

## CHARAKTERYSTYKA TRIBOLOGICZNA STOPÓW MAGNEZU STOSOWANYCH W ŚRODKACH TRANSPORTU

### Streszczenie

Znajomość charakterystyk tribologicznych par materiałów ze sobą współpracujących, przydaje się przy ich doborze na ważne elementy środków transportu oraz w procesie kształtowania na drodze obróbki plastycznej. Artykuł dotyczy analizy charakterystyki zużycia tribologicznego ball-on-disc stopów magnezu Mg-Al-Zn wykorzystywanych w budowie różnych środków transportu. Testy tribologiczne prowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego dla pary stop magnezu–stal 100Cr6. Badano twardość stopów, współczynnik zużycia i współczynnik tarcia, a ślady zużycia poddano obserwacjom SEM. Ocenę istotności zmian współczynnika zużycia przeprowadzono testem t-Studenta.

### WSTĘP

W budowie środków transportu bardzo istotną rolę odgrywa ograniczenie masy gotowego produktu przede wszystkim w przemyśle lotniczym ale coraz częściej również w budowie pojazdów, dlatego nie dziwi tak ogromne obecnie zainteresowanie lekkimi i wytrzymałymi materiałami konstrukcyjnymi. Podejmowane są próby wykorzystania materiałów takich jak: stopy aluminium, stopy magnezu i tytanu, kompozyty oraz wysokowytrzymałe rodzaje stali AHSS (ang. Advanced High-Strength Steels) [12], w tym stal martenzytyczną MSS (ang. Martensitic Stainless Steels) [5]. Łączenie różnych materiałów konstrukcyjnych pozwoli na zachowanie wytrzymałości konstrukcji oraz obniżenie masy pojazdu i redukcję emisji CO<sub>2</sub>. Zgodnie z wytycznymi UE do roku 2020 emisja CO<sub>2</sub> ma zostać ograniczona do 95 g/km, a do roku 2025 do 75 g/km [3].

Historia zastosowania stopów magnezu w budowie środków transportu długa. Pierwsze seryjnie produkowane pojazdy zawierające elementy ze stopów magnezu (obudowy silnika) to londyńskie autobusy firmy Leyland, które powstały już w latach 30. XX w. W 1962 r. całkowita waga elementów wykonanych z magnezu w popularnym garbusie osiągnęła wartość około 17 kg, a były to: karter, obudowa skrzyni biegów, różnego rodzaju pokrywy i ramię prądnicy [8]. Najbardziej wartościową cechą stopów magnezu jest ich bardzo mała gęstość – około 0,0018 kg/m<sup>3</sup>, najniższa z wszystkich znanych stopów technicznych, co pozwala na znaczne obniżenie masy pojazdów [8]. Do jednych z nowszych gatunków stopów należą te z dodatkiem strontu (Mg-Al-Sr) opracowane przez firmę Falconbridge wspólnie z firmą BMW AG, o symbolach AJ52 i AJ62 [10, 14]. Obecnie ze stopów magnezu wykonywane są takie elementy jak [3]:

- ramy foteli (stopy grupy AZ (Mg-Al-Zn)),
- obudowy skrzyni biegów, pokrywy silnika (stopy grupy AZ (Mg-Al-Zn)),
- blok silnika,
- przewody dolotowe silnika,
- miski olejowe silnika,
- panele czołowe,
- wewnętrzne elementy deski rozdzielczej (stopy z grupy AM (Mg-Al-Mn)),
- konstrukcja kierownic i kolumny,
- felgi (np. stop EN-MCMgAl6Mn).

Pomimo rosnącego zainteresowania stopami magnezu istnieje bardzo mało danych dotyczących właściwości tribologicznych tych lekkich stopów. Choć stopy magnezu nie są stosowane potencjalnie jako elementy łożysk, uszczelnień czy przekładni mechanicznych, to istnieją w technice sytuacje, w których ich powierzchnia może stykać się z innymi materiałami i przez to narażone są na mechaniczne oddziaływanie poprzez tarcie, a w efekcie zużycie. Ponadto zagażenie tarcia występujące podczas współpracy elementów części maszyn pracujących w układzie ślizgowo-ciernym są ważnym zjawiskiem, mającym miejsce w procesie kształtowania stopów magnezu poprzez obróbkę plastyczną m. in. walcowanie, kucie itp. [1, 2]. Zużycie ściernie materiałów zależy nie tylko od właściwości mechanicznych i strukturalnych stosowanych materiałów ale również od techniki i warunków badania. Dlatego też, celem pracy była charakterystyka tribologiczna stopów magnezu Mg-Al-Zn stosowanych na współczesne konstrukcje środków transportu przy użyciu testera ball-on-disc.

### 1. METODYKA BADAŃ

Do badań użyto dwóch stopów magnezu (typu Mg-Al-Zn) AZ31 i AZ61, których głównym dodatkiem stopowym jest aluminium. Próbkę w kształcie krążków o średnicy  $\varnothing$  30 mm i grubości 4 mm podano szlifowaniu na wodnych papierach ściernych o ziarnistości odpowiednio 220, 600 i 1200. Następnie próbki polerowano mechanicznie przy użyciu zawiesziny diamentowej 3  $\mu$ m i zawiesziny tlenków 0,05  $\mu$ m, a po zakończeniu polerowania przemywano je acetonem i suszono.

Testy zużycia zrealizowano na tribotesterze typu „ball-on-disc” firmy CSM Instruments, w temperaturze pokojowej w warunkach tarcia technicznie suchego. Jako przeciwpróbki (ball) użyto kulek o średnicy 6 mm wykonanych ze stali 100Cr6 (CSM Instruments). Badania realizowano pod obciążeniem 5N z prędkością liniową  $1,26 \times 10^{-2}$  m/s na promieniu 4 mm. Całkowita droga testu wynosiła 100 m, podczas której rejestrowano zmianę współczynnika tarcia. 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 10 miejscach) mierzono pole profilu wytarcia próbki. Promień zaokrąglenia igły pomiarowej wynosił 2  $\mu$ m. 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:

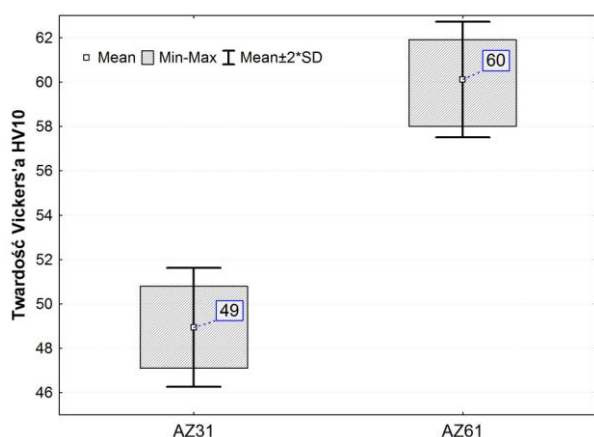
$$K = \frac{\text{Zużycie objętościowe}}{\text{Siła obciążająca} \times \text{droga testu (dystans)}} \quad [\text{mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}] \quad (1)$$

Powierzchnię torów zużycia badanych materiałów po przeprowadzonych testach tribologicznych oceniano przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego Phenom G2 pro (Phenom Word). Natomiast twardość badanych materiałów mierzono przy obciążeniu 98,07 N na twardościomierzu Vickers'a FV-700 z automatycznym systemem ARS 900 firmy Future-Tech Corp., dla których wykonano po 10 pomiarów dla każdej z próbek.

## 2. REZULTATY BADAŃ

Na rysunku 1 przedstawiono porównanie wyników twardości badanych stopów magnezu. Porównanie to wykazało, że gatunek AZ31 posiada mniejszą twardość (ok. 49 HV10) niż stop AZ61 (ok. 60 HV10), co wynika z różnej zawartości głównych dodatków stopowych w badanych próbkach. Przede wszystkim aluminium ma korzystny wpływ na wzrost właściwości mechanicznych stopu magnezu. Stop AZ61 charakteryzuje się wyższą zawartością aluminium ok. 5,7-8,2% niż stop AZ31 ok. 2,5-3,5% [9]. Za umocnienie stopu magnezu głównie odpowiadają wydzielenia fazy  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  [6]. Dodatkowo najwyższą wytrzymałość  $R_m$  uzyskuje się po wprowadzeniu do stopu ok. 5% Al, a maksymalne wydłużenie przy zawartości ok. 6% Al [13]. Drugim co do wielkości dodatkiem stopowym, który powoduje m. in. podwyższenie twardości jest cynk.

Sprawdzanie istotności zmian pomiarów twardości wykonano programem STATISTICA. Badanie normalności rozkładu zmiennych wykonano testem Shapiro-Wilka. Analiza twardości stopów AZ31 i AZ61 wykazała rozkład normalny badanej cechy dla obu stopów  $p > 0,05$  (przy założeniu poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ ) odpowiednio  $p = 0,3799$  oraz  $p = 0,7686$ . Zastosowany test istotności t-Studenta (dla  $\alpha = 0,05$ ) wykazał, że różnice w twardości pomiędzy badanymi stopami są istotne statystycznie ( $p < 0,05$ ).



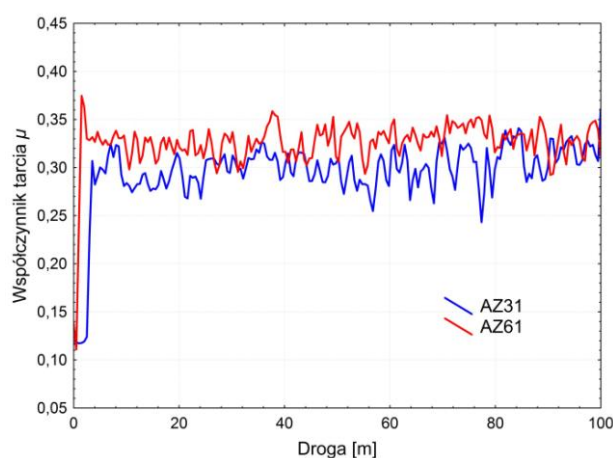
Rys. 1. Zestawienie wyników pomiaru twardości

W tabeli 1 zamieszczono wartości zarejestrowanych współczynników tarcia, a interpretację graficzną w funkcji drogi przedstawiono na rysunku 2. Analiza porównawcza współczynników tarcia wykazała, że najniższy współczynnik tarcia ( $\mu = 0,296$ ) odnotowano dla pary AZ31 – stal 100Cr6. Przy czym dla tej pary uzyskano największe odchylenie standardowe  $\pm 0,043$ . Natomiast największy współczynnik tarcia uzyskano dla pary stop AZ61 – stal 100Cr6. Generalnie niższy współczynnik tarcia odpowiada materiałowi o mniejszej twardości (patrz rysunek 1), taka sytuacja w przypadku

tarcia technicznie suchego materiałów bardzo plastycznych związana jest z występowaniem zjawiska „smarowania warstwą wierzchnią”. Z przebiegu zmian współczynnika tarcia w funkcji drogi we wszystkich analizowanych przypadkach widać, iż w początkowym etapie testu próbki są w fazie docierania powierzchni tarcia, - obserwuje się gwałtowny wzrost współczynnika tarcia. Wówczas szybko zwiększa się pole kontaktu pomiędzy współpracującymi powierzchniami, spowodowane brakiem środka smarnego. Następnie po dystansie 5 m obserwuje się stabilizowanie średniego trendu współczynnika tarcia. Niekiedy wtórne produkty zużycia dostają się na tor bezpośredniej współpracy próbki z przeciwpróbką i wówczas obserwuje się chwilowy wzrost współczynnika tarcia.

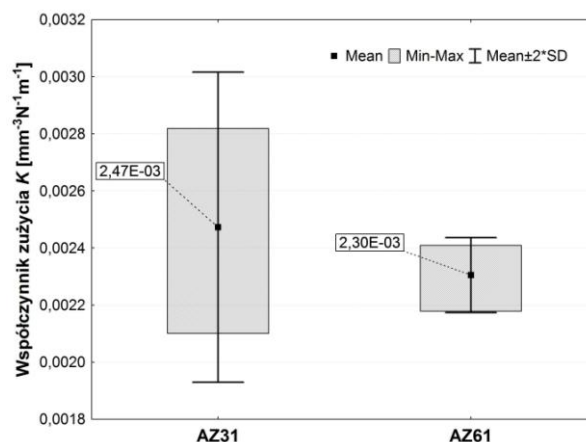
Tab. 1. Zestawienie wyznaczonych wartości współczynników tarcia stali 100Cr6 w różnych środowiskach paliw

Stop Mg-Al-Zn	Średni współczynnik tarcia	Odchylenie standardowe
AZ31	0,296	0,043
AZ61	0,326	0,037



Rys. 2. Wykres średnich zmian współczynnika tarcia stopów AZ31 i AZ61 w funkcji przebytej drogi przy obciążeniu 5N w warunkach tarcia technicznie suchego

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki współczynnika zużycia dla pary stop magnezu – stal łożyskowa 100Cr6. Zaobserwowano mniejszą odporność na zużycie w środowisku tarcia technicznie suchego dla stopu AZ31, który charakteryzuje się istotnie statystycznie mniejszą twardością.

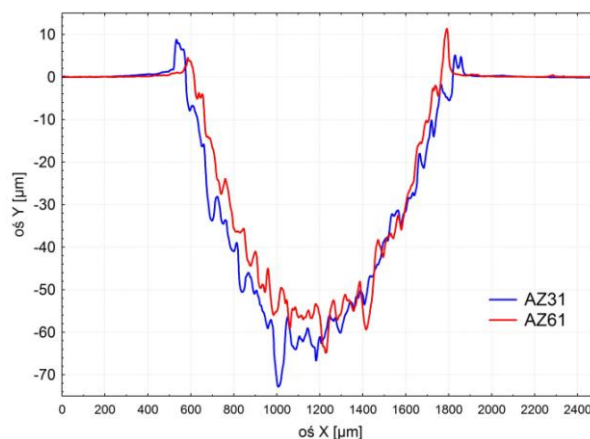


Rys. 3. Wykres wyznaczonych wartości współczynników zużycia  $K$

Sprawdzanie istotności zmian zużycia objętościowego realizowano za pomocą programu Statistica, wykorzystując testy parametryczne dla prób niezależnych. Badanie normalności rozkładu

zmiennych wykonano testem Shapiro-Wilka. Analiza wartości zużycia objętościowego stopów AZ31 i AZ61 wykazała rozkład normalny badanej cechy dla obu stopów  $p > 0,05$  (przy założeniu poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ ) odpowiednio  $p = 0,4132$  oraz  $p = 0,9674$ . Zatem  $p > \alpha$ , dlatego też nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o rozkładzie normalnym badanej cechy. Pomimo, iż na wykresie (rysunek 3) widoczne są różnice w średnich wartościach współczynnika zużycia (ok. 7%) badanych stopów magnezu to test istotności t-Studenta (dla  $\alpha = 0,05$ ) wykazał, że różnice te są nieistotne statystycznie ( $p > 0,05$ ), a otrzymany współczynnik istotności wynosi  $p = 0,1942$ .

Na rysunku 4 przedstawiono profile śladów zużycia, a na rysunku 5 zdjęcia SEM powierzchni torów zużycia próbek. Analiza profili zużycia i powierzchni torów zużycia – zdjęcia SEM wskazują, że dominującym jest abrazyjny mechanizm zużycia. Dla badanych materiałów obserwuje się spiętrzenie obrzeży krawędzi torów zużycia (patrz rysunek 4). Intensyfikującym czynnikiem zużycia jest mikroskrabanie i bruzdowanie. W wyniku procesów zachodzących tribologicznych dochodzi do luźnego przetaczania się wtórnych produktów zużycia między współpracującymi powierzchniami próbki i przeciwpróbki. Przetaczająca się cząstka powoduje powstawanie zarysowań na powierzchni współpracującej próbki lub plastyczną deformację w postaci bruzd co jest widoczne na rysunku 5a. Bruzdy te dobrze widoczne są na profilu śladów zużycia na rysunku 4. Z upływem czasu cząstka ulega plastycznemu zaprasowaniu (wgniataniu) w dolinie toru zużycia. Dochodzi do plastycznego odkształcenia obserwowanego jako „rozmazywianie” materiału stopu na powierzchni tarcia. Abrazyjny mechanizm zużycia z plastycznym bruzdowaniem doliny toru zużycia potwierdzają badania [2, 7, 11]. Ponadto miejscami zaobserwowano zmiany charakterystyczne dla zużycia utleniającego. Magnez odznacza się znaczną reaktywnością i podczas tarcia dochodzi do lokalnego wzrostu temperatury współpracujących elementów, co z kolei powoduje utlenienie powierzchni. Podczas ślizgania się przeciwpróbki z utlenionych powierzchni usuwane są fragmenty cząsteczek tlenków gromadzące się w dolinie torów zużycia (rysunek 5b). Takie zjawisko potwierdzają Chen i Alpas [4].

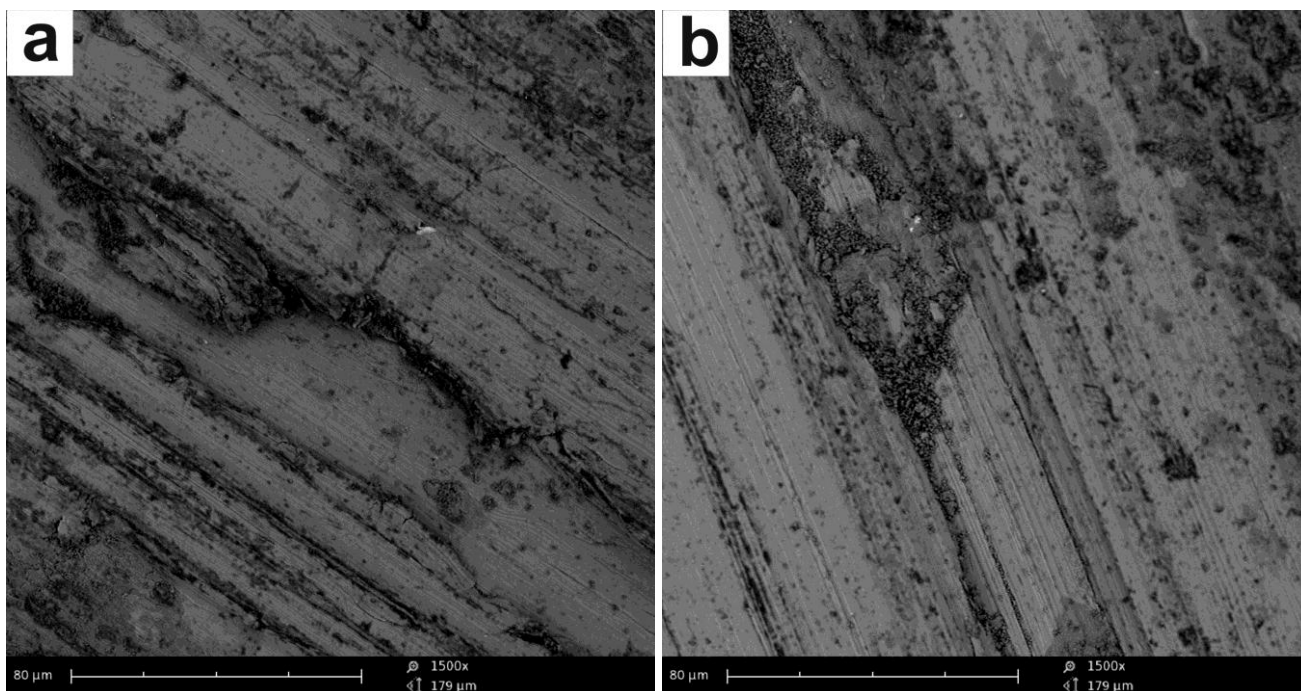


Rys. 4. Typowe profile śladów zużycia

Anbu Selvan i Ramanathan [2] zwracają uwagę, że w przypadku stopów magnezu przy prędkościach testów tribologicznych mniejszych niż 1 m/s i obciążeniu 30N obserwuje się intensyfikację procesów tribologicznych związanych ze zużyciem utleniającym. Natomiast gdy prędkość badania i obciążenie zwiększy się odpowiednio do 1 m/s i ok. 60N to może nawet dochodzić do zjawiska delaminacji torów zużycia.

## WNIOSKI

Znajomość charakterystyki tribologicznej i identyfikacja zużycia stopów magnezu pozwalają na opracowanie w przyszłości kompleksowych kryteriów ich doboru przy projektowaniu części maszyn lub przy doborze parametrów kształtowania ich metodami obróbki plastycznej takiej jak walcowanie czy kucie. Analiza porównawcza współczynników tarcia wykazała, że stop AZ31 w porównaniu do AZ61 charakteryzuje się niższym współczynnikiem odpowiednio  $\mu=0,296$  i  $\mu=0,326$ . Ponadto stop AZ61 charakteryzuje się istotnie statystycznie wyższą twardością w stosunku do stopu AZ31. Nie odnotowano istotnych statystycznych różnic w wielkości współczynnika zużycia. Zasadniczo mechanizm niszczenia badanych stopów magnezu miał charakter abrazyjny intensyfikowany przez mikro-



Rys. 5. Reprezentatywne mikrostruktury SEM śladów zużycia po testach tribologicznych w warunkach tarcia technicznie suchego: a) AZ31, b) AZ61

skrawanie i bruzdowanie. Dodatkowo zachodzą zjawiska związane z plastyczną deformacją toru zużycia i zużycia przez utlenianie.

## BIBLIOGRAFIA

1. An J., Li R.G., Lu Y., Chen C.M., Xu Y., Chen X., et al., *Dry sliding wear behavior of magnesium alloys*. Wear 2008, Vol. 265, pp. 97–104.
2. Anbu Selvan S., Ramanathan S., *Dry sliding wear behavior of as-cast ZE41A magnesium alloy*. Materials and Design 2010, Vol. 31, pp. 1930–1936.
3. Caban J., Drożdżel P., Seńko J., *Wybrane materiały konstrukcyjne w budowie pojazdów samochodowych*. Logistyka 2014, nr 3, s. 946–953.
4. Chen H., Alpas A.T., *Sliding wear map of AZ91 magnesium alloy*. Wear 2000, Vol. 246, pp. 106–116.
5. Codd D., *Martensitic stainless steel makes inroads in the automotive sector*. Machine Design 2011, No. 5.
6. Dobrzański L.A., Tański T., Dobrzańska-Danikiewicz A.D., Król M., Malara Sz., Domagała-Dubiel J., *Struktura i własności stopów Mg-Al-Zn*. Open Access Library, 2012, Vol.5, No. 11, pp. 11-25.
7. El-Morsy Abdel-Wahab, *Dry sliding wear behavior of hot deformed magnesium AZ61 alloy as influenced by the sliding condition*. Materials Science and Engineering A 2008, Vol. 473, pp. 330–335.
8. Fajkiel A., Białobrzęski A., Dudek P., Reguła T., *Nowoczesne stopy oraz metody odlewania magnezu w zastosowaniach motoryzacyjnych*. Przegląd Mechaniczny 2009, nr 2.
9. Hadasik E., Kuc D., *Obróbka plastyczna stopów magnezu*. Obróbka Plastyczna Metali 2013, Vol. 24, Nr 2, s. 131-146.
10. Jinga B., Yangshana S., Fenga X., Shana X., Jinga Q., Weijianb T., *Effect of extrusion on microstructures, and mechanical and creep properties of Mg-Al-Sr and Mg-Al-Sr-Ca alloys*. Scripta Materialia 2006, December, Vol. 55.
11. Lim C.Y.H., Lim S.C., Gupta M., *Wear behavior of SiCp reinforced magnesium metal matrix composites*. Wear 2003, Vol. 255, pp. 629–637.
12. Mraz S., *Steel is up to the Automotive Challenge*. Machine Design 2012, No. 5.
13. Piątkowski J., Binczyk F., *Właściwości i zastosowanie odlewniczych stopów Mg-Al*. Archives of Foundry 2002, Vol. 2, No. 4, s. 426-433.
14. Xu S., Gharghoury M. A., Sahoo M., *Tensile – Compressive Creep Asymmetry of Die Cast Magnesium Alloys AM50, AE44 and AJ62A*. Magnesium. red. K.U. Kainer. Wiley-VCH, Weinheim 2007.

## TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF MAGNESIUM ALLOYS USED IN MEANS OF TRANSPORT

### Abstract

*Knowledge of the tribological characteristics of materials pairs of cooperating with one another, useful for the selection for important elements of means of transport and in the process of metal forming. The article concerns the analysis of the characteristics of tribological wear ball-on-disc magnesium alloys used in the construction of various means of transport. Tribological tests were carried out under dry friction pair magnesium alloy-steel 100Cr6. Were tested wear rate and coefficient of friction of the sample, the signs of wear was SEM observation. The evaluation of the significance of changes in consumption coefficient was conducted by t-Student's test.*

### Autorzy:

dr inż. **Mariusz Walczak** – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Tel: + 48 81 538-42-15, m.walczak@pollub.pl

mgr inż. **Jacek Caban** – Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Maszyn Rolniczych i Transportowych, ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin, jacek.caban@up.lublin.pl

mgr inż. **Paula Pliżga** – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, paulaplizga@gmail.com