

ODPORNOŚĆ NA ZUŻYCIĘ ŚCIERNE KOMPOZYTÓW O OSNOWIE ZE STOPÓW ALUMINIUM

W niniejszej pracy przedstawiono odporność na zużycie ścierne kompozytów o osnowie metalowej (aluminium i jego stopu). Analizowano kompozyty o osnowie ze stopu aluminium odlewnicze i obrobione plastycznie. Krótko scharakteryzowano zjawisko tribologii. Porównano wyniki badań innych autorów oraz zaprezentowano badania własne dotyczące odporności na zużycie ścierne kompozytów o osnowie AlSi9 zbrojonych SiC w porównaniu do żeliwa stopowego odpornego na ścieranie. Udowodniono, że materiały kompozytowe o osnowie aluminiowej odznaczają się wysoką odpornością na ścieranie i coraz częściej zastępują materiały klasyczne (żeliwo, stal) stosowane na odpowiedzialne pary tribologiczne.

WSTĘP

W ostatnich latach określono nowe technologie produkcji kompozytów (odlewnicze, metodą obróbki plastycznej, metalurgii proszków) oraz ich modyfikacje i ocenę jakości [1-3] w przemyśle, dzięki którym rozszerzył się zakres ich wykorzystywania. Szczególnie w transporcie samochodowym, morskim, lotniczym [1-4] czy medycynie. Przyczyniło się to do ciągłych badań nad sposobami ich przetwarzania, łączenia i regeneracji.

Kompozyty są materiałami, które w porównaniu do powszechnie stosowanych materiałów jak np. metale i stopy, mają bardziej złożoną budowę wewnętrzną. Wprowadzenie fazy zbrojącej (umacniającej) metodami in-vitro albo in-situ modyfikuje skutecznie właściwości materiału tworzącego osnowę, co ma wpływ na zachowanie materiału w warunkach np. zużycia podczas tarcia [5-7].

Oddziaływanie budowy (struktury) kompozytu na jego charakterystykę tribologiczną należy rozpatrywać pod względem wielu czynników, spośród których najważniejszymi są:

- materiał zastosowanego do wytworzenia osnowy,
- stan materiału osnowy (wyciskany, odlewany, obrabiany cieplnie),
- materiału i udział objętościowy fazy zbrojącej,
- wielkość cząstek fazy zbrojącej,
- stereologia fazy zbrojącej tzn. kształt cząstek, ich ułożenie [8].

Kompozyty o osnowie metalowej (MMC - metal - matrix composites) są coraz bardziej popularne szeroko wykorzystywane do budowy maszyn i urządzeń. Dzięki odpowiedniej obróbce materiałów MMC istnieje możliwość uzyskania wymaganych właściwości użytkowych oraz osiągnięcia nowego materiału, który będzie się wyróżniał oczekiwanymi wymaganiami. Dzięki metalowym materiałom kompozytowym uzyskać można obniżenie masy oraz poprawę jakości gotowych wyrobów, tam gdzie są konieczne do osiągnięcia, zgodnie z nowymi wymaganiami ekonomicznymi i technicznymi. Do nich należą np. zwiększona twardość, odporność na ścieranie, żaroodporność itp. W niniejszym artykule skoncentrowano się na badaniach odporności na ścieranie czyli zjawiskami związanymi z tribologią [9]. Materiały kompozytowe produkowane na bazie stopów aluminium znane są pod ogólną nazwą AIMC (Aluminium Matrix Composite). Kompozyty te są wykorzystywane w różnych dziedzinach, takich jak: lotnictwo, przemysł kosmiczny, budowa statków, jachtów, łodzi, urządzeń wiatrowych i innych. Pojawiają się

również w jednej z najważniejszych dziedzin, czyli motoryzacji. W przemyśle tym mogą znaleźć zastosowanie w konstrukcjach tj. elementy silników spalinowych, zawieszania, układów hamulcowych itp. Elementy węzłów hamulcowych pracują w warunkach intensywnego zużycia ściernego [3, 5, 10], a co za tym idzie też w podwyższonej temperaturze w ciągu pracy [6]. Dlatego kompozyty AIMC są wykorzystywane do produkcji bębnow, tarcz hamulcowych i sprzęgieł. Zastosowanie mają tu kompozyty zawierające fazę zbrojącą w kształcie włókien krótkich i cząstek np. Al_2O_3 i SiC. Te kompozyty znalazły zastosowanie w m. in. firmie: MAHLE ze Stuttgartu (tłoki w silnikach spalinowych) [11] TOYOTA (niektóre elementy silnika) [12] i MERCEDES BENZ (produkcja samochodu Smart).

Praca stanowi krótki przegląd literaturowy dotyczący AIMC oraz prezentacje badań własnych autorów, (którzy przedstawili wartości średniego zużycia masowego materiału kompozytowego i żeliwa podczas testów tribologicznych.)

1. PROCES ZUŻYCIA TARCIEGO KOMPOZYTÓW O OSNOWIE Z STOPÓW

Tribologia jest nauką o tarcu i procesach, które im towarzyszą. Zajmuje się opisem zjawisk fizycznych (takich jak: mechaniczne, elektryczne, magnetyczne itp.) oraz chemicznych, biologicznych i innych, które występują podczas procesu tarcia [13].

W celu analizy zjawiska powinno się przeprowadzać pomiary ilościowe oporów tarcia, niezależnie od rodzaju badań tribologicznych, tj. siły tarcia, momentu tarcia. Wskazane jest też realizowanie pomiarów intensywności i wartości zużycia. Cel badań wraz z odpowiednim czasem ich trwania oraz odpowiednia dokładność pomiaru determinują wybór metod: pomiaru i oceny wartości zużycia, intensywności zużywania czy oporów tarcia. Otrzymane wyniki badań siły tarcia i intensywności zużywania kontrolowanych materiałów winny być wykorzystywane przy konstruowaniu maszyn i ich eksploatacji [7].

Stosowane metody badań odporności na zużycie dają możliwość oceny względnej odporności materiałów. Zaobserwowane zjawiska tribologiczne zależą przede wszystkim od stanu warstw wierzchnich miejsc styku trących elementów maszyn. Zużycie elementów, jako procesy, które towarzyszą tarcu, to naruszenie warstwy wierzchniej związanej ze zmianą masy, geometrii powierzchni czy jej kształtu. Ubytki np. masy powstające na skutek tarcia jest są zwane zużyciem tribologicznym. Wynikiem tarcia jest nagromadze-

nie makro- i mikro defektów, które w rezultacie powodują dekohezję materiału warstwy wierzchniej. Poprzez oddziaływanie wszystkich rodzajów tarcia, następuje zużycie tribologiczne elementów maszyn, co powoduje w rzeczywistości niszczenie ich warstwy wierzchniej. Wartość zużycia, oraz w niektórych przypadkach też i intensywność zużywania, można ocenić przy pomocy metod ilościowych [14]:

- wagowej;
- metrycznej;
- pomiaru ciśnienia i natężenia przepływu płynów przepływających przez szczelinę między trącymi elementami;
- pomiarów tensometrycznych;
- pneumatycznego pomiaru mikrometrycznego;
- sztucznych baz;
- czujników dynamometrów puszkowych;
- czujników indukcyjnych;
- profilografowania;
- pomiarów izotopów promieniotwórczych.

Obecnie w wielu ośrodkach są prowadzone badania właściwości tribologicznych stopów aluminium zbrojonych fazą obcą o wielorakim składzie chemicznym i parametrach stereologicznych. Technologie produkcji warstw wierzchnich przy produkcji kompozytów AIMC umożliwiają obniżenie lub zwiększenie współczynnika tarcia w czasie ograniczonego smarowania i zmniejszenie ilości oleju, który jest emitowany do otoczenia, co ma znaczenie w np. układach zasilających napędy pneumatyczne.

2. PRZYKŁADY BADAŃ KOMPOZYTÓW AIMC

Podział metod ulepszenia właściwości tribologicznych bazowego materiału, patrząc pod względem tribologii, to zbrojenie i modyfikacja. Przyjęto, że kryterium podziału będzie relacja między odpornością na ścieranie osnowy (τ_o) i materiału cząsteczki obcej (τ_p). W przypadku $\tau_o < \tau_p$ mamy do czynienia ze stopem zbrojonym, co wpływa pozytywnie na jego odporność na zużycie, ale też zwiększa współczynnik tarcia. Stop jest modyfikowany jest wtedy gdy $\tau_o > \tau_p$. Dzięki modyfikacji uzyskujemy zmniejszony współczynnik tarcia oraz ochronę przed zatarciem. Do zbrojenia używane są najczęściej włókna lub sfery Al_2O_3 i SiC. Natomiast do modyfikacji stosuje się mikię, grafit lub miedź [15]. Właściwe uformowanie strefy przypowierzchniowej okołoeutektycznego stopu aluminium poprzez wykorzystanie włókien Al_2O_3 umożliwi współpracę wraz z tworzywami, które zawierają PTFE podczas tarcia suchego [16].

Zbrojenie stosowane jest m. in. by uzyskać podwyższoną wytrzymałość i lekkość materiału stosowanego na bębny i tarcze hamulcowe oraz sprzęgła. Dzięki temu zabiegowi elementy pracujące w warunkach tarcia technicznie suchego, gdzie szybko się nagrzewają mogą wydłużyć swoją przydatność eksploatacyjną. Dlatego stosowanie stopu aluminium jako osnowy na te elementy jest coraz powszechniejsze i wypiera bębny żeliwne – aluminium produkowane metodą ALFIN [17]. Dzieje się tak ponieważ aluminium ma pięciokrotnie wyższą przewodność cieplną niż żeliwo [17].

Profesor Konopka Z. [18] w czasie badań tarcia suchego metodą PIN ON DISK z kompozytu (uzyskanego przez dodanie od 5% do 15% SiC do siluminu eutektycznego) oraz trzpienia stalowego uzyskał około trzykrotnie zredukowanie zużycia oraz wzrost współczynnika tarcia z 0,35 dla osnowy do 0,5 – 0,6 dla kompozytu ($F = 5$ N; $v = 0,1$ m/s; $s = 1000$ m).

Biało D. [8] w procesie metalurgii proszków otrzymał kompozyt z zawierający osnowę $Al + 4,5Cu + 0,7Si + 0,5Mg$ i fazę umacniającą w postaci cząstek Al_2O_3 i przeprowadził badania tarcia na sucho i zużycia otrzymanych materiałów. Badania wykazały, że im większa była ziarnistość cząstek Al_2O_3 tym wyższe otrzymywano wartości

współczynnika tarcia oraz uzyskano zmniejszenie intensywności zużycia ($p = \text{od } 0,5 \text{ do } 3 \text{ MPa}$; $v = \text{od } 0,1 \text{ do } 5 \text{ m/s}$; $s = \text{od } 6000 \text{ do } 12000 \text{ m}$).

Dodatkowo Wojciechowski A. wraz z Sobczak J. [19] przeprowadzili badania odporności na zużycie kompozytowych materiałów aluminiowych przeznaczonych tylko na tarcze hamulcowe. Testy tribologiczne zostały przeprowadzone na grupie 11-stu typów kompozytów, różniących się między sobą składem chemicznym osnowy, zbrojenia oraz sposobem powstawania i obróbki. Porównawczo przetestowano też różne typy żeliw. Testy jakim poddano materiały było określenie wskaźników zużycia tribologicznego w zależności od obciążenia i rodzaju materiału metodą PIN ON DISK oraz w zależności od użytego materiału w 4 cyklach różnych narastających temperatur (od 0 do 360 °C) tzw. „metoda na małych próbkach”, wg WT-074/PIMOT/93 [20]. Badania wykazały, iż materiały żeliwne posiadają porównywalne albo nieznacznie mniejsze wartości zużycia niż materiały kompozytowe. Wywnioskowano też, że kompozyty wykorzystane w badaniach cechują się wyższymi miarami współczynników tarcia w parze trącej z suchą tarczą stalową w porównaniu do badanych żeliw. Zauważono też niejednoznaczną zależność oddziaływanie obróbki cieplnej kompozytów na wartości współczynników tarcia tych materiałów.

Natomiast Posmyk A. [21] dokonał pomiarów zużycia materiałów AIMC w skojarzeniach niskotarciowych z ograniczonym smarowaniem i bez niego. Do badań przy tarcu suchym użyto materiału kompozytowego na bazie stopu MAHLE 124, który posiada 10% włókien Al_2O_3 oraz siluminu $AlSi7Mg$ uzyskanego z odlewu grawitacyjnego zawierającego 15% dyspersyjnej fazy zbrojącej w postaci cząstek SiC. Po przeprowadzeniu badań stwierdzono, że materiał kompozytowy $AlSi7Mg + SiC$ po procesie anodowania może współpracować z tworzywami, które zawierają PTFE w warunkach technicznie suchego tarcia oraz współczynnik tarcia jest wyższy co spowodowało większe zużycie w porównaniu do kompozytu MAHLE 124 + Al_2O_3 .

W przemyśle znane są przypadki stosowania stopów aluminium zbrojonych materiałami ceramicznymi. Jednym z przykładów jest HONDA, gdzie od 1991 roku stosuje się kompozyt Al/Al_2O_3 na tuleje cylindrowe. Dzięki temu uzyskano mniejszą masę silnika i podwyższono odporność na zużycie silnika [6, 12]. Kolejnym przykładem jest firma TOYOTA, która od 1983 roku stosuje zbrojenie kompozytem Al/Al_2O_3 na półki pierścieni tłoków i dzięki temu uzyskano zmniejszenie masy tłoka i lepszą jego odporność na zużycie w podwyższonych temperaturach [12]. Firma MAHLE ze Stuttgartu by ochronić półki pierścieni stosuje tłoki z wkładką wzmocnioną krótkimi włóknami Al_2O_3 [11].

Modyfikacje składów chemicznych stopów aluminium ma na celu uzyskanie poprawy właściwości tribologicznych, gdzie jednym z nich jest zastosowanie grafitu. Prasad S. oraz Rohatgi P. [22] w swoich badaniach podają, że dodanie od 1, 1% do 5, 2% grafitu powoduje zmniejszenie zużycia ściernego stopu aluminium – grafit nawet pięciokrotnie ($Al - 45Cu + 3\% GR$). W pracy badawczej Gibson'a podane zostało, iż obecność grafitu skutkuje obniżeniem współczynnika tarcia od 0,38 do 0,28 dla stopu $AlSi11$ oraz z 0,28 do 0,20 dla stopu $AlSi7$ (8% wag. GR) [23-24].

3. BADANIA WŁASNE

Badaniom odporności na zużycie w procesie tarcia ślizgowego na sucho w niniejszej pracy, zostały poddane po trzy próbki wykonane z powszechnie stosowanego na tarcze hamulcowe żeliwa chromowego odpornego na ścieranie oraz z kompozytu firmy Duralcan, którego osnowę stanowi silumin $AlSi9$, zaś zbrojenie występuje w formie cząstek SiC w udziale 15%. Jako materiał na przeciwprób-

kę zastosowano stal po ulepszeniu cieplnym, o twardości 42 HRC. Do wykonywania badań na ścieranie materiałów kompozytowych wykorzystano stanowisko znajdujące się w Zakładzie Inżynierii Materiałów Okrętowych, Instytutu Podstawowych Nauk Technicznych Akademii Morskiej w Szczecinie. Wygląd stanowiska przedstawia rysunek.



Rys. 1. Stanowisko do badania materiałów kompozytowych na ścieranie (Akademia Morska w Szczecinie)
Źródło: Opracowanie własne

Odporność na zużycie badanych materiałów została określona przy pomocy metody wagowej [10] a wartości średniego zużycia masowego zgodnie z wzorem (1) dla badanych materiałów przedstawiono w tabeli 1. Próby były przeprowadzone dla wartości obciążenia normalnego o wartości: 40 kG (392, 4 N), co przy rzeczywistym polu styku próbki z przeciwpróbką $A = 1,9 \text{ cm}^2$ odpowiadało naciskowi jednostkowemu 2 MPa.

$$Z_m = m_1 - m_2 \quad (1)$$

Gdzie:

Z_m - zużycie masowe

m_1 - masa próbki przed próbą zużycia [g]

m_2 - masa próbki po próbie zużycia [g]

Tab. 1. Tab. 1. Zestawienie wartości średniego zużycia masowego Z_m próbek* z materiału kompozytowego i żeliwa podczas testów tribologicznych

Nacisk jednostkowy [MPa]	Bezwzględne Z_m [g]	Względne Z_m/m_1 [%]	Nacisk jednostkowy [MPa]
Zużycie żeliwa	21, 15	56, 1	Zużycie żeliwa
Zużycie kompozytu	0, 03	0, 4	Zużycie kompozytu

*uśredniona wartość z 3 próbek dla każdego materiału

PODSUMOWANIE

Niniejszy artykuł oprócz badań własnych, przedstawia przegląd materiałów kompozytowych o osnowie ze stopu aluminium, stosowanych w przemyśle i badanych w laboratorium z punktu widzenia ich przydatności.

Aluminiowe materiały kompozytowe posiadają porównywalne wartości znormalizowanej dynamiki zużycia do materiałów żeliwnych. Może to świadczyć o współmiernej odporności na zużycie tribologiczne kompozytów i żeliwa. Z badań wyżej przedstawionych wynika, że najwyższą odporność na zużycie uzyskał kompozyt F3N.20S LS i F3N20S SQ (stan lany i obrobiony cieplnie-badania J. Sobczaka [1, 19]), co potwierdza prawidłowe wykorzystanie kompozytów zbrojonych aluminium w postaci cząstek węgla krzemowego jako najlepszego materiału na tarcze hamulcowe. Stwierdzenie to potwierdza stała wartość współczynnika tarcia i zużycie materiału w

podwyższonych temperaturach, co zostało udowodnione w badaniach kompozytu F3N. 20S i przedstawione w [17]. Wartości współczynnika tarcia podczas pracy tarczy AIMC a okładziną cierną są równomierne i takie same we wszystkich temperaturach ich pracy. Natomiast przyspieszone zużycie tarczy z AIMC zależy w bardzo dużym stopniu od temperatury w parze ściernej. Z przeprowadzonych testów otrzymano wynik, że tarcze kompozytowe bezpiecznie mogą pracować w temperaturze nie przekraczającej 300 °C [17].

Z badań Biało D. [8] materiałów kompozytowych o osnowie $\text{Al} + 4,5\text{Cu} + 0,7\text{Si} + 0,5\text{Mg}$ z fazą umacniającą Al_2O_3 w postaci cząstek w udziale 10% objętości materiału wynika, że intensywność zużywania się kompozytów aluminiowych rośnie ze wzrostem drogi tarcia, nacisków jednostkowych oraz prędkości tarcia. Dodatkowo wielkość cząstek fazy zbrojącej ma wpływ na intensywność zużycia, bo im większe są cząstki Al_2O_3 tym mniejsze zużycie się obserwuje oraz im większa ziarnistość cząstek Al_2O_3 tym większe otrzymywano wielkości współczynnika tarcia. Opisywane materiały stanowią bardzo dobry materiał na elementy pracujące w warunkach zużycia ściernego i to w podwyższonych temperaturach. Mogą z zatem z powodzeniem zastąpić stosowane dotąd pracujące w tej grupie materiały jak żeliwo czy stале.

Na podstawie przeprowadzonych badań tribologicznych można stwierdzić, że w warunkach tarcia „na sucho” ze stałą ulepszoną cieplnie, odlewany materiał kompozytowy zbrojony cząstkami SiC charakteryzuje się niezwykle wysoką odpornością na ścieranie (Tab. 1). Przy nacisku jednostkowym 2 MPa zdecydowanie przewyższa pod tym względem żeliwo stopowe, które zużywało się intensywnie podczas kolejnych prób (Tab. 1). Dobrą odporność na ścieranie materiału kompozytowego można tłumaczyć bardzo dużą twardością cząstek węgla krzemowego (9. 5 w skali Mohsa) [1] oraz ich dobrym połączeniem (adhezją) z osnową kompozytu [2].

Na podstawie przeglądu literaturowego oraz badań własnych można stwierdzić, że:

- Stop modyfikowany jest wtedy gdy $\tau_o > \tau_p$. Modyfikacja powoduje zmniejszenie współczynnika tarcia oraz ochronę przed zatarciem.
- Do zbrojenia używane są najczęściej włókna lub sfery Al_2O_3 i SiC. Natomiast do modyfikacji stosuje się mikię, grafit lub miedź [15].
- Aluminiowe materiały kompozytowe posiadają porównywalne wartości znormalizowanej dynamiki zużycia do materiałów żeliwnych [1, 19].
- Najwyższą odporność na zużycie uzyskał kompozyt F3N.20S LS i F3N20S SQ [1, 19]
- Zauważono też niejednoznaczność oddziaływanie odróbki cieplnej kompozytów na wartości współczynników tarcia tych materiałów [19].
- Zużycie elementów z AIMC zależy w bardzo dużym stopniu od temperatury w parze ściernej [17].
- Z badań Biało D [8] wynika, że intensywność zużywania się kompozytów aluminiowych rośnie ze wzrostem drogi tarcia, nacisków jednostkowych oraz prędkości tarcia.
- Wielkość cząstek fazy zbrojącej ma wpływ na intensywność zużycia, im większe są cząstki Al_2O_3 tym mniejsze zużycie.
- Z badań własnych można stwierdzić, że w warunkach tarcia „na sucho” ze stałą ulepszoną cieplnie, odlewany materiał kompozytowy zbrojony cząstkami SiC charakteryzuje się wysoką odpornością na ścieranie.
- Przy nacisku jednostkowym 2 MPa kompozyt AIMC wykazał znacznie wyższą odporność na ścieranie, niż żeliwo stopowe.

BIBLIOGRAFIA

1. Sobczak J. J., Rozdział IV. 1. 5 „Praktyka odlewanych kompozytów metalowych” Poradnik Odlewnika. Kraków. ISBN: 878-83-904306-9-0, pp. 725-771.
2. Gawdzińska K., Chybowski L., Przetakiewicz W., *Proper matrix-reinforcement bonding in cast metal matrix composites as a factor of their good quality*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 16(3), pp. 553-563, 2016 [ISSN 1644-9665, DOI: 10.1016/j.acme.2015.11.004]
3. Gawdzińska K., Chybowski L., Bejger A., Krile S., *Determination of technological parameters of saturated composites based on sic by means of a model liquid*, Metalurgija, Vol. 55 No. 4 November 2016, pp. 659-662, 2016 [ISSN 0543-5846, e-ISSN 1334-2576]
4. Richter J., *Tribological evaluation of high-speed steels with a regulated carbide phase*. Material Characterization 50/4-5, pp. 339-347 doi: 10.1016/j.matchar.2003.08.002
5. Richter J., Hutchings I. M., Wclyne D. N. Allsopp T., Peng X., *Tribological characterization of diamond-like carbon films on nonledeburitic high-speed steels*, Materials Characterization, Volume: 45, Issue: 3, 2000, pp: 233-239, [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(00\)00076-0](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(00)00076-0).
6. Herbin P., Pajor M., Stateczny K., *Six-axis control joystick based on tensometric beam*, Advances in Manufacturing Science and Technology, 40(4), 33-41.
7. Gawdzińska K., Bryll K., Nagolska D., *Influence of Heat Treatment on Abrasive Wear Resistance of Silumin Matrix Composite Castings*, Arch. Metall. Mater., Vol. 61 (2016), No 1, p. 177-182, DOI: 10.1515/amm-2016-00310
8. Biało D., *Wpływ struktury kompozytów aluminiowych na proces ich zużywania przy tarcii*; Tribologia kwiecień 2001, s. 535 – 547.
9. Pawłowska P. *Zastosowanie materiałów wytwarzanych metodą Laserowej Techniki Przyrostowej (Laser Enginnered Net Shaping) w transporcie morskim ze szczególnym uwzględnieniem zużycia ściernego*; praca magisterska, Szczecin 2016.
10. Gościański M., Łabęcki M., Kapcińska D., *Badania tribologiczne, wytrzymałościowe i strukturalne wybranych materiałów stosowanych na elementy maszyn rolniczych pracujące w glebie*. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 2007, Vol. 52 (2) : 43-51.
11. Röhrle M. D., *Ferrotherm – und faserverstärkte Kolben für Nutzfahrzeugmotoren*, Motorentchnische Zeitschrift 52 (1991) 7/8, s. 369 – 370.
12. Noguchi M., *Present and future of composite materials for automotivie application in Japan*, Proceedings of the Ninth International Conference on Composite Materials, s. 1355 – 1362, Edited by A. Miravete, Woodhead Publishing Ltd., Madrid 1993.
13. Dobrzański L., *Metaloznawstwo z podstawami nauki o materiałach*, Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, Warszawa 1999.
14. Chlebus E., Cholewa M., *Rapid prototyping – rapid tooling. Innowacyjne technologie w zastosowaniach przemysłowych*, Zarządzanie Produkcją nr 3-4, 1999.
15. Deus R. L., Subramain C., Yellup J. M., *Abrasive wear of aluminium composites – a review*. Wear 201 (1996) s. 132 – 144.
16. Posmyk A., *Tribologische Eigenschaften von ausgewählten faserverstärkten Aluminiumlegierungen*. Złożone do druku w Tribologie und Schmierungstechnik.
17. Schmidt K., *Elementy silników samochodowych*. WKŁ Warszawa 1973.
18. Konopka Z., *Tribological properties of pressure die cast SiC reinforced aluminium alloy matrix composites*. Cast Composites '95, Materiały konferencyjne, s. 103 – 106, Zakopane 18 – 20 october 1995.
19. Wojciechowski A., Sobczak J., *Badanie odporności na zużycie aluminiowych materiałów kompozytowych przeznaczonych na tarcze hamulcowe*, Kompozyty 2001, s. 191 - 195.
20. WT – 074/PIMOT/93: *Pojazdy samochodowe, Nakładki cierne hamulców tarczowych, Wymagania i badania w zakresie bezpieczeństwa użytkowania*.
21. Posmyk A., *Tarcie i zużycie materiałów kompozytowych na bazie stopów aluminium*, Tribologia kwiecień 1998, s. 493 – 501.
22. Parsad S. V., Rohatgi P. K., *Tribological Properties of Al. Alloy Particles Composites*. Journal of Metals, Nov. 1987, s. 22.
23. Gibson P. R., Clegg A. J., Das A. A., *Wear of Cast Al – Si Alloys Containing Graphite*, Wear Vol. 95 1984, s. 193.
24. Pietrzak K., Kaczmar J. W., Włosiński W., *Wytwarzanie, właściwości i zastosowanie materiałów kompozytowych ceramiczno – metalowych*, Kompozyty, Seminarium Polskiego Towarzystwa Materiałów Kompozytowych, s. 65 – 88, Częstochowa, 8 listopada 1996.

Resistance of aluminium alloy matrix composites to abrasive wear

In this work we elaborate on the resistance of metal matrix composites to abrasive wear, where the metals include aluminium and its alloys. We have examined cast and plastically worked aluminium matrix composites. We have briefly characterized the phenomenon of tribology. The work shows comparisons with the findings of other authors and presents our research in the scope of examination of the resistance to abrasive wear of AlSi9 matrix composites reinforced with SiC, compared to an abrasion-resistant alloy of cast-iron. It has been proven that aluminium matrix composites are characterized by abrasion resistance and that they are increasingly replacing conventional materials (such as cast iron and steel) used for heavy-duty tribological pairs.

Autorzy:

mgr. inż. **Patrycja Pawłowska** – Akademia Morska, Instytut Inżynierii Transportu, ul. H. Pobożnego 11, 70-507 Szczecin, p.pawlowska@am.szczecin.pl

dr hab. inż. kpt. ż. w. **Wojciech Ślaczka** prof. nadzw. AM – Akademia Morska, Instytut Nawigacji Morskiej, ul. Wały Chrobrego 1-2, 70- 500 Szczecin, w.slaczka@am.szczecin.pl

mgr inż. **Ewelina Kostecka** – Akademia Morska, studentka studiów doktoranckich Wydział Mechaniczny, ul. Wały Chrobrego 1-2, 70- 500 Szczecin, e.kostecka@am.szczecin.pl

prof. dr hab. inż. **Janusz Grabian** – Akademia Morska, Instytut Podstawowych Nauk Technicznych, ul. Willowa 2-4, 71-650 Szczecin, j.grabian@am.szczecin.pl