

**Jerzy MYALSKI\* , Jakub WIECZOREK\***

**KOMPOZYTY O OSNOWIE METALOWEJ  
ZAWIERAJĄCE CZĄSTKI WĘGLA SZKLISTEGO  
WYKORZYSTANE DO PRACY W WARUNKACH  
TARCIA**

**METAL MATRIX COMPOSITES CONTAINING A GLASSY CARBON  
PARTICLES USED TO WORK IN FRICTION CONDITIONS**

**Słowa kluczowe:**

węgiel szklisty, kompozyty metalowe umacniane cząstkami, współczynnik tarcia, zużycie, właściwości mechaniczne

**Key words:**

glassy carbon, metal matrix composite, coefficient of friction, wear, mechanical properties

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości tribologicznych materiałów kompozytowych na osnowie stopu aluminium zawierających cząstki węgla o strukturze amorficznej. Do modyfikacji właściwości tri-

---

\* Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katedra Technologii Materiałów, e-mail: Jerzy.Myalski@polsl.pl.

bologicznych użyto węgla szklanego uzyskanego w procesie pirolizy żywicy fenolowo-formaldehydowej. W badaniach starano się określić czynniki decydujące o tym, czy węgiel szklany może być wykorzystany jako komponent decydujący o właściwościach tribologicznych. Ocena przydatności węgla szklanego w kompozytach została dokonana na podstawie badań podstawowych właściwości mechanicznych oraz badań współczynnika tarcia i zużycia. Dokonano oceny wpływu wielkości i udziału zbrojenia charakterystyki tribologiczne (współczynnik tarcia i zużycie) i podstawowe właściwości mechaniczne (wytrzymałość na rozciąganie i uderzenie). Badania współczynnika tarcia wykazały, że ze wzrostem ilości zbrojenia (od 5 do 20%) następuje obniżenie współczynnika tarcia z 0,4 dla udziału 5% do około 0,12 dla udziału 20%. Również wielkości cząstek (w badaniach wykorzystano cząstki 80–200  $\mu\text{m}$ ) ma wpływ na współczynnik tarcia. Cząstki o wielkości 200  $\mu\text{m}$  pozwalają na uzyskanie porównywalnych wartości współczynnika tarcia, w niewielkim stopniu zależnych od udziału zbrojenia. Wielkość cząstki wpływa na procesy związane z zużyciem wynikające z wyrywania i wykruszania zbrojenia z osnowy.

## WPROWADZENIE

Uzyskanie określonych cech użytkowych w przypadku grupy materiałów materiały przeznaczonych do pracy w węzłach tarcia związane jest z podstawowymi charakterystykami tribologicznymi (stabilność współczynnika tarcia, odporność na zużycie), charakterystykami materiałowymi (stabilność mechaniczna, chemiczna, termochemiczna), ale również dotyczą takich charakterystyk fizycznych, jak wysoka temperatura topnienia, wysoki współczynnik przewodzenia ciepła, niski współczynnik rozszerzalności cieplnej, duża wartość ciepła właściwego [L. 1, 2]. Dodatkowo zróżnicowane cechy konstrukcyjne i warunki pracy w maszynach roboczych i pojazdach muszą być dostosowane do coraz większych obciążeń mechanicznych i termicznych elementów pary ciernej. Przyczyniło się to do opracowania bardzo szerokiego zestawu wyspecjalizowanych materiałów, w tym materiałów kompozytowych, przeznaczonych na elementy węzła tarcia. Opracowane w ostatnich latach kompozyty aluminiowe umacniane cząstkami lub włóknami ceramicznymi przyczyniły się do znaczącej poprawy właściwości mechanicznych aluminium i ich stopów [L. 3, 4].

W pracy podjęto próbę kształtowania właściwości osnowy aluminiowej poprzez wprowadzenie węgla szklanego w celu uzyskania określonych wartości współczynnika tarcia i zużycia. Cechy fizyczne węgla szklanego, takie jak wytrzymałość, twardość, kruchość, temperatura destrukcji termicznej, dobre przewodnictwo cieplne i elektryczne niezmiennące się w temperaturze podwyższonej, decydować mogą o przydatności i wyborze tego rodzaju komponentu do kształtowania właściwości kompozytu [L. 4].

Oceny przydatności węgla szklanego do modyfikacji właściwości tribologicznych dokonano na podstawie pomiaru współczynnika tarcia i zużycia oraz badań strukturalnych zachodzących w warstwie wierzchniej kompozytu.

## MATERIAŁY DO BADAŃ

Materiał do badań stanowił kompozyt na osnowie odlewniczego stopu aluminium AK12, zbrojony cząstkami węgla szklanego (WS) o różnej wielkości ziaren (<80, 80, 100, 160, 200  $\mu\text{m}$ ) i różnym udziale wagowym (5, 10, 15, 20%) w kompozycie. Przy czym określona wielkość ziarna cząstek węgla np. 100  $\mu\text{m}$  oznacza wielkość ziaren separowanych na siatach o rozmiarach oczek pomiędzy 80 a 100  $\mu\text{m}$ .

Kompozyt wytworzono technologią odlewniczą poprzez wprowadzenie cząstek metodą mechanicznego mieszania [L. 5]. Stop osnowy AK12 modyfikowano 2% ilością Mg w celu polepszenia zwilżalności materiału zbrojenia. Cząstki węgla szklanego z naniesioną powłoką zapewniającą poprawę zwilżalności i ograniczenie procesów destrukcji termicznej [L. 8] były wprowadzane do ciekłej osnowy w atmosferze argonu.

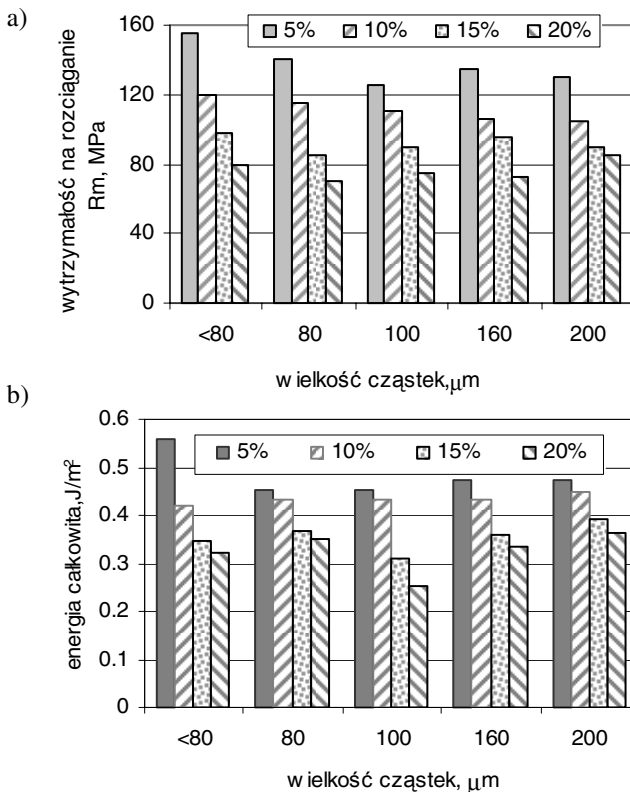
Oceny właściwości mechanicznych kompozytów dokonano na podstawie statycznej próby rozciągania wg PN EN 10002-1 oraz udarności wg PN EN 100451-1. W próbie udarowej wykorzystano oprzyrządowany młot typu Charpy, rejestrujący przebieg zmian siły działającej podczas zginania udarowego. Uzyskane informacje pozwoliły określić energię całkowitą towarzyszącą zniszczeniu, z podziałem na energię stanu sprężystego oraz energię związaną z rozwojem pęknięcia. Energia stanu sprężystego odpowiada osiągnięciu siły maksymalnej, do momentu rozwoju pęknięcia. Druga składowa energii (plastyczna) odpowiada energii związanej z rozwojem pojawiających się defektów, aż do dekohezji materiału [L. 9].

Badanie współczynnika tarcia realizowano na testerze T-01M typu trzpień-tarcza w warunkach tarcia technicznie suchego przy prędkości ob-

rotowej 0,5 m/s, obciążeniu 35 N, na drodze tarcia wynoszącej 2500 m. Przeciwpórką materiału kompozytowego (tarczy) był trzpień wykonany z żeliwa ENG JS 300 o średnicy 3 mm.

## ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki badań właściwości mechanicznych kompozytu wykazały, że wytrzymałość na rozciąganie jest przede wszystkim zależna od udziału węgla szklanego w kompozycie (**Rys. 1a**). Mniejszy wpływ na wytrzymałość ma wielkość cząstek zbrojących. Wzrost udziału wag. węgla powoduje obniżenie, w stosunku do materiału osnowy, wytrzymałości na rozciąganie i odkształcenia niszczącego.



**Rys. 1. Zależność wytrzymałości na rozciąganie (a) i energii zniszczenia (b) kompozytu AK12–węgiel szklisty od wielkości cząstek zbrojących**

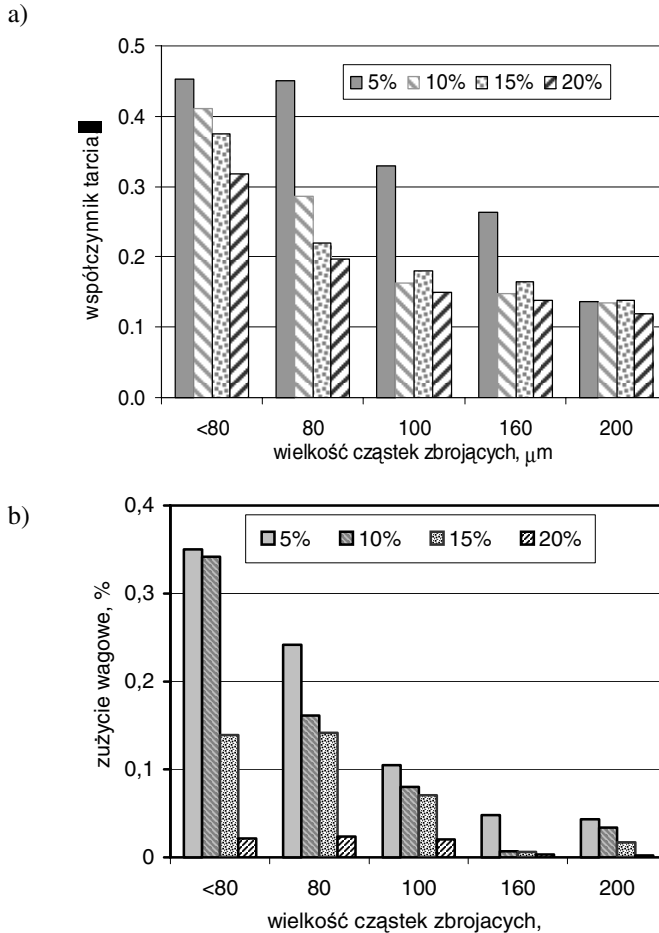
Fig. 1. Dependence of tensile strength (a) and destruction energy (b) for metal matrix AK12–glassy carbon composite as function of size particles

Największą wytrzymałość uzyskuje się przy małym (5%) udziale WS. Wynosi ona około 130–150 MPa i odkształceniu przy zniszczeniu 5–7%. Zwiększenie udziału zbrojenia do 20% wag. powoduje spadek  $R_m$  do wartości około 60–80 MPa i  $\epsilon$  do 2%. Zmiana właściwości mechanicznych w mniejszym stopniu zależna jest od wielkości zastosowanych cząstek. Cząstki małe o wielkości powyżej 80  $\mu\text{m}$  i cząstki duże 200  $\mu\text{m}$  zapewniają uzyskanie porównywalnych naprężeń niszczących. Podobnie jest w przypadku udarności kompozytu. Większy wpływ na zmianę wartości całkowitej energii zniszczenia ma udział zbrojenia niż wielkość cząstki (**Rys. 1b**). Energia zniszczenia kompozytów zawierających cząstki o wielkości powyżej 80 do 200  $\mu\text{m}$  są porównywalne przy różnym udziale cząstek zbrojących.

Analizując przebieg zmian wartości współczynnika tarcia w funkcji udziału wag. węgla szklistego, można zauważyć, iż jego dodatek w znaczny sposób obniża współczynnik tarcia i zmniejsza zużycie (**Rys. 2**). Największą wartością współczynnika tarcia  $\mu = 0,46$  charakteryzuje się kompozyt zbrojony cząstkami o wielkości poniżej 80  $\mu\text{m}$  i 5% udziale wag. WS. Najmniejszą wartość współczynnika tarcia  $\mu = 0,12$  zarejestrowano dla kompozytu zbrojonego cząstkami o średnicy 200  $\mu\text{m}$  przy 20% udziale wag. WS. Również niewielką wartość współczynnika tarcia ( $0,1 \div 0,12$ ) uzyskano dla kompozytów, w których udział wag. cząstek był większy od 10%, a ich wymiary większe od 100  $\mu\text{m}$ . W kompozytach, w których cząstki były mniejsze niż 100  $\mu\text{m}$ , nawet przy dużej zawartości komponentu zbrojącego, współczynnik tarcia osiągał wartości od  $0,3 \div 0,5$  (**Rys. 2a**).

Podane wartości dotyczą współczynnika tarcia określonego w końcowej fazie badań, a więc na drodze tarcia 2500 m.

Podobny charakter zmian zaobserwowano w badaniach zużycia (**Rys. 2b**). Zużycie zmniejsza się wraz ze wzrostem udziału cząstek zbrojących oraz ich wymiarem. Cząstki o wymiarach 160 i 200  $\mu\text{m}$  przy udziale powyżej 15% wag. znacznie ograniczają zużywanie się materiału kompozytowego. Na podstawie oceny zmian zachodzących w warstwie wierzchniej kompozytu można przypuszczać, że ograniczenie zużycia w przypadku kompozytów AK12-WS zawierających duże cząstki jest prawdopodobnie skutkiem utworzenia warstwy pośredniej z fragmentów zniszczonego w procesach tarcia węgla szklistego. Produkty zużycia tworzą pośrednią fazę spełniającą rolę smaru stałego rozdzielającego współpracujące



**Rys. 2. Zmiana współczynnika tarcia kompozytu (a) i zużycia (b) kompozytu AK12 + WS w zależności od wielkości cząstek zbrojących**

Fig. 2. Dependence of coefficient of frictions(a) and mass loss (b) composite materials AK12-galssy carbon as function of size particles

powierzchnie, podobnie jak to ma miejsce w przypadku zastosowania w kompozytach metalowych grafitu [L. 6]. Natomiast w przypadku kompozytu zawierającego mniejsze cząstki następuje ich wykruszanie i rozdrobnienie, a drobne fragmenty węgla tworzą pomiędzy współpracującymi powierzchniami ciało trzecie, mogące dodatkowo zwiększać zużycie, działając jak materiał ścierny o dużej twardości [L. 3, 7].

## PODSUMOWANIE

Wyniki uzyskanych badań pozwalają stwierdzić, że możliwe jest kształtowanie właściwości wytrzymałościowych i tribologicznych kompozytów z osnową aluminiową zawierających cząstki węgla szklanego poprzez odpowiedni wybór udziału zbrojenia i jego wielkości. Zwiększenie udziału zbrojenia wpływa przede wszystkim na obniżenie wytrzymałości na rozciąganie i energii towarzyszącej zniszczeniu udarowemu. Mniej zauważalny jest wpływ wielkości cząstek na własności wytrzymałościowe.

Zwiększenie udziału i wielkości cząstek węgla w stopie aluminium przyczynia się do zmniejszenia zużycia i obniżenia wartości współczynnika tarcia. Zmieniając udział wagowy i wielkość cząstek węgla szklanego można uzyskać kompozyt charakteryzujący się określonymi ściśle właściwościami mechanicznymi i tribologicznymi. Uzyskane po wprowadzeniu węgla szklanego do aluminium właściwości tribologiczne mogą być przeciwstawne. Jeżeli jako zbrojenie zostaną wykorzystane niewielkie ilości węgla szklanego o małych wymiarach, to kompozyt może charakteryzować się wysoką wartością współczynnika tarcia i być przydatny jako materiał stosowany w okładzinach hamulcowych. W przypadku zwiększenia zarówno wymiarów ziaren, jak i udziału cząstek zawartych w kompozycie możliwe jest uzyskanie materiału charakteryzującego się niskim współczynnikiem tarcia, przydatnego w skojarzeniach ślizgowych.

## LITERATURA

1. Sobczak J.: Współczesne tendencje praktycznego zastosowania kompozytów metalowych., *Kompozyty* 2003, nr 2, s. 24.
2. Górny. Z., Sobczak J.: Nowoczesne tworzywa odlewnicze na bazie metali nieżelaznych 2005 ZA-PIS Kraków.
3. Kunze J.M., Bampton C.C: Challenges to Developing and Producing MMCs for Space Applications *Journal of Metal*, 2001, April, s. 20.
4. Myalski J.: Kształtowanie właściwości skojarzeń ciernych z wykorzystaniem materiałów ciernych zawierających węgiel o strukturze amorficznej, *Kompozyty* 2001, nr 1; s. 203.
5. Śleziona J., Hyla I., Myalski J.: Formation of layers structure in Al-ceramic particles composites, *Science and Engineering of Composite Materials*, v. 7, no 4, 1998, p. 287.

6. Shrama S.C., Girish B.M., Kamath R., Stathis B.M.: Graphite particles reinforced ZA-27 alloy composite materials for journal bearing applications. *Wear* 1998, vol. 219, s. 162.
7. Mitko M., Tomczyński S.: Struktura powierzchni kompozytu AlSi7Mg-SiC po ścieraniu. *Kompozyty* 2003, vol. 8, nr 3, s. 363.
8. Ślężiona J.: Uwarunkowania technologiczne wytwarzania zawiesin kompozytowych typu Al-SiC. *Innowacje w odlewnictwie*, wyd. Instytutu Odlewnictwa, Kraków, 2007, s. 181.
9. Myalski J., Ślężiona J.: Kompozyty metalowe zbrojone cząstkami węgla szklanego. *Przegląd Odlewnictwa*, 2005, nr 1, tom 55, s. 24.

*Badania realizowane w ramach Projektu nr POIG.0101.02-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez UE ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*

**Recenzent:**  
**Zbigniew PAWELEC**

## Summary

**The results of the physicochemical properties of composite materials containing ceramic particles of carbon of amorphous structure are presented. The influence of the size and reinforcement value on tensile strength, impact, and tribological characteristics (the coefficient of friction and wear) were estimated. It was found that the reinforcement value primarily defines mechanical properties. The enlargement of particle values leads to the decreasing of tensile strengths and impact strengths. The research on the coefficient of friction proved, that an increase of the reinforcement value leads to a decrease in the coefficient of friction from 0.4 for 5% value to about 0.12 for 20% of particle value. It has been also proved that the size of particles has some influence on the coefficient of friction. The coefficient of friction is comparable for the composites containing particles of 200  $\mu\text{m}$  size and has little dependence on the reinforcement value. The reason are the changes in surface area of composite, being the result of pulling out and crumbling out the reinforcement from the matrix.**