



**Jakub Wieczorek\*, Józef Ślężiona, Anna Dolata-Grosz, Jerzy Mylowski**

*Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland*

*\* Corresponding author. E-mail: jakub.wieczorek@polsl.pl*

Otrzymano (Received) 11.02.2008

## WPŁYW MATERIAŁU PARTNERA TARCIA NA TRIBOLOGICZNE WŁAŚCIWOŚCI KOMPOZYTÓW HETEROFAZOWYCH

Przedstawiono wyniki badań właściwości tribologicznych kompozytów z osnową aluminiową i ceramicznym zbrojeniem. Przedmiotem badań były kompozyty zbrojone cząstkami węgla krzemowego (AK12/SiC) oraz mieszaniną cząstek SiC i węgla szklanego (AK12/SiC+C). W kompozytach heterofazowych cząstki węgla szklanego wykorzystano do modyfikacji właściwości ciernych. Badania przeprowadzono, wykorzystując tester tribologiczny T-01. Partnerem tarcia dla kompozytów były trzy rodzaje materiałów: żeliwo sferoidalne, kompozyt Duralcan F3K.15S z cząstkami SiC oraz kompozyt Duralcan W6A.15A z cząstkami  $Al_2O_3$ . Wyniki badań współczynnika tarcia i zużycia pozwoliły ocenić, w jaki sposób dodatek węgla szklanego może wpływać na zmianę charakterystyk tribologicznych. Stwierdzono, że zastąpienie części zbrojenia cząstkami węgla szklanego spowodowało obniżenie zarówno współczynnika tarcia, jak i zużycia kompozytów heterofazowych oraz współpracujących z nimi materiałów. W pracy dokonano również oceny wpływu obecności cząstek węgla amorficznego na kształtowanie geometrii powierzchni roboczych. Uzyskane wyniki pozwoliły stwierdzić, że możliwe jest kształtowanie właściwości tribologicznych kompozytów poprzez zmianę rodzaju, wielkości zbrojenia oraz w wyniku zastosowania cząstek zbrojących o różnych charakterystykach fizykochemicznych. Pozwala to w znacznym stopniu rozszerzyć możliwości projektowania właściwości tribologicznych skojarzeń ciernych.

**Słowa kluczowe:** stop aluminium, zbrojenie heterofazowe, odlewanie odśrodkowe, właściwości tribologiczne

## INFLUENCE OF MATERIAL OF FRICTION PARTNER ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF HETEROPHASE COMPOSITES

The paper presents the results of the tribological properties investigations of aluminium matrix composite (AK12) with ceramic reinforcement. The composite reinforced by the silicon carbide particles (AK12/SiC) and by the mixture of the silicon carbide and amorphous glassy carbon particles (AK12/SiC+C) were subjected of investigations. For the heterophase composites glassy carbon particles was applied to modify frictional properties. The investigations were conducted with the use of tribological tester T-01. The three different kind of frictional partners of materials were used for composites: cast iron, Duralcan F3K.15S composite with SiC particles and Duralcan W6A.15A composite with  $Al_2O_3$  particles. The structure of heterophase composite containing SiC and glass carbon particles have been shown. The results of the friction coefficient and wear investigations allowed assessing the influence of the glassy carbon addition on the tribological characteristics change. It was stated that the replacement of the parts of the reinforcement with the glassy carbon particles caused the friction coefficient as well as the wear of the heterophase composite reduction and materials cooperating with them. In the paper make estimation the influence of glassy carbon particles on surface work geometry, too. At the same time it could be stated that the application for the composite products shaping centrifugal casting technology may have triggered vertical diversification in the reinforcing particles distribution and following on from this diverse tribological properties depending on the place of the sample taking. Gotten results permitted to state, that there is possibility of tribological properties of composites shaping by the through the change of kind and size reinforcement particles about different physicochemical characteristics. It allows to widening possibilities of designing the tribological properties of frictional associations.

**Keywords:** aluminium alloy, heterophase reinforcement, centrifugal casting, tribological properties

## WPROWADZENIE

Właściwości każdego kompozytu są w ścisłej korelacji z jego strukturą, tzn. wielkością i udziałem objętościowym fazy zbrojącej, rodzajem i typem połączenia pomiędzy komponentami, właściwościami - zarówno osnowy, jak i zbrojenia - oraz rozmieszczeniem cząstek

zbrojących w osnowie, kształtowanym i związanym bezpośrednio z parametrami procesu technologicznego [1-6]. Na podstawie danych literaturowych oraz badań własnych można stwierdzić, że zastosowanie zbrojenia heterofazowego jest rozwiązaniem pozwalającym w zna-

cznym stopniu rozszerzyć możliwości projektowania struktury i właściwości materiałów kompozytowych [7-12]. Pozwala to na porównanie wpływu składu fazowego kompozytów oraz technologii ich wytwarzania i przetwarzania na właściwości tribologiczne [11, 12].

Na podstawie wyników badań autorów artykułu stwierdzono, że wprowadzenie cząstek ceramicznych w postaci węgla krzemu lub tlenku aluminium w połączeniu z cząstkami węgla szklatego wpływa przede wszystkim na korzystną zmianę właściwości tribologicznych w wybranych skojarzeniach ciernych [8-11]. Dotychczasowe badania prowadzone w Zakładzie Kompozytów Politechniki Śląskiej koncentrowały się na wykorzystaniu jako partnera tarcia dla badanych kompozytów jedynie żeliwa. Prezentowane w artykule badania skojarzeń kompozytu heterofazowego z różnymi materiałami pozwoliły na rozszerzenie wiedzy na temat mechanizmów zużycia tribologicznego kompozytów, szczególnie rolę komponentów zbrojących na te właściwości. O własnościach użytkowych kompozytów heterofazowych, w tym o własnościach tribologicznych, decydować będzie dodatkowo wzajemny stosunek ilościowy cząstek zbrojących każdego rodzaju [7].

## CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem pracy było określenie zachowania się kompozytów heterofazowych, o osnowie odlewniczego stopu AK12 (AlSi12NiCuMg), zbrojonych cząstkami SiC oraz mieszaniną cząstek ceramicznych (węgla krzemu SiC i węgla szklatego Cs) w warunkach tarcia w skojarzeniu z żeliwem i kompozytem.

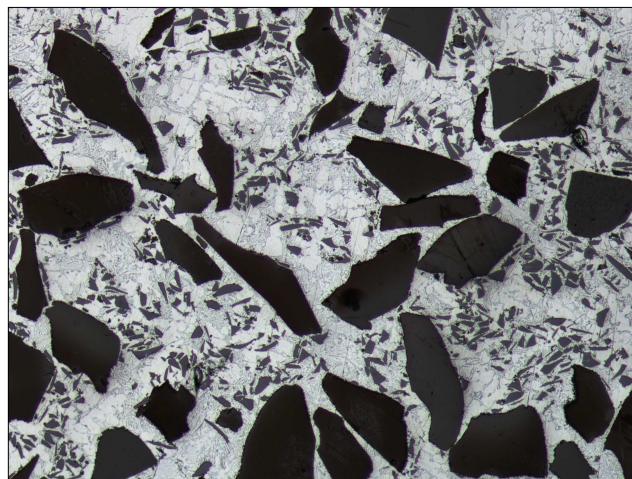
Zakres pracy obejmował:

- wytworzenie kompozytu metodą mechanicznego mieszania;
- odlanie odśrodkowe tulei gwarantujące właściwe rozmieszczenie faz zbrojących;
- przygotowanie próbek, poprzez pocięcie tulei na krążki o grubości ok. 5 mm, a także przygotowanie powierzchni krążków i trzpieni przez szlifowanie i polerowanie;
- przygotowanie trzpieni o średnicy 6 mm z żeliwa oraz dwu rodzajów kompozytu Duralkan zbrojonego SiC oraz  $Al_2O_3$ ;
- przeprowadzenie badań na testerze T-01 w warunkach tarcia technicznie suchego;
- wyznaczenie współczynnika tarcia przygotowanych wcześniej próbek;
- określenie ubytku masy próbek oraz przeciwpróbek;
- analizę geometrii powstałego śladu wytarcia z wykorzystaniem profilografu laserowego.

## MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Badaniami objęto materiał kompozytowy o osnowie odlewniczego stopu aluminium AK12, zbrojony cząstkami

SiC o wielkości 10, 25 i 50  $\mu m$  i heterofazową mieszaniną cząstek SiC (10, 25 i 50  $\mu m$ ) i węgla szklatego (C) o 100  $\mu m$  rozmiarze cząstki. W każdym przypadku stosowano łączny 20% udział zbrojenia w różnych proporcjach dla SiC i C (tab. 1). Kompozyt wytworzono metodą mechanicznego mieszania i ukształtowano do postaci tulei, stosując technikę odlewania odśrodkowego [11, 12]. Charakterystyczną strukturę badanych kompozytów przedstawiono na rysunku 1. W strukturze osnowy widoczne są większe cząstki węgla szklatego (100  $\mu m$ ) otoczone znacznie mniejszymi cząstkami węgla krzemu (10  $\mu m$ ).



Rys. 1. Struktura kompozytu zbrojonego heterofazowo mieszaniną węgla krzemu i węgla szklatego

Fig. 1. The structure of heterophase composite reinforced by the mixture of the SiC and amorphous glassy carbon particles

Aby ocenić własności tribologiczne kompozytów heterofazowych w zależności od rodzaju materiału partnera tarcia, do badań wybrano trzpienie wykonane z żeliwa sferoidalnego, stosowanego na tarczach hamulcowe, oraz z kompozytu Duralkan F3K.15S (kompozyt umacniany cząstkami SiC 15  $\mu m$ ) i kompozytu Duralkan W6A.15A (kompozyt umacniany cząstkami  $Al_2O_3$  15  $\mu m$ ). Wybranie trzech rodzajów materiału partnera tarcia dla dwóch kompozytów dało 6 par ciernych, których zestawienie przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Pary ciernie stosowane do badań tribologicznych  
TABLE 1. The friction couple using for tribological investigations

Lp.	Oznaczenie	Rodzaj cząstek	Wielkość cząstek $\mu m$	Materiał trzpienia	Udział objętościowy fazy zbrojącej, %
1	S10/25/50_GJS	SiC	25/50	EN-GJS	20
2	S25/C100_GJS	SiC/C	10/25/50/100	EN-GJS	10/10 = 20
3	S10/25/50_DA	SiC	10/25/50	W6A.15A	20
4	S25/C100_DA	SiC/C	25/100	W6A.15A	10/10 = 20
5	S10/25/50_DS	SiC	10/25/50	F3K.15S	20
6	S25/C100_DS	SiC/C	25/100	F3K.15S	10/10 = 20

Badania tribologiczne przeprowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego w temperaturze otoczenia (ok. 20°C), przy stałej prędkości poślizgu 0,7 m/s oraz drodze tarcia 2500 m, wykorzystując tester T-01 (tarcza-trzpień). Odporność na zużycie badanych próbek została określona za pomocą metody wagowej. Parametry badań tribologicznych podano w tabeli 2.

TABELA 2. Parametry badań tribologicznych  
TABLE 2. The parameters used in tribological test

Tarcie	Prędkość poślizgu	Obciążenie	Droga tarcia	Temperatura	Nacisk jednostkowy
Technicznie suche	0,7 m/s	24,5 N	2500 m	20°C	0,8 MPa

Analiza struktury powierzchni tarcia kompozytów biorących udział w badaniu została przedstawiona za pomocą wykresów i profilografów sporządzonych na profilografie laserowym MicroProf firmy FRT. Pomiar ten jest pomiarem bezkontaktowym, całkowicie eliminującym możliwość deformacji śladu wytarcia w trakcie wykonywania badania. Badania geometrii śladu wytarcia przeprowadzono bezpośrednio po zakończeniu procesu tarcia. Jediną formą przygotowania powierzchni przed pomiarem było czyszczenie jej w płuczce ultradźwiękowej w roztworze acetonu. Parametry przeprowadzonych pomiarów geometrii powierzchni to:

- pole pomiarowe 8x8 mm,
- rozdzielczość 2400x600 punktów,
- akwizycja i obróbka danych pomiarowych - program MARK III.

Ocenie poddano podstawowe cechy powierzchni, takie jak: głębokość śladu wytarcia, chropowatość oraz falistość powierzchni. W analizie użyto dwuwymiarowych i trójwymiarowych obrazów.

## WYNIKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Wyniki pomiarów współczynnika tarcia materiału kompozytowego S25\Cs100 we współpracy z różnymi trzpieniami przedstawiono na rysunku 2. Każda z widocznych na wykresie par ciernych charakteryzuje się występowaniem etapu docierania na dystansie do ok. 200 m. Przebiegi zmian współczynnika tarcia cechuje zbliżona budowa. W początkowej fazie drogi współczynnik tarcia gwałtownie rośnie, następnie nieznacznie spada, stabilizując się do końca próby.

Jak widać na rysunku 3, powstały ślad wytarcia na powierzchni kompozytu zbrojonego mieszaniną cząstek SiC i Cs (węgiel szklisty) po współpracy z żeliwnym trzpieniem jest śladem o złożonej geometrii. Jest to efekt nierównomiernego zużycia ściernego (mikroskrawania i wykuszania cząstek) powierzchni kompozytu. W centralnej jego części widać obszar o niskiej chropowatości i niewielkim zużyciu. Po obu stronach tego obszaru znajdują się natomiast bruzdy o głębokości do-

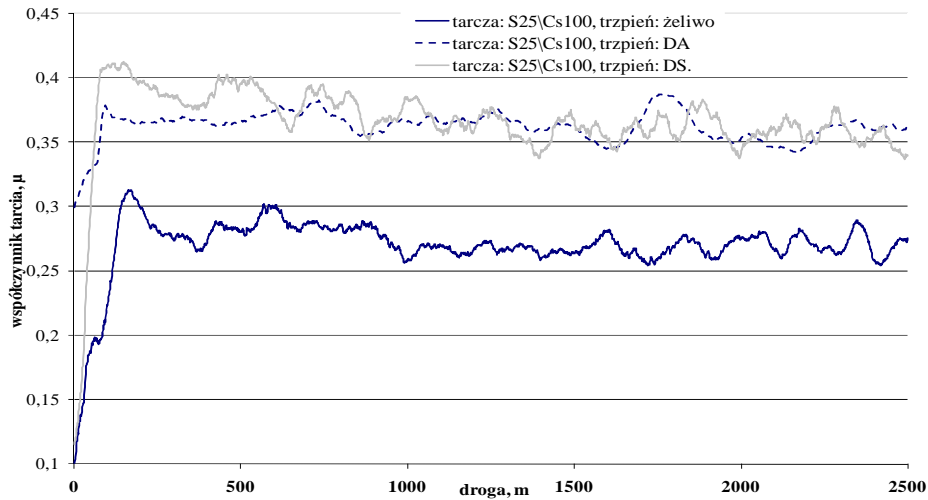
chodzącej do 75  $\mu\text{m}$ . Taki charakter powstałego śladu wytarcia wynika z zastosowania dwóch różnych co do własności tribologicznych cząstek umacniających. Tam, gdzie decydującą rolę w procesie zużycia odgrywają cząstki węgla szklatego, chropowatość powierzchni jest niewielka, a zatem również niewielkie zużycie. W przypadku gdy o charakterze zużycia decydują cząstki węgla krzemu chropowatość i zużycie wyraźnie rosną. Na rysunkach 4, 5 i 6 widoczny jest ślad wytarcia powstały po współpracy kompozytu S25/Cs100 z kompozytowymi trzpieniami. Tu również, tak jak w przypadku współpracy z trzpieniem żeliwnym, jest widoczna złożoność geometrii powstałego wytarcia. W przypadku współpracy z kompozytem Durakan F3K.15S (rys. 5) widoczna jest w środkowej części śladu wytarcia głęboka na 250  $\mu\text{m}$  bruzda powstała wskutek skrawania przez wyrwaną cząstkę SiC.

Wykres przedstawiający porównanie współczynnika tarcia w funkcji drogi dla kompozytu S10/25/50 współpracującego z różnymi materiałami trzpienia przedstawiono na rysunku 7. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że kompozyt S10/25/50 w trakcie współpracy z trzpieniami o różnym składzie przyjmuje różne wartości  $\mu$  na całym dystansie. Podczas współpracy z trzpieniem żeliwnym na całym dystansie wartość współczynnika tarcia rosła, nie można tu wskazać końca etapu docierania. Podczas współpracy z trzpieniami kompozytowymi wartość średnia współczynnika tarcia w obu przypadkach wynosiła średnio 0,36, a dystans docierania nie przekraczał 100 m.

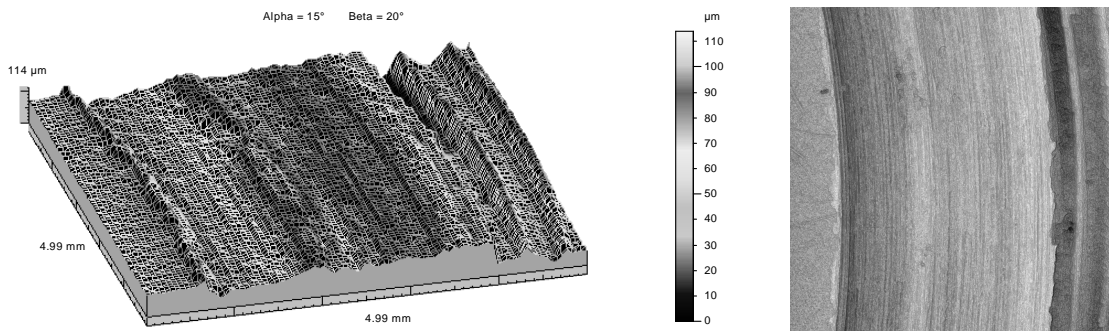
Porównując ślady zużycia powstałe na powierzchni żeliwnych trzpieni po współpracy z dwoma różnymi kompozytami (S25\Cs100 - rys. 6 i S10/25/50 - rys. 8), widoczne są charakterystyczne cechy zużycia abrazyjnego, takie jak zarysowania i bruzdy ułożone w kierunku ruchu.

W przypadku trzpienia po współpracy z kompozytem S25/Cs100 zawierającym węgiel szklisty (rys. 6) poziom chropowatości powierzchni po tarcu jest niewielki ( $R_a = 1$  do 5  $\mu\text{m}$ ). Nieznaczne jest także zużycie tego trzpienia (rys. 10). Trzpień żeliwny po współpracy z kompozytem umacnianym cząstkami SiC ma większą chropowatość powierzchni ( $R_a = 10$  do 12  $\mu\text{m}$ ) (rys. 9). Na jego powierzchni pojawiają się głębokie bruzdowania, stanowiące najprawdopodobniej ślad po bezpośrednim kontakcie powierzchni trącej trzpienia z cząstką SiC z powierzchni tarczy kompozytowej. Głębokość tego zarysowania wynosząca 20  $\mu\text{m}$  jest zbliżona do wielkości cząstek umacniających w kompozytowej tarczy.

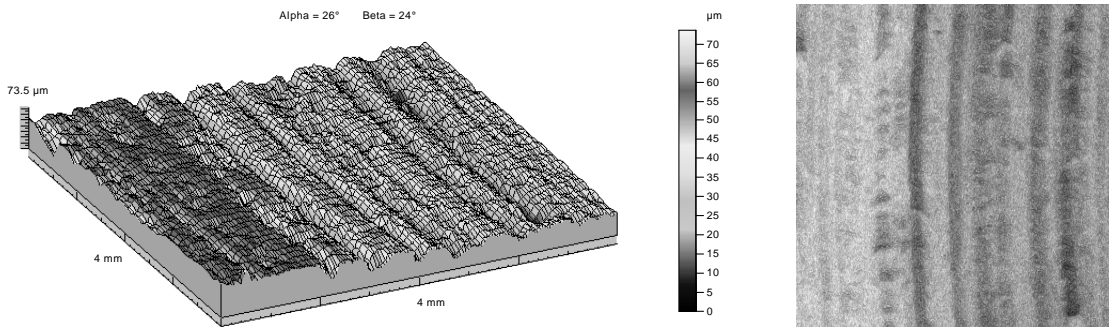
Przedstawione na wykresie (rys. 10) ubytki masy kompozytów wskazują, że najlepsze właściwości tribologiczne, tj. niewielkie zużycie w połączeniu z najmniejszym współczynnikiem tarcia, wykazuje kompozyt S25/Cs100, niezależnie od zastosowanego materiału trzpienia (przeciwpróbki). Świadczy to o bardzo korzystnym oddziaływaniu umocnienia heterofazowego z udziałem amorficznego węgla.



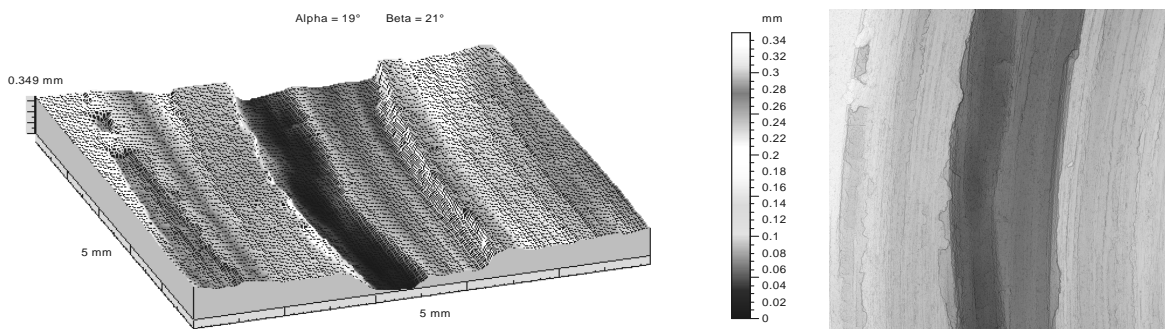
Rys. 2. Wykresy współczynnika tarcia dla kompozytu S25/Cs100 po współpracy z różnymi materiałami trzpienia  
 Fig. 2. The diagrams of friction coefficient for S25/Cs100 composite after matting with different pin materials



Rys. 3. Powierzchnia tarczy kompozytowej S25/Cs100 po współpracy z żeliwnym trzpieniem  
 Fig. 3. The surface of S25/Cs100 composite disk after cast iron pin the mating

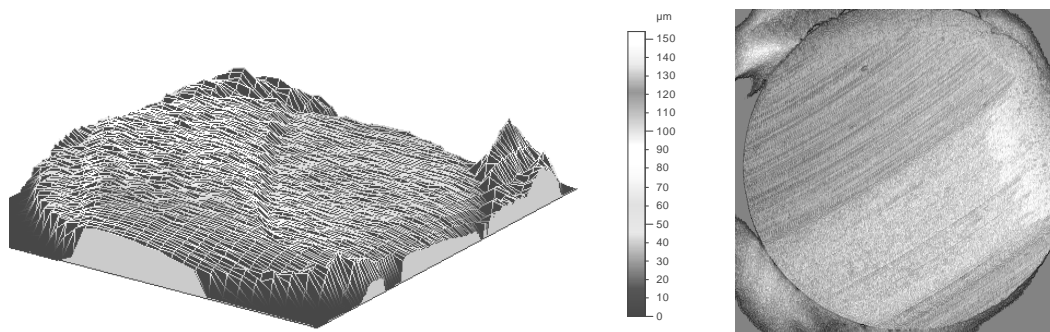


Rys. 4. Powierzchnia tarczy kompozytowej S25/Cs100 po współpracy z kompozytowym trzpieniem - Duralcan  $\text{Al}_2\text{O}_3$   
 Fig. 4. The surface of the S25/Cs100 composite disk after Duralcan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pin the mating

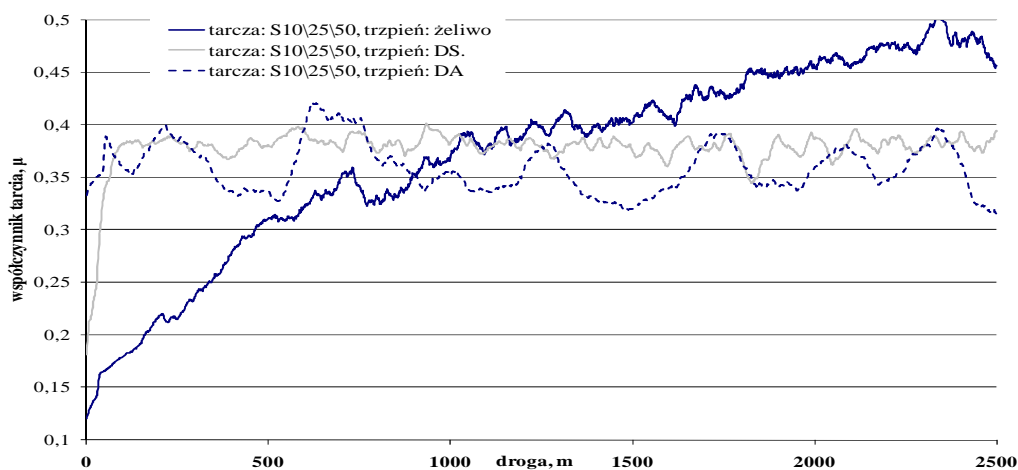


Rys. 5. Powierzchnia tarczy kompozytowej S25/Cs100 po współpracy z trzpieniem Duralcan SiC  
 Fig. 5. The surface of S25/Cs100 composite disk after Duralcan SiC pin the mating

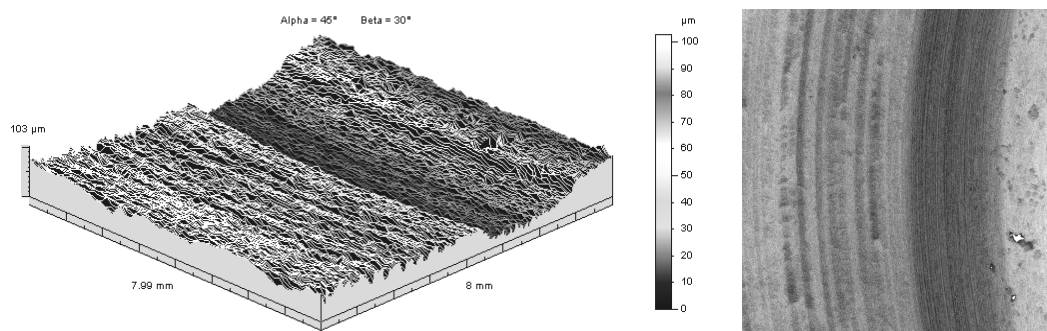




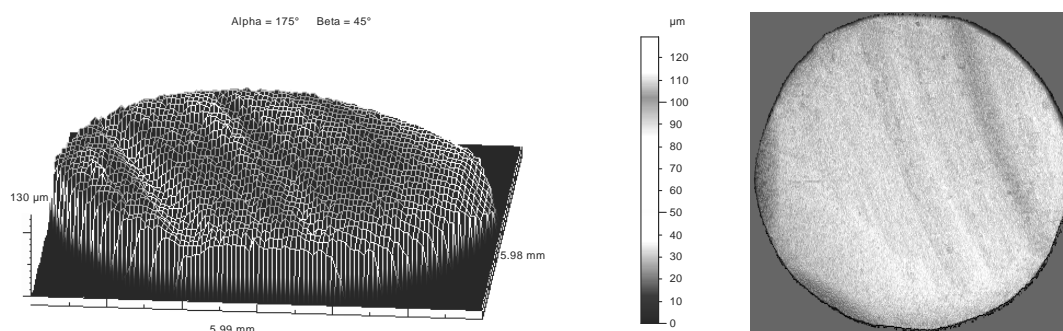
Rys. 6. Powierzchnia żeliwnego trzpienia po współpracy z tarczą kompozytową S25/Cs100  
 Fig. 6. The surface of cast iron pin after S25\Cs100 composite disk the mating



Rys. 7. Współczynnik tarcia dla kompozytu S10/25/50 po współpracy z różnymi materiałami trzpienia  
 Fig. 7. The diagrams of friction coefficient for S10/25/50 composite after mating with different pin materials

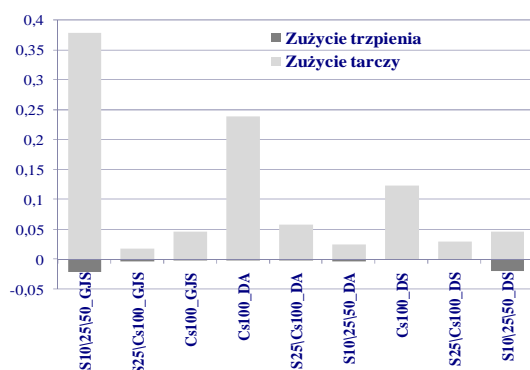


Rys. 8. Powierzchnia tarczy kompozytywnej S10/25/50 po współpracy z żeliwnym trzpieniem  
 Fig. 8. The surface of S10/25/50 composite disk after cast iron pin the mating



Rys. 9. Powierzchnia żeliwnego trzpienia po współpracy z tarczą kompozytową S10/25/50  
 Fig. 9. The surface of cast iron pin after S10/25/50 composite disk the mating

Najwyższą odporność na ścieranie, ale również stosunkowo wysokim współczynnikiem tarcia wykazuje się kompozyt S10/25/50. Warunki tarcia dla tego kompozytu są najmniej korzystne. Wysoka twardość i odporność na ścieranie współpracujących materiałów objawia się wysokim współczynnikiem tarcia. Najniższą wartość współczynnika tarcia uzyskano dla układu S25/Cs100\_GJS (poniżej 0,25), co świadczy o bardzo korzystnym wpływie grafitu (zawartego w żeliwie) i węgla szklatego (zawartego w kompozycie) na współczynnik tarcia. Równocześnie cząstki SiC zapewniają właściwą nośność powierzchni i wysoką odporność na ścieranie.



Rys. 10. Ubytek masy tarcz i trzpieni po tarcu

Fig. 10. The loss of disk's and pin's mass after the friction

Kompozyt heterofazowy jest zatem dla układów tribologicznych najkorzystniejszym rozwiązaniem. Taki układ tribologiczny można by rekomendować do zastosowań w bezsmarowych węzłach tarcia lub przy ograniczonym smarowaniu.

## PODSUMOWANIE

Stwierdzony charakter zużywania się powierzchni trących ma swoje uzasadnienie w przebiegu zmian współczynnika tarcia. Charakterystyczne zmiany współczynnika tarcia, pokazane na rysunkach 2 i 7, w połączeniu z obrazami geometrii powierzchni (rys. rys. 3-6) potwierdzają, że jednym z istotnych mechanizmów zużywania się kompozytów jest mikroskrawanie i towarzyszące mu wykruszanie cząstek z osnowy. W początkowej fazie współpracy zachodzi docieranie powierzchni (na drodze od 100 do 200 m), dalszy przebieg zmian współczynnika tarcia ma charakter oscylacyjny, co wiąże się zarówno z nierównomiernym rozmieszczeniem cząstek na powierzchni, jak i z zużywaniem powierzchni współpracujących. Najkorzystniejsze właściwości ma kompozyt S25/Cs100, który charakteryzuje się niskim współczynnikiem tarcia, a także niskim zużyciem. Pokazany na rysunku 7 przebieg zmian współczynnika tarcia dla układu S10/25/50-żeliwo wskazuje na intensywny wzrost współczynnika tarcia na drodze tarcia, podczas gdy dla pozostałych układów współczynnik tarcia po okresie docierania stabilizuje się. Wynika to

prawdopodobnie z abrazyjnego zużywania trzpienia żeliwnego. Właściwości tribologiczne kompozytów o osnowie stopu aluminium wybitnie zależą od materiału cząstek umacniających. Najkorzystniejszy zespół właściwości tribologicznych (zużycie, współczynnik tarcia) wykazuje kompozyt S25/C100, niezależnie od zastosowanego materiału przeciwpróbki. Przebieg zużycia tego kompozytu w przypadku współpracy z żeliwem jest stabilny, a stwierdzony ślad wytarcia równomierny, co świadczy o dobrym skojarzeniu tych dwóch materiałów.

## Podziękowania

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2004-2008 jako projekt badawczy PBZ-KBN-114/T08D/2004.*

## LITERATURA

- [1] Wojciechowski A., Sobczak J., Bojar Z., Pietrzak K., Ocena własności tribologicznych kompozytowych tarcz hamulcowych, *Kompozyty (Composites)* 2002, 2, 4, 223-228.
- [2] Mitko M., Tomczyński S., Struktura powierzchni kompozytu AlSi7Mg-SiC po ścieraniu, *Kompozyty (Composites)* 2003, 3, 8, 363-365.
- [3] Braszczyńska K.N., Bochenek A., Zyska A., Korelacje pomiędzy pierwotną i wtórną strukturą a własnościami kompozytów AlMg-SiC<sub>p</sub>, *Kompozyty (Composites)* 2002, 2, 4, 157-162.
- [4] Ted Guo M.L., Tsao C.-Y.A., Tribological behavior of self-lubricating aluminium /SiC/ graphite hybrid composites synthesized by the semi-solid powder-desiccations method, *Composites Science and Technology* 2000, 60.
- [5] Ames W.A., Alpas T., Wear mechanism in hybrid composites of graphite-20 pct SiC in A356 aluminium alloy (Al-7pct Si 0,3 pct Mg), *Metallurgical and Materials Transactions A* 1995, 26A, 1, 85-98.
- [6] Myalski J., Wiczorek J., Dolata-Grosz A., Ślężiona J., Właściwości tribologiczne kompozytów o heterofazowym zbrojeniu mieszaniną cząstek ceramicznych i węgla szklatego, *Kompozyty (Composites)* 2005, 5, 2, 11-16.
- [7] KBN nr 3T08D02428: Kształtowanie funkcjonalnej, warstwowej struktury odlewów kompozytowych zawierających zbrojenie heterofazowe.
- [8] Myalski J., Wiczorek J., Ślężiona J., Dolata-Grosz A., Dyżia M., Tribologiczne właściwości kompozytów zbrojonych mieszaniną cząstek ceramicznych i węgla szklatego, *Inżynieria Materiałowa* 2005, 3, 93-104.
- [9] Myalski J., Wiczorek J., Dolata-Grosz A., Tribological properties of heterophase composites with an aluminum matrix, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 15, issue 1-2, 2006, 53-57.
- [10] Dolata-Grosz A., Wiczorek J., Właściwości tribologiczne heterofazowych aluminiowych odlewów kompozytowych zawierających węgliki chromu i tytanu, *Kompozyty (Composites)* 2006, 6, 1, 26-32.
- [11] Dolata-Grosz A., Wiczorek J., Ślężiona J., Myalski J., Właściwości tribologiczne kompozytu heterofazowego odlewane go odśrodkowo, *Kompozyty (Composites)* 2007, 7, 1, 46-50.
- [12] Dolata-Grosz A., Wiczorek J., Ślężiona J., Myalski J., Tribologiczne konsekwencje segregacji zbrojenia heterofazowego wywołane odlewaniem odśrodkowym, *Inżynieria Materiałowa* 2007, 3-4 (157-158), 762-767.

