



**Anna Dolata-Grosz\*, Jakub Wieczorek, Józef Ślezionea, Jerzy Myliski**

*Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów, ul. Krasińskiego 4, 40-019 Katowice, Poland  
e-mail: \*anna.dolata-grosz@polsl.pl*

Otrzymano (Received) 09.01.2007

## WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE KOMPOZYTU HETEROFAZOWEGO ODLEWANEGO ODŚRODKOWO

Przedstawiono wyniki badań właściwości tribologicznych kompozytu z osnową aluminium (AlSi12CuNiMg2), zawierającego zbrojenie heterofazowe. Badaniom poddano kompozyt umacniany mieszaniną cząstek tlenku aluminium ( $Al_2O_3$ ) i amorficznego węgla szklatego. Węgiel szklisty w kompozycie heterofazowym zastosowano w celu modyfikacji właściwości ciernych. Badania przeprowadzono, wykorzystując tester tribologiczny T-01, w których partnerem tarcia dla kompozytu było żeliwo. W pracy oceniono wpływ heterofazowego zbrojenia na współczynnik tarcia badanych próbek kompozytowych. Dokonano również oceny wpływu rozmieszczenia cząstek zbrojących, wynikającego z parametrów przyjętej technologii wytwarzania, na współczynnik tarcia. Wyniki badań współczynnika tarcia i zużycia pozwoliły ocenić wpływ dodatku węgla szklatego na zmianę charakterystyk tribologicznych. Stwierdzono, że zastąpienie części zbrojenia cząstkami węgla szklatego spowodowało obniżenie zarówno współczynnika tarcia, jak i zużycia kompozytu heterofazowego oraz współpracującego z nim żeliwa szarego. Jednocześnie stwierdzono, że stosowanie do kształtowania wyrobów kompozytowych technologii odlewania odśrodkowego może wywołać pionowe zróżnicowanie w rozkładzie cząstek zbrojących, a co za tym idzie - różnorodne właściwości tribologiczne zależne od miejsca pobrania próbki.

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

## TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF HETEROPHASE COMPOSITE OBTAINED BY CENTRIFUGAL CASTING

The paper presents the results of the tribological properties investigations of aluminium matrix composite (AlSi12CuNiMg2), containing heterophase reinforcement. The composite reinforced with the mixture of the aluminium oxide ( $Al_2O_3$ ) and amorphous glass carbon were subjected to investigations. For the heterophase composite glass carbon was applied to modify frictional properties. The investigations were conducted with the use of tribological T-01 tester and the frictional partner for composite was cast iron. In the paper the influence of the heterophase reinforcement on the investigated composite samples friction coefficient was assessed. The assessment of the influence of the reinforcement particles distribution resulting from parameters of the adopted producing technology on the friction coefficient was also accomplished. The results of the friction coefficient and wear investigations allowed to assess the influence of the glass carbon addition on the tribological characteristics change. It was stated that the replacement of the parts of the reinforcement with the glass carbon particles caused the friction coefficient and the wear of the heterophase composite reduction and cooperating with them grey cast iron as well. 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.

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

## WPROWADZENIE

Wprowadzenie do osnowy aluminiowej cząstek ceramicznych różnego rodzaju, tzn. zastosowanie zbrojenia heterofazowego, daje możliwość uzyskania materiału kompozytowego o niekonwencjonalnych własnościach [1-6]. Zastosowanie zbrojenia heterofazowego jest rozwiązaniem pozwalającym w znacznym stopniu rozszerzyć możliwości projektowania struktury i właściwości wyrobów [4]. Na podstawie wyników badań

własnych 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 [3-6].

Właściwości każdego kompozytu są w ścisłej korelacji z jego strukturą, tzn. wielkością i udziałem obje-

tościowym fazy zbrojącej, rodzajem i typem połączenia pomiędzy komponentami, właściwościami - zarówno osnowy, jak i zbrojenia oraz rozmieszczeniem cząstek zbrojących w osnowie, kształtowaniem i związanym bezpośrednio z parametrami procesu technologicznego [7-13]. O własnościach użytkowych kompozytów heterofazowych, w tym o właściwościach tribologicznych, decydować będzie dodatkowo wzajemny stosunek ilościowy cząstek zbrojących każdego rodzaju [4, 14]. Jednak, stosując do kształtowania heterofazowych wyrobów kompozytowych technologii odlewnicze, w tym technologię odlewania odśrodkowego, należy liczyć się z faktem niezachowania proporcjonalności rozkładu zbrojenia wynikającego z różnic gęstości pomiędzy użytymi materiałami zbrojącymi. Przy zachowaniu takich samych parametrów odlewania, prędkości obrotowej, temperatury formy i temperatury zalewania różnice takie mogą powstać wskutek różnicy wielkości, a przede wszystkim własności fizykochemicznych cząstek użytych do zbrojenia stopu osnowy.

## CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem zrealizowanych badań była ocena różnic występujących we właściwościach tribologicznych na przekroju kompozytu heterofazowego, zbrojonego mieszaniną cząstek tlenku glinu ( $Al_2O_3$ ) i węgla szklanego (Cs), ukształtowanego w procesie odlewania odśrodkowego.

Zakres badań obejmował:

- wytworzenie zawiesiny kompozytowej;
- odlanie odśrodkowe tulei, gwarantujące właściwe rozmieszczenie fazy zbrojącej;
- przygotowanie próbek do badań w postaci pierścieni kompozytowych i żeliwnych trzpieni;
- badanie właściwości tribologicznych: współczynnika tarcia, a także ocenę zużycia par ciernych w warunkach tarcia technicznie suchego.

## MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

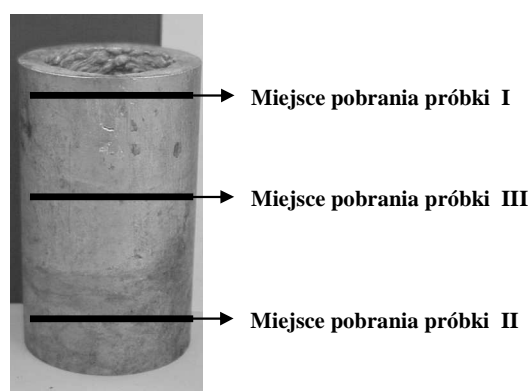
Badaniami objęto materiał kompozytowy o osnowie odlewniczego stopu aluminium  $AlSi12CuNiMg2$ , zbrojony heterofazowo mieszaniną cząstek tlenku aluminium ( $Al_2O_3$ ) o wielkości ziarna  $25\ \mu m$  i węgla szklanego o wielkości  $100\ \mu m$  (Cs) w stosunku wagowym 2:1. Stosowano 30% udział objętościowy cząstek zbrojących. Kompozyt wytworzono metodą mechanicznego mieszania i ukształtowano do postaci tulei, stosując technikę odlewania odśrodkowego [5].

Aby ocenić wpływ technologii odlewania odśrodkowego i rozmieszczenia cząstek na właściwości tribologiczne kompozytów heterofazowych (tab. 1), badania wykonano przy zachowaniu jednakowych parametrów procesu, tj.:

- pionowej osi obrotu,

- średnicy wewnętrznej formy  $60\ mm$ ,
- prędkości obrotowej formy  $500\ obr/min$ ,
- temperatury formy  $350^\circ C$ ,
- temperatury zalewania  $720^\circ C$ ,
- masy odlewu  $850\ g$ .

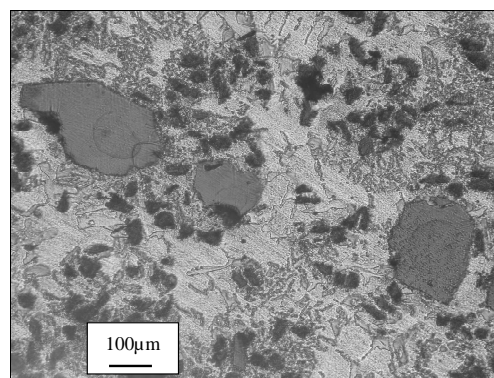
Próbki przeznaczone do badań tribologicznych uzyskano poprzez odcięcie pierścieni z dolnej, górnej i środkowej części tulei. Miejsca pobrania próbek przedstawiono na rysunku 1. Przygotowanie próbek do badań tribologicznych polegało na wycięciu z odlanych tulei pierścieni, które po szlifowaniu i polerowaniu na papierze ściernym o ziarnistości 500 stanowiły materiał tarczy poddany badaniom tribologicznym. Jako materiał przeciwpróbki zastosowano trzpień  $\phi 6 \times 20\ mm$  wykonane z żeliwa EN-GJL-300.



Rys. 1. Widok tulei kompozytowej z miejscem pobrania próbek

Fig. 1. The view of composite sleeve with place of specimen collected

Charakterystyczną, typową strukturę badanych kompozytów przedstawiono na rysunku 1. W strukturze osnowy widoczne są większe cząstki węgla szklanego otoczone znacznie mniejszymi cząstkami tlenku aluminium.



Rys. 2. Struktura kompozytu zbrojonego heterofazowo mieszaniną tlenku aluminium i węgla szklanego

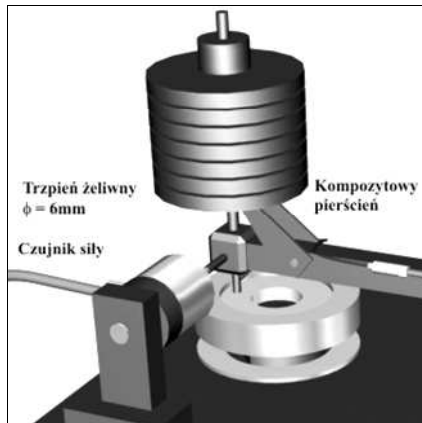
Fig. 2. The structure of heterophase composite reinforced by the mixture of the aluminium oxide and amorphous glass carbon particles

Badania tribologiczne przeprowadzono z wykorzystaniem testera T01-M, pozwalającego wyznaczyć wartość współczynnika tarcia oraz poziom zużycia materia-

łów kompozytowych we współpracy z żeliwnym trzpieniem, w warunkach tarcia technicznie suchego. Parametry próby pokazano w tabeli 1. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 3. W trakcie badania w sposób ciągły rejestrowano wartość współczynnika tarcia, a zużycie trących elementów określono jako ubytek masy po zakończonym cyklu badawczym.

TABELA 1. Parametry badań tribologicznych  
TABLE 1. The parameters used in tribological test

| Materiał przeciwpółki (trzcienia) | Żeliwo EN-GJL-300        |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Średnica trzcienia                | 6 mm                     |
| Prędkość                          | 0,7 m/s                  |
| Nacisk jednostkowy                | 4,2 MPa                  |
| Dystans tarcia                    | 3000 m                   |
| Rodzaj skojarzenia                | Tarcie technicznie suche |
| Promień tarcia                    | 23 mm                    |



Rys. 3. Widok układu pomiarowego T-01 zastosowanego podczas badań tribologicznych [5]

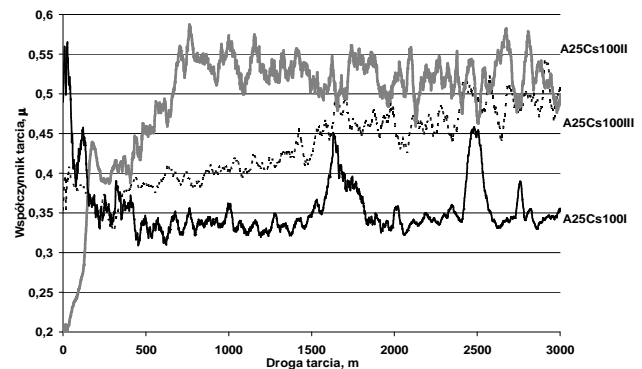
Fig. 3. View of the T-01 measuring system applied for the tribological investigations [5]

## WYNIKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Przebieg zmian wartości współczynnika tarcia w funkcji drogi tarcia dla wszystkich trzech próbek pobranych z różnej wysokości tulei jest porównywalny (rys. 4). Po krótkim okresie docierania, około 100 m, następuje okres stabilizacji jego wartości. Różnice w zarejestrowanych wartościach współczynnika tarcia wskazują, iż dla próbek pobranych z górnej części tulei kompozytowej (A25Cs100I) wartość współczynnika tarcia jest najmniejsza i wynosi średnio  $\mu = 0,33$ . Dla próbki (A25Cs100II), pobranej z dolnej części tulei kompozytowej, średnia wartość współczynnika tarcia, zarejestrowana w trakcie badania, jest o 0,2 wyższa od poprzedniej i wynosi  $\mu = 0,53$ . Natomiast dla próbki (A25Cs100III) pobranej z części środkowej tulei wartość współczynnika tarcia wynosi średnio  $\mu = 0,45$ . Dla tej próbki rejestrowano najwyraźniej widoczny trend

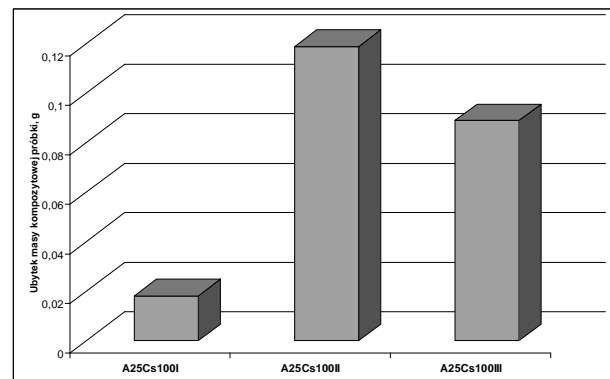
wzrostu wartości współczynnika tarcia wraz ze wzrostem drogi.

Zmierzone po badaniu ubytki masy próbek kompozytowych i przeciwpółek żeliwnych przedstawiono w formie wykresów na rysunkach 5 i 6.



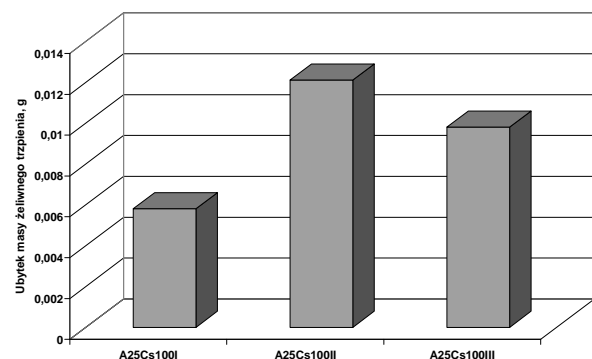
Rys. 4. Wykres zmian współczynnika tarcia w funkcji drogi dla kompozytów heterofazowych zbrojonych cząstkami  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $25 \mu\text{m}$ ) i węgla szklanego ( $100 \mu\text{m}$ )

Fig. 4. The diagram of friction coefficient shifts in function track for heterophase composites reinforced by  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $25 \mu\text{m}$ ) and glass carbon particles ( $100 \mu\text{m}$ )



Rys. 5. Ubytek masy kompozytowych pierścieni

Fig. 5. The loss of mass of composite rings



Rys. 6. Ubytek masy żeliwnych trzpieni po współpracy z kompozytem heterofazowym

Fig. 6. The loss of mass of cast iron counter after collaboration with heterophase composite

Porównując uzyskane wyniki zużycia kompozytowych próbek i żeliwnych trzpieni, można zaobserwo-

wać, że najmniejsze wartości zużycia elementów pary ciernej zmierzono dla skojarzenia żeliwo-kompozyt A25CS100I, czyli dla pierścienia kompozytowego pobranego z górnej części odlanej odśrodkowo tulei. Największą wartość zużycia zarówno trzpienia (0,0121 g), jak i pierścienia kompozytowego (0,1188 g) zmierzono dla skojarzenia żeliwo-kompozyt A25Cs100II, czyli dla pierścienia pobranego z dolnej części tulei. Wyniki te pokrywają się z przedstawionymi na wykresie różnicami w wartościach współczynnika tarcia (rys. 4).

## PODSUMOWANIE

Jak wykazały przeprowadzone badania, w trakcie projektowania procesów technologicznych i przetwarzania kompozytów heterofazowych, szczególnie na drodze odlewania odśrodkowego, należy wziąć pod uwagę fakt powstania nierównomierności rozkładu zbrojenia na wysokości otrzymanych wyrobów. W badanych układach zaobserwowano, iż zarówno zużycie elementów pary ciernej, jak i współczynnik tarcia są mniejsze dla kompozytowego pierścienia pobranego z górnej części tulei w porównaniu do wartości zarejestrowanych dla skojarzeń, gdzie kompozytowy pierścień pobrany był z dolnej lub środkowej części odlewu. O powstającej segregacji zbrojenia na przekroju podłużnym tulei kompozytowych świadczą nie tylko różnice we własnościach tribologicznych przedstawionych w pracy, ale również charakterystyczne ślady wytarcia obserwowane na powierzchniach po współpracy. Ślady zużycia i różnice występujące pomiędzy nimi przedstawiono na rysunkach 7 i 8. Strzałkami zaznaczono szerokość śladu zużycia kompozytowej tarczy.

Ślad wytarcia powstały na powierzchni próbki kompozytowej A25Cs100II, pobranej z dolnej części tulei, i ślad na współpracującym z nią żeliwnym trzpieniu przedstawiono na rysunku 7. Widoczna jest nierównomierność zużycia powierzchni trących, w połowie szerokości śladu wytarcia jest wyraźniejszy z widocznymi głębszymi bruzdami. W przypadku śladu powstałego na powierzchni kompozytu A25Cs100I, pobranego z górnej części tulei i współpracującego z nią trzpienia żeliwnego (rys. 8), nie zaobserwowano podziału śladu wytarcia na różne, co do głębokości i szerokości, strefy bruzdowania. Powierzchnie robocze były jednorodnie zużywane. Różnice rozkładu bruzdowania i intensywności zużycia obserwowane na powierzchniach po współpracy tribologicznej oraz odpowiadające im wartości współczynnika tarcia należy uznać za powstałe w wyniku segregacji zbrojenia wywołanej zastosowaniem odlewania odśrodkowego. Zróżnicowanie rozmieszczenia cząstek tlenku aluminium i węgla szklanego potwierdzono podczas badań z wykorzystaniem mikroskopii optycznej. Na podstawie przeprowadzonych obserwacji w górnych obszarach odlewu stwierdzono wzrost koncentracji cząstek węgla szklanego, z kolei w dolnych - zwię-

kszony udział cząstek tlenku aluminium. W toku dalszych badań dotyczących wpływu rozmieszczenia zbrojenia heterofazowego na właściwości kompozytów kształtowanych z wykorzystaniem metody odlewania odśrodkowego planuje się wykonanie szczegółowych badań strukturalnych z wykorzystaniem analizy ilościowej.



Rys. 7. Widok śladu zużycia kompozytowej tarczy Al25Cs100II i współpracującego z nią żeliwnego trzpienia

Fig. 7. The view of the Al25Cs100II composite disk wear track and the cast iron counter after the collaboration



Rys. 8. Widok śladu zużycia kompozytowej tarczy Al25Cs100I i współpracującego z nią żeliwnego trzpienia

Fig. 8. The view of the Al25Cs100I composite disk wear track and the cast iron counter after the collaboration

Wyniki uzyskanych badań wskazują na konieczność właściwego doboru parametrów odlewania odśrodkowego w celu uzyskania oczekiwanych właściwości tribologicznych na całym przekroju odlewanych tulei, gwarantujących równomierny, co do składu fazowego, rozkład heterofazowego zbrojenia w wyrobie.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2007 jako projekt badawczy 3 T08D 024 28.*

## LITERATURA

- [1] 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.
- [2] Ames W., Alpas A.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.
- [3] Myalski J., Wieczorek J., Dolata-Grosz A., Śleziona J., Właściwości tribologiczne kompozytów o heterofazowym zbrojeniu mieszaniną cząstek ceramicznych i węgla szklistego, *Kompozyty (Composites)* 2005, 5, 2, 11-16.
- [4] KBN nr 3T08D02428: Kształtowanie funkcjonalnej, warstwowej struktury odlewów kompozytowych zawierających zbrojenie heterofazowe.
- [5] Myalski J., Wieczorek J., Śleziona J., Dolata-Grosz A., Dynia M., Tribologiczne właściwości kompozytów zbrojonych mieszaniną cząstek ceramicznych i węgla szklistego, *Inżynieria Materiałowa* 2005, 3, 93-104.
- [6] Myalski J., Wieczorek J., Dolata-Grosz A., Tribological properties of heterophase composites with an aluminum matrix, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 2006, 15, 1-2, 53-57.
- [7] Wojciechowski A., Sobczak J., Bojar Z., Pietrzak K., Ocena własności tribologicznych kompozytowych tarcz hamulcowych, *Kompozyty (Composites)* 2002, 2, 4, 223-228.
- [8] Mitko M., Tomczyński S., Struktura powierzchni kompozytu AlSi7Mg-SiC po ścieraniu, *Kompozyty (Composites)* 2003, 3, 8, 363-365.
- [9] Braszczyńska K.N., Bochenek A., Problemy z korelacją pomiędzy strukturą a własnościami odlewanych kompozytów metalowych umacnianych cząstkami ceramicznymi, *Kompozyty (Composites)* 1(2001)1, 28-31.
- [10] Wieczorek J., Dolata-Grosz A., Dynia M., Śleziona J., Właściwości tribologiczne kompozytowych materiałów o osnowie stopu aluminium AK12 zbrojonych cząstkami ceramicznymi, *Kompozyty (Composites)* 2, 2002, 207.
- [11] Posmyk A., Śleziona J., Dolata-Grosz A., Wieczorek J. Reibungs- und Schmierungsverhalten von Aluminium - legierungen mit einem verstärkten Oberflächenbereich, *Technische Akademie Esslingen, 12<sup>th</sup> International Colloquium January 11-13, 2000, Tribology 2000 - Plus, vol. III, 1591-1598.*
- [12] Dolata-Grosz A., Śleziona J., Wieczorek J., Dyzia M., Structure and functional quality properties of composites sleeves obtaining by centrifugal casting, *Acta Metallurgica Slovaca* 2002, 8, 2, 283-288 .
- [13] Bober A., Konopna Z., Zyska A., Łągiewka M., Nocuj S., Zużycie trybologiczne kompozytu na osnowie zgaru stopu AK132 umacnianego cząstkami SiC, *Archiwum Odlewnictwa*, 6, 22, 71-76.
- [14] Dolata-Grosz A., Wieczorek J., Śleziona J., Myalski J., Tribologiczne konsekwencje segregacji zbrojenia heterofazowego wywołane odlewaniem odśrodkowym, *Inżynieria Materiałowa* 2007 (w druku).