

**Stanisław NOSAL<sup>\*</sup>, Tomasz ORŁOWSKI<sup>\*\*</sup>**

## **WPLYW WYBRANYCH SMARÓW STAŁYCH STOSOWANYCH W KOMPOZYTOWYCH MATERIAŁACH CIERNYCH NA SKUTECZNOŚĆ HAMOWANIA I ZUŻYCIE**

### **INFLUENCE OF SELECTED SOLID LUBRICANTS USED IN COMPOSITE FRICTION MATERIALS ON BRAKING EFFICIENCY AND WEAR**

#### **Słowa kluczowe:**

materiał cierny, smary stałe, fading, zużycie

#### **Key words:**

friction material, solid lubricant, fading, wear

#### **Streszczenie**

Siarczek antymonu jest powszechnie wprowadzany do kompozytowych materiałów jako środek smarujący. Ze względów ekologicznych dąży się do wyeliminowania go z materiałów ciernych.

---

<sup>\*</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel. (61) 647-58-52, e-mail: stanislaw.nosal@put.poznan.pl.

<sup>\*\*</sup> Lumag Sp. z o.o., 64-840 Budzyń, tel. (67) 284-48-27, e-mail: t.orlowski@lumag.pl.

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących wpływu siarczku antymonu na stabilność cieplną materiału ciernego oraz możliwości jego zastąpienia innymi zamiennikami w postaci mieszanin różnych środków smarujących. Badano materiały cierne zawierające siarczek antymonu (III), mieszaninę siarczków cyny, żelaza, miedzi i tytanu oraz mieszaninę siarczków cyny (II), cyny (IV) i grafitu. Badania skuteczności hamowania wykonano na stanowisku bezwładnościowym wg ISO 26865. Najlepsze wyniki w całym zakresie temperatury uzyskano dla materiału zawierającego siarczek antymonu (III). Stwierdzono, że żaden z testowanych materiałów nie może być bezpośrednio użyty jako zamiennik siarczku antymonu. Prawdopodobnie należy testowane zamienniki użyć w większej ilości lub też konieczne są inne modyfikacje składu materiału ciernego.

## WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój transportu samochodowego zmienił w ostatnim czasie w znacznym stopniu wymagania w zakresie konstrukcji, technologii wytwarzania i eksploatacji pojazdów. W szczególności dotyczy to układów hamulcowych. Wzrost prędkości pojazdów oraz ich masy całkowitej wymusił postęp w budowie hamulców i w projektowaniu nowych materiałów ciernych. Nowe konstrukcje hamulców tarczowych oraz nowoczesne materiały cierne muszą charakteryzować się wysoką skutecznością hamowania w szerokim zakresie temperatury. Te uwarunkowania i coraz większa orientacja proekologiczna oraz nowe regulacje prawne wymagają ciągłej pracy związanej z rozwojem ciernych materiałów hamulcowych.

Nowoczesne materiały cierne stosowane powszechnie w Europie składają się ze środków wiążących, włókien, metali, wypełniaczy oraz smarów stałych. Do tej ostatniej grupy składników zalicza się głównie: grafit, koks naftowy i siarczki metali. Smary stałe mają bardzo duży wpływ na kształtowanie się z produktów zużycia materiału ciernego i bieżni hamulca warstwy „third body layer” (TBL), czyli warstwy, która jest odpowiedzialna za skuteczność hamowania [L. 1]. Dąży się do tego, aby ta warstwa była trwała i nieusuwalna z powierzchni klocka po nagrzaniu lub wystudzeniu hamulców.

Najbardziej rozpowszechnionymi smarami stałymi w materiałach ciernych są grafity syntetyczne (najczęściej o zawartości węgla powyżej 95%), grafity naturalne o strukturze krystalicznej i amorficznej oraz koks naftowy otrzymany podczas przeróbki ropy naftowej. Ze względu na pełnioną funkcję w materiale ciernym do bardzo ważnych cech tych składników należą: zawartość węgla, granulacja i budowa krystaliczna. Bardzo intensywny rozwój środków smarujących w ostatnich latach oparty jest na siarczku metali. W materiałach ciernych najczęściej stosowane są naturalne siarczki: siarczek antymonu (III), siarczek cynku, siarczek żelaza (II), siarczek miedzi i żelaza (chalkopiryt); do

niedawna stosowano również siarczek ołowiu (II). Ze względu na różną funkcję oraz różny zakres warunków działania w materiałach ciernych zwykle stosuje się mieszaninę środków smarujących. Siarczki metali oprócz właściwości smarujących zwiększają skuteczność hamowania w wysokich temperaturach. Związane to jest z ich utlenianiem. Najczęściej tlenki metali charakteryzują się większym współczynnikiem tarcia od siarczków i dzięki temu w pożądanym zakresie temperatury (gdy zachodzi rozkład związków organicznych) zwiększa się współczynnik tarcia. Tlenki również pełnią rolę smarującą i tej przemianie nie towarzyszy gwałtowny wzrost zużycia. Najbardziej skuteczny pod tym względem był powszechnie do niedawna stosowany siarczek antymonu (III)  $Sb_2S_3$  używany w ilości 3÷8%. Ten składnik utlenia się na dwóch etapach. Pierwszy etap rozpoczyna się w temperaturze 380°C i powstaje wówczas  $Sb_2O_3$  i  $Sb_2O_5$ , a drugi etap zachodzi w temperaturze 570°C i powstaje wówczas  $Sb_2O_4$ . Wraz ze wzrostem ilości użytego siarczku antymonu wzrasta stabilność współczynnika tarcia [L. 2]. Wskazane jest, aby używać siarczek antymonu z grafitem [L. 3, 4]. Siarczek antymonu  $Sb_2S_3$  występuje w przyrodzie jako główny składnik antymonitu (stybnitu) (w rombowym układzie krystalograficznym). Niestety tlenki antymonu są podejrzewane o działanie rakotwórcze, co może być spowodowane faktem, że antymonit często jest zanieczyszczony arsenem [L. 5]. Dlatego siarczek antymonu (III) jest eliminowany z materiałów ciernych.

Zamiennikiem siarczku antymonu mogą być siarczki cyny  $SnS_2$  i  $SnS$ . Wskazane jest stosowanie mieszaniny tych siarczków ze względu na różną temperaturę utleniania (470°C dla  $SnS_2$  i 700°C dla  $SnS$ ). To prawdopodobnie jest powodem wyjątkowej skuteczności hamowania na gorąco materiałów ciernych zawierających siarczki cyny [L. 4].

Celem pracy jest przedstawienie, na podstawie własnych badań eksperymentalnych, wpływu siarczku antymonu na stabilność cieplną materiału ciernego oraz możliwości jego zastąpienia innymi zamiennikami w postaci mieszanin różnych środków smarujących.

## BADANIA

### Przedmiot badań

W celu określenia wpływu siarczku antymonu oraz możliwych jego zamienników na skuteczność hamowania opracowano, na podstawie wcześniejszych badań i doświadczeń autorów, materiał cierny mieszczący się w klasie Low Steel wg klasyfikacji wymienianej w Brake Technology Handbook [L. 7] o następującym składzie:

- 1) napełniacze nieorganiczne – 14% (wag.),
- 2) wełna stalowa i metale kolorowe – 43,5%,

- 3) środki smarujące stałe – 28%,  
 4) włókna nieorganiczne i organiczne – 6%,  
 5) żywice fenolowe i kauczuki – 8,5%.

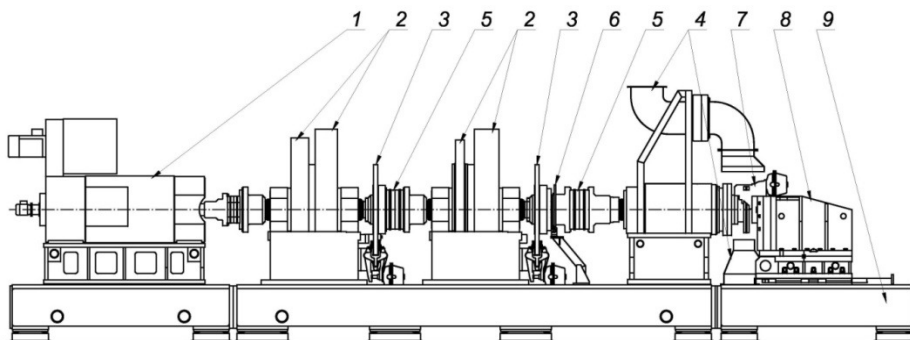
Jako środki smarujące zastosowano grafit, koks naftowy oraz 5,5% badanego siarczku metalu:

- w materiale P-0 zastosowano siarczek antymonu (III) o zawartości 66% Sb – L0,
- w materiale P-1 zastosowano mieszaninę siarczków cyny, żelaza, miedzi i tytanu – L1,
- w materiale P-2 zastosowano mieszaninę siarczków cyny (II), cyny (IV) i grafitu – L2.

Sposób przygotowania materiałów ciernych do badań był taki sam, jak opisany w referacie [L. 6]. Materiały te uformowano na prasie hydraulicznej w temperaturze 140÷150°C i pod naciskiem 38 MPa. Następnie wypraski utwardzono w piecu komorowym w temperaturze 180°C w czasie 12 godzin.

### Metodyka badań

Badania skuteczności hamowania wykonano na stanowisku bezwładnościowym, które przedstawiono na **Rys. 1**.



**Rys. 1.** Stanowisko bezwładnościowe do badania hamulców; 1 – silnik, 2 – koła bezwładności, 3 – hamulce bezpieczeństwa, 4 – wentylacja, 5 – sprzęgła, 6 – momentomierz, 7 – badany hamulec wraz z tarczą hamulcową, 8 – wózek do montażu hamulca bądź osi pojazdu, 9 – podstawa

**Fig. 1.** Brake dynamometer: 1 – DC motor, 2 – flywheels, 3 – emergency brake, 4 – ventilation, 5 – coupling, 6 – torque meter, 7 – brake, 8 – tailstock, 9 – base

Zamontowane masy bezwładnościowe symulują obciążenie koła odpowiadające przewożonej masie ładunku. Masę bezwładności symuluje również silnik elektryczny. Silnik nadaje określoną prędkość obrotową, która po przeli-

czeniu z wykorzystaniem promienia dynamicznego koła odpowiada prędkości liniowej pojazdu. W czasie testu następuje hamowanie, podczas którego mierzony jest moment hamowania, temperatura tarczy i klocków, prędkość, droga hamowania, ciśnienie w układzie hamulcowym i skok siłownika hamulca. Na podstawie tych parametrów określa się skuteczność hamowania wyrażaną jako opóźnienie pojazdu lub jako moment hamowania. Testy można przeprowadzać w różnej temperaturze (0÷1000°C), prędkości (0÷120 km/h) i ciśnieniu (0÷10 barów). Badania wykonano z użyciem hamulca firmy Knorr Bremse AG typ SB7/SN7. Zastosowano tradycyjne, dostępne na rynku tarcze hamulcowe wykonane z żeliwa szarego. Testy wykonano wg normy ISO 26865 Road vehicles – Brake lining friction materials — Standard performance test procedure for commercial vehicles with air brakes. Przyjęto następujące parametry badania:

- obciążenie osi – 100 000 N,
- promień dynamiczny – 0,527 m,
- siłownik pneumatyczny – 24”.

Badanie wg ww. normy polega na wykonaniu szeregu zahamowań w różnych warunkach: po dotarciu, po przegrzaniu, na zimno, na gorąco, od różnych prędkości początkowych i pod różnymi ciśnieniami w układzie hamulcowym.

Określono również zużycie liniowe i wagowe badanych materiałów po teście skuteczności hamowania wg ISO 26865. Zużycie wagowe wyliczono z różnicy masy klocków przed testem i po teście. Zużycie liniowe określono jako różnicę grubości danego klocka w 8 punktach pomiarowych przed testem i po teście. Jako wynik przyjęto sumę zużycia dla obu klocków.

## REZULTATY BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Do oceny właściwości badanych materiałów ciernych wybrano wyniki zahamowań wykonanych od temperatury 100°C, 300°C, 500°C i po przegrzaniu od 650°C, od prędkości 60 km/h i 80 km/h oraz pod ciśnieniem w układzie wynoszącym 0,3 MPa i 0,6 MPa.

Wyniki badań skuteczności hamowania wyrażone średnim momentem hamowania oraz fadingiem przedstawiono w **Tabeli 1**. Fading, czyli spadek skuteczności hamowania pod wpływem temperatury wyrażono w procentach w stosunku do zahamowań z temperatury 100°C. Akceptowany jest fading nieprzekraczający 20%.

W temperaturze 300°C fading wszystkich badanych materiałów wyniósł poniżej 20%, co jest dobrym wynikiem. Najlepsze wyniki skuteczności hamowania w temperaturze 500°C uzyskano dla materiału P-0 zawierającego siarczek antymonu (III), następnie dla materiału P-2 zawierającego mieszaninę siarczków cyny i grafitu. Zahamowanie od temperatury 650°C poprzedzone zostało przetrzymaniem w tej wysokiej temperaturze hamulca, wykonując

50 zahamowań z 60 km/h do 50 km/h. Dla wszystkich badanych materiałów uzyskano zadowalająco duże wartości momentu hamowania.

W **Tabeli 2** przedstawiono wyniki pomiaru zużycia wagowego i liniowego klocków hamulcowych zmierzone po teście skuteczności hamowania.

**Tabela 1. Wyniki badań skuteczności hamowania**

Table 1. Results of performance

Lp.	T <sub>start</sub> [°C]	V <sub>start</sub> [km/h]	p [MPa]	Skuteczność hamowania [kNm]			Fading [%]		
				P-0	P-1	P-2	P-0	P-1	P-2
1	100	60 – 0	0,3	8,1	7,5	7,4	0,0	0,0	0,0
2	300	60 – 0	0,3	6,9	6,4	6,9	14,4	14,3	7,7
3	500	60 – 0	0,3	6,2	5,3	5,4	23,5	29,1	26,8
4	100	60 – 0	0,6	15,0	14,7	14,6	0,0	0,0	0,0
5	300	60 – 0	0,6	13,6	12,5	13,0	9,2	14,6	10,9
6	500	60 – 0	0,6	12,5	10,6	11,1	16,7	27,3	23,8
7	100	80 – 0	0,6	13,5	13,2	13,0	0,0	0,0	0,0
8	300	80 – 0	0,6	13,3	10,7	11,3	1,8	18,8	13,0
9	500	80 – 0	0,6	11,7	9,9	11,4	13,2	25,3	12,2
10	650	60 – 0	0,6	14,0	13,7	14,3			

**Tabela 2. Zużycie klocków hamulcowych po teście skuteczności hamowania**

Table 2. Results of wear during performance test

	dopuszczalne	P-0	P-1	P-2
Zużycie liniowe [mm]	2,50	1,93	2,69	2,11
Zużycie wagowe [g]	250	184,2	243,7	191,8

Dla materiałów zawierających siarczki antymonu (III) oraz mieszaninę siarczków cyny i grafitu uzyskano wyniki zgodne z wymaganiami.

## PODSUMOWANIE

Najlepsze wyniki skuteczności hamowania w całym zakresie temperatury uzyskano dla materiału zawierającego siarczki antymonu (III). Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że żaden z testowanych materiałów nie może być bezpośrednio użyty jako zamiennik siarczku antymonu. Prawdopodobnie należy testowane zamienniki użyć w większej ilości lub też konieczne

są inne modyfikacje składu materiału ciernego. Otrzymane wyniki sugerują konieczność dalszych badań materiałów ciernych niezawierających antymonu w celu osiągnięcia zadowalającej skuteczności hamowania w wysokiej temperaturze.

## LITERATURA

1. Gudman-Hoyer L., Bach A., Nielsen G.T., Morgen P.: Tribological properties of automotive disc brakes with solid lubricants, *Wear* 1999; 232, 168–175.
2. Jang H., Kim S.J.: The effects of antimony trisulfide ( $Sb_2S_3$ ) and zirconium silicate  $ZrSiO_4$  in the automotive brake friction material on friction characteristics, *Wear* 239, 2000, s. 229–236.
3. Kim S.J., Cho M.H., Cho K.H., Jang H.: Complementary effects of solid lubricants in the Automotive brake lining, *Tribology International* 40, 2007, s. 15–20.
4. Melcher B., Faullant P.: A comprehensive study of chemical and physical properties of metal sulfides, 18<sup>th</sup> Annual Brake Colloquium & Engineering Display, San Diego, 2000.
5. Sundar S., Chakravarty J.: Antimony Toxicity, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2010; 7, 4267–4277.
6. Nosal S., Orłowski T.: Wpływ miedzi i jej stopów wprowadzonych do ciernego materiału hamulcowego na jego właściwości tribologiczne, X Jubileuszowy Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych, Stare Jabłonki 2005, 401–410.
7. Breuer B., Bill K.H.: *Brake Technology Handbook*, SAE International, Warrendale 2007.
8. ISO 26865 – 2009 – Road vehicles – Brake lining friction materials – Standard performance test procedure for commercial vehicles with air brakes.

## Summary

**The following materials are generally used as lubricants that are added to composite friction materials: graphite, petroleum coke, and metal sulphides. Other agents are used rather infrequently. Their purpose is to limit wear and improve braking performance. Many of these components stabilise the friction factor, reducing it in a selected temperature range and increasing it in another temperature range. Therefore, selection of these components requires expertise.**

**The first test in friction material development is the braking performance test according to ISO 26865. It is performed on a dynamometer with mass simulation falling on the braked axle with following variable parameters: pressure in the braking system, speed, and initial braking temperature.**

**During the tests, optimum quantities and temperatures of activation can be found.**

**Additional aspects to be considered in the choice of the solid lubricant are ecological requirements. There is a tendency to eliminate antimony from friction materials. Antimony sulphide is a widely used solid lubricant that oxidises under the influence of temperature. Antimony oxides have a higher friction factor than antimony sulphides and work better against fading. One of the most popular alternatives to antimony sulphide is the tin sulphide, but its disadvantage is the 300% higher price.**

**The paper presents test bench, test description and test results of selected solid oils used as alternatives to antimony sulphide.**