega zużyciu ściernemu (**Rys. 11b**).

W warunkach tarcia płynnego charakterystyczne jest pojawienie się wykruszeń wzdłuż kierunku tarcia, ich ilość zwiększa się z wydłużeniem drogi tarcia (czasu kontaktu próbka – przeciwpróbka) (**Rys. 11 c, d**). Wykruszone cząstki biorą udział w tarcu – zużycie abrazyjne, ubywa smaru, w mikroobszarach następuje zużycie adhezyjne (**Rys. 11d**). Dodatkowym elementem jest duży udział cząstek Al_2O_3 w materiale. Proszki aluminium pokrywają się warstwą Al_2O_3 grubości 50 – 150 Å już na etapie wytwarzania. Podczas deformacji ule-

gają rozkruszeniu i rozmieszczeniu zarówno wewnątrz ziaren, jak i po granicach. Wyniki dowodzące występowania cząstek Al_2O_3 przedstawiono w pracy autora dotyczącej kompozytów aluminiowych [L. 8].

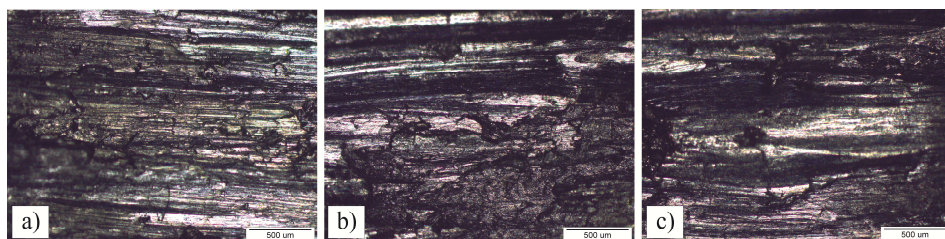


Rys. 12. Powierzchnie po tarcii próbek z litego aluminium L, przeciwpróbką 100Cr6; a) droga tarcia 100 m, tarcie technicznie suche, b) droga tarcia 500 m, tarcie technicznie suche, c) droga tarcia 100 m, smar podawany na początku procesu, d) droga tarcia 500 m, smar podawany na początku procesu

Fig. 12. The samples surfaces after tribological tests, solid aluminium L, rotating ring 100Cr6; a) sliding distance 100 m, dry friction, b) sliding distance 500 m, dry friction, c) sliding distance 100 m, application of the fluid at the beginning of the process, d) sliding distance 500 m, application of the fluid at the beginning of the process

Analiza powierzchni po tarcii litego aluminium L w warunkach tarcia technicznie suchego w kontakcie z przeciwpróbką wykonaną ze stali 100 Cr6 wskazuje, że na drodze tarcia 100 m mechanizm zużycia jest zbliżony do kształtki wykonanej poprzez konsolidację plastyczną proszku rozpylanego argonem A. Jednak w przypadku litego aluminium umocnienie warstwy wierzchniej jest większe niż kształtki A, przez co widoczne są wykruszenia, wręcz wyrwania dużych fragmentów materiału (**Rys. 12a**). Wydłużenie drogi tarcia nie spowodowało zmiany mechanizmu zużycia (**Rys. 12b**). W warunkach tarcia ze smarem dostarczonym w początkowym stadium testu dominującym mechanizmem zużycia w litym aluminium jest zużycie ścierne (**Rys. 12c, d**). Wydłużenie drogi tarcia skutkowało pojawieniem się dużych, skoncentrowanych wykruszeń (**Rys. 12d**). Ten efekt odróżnia lite aluminium od materiałów wytworzonych poprzez konsolidację plastyczną proszków.

Dla celów porównawczych przeprowadzono badanie właściwości tribologicznych w zestawieniu z przeciwpróbką ze stopu 7075. Badanie prowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego na drodze tarcia 100 m. Powierzchnie próbek po tarceniu w takich warunkach przedstawiono na **Rys. 13a, b, c**.



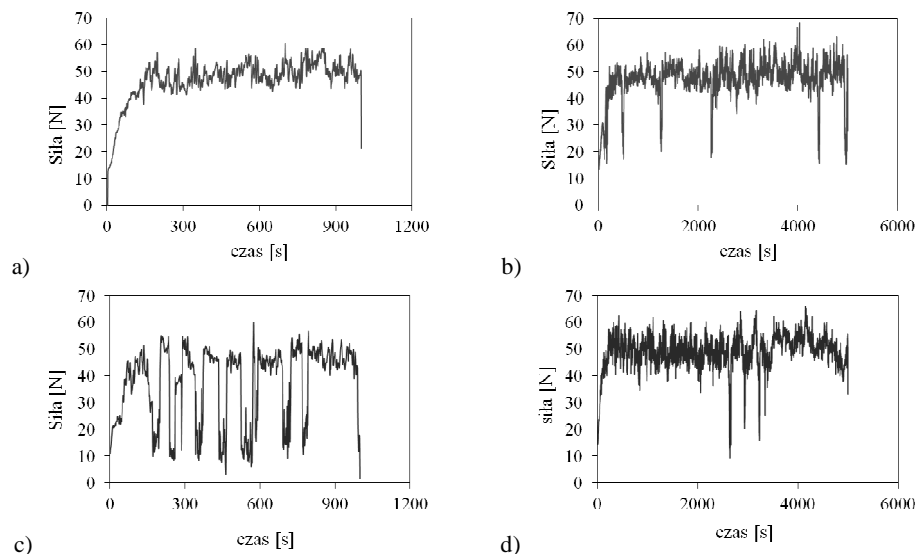
Rys. 13. Powierzchnie próbek po tarceniu, tarcie technicznie suche, przeciwpróbka 7075, droga tarcia 100 m: a) kształtki wykonane poprzez konsolidację plastyczną proszku rozpylanego argonem A, b) kształtki wykonane poprzez konsolidację plastyczną mieszanki proszku M, c) aluminium lite L

Fig. 13. The samples surfaces after tribological tests, rotating ring 7075, sliding distance 100 m, dry friction: a) powders atomized by argon A, b) powders mixture M, c) solid aluminium L

W zestawieniu z przeciwpróbką wykonaną ze stopu 7075 w kształtkach powstałych w wyniku konsolidacji plastycznej proszku rozpylanego argonem A dominującym mechanizmem jest zużycie ściernie z udziałem rysowania, równie charakterystyczne są obserwowane pęknięcia, które lokalizują się poprzecznie do kierunku tarcia. W wyniku umocnienia materiał staje się bardziej kruchy – następuje jego wykruszanie (**Rys. 13a**). W odniesieniu do kształtek powstałych przez konsolidację plastyczną proszku rozpylanego argonem A w litym aluminium w kontakcie z przeciwpróbką wykonaną ze stopu 7075 widoczny jest bardziej adhezyjny mechanizm zużycia. Charakterystyczna jest również znacznie mniejsza liczba pęknięć poprzecznych do kierunku tarcia (**Rys. 13c**). W kształtkach wykonanych z mieszanki proszków widoczny jest większy udział zużycia adhezyjnego przy niewielkim udziale pęknięć poprzecznych (**Rys. 13b**).

Na **Rys. 14, 16** oraz **17** przedstawiono wykresy obrazujące zależność siły tarcia od czasu dla wybranych materiałów na drodze tarcia 100 m i 500 m. **Rysunki 14 i 16** obrazują przebieg siły tarcia w kontakcie z przeciwpróbką wykonaną ze stali 100 Cr6, z kolei **Rys. 17** w zestawieniu z przeciwpróbką z 7075 w warunkach tarcia na sucho.

Wykresy obrazujące przebieg tarcia w warunkach na sucho charakteryzują się licznymi wahaniami na krzywej przebiegu siły tarcia (**Rys. 14**). Maksymalna wartość siły dochodzi do 70 N. Wahaniami siły obserwowane dla kształtek powstałych przez konsolidację plastyczną proszku rozpylanego argonem A mogą

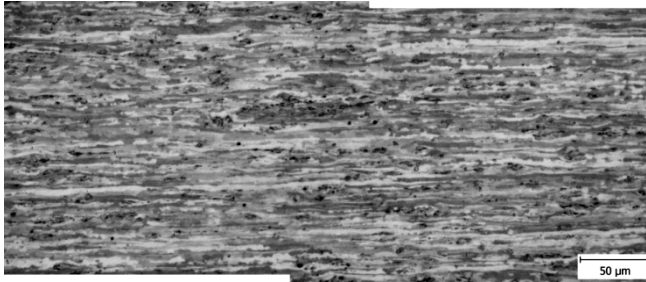


Rys. 14. Zależność siły tarcia od czasu testu; przeciwność ze stali 100Cr6, tarcie technicznie suche: a) lite aluminium L, droga tarcia 100 m, b) lite aluminium L, droga tarcia 500 m, c) kształtki wykonane na drodze konsolidacji plastycznej proszku rozpylanego argonem A, droga tarcia 100 m, d) kształtki wykonane na drodze konsolidacji plastycznej proszku rozpylanego argonem A, droga tarcia 500 m

Fig. 14. Sliding distance – friction force relation; rotating ring 100Cr6, dry friction: a) solid aluminium L, sliding distance 100 m, b) solid aluminium L, sliding distance 500 m, c) powders atomized by argon A, sliding distance 100 m, d) powders atomized by argon A, sliding distance 500 m

być związane z wrywaniem części materiału, np. tlenków Al_2O_3 obecnych w materiale (**Rys. 15**). Wydłużenie drogi tarcia w litym aluminium skutkowało pojawieniem się pików na wykresie, co również może być związane z wykruszaniem części materiału, który wcześniej został umocniony.

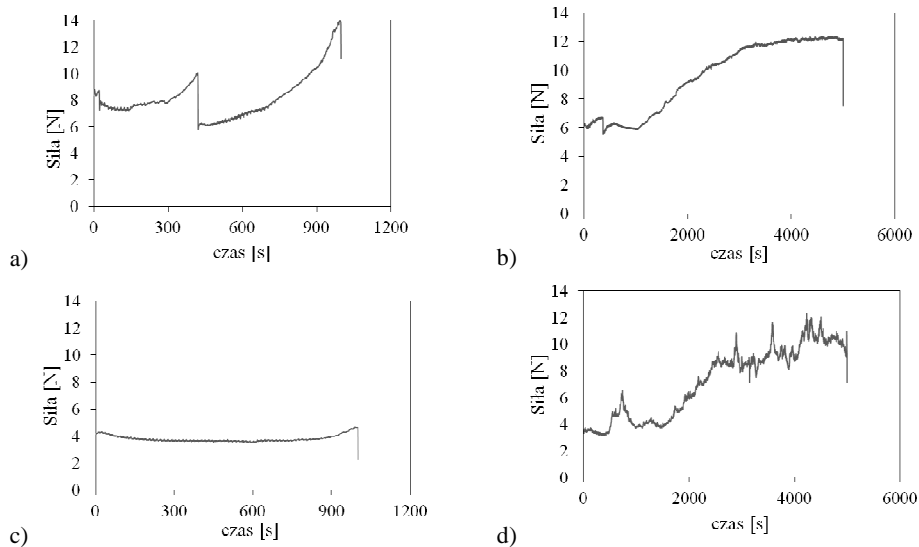
Krzywe obrazujące przebieg siły tarcia z zastosowaniem w początkowym stadium testu smaru OCG 1000 mają bardziej łagodny przebieg aniżeli w przypadku tarcia w warunkach na sucho (**Rys. 16**). Maksymalna wartość siły tarcia nie przekracza 14 N. Obecne na wykresach obrazujących przebieg siły w funkcji czasu dla tarcia z udziałem smaru maksima związane są najprawdopodobniej z ustalaniem się warunków tarcia. Smar OCG 1000 ma „stałą” konsystencję i dopiero po jego równomiernym rozłożeniu na powierzchni próbki następuje ustalenie się procesu. Smar OCG 1000 podawano na początku testu do węzła tarcia. W warunkach tarcia technicznie suchego, gdy nie jest obecny film smaru pomiędzy próbką i przeciwnością, zużycie materiału jest duże.



Rys. 15. Mikrostruktura kształtki otrzymanej w wyniku konsolidacji plastycznej proszku aluminium rozpylanego argonem A

Fig. 15. Microstructure of the sample obtain in the process of plastic consolidation powders atomized by argon A

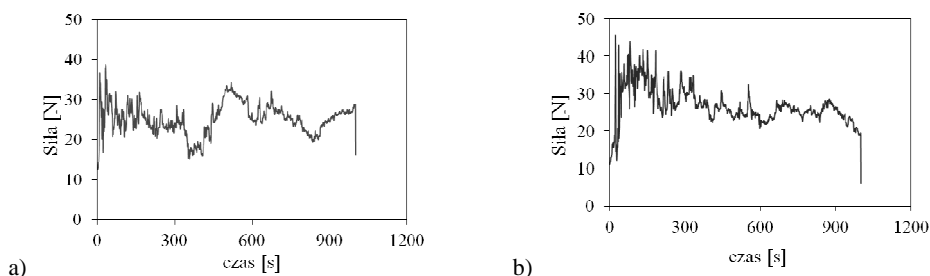
Zastosowanie smaru OCG 1000 znacznie ograniczyło zużycie materiału, nie następuje wykruszanie dużych jego części, jak miało to miejsce w warunkach tarcia suchego. Potwierdzeniem tego są powierzchnie po tarcii przedstawione na **Rys. 10 i 12**.



Rys. 16. Zależność siły tarcia od czasu testu; przeciwpróbka ze stali 100Cr6, smar podawany na początku procesu (smar OCG 1000): a) lite aluminium L, droga tarcia 100 m, b) lite aluminium L, droga tarcia 500 m, c) kształtki wykonane na drodze konsolidacji plastycznej proszku rozpylanego argonem A, droga tarcia 100 m, d) kształtki wykonane na drodze konsolidacji plastycznej proszku rozpylanego argonem A, droga tarcia 500 m

Fig. 16. Sliding distance – friction force relation; rotating ring 100Cr6, application of the fluid at the beginning of the process: a) solid aluminium L, sliding distance 100 m, b) solid aluminium L, sliding distance 500 m, c) powders atomized by argon A, sliding distance 100 m, d) powders atomized by argon A, sliding distance 500 m

Krzywe obrazujące przebieg siły tarcia dla tych samych materiałów, ale w zestawieniu z przeciwpróbką ze stopu 7075 mają odmienny charakter (**Rys. 17**). Widoczne są liczne maksima, maksymalna wartość siły nie przekracza 45 N. W takim skojarzeniu materiałów następowało zużycie zarówno materiału próbki, jak i przeciwpróbki. Obecne maksima mogą być związane z adhezyjnym charakterem zużycia. W kształtce wykonanej przez konsolidację plastyczną proszku rozpylanego argonem A w miarę trwania procesu następuje obniżanie poziomu siły (**Rys. 17b**).



Rys. 17. Zależność siły tarcia od czasu testu; przeciwpróbka ze stopu 7075, tarcie technicznie suche: a) lite aluminium L, droga tarcia 100 m, b) kształtki wykonane na drodze konsolidacji plastycznej proszku rozpylanego argonem A, droga tarcia 100 m

Fig. 17. Sliding distance – friction force relation; rotating ring 7075, dry friction: a) solid aluminium L, sliding distance 100 m, b) powders atomized by argon A, sliding distance 100 m

PODSUMOWANIE

1. W przypadku litego aluminium uzyskane wyniki ubytku masy na drodze tarcia 100 m i 250 m są niemal 2-krotnie wyższe w przypadku tarcia w warunkach na sucho w porównaniu z tarciem płynnym. Na drodze 500 m wartości względnego ubytku masy są jednakowe i wynoszą $\Delta m = 0,54\%$.
2. Wyznaczone wartości współczynnika tarcia μ dla wszystkich próbek w warunkach tarcia na sucho są wysokie i mieszczą się w zakresie 0,635–0,927.
3. Wyznaczone wartości współczynnika tarcia μ dla wszystkich próbek w warunkach tarcia płynnego mieszczą się w zakresie 0,059–0,197. Największe wartości współczynnika tarcia posiadała próbka z litego aluminium – $\mu = 0,147 - 0,197$. W większości przypadków wydłużenie drogi tarcia nie skutkowało znacznymi zmianami wartości współczynnika tarcia.
4. Badanie właściwości tribologicznych próbek w warunkach tarcia suchego z zastosowaniem przeciwpróbki wykonanej ze stopu 7075 dowiodło znacznie większego zużycia zarówno materiału próbki, jak i przeciwpróbki w porównaniu z zestawieniem z przeciwpróbką wykonaną ze stali 100 Cr6. Do-

minującym mechanizmem jest zużycie ściernie z udziałem rysowania, równie charakterystyczne są obserwowane pęknięcia lokalizujące się poprzecznie do kierunku tarcia.

Podziękowania

Autorzy pragną serdecznie podziękować Panu prof. dr. hab. inż. Henrykowi Dybcowi z Wydziału Metali Nieżelaznych AGH za pomoc w realizacji badań i dyskusje oraz dr. inż. Januszowi Krawczykowi z Wydziału Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej AGH za dyskusje nad wynikami badań tribologicznych.

LITERATURA

1. Dybiec H.: Plastic consolidation of metallic powders, Archives of Metallurgy and Materials, 52/2, 2007, 161.
2. Dybiec H.: Submikrostrukturalne stopy aluminium, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2008.
3. Hebda M., Wachal A.: Trybologia, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980.
4. Mehta D.S., Masood S.H., Song W.Q.: Investigation of wear properties of magnesium and aluminium alloys for Automotive applications, Journal of Materials Processing Technology 155–156, 2004, s. 1526–1531.
5. Żaba K., Madej M.: Selected problems of abrasion resistance of aluminized steel tubes, Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 56, 2011, Nr 4, s. 859–869.
6. Dybiec H., Motyka M.: Influence of grain refining on abrasive wear of submicrocrystalline Al – Si alloys, Materials Science Forum, Vol. 674, 2011, s. 97–103.
7. Dybiec H.: Wpływ parametrów proszku z aluminium przewodowego na proces konsolidacji plastycznej, Polska metalurgia w latach 2006–2010, 2010, s. 217–225.
8. Leszczyńska-Madej B.: The effect of sintering temperature on microstructure and properties of Al – SiC composites, Archives of Metallurgy and Materials (artykuł przyjęty do druku).

Summary

The results of the tribological tests performed on the aluminium (1070 grade) produced by rapid solidification and plastic consolidation powders are presented in the article. The results were compared to solid aluminium in the same composition. The samples were subjected to wear tests performed by a block-on-ring wear tester. Tests were performed in the conditions of dry tests and with the application of the lubricant (OCG 1000) at the beginning of the process. Results indicate a considerable increase in the wear of the materials in the condition of dry friction in comparison to the friction with the application of the fluid at the beginning of the process. Applying 7075 alloy as a rotating ring affects the abrasive wear of both the sample and rotating ring.