

**Aleksandra REWOLIŃSKA^{*}, Marta PACZKOWSKA^{*},
Karolina PERZ^{*}, Tomasz ORŁOWSKI^{**}**

WPLYW TEMPERATURY NA ZJAWISKA TRIBOLOGICZNE WYSTĘPUJĄCE W SKOJARZENIU GRAFIT EKSPANDOWANY–STAL

THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE TRIBOLOGICAL PHENOMENON OCCURRING IN COMBINATION EXPANDED GRAPHITE–STEEL

Słowa kluczowe:

tarcie, grafit ekspandowany, stalowa tarcza, współczynnik tarcia, zużycie

Key words:

friction, expanded graphite, steel shield, coefficient of friction, wear

^{*} 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, marta.paczkowska@put.poznan.pl, karolina.perz@put.poznan.pl.

^{**} Lumag Sp. z o.o., ul. Rogozińska 72, 64-840 Budzyń, Polska, e-mail: t.orlowski@lumag.pl.

Streszczenie

Celem niniejszego opracowania jest ocena wpływu temperatury na właściwości tribologiczne skojarzenia grafit ekspandowany–stalowa tarcza. Badane skojarzenie składa się z próbek wykonanych z grafitu ekspandowanego, które współpracowały z tarczą wykonaną ze stali wysokowęglowej. Próbki wykonano z grafitu ekspandowanego w postaci taśmy, która została sprasowana. Parametry chropowatości tarczy są następujące: $R_a = 2,233 \mu\text{m}$, $R_z = 15,608 \mu\text{m}$, $R_q = 2,736 \mu\text{m}$. Badania wykonywano w różnych temperaturach. Czas trwania testu wynosił odpowiednio 30 i 60 s, a prędkość poślizgu 25 mm/s. Po zakończeniu każdego z etapów próbki ważono. Na podstawie przeprowadzonych testów określano wartości współczynnika tarcia oraz szybkość zużycia masowego próbek. W wyniku współpracy tribologicznej skojarzenia odnotowano spadek współczynnika tarcia wraz ze wzrostem temperatury. Uzyskane wartości współczynnika tarcia dla próbek wykonanych z grafitu ekspandowanego są niższe niż dla grafitu proszkowego. W zakresie stosowanych nacisków wynoszących 50 i 100 N/cm² nie odnotowano ich wpływu na współczynnik tarcia. Wykonane badania zużycia masowego próbek wskazują na potrzebę wydłużenia czasu badania. Odnotowania wymaga również fakt powstającej na powierzchni stalowej skojarzenia warstewki, która jest charakterystyczna dla współpracy stali z grafitem.

WPROWADZENIE

Grafit ekspandowany jest materiałem szeroko stosowanym w technice uszczelniania. Występuje w postaci pierścieni prasowanych lub na przykład pierścieni plecionych – jako materiał podstawowy lub dodatek. Grafit ekspandowany powstaje przez gwałtowne ogrzanie grafitu interkalowanego silnymi utleniaczami. Najczęściej stosowanymi interkalatami do wytwarzania ekspandowanego grafitu są kwasy siarkowy i azotowy. Powstające porowate ziarna przypominające harmonijki mają niską wytrzymałość mechaniczną [L. 1, 2]. Grafit ekspandowany posiada dobrą odporność termiczną od -200°C do $+2000^\circ\text{C}$. Niestety pod wpływem powietrza, pary i innych utleniaczy jego odporność termiczna maleje, dlatego też przyjmuje się, że dobre gatunki grafitu ekspandowanego mogą pracować w powietrzu do 450°C . Z kolei w parze w zastosowaniach ruchowych do 550°C , a w parze w zastosowaniach spoczynkowych, np. w zaworach, do 600°C [L. 3]. Uszczelnienia grafitowe stosowane są w połączeniach spoczynkowych oraz ruchowych, pracując zarówno w ruchu obrotowym, np. uszczelniając dławnice pomp, jak i w ruchu posuwisto-zwrotnym, np. w armaturze przemysłowej. Tak jak w zastosowaniach statycznych prościej jest przewidzieć zachowanie grafitu ekspandowanego, tak w zastosowaniach dynamicznych pojawia się wiele czynników, które decydują o trwałości uszczelnienia.

Literatura przedmiotu przedstawia wiele badań dotyczących zjawisk tribologicznych występujących w skojarzeniu grafit – stal. Badania te dotyczą przede wszystkim grafitu jako dodatku do materiałów ciernych oraz ślizgowych [L. 4–6]. Występuje on wówczas w postaci proszku pochodzenia naturalnego lub syntetycznego. Według [L. 7] grafit syntetyczny wykazuje wyższość nad naturalnym pod względem stabilności współczynnika tarcia i spadku zużycia. Ogólnie badania podają [L. 8–10], że grafit poprawia odporność na zużycie materiału współpracującego, obniża temperaturę pary ciekiej, stabilizuje współczynnik tarcia czy zmniejsza hałas.

Duży wpływ na zjawiska występujące w skojarzeniu grafit–stal ma temperatura. Badania podkreślają pozytywny wpływ temperatury na zjawiska tribologiczne występujące w skojarzeniu [L. 11–14]. Przykładowa współpraca grafitu oraz miedzi w temp. 50–80°C objawia się wyższymi wartościami współczynnika tarcia niż w temp. 80–150°C, gdzie odnotowuje się nagły spadek współczynnika. Inne badania [L. 15] pokazują, że najlepsze działanie smarujące grafit przejawia w zakresie temperatury 200÷250°C.

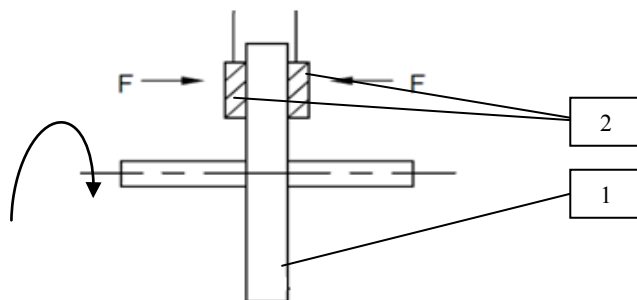
Skojarzenie grafit ekspandowany–stal nie jest już tak powszechnym tematem badań [L. 16, 17]. Z kolei zastosowanie grafitu ekspandowanego w uszczelnieniach jest bardzo powszechne. Dlatego należałoby rozpoznać zjawiska tribologiczne występujące we wspomnianym skojarzeniu. Znajomość powyższych zagadnień pozwoli w przyszłości lepiej zaprojektować i dobrać uszczelnienia do danych zastosowań.

Celem niniejszego opracowania jest ocena wpływu temperatury na właściwości tribologiczne skojarzenia grafit ekspandowany–stalowa tarcza.

BADANIA RUCHOWE SKOJARZENIA GRAFIT EKSPANDOWANY –STAL

Obiekt badań

Schemat kinematyczny skojarzenia stal–grafit ekspandowany przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Schemat badanej pary tarcia: 1 – tarcza stalowa, 2 – próbki z grafitu ekspandowanego
Fig. 1. Scheme of analyzed friction mode: 1 – steel disc, 2 – samples of expanded graphite

Badane skojarzenie składa się z próbek wykonanych z grafitu ekspandowanego, które współpracowały z tarczą wykonaną ze stali wysokowęglowej. Próbki wykonano z grafitu ekspandowanego w postaci taśmy, która została sprasowana. Parametry chropowatości tarczy są następujące: $R_a = 2,233 \mu\text{m}$, $R_z = 15,608 \mu\text{m}$, $R_q = 2,736 \mu\text{m}$.

Warunki testu

Warunki przeprowadzania testu przedstawiono w **Tabeli 1**. Czas trwania testu wynosił odpowiednio 30 i 60 s, a prędkość poślizgu 25 mm/s. Zastosowano dwie wartości nacisku 50 i 100 N/cm². Przed rozpoczęciem właściwych pomiarów badana para materiałów była docierana do czasu, gdy próbka z grafitu ekspandowanego stykała się całą powierzchnią z przeciwpróbką stalową. Zaplanowany test nr 5 nie został zrealizowany, ponieważ w temp. 600°C próbki uległy rozwarstwieniu, co uniemożliwiło wykonanie pomiarów.

Tabela 1. Warunki testu tribologicznego

Table 1. Conditions of tribological test

Etap	Temperatura [°C]	Czas [s]	Nacisk [N/cm ²]
1	25	30	50
			100
2	150	30	50
			100
3	300	60	50
			100
4	450	60	50
			100
5	600	60	50
			100

Po zakończeniu każdego z etapów próbki ważono. Na podstawie przeprowadzonych testów określano:

- wartości współczynnika tarcia: średnią, minimalną, maksymalną dla każdego z etapów,
- szybkość zużycia masowego próbek (pomiar wykonano z dokładnością do 0,001 g);

$$z_m = \frac{\Delta_m}{t} \left[\frac{\text{g}}{\text{s}} \right]$$

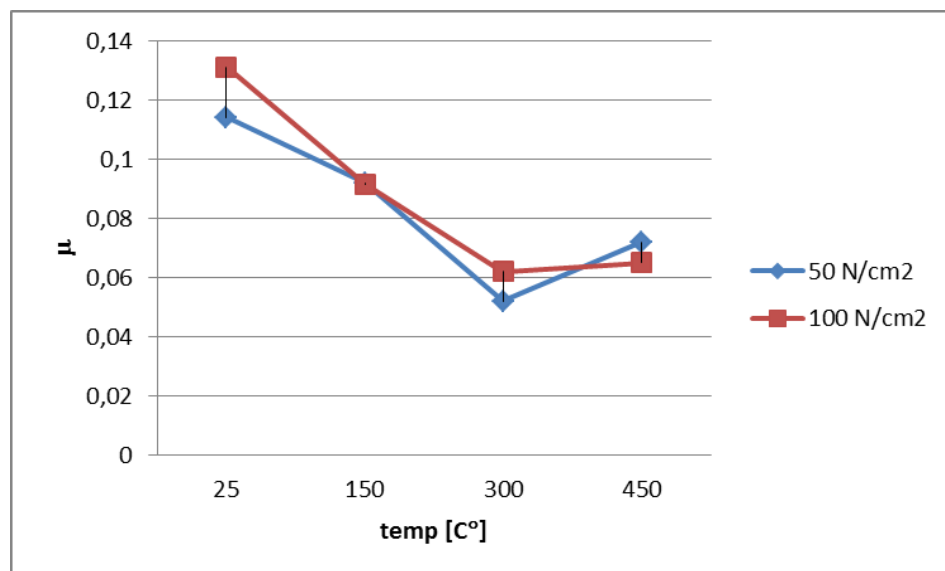
gdzie:

Δ_m – ubytek masy badanej próbki [g],

t – czas trwania próby [s].

Wyniki badań

W wyniku współpracy tribologicznej stalowej tarczy z próbkami wykonanymi z grafitu ekspandowanego odnotowano spadek współczynnika tarcia wraz ze wzrostem temperatury (**Rys. 2**).



Rys. 2. Wpływ temperatury na wartość współczynnika tarcia skojarzenia stal–grafit ekspandowany przy nacisku 50 i 100 [N/cm²]

Fig. 2. Effect of temperature on the coefficient of friction combination of steel–expanded graphite at a pressure of 50 and 100 [N/cm²]

Uzyskany w badaniach współczynnik tarcia jest mały, wynosi od 0,05 do 0,11 dla 50 N/cm² i od 0,06 do 0,13 dla 100 N/cm². Przykładowe dane literaturowe podają, że współczynnik tarcia stal–grafit wynosi od 0,3 dla temperatury otoczenia do 0,15 dla temperatury 400°C dla pracy w powietrzu. Dane te jednak dotyczą próbek wykonanych ze sproszkowanego płytkowego grafitu. W temperaturze powyżej 300°C współczynnik tarcia nieznacznie rośnie. Zniszczenie próbek w temp. 600°C uniemożliwiło wykonanie pomiarów. Potwierdzone zostały jednak dane literaturowe [L. 3], z których wynika, że grafit ekspandowany w zastosowaniach ruchowych w powietrzu poprawia warunki smarowania do około 450°C. Powyżej tej temperatury zaczyna się utleniać.

Wyniki zużycia masowego próbek w zależności od temperatury dla nacisków 50 i 100 N/cm² przedstawiono w **Tabeli 2**.

Tabela 2. Zużycie masowe próbek w zależności od temperatury pracy skojarzenia stal–grafit ekspandowany dla nacisków 50 i 100 N/cm²

Table 2. Mass consumption of samples depending on the operating temperature of association steel–expanded graphite to pressure of 50 and 100 N/cm²

Czas trwania próby [s]	30				60			
	25		150		300		450	
Temperatura [°C]								
Naciski [N/cm ²]	50	100	50	100	50	100	50	100
Zużycie masowe [g/s]	0,0013	-0,0003	0,0013	0,0007	0,004	0,0022	0,007	0,003

Do 150°C wzrost zużycia masowego jest niewielki, a w przypadku nacisków 50 N/cm² nieistotny. Powyżej tej temperatury zużycie próbek rośnie. Ponieważ jednocześnie wzrósł czas trwania próby, trudno wnioskować, który z czynników zadecydował o wzroście zużycia.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Wyniki uzyskane podczas badań tribologicznych pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków i spostrzeżeń:

- zauważalny jest wpływ temperatury na współczynnik tarcia; badania literaturowe dotyczące „klasycznego” grafitu również wskazują, że wraz ze wzrostem temperatury spada współczynnik tarcia, jednak uzyskane wartości współczynnika tarcia dla próbek wykonanych z grafitu ekspandowanego są niższe niż dla grafitu proszkowego,
- w zakresie stosowanych nacisków, wynoszących 50 i 100 N/cm², nie odnotowano ich wpływu na współczynnik tarcia; przyłożone naciski nie były jednak duże, co mogło przyczynić się do powyższego stanu; informacje literaturowe dotyczące wpływu nacisków na współczynnik tarcia w skojarzeniu stal–grafit nie są jednoznaczne,
- wykonane badania zużycia masowego próbek wskazują na potrzebę wydłużenia czasu badania; podczas badań trwających 60 s odnotowano wzrost zużycia próbek wraz ze wzrostem temperatury,
- odnotowania wymaga również fakt powstającej na powierzchni stalowej skojarzenia warstewki, która jest charakterystyczna dla współpracy stali z grafitem; ocena wzrokowa warstewki wykazała, że wraz ze wzrostem temperatury warstewka była gładzsza i równomierniej rozłożona na powierzchni stalowej przeciwpróbki; badania literaturowe nie są jednoznaczne co do czynników mających wpływ na jej powstawanie oraz procesów tribologicz-

nych zachodzących w trakcie jej powstawania, co zachęca do dalszych badań w tym kierunku.

LITERATURA

1. Pichór W., Słomka J.: Cement Wapno Beton 2011 | R. 16/78, nr 4 | 210-214 Właściwości kompozytów cementowych z dodatkiem grafitu ekspandowanego.
2. Li, Ji-hui; Feng, Li-li; Jia, Zhi-xin: Preparation of expanded graphite with 160 μm mesh of fine flake graphite Materials Letters Volume: 60, Issue: 6, March, 2006, pp. 746–749.
3. Chung D.D.L.: Review graphite, J. Mater. Sci. 37 (2002) 1475–1489.
4. Zhanga G., Rashevaa Z., Schlarbb A.K.: Friction and wear variations of short carbon fiber (SCF)/PTFE/graphite (10 vol.%) filled PEEK: effects of fiber orientation and nominal contact pressure, Wear 268 (2010) 893–899.
5. Zhang X.R., Pei X.Q., Wang Q.H.: Friction and wear studies of polyimide composites filled with short carbon fibers and graphite and micro SiO₂, Mater. Des. 30 (2009) 4414–4420.
6. Basavarajappa S., Ellangovan S., Arun K.V.: Studies on dry sliding wear behaviour of graphite filled glass-epoxy composites, Mater. Des. 30 (2009) 2670–2675.
7. Kolluri D.K., Satapathy D.K., Bijwe J., Ghosh A.K.: Analysis of load and temperature dependence of tribo-performance of graphite filled phenolic composites, Materials Science and Engineering, A 456, 2007, s. 162–169.
8. Jaworski J.: Okładziny cierne do hamulców i sprzęgieł pojazdów mechanicznych, WKŁ, Warszawa 1984.
9. Ścieszka S.: Hamulce cierne. Zagadnienia materiałowe, konstrukcyjne i tribologiczne, ITeE Radom, Gliwice 1998.
10. Nosal S., Orłowski T.: Wpływ rodzaju użytego grafitu i koksu naftowego na właściwości tarciovo-zużyciowe materiałów ciernych, Tribologia, nr 5, 2010, s. 85–93.
11. Nosov MI. Lubricating properties of molybdenium disulfide, graphite and phthalocyanine. Chem Technol Fuels Oils 1972;8(7):538–41.
12. Stanley IW. The effect of surface temperature on the friction of electrographite on copper. Brit. J. Appl. Phys. 1966;17:795–801.
13. Semenov A.P.: Tribology at high temperatures. Tribology International 28 (1), 1995, 45–50.
14. Kikuchi K., Kaburaki H., Sanokawa K.: Impurity gas effects on friction and wear of high-temperature materials for VHTRs. Nuclear Technology 66, 1984, 491–502.
15. Nicholson G.: Facts about Friction a friction material manual al most all you need to know about manufacturing, P&W Price Enterprises, Inc., Croydon 1995.
16. Roe M., Torrance A.A.: The surface failure and wear of graphite seals, Tribology International Volume: 41, Issue: 11, November, 2008, pp. 1002–1008.
17. Savchenko D.V., Serdan A.A., Morozov V.A., Van Tendeloo G., Ionov S.G.: Improvement of the oxidation stability and the mechanical properties of flexible graphite foil by boron oxide impregnation, pp. 12–18.

Summary

The aim of this article is to evaluate the effect of temperature on the tribological properties of expanded graphite works with a steel shield. The examined association was composed of samples made from expanded graphite, which cooperated with a shield made of high carbon steel. The values of roughness of the disc are as follows: $R_a = 2.233 \mu\text{m}$, $R_z = 15.608 \mu\text{m}$, and $R_q = 2.736 \mu\text{m}$. Tests were performed at different temperatures. The durations of the tests were 30 and 60 seconds, and the sliding velocity was 25 mm/s. After each step, the samples were weighed. Based on the tests, the coefficient of friction and wear rate of the samples were determined. The tribological combination decreased the coefficient of friction with increasing temperature. The resulting coefficients of friction for specimens made of expanded graphite were lower than the graphite powder. In the field of applied pressures of 50 and 100 N/cm², there was no effect on the coefficient of friction. A layer was formed on the surface of the steel, which is characteristic of graphite cooperation with steel.