

**Aleksandra REWOLIŃSKA<sup>\*</sup>, Arkadiusz STACHOWIAK<sup>\*</sup>,  
Grzegorz KINAL<sup>\*</sup>, Marta PACZKOWSKA<sup>\*</sup>, Karolina PERZ<sup>\*</sup>**

## **ZJAWISKO PRZENOSZENIA MATERIAŁU W SKOJARZENIU GRAFIT EKSPANDOWANY–STAL**

### **THE PHENOMENON OF TRANSFERRING MATERIAL IN THE COMBINATION OF EXPANDED GRAPHITE–STEEL**

#### **Słowa kluczowe:**

tarcie, ruch posuwisto-zwrotny, przenoszenie materiału, grafit ekspandowany

#### **Key words:**

friction, reciprocating, transferring material, expanded graphite

#### **Streszczenie**

Celem artykułu jest identyfikacja zjawiska przenoszenia materiału w skojarzeniu pary tribologicznej grafit ekspandowany–stal w wybranych warunkach. Badanie skojarzenia materiałowego wykonano na stanowisku kulka–pierścień. Stalowa kulka poruszała się ruchem posuwisto-zwrotnym po powierzchni próbki

---

<sup>\*</sup> Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska, e-mail: aleksandra.rewolin-ska@put.poznan.pl, arkadiusz.stachowiak@put.poznan.pl, grzegorz.kinal@put.poznan.pl, marta.paczowska@put.poznan.pl, karolina.perz@put.poznan.pl.

(pierścien) z grafitu ekspandowanego. Próby wykonano na sucho oraz mokro (całkowite zanurzenie skojarzenia w wodzie). Ocenę powierzchni kulki oraz pierścienia prowadzono z wykorzystaniem metalograficznego mikroskopu optycznego firmy ZAISS. Stwierdzono, że na powierzchni kulki, zarówno podczas pracy na sucho jak i po zanurzeniu skojarzenia w wodzie powstaje warstwa grafitu. Wygląd tworzonej warstwy zależy od warunków pracy skojarzenia – warstewka utworzona w wodzie jest cieńsza niż warstwa utworzona podczas pracy na sucho. Utworzona warstwa ma wyraźną strefową budowę warstwy. Na powierzchni bocznej kulki powstają zarysowania, których mechanizm powstawania wymaga wyjaśnienia. Należy poznać mechanizm powstawania warstwy oraz warunki kształtowania tej warstewki o optymalnych właściwościach.

## WPROWADZENIE

Zjawiskiem ściśle związanym ze współpracą pary tribologicznej grafit – metal jest przenoszenie materiału. Zjawisko to polega na przenoszeniu grafitu na powierzchnię metalu w taki sposób, że po pewnym czasie skojarzenie może pracować w układzie grafit–grafit. Przedmiotem wielu badań był proces przenoszenia materiału tworzyw zawierających grafit jako wypełniacz [L. 1, 2]. Tworzywa modyfikowane grafitem tworzą na powierzchni metalowej warstwę ślizgową, która jest czynnikiem opóźniającym proces niszczenia na powierzchniach trących i zwiększa wartość iloczynu nacisków i prędkości, przy którym możliwe jest eksploatacyjne wykorzystanie badanych materiałów [L. 3]. Nie bez znaczenia okazuje się być udział grafitu jako wypełniacza w tworzywie. Zbyt duża ilość może niekorzystnie wpływać na zjawiska tribologiczne w skojarzeniu. Stopień grafityzacji tworzywa wpływa także na strukturę utworzonej warstwy ślizgowej na stalowej przeciwpróbce. Tworzywo węglowo-grafitowe o mniejszym stopniu grafityzacji (np. 35%) tworzy na powierzchni czopa warstwę ślizgową o odpowiednio mniejszej grubości i zawartości węgla w porównaniu z tworzywami o większym stopniu grafityzacji (np. 85%) [L. 3].

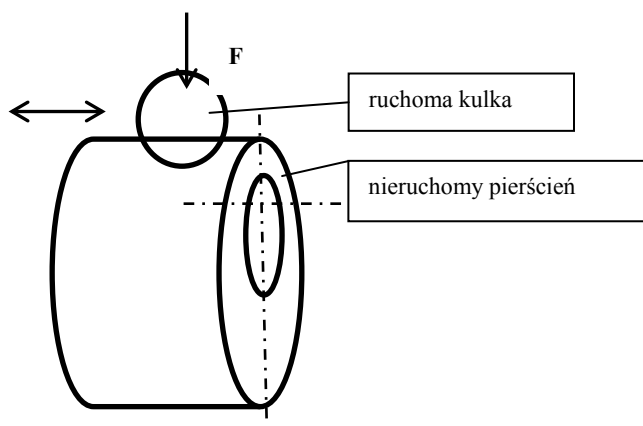
W przeciwieństwie do tworzyw modyfikowanych grafitem zjawisko przenoszenia czystego grafitu na stalową powierzchnię nie jest już tak dobrze rozpoznane. Autor [L. 4] podaje, że grafit dzięki swoim właściwościom posiada zdolność adsorbowania się na trących powierzchniach i tworzenia wytrzymałej warstewki zorientowanej w kierunku ruchu. Jednak charakter i przebieg tworzenia się warstewki zależy od wielu czynników (skojarzeń materiałowych, wymuszeń, środowiska itd.) [L. 5, 6, 9]. Autorzy [L. 7, 8], obserwując stalowe trzpienie pracujące w podwyższonej temperaturze w dławnicach zaworów w skojarzeniu z pierścieniami wykonanymi z grafitu ekspandowanego, zauważyli wpływ chropowatości powierzchni trzpienia na powstającą warstwę. W temperaturze otoczenia trudno było znaleźć korelację między powstającą

warstwą a chropowatością powierzchni trzpienia. Duża liczba czynników fizycznych i chemicznych wpływających na przenoszenie grafitu powoduje, że brakuje do tej chwili teorii opisującej kompleksowo to zjawisko. Trudne jest także ustalenie, które z elementarnych zjawisk tarcia dominuje w określonych warunkach.

Celem artykułu jest identyfikacja zjawiska przenoszenia materiału w skojarzeniu pary tribologicznej grafit ekspandowany–stal w wybranych warunkach.

## OBIEKT BADAŃ I WARUNKI WYKONANIA TESTU

Badanie skojarzenia materiałowego grafit ekspandowany–stal wykonano na stanowisku kulka–pierścień (**Rys. 1**). Stalowa kulka poruszała się ruchem posuwisto-zwrotnym po powierzchni próbki (pierścienia) z grafitu ekspandowanego. Ruch posuwisto-zwrotny kulki uzyskiwano za pomocą mechanizmu mimośrodowego. Kulka przemieszczała się na odcinku o długości 6 mm ze średnią prędkością 25 mm/s. Informacje o badanych materiałach i warunkach przeprowadzania próby przedstawiono w **Tabeli 1**. Próby wykonano na sucho oraz mokro (całkowite zanurzenie skojarzenia w wodzie).



**Rys. 1. Schemat badanego skojarzenia**

Fig 1. Scheme of analyzed friction node

Ocenę powierzchni kulki oraz pierścienia prowadzono z wykorzystaniem metalograficznego mikroskopu optycznego firmy ZAISS pracującego w układzie odwróconym wyposażonego w kamerę oraz współpracującego z komputerem i systemem komputerowej analizy obrazu o nazwie MultiScan. Zdjęcia robiono bezpośrednio po próbie, a następnie po oczyszczeniu powierzchni acetonem. Jednocześnie wykonano profil powierzchni badanych kulek.

**Tabela 1. Dane materiałowe próbki i przeciwpróbki oraz warunki przeprowadzania testów na sucho oraz w wodzie**

Table 1. Material data sample and countersample and experimental conditions

Materiał	Próbka (pierścień)  grafit ekspandowany, gęstość 1,6 g/cm <sup>3</sup>	Przeciwpróbka (kulka)		
			stal nierdzewna AISI 304	stal chromowana AISI 52100
		twardość [HRC]	25-39	58-66
		Ra [μm]	0,78; 0,70	0,040; 0,042
Wymiary [mm]	φ55x35x10	φ 8		φ 10
Warunki				
wilgotność względna [%]	temperatura [°C]	obciążenie [N]		czas trwania próby [min]
45-50	22	18,5		30

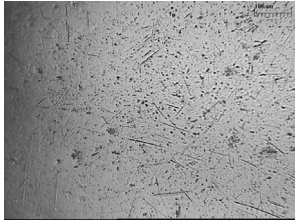
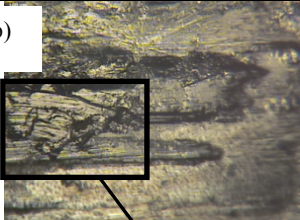
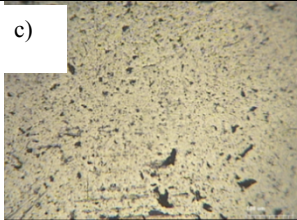
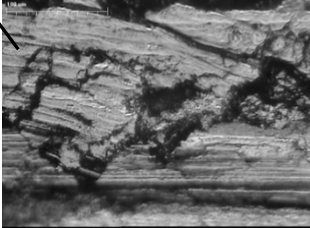
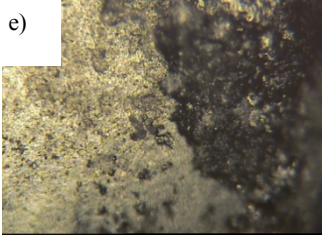
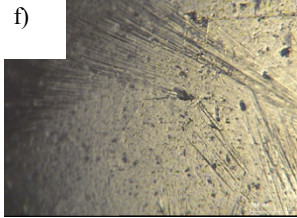
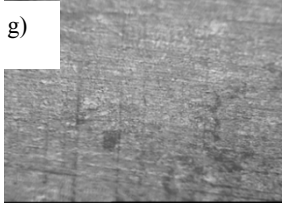
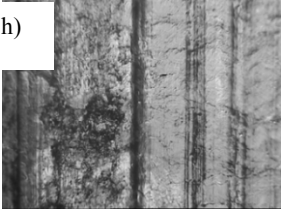
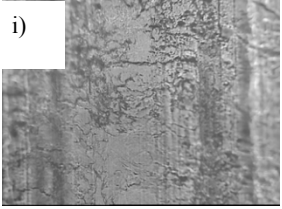
## WYNIKI BADAŃ OBSERWACYJNYCH

Pierwszą próbę wykonano „na sucho”. Kulkę oraz pierścień poddano obserwacjom pod mikroskopem optycznym. Na podstawie uzyskanych zdjęć (**Tabela 2**) stwierdzono, że:

- na stalowej kulce współpracującej z pierścieniem grafitowym widoczna jest niejednorodna warstwa (rys. b), którą tworzą produkty zużycia pierścienia; przy większym zbliżeniu widoczna jest strefowa budowa warstwy (rys. d),
- produkty zużycia widoczne są również na skraju współpracującej powierzchni oraz poza miejscem współpracy (rys. e), gdzie zostały „wyrzucone” w trakcie pracy,
- po oczyszczeniu powierzchni kulki, w miejscu współpracy z pierścieniem, wygląd powierzchni (rys. c) jest zbliżony do wyglądu powierzchni przed pracą (rys. a); brak widocznych śladów współpracy może być przyczyną dużych nacisków występujących w tym miejscu, jak również odpowiadać za taką sytuację może utworzona warstewka, która chroniła powierzchnię kuli przed zarysowaniem,
- na bocznych powierzchniach kulki widoczne są znaczne ślady współpracy z pierścieniem (rys. f); trudno wyjaśnić mechanizm powstawania zarysowań na twardszej powierzchni współpracującej z miękką,
- na powierzchni pierścienia widać wyrwania, które stanowią materiał, z którego powstała warstewka na powierzchni kulki; widoczne są także znaczne bruzdy (rys. h) oraz pęknięcia zmęczeniowe – tzw. siatka pęknięć (rys. i).

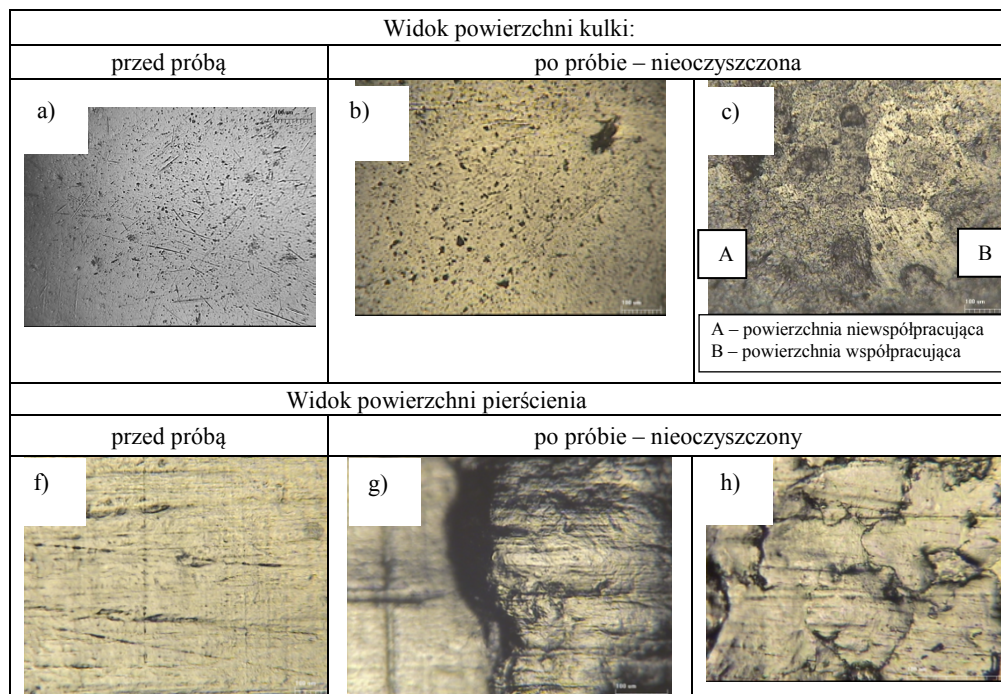
**Tabela 2. Wyniki badań obserwacyjnych kulki i pierścienia po pracy na sucho (100  $\mu\text{m}$ ) (opis w tekście)**

Table 2. Results of observational studies balls and ring after running dry (100  $\mu\text{m}$ ) (described in text)

Widok powierzchni kulki:		
przed próbą	po próbie	
	nieoczyszczona	oczyszczona
a) 	b) 	c) 
	d) 	
	e) 	f) 
Widok powierzchni próbki (pierścienia)		
przed próbą	po próbie – nieoczyszczony	
g) 	h) 	i) 

**Tabela 3. Wyniki badań obserwacyjnych kulki i pierścienia po pracy na mokro (100  $\mu\text{m}$ ) (opis w tekście)**

Table 3. Results of observational studies balls and ring after wet work (100  $\mu\text{m}$ ) (described in text)



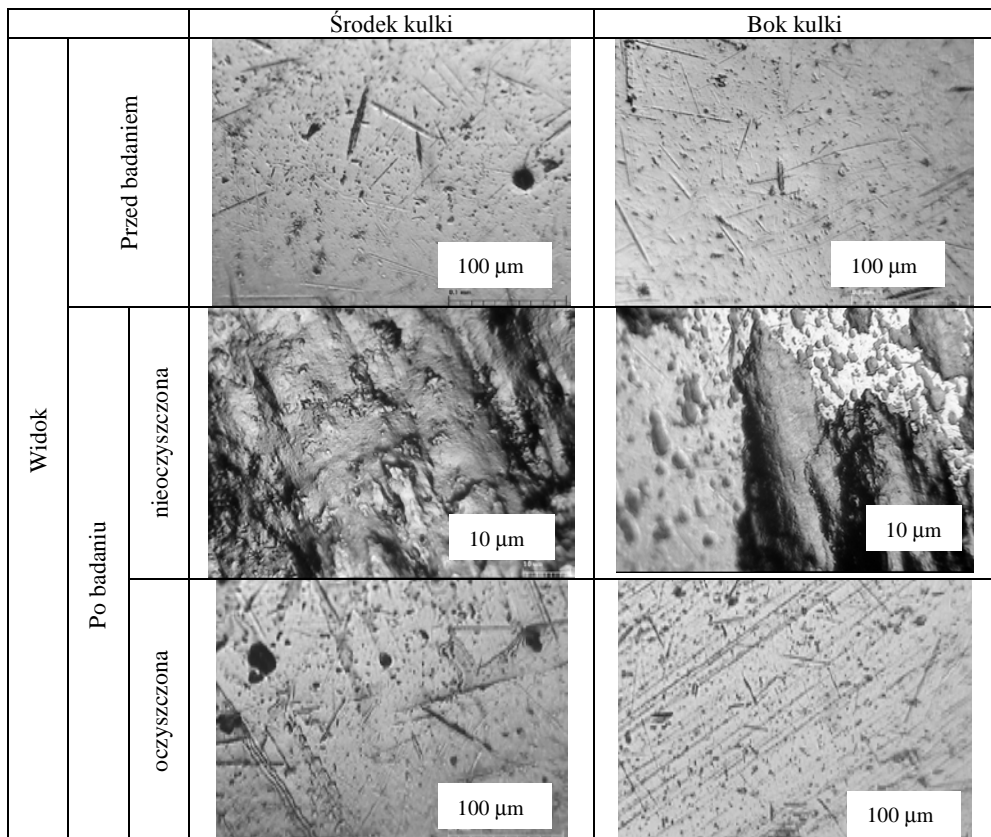
W drugim kroku badań skojarzenie pracowało w wodzie. Na podstawie obserwacji (**Tabela 3**) stwierdzono, że:

- na powierzchni kulki stalowej powstała warstwa, która jest bardzo cienka, trudna do identyfikacji (rys. b), przy większym zbliżeniu widać ślady docierania powierzchni (rys. c),
- pierścień grafitowy współpracujący z kulką posiada ślady znacznego zużycia; materiał pierścienia na skutek znacznych nacisków został wypchnięty na zewnątrz (rys. g), a szerokość powstałej „rynny” jest znacznie większa niż w przypadku współpracy na sucho,
- duża liczba produktów zużycia znajduje się poza miejscem współpracy skojarzenia; pierścień w miejscu współpracy wygląda jak gdyby woda „wchodziła” pod warstwy i następnie były one wyrywane przez kulkę pracującą w ruchu posuwisto-zwrotnym (rys. h).

Następnie przebadano kolejną kulkę wykonaną ze stali chromowanej, która pracowała z pierścieniem w warunkach pracy na sucho. Ponownie zauważalna była warstwa grafitowa, a po jej usunięciu znaczne rysy przede wszystkim na powierzchni bocznej kulki (**Tabela 4**).

**Tabela 4. Widok powierzchni stalowej chromowanej kulki przed i po badaniu na sucho (100  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ )**

Table 4. View the steel surface chrome balls before and after the test dry (100  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ )



**Tabela 5. Wyniki pomiaru chropowatości kulek pracujących w skojarzeniu z grafitem ekspandowanym na sucho oraz w wodzie**

Table 5. Results of measurement of surface roughness balls working in combination with the expanded graphite dry and in water

Pomiar chropowatości powierzchni kulki				
	przed próbą		po próbie	
	Ra [ $\mu\text{m}$ ]		Ra [ $\mu\text{m}$ ]	
na sucho	stal nierdzewna AISI 304	0,78; 0,70	z warstwą grafitu	1,25; 1,62
			po oczyszczeniu	0,56; 0,65
	stal chromowana AISI 52100	0,0400; 0,042	z warstwą grafitu	1,76; 1,86
			po oczyszczeniu	0,037; 0,040
we wodzie	stal nierdzewna AISI 304	0,69; 0,71	z warstwą grafitu	0,09; 0,11
			po oczyszczeniu	0,58; 0,54

Wykonane w kolejnym kroku profile stalowych kulek pokazały jak wygląda powierzchnia kulki z nałożoną wytworzoną warstwą oraz po jej usunięciu dla różnych materiałów oraz warunków pracy (**Tabela 5**).

## WNIOSKI

W podsumowaniu badań nad tworzeniem się warstwy ślizgowej podczas współpracy stalowej kulki z pierścieniem wykonanym z grafitu ekspandowanego można stwierdzić, że:

- na powierzchni kulki, zarówno podczas pracy na sucho, jak i po zanurzeniu skojarzenia w wodzie powstała warstwa,
- wygląd tworzonej warstwy zależy od warunków pracy skojarzenia; warstewka utworzona w wodzie jest cieńsza niż warstwa utworzona podczas pracy na sucho,
- budowa warstwy na kulce, utworzonej podczas pracy na sucho, nie jest jednorodna na całej długości; w miejscu największych nacisków warstwa jest równiejsza niż na skraju,
- utworzona warstwa ma wyraźną budowę strefową (rys. c, **Tabela 3**),
- na powierzchni bocznej kulki powstają zarysowania, których mechanizm powstawania wymaga wyjaśnienia,
- produkty zużycia będące produktami niepożądanymi i usuwanymi z miejsca pracy skojarzenia są w tym przypadku w odpowiednich warunkach czynnikiem spełniającym pozytywną rolę (**Tabela 5** – praca w wodzie),
- należy poznać mechanizm powstawania warstwy oraz warunki kształtowania tej warstewki o optymalnych właściwościach.

## LITERATURA

1. Yunxia W., Fengyuan Y.: Tribological properties of transfer films of PTFE-based composites. *Wear* 261 (2006) 1359–1366.
2. Kumar N., Dash S., Tyagi A.K., Baldev R.: Super low to high friction of turbostratic graphite under various atmospheric test conditions. *Tribology International* 44 (2011) 1969–1978.
3. Polak A.: Przenoszenie materiału w łożysku ślizgowym stal–tworzywo sztuczne. Monografia 233, Kraków 1998.
4. Krawiec S.: Kompozycje smarów plastycznych i stałych w procesie tarcia stalowych węzłów maszyn. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
5. Ilberg L., Manis-Levy H., Raveh A., Lifshitz Y., Varenberg M.: Effect of structure of carbon films on their tribological propertie, *Diamond & Related Materials* 38 (2013) 79–86.
6. Erdemir A., Donnet C.: Tribology of diamond-like carbon films: recent progres and future prospects. *J. Phys. D Appl. Phys.* 39 (2006) R311–R327.



7. Walker J.: How stem finish affects friction and fugitive emissions with graphite-based control valve packing. A technical paper presented by James Walker & Co Ltd First presented at Valve World 2010.
8. Walker J.: Analysis of surface roughness and profile parameters of graphite packing deposition on valve stems and how this influences frictional performance. A technical paper presented by James Walker First presented at Valve World 2012.
9. Optimierung von Spindelabdichtungen in Armaturen hinsichtlich Funktion und Emissionsverhalten durch Oberflächenbeschichtung (Phase II)  
FORSCHUNGSVORHABEN AiF-Nr. 17222N / VGB-Nr. 369.

## Summary

**A phenomenon closely related to cooperation tribological pair of graphite-metal is the transmission of the material. A large number of physical and chemical factors affecting the transfer of graphite cause the lack of theory describing this phenomenon. It also is difficult to determine which of the elementary frictions dominates under certain conditions. The aim of this article is to identify the relocation of the material in the combination tribological pair of expanded graphite-steel under the selected conditions. Research was carried out on post-ball-ring tester. A steel ball moved with a reciprocating motion over the surface of the sample (ring) of the expanded graphite. Tests were carried out in dry and wet (total immersion association in water) conditions. The evaluation of the surface of the ball and ring were conducted using optical microscopy (metallographic manual Zeiss). The surface of the balls, both in dry and after immersion associations in water, formed a layer of graphite. The exterior layer formed varied with the operating conditions of association; the layer formed in water was thinner than the layer formed in dry working conditions. The formed layer has a clearly layered structure. On the surface of the balls, cracks were found and the mechanism needs to be clarified. Wear products, which are products of reactions and removed from the workplace, had a beneficial role in this case, under appropriate conditions. There is a need to understand the mechanism of the formation of the layer and the layer forming conditions with optimal properties.**