

**Tadeusz KAŁDONSKI\***, **Konrad KŁOS\***

## **O MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA AZOTKU BORU h-BN JAKO SKŁADNIKA ŻELAZNEGO POROWATEGO SPIEKU**

### **THE POSSIBILITY OF THE APPLICATION OF BORON NITRIDE h-BN AS A COMPONENT OF IRON POROUS SINTER**

#### **Słowa kluczowe:**

porowaty spiek Fe, azotek boru h-BN

#### **Key words:**

Fe porous sinter, boron nitride h-BN

#### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki badań żelaznych spieków zawierających różne ilości heksagonalnego azotku boru h-BN. Badania tribologiczne przeprowadzono za pomocą maszyn KEWAT-6 i KEWAT-1 w Zakładzie Tribologii, Inżynierii Powierzchni i Logistyki Płynów Eksploatacyjnych IPMiT WME WAT. Stwierdzono, że zawartość do 3% wagowo azotku boru w żelaznym spieku proszku żelaza Höganäs NC.100.24 poprawia skutecznie właściwości tribologiczne spieku, tj. zmniejsza wartość współczynnika tarcia, nie zwiększając zu-

---

\* Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2, tel. (22) 683-95-65, e-mail: tkaldonski@wat.edu.pl.

zycia spiekanych próbek mimo nieznacznego spadku ich twardości. Wyniki tych badań były podstawą do wykonania pełnogabarytowych tulei porowatych zawierających azotek boru h-BN w spieku, które następnie poddano badaniom stanowiskowym w ramach projektu badawczego rozwojowego PBR/15-249/2007/WAT-OR00002904 [L. 1], finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007–2011.

## WPROWADZENIE

Do spieku żelaznego (np. porowatych tulei łożysk ślizgowych) dodaje się najczęściej grafit lub miedź w celu poprawienia jego właściwości mechanicznych i tribologicznych [L. 2, 3, 4, 5]. Alternatywą dla tych dodatków może być azotek boru h-BN, którego korzystne właściwości jako dodatku do olejów smarowych i smarów plastycznych, w tym także do nasączania porowatych tulei ślizgowych, zostały potwierdzone w badaniach własnych [L. 6] i opisane w wielu publikacjach [np. L. 7–9]. Wypada nadmienić, że azotek boru był wytworzony i oczyszczony wg patentów: 153588, 31.10.1991; 155646, 31.07.1992; 161930, 31.08.1993, do których uprawniona jest Wojskowa Akademia Techniczna. Pozytywne wyniki badań opisanych m.in. w pracach [L. 6–9] skutkowały nawet kilkoma patentami zarejestrowanymi w Urzędzie Patentowym Rzeczypospolitej Polskiej [L. 10, 11].

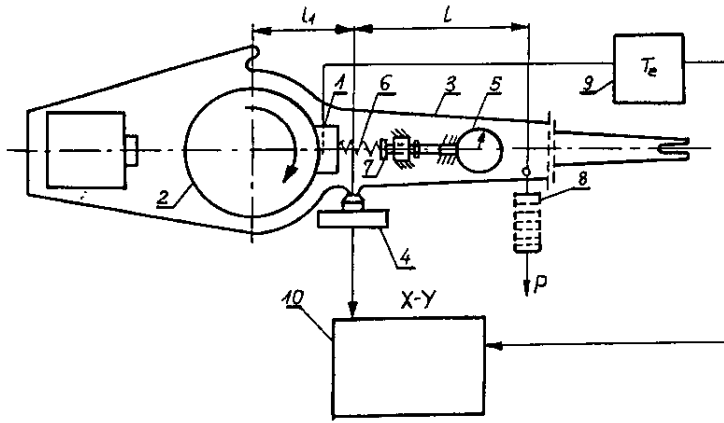
Nasuwało się wobec tego pytanie, czy azotek boru h-BN może także skutecznie zastąpić w spieku inne, dotychczas stosowane dodatki, np. miedź i grafit? Czy właściwości ślizgowe żelaznego spieku zawierającego azotek boru ulegną poprawie czy pogorszeniu i jakie będzie jego zużycie tribologiczne? Czy proces spiekania proszku żelaza z dodatkiem azotku boru będzie przebiegał bez zakłóceń, czy zostanie optymalnie zrealizowany? W przypadku pozytywnych wyników tych badań zaplanowano wykonanie pełnogabarytowych tulei ślizgowych do badań stanowiskowych nośności i trwałości łożysk nowej generacji [L. 1].

## METODYKA I BADANE OBIEKTY

Podstawowe badania tribologiczne wykonano za pomocą wielofunkcyjnej maszyny tarciowej KEWAT-6, przeznaczonej do badań kinematycznego współczynnika tarcia materiałów konstrukcyjnych w funkcji temperatury. Uproszczony schemat tego stanowiska przedstawiono na **Rys. 1**.

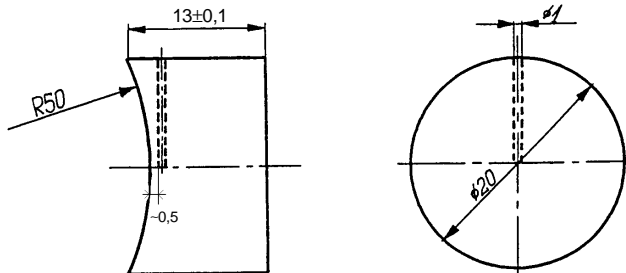
Siła dociskowa próbki 1 do przeciwpróbki 2 była powodowana przez sprężynę dociskową 6 o znanej charakterystyce. Ściskania sprężyny dokonywano za pomocą śruby regulacyjnej 7, a jej ugięcie mierzono czujnikiem zegarowym 5. Badania można było prowadzić przy stałych naciskach jednostkowych w zakresie 0÷2,5 MPa. Siła tarcia powstająca w obszarze styku próbki 1 z przeciwpróbką 2 powodowała obrót tarczy wahliwej 3, która zderzakiem opierała się

o czujnik dynamometryczny 4. Z czujnikiem dynamometrycznym połączono rejestrator x-y, w którym na papierze milimetrowym zapisywana była wartość (wykres) siły tarcia po odpowiednim wyskalowaniu układu. Temperaturę warstwy wierzchniej próbki 1 mierzono za pomocą wycechowanej termopary żelazo-konstantan i potencjometru 9. Badane były porowate próbki żelazne zawierające azotek boru w spieku, których kształt i rozmiary pokazano na **Rys. 2**.



**Rys. 1. Schemat stanowiska do badań kinematycznego współczynnika tarcia**

Fig. 1. Scheme of the station for kinetic friction factor measurements



**Rys. 2. Badana próbka (spiek Fe + h-BN)**

Fig. 2. Examined sample (Fe + h-BN sinter)

Produktami podstawowymi do wykonania próbek porowatych był zredukowany proszek żelaza NC.100.24. Höganäs AB (Szwecja), materiał poślizgowo-spajający Kenolube P11 (Niemcy) oraz odpowiednia ilość azotku boru h-BN. Próbkę wykonano w WAT, dodając do proszku Fe + h-BN ok. 10% wagowo materiału poślizgowo-spajającego Kenolube, mieszając w mieszadło dwustożkowym i prasując na prasie hydraulicznej typu PH-CM63a wyposażonej w spe-

cialnie zaprojektowany i wykonany stempel. Dobrane ciśnienie prasowania wynosiło 12 MPa, co pozwoliło na wykonanie próbek o porowatości ok. 27,8%.

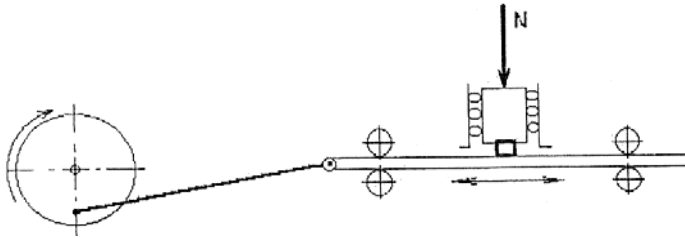
Spiekanie próbek odbywało się w piecu typu KS600/25, który umożliwia wygrzewanie i spiekanie w osłonie zdysocjowanego amoniaku. Przed właściwym spiekaniem próbki umieszczono w retorcie i wygrzewano w osłonie zdysocjowanego amoniaku. Wygrzewanie przebiegało dwustopniowo. Najpierw wypalano materiał poślizgowy Kenolube P11 w temperaturze  $600 \pm 5^\circ\text{C}$  i w czasie 30 minut. Następnie realizowano właściwe spiekanie w temperaturze  $1120 \pm 5^\circ\text{C}$  w ciągu jednej godziny.

Wykonano próbki o porowatości ok. 27,8% [L. 9], zawierające zróżnicowaną ilość azotku boru h-BN, tj. 0%, 3%, 5%, 10%, 20%, 30% i 50% w stosunku wagowym, i nasączono trzema różnymi olejami, tj. Hyrorafinatem-5, olejem silnikowym Selektol 15 W/40 albo olejem przekładniowym Hipol 15F, które miały lepkość kinematyczną w  $40^\circ\text{C}$  i w  $100^\circ\text{C}$  odpowiednio:  $\nu_{40} = 31,40$ ; 103,51 i 197,80  $\text{mm}^2/\text{s}$  oraz  $\nu_{100} = 5,30$ ; 14,20 i 17,88  $\text{mm}^2/\text{s}$ . Nasączenie porowatych próbek wybranymi olejami przeprowadzono w próżni przy ciśnieniu  $p \cong 0,005 \text{ MPa}$ , w temperaturze  $75 \pm 2^\circ\text{C}$  i w ciągu 40 minut, co pozwoliło osiągnąć sprawność nasączania ok. 97%. Tak przygotowane próbki poddano testom na maszynie KEWAT-6 (Rys. 1). W celu uzyskania porównywalnych przebiegów dla wybranych środków smarowych doświadczalnie ustalono siłę obciążającą  $P = 200 \text{ N}$ , wynikającą z charakterystyki sprężyny dociskowej (6 na Rys. 1), co oznaczało średnie naciski jednostkowe  $p = 0,64 \text{ MPa}$ . Badania przeprowadzono za pomocą maszyny KEWAT-6 aż do uzyskania temperatury w warstwie wierzchniej próbki  $T_e = 150^\circ\text{C}$ , mierząc zmienność siły tarcia i następnie obliczając wartości kinematycznego współczynnika tarcia  $\mu_k$  z zależności Amontonsa [L. 9].

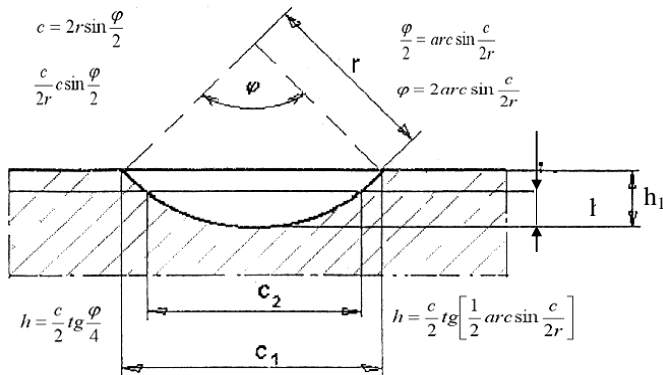
Badania odporności zużyciowej próbek porowatych zawierających różną ilość azotku boru (0, 3, 5, 10, 20, 30 lub 50% w stosunku wagowym) przeprowadzono z próbkami prostopadłościennymi, które wycięto (przed ich nasączeniem) z próbek porowatych wykonanych w sposób opisany powyżej tak, że ich powierzchnia tarcia miała rozmiary 12 mm x 18 mm. Siła dociskowa (normalna) próbki do przeciwpróbki wykonanej z tego samego materiału co przeciwpróbka w maszynie KEWAT-6, tj. z żeliwa szarego o klasie twardości H235, wynosiła  $N = 280 \text{ N}$ , tzn. że naciski jednostkowe wynosiły ok. 1,3 MPa. Każdy cykl badań zużycia kończył się po 100 000 obrotów mechanizmu napędowego maszyny KEWAT-1. Na Rys. 3 przedstawiono schemat ideowy działania maszyny tarciowej KEWAT-1.

Podczas jednego obrotu koła napędzanego silnikiem elektrycznym listwa z przeciwpróbką wykonywała dwa suwy (w jedną i w drugą stronę) o długości 0,005 m każdy. Zatem droga tarcia w jednym cyklu badawczym pary trącej wynosiła 1000 m. Przed badaniami zużyciowymi dokonano pomiaru twardości HB próbek. Wgnioty wykonane były kulką o średnicy 2,5 mm, przy obciążeniu  $F = 31,25 \text{ kG}$  ( $x 9,81 \text{ N}$ ) po czasie trwania obciążenia  $t = 30 \text{ s}$  (zgodnie z PN-

78/H 09350 – Pomiar twardości metodą Brinella). Pomiary twardości HB wykonane były minimum dla trzech próbek. Średnicę wgniotów mierzono mikroskopem warsztatowym z dokładnością 0,01 mm. Wykonane twardościomierzem Brinella wgnioty stanowiły tzw. sztuczne bazy do oceny wartości zużycia, w sposób pokazany na **Rys. 4**.



**Rys. 3. Schemat ideowy działania maszyny tarcowej KEWAT-1**  
 Fig. 3. Schematic diagram of KEWAT-1 friction machine functioning



**Rys. 4. Podstawowe wielkości geometryczne przydatne do obliczenia zużycia metodą sztucznych baz wykonanych twardościomierzem Brinella**

Fig. 4. The basic geometrical dimensions useful for calculating of wear with the method of “artificial basis” made by Brinell’s hardness tester device

Mierzono bezpośrednio średnice wgniotów przed cyklem badawczym  $C_1$  i po cyklu badawczym  $C_2$  i następnie na podstawie zależności objaśnionych na **Rys. 4** obliczono głębokość wgniotów. Wartość zużycia liniowego stanowiła różnica głębokości wgniotów przed cyklem badawczym  $h_1$  i po cyklu badawczym  $h_2$ , tj.  $z = h_1 - h_2$  [mm]. Na podstawie takich obliczeń określono zużycie wszystkich badanych próbek zawierających różną ilość azotku boru h-BN.

## WYNIKI BADAŃ ORAZ ICH ANALIZA

Przykładowe wyniki badań przedstawiono w **Tabeli 1** i **2**, natomiast na **Rys. 5, 6 i 7** pokazano typowy charakter zmian siły tarcia i temperatury tribologicznej warstwy wierzchniej porowatych próbek. Z kolei na **Rys. 8–11** przedstawiono charakterystyki przebiegu współczynników tarcia  $\mu_k$  w funkcji czasu trwania testu do osiągnięcia temperatury 150°C, przy różnej zawartości azotku boru w żelaznym spieku.



**Tabela 1. Zestawienie wartości sił tarcia T i współczynników tarcia  $\mu_k$  dla próbek bez azotku boru w spieku**

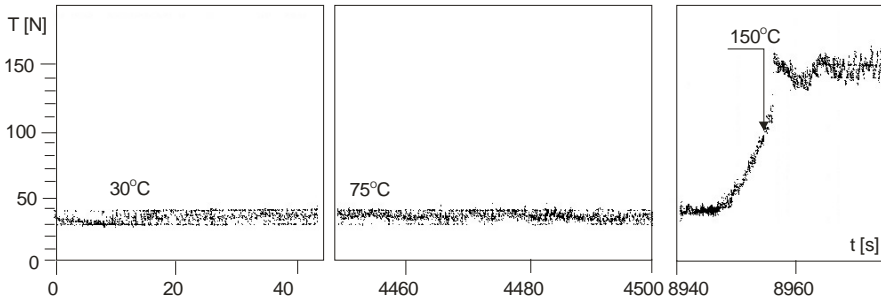
Table 1. Tabulation of the values of friction forces T and friction factors  $\mu_k$  for the samples without boron nitride in the sinter

Czas trwania testu [s]	HYDRORAFINAT-5		SELEKTOL 15 W/40		HIPOL 15F	
	T [N]	$\mu_k$	T [N]	$\mu_k$	T [N]	$\mu_k$
10	60	0,300	35	0,175	36	0,180
20	78	0,390	44	0,220	36	0,180
30	96	0,480	56	0,280	36	0,180
40	106	0,530	62	0,310	38	0,190
50	94	0,470	54	0,270	38	0,190
60	44	0,220	30	0,150	38	0,190
300	40	0,200	32	0,160	38	0,190
900	50	0,250	30	0,150	38	0,190
1800	150	0,775	32	0,160	39	0,195
2700	-	-	34	0,170	39	0,195
3600	-	-	34	0,170	40	0,200
4500	-	-	35	0,175	40	0,200
5400	-	-	34	0,170	39	0,195
6300	-	-	33	0,165	40	0,200
7200	-	-	32	0,160	50	0,250
8100	-	-	33	0,165	60	0,300
9000	-	-	106	0,530	-	-

**Tabela 2. Zestawienie wartości sił tarcia T i współczynników tarcia  $\mu_k$  dla próbek z azotkiem boru w spieku**

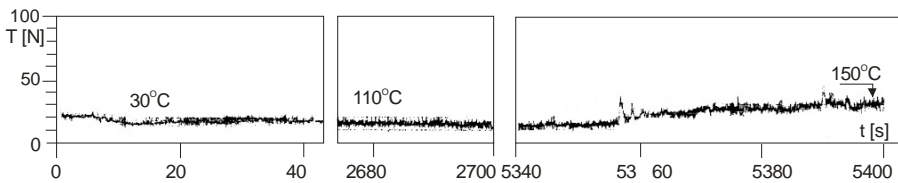
Table 2. Tabulation of the values of friction forces T and friction factors  $\mu_k$  for the samples with boron nitride in the sinter

Czas trwania testu [s]	Próbki porowate zawierające 5% h-BN w spieku					
	HYDRORAFINAT-5		SELEKTOL 15 W/40		HIPOL 15F	
	T [N]	$\mu_k$	T [N]	$\mu_k$	T [N]	$\mu_k$
10	32	0,160	20	0,100	30	0,150
20	36	0,180	26	0,130	40	0,200
60	21	0,105	18	0,090	29	0,145
300	30	0,150	18	0,090	26	0,130
900	88	0,440	13	0,065	23	0,115
1800	-	-	10	0,050	21	0,105
2700	-	-	15	0,075	21	0,105
3600	-	-	14	0,070	23	0,110
4500	-	-	15	0,075	-	-
5400	-	-	30	0,150	-	-
	Próbki porowate zawierające 10% h-BN w spieku					
10	24	0,120	24	0,120	25	0,125
20	31	0,155	32	0,160	34	0,170
30	38	0,190	38	0,190	44	0,220
40	44	0,220	44	0,220	48	0,240
50	40	0,200	40	0,200	45	0,225
60	22	0,110	23	0,115	24	0,120
300	32	0,160	32	0,160	20	0,100
900	64	0,320	40	0,200	22	0,110
1800	-	-	-	-	29	0,145
	Próbki porowate zawierające 50% h-BN w spieku					
10	25	0,125	25	0,125	26	0,130
20	26	0,130	27	0,135	27	0,135
30	27	0,135	28	0,140	27	0,135
40	27	0,135	29	0,145	28	0,140
50	28	0,140	29	0,145	28	0,140
60	29	0,145	30	0,150	28	0,140
300	39	0,195	32	0,160	29	0,145
900	46	0,230	48	0,240	38	0,190



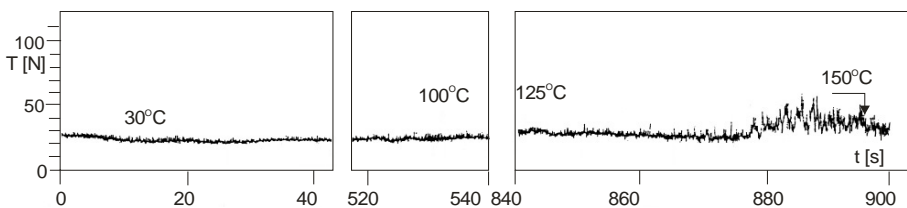
**Rys. 5. Zależność siły tarcia  $T$  [N] i rejestrowana temperatura warstwy wierzchniej porowatej próbki niezawierającej azotku boru w spieku, smarowanej Selektolem 15 W/40 w funkcji czasu trwania testu  $t$  [s] do uzyskania temperatury  $150^{\circ}\text{C}$**

Fig. 5. Dependence of the friction force  $T$  [N] and the recorded temperature of the surface layer of the porous sample without boron nitride in the sinter, lubricated with Selektol 15 W/40, versus the test duration time  $t$  [s] till reaching the temperature of  $150^{\circ}\text{C}$



**Rys. 6. Zależność siły tarcia  $T$  [N] i rejestrowana temperatura warstwy wierzchniej porowatej próbki zawierającej 5% azotku boru w spieku, smarowanej Selektolem 15 W/40 w funkcji czasu trwania testu  $t$  [s] do uzyskania temperatury  $150^{\circ}\text{C}$**

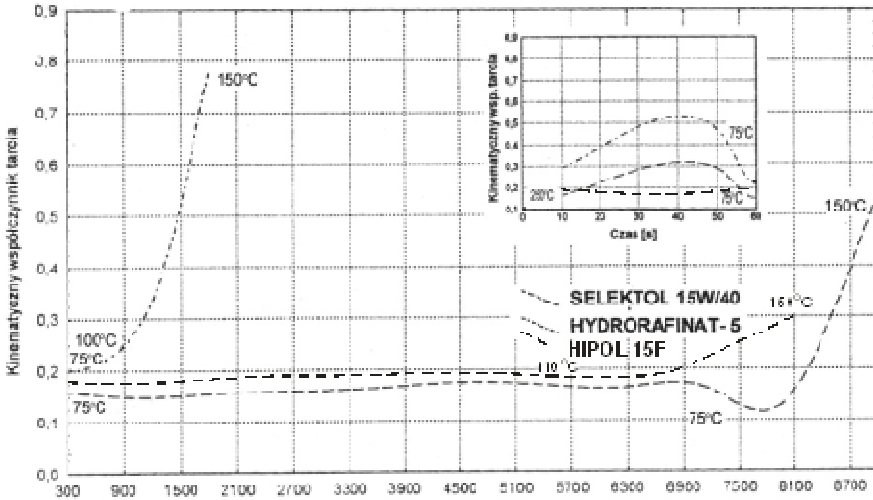
Fig. 6. Dependence of the friction force  $T$  [N] and the recorded temperature of the surface layer of the porous sample containing 5% of boron nitride in the sinter, lubricated with Selektol 15 W/40, versus the test duration time  $t$  [s] till reaching the temperature of  $150^{\circ}\text{C}$



**Rys. 7. Zależność siły tarcia  $T$  [N] i rejestrowana temperatura warstwy wierzchniej porowatej próbki zawierającej 10% azotku boru w spieku, smarowanej Selektolem 15 W/40 w funkcji czasu trwania testu  $t$  [s] do uzyskania temperatury  $150^{\circ}\text{C}$**

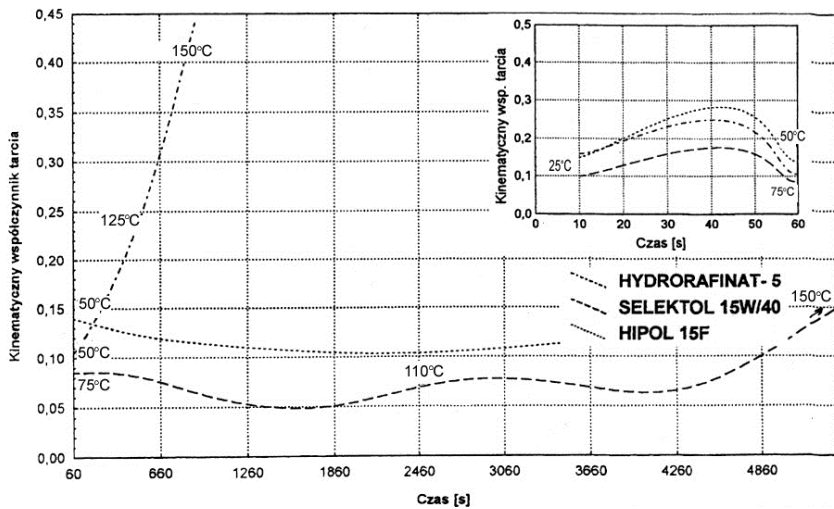
Fig. 7. Dependence of the friction force  $T$  [N] and the recorded temperature of the surface layer of the porous sample containing 10% of boron nitride in the sinter, lubricated with Selektol 15 W/40, versus the test duration time  $t$  [s] till reaching the temperature of  $150^{\circ}\text{C}$





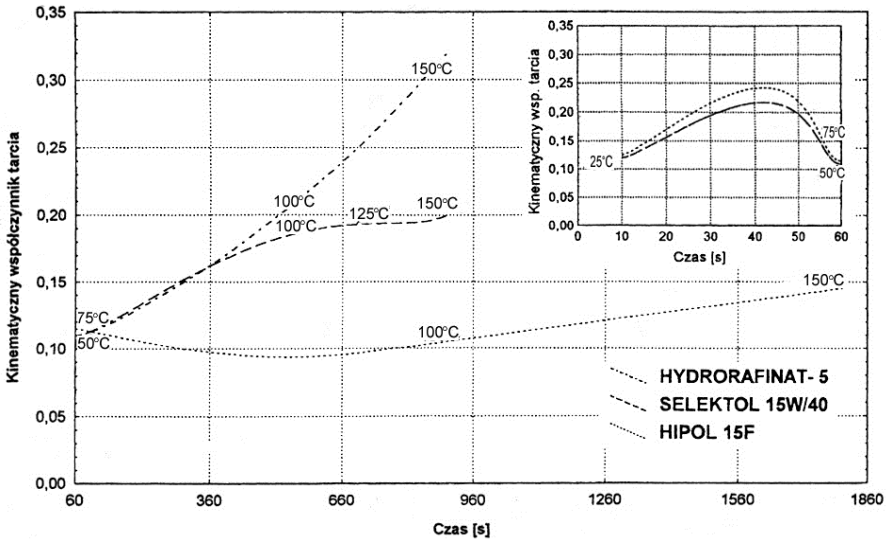
**Rys. 8. Zależność kinematycznego współczynnika tarcia w funkcji czasu trwania testu do osiągnięcia 150°C dla próbek o porowatości ok. 27,8%, niezawierających h-BN w spieku, impregnowanych różnymi olejami**

**Fig. 8. Dependence of the kinematic friction factor versus the test duration time till reaching the temperature of 150°C, for about 27.8% porosity samples, without h-BN in the sinter, impregnated with various oils**



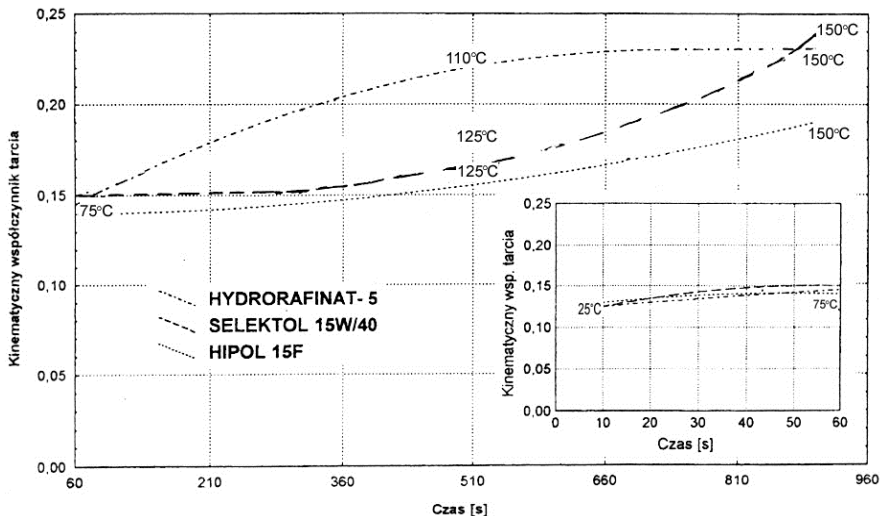
**Rys. 9. Zależność kinematycznego współczynnika tarcia w funkcji czasu trwania testu do osiągnięcia 150°C dla próbek o porowatości ok. 27,8%, zawierających 5% h-BN w spieku, impregnowanych różnymi olejami**

**Fig. 9. Dependence of the kinematic friction factor versus the test duration time till reaching the temperature of 150 °C, for about 27.8% porosity samples containing 5% of h-BN in the sinter, impregnated with various oils**



**Rys. 10.** Zależność kinematycznego współczynnika tarcia w funkcji czasu trwania testu do osiągnięcia 150°C dla próbek o porowatości ok. 27,8%, zawierających 10% h-BN w spieku, impregnowanych różnymi olejami

**Fig. 10.** Dependence of the kinematic friction factor versus the test duration time till reaching the temperature of 150°C, for about 27.8% porosity samples containing 10% of h-BN in the sinter, impregnated with various oils



**Rys. 11.** Zależność kinematycznego współczynnika tarcia w funkcji czasu trwania testu do osiągnięcia 150 °C dla próbek o porowatości ok. 27,8%, zawierających 50% h-BN w spieku, impregnowanych różnymi olejami

**Fig. 11.** Dependence of the kinematic friction factor versus the test duration time till reaching the temperature of 150 °C, for about 27.8% porosity samples containing 50% of h-BN in the sinter, impregnated with various oils

Wyniki badań przeprowadzonych za pomocą maszyny tarciowej KEWAT-6 dowodzą, że dla próbek niezawierających azotku boru h-BN w spieku współczynnik tarcia zależał tylko od rodzaju oleju użytego do nasączenia porowatych próbek. W przypadku małolepkiego i niezawierającego żadnych dodatków smarnościowych Hydrorafinatu-5 ( $v_{40} = 31,40 \text{ mm}^2/\text{s}$  i  $v_{100} = 5,30 \text{ mm}^2/\text{s}$ ) współczynnik tarcia, po okresie wstępnego docierania skojarzenia tribologicznego, urósł od wartości 0,200 aż do wartości 0,775, gdy w warstwie wierzchniej porowatej próbki zarejestrowano temperaturę  $150^\circ\text{C}$  po przebiegu 1800 s (**Tab. 1, Rys. 8**). W tym przypadku olej o bardzo małej lepkości i bez dodatków smarnościowych nie zdołał wytworzyć odpowiedniego filmu smarującego. Ten szybki wzrost współczynnika tarcia świadczy o występowaniu w styku pary trącej tarcia suchego. Zgoła odmiennie zachował się olej Selektol 15 W/40 o dużo większej lepkości ( $v_{40} = 103,51 \text{ mm}^2/\text{s}$  i  $v_{100} = 14,20 \text{ mm}^2/\text{s}$ ) i dobrych właściwości smarnościowych – **Tab. 1, Rys. 8**. W tym przypadku po okresie niewielkich wahań wartości współczynnika tarcia w pierwszej minucie nastąpiła jego stabilizacja na poziomie wartości ok. 0,150–0,160. Stan taki utrzymywał się do uzyskania temperatury  $75\text{--}80^\circ\text{C}$ . Po jej przekroczeniu, tj. po zejściu desorpcji związków smarnościowych, wartość współczynnika tarcia gwałtownie wzrosła (po czasie 8000 s) i w temperaturze  $150^\circ\text{C}$  osiągnęła wartość 0,530 (po czasie 9000 s). Ten gwałtowny wzrost oporów tarcia widać szczególnie dokładnie na **Rys. 5** (powyżej 8900 s).

Na kolejnych **Rysunkach 6 i 7** oraz **8–11** widoczny jest wpływ obecności azotku boru w spieku na obniżenie oporów tarcia mimo szybkiego osiągnięcia założonej temperatury granicznej  $150^\circ\text{C}$ , niezależnie od oleju zastosowanego do nasączenia porowatych próbek. Na **Rys. 6 i 9** oraz w **Tabeli 2** pokazano charakter zmian siły tarcia  $T$  i współczynnika tarcia  $\mu_k$  przy 5% zawartości azotku boru h-BN w spieku. Próbki smarowane Hydrorafinatem-5, podobnie jak poprzednio, uzyskały najmniej korzystne charakterystyki  $T = f(t)$  i  $\mu_k = f(t)$ , jednak wartość współczynnika tarcia była niemal o połowę mniejsza niż dla próbek żelaznych niezawierających azotku boru. Jeszcze mniejsze wartości  $\mu_k$  uzyskano w przypadku smarowania olejami Selektol 15 W/40 i Hipol 15F – minimalne, ustabilizowane wartości  $\mu_k = 0,05\div 0,07$  były ok. 3-krotnie niższe od wartości  $\mu_k = 0,16\div 0,18$  dla próbek bez azotku boru, przy wyższej o ok.  $30^\circ\text{C}$  temperaturze pracy z powodu gorszego odprowadzania ciepła w obecności azotku boru w porowatym spieku, a wartości maksymalne  $\mu_k$  w temperaturze granicznej  $150^\circ\text{C}$  były niemal 4-krotnie mniejsze ( $0,530 \rightarrow 0,150$ ).

Zwiększanie zawartości azotku boru w spieku powodowało dalsze skrócenie czasu do osiągnięcia granicznej temperatury  $150^\circ\text{C}$  i przyrost wartości współczynnika tarcia  $\mu_k$  w stosunku do zarejestrowanych wartości dla zawartości 5% azotku boru (**Tab. 2, Rys. 7, 10, 11**). Dla zawartości 3% h-BN charakterystyki były podobne.

W **Tabeli 3** podano wyniki pomiaru twardości porowatych próbek metodą Brinella, a w **Tabeli 4** zestawienie wyników badań i obliczeń zużycia tych próbek.

**Tabela 3. Wyniki pomiarów twardości porowatych próbek metodą Brinella**

Table 3. Results of the porous samples hardness measurements with Brinell's method

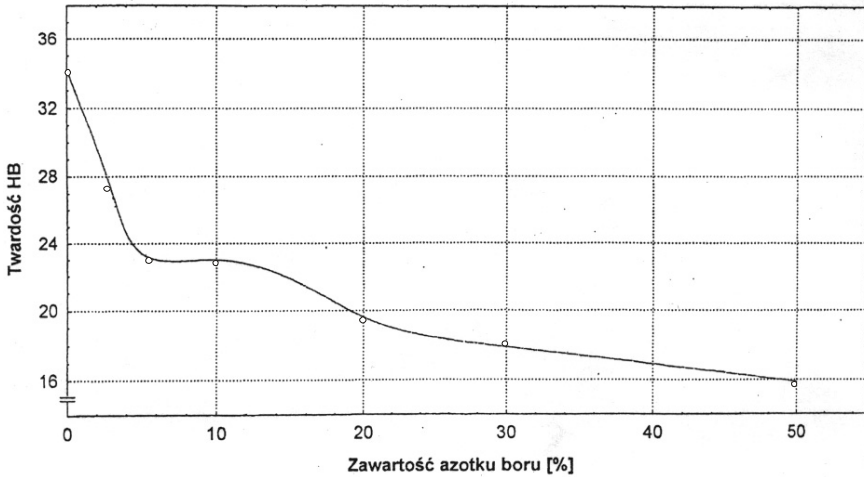
Zawartość h-BN, [%]	Średnica wgniotu, [mm]	Twardość HB	Średnie twardości HB
0	1,04; 1,04; 1,08	35,1; 35,1; 32,4	34,2
3	1,19; 1,19; 1,14	26,4; 26,4; 28,9	27,2
5	1,29; 1,23; 1,26	22,2; 24,6; 23,4	23,4
10	1,31; 1,27; 1,23	21,5; 23,9; 24,6	23,0
20	1,37; 1,33; 1,40	19,5; 20,8; 18,6	19,6
30	1,42; 1,43; 1,42	18,0; 17,7; 18,0	17,9
50	1,53; 1,55; 1,51	15,9; 16,0; 15,7	15,9

**Tabela 4. Zestawienie wyników pomiarów zużycia porowatych próbek metodą sztucznych baz**

Table 4. Tabulation of the results of the porous samples wear measurements with the use of the "artificial basis" method

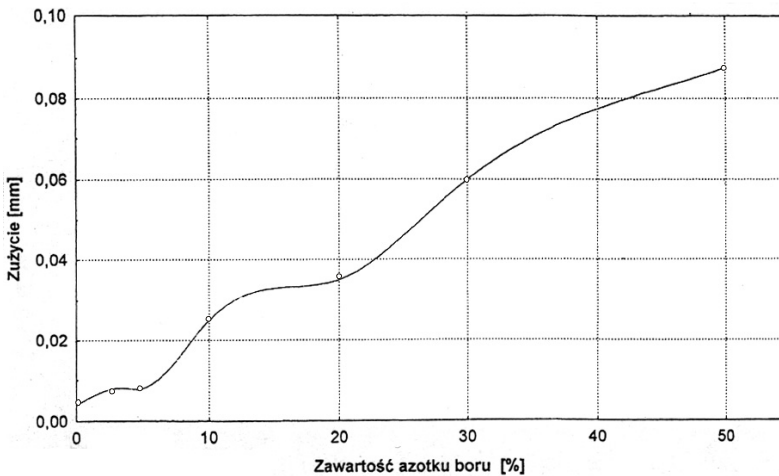
Zawartość h-BN [%]	C <sub>1</sub> [mm]	h <sub>1</sub> [mm]	C <sub>2</sub> [mm]	h <sub>2</sub> [mm]	Z=h <sub>1</sub> -h <sub>2</sub> [mm]
0	1,36	0,201	1,35	0,197	0,007
3	1,48	0,243	1,46	0,235	0,008
5	1,67	0,320	1,64	0,312	0,008
10	1,79	0,377	1,74	0,352	0,025
20	1,80	0,383	1,73	0,348	0,035
30	1,89	0,432	1,78	0,372	0,060
50	2,02	0,514	1,88	0,426	0,088

Na kolejnych **Rysunkach 12 i 13** przedstawiono graficznie przebieg zmian twardości i zużycia badanych próbek wykonanych z żelaznego spieku z różną zawartością azotku boru h-BN.



**Rys. 12. Przebieg zmian twardości porowatych próbek w zależności od zawartości h-BN w spieku**

Fig. 12. The course of the porous samples hardness versus the amount of h-BN in the sinter



**Rys. 13. Przebieg zmian zużycia porowatych próbek w zależności od zawartości h-BN w spieku**

Fig. 13. The course of the porous samples wear against the amount of h-BN in the sinter

Jak widać w **Tabeli 3 i 4** oraz z **Rys. 12 i 13** dla małej zawartości azotku boru (do ok. 5%) twardość spieku wyraźnie zmniejszała się, ale nie miało to dużego wpływu na zużycie, które było niemal takie samo jak dla próbek niezawierających azotku boru (0,008 → 0,007). Dalszy spadek twardości próbek spowodowany coraz większą zawartością azotku boru w spieku, mimo dosyć

łagodnego przebiegu (**Rys. 12**), determinował jednak zdecydowany wzrost zużycia (**Rys. 13**).

## PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań wynika, że 5% zawartość azotku boru h-BN w spieku żelaznym stanowi nieprzekraczalną granicę możliwą do zaakceptowania. Biorąc pod uwagę wszystkie wyniki i analizy związane z tymi badaniami (twardość, wytrzymałość, odporność zużyciową, przewodność cieplną, opory tarcia), uznano, że 3% zawartość azotku boru w spieku jest najbardziej korzystna i takie tuleje porowate  $\text{Ø}25/\text{Ø}35 \times 20$  mm postanowiono wykonać i przeznaczyć do dalszych badań w ramach projektu rozwojowego PBR/15-249/2007/WAT-OR00002904 [**L. 1**]. W efekcie tych badań uzyskano bardzo korzystne wyniki, co pozwoliło na zgłoszenie zastrzeżenia patentowego [**L. 12**]. Należy dodać, że dotychczas nie są znane inne łożyska spiekane z proszku żelaza z dodatkiem heksagonalnej odmiany azotku boru h-BN, pozwalające na zwiększenie ich trwałości i nośności z zastosowaniem odpowiednio dobranego oleju smarowego.

## LITERATURA

1. Kałdoński T. i Zespół: Opracowanie, badania, przygotowanie do wdrożenia w technice wojskowej porowatych łożysk ślizgowych nowej generacji o zwiększonej nośności i trwałości, impregnowanych ekologicznymi smarami zawierającymi dobrane surfaktanty, w tym ciecze jonowe. Sprawozdanie końcowe z realizacji pracy badawczej rozwojowej PBR/15-249/2007/WAT/-OR00002904, WAT, Warszawa, maj 2012.
2. Metal Powder Industry Federation Standard 35 Material Standards for P/M Self-Lubricating Bearings, 1998 Edition.
3. Schatt W., Wieters K.: Powder Metallurgy. Processing and Materials. EPMA 1997.
4. Shikata H.: Oil impregnated sintered bearings. Lubrication, vol. 20, № 8, 1984, pp. 29–32.
5. [www.stellite.com/](http://www.stellite.com/)-strona firmy Delero Stellite Group, producenta stopu Tribaloy.
6. Kałdoński T.: Badania i technologia optymalnego stosowania azotku boru  $\alpha$ -BN jako dodatku smarowościowego w sprzęcie wojskowym. Sprawozdanie końcowe projektu badawczego Grant PB OT00A01408, WAT, Warszawa 1998.
7. Kałdoński T.: Wpływ azotku boru na właściwości użytkowe smarów plastycznych do łożysk ślizgowych. Tribologia, nr 5-6, 1997, s. 640–646.
8. Kałdoński T.J., Kałdoński T.: Physicochemical self-lubricating mechanism of porous sliding bearings. Solid State Phenomena, vol. 13 (2006), pp. 405–410.
9. Kałdoński T.: Tribologiczne zastosowania azotku boru. WAT, Warszawa 2006.
10. Kałdoński T. i Zespół: Olej smarowy zawierający azotek boru  $\alpha$ -BN, zwłaszcza do masycania porowatych łożysk ślizgowych – P321029, 07.07.1997 r.; WYN: (11) 185733, WUP 31.07.2003.

11. Kałdoński T. i Zespół: Smar plastyczny, zwłaszcza do nasycania porowatych łożysk ślizgowych – P332485, 12.04.1999 r.; WYN: (11) 192006, WUP 31.08.2006.
12. Kałdoński T. i Zespół: Porowate łożyska ślizgowe spiekane z proszku żelaza z dodatkiem heksagonalnego azotku boru h-BN – P401050, 4.10.2012.

## Summary

The results of research on the iron sinters containing various amounts hexagonal boron nitride h-BN are presented in this paper. The tribological research was realised with KEWAT-6 and KEWAT-1 machines at the Department of Tribology, Surface Engineering and Service Fluids Logistics of the Institute of Motor Vehicles and Transportation, FME, MUT. The paper concludes that boron nitride up to 3% by weight in the iron sinter of Höganäs NC.100.24 iron powder efficiently increases tribological properties of the sinter, i.e. it lowers the value of the friction factor without increasing the wear of sintered samples. However, their hardness was slightly decreased. These results were the basis for making some full-size porous sleeves, which included boron nitride h-BN in the sinter. The sleeves were then subjected to stand tests within the framework of the development and research project number PBR/15-249/2007/WAT-OR00002904 [L. 1], financed by the Ministry of Science and Higher Education, 2007–2011. Very advantageous results were obtained from these tests, which allowed us to make a patent claim [L. 8].

