

**Jerzy MYALSKI**

Politechnika Śląska,

Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów, Katowice

## **WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE KOMPOZYTÓW Z OSNOWĄ POLIMEROWĄ, ZAWIERAJĄCYCH WĘGIEL SZKLISTY**

### **Słowa kluczowe**

Kompozyty ślizgowe, węgiel szklisty, współczynnik tarcia, zużycie, mechanizm zużycia, właściwości mechaniczne, technologia otrzymywania.

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych i tribologicznych materiałów z osnową polimerową, zawierających węgiel szklisty. Jako komponent modyfikujący właściwości ślizgowe zastosowano węgiel szklisty. Na podstawie badań współczynnika tarcia i zużycia określono wpływ udziału węgla szklistego, technologii otrzymywania na współczynnik tarcia i zużycie w różnych skojarzeniach ciernych. Na podstawie badań mikroskopowych określono mechanizmy zużywania się kompozytu zawierającego węgiel szklisty.

### **Wprowadzenie**

W dotychczas stosowanych kompozytach o określonych właściwościach ślizgowych jako komponent węglowy stosowany jest przede wszystkim grafit, natomiast nie wykorzystywano jako komponentu cząstek węgla o strukturze bezpostaciowej (węgiel szklisty). Węgiel szklisty otrzymywany w procesach wysokotemperaturowych CVD lub CVI ze związków węglowodorowych lub w wyniku procesów wysokotemperaturowej pirolizy prekursorów polimero-

wych, cechuje się wysoką twardością, wysoką odpornością termiczną, wysoką przewodnością cieplną, bardzo niskim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej i odpornością na szoki termiczne [1, 2]. Węgiel szklisty jest wykorzystywany jako materiał do pracy w podwyższonej temperaturze, w środowiskach silnie korodujących (metalurgia, przemysł chemiczny), jako składnik materiałów hamulcowych w samolotach, szybkich pociągach.

Korzystny wpływ węgla szklistego na właściwości tribologiczne materiału cierne (okładziny ciernej wykorzystywanej w układach hamulcowych pojazdów samochodowych) został wykazany między innymi w pracach własnych [3, 4]. Węgiel szklisty wprowadzony do cierne materiału z osnową polimerową zapewnił stabilność współczynnika tarcia w temperaturze podwyższonej, ograniczając w znacznej mierze tzw. fading temperaturowy, a także powodował wzrost odporności na zużycie i podwyższenie wytrzymałości mechanicznej okładziny. Równocześnie dodatek węgla szklistego obniżył wartość współczynnika tarcia okładziny oraz wpływał korzystnie na przebieg zniszczenia powierzchni warstwy wierzchniej przeciwpróbki [4, 5].

Przedmiotem niniejszej pracy była ocena przydatności węgla szklistego jako składnika kształtującego właściwości materiałów ślizgowych z osnową polimerową. Określone zostały warunki technologiczne otrzymywania kompozytu z osnową polimerową zawierającego cząstki węgla o strukturze amorficznej oraz podstawowe właściwości tribologiczne tego kompozytu, tj. współczynnik tarcia i zużycie cierne.

## 1. Materiały do badań

Do wytworzenia próbek wykorzystano technologię prasowania, stosując jej dwie odmiany – bezpośrednie wprowadzanie do ciekłej osnowy komponentów i następnie prasowanie (technologia I) oraz mieszanie żywicy fenolowej w stanie częściowo utwardzonym (stan rezitolu) z komponentami i prasowanie (technologia II). Zastosowano standardowe ciśnienia prasowania około 20 MPa i temperaturę ok. 160°C. Dla wytworzonych materiałów przeprowadzono badania właściwości mechanicznych. Skład badanych materiałów oraz wyniki badań właściwości mechanicznych podane zostały w tabeli 1.

Wyniki badań właściwości mechanicznych wykazały, że wytrzymałość na zginanie i udarność zależna jest od udziału węgla szklistego (WS). Dobrą wytrzymałość na zginanie uzyskano z udziałem WS – 50÷60%. Jednakże kompozyty zawierające jedynie węgiel szklisty cechowały się niską udarnością. Poprawę udarności kompozytu uzyskano po wprowadzeniu napełniaczy: grafitu oraz grafitu płatkowego i mosiądzu. Kompozyty zawierające mosiądz i grafit charakteryzowały się największą wytrzymałością na zginanie i zadowalającą udarnością. Również sposób wprowadzania węgla szklistego, rodzaj zastosowanej technologii może przyczyniać się do zmiany właściwości mechanicznych. Ko-

rzystniejsze jest mieszanie wszystkich komponentów z żywicą fenolową FF, będącą w stanie rezolu (technologia I), a nie rezitolu.

Tabela 1. Właściwości mechaniczne badanych materiałów

Kompozyt osnowa + węgiel szklisty	Oznaczenie	Rg, MPa	U, kJ/m <sup>2</sup>
FF-50%WS (technologia I)	<b>B</b>	47,8	2,2
FF-60% WS (technologia I)	<b>C</b>	56,4	3,4
FF-75% WS (technologia I)	<b>H</b>	34,8	1,2
FF-50%WS (technologia II)	<b>E</b>	16,8	0,8
FF-60% WS (technologia II)	<b>A</b>	27,0	0,8
FF-75% WS (technologia II)	<b>D</b>	43,9	2,0
Kompozyt osnowa+ węgiel szklisty + napętniacze	Oznaczenie		
FF-50% WS + grafit (technologia I)	<b>I</b>	37,0	1,98
FF-50% WS + grafit płatkowy (technologia I)	<b>F</b>	58,4	3,6
FF-50% WS + grafit + mosiądz (technologia I)	<b>G</b>	70,9	2,6

## 2. Badania właściwości tribologicznych

Badania przeprowadzono na testerze T01 w następujących warunkach:

- tarcie technicznie suche w powietrzu o wilgotności względnej 60%;
- temperatura  $t = 23^{\circ}\text{C}$ ;
- prędkość trzpienia względem tarczy  $v = 0,5 \text{ m/s}$ ;
- obciążenie na trzpieniu  $Q = 35 \text{ N}$ ;
- droga tarcia  $s = 2500 \text{ m}$ .

W ramach badań dokonano pomiaru współczynnika tarcia, ubytku masy trzpienia i tarczy oraz temperatury w pobliżu strefy tarcia (metodą stykową). Wyniki przedstawiono w tabelach 2, 3, 4 zależności od rodzaju zastosowanego jako przeciwpróbka trzpienia. W badaniach wykorzystano trzpienie żeliwne (żeliwo EN GJL-300), stalowe (stal typu X4CrNi 18 8), z brązu (B100). Powierzchnie robocze próbek i przeciwpróbek były szlifowane na papierze ściernym o ziarnistości 500 dla trzpienia i 320 dla materiałów kompozytowych zawierających węgiel szklisty (WS).

## 3. Wyniki badań

Przeprowadzone badania współczynnika tarcia i zużycia w skojarzeniu z żeliwem EN GJL-300 wykazały, że wartość współczynnika tarcia jest zależna od udziału węgla szklistego. Wartość współczynnika tarcia dla materiałów zawierających węgiel szklisty mieści się w przedziale  $0,15 \pm 0,25$  (tab. 2). Przy zawartości 60% WS uzyskano najniższą wartość współczynnika tarcia. Zużycie próbki i przeciwpróbki było bardzo małe i wynosiło maksymalnie 40 mg. Ubytek masy

trzczenia żeliwnego zmieniał się od 0 do 0,5 mg. Wpływ na właściwości tribologiczne ma również technologia formowania materiałów. Korzystniejsze jest zastosowanie technologii krezolowej, polegającej na wymieszaniu węgla szklatego i napełniaczy z ciekłą żywicą fenolowo-formaldehydową (technologia I). Początkowe wartości współczynnika tarcia są w obu wybranych technologiach podobne, ale w kompozytach uzyskanych z fazy rezitolowej (technologia II) współczynnik tarcia rośnie wraz ze zwiększaniem się drogi tarcia do wartości nawet 0,3. Dlatego też w badaniach kompozytów zawierających dodatkowo napełniacze (grafit, mosiądz) zastosowano technologię rezolową (I). Z zastosowanych napełniaczy grafit typu płatkowego powoduje obniżenie współczynnika tarcia (próbka F). Niewielkie obniżenie współczynnika tarcia zauważono w początkowym okresie współpracy po domieszczeniu proszku mosiądzu, do kompozytu G.

Tabela 2. Właściwości tribologiczne badanych materiałów w skojarzeniu z żeliwem

Oznaczenie	Ubytek masy kompozytu, mg	Ubytek masy przeciwpróbki, mg	Współczynnik tarcia
<b>B</b>	5,9	0,1	0,13±0,17
<b>C</b>	1,7	0,1	0,12±0,22
<b>H</b>	1,2	0,3	0,15±0,13
<b>E</b>	3,7	0,2	0,15±0,22
<b>A</b>	1,7	0,2	0,13 ±0,35
<b>D</b>	1,5	0,1	0,13±0,20
<b>I</b>	1,1	0,3	0,16±0,14
<b>F</b>	3,5	0,2	0,12±0,18
<b>G</b>	31,2	0,2	0,13±0,25

Podobne wyniki uzyskano we współpracy kompozytów ze stalą. Współczynnik tarcia przy ilości węgla powyżej 50% (kompozyt C,H) osiągnął wartość 0,10±0,13 i był stabilny podczas badania. Ubytek masy kompozytów był jeszcze mniejszy niż w przypadku skojarzeń z żeliwem. Zwiększył się natomiast ubytek masy trzcienia, co było prawdopodobnie związane ze zwiększeniem zużycia ściernego w materiale stalowym charakteryzującym się mniejszą twardością niż żeliwo (tab. 3).

Zmniejszenie zużycia trzcienia z żeliwa w stosunku do stali może być również spowodowane obecnością w żeliwie wydzieleń grafitu, które jako produkty zużycia mogą osadzać się na współpracujących materiałach jako warstwa smaru stałego, łagodząc skutki tarcia i zużycia.

Tabela 3. Właściwości tribologiczne badanych materiałów w skojarzeniu ze stalą

Oznaczenie	Ubytek masy kompozytu, mg	Ubytek masy przeciwpróbki, mg	Współczynnik tarcia
<b>B</b>	0,05	3,4	0,25±0,13
<b>C</b>	0,05	4,5	0,12±0,26
<b>H</b>	0,0	3,7	0,10±0,13
<b>E</b>	0,1	4,0	0,10±0,26
<b>A</b>	0,05	3,4	0,25±0,13
<b>D</b>	0,1	1,6	0,13±0,11
<b>I</b>	0,2	8,6	0,12±0,16
<b>F</b>	0,1	2,5	0,08±0,14
<b>G</b>	0,0	2,1	0,11±0,15

Tabela 4. Właściwości tribologiczne badanych materiałów w skojarzeniu z brązem

Oznaczenie	Ubytek masy kompozytu, mg	Ubytek masy przeciw próbki, mg	Współczynnik tarcia
<b>B</b>	0,2	4,0	0,18±0,13
<b>C</b>	0,1	1,5	0,24±0,22
<b>H</b>	1,0	2,5	0,20±0,13
<b>E</b>	0,25	1,6	0,20±0,15
<b>A</b>	0,1	3,0	0,26±0,18
<b>D</b>	0,2	6,3	0,20±0,14
<b>I</b>	1,1	2,2	0,18±0,13
<b>F</b>	0,5	-0,1	0,17±0,16
<b>G</b>	0,0	1,4	0,18±0,15

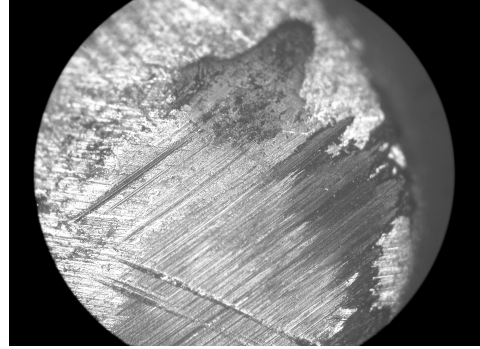
Natomiast w skojarzeniu kompozytów z trzpieniem wykonanym z brązu zaobserwowano dość znaczny wzrost współczynnika tarcia (tab. 4). Poziom współczynnika tarcia był prawie dwukrotnie większy niż przy współpracy ze stalą i żeliwem. Najniższą wartość współczynnika tarcia uzyskano przy zawartości węgla wynoszącej 50% (kompozyt B) oraz kompozytów zawierających grafit (I) oraz grafit i mosiądz (G).

Przyczyną takiej zmiany charakterystyk tribologicznych może być pojawienie się na powierzchni współpracujących elementów węzła tarcia produktów zużycia. Na powierzchniach ślizgowych kompozytów nanosił się materiał trzpienia z brązu w postaci czerwonego, błyszczącego paska o szerokości zbliżonej do średnicy trzpienia (rys.1), a na trzpieniu wyraźne są ślady zużycia i niewielkie ilości produktów zużycia kompozytu w postaci czarnych plam na powierzchni trzpienia (rys. 2) świadczący o procesach przenoszenia produktów

zużycia zarówno tarczy, jak i trzpienia [6]. Natomiast przy współpracy ze stałą lub żeliwem nie zauważono pojawiania się produktów zużycia na powierzchni kompozytów (rys. 3), ale jedynie na powierzchni trzpienia (rys. 4).



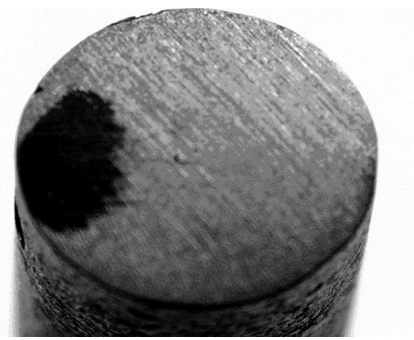
Rys. 1. Powierzchnia tarczy z kompozytu z naniesionym podczas tarcia brązem



Rys. 2. Powierzchnia tarcia trzpienia z brązu z naniesionymi produktami zużycia



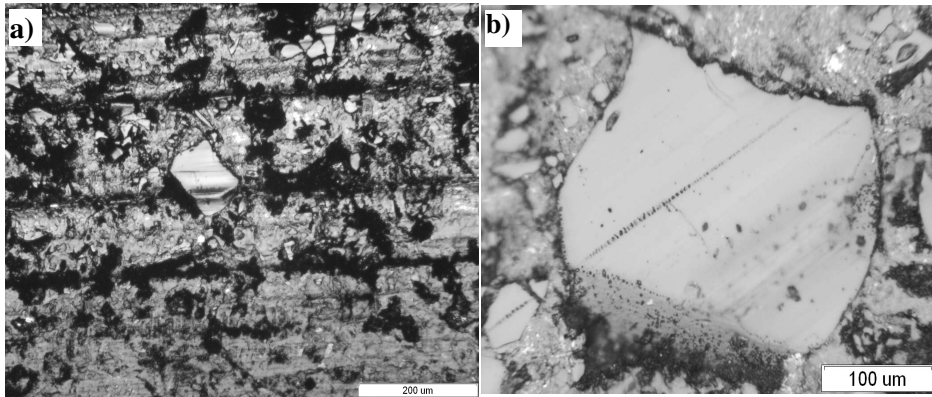
Rys. 3. Powierzchnia tarczy z kompozytu po współpracy z żeliwem



Rys. 4. Powierzchnia trzpienia żeliwnego z naniesionymi produktami zużycia

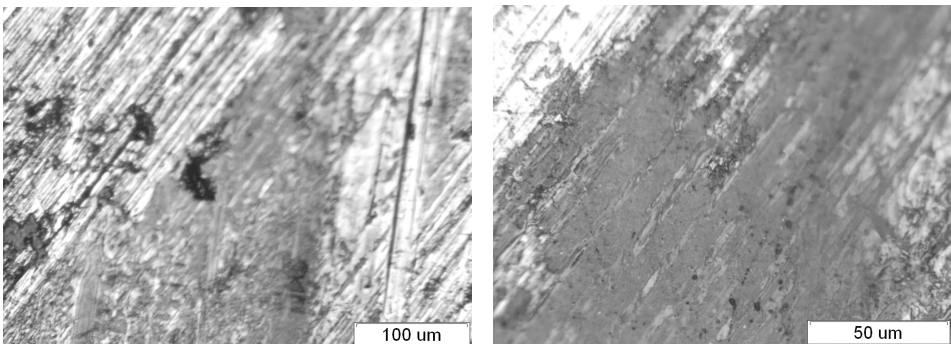
Na podstawie badań mikroskopowych struktury powierzchni kompozytów określony został mechanizm ich zużywania. Wprowadzone do kompozytu cząstki węgla szklistego ograniczają procesy zużycia ściernego. Zarysowania powierzchni kompozytu są widoczne w obszarach, w których nie występują cząstki węgla (rys. 5a). Na cząstkach węgla brak jest śladów zużycia w wyniku procesów mikroskrawania i bruzdowania (rys. 5b). Przyczyną tego jest duża twardość cząstek WS, porównywalna z twardością cząstek ceramicznych takich jak SiC czy  $Al_2O_3$  wynosząca około 3000 HV<sub>0,5</sub> [7]. Węgiel szklisty jest materiałem charakteryzującym się mniejszą wytrzymałością na ścinanie  $\tau = 30 \div 50$  MPa niż cząstki ceramiczne. Z punktu widzenia mechanicznej hipotezy tarcia Bowdena [8] materiałem korzystniejszym na skojarzenia ślizgowe będzie węgiel

szklisty. Pomimo dużej twardości nie zaobserwano znacznego zużycia materiałów przeciwpróbek, a prawie we wszystkich materiałach przeciwpróbki na trzpieniu można zauważyć ślady powstałe w wyniku skrawania i obecność produktów zużycia naniesionego na trzpień (rys. 6).

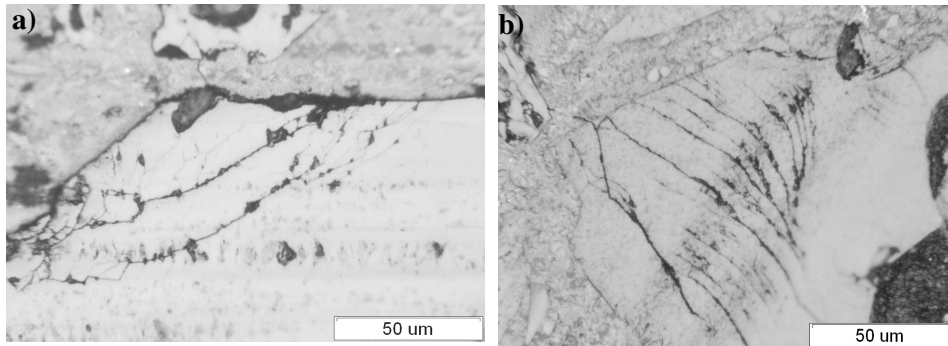


Rys. 5. a) Wygląd powierzchni tarcia kompozytu zawierającego węgiel szklisty z wyraźnymi śladami zużycia, b) wygląd cząstki węgla szklanego biorącej udział w tarcii

Prawdopodobnie jest to wynikiem niszczenia się cząstek węgla szklanego podczas tarcia. W wyniku nacisku i drgań powstałych w węźle tarcia w cząstkach węgla szklanego pojawiają się pęknięcia i zniszczenie cząstek (rys. 7). Wykruszone fragmenty cząstek jako produkt zużycia nanoszone są na powierzchnię trzpienia ograniczając jego zużywanie się.



Rys. 6. Struktura powierzchni trzpienia żeliwnego z produktami zużycia naniesionymi na powierzchnię tarcia



Rys. 7. a) Wygląd powierzchni cząstki węgla szklistego z zainicjowanym pęknięciem, b) zniszczenie cząstki węgla w wyniku tarcia

#### 4. Podsumowanie

Kompozyt zawierający jako zbrojenie cząstki węgla szklistego charakteryzuje się korzystnymi właściwościami tribologicznymi – niewielką wartością współczynnika tarcia oraz dużą odpornością na zużycie. O poziomie współczynnika tarcia decyduje udział węgla w kompozycie. Zawartość około 50÷60% WS pozwala uzyskać stosunkowo niską wartość współczynnika tarcia. Wysoka twardość i duża odporność na ścieranie węgla szklistego zmniejsza intensywność procesów zniszczenia i zużywania współpracujących z nim materiałów. Wynika to przede wszystkim z różnic mechanizmu zużycia, który sprowadza się do procesów zniszczenia w głównej mierze cząstek węgla szklistego, bez uszkodzania materiału osnowy polimerowej.

*Praca naukowa finansowana ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wykonana w ramach realizacji Planu Wieloletniego pn. „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008”.*

#### Bibliografia

1. Hutton T., McEnaney B., Crellling J.: Structural studies of wear debris from carbon-carbon composite aircraft brakes, *Carbon*, 37, 1999, 907–916.
2. Blanco F., Bermejo J., Menendez R : Chemical and physical properties of carbon an related to brake performance, *Wear*, 213.1W, 1–13.
3. Hyla I., Myalski J., Grellmann W.: Modification of polymer plastics by means of glass-like carbon additive leading to the optimisation of their tri-



- biological properties, *Mechanical Properties of Polymers*, Berlin, Verlag, 1999.
4. Myalski J., Ślężiona J.: Tribological phenomena in the outer layer of friction linings containing composite waste materials, *Euromat'99*, Monachium, 1999.
  5. Myalski J., Posmyk A.: Zum Einfluß der verkohlten Additive auf das tribologische Verhalten der in der Automobilindustrie verwendeten Friktionswerkstoffe, *12<sup>th</sup> International Colloquium Tribology 2000 Plus*, Wien, 2000, III, 1591–1598.
  6. Rymuza Z.: *Trybologia polimerów ślizgowych*, WNT, Warszawa, 1986.
  7. Myalski J.: Kompozyty cierne z osnową aluminiową o niskim współczynniku tarcia, *Kompozyty*, 4, 2002, 3–7.
  8. Ernst H., Merchant M. E.: Surface friction between metals. A basic factor in the metal cutting process. *Proceeding Special Summer Conf. Friction and Surface Finish*, Cambridge (Mass.) MIT Press, 1940, 76–85.

Recenzent:  
**Henryk LEDA**

### **Tribological properties of polymer matrix composites containing glassy carbon**

#### **Key words**

Sliding composite, glassy carbon, coefficient of friction, wear, mechanism of wear, mechanical properties, producing technology.

#### **Summary**

The results of research into the mechanical and tribological properties of polymer matrix composites containing glassy carbon particles have been shown. The glassy carbon particles in polymer matrix like components modify sliding properties. Based on the friction coefficient and wear, the influence of glassy carbon and technological parameters for different frictional conditions have been defined. In microscopy research the wear mechanism of composites has been also described.

