

**Stanisław NOSAL\***, **Tomasz ORŁOWSKI\*\***

## **WPLYW RODZAJU UŻYTEGO GRAFITU I KOKSU NAFTOWEGO NA WŁAŚCIWOŚCI TARCIOWO- -ZUŻYCIOWE MATERIAŁÓW CIERNYCH**

### **THE INFLUENCE OF VARIOUS GRAPHITE'S AND COKES USED IN FRICTION MATERIALS ON FRICTION AND WEAR BEHAVIOUR**

#### **Słowa kluczowe:**

kompozytowy materiał cierny, smary stałe, współczynnik tarcia, zużycie

#### **Key words:**

friction materials, lubricant, friction coefficient, wear

#### **Streszczenie**

W referacie przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu grafitów naturalnych i syntetycznych o różnej zawartości węgla i granulacji oraz koksu naftowego, wprowadzonych do bazowego materiału ciernego hamulcowego, na jego zużycie oraz współczynnik tarcia. Dodawano 7,5% i 15% do receptury bazowej ww. środków smarujących. Badania tribolo-

---

\* Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: stanislaw.nosal@put.poznan.pl, tel.: (61) 6475852.

\*\* Lumag Sp. z o.o., 64-840 Budzyń, e-mail: t.orlowski@lumag.pl, tel.: (67) 2844827.

giczne wykonano ze stałym momentem hamowania na stanowisku Kraussa. Tarcza hamulcowa była wykonana z żeliwa szarego. Test tarciovo-zużyciowy trwał 4 godziny.

Najlepsze właściwości tribologiczne, zwłaszcza odporność na zużycie, wykazał materiał cierny zawierający dodatek grubego grafitu syntetycznego o zawartości węgla 99%.

## WPROWADZENIE

Materiały cierne oparte na żywicy fenolowej zwykle zawierają bardzo dużą ilość składników wzmacniających i wypełniających, takich jak włókna, materiały ściernie, spoiwa, wypełniacze i modyfikatory tarcia (stałe smary). To wyjaśnia wielką zależność ich własności od wzajemnych oddziaływań i efektów synergicznych między wielofazowymi składnikami. Dlatego bardzo ważny jest właściwy dobór komponentów, aby spełnić różne wymagania stawiane materiałom ciernym. W tych materiałach modyfikatory tarcia zwykle wywierają decydujący wpływ na ich własności cierne [L. 1]. Smary stałe są sklasyfikowane jako funkcjonalne wypełniacze, ponieważ stabilizują współczynnik tarcia do pożądanego poziomu przez ułatwianie formowania się stałego filmu smarnego. Mimo identycznego składu chemicznego, własności tarciovo-zużyciowe materiału ciernego, do którego są wprowadzone, zależą od wielkości cząstek i źródeł pochodzenia składnika [L. 2].

Oczekuje się, że materiały cierne będą spełniać różne kryteria, takie jak: odpowiedni współczynnik tarcia i jego niska wrażliwość na zmianę obciążenia, prędkości i temperatury, umiarkowanie małe zużycie, niski fading i szybkie odzyskiwanie skuteczności hamowania po fadingu, odporność na generowanie pisków, hałasów i wstrząsów, powtarzalność w produkcji, akceptowalny koszt itd. Wyroby z materiałów ciernych są dużo tańsze niż tarcze i bębny, dlatego też nie powinny w nadmierny sposób niszczyć bieżni hamulca w sposób mechaniczny czy cieplny [L. 3]. Materiały węglowe zawierające grafit, koks, sadzę i włókna węglowe są używane w znacznych ilościach (typowo 5–30%) w materiałach ciernych hamulcowych [L. 4]. Węgiel występuje w wielu odmianach alotropowych, takich jak diament, grafit, sadza, fuleryt. Od postaci, w jakiej występuje, zależą jego własności. Grafit i koks naftowy jest używany we wszystkich typach materiałów ciernych hamulcowych i sprzęgłowych, np. NAO, semimetallic, low steel, materiały spiekane, kompozyty C/C itd. Te smary poprawiają odporność na zużycie materiału ciernego i bież-

ni hamulca, obniżają temperaturę pary ciernej, stabilizują współczynnik tarcia, zmniejszają fading, hałas (dzięki porowatości) i ściśliwość.

Grafity stosowane do materiałów ciernych różnią się pochodzeniem (naturalne lub syntetyczne), czystością, krystalicznością, wielkością i kształtem cząstek, przewodnictwem cieplnym i elektrycznym itd. [L. 4]. O strukturze grafitu można powiedzieć, że jest krystaliczna i warstwowa. Między atomami węgla w warstwach istnieją silne wiązania, natomiast między warstwami wiązania są słabe. Konsekwencją warstwowej budowy grafitu oraz różnicy energii wiązań atomowych w pojedynczych warstwach i między warstwami jest znaczna anizotropia jego własności [L. 5], przejawiająca się łatwością poślizgu płaszczyzn po sobie. Dzięki temu grafit jest dobrym smarem stałym.

Ze względu na budowę krystaliczną oraz wynikające z niej własności grafit naturalny dzieli się na płatkowy (krystaliczny) i amorficzny (przemieniony). Grafit amorficzny jest powszechnie występującym rodzajem grafitu o słabo uporządkowanej strukturze krystalicznej. Nazywany jest również grafitem czarnym lub bezpostaciowym. Występuje w złożach o dużej (do 90%) zawartości węgla. Grafit płatkowy nazywany jest również srebrzystym lub krystalicznym. Jest to szlachetna odmiana grafitu naturalnego. Jego sieć krystaliczna jest niezwykle uporządkowana i odznacza się dużymi rozmiarami pojedynczych krystalitów [L. 5].

Grafit syntetyczny jest wytwarzany w procesie kalcynacji koksu naftowego w temperaturze 1000–3000°C. Charakteryzuje się wysoką zawartością węgla (od 95–99%). Klasyfikuje się go również według zawartości węgla oraz wielkości cząstek.

Koks naftowy jest to stały produkt o barwie czarnej otrzymywany podczas przeróbki ropy naftowej, najczęściej zawiera 90–95% węgla. Do materiałów ciernych najczęściej używa się koksu naftowego kalcynowanego o zawartości węgla min. 98%.

Celem referatu jest przedstawienie wpływu wybranych rodzajów grafitu i koksu naftowego na charakterystykę tarciovo-zużyciową oraz gęstość i twardość bazowego materiału cierneho o niskiej zawartości stali, spełniającego wymagania użytkowników europejskich.

## PRZEBIEG BADAŃ

### Przedmiot badań

Zastosowano materiał cierny bazowy OB o następującym składzie: wełna stalowa – 32% (wag.), napełniacze nieorganiczne – 43%, żywica fenolowa – 7,5%, środki smarujące stałe w postaci siarczków metali i mieszaniny koksu naftowego z grafitem – 10%, składniki włókniste – 7,5%. Aby określić wpływ różnego rodzaju grafitów i kokсів naftowych na własności tribologiczne materiałów ciernych, do materiału bazowego dodawano następujące środki smarujące: grafity syntetyczne, grafity naturalne krystaliczne i amorficzne oraz koksy naftowe. Powstałe receptury OB-XX-Y-1 i OB-XX-Y-2 zawierały stałą ilość środka wiążącego 7,5% oraz dodatek odpowiednio 7,5 lub 15% badanego smaru stałego oraz pozostałe składniki z receptury OB proporcjonalnie pomniejszone. Sposób przygotowania materiałów ciernych do badań był taki sam, jak opisany w referacie [L. 8]. Materiały te zestawiono w **Tabeli 1**.

### Metodyka badań

Badania tribologiczne wykonano na stanowisku firmy Krauss GmbH typ RWDC 136B [L. 8].

Do testów zastosowano hamulec tarczowy Tevesa SS 60 o następującej charakterystyce:

- średnica cylindra – 60 mm,
- średnica litej tarczy hamulcowej – 278 mm,
- grubość tarczy hamulcowej – 12,7 mm,
- materiał tarczy – żeliwo szare.

Test tribologiczny, któremu poddano materiały cierne składał się z trzynastu kroków. Przedstawiony jest on m.in. w publikacjach [L. 8, 9].

**Tabela 1. Materiały cierne użyte w badaniach**

Table 1. Friction materials used in studies

Lp.	Oznaczenie materiału ciernego	Środek smarujący		
		Typ	Opis	Ilość % wag.
1	OB-GS-1-1	9904 0-0,4	grafit syntetyczny gruby o zawart. węgla 99%	7,5
2	OB-GS-1-2	9904 0-0,4		15
3	OB-GS-2-1	9904 0-0,071	grafit syntetyczny drobny o zawart. węgla 99%	7,5

4	OB-GS-2-2	9904 0-0,071		15
5	OB-GN-3-1	PV 60-65	grafit naturalny krystal. o zawart. węgla 60–65%	7,5
6	OB-GN-3-2	PV 60-65		15
7	OB-GN-4-1	PV 80-85	grafit naturalny krystal. o zawart. węgla 80–85%	7,5
8	OB-GN-4-2	PV 80-85		15
9	OB-GN-5-1	385	grafit naturalny amorficzny	7,5
10	OB-GN-5-2	385		15
11	OB-GN-6-1	94/96	grafit naturalny kry stal. o zawart. węgla 94–96%	7,5
12	OB-GN-6-2	94/96		15
13	OB-GN-7-1	390	grafit naturalny krystaliczny bardzo drobny o zawartości węgla 94–96%	7,5
14	OB-GN-7-2	390		15
15	OB-KS-1-1	9885 0,2–0,8	koks naftowy gruby	7,5
16	OB-KS-1-2	9885 0,2–0,8		15
17	OB-KS-2-1	9885 0–0,16	koks naftowy drobny	7,5
18	OB-KS-2-2	9885 0–0,16		15

Test prowadzono przy stałym momencie hamowania, wynoszącym 355 Nm. W każdym kroku wykonywano odpowiednią liczbę 5-sekundowych zahamowań. Rozpoczynano je przy różnej temperaturze tarczy hamulcowej i określonej jej prędkości obrotowej. Czas trwania całego testu wynosił 4 godziny. Podczas trwania testu rejestrowano: prędkość obrotową, moment tarcia i temperaturę na powierzchni tarczy hamulcowej za pomocą czujnika ślizgowego.

Na podstawie przeprowadzonych testów określano:

- 1) wartości zużycia liniowego (z dokł. do 0,01 mm) oraz wagowego (z dokł. do 0,01 g), na podstawie którego obliczano zużycie objętościowe,
- 2) wartości współczynnika tarcia: średnią, minimalną, maksymalną dla całego testu oraz średnie wartości dla kroków rozpoczynających się w temperaturze: 100°C, 200°C, 300°C i 400°C,
- 3) wskaźniki stabilności współczynnika tarcia  $\gamma_1$  i  $\gamma_2$ .

Wskaźniki stabilności współczynnika tarcia  $\gamma_1$  i  $\gamma_2$  obliczano z zależności:

$$\gamma_1 = 1 - \mu_{\min.}/\mu_{\max.},$$

$$\gamma_2 = 1 - \mu_{100}/\mu_{400},$$

gdzie:  $\mu_{\min}$  i  $\mu_{\max}$  – minimalna i maksymalna wartość współczynnika tarcia,  $\mu_{100}$  i  $\mu_{400}$  – wartości współczynnika tarcia uzyskane z zahamowań z temperatury początkowej 100°C i 400°C.

Im wskaźniki  $\gamma_1$  i  $\gamma_2$  są bliższe zeru, tym tarcie ma bardziej stabilny charakter. Dąży się do tego, aby wartości współczynnika tarcia  $\mu_{\min}$  i  $\mu_{\max}$  oraz  $\mu_{100}$  i  $\mu_{400}$  były jak najbardziej zbliżone do siebie.

Gęstość wyznaczono metodą immersyjną, na podstawie normy PN-92/C-89035 [L. 6].

Twardość mierzono metodą Rockwella w skali HRR wg normy PN-93/C-89030/02 dla tworzyw sztucznych [L. 7]. Jako wgłębnik zastosowano kulkę stalową o średnicy 12,70 mm.

## REZULTATY BADAŃ I ICH ANALIZA

Aby określić wpływ grafitów naturalnych, syntetycznych i koksu naftowego, porównano własności tribologiczne materiałów ciernych, które zawierały dodatek tych środków smarujących. Uzyskane wyniki przedstawiono w **Tabeli 2**.

Z porównania danych wynika, że:

- a) Każdy z badanych dodatków miał wpływ na co najmniej jedną z ww. wartości współczynnika tarcia, szczególnie obniżając maksymalny współczynnik tarcia, dlatego wszystkie materiały wykazały znaczącą poprawę wskaźnika stabilności  $\gamma_1$ , poprawiając jednocześnie własności komfortowe materiału ciernego. Największą poprawę dały dodatki 7,5% grafitu naturalnego krystalicznego zawierającego 80–85% C oraz grafitu syntetycznego drobnego. Każdy z badanych dodatków obniżył średni współczynnik tarcia z temperatury 100°C i podwyższył średni współczynnik tarcia z 400°C, co oczywiście poprawiło znacząco stabilność materiału ciernego określonego współczynnikiem  $\gamma_2$ . Najlepszy efekt poprawy tych parametrów zapewnił dodatek 15% grafitów naturalnych krystalicznych o dużej zawartości węgla oraz obu grafitów syntetycznych.
- b) Wszystkie dodatki spowodowały obniżenie zużycia w stosunku do materiału bazowego, ale najlepsze efekty dały 15-procentowe dodatki grafitu syntetycznego grubego i koksu naftowego grubego.

**Tabela 2. Wyniki badań tribologicznych materiałów ciernych**

Table 2. Data that has been retrieved after tribologic tests processing

Material cierny	$\mu_{\text{sr.}}$	$\mu_{\text{min}}$	$\mu_{\text{max}}$	$\mu_{100}$	$\mu_{400}$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$Z_V[\text{cm}^3]$	$d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	H [HRR]
OB	0,410	0,258	0,646	0,460	0,304	0,601	-0,516	2,774	3,047	83,13
OB-GN-3-1	0,421	0,317	0,561	0,429	0,374	0,434	-0,146	2,266	2,915	84,30
OB-GN-3-2	0,409	0,285	0,536	0,444	0,380	0,468	-0,170	2,470	2,804	79,25
OB-GN-4-1	0,365	0,280	0,473	0,365	0,352	0,408	-0,037	2,281	2,940	79,30
OB-GN-4-2	0,381	0,277	0,488	0,360	0,369	0,432	0,024	1,701	2,833	66,73
OB-GN-5-1	0,397	0,292	0,497	0,400	0,368	0,412	-0,087	2,182	2,875	83,28
OB-GN-5-2	0,371	0,262	0,491	0,362	0,367	0,467	0,014	2,170	2,798	83,43
OB-GN-6-1	0,407	0,291	0,505	0,420	0,367	0,424	-0,144	2,289	2,876	78,00
OB-GN-6-2	0,369	0,276	0,470	0,369	0,343	0,412	-0,076	1,834	2,848	76,73
OB-GN-7-1	0,371	0,277	0,478	0,353	0,359	0,421	0,017	2,147	2,774	79,98
OB-GN-7-2	0,336	0,218	0,447	0,300	0,339	0,513	0,117	2,351	2,905	68,78
OB-GS-1-1	0,421	0,330	0,567	0,426	0,378	0,418	-0,128	1,796	2,873	73,88
OB-GS-1-2	0,393	0,272	0,540	0,356	0,372	0,497	0,044	1,437	2,706	66,65
OB-GS-2-1	0,394	0,288	0,487	0,380	0,360	0,409	-0,057	2,065	2,888	80,53
OB-GS-2-2	0,340	0,256	0,449	0,321	0,335	0,430	0,042	2,116	2,782	78,60
OB-KS-1-1	0,386	0,277	0,517	0,416	0,320	0,465	-0,298	2,239	2,827	79,08
OB-KS-1-2	0,385	0,295	0,521	0,377	0,353	0,434	-0,068	1,619	2,654	77,50
OB-KS-2-1	0,406	0,300	0,532	0,411	0,364	0,437	-0,128	2,250	2,827	75,60
OB-KS-2-2	0,386	0,285	0,501	0,394	0,357	0,432	-0,104	2,094	2,730	73,70

$\mu_{\text{sr.}}$ ,  $\mu_{\text{min}}$ ,  $\mu_{\text{max}}$ ,  $\mu_{100}$ ,  $\mu_{400}$  – odpowiednio wartości współczynnika tarcia: średnia, minimalna, maksymalna, w temperaturze 100°C i 400°C;  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  – wskaźniki stabilności współczynnika tarcia;  $Z_V$  – zużycie objętościowe;  $d$  – gęstość; H – twardość Rockwella; OB – materiał bazowy.

- c) Gęstość wszystkich badanych materiałów, do których wprowadzono badane dodatki została obniżona, co wynika głównie z porowatości i niskiej własnej gęstości. Ten parametr ma duże znaczenie ekonomiczne. Największą zmianę gęstości spowodowały gruboziarniste dodatki grafitu syntetycznego i koksu naftowego.
- d) Niektóre dodatki spowodowały obniżenie twardości materiału ciernego. Tak się stało po wprowadzeniu 15% grafitów naturalnych kryształicznych o dużej zawartości węgla, grafitu syntetycznego grubego oraz koksu naftowego grubego.

- e) Wpływ wielkości ziaren jest szczególnie widoczny przy porównaniu grafitów syntetycznych. Grafit grubszy bardziej poprawiał odporność na zużycie niż grafit drobniejszy.
- f) W grafitach naturalnych wraz ze wzrastającą zawartością węgla wiadać poprawę właściwości tarciovo-zużyciowych.
- g) W większości przypadków 15-procentowy dodatek znacznie bardziej poprawił własności modyfikowanego materiału niż 7,5%.

## PODSUMOWANIE

Wprowadzenie badanych dodatków do materiału ciernego spowodowało poprawę wszystkich parametrów. Najmniej korzystne jest używanie naturalnego grafitu o małej zawartości węgla oraz grafitu amorficznego. Aby uzyskać optymalne właściwości tribologiczne materiału ciernego, często używa się kilku rodzajów grafitów i koksów. Konieczne jest zatem poszukiwanie kompromisu. Jediną drogą jego osiągnięcia są badania eksperymentalne.

## LITERATURA

1. Yi G., Yan F., Effect of hexagonal boron nitride and calcined petroleum coke on friction and wear behavior of phenolic resin-based friction composites, *Materials Science and Engineering A* 425 2006, 330–338.
2. 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, 162–169.
3. Kolluri D.K., Boidin X., Desplanques Y., Degallaix X., Ghosh A.K., Bijwe J., Kumar M.: Effect of Natural Graphite Particle size in friction materials on thermal localisation phenomenon during stop-braking, *Wear* 268, 2010, 1472–1482.
4. Kolluri D.K., Ghosh A.K., Bijwe J., Analysis of load-speed sensitivity of friction composites based on various synthetic graphites, *Wear* 266, 2009, 266–274.
5. Materiały firmy Sinograf SA.
6. PN-92/C-89035 Tworzywa sztuczne. Metody oznaczania gęstości i gęstości względnej tworzyw nieporowatych.
7. PN-93/C-89030/02 Tworzywa sztuczne. Oznaczanie twardości. Twardość Rockwella.
8. Nosal S., Orłowski T., Wpływ miedzi i jej stopów wprowadzonych do ciernego materiału hamulcowego na jego właściwości tribologiczne, X Jubile-



uszowy Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych, Stare Jabłonki 2005, s. 401–410.

9. Nosal S., Orłowski T., Wpływ rodzaju włókien na własności kompozytowych materiałów ciernych, International Seminar: New materials for advanced applications, Poznań – Wąsowo, 18–19.09.2006, s. 91–99.

**Recenzent:**  
**Janusz JANECKI**

### **Summary**

**The paper presents the results of research on the influence of natural and synthetic graphite's with different carbon content and particle size introduced to the basic friction material on friction and wear behaviour. 7.5% and 15% of the above mentioned lubricants were added to the basic mixture formula. Tribology research was performed with a constant brake moment on a Krauss machine type RWDC 136B with a mounted brake system (described in the R90 ECE annexe 8). The brake disc was made from cast iron. The wear test ran for 4 hours. The best of tribological properties, especially the wear resistance, indicated the friction material containing coarse synthetic graphite additives with 99% carbon.**

