



## Badania smerności olejów zawierających heksagonalny azotek boru

SZYMON SENYK, MACIEJ PEREHUBKA, TADEUSZ KAŁDOŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,  
Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, ul. gen. W. Urbanowicza 2,  
00-908 Warszawa, szymon.senyk@student.wat.edu.pl,  
maciej.perehubka@student.wat.edu.pl, tadeusz.kaldonski@wat.edu.pl

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości smarnościowych oleju hydraulicznego Hydrol L-HL 32, oleju przekładniowego Mobilube 1 SHC 75w-90 oraz dwóch olejów bazowych SN-150 i SN-650, zawierających heksagonalny azotek boru o średniej średnicy ziaren  $d_z = 0,5 \mu\text{m}$ . Do przeprowadzania koniecznych badań wykorzystano aparat czterokulowy (four ball machine). Urządzenie to jest powszechnie stosowane na świecie do oceny właściwości smarnościowych olejów i smarów plastycznych. Określono następujące normatywne parametry smarnościowe: wartość obciążenia zespawania  $P_z$  [daN], wartość obciążenia niezacierającego  $P_n$  [daN], wartość obciążenia zacierającego  $P_t$  [daN], a także graniczne obciążenie zużycia  $G_{oz}$  [daN/mm<sup>2</sup>]. Wykonano także szereg badań niernormatywnych, które obejmowały wyznaczenie dwóch parametrów umożliwiających dokładniejszą ocenę właściwości smarnościowych olejów. W oparciu o przeprowadzone badania stwierdzono, że heksagonalny azotek boru jest dobrym dodatkiem poprawiającym właściwości smarnościowe. Zarejestrowano poprawę tych właściwości zarówno w przypadku oleju hydraulicznego, jak i przekładniowego, a także baz olejowych. Najlepsze efekty poprawy dla oleju hydraulicznego uzyskano po dodaniu 4% h-BN, natomiast w przypadku bazy olejowej SN-150 było to 2% h-BN. Najlepsze efekty dla oleju przekładniowego oraz bazy olejowej SN-650 uzyskano również po dodaniu 4% h-BN. Wykluczono możliwość stosowania większej ilości h-BN niż 4%. Stwierdzono, że większa zawartość h-BN w oleju wywołuje negatywne skutki (w warunkach testów na aparacie czterokulowym), polegające na obniżeniu wartości ocenianych parametrów smarnościowych.

**Słowa kluczowe:** tribologia, smarność, azotek boru

DOI: 10.5604/01.3001.0013.1476

## 1. Wstęp

Smarność charakteryzuje zachowanie substancji smarującej w warunkach tarcia granicznego. Z punktu widzenia współdziałania elementów systemu tribologicznego jest to więc bardzo ważna właściwość cieczy smarującej, która zależy nie tylko od właściwości substancji smarującej, lecz także od stanu smarowanego podłoża [6, 9].

Określa ona zdolność do wytworzenia trwałej warstwy granicznej w wyniku adsorpcji (chemisorpcji) w konkretnym węźle tribologicznym, na danym podłożu o określonym stanie energetycznym smarowanej powierzchni. Zatem podatność ta jest różna w stosunku do różnych rodzajów ciał stałych, z którymi styka się substancja smarująca. Wielkością określającą smarność jest trwałość warstwy granicznej zdeterminowana m.in. trwałością wiązań pomiędzy substancją smarującą a podłożem. Trwałość tę można oceniać w czasie tworzenia warstwy granicznej (np. mierząc ciepło sorpcji), niszczenia jej (np. mierząc ilość energii potrzebnej do przerwania filmu granicznego) oraz poprzez badania zużycia współpracujących elementów i ich skłonności do zacierania [6, 9]. Ta ostatnia metoda wymaga stosowania odpowiednich urządzeń (aparatów) tribologicznych i znormalizowanych metod badań.

Powszechnie stosowanym na świecie urządzeniem służącym do oceny właściwości smarnościowych olejów i smarów plastycznych jest aparat czterokulowy (four-ball apparatus), na którym badania realizowane są według metodyk ściśle określonych normami (np. ASTM D 2266, ASTM D 2596, ASTM D 2783, ASTM D 4172, ASTM D 5183, DIN 51350/1/4, IP 239).

Właściwości smarnościowe są jednym z kryteriów doboru olejów i smarów plastycznych w kontekście ich przydatności i potencjalnego zastosowania. W skrajnych warunkach pracujących przy dużych obciążeniach muszą być stosowane substancje smarujące, które gwarantują stworzenie trwałej warstwy granicznej. Jej trwałość jest zdeterminowana między innymi właściwościami smarnościowymi, co wskazuje, że ich ocena jest niezwykle istotna z punktu widzenia eksploatacji węzłów tribologicznych.

Celowe tworzenie warstwy granicznej można osiągnąć przez dodanie do substancji smarującej związków o charakterze powierzchniowo-czynnym lub tworzących nowy film smarujący ułatwiający poślizg na granicy faz ciecz–ciało stałe. Takim związkiem jest azotek boru, zastosowany w badaniach opisanych w dalszej części pracy. Technologia otrzymywania, syntezy i oczyszczania heksagonalnego azotku boru została opracowana w Wojskowej Akademii Technicznej. Rozpoczęto również badania mające na celu rozważenie wpływu tego dodatku na właściwości smarnościowe olejów i smarów plastycznych. Zostały one opublikowane i opisane między innymi w monografii [7].

W artykule przedstawiono wyniki rozszerzonych, bardziej szczegółowych i kompleksowych badań wpływu heksagonalnego azotku boru na właściwości

smarnościowe olejów smarowych o zróżnicowanej lepkości [13, 16]. Mianowicie chodziło o ocenę wpływu określonej ilości azotku boru na właściwości smarnościowe olejów o małej i dużej lepkości. W obu przypadkach badania dotyczyły olejów bazowych bez innych dodatków oraz olejów z odpowiednim pakietem dodatków, stosowanym przez producenta [19-22].

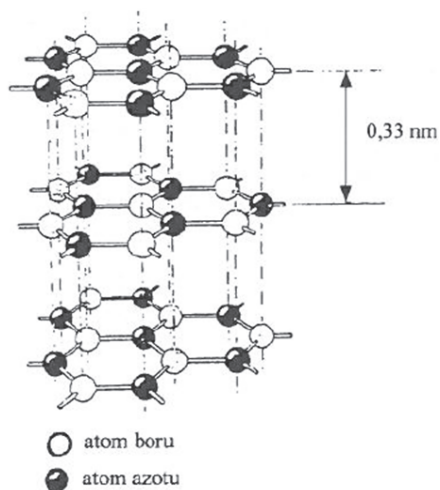
## 2. Charakterystyka heksagonalnego azotku boru h-BN

Azotek boru (BN) jest jednym z proponowanych dodatków do olejów i smarów plastycznych. Jest to nieorganiczny związek chemiczny boru i azotu w postaci stałej. Najczęściej występuje w układzie o strukturze [7, 8, 10]:

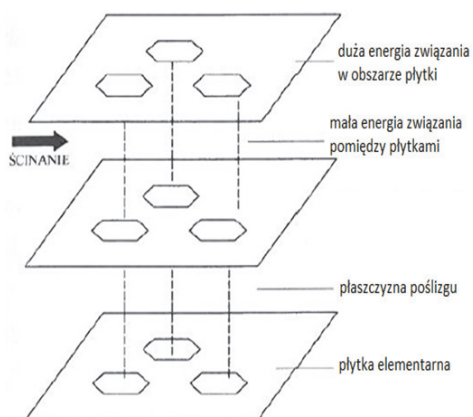
- heksagonalnej, analogicznej do struktury grafitu,
- heksagonalnej ściśle upakowanej,
- regularnej, analogicznej do struktury diamentu.

Omawiany związek h-BN jest miękką, heksagonalną odmianą o budowie płytkowej (warstwowej), co pozwala go zakwalifikować do substancji o spójności anizotropowej. Budowa heksagonalnej odmiany azotku boru h-BN jest charakterystyczna dla smarów stałych. Pomiędzy płytkami (warstwami) występują w azotku słabe oddziaływania, które zaliczają się do oddziaływań międzycząsteczkowych (oddziaływania Van der Waalsa). Natomiast poszczególne atomy w pojedynczej warstwie są związane ze sobą silnymi wiązaniami (kowalencyjnymi). Związek ten charakteryzuje się małą twardością. Azotek boru h-BN jest często nazywany „białym grafitem”, ponieważ jego budowa jest podobna do grafitu. Kolejnym podobieństwem do grafitu jest wykazywanie przez h-BN małych wartości współczynnika tarcia w atmosferze powietrza, które stanowi środowisko tarcia. Na rysunku 2.1 przedstawiono siatkę krystaliczną azotku boru, natomiast na rysunku 2.2 jego budowę płytkową [1, 5, 7].

Azotek boru h-BN posiada wiele właściwości fizykochemicznych, dzięki którym można go potencjalnie zastosować w niekonwencjonalnych węzłach tribologicznych. Azotek jest stabilny chemicznie oraz stabilny w wysokich temperaturach. Utlenia się dopiero w temperaturze około 1000°C. Cechuje się wysoką temperaturą topnienia, wynoszącą aż 3000°C (pod ciśnieniem azotu) i przewodnością cieplną. Nie reaguje z większością substancji chemicznych ze względu na dużą odporność chemiczną. Jest praktycznie odporny na działanie pierwiastków takich jak wodór, jod czy chlor oraz wielu czynników chemicznych, a także jest nieprzewodzący elektrycznie. Kwas siarkowy rozkłada azotek boru jedynie w temperaturze wrzenia, natomiast kwas azotowy i solny nie powodują istotnych zmian w strukturze azotku. Wybrane właściwości fizyczne heksagonalnego azotku boru, wyprodukowanego według technologii WAT, przedstawiono w tabeli 2.1 [7, 8].



Rys. 2.1. Siatka krystaliczna azotku boru [7]



Rys. 2.2. Płytkowa budowa azotku boru [7]

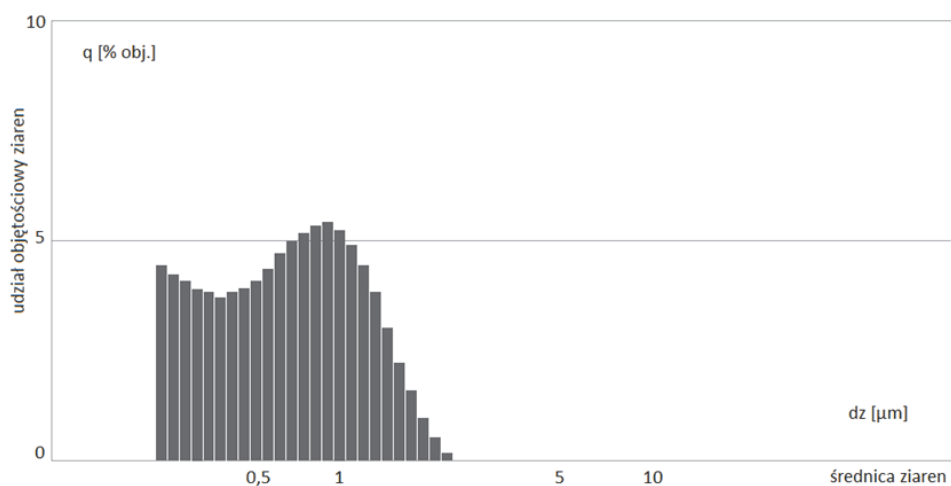
TABELA 2.1

Właściwości heksagonalnego azotku boru [7]

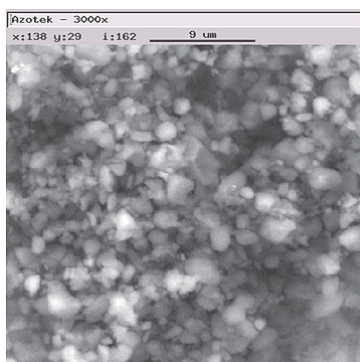
Gęstość	2,200-2,355 g/cm <sup>3</sup>
Twardość w skali Mohsa	1-2
Przewodnictwo cieplne	0,036-0,039 cal/cm·s·deg
Przewodnictwo właściwe	10 <sup>14</sup> Ω cm
Temperatura topnienia	2000-3000°C
Temperatura utleniania	≥ 1000°C
Średnica ziaren	≤ 2 μm

Należy zaznaczyć, że heksagonalny azotek boru nie jest typowym dodatkiem smarnościowym, działającym na zasadzie zwilżenia, adsorpcji lub chemisorpcji surfaktantu na powierzchni smarowanej. Związek ten, tworząc nowy film smarny (NFS) w postaci poślizgowych, lamelarnych warstewek na granicy faz ciecz–ciało stałe, przyczynia się pośrednio do poprawy właściwości smarnościowych substancji, do której go wprowadzono, a także do porowatej struktury łożyska ślizgowego [7, 8, 11, 12, 17, 18].

Zastosowany w obecnych badaniach heksagonalny azotek boru był rozdrobiony w młynie prętowym. Na rysunku 2.3 zobrazowano rozdrobienie cząstek h-BN po trzech godzinach. Jak widać, rozdrobiony h-BN składał się wyłącznie z ziaren mniejszych od 2  $\mu\text{m}$ . Na rysunku 2.4 przedstawiono skaningowy obraz rozdrobionego h-BN.



Rys. 2.3. Rozdrobnienie azotku boru w młynie prętowym po trzech godzinach [7]



Rys. 2.4. Skaningowy obraz rozdrobionego azotku boru [7]

### 3. Zakres i metodyka badań

Podstawowym celem tych badań było określenie wpływu heksagonalnego azotku boru na właściwości smarnościowe oleju o niskiej lepkości w porównaniu do oleju o znacznie większej lepkości. Ponadto należało sprawdzić, jak funkcjonuje h-BN w oleju bez jakichkolwiek innych dodatków, a jak w oleju zawierającym inne dodatki (w tym powierzchniowo czynne). Czy w tym drugim przypadku może wystąpić efekt synergii, objawiający się znacznie większą poprawą właściwości smarnościowych niż w przypadku oleju bazowego niezawierającego żadnych innych dodatków oprócz h-BN?

#### 3.1. Obiekty badań

W badaniach wykorzystano olej hydrauliczny Hydrol L-HL 32 oraz olej przekładniowy Mobilube 1 SHC 75w-90 [19, 22]. Hydrol L-HL 32 jest średniej klasy olejem mineralnym zawierającym jako dodatki tylko inhibitory utleniania i korozji; nie ma żadnych dodatków smarnościowych. Natomiast olej przekładniowy Mobilube 1 SHC 75w-90 jest olejem przewyższającym wymagania zawarte w klasyfikacji MT-1/GL-4/GL-5. Jest to olej skomponowany na bazie oleju syntetycznego, uszlachetnionego pakietem dodatków, w tym m.in. siarczkiem olefinowym (1÷5% (m/m)) oraz solami amin i estrów kwasu fosforowego (< 2,5% (m/m)), dzięki czemu ma bardzo dobre właściwości smarnościowe. Dobrano do nich odpowiednie bazy olejowe, tj. bazę SN-150 oraz bazę SN-650 [20, 21]. Dostępne bazy olejowe przyporządkowano do olejów smarowych na podstawie ich właściwości reologicznych (wartości lepkości kinematycznej oraz wskaźnika lepkości) przedstawionych w tabeli 3.1.

TABELA 3.1

Właściwości reologiczne obiektów badań [19-22]

Obiekt badań Parametr	Hydrol L-HL 32	Mobilube 1 SHC 75w-90	SN-150	SN-650
Lepkość kinematyczna w 40°C [mm <sup>2</sup> /s]	32,3	102,0	31,4	151,0
Lepkość kinematyczna w 100°C [mm <sup>2</sup> /s]	–	15,1	5,23	13,7
Wskaźnik lepkości	103	156	95	87

W celu oceny właściwości smarnościowych wybranych obiektów badań sporządzono ich mieszaniny z heksagonalnym azotkiem boru, w następujących stężeniach masowych h-BN: 0,5; 2; 4; 6 i 10%. Proces przygotowania próbek obejmował odważenie odpowiedniej ilości h-BN na wadze analitycznej i dodanie go do odmierzonej ilości oleju. Następnie z wykorzystaniem mieszadła laboratoryjnego ML 4 dokonano

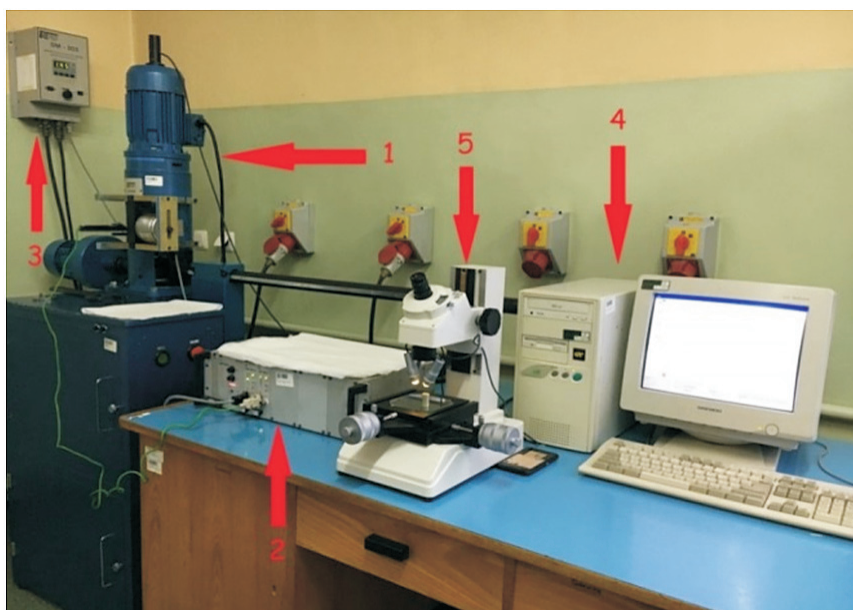
wstępnego wymieszania mieszanin, które trwało 20 minut. Ostatnim etapem było równomierne „zawieszenie” cząstek h-BN w mieszaninie. W tym celu posłużono się ultradźwiękową myjką CD 4820, w której próbki stabilizowano kolejne 20 minut. Tak przygotowane kolejno próbki poddawano natychmiast badaniom na aparacie czterokulowym. Dzięki temu uniknięto sedimentacji, jaka mogła zaistnieć w przypadku dłuższego przechowywania próbek przed cyklem badań. Wykonano także badania olejów i baz olejowych niezawierających h-BN, co pozwoliło na porównanie wpływu h-BN na poprawę ocenianych właściwości smarnościowych.

### 3.2. Metodyka badawcza

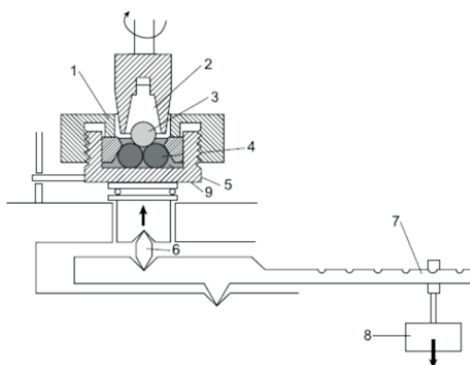
Badania zostały przeprowadzone na aparacie czterokulowym T-02, wyprodukowanym przez Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu. Aparat ten znajduje się na wyposażeniu Zakładu Tribologii, Inżynierii Powierzchni i Logistyki Płynów Eksploatacyjnych WME WAT.

Aparat T-02 pozwala na uzyskanie prędkości ślizgowych, przy których liczba obrotów górnej kuli na minutę wynosi od 50 do 1500. Węzeł tarcia aparatu może być obciążany w zakresie od 0 do 800 kG ( $0 \div 784,53$  daN; przy przeliczeniu  $g = 9,8066$  m/s<sup>2</sup>) [20]. Badania postanowiono zrealizować według starej normy PN-76/C-04147 [14], ponieważ wdrażana obecnie norma europejska jest obciążona wieloma błędami i nadal trwają prace w PKN nad jej usprawnieniem [2]. Ponadto wcześniej zrealizowane badania [4, 5, 7, 8] wykonano zgodnie z tą normą, zatem w celu efektywnego porównania wyników należało ocenić te same normatywne parametry smarnościowe. Wszystkie obciążenia wskazane w normie [14] zostały zaznaczone na dźwigni obciążającej aparatu T-02. Możliwe jest także narastanie obciążenia w sposób ciągły z prędkością ok. 409 N/s [3]. Stanowisko badawcze przedstawiono na rysunku 3.1.

W badaniach na maszynie czterokulowej właściwości smarnościowe ocenia się m.in. w oparciu o średnicę szkar powstałych w wyniku zużycia na trzech dolnych kulach, które wraz z czwartą (górną) — obracającą się zadaną prędkością obrotową i dociskaną określonym obciążeniem — tworzą modelowy węzeł tarcia aparatu (rys. 3.2). W takim przypadku rodzaj styku między elementami zamodelowanego węzła należy określić jako punktowy. Kule ułożone są w postaci czworościanu foremego, zatem zadane obciążenie węzła rozkłada się na trzy jednakowe siły działające w strefie styku kuli górnej z trzema kulami dolnymi. Norma ściśle określa, że kule powinny być wykonane ze stali łożyskowej, w klasie dokładności 0. Średnica pojedynczej kuli wynosi ½", czyli 12,7 mm [14]. Wszelkie inne parametry dotyczące kul ze stali łożyskowej podaje norma [15]. Schemat tego węzła tarcia przedstawiono na rysunku 3.2.



Rys. 3.1. Widok aparatu czterokulowego T-02 wraz z elementami stanowiska badawczego: 1 — aparat czterokulowy T-02, 2 — mikroprocesorowy sterownik tribologiczny, 3 — regulator SM – 303, 4 — komputer wraz z programem sterującym, 5 — mikroskop pomiarowy MP1



Rys. 3.2. Schemat kinematyczny aparatu czterokulowego: 1 — pokrywa mocująca kule dolne, 2 — uchwyt kuli górnej, 3 — kula górna (obracana), 4 — kule dolne (nieruchome), 5 — naczynie z badanym olejem, 6 — pryzmat, 7 — dźwignia, 8 — obciążniki, 9 — badany olej [9]

Wspomniane ślady zużycia powstają na kulach w czasie danego biegu pod wpływem zadanego obciążenia, określanego w daN. Norma [14] ściśle określa, jaką wartość obciążenia należy zadać. Podaje się je na ogół w daN (choć w starej normie [14] są to kG, w związku z czym przyjęto przelicznik  $g = 9,8066 \text{ m/s}^2$ ). Pomiaru średnicy dokonuje się w kierunku prostopadłym i równoległym do śladów zużycia.



Na podstawie zmierzonych średnic oblicza się średnią średnicę skaz, wyrażoną w milimetrach, powstałych przy zadanym obciążeniu [14].

Wyznaczono następujące normatywne parametry określające smarność olejów:

- $P_n$  — największe obciążenie niezacierające,
- $P_z$  — obciążenie zespawania,
- $P_t$  — obciążenie zacierające,
- $G_{oz}$  — graniczne obciążenie zużycia.

Zostały one wyznaczone dla wszystkich próbek olejów opisanych w rozdziale 3.1. Ponadto określono nienormatywny parametr oznaczany symbolem  $p_{oz}$  (wzór 3.2). Sformułowano także przebiegi wartości średnic skaz zużycia w funkcji czasu —  $d = f(t)$ . Przykładowe wykresy tego typu przedstawiono w literaturze [7]. W oparciu o nie wykonano także obecne badania tego parametru.

Największe obciążenie niezacierające ( $P_n$ ) to największe obciążenie (z szeregu obciążeń podanych w normie [14]), przy którym średnia średnica skaz nie jest większa niż 5% od skompensowanej średnicy skaz ( $d$ ). Pomiar wykonany został w czasie  $10 \pm 0,2$  sekund, przy  $n = 1450$  obr/min. Pierwszy bieg odbył się przy obciążeniu równym 78,45 daN, następnie porównano średnią średnicę skaz ze skompensowaną średnicą skaz, która jest podana w normie. W przypadku gdy średnia średnica skaz przekroczyła wartość skompensowanej średnicy o więcej niż 5%, zmniejszono obciążenie o jeden stopień według normy [14] i porównywano kolejny wynik w ten sam sposób. Jeśli średnia średnica skaz okazała się mniejsza niż skompensowana średnica, wówczas to obciążenie uznawano za największe obciążenie niezacierające.

Warunki wyznaczenia obciążenia zespawania ( $P_z$ ) są tożsame z tymi, przy jakich określa się największe obciążenie niezacierające. Przez obciążenie zespawania rozumie się najmniejsze zadane (według normy [14]) obciążenie, które powoduje zespawanie kuli górnej z kulami dolnymi. Sygnalizuje to, że nastąpiło przekroczenie największego nacisku, jaki jest w stanie wytrzymać substancja smarująca. Zespawanie nie następuje jednak w każdym wypadku, wobec czego za  $P_z$  uznaje się taką wartość obciążania, przy której średnia średnica skaz na kulach przekracza 4 mm. W przypadku gdy pomiar przy danym obciążeniu uzna się za  $P_z$ , trzeba go powtórzyć. Wówczas, gdy drugi pomiar nie okaże się tożsamy, należy wykonać bieg na obciążeniu większym. Obciążeniem zespawania jest wobec tego obciążenie, które spowodowało dwukrotne zespawanie kul [14].

Obciążenie zacierające ( $P_t$ ) to najmniejsze płynnie wzrastające obciążenie, przy którym wystąpi zdecydowany wzrost oporów w węźle tribologicznym, wskazujący przerwanie warstwy smarującej. Pomiar wykonano po wcześniejszym ustawieniu obciążenia węzła tarcia na pozycję 0. Następnie włączono bieg aparatu ( $n = 500$  obr/min), w trakcie którego obciążenie wzrastało w sposób ciągły od 0 do 800 kG (784,53 daN), z prędkością  $v = 409$  N/s. W trakcie próby obserwowano wskazania miernika momentu tarcia. Gdy następował gwałtowny wzrost momentu tarcia, wstrzymano próbę. Wzrost ten świadczył o zacieraniu kulek, a więc o przerwaniu filmu

granicznego. Następnie odczytywano wartość obciążenia zacierającego w momencie skoku momentu tarcia oraz czas, po jakim on nastąpił. Jako wynik przyjmowano średnią arytmetyczną z co najmniej trzech pomiarów, nieróżniących się od średniej arytmetycznej o więcej niż 10%.

Graniczne obciążenie zużycia ( $G_{oz}$ ) to obciążenie, które określa nacisk w węźle tribologicznym przy stałym obciążeniu zadanym ( $P$ ), jest obliczane na podstawie średniej średnicy skaz ( $d$ ). Pomiar wykonano po biegu aparatu T-02 przy obciążeniu zadanym równym 147,1 daN (150 kG), trwającym  $60 \pm 1$  sekund, przy  $n = 500$  obr/min. Unikano przy tym gwałtownych zmian przy obciążeniu, gdyż mogłoby to zdeformować powierzchnie kul. Po zakończeniu biegu zmierzono średnicę skaz na dolnych kulach poddanych próbie i następnie obliczono średnią średnicę ich skaz. Następnie, korzystając z wzoru (3.1), obliczono graniczne obciążenie zużycia:

$$G_{oz} = 0,52 \times \frac{P}{d^2}, \left[ \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2} \right], \quad (3.1)$$

gdzie: 0,52 — współczynnik wynikający z rozkładu sił w węźle tarcia aparatu czterokulowego (czworościanu foremego),  
 $P$  — obciążenie zadane w daN,  
 $d$  — średnia średnica skaz na powierzchni kul (mm).

Jako wynik przyjmowano średnią arytmetyczną z co najmniej trzech pomiarów nieróżniących się od średniej arytmetycznej o więcej niż 10%.

Parametr określany jako  $p_{oz}$  odzwierciedla naciski powierzchniowe w węźle tarcia (podobnie jak  $G_{oz}$ ). Prędkość obrotowa w tym teście wynosi 500 obr/min, natomiast prędkość przyrostu obciążenia to 409 N/s. Warunki testu są zatem takie jak przy wyznaczaniu parametru  $P_t$ . Badanie prowadzone jest przy obciążaniu wzrastającym w sposób ciągły. Pomiar rozpoczyna się przy obciążeniu wynoszącym 0 daN. Zatarcie określa się dla wartości obciążenia wynoszącej 784,53 daN (800 kG) — jest to wartość graniczna (maksymalna), przy której aparat czterokulowy samoczynnie się wyłącza (względy bezpieczeństwa).

Parametr  $p_{oz}$  oblicza się na podstawie obciążenia  $P_{max}$  jednakowego we wszystkich próbach oraz śladów zatarcia powstałych na kulkach w czasie testu. Zależność ta ma następującą postać:

$$p_{oz} = 0,52 \times \frac{P_{max}}{d^2}, \left[ \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2} \right] \quad (3.2)$$

gdzie: 0,52 — współczynnik wynikający z rozkładu sił w węźle tarcia aparatu czterokulowego,  
 $P_{max}$  — maksymalna wartość obciążenia [daN],  
 $d$  — średnia średnica skaz na kulach [mm].

Przyjęto założenie, że wartość  $p_{oz}$  stanowić będzie średnia z co najmniej trzech pomiarów nieróżniących się między sobą o więcej niż 10% (podobnie jak dla  $G_{oz}$  i  $P_t$ ).

Ostatnią fazą badań było określenie zmiany średnicy skaz na kulach w funkcji czasu testu. W tym celu wykonano testy dla dwóch obciążeń. Jedno z nich było o stopień mniejsze od najmniejszego obciążenia niezacierającego spośród wszystkich przebadanych próbek. Drugie obciążenie było jeszcze mniejsze. Testy prowadzono przy prędkości obrotowej wynoszącej 1450 obr/min. Obiekty badań poddano próbom trwającym 1, 5, 15 i 30 minut.

#### 4. Wyniki badań i analiz

Wspominane parametry, opisane w części dotyczącej metodyki badań, znajdują się w przedstawionych poniżej tabelach. Tabela 4.1 zawiera wyniki dla oleju hydraulicznego Hydrol L-HL 32 i bazy olejowej SN-150, natomiast w tabeli 4.2 są wyniki dla oleju przekładniowego Mobilube 1 SHC 75w-90 oraz bazy olejowej SN-650.

TABELA 4.1  
Zestawienie wartości parametrów badanych próbek oleju Hydrol L-HL 32 i bazy olejowej SN-150

Próbka Parametr	SN* -	SN+ 0,5% BN	SN+ 2% BN	SN+ 4% BN	SN+ 6% BN	SN+ 10% BN
$P_n$ [daN]	39,23	49,03	49,03	49,03	49,03	49,03
$P_z$ [daN]	156,91	156,91	156,91	156,91	156,91	156,91
$G_{oz}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]	60,61	61,34	62,80	41,28	40,11	38,73
$P_t$ [daN]	109,07	109,78	127,84	128,84	126,11	104,30
$p_{oz}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]	492,57	493,47	517,65	513,82	503,58	410,05

Próbka Parametr	H* -	H+ 0,5% BN	H+ 2% BN	H+ 4% BN	H+ 6% BN	H+ 10% BN
$P_n$ [daN]	49,03	61,78	61,78	61,78	61,78	61,78
$P_z$ [daN]	156,91	156,91	156,91	156,91	156,91	156,91
$G_{oz}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]	50,91	51,31	54,05	57,64	48,48	47,86
$P_t$ [daN]	139,67	158,83	223,59	217,45	203,14	207,91
$p_{oz}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]	562,95	578,43	593,32	675,40	673,65	666,70

\*SN – baza olejowa SN-150

\*H – Hydrol L-HL 32

Na podstawie analizy danych zawartych w tabeli 4.1 stwierdzono, że azotek boru w określonych stężeniach wpływa na poprawę właściwości smarnościowych oleju.

W przypadku bazy olejowej SN-150 poprawa ta widoczna jest już przy analizie parametru  $P_n$ . Po zastosowaniu h-BN największe obciążenie niezacierające zwiększyło się z 39,23 daN do 49,03 daN. Próbki z dodatkiem h-BN miały zatem lepsze właściwości przeciwzatarciowe.

Parametr  $P_z$  nie okazał się różnicujący, gdyż dla wszystkich próbek jest on na tym samym poziomie. W tym wypadku wpływ azotku boru nie jest zauważalny.

Z kolei wartości granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz}$  po dodaniu h-BN rosną, lecz tylko do stężenia wynoszącego 2%. Poprawa ta jest jednak nieznaczna. Natomiast dodanie h-BN w stężeniach 4%, 6% i 10% do bazy olejowej SN-150 znacznie pogorszyło jej właściwości przeciwzużyciowe.

Obciążenie zatarcia  $P_t$  dla bazy olejowej SN-150 po dodaniu 4% h-BN ma największą wartość. Niewiele gorsze wyniki uzyskano dla próbek z zawartością 2% i 6% heksagonalnego azotku boru. Pozostałe próbki mają gorsze wyniki (o około 20 daN).

Najlepsze efekty, oceniane w oparciu o parametr  $p_{oz}$ , uzyskano dla próbki SN-150 z dodatkiem 2% h-BN. Niewiele gorsze wyniki uzyskały próbki z dodatkiem 4%. Pozostałe próbki miały gorsze wartości.

Dla oleju hydraulicznego parametr  $P_n$  miał taką samą wartość dla wszystkich próbek zawierających h-BN. Wartość ta jest o ok. 10 daN większa niż dla próbki bez dodatku h-BN, podobnie jak w przypadku SN-150.

Tak jak w przypadku bazy olejowej SN-150, parametr  $P_z$  ma taką samą wartość dla wszystkich zbadanych próbek.

Graniczne obciążenie zużycia  $G_{oz}$  oleju hydraulicznego miało najlepszą wartość dla próbki z dodatkiem 4% h-BN, nieco gorszą dla próbki z 2% h-BN. Pozostałe próbki miały wartości na podobnym poziomie (w przypadku dodania 6% h-BN i 10% h-BN nieznacznie niższym niż próbka bez dodatku h-BN).

Analiza danych zawartych w tabeli 4.1 pozwala także zauważyć zróżnicowanie wartości parametru  $P_t$  dla oleju Hydrol L-HL 32. Wpływ heksagonalnego azotku boru na poprawę tego parametru był duży. Zastosowanie dodatku pozwoliło na poprawę obciążenia zacierającego o 20-80 daN. Najlepszą wartość  $P_t$  uzyskano dla próbki oleju zawierającego 2% h-BN i nieco mniejszą dla próbki z 4% h-BN.

Z kolei najlepszą wartość parametru  $p_{oz}$  uzyskano dla oleju hydraulicznego z dodatkiem 4% h-BN. Dobre wyniki otrzymano także dla próbek z dodatkiem 6% i 10% BN. Gorsze były wyniki dla próbek zawierających 2% i 0,5% h-BN, ale jednak lepsze niż dla próbki oleju niezawierającego h-BN.

TABELA 4.2

Zestawienie wartości parametrów badanych próbek dla oleju Mobilube 1 SHC 75w-90 i bazy olejowej SN-650

Próbka Parametr	SN*	SN+ 0,5% BN	SN+ 2% BN	SN+ 4% BN	SN+ 6% BN	SN+ 10% BN
$P_n$ [daN]	49,03	49,03	61,78	61,78	61,78	61,78
$P_z$ [daN]	156,91	156,91	156,91	156,91	156,91	156,91
$G_{oz}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]	64,58	68,14	74,63	75,29	67,38	62,20
$P_t$ [daN]	137,63	172,46	173,83	196,32	168,37	165,65
$p_{oz}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]	411,02	433,56	511,29	584,87	443,27	427,28

Próbka Parametr	M*	M+ 0,5% BN	M+ 2% BN	M+ 4% BN	M+ 6% BN	M+ 10% BN
$P_n$ [daN]	123,56	123,56	123,56	123,56	123,56	123,56
$P_z$ [daN]	784,53	784,53	784,53	784,53	784,53	608,01
$G_{oz}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]	332,15	342,11	346,67	357,03	341,44	339,19
$P_t$ [daN]	306,26	311,67	314,25	332,65	299,93	298,57
$p_{oz}$ [daN/mm <sup>2</sup> ]	695,67	697,02	698,63	700,66	670,12	657,45

\*SN – baza olejowa SN-650

\*M – Mobilube 1 SHC 75w-90

Wyniki badań zawarte w tabeli 4.2 jednoznacznie wskazują, podobnie jak w poprzednim przypadku (tabela 4.1), że heksagonalny azotek boru w określonych stężeniach wpływa na poprawę właściwości smarnościowych oleju.

W przypadku bazy SN-650 ostatnie obciążenie niezacierające  $P_n$  dla próbek zawierających od 2 do 10% h-BN to 61,78 daN, podczas gdy dla oleju bazowego bez dodatku oraz z dodatkiem 0,5% BN obciążenie to miało wartość 49,03 daN. Natomiast obciążenie zespawania dla wszystkich próbek wynosiło 156,91 daN, tzn. obecność h-BN nie spowodowała zróżnicowania tego parametru.

W przypadku oleju przekładniowego Mobilube 1 SHC 75w-90 wyniki badań wskazane w tabeli 4.2 dotyczące ostatniego obciążenia niezacierającego  $P_n$  są tożsame dla wszystkich badanych próbek. Natomiast obciążenie zespawania dla próbki zawierającej 10% BN było mniejsze niż dla pozostałych próbek. Fakt ten każe stwierdzić, że takie stężenie azotku boru w tym oleju było zbyt duże — cząstki h-BN uniemożliwiły swobodny dopływ oleju do obszaru tarcia.

Najlepsze wyniki badań granicznego obciążenia zużycia  $G_{oz}$  próbek SN-650 otrzymano dla 4% zawartości h-BN. Podobną wartość  $G_{oz}$  wykazała próbka SN-650 z dodatkiem 2% h-BN. Skoro próbki te decydowały o najmniejszym zużyciu kul, to znaczy, że wytworzyły warstwę smarującą najlepiej zapobiegającą temu zjawisku w warunkach

badania na aparacie czterokulowym. Wyniki dla pozostałych próbek zawierających azotek boru są gorsze lub bliskie tym uzyskanym dla bazy olejowej bez dodatku.

Odnosnie do oleju przekładniowego największe wartości  $G_{oz}$  otrzymano również dla próbki Mobilube 1 SHC 75w-90 zawierającej 4% h-BN. Takie stężenie azotku boru w mieszaninie z olejem przekładniowym najlepiej zapobiegało zużyciu kul modelowego wężła tarcia aparatu czterokulowego.

Wyniki  $G_{oz}$  dla oleju przekładniowego są około pięciokrotnie lepsze niż dla bazy olejowej. Próbki wykonane na bazie SN-650 mają zdecydowanie gorsze właściwości przeciwzużyciowe, ponieważ nie zawierają takiego pakietu dodatków uszlachetniających jak olej Mobilube 1 SHC 75w-90, w tym specjalnych dodatków smarowościowych.

Kolejnym wyznaczonym parametrem było obciążenie zacierające  $P_t$ . Dla bazy olejowej wynik  $P_t$  jest zdecydowanie mniejszy (o około 30÷50 daN) niż dla próbek z dodatkiem azotku boru. Takie wyniki pozwalają sądzić, że azotek boru miał wpływ na poprawę właściwości przeciwzatarciowych. Najlepsze rezultaty uzyskano dla próbki z dodatkiem 4% h-BN. Nieznacznie gorsze efekty dał dodatek 2% h-BN. Pozostałe próbki wykazały mniejsze wartości. Wraz ze wzrostem stężenia h-BN od 6% do 10% wyniki ulegały pogorszeniu, prawdopodobnie z powodu braku swobodnego dopływu oleju do obszaru tarcia.

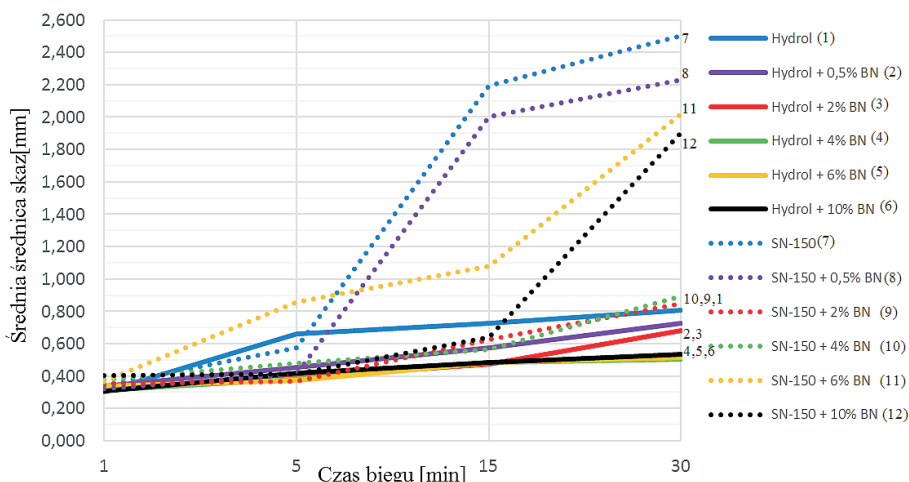
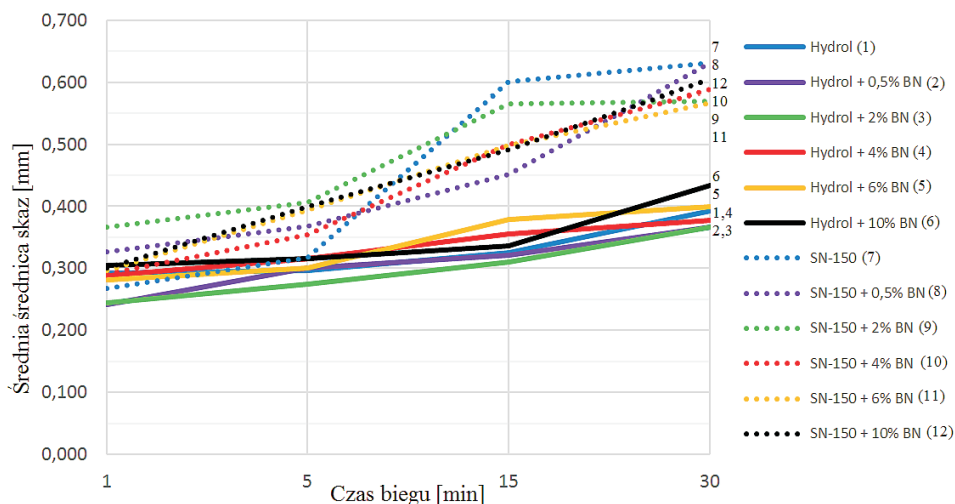
Badania obciążenia zacierającego  $P_t$  próbek oleju przekładniowego Mobilube 1 SHC 75w-90 wykazały, że wpływ obecności heksagonalnego azotku boru nie jest tak wyraźny jak w przypadku bazy olejowej SN-650. Jednak związek ten również w tym przypadku jest w stanie poprawić parametr  $P_t$ . Najlepsze efekty uzyskano po dodaniu do oleju 4% heksagonalnego azotku boru. próbka zawierająca 2% h-BN również charakteryzowała się większą wartością obciążenia zacierającego niż próbka bez dodatku h-BN. Wyniki pozostałych próbek, zawierających więcej h-BN, były gorsze niż w przypadku „czystego” oleju przekładniowego.

Wyniki  $P_t$  uzyskane dla próbek oleju przekładniowego są około dwukrotnie lepsze niż wyniki dla bazy olejowej. Właściwości przeciwzatarciowe oleju przekładniowego są zdecydowanie lepsze ze względu na obecność w nim specjalnego pakietu dodatków uszlachetniających.

Najlepsze efekty, oceniane w oparciu o parametr  $p_{oz}$ , spośród próbek sporządzonych z bazy SN-650 uzyskano dla próbki z dodatkiem 4% h-BN.

Podobnie wygląda to dla próbek oleju przekładniowego. Najlepsze efekty daje dodanie 4% h-BN. Nieco gorsze rezultaty otrzymano dla próbki Mobilube 1 SHC 75w-90 z dodatkiem 2% heksagonalnego azotku boru.

Ostatnim etapem badań było wyznaczenie przebiegu charakterystyki  $d = f(t)$ , tj. średniej średnicy skaz zużycia w funkcji czasu testu. Na rysunkach 4.1-4.4 przedstawiono wykresy zmian średnic skaz w funkcji czasu dla dwóch obciążeń nadanych mniejszych od najmniejszego obciążenia niezacierającego spośród wszystkich przebadanych próbek, tj. 39,23 daN i 19,61 daN.

Rys. 4.1. Charakterystyka  $d = f(t)$  przy  $P = 39,23$  daN dla oleju Hydrol L-HL 32 i SN-150Rys. 4.2. Charakterystyka  $d = f(t)$  przy  $P = 19,61$  daN dla oleju Hydrol L-HL 32 i SN-150

Analizując przebiegi  $d = f(t)$  dla obciążeń  $P = 39,23$  daN oraz  $P = 19,61$  daN, wyraźnie widać różnice polegające na znacznie gorszych właściwości przeciwdrożdzeniowych oleju bazowego SN-150 w porównaniu do oleju hydraulicznego Hydrol L-HL 32. Widoczna jest także tendencja do znacznego zużycia kul aparatu czterokulowego w obecności czystego oleju bazowego SN-150 w przypadku obu obciążeń (rys. 4.1 i 4.2). Olej hydrauliczny funkcjonował odmiennie – wykazał tendencję do równomiernego, liniowego wzrostu zużycia stalowych kul aparatu czterokulowego w miarę upływu czasu testu, również w przypadku obu zastosowanych obciążeń.

Znaczna zmiana średniej średnicy skaz zużycia w funkcji czasu biegu wynika ze wzrostu oporów tarcia w węzle przy zwiększonym obciążeniu. W wyniku ruchu obrotowego górnej kuli aparatu czterokulowego następowało „odwirowywanie” cząstek azotku boru wraz z olejem poza obszar tarcia oraz sedymentacja znacznej liczby cząstek h-BN poza tym obszarem. Dotyczyło to szczególnie próbek bazy SN-150 zawierających h-BN przy dłuższych próbach czasowych (15 i 30 minut). Jednak najgorsza wtedy była mimo wszystko „czysta” baza SN-150. Uznano zatem, że dla tak pogarszającej się podczas testu warstwy smarującej zadane obciążenie, wynoszące 39,23 daN, było zbyt duże. Zmniejszenie obciążenia na 19,61 daN dało spodziewane efekty, co pozwoliło na bardziej miarodajne wnioskowanie co do właściwości przeciwzużyciowych badanych olejów zawierających h-BN.

Najlepsze właściwości przeciwzużyciowe oceniane na podstawie tych charakterystyk (przy obciążeniu 39,23 daN) w przypadku bazy olejowej miały próbki z dodatkiem 2% i 4% h-BN. Dla pozostałych próbek widać było wyraźne zmiany średniej średnicy skaz przy zmianie czasu testu z 5 minut na 15 minut oraz z 15 minut na 30 minut. Świadczyło to o zbyt dużych oporach w węzle tarcia i w efekcie gorszych właściwościach przeciwzużyciowych tych próbek.

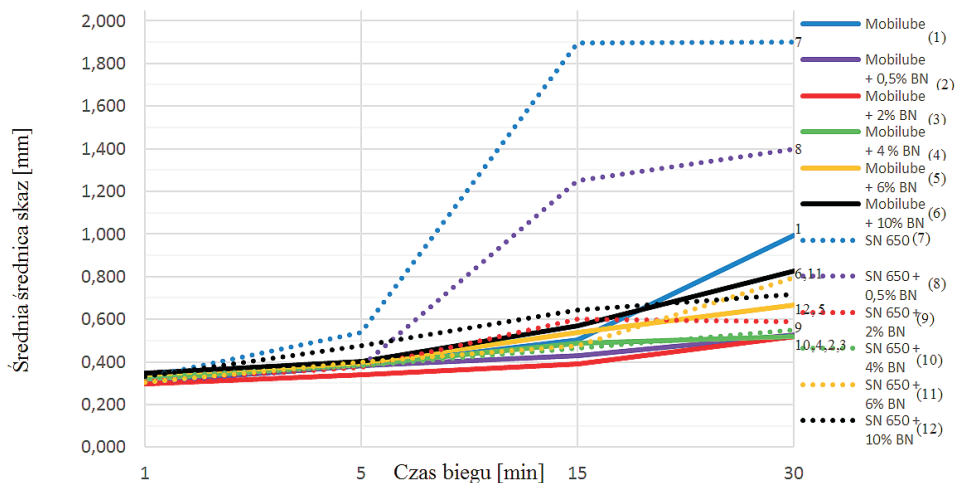
Po zmianie obciążenia na mniejsze najlepsze rezultaty po 30 minutach zaobserwowano dla próbki SN-150 z dodatkiem 6% h-BN. Pozostałe próbki, szczególnie te zawierające 2% i 4% h-BN, charakteryzowały się tylko nieznacznie gorszymi rezultatami. Ponadto we wszystkich przypadkach nie następował tak duży jak poprzednio skok zmiany wartości średniej średnicy skaz zużycia.

W przypadku oleju hydraulicznego, przy obciążeniu 39,23 daN nie zaobserwowano takich skokowych zmian średniej średnicy skaz zużycia. Najlepsze efekty po 30 minutach uzyskano dla próbek z dodatkiem 4% i 6% h-BN. Po 15 minutach testu tak samo dobra była próbka zawierająca 2% h-BN. Widać zatem wyraźnie wpływ h-BN na poprawę właściwości przeciwzużyciowych. Zmiana obciążenia na 19,61 daN (rys. 4.2) pozwoliła stwierdzić, że próbka z dodatkiem 2% h-BN, która przy obciążeniu 39,23 daN po 30 minutach była nieznacznie gorsza od próbek zawierających 4% i 6% h-BN, teraz miała najlepsze właściwości przeciwzużyciowe, oceniane na podstawie zmiany średniej średnicy skaz w funkcji czasu testu. Przy mniejszym obciążeniu właściwości przeciwzużyciowe próbek z dodatkiem 4% i 6% h-BN uległy nieznacznemu pogorszeniu w stosunku do próbki zawierającej 2% h-BN.

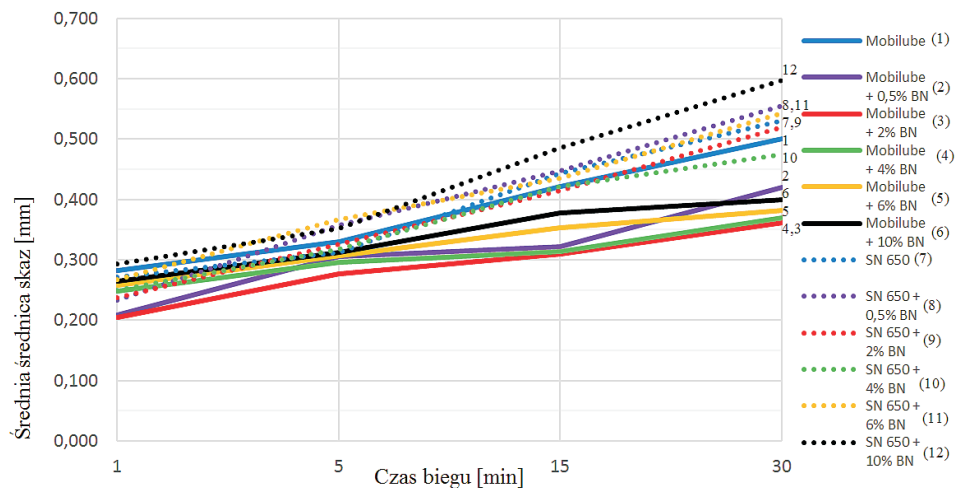
Zdecydowanie większe wartości średniej średnicy skaz otrzymano w przypadku oleju bazowego SN-150. Wskazuje to na fakt, że olej hydrauliczny Hydrol L-HL 32 posiada znacznie lepsze właściwości przeciwzużyciowe, mimo braku typowego dodatku smarnościowego. Największe wartości średniej średnicy skaz po teście 30-minutowym przy obciążeniu 39,23 daN w przypadku bazy olejowej SN-150 wynoszą ponad 2 mm (nawet do 2,5 mm), podczas gdy w przypadku oleju hydraulicznego 0,6 mm. Przy obciążeniu 19,61 daN różnice w wartościach średniej średnicy skaz nie są tak duże. Potwierdza się jednak fakt, że olej hydrauliczny posiada lepsze



właściwości przeciwzużyciowe. Wartości maksymalne średniej średnicy skaz przy tym obciążeniu i po 30 minutach testu wynoszą 0,6 mm dla bazy olejowej i 0,4 mm dla oleju hydraulicznego.



Rys. 4.3. Charakterystyka  $d = f(t)$  przy  $P = 39,23$  daN dla oleju Mobilube 1 SHC 75w-90 i SN-650



Rys. 4.4. Charakterystyka  $d = f(t)$  przy  $P = 19,61$  daN dla oleju Mobilube 1 SHC 75w-90 i SN-650

Wyniki uzyskane dla oleju przekładniowego Mobilube 1 SHC 75w-90 przy obciążeniu wynoszącym 39,23 daN wskazują, że olej przekładniowy posiada znacznie lepsze właściwości przeciwzużyciowe niż referencyjna baza SN-650. Mówi o tym mniejsza średnia średnica skaz zużycia otrzymana dla tego oleju w porównaniu

z bazą olejową. Dodanie heksagonalnego azotku boru poprawiło charakterystyki tego oleju, szczególnie w przypadku próbek zawierających 0,5%, 2% oraz 4% h-BN. W obecności oleju przekładniowego bez dodatku h-BN występował skok wartości średniej średnicy skaz, przy zmianie czasu testu z 15 minut na 30 minut. Zatem po dłuższym okresie pracy, gdy w wyniku wzrostu temperatury następuje zmniejszenie lepkości oleju, dochodzi do znacznego pogorszenia wytrzymałości warstwy smarującej. W przypadku oleju bazowego SN-650 oraz oleju SN-650 zawierającego 0,5% BN efekt taki występował znacznie wcześniej — przy przejściu z 5 minut na 15 minut (rys. 4.3). Ich właściwości przeciwzużyciowe były zdecydowanie najgorsze. Natomiast dobre wyniki po 30 minutach uzyskano dla pozostałych próbek bazy SN-650 z dodatkiem h-BN, lepsze od oleju niezawierającego h-BN. Najlepsze rezultaty otrzymano dla próbek SN-650 zawierających 2% oraz 4% h-BN.

Przy obciążeniu 39,23 daN, szczególnie w przypadku olejów niezawierających h-BN, gdy jednocześnie występowało duże „odwirowywanie” cząstek BN poza obszar tarcia, dochodziło w efekcie do przzerwiania filmu smarującego i rejestrowano nagły wzrost oporów w modelowym węźle aparatu czterokulowego. Ustępował on po chwili, jednak miało to zasadniczy wpływ na wzrost średnic skaz zużycia powstałych na dolnych kulach węzła tarcia.

Zmiana obciążenia z 39,23 daN (rys. 4.3) na 19,61 daN (rys. 4.4) dała spodziewane efekty. W zasadzie nie dochodziło do skokowego wzrostu oporów w węźle tarcia. Dla próbek oleju przekładniowego Mobilube 1 SHC 75w-90 uzyskano znacznie lepsze efekty niż dla bazy SN-650. Zmiany wartości średnic skaz zużycia w funkcji czasu testów (1, 5, 15, 30 minut) były znacznie mniejsze niż przy obciążeniu 39,23 daN. W żadnym z analizowanych przypadków nie doszło do skokowej zmiany wartości średniej średnicy skaz zużycia w funkcji czasu testów. Charakter tej zależności był bardzo zbliżony do liniowego (rys. 4.4). Zatem można uznać, że warunki i przebieg smarowania były jednorodne, niezależnie od czasu testu i rodzaju próbek.

Zarówno w przypadku oleju przekładniowego, jak i bazy olejowej SN-650 najlepsze efekty uzyskano dla próbek zawierających 2% oraz 4% h-BN. Średnia średnica skaz zużycia w ich przypadku była najmniejsza po 30-minutowym teście.

Średnie średnice skaz zużycia przy obciążeniu 39,23 daN, oceniane po 30 minutach testu, mają większe wartości dla próbek bazy olejowej SN-650. W tym przypadku średnia średnica skaz osiąga maksymalne wartości nawet 1,9 mm, natomiast w wypadku oleju przekładniowego średnia średnica skaz osiąga wartości rzędu 1 mm. Przy obciążeniu 19,61 daN wartości średniej średnicy skaz dla próbek oleju bazowego SN-650 oraz oleju przekładniowego nie różnią się zasadniczo. Maksymalne wartości wynoszą 0,4 mm dla próbek Mobilube 1 SHC 75w-90 oraz 0,6 mm dla próbek bazy olejowej SN-650. Wobec tego próbki oleju przekładniowego posiadają lepsze właściwości przeciwzużyciowe.

## 5. Wnioski końcowe

W oparciu o przeprowadzone badania, ich wyniki oraz analizę sformułowano następujące wnioski końcowe:

1. Potwierdzono wcześniejsze doniesienia literaturowe, że heksagonalny azotek boru jest dobrym dodatkiem poprawiającym właściwości smarnościowe olejów. Równocześnie wykluczono przypuszczenia o możliwości korzystnego stosowania h-BN jako dodatku do olejów przemysłowych w ilości większej niż 4% m/m.
2. Właściwości smarnościowe olejów przemysłowych o zróżnicowanej lepkości oraz referencyjnych olejów bazowych z dodatkiem heksagonalnego azotku boru uległy poprawie. Wpływ tego dodatku jest wyraźnie zauważalny, szczególnie przy mniejszych obciążeniach — powoduje poprawę właściwości przeciwwzuźyciowych oleju.
3. Lepsze efekty poprawy uzyskano w przypadku baz olejowych po zastosowaniu h-BN. Poprawa wyników była bardziej widoczna niż w przypadku olejów przemysłowych zawierających określony pakiet dodatków uszlachetniających determinujących ich dobre właściwości smarnościowe. Takie rezultaty badań dokumentują brak synergicznego oddziaływania h-BN i dodatków uszlachetniających w ocenianych olejach, polegającego na znacznie większej poprawie ich smarności.
4. W przypadku olejów o małej lepkości najlepsze efekty poprawy uzyskano po dodaniu 4% h-BN do oleju Hydrol L-HL 32, natomiast w przypadku bazy olejowej SN-150 było to raczej 2% h-BN, chociaż zróżnicowanie było małe.
5. W przypadku olejów o kilkukrotnie większej lepkości (Mobilube 1 SHC 75w-90) najlepsze efekty uzyskano również po dodaniu 4% h-BN. Podobnie było w przypadku bazy olejowej SN-650. Niemal tak samo dobre efekty uzyskano dla próbek zawierających 2% h-BN.
6. Należy uznać, że optymalna zawartość h-BN poprawiająca właściwości smarnościowe olejów przemysłowych, biorąc pod uwagę zarówno efekt tribologiczny, jak i nakłady finansowe, to 2% m/m.

Niezbędne są kolejne kompleksowe badania smarności olejów zawierających heksagonalny azotek boru o zróżnicowanej granulacji, w tym poniżej 100 nm, w obecności detergentów i dyspergatorów. Badania takie są obecnie realizowane w Zakładzie Tribologii, Inżynierii Powierzchni i Logistyki Płynów Eksploatacyjnych WME WAT.

Źródło finansowania pracy – działalność statutowa Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 16.10.2018 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 10.12.2018 r.

Tadeusz Kałdoński <https://orcid.org/0000-0001-6483-3739>

#### LITERATURA

- [1] CHASSAGNETTE C. i in., *Friction of hexagonal boron nitride in various environments*, Tribol. Trans., vol. 35, 1992, pp. 462-472.
- [2] CHODKIEWICZ A., *Ocena porównawcza standardowych parametrów smarnościowych oleju przekładniowego wg PN-76/C-04147 i PN-EN-ISO 20623* (praca dyplomowa), WAT, Warszawa, 2018.
- [3] Instrukcja obsługi aparatu czterokulowego T-02, ITeE, Radom.
- [4] KAŁDOŃSKI T., *Badania i technologia optymalnego stosowania azotku boru  $\alpha$ -BN jako dodatku smarnościowego w sprzęcie wojskowym, Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego PB OT 00A 014 08*, WAT, Warszawa 1998.
- [5] KAŁDOŃSKI T., *Badania zastosowań azotku boru w technice smarowniczej. Sprawozdanie z realizacji zadania naukowego nr 44/92*, WAT, Warszawa, 1994.
- [6] KAŁDOŃSKI T., *Podstawowe problemy analizowania procesów tribologicznych*, WAT, Warszawa, 2015.
- [7] KAŁDOŃSKI T., *Tribologiczne zastosowania azotku boru*, WAT, Warszawa, 2013.
- [8] KAŁDOŃSKI T. i in., *Opracowanie, badania i 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 z realizacji projektu badawczego rozwojowego OR00002904*, WAT, Warszawa, 2012.
- [9] Katalog produktów Elf Lubricants. Elf Lubricants Polska sp. z o.o., Warszawa.
- [10] KETLING-SZEMLEY M., RADOMSKI J., REĆKO W.M., *Własności azotku boru i metody jego otrzymywania*, [online][dostęp: 10.12.2017 r.], dostępny w Internecie <http://rcin.org.pl>.
- [11] PAWLAK Z., KALDONSKI T.J., MACKO M., URBANIAK W., *h-BN lamellar lubricant in hydrocarbon and formulated oil in porous sintered bearings (iron + h-BN)*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 17, 3, 2017, pp. 687-693.
- [12] PAWLAK Z., PAI R., BAYRAKTAR E., KALDONSKI T. AND OLOYEDE A., *Lamellar lubrication in vivo and vitro: Friction testing of hexagonal boron nitride*, BioSystems, 94, 2008, pp. 202-208, AN 2008:1324128.
- [13] PEREHUDKA M., *Ocena właściwości smarnościowych olejów hydraulicznych zawierających heksagonalny azotek boru* (praca dyplomowa), WAT, Warszawa, 2018.
- [14] PN-76/C-04147 – *Przetwory naftowe. Badania własności smarnych olejów i smarów.*
- [15] PN-EN ISO 683-17:2004 – *Stale na łożyska toczne.*
- [16] SENYK S., *Ocena właściwości smarnościowych olejów przekładniowych zawierających heksagonalny azotek boru* (praca dyplomowa), WAT, Warszawa, 2018.
- [17] URBANIAK W., KALDONSKI T., KALDONSKI T.J., PAWLAK Z., *Hexagonal boron nitride as a component of the iron porous bearing: friction on the porous sinters up to 150°C*, Meccanica, 51, 9, 2016, pp. 1157-1165.

- [18] URBANIAK W., KALDONSKI T., HAGNER-DERENGOWSKA M., KALDONSKI T.J., MADHANI J.T., KRUSZEWSKI Z., PAWLAK Z., *Impregnated porous bearings textured with a pocket on sliding surfaces: comparison of h-boron nitride with graphite and molybdenum disulphide up to 150°C*, Meccanica, 50, 2, 2015, pp. 1343-1349.
- [19] [www.mobil.com/polish-pl/commercial-vehicle-lube/pds/glxxmobilube-1-shc-75w90](http://www.mobil.com/polish-pl/commercial-vehicle-lube/pds/glxxmobilube-1-shc-75w90) [data dostępu: 10.12.2017 r.]
- [20] [www.orlenoil.pl/PL/NaszaOferta/Produkty/Storny/OLEJ\\_BAZOWY\\_SN-150.aspx](http://www.orlenoil.pl/PL/NaszaOferta/Produkty/Storny/OLEJ_BAZOWY_SN-150.aspx) [data dostępu: 10.12.2017 r.]
- [21] [www.orlenoil.pl/PL/NaszaOferta/Produkty/Storny/OLEJ\\_BAZOWY\\_SN-650.aspx](http://www.orlenoil.pl/PL/NaszaOferta/Produkty/Storny/OLEJ_BAZOWY_SN-650.aspx) [data dostępu: 10.12.2017 r.]
- [22] [www.orlen.pl/PL/NaszaOferta/Produkty/Storny/Produkt.aspx?produkt=HYDROL\\_L-HL\\_32.aspx](http://www.orlen.pl/PL/NaszaOferta/Produkty/Storny/Produkt.aspx?produkt=HYDROL_L-HL_32.aspx) [data dostępu: 10.12.2017 r.]

S. SENYK, M. PEREHUBKA, T. KAŁDOŃSKI

### Research on lubricity of oils containing the hexagonal boron nitride

**Abstract.** The paper presents the test results of lubricity properties of Hydrol L-HL 32 hydraulic oil, Mobilube 1 SHC 75w-90 gear oil, and two base oils: SN-150 and SN-650, containing hexagonal boron nitride.

To conduct the required tests, a four ball machine was used. This device is commonly used when assessing lubricity properties of oils and greases.

The following normative lubricity parameters were defined: the value of welding point  $P_z$  [daN], the value of last non-seizing load  $P_n$  [daN], the value of seizing at smoothy growing load  $P_t$  [daN], as well as the wear limiting capacity load  $G_{oz}$  [daN/mm<sup>2</sup>]. Furthermore, several non-normative tests were completed that covered indication of two parameters making it possible to complete an assessment of lubricity properties of oils.

Based on the tests, it was determined that hexagonal boron nitride is a good additive that improves lubricity properties. Improvement in the above properties was recorded both in the case of hydraulic oil and gear oil, as well as oil bases. Relatively better improvement results were obtained in the case of oil bases, where the improvement in the results after using boron nitride, was more visible than in the case of hydraulic and gear oil. The best improvement results for hydraulic oil were obtained after adding 4% h-BN, whereas in the case of the SN-150 oil base, this value was 2% h-BN. The best improvement results for gear oil and SN-650 oil base were also obtained after adding 4% h-BN. The possibility of using the values of h-BN bigger than 4% was excluded. It was determined that bigger content of h-BN in oil generates negative effects (under four ball conditions).

**Keywords:** tribology, lubricity, boron nitride.

**DOI:** 10.5604/01.3001.0013.1476

