

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Senyka nt.: „**Eksperymentalne badania właściwości tribologicznych smarów plastycznych zawierających heksagonalny azotek boru o różnym udziale nanocząstek i mikrocząstek**”

Promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Katdoński
Promotor pomocniczy: ppłk dr inż. Krzysztof Gocman

Podstawa opracowania: pismo z dnia 10.07.2025 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, dr. hab. inż. Stanisława Kachela, prof. WAT

1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 306 stron, a w tym: 3 str. spisu treści, 4 str. wykazu ważniejszych skrótów i symboli, 273 str. głównego tekstu rozprawy, 2,5 str. streszczenia w języku polskim oraz 2,5 str. streszczenia w języku angielskim, 5 str. wykazu rysunków (128 rysunków), 3 str. wykazu tabel (61 tabel), 11 str. spisu wykazu (153 pozycje).

Należy z uznaniem podkreślić, że pod względem językowym i edytorskim tak obszerna rozprawa doktorska została opracowana wzorowo.

Literatura i odpowiednie normy, do których Autor rozprawy odwołuje się zostały dobrane odpowiednio w odniesieniu do realizowanych badań.

Praca składa się z wprowadzenia i pięciu głównych rozdziałów oraz podsumowania uzyskanych wyników badań, sformułowanych wniosków końcowych i propozycji kolejnych, uzasadnionych do podjęcia dalszych badań.

We wprowadzeniu (s.10-s.12), Doktorant przedstawia krótko genezę podjęcia tematu pracy doktorskiej. Główne składniki smaru plastycznego to olej bazowy oraz dodatki uszlachetniające. Modyfikacja właściwości i rozwój smarów plastycznych w głównej mierze jest związany z opracowaniem nowych dodatków uszlachetniających, do których należy między innymi heksagonalny azotek boru (h-BN). Charakteryzuje się on dobrymi właściwościami smarnymi, wysoką wytrzymałością mechaniczną, dobrą przewodnością cieplną oraz bardzo dobrą stabilnością chemiczną i termiczną. Jest materiałem nietoksycznym o znikomej szkodliwości dla środowiska naturalnego.

Potencjalne korzyści wynikające z właściwości heksagonalnego azotku boru były główną przestanką do podjęcia opiniowanej pracy doktorskiej. Główne zadanie, które podjął Doktorant dotyczyło oceny wpływu nanocząstek i mikrocząstek heksagonalnego azotku boru na właściwości tribologiczne smarów plastycznych. Jego realizacja wymagała:

- określenia właściwości fizykochemicznych heksagonalnego azotku boru, decydujących o efektywności jego zastosowania;
- wykonania badań tribologicznych z wykorzystaniem różnych par trących na urządzeniach o odmiennych modelowych węzłach tarcia, pracujących przy zróżnicowanych wymuszeniach.;
- zastosowania różnych smarów plastycznych, będących medium bazowym;
- oceny skuteczności smarowania nanocząstkami i mikrocząstkami heksagonalnego azotku boru w odniesieniu do rodzaju smaru bazowego;
- określenia wpływu dodatku na właściwości użytkowe smarów plastycznych.

W świetle przedstawionych założeń zakresu rozprawy doktorskiej podjęty temat uznaję za w pełni uzasadniony, gdyż jest to aktualny i ważny problem badawczy zarówno z naukowego, jak i utylitarnego punktu widzenia. Należy bowiem podkreślić, że poprawa właściwości eksploatacyjnych smarów ma istotny wpływ na trwałość i niezawodność wszelkiego rodzaju maszyn i urządzeń technologicznych.

W rozdziale 1 (s.13-s.81) – analiza stanu zagadnienia, Doktorant zdefiniował pojęcie smaru plastycznego i skład smaru, w którym głównym składnikiem jest olej (udział od 80% do 90%), następnie zagęszczacz (od 5% do 20%) oraz dodatki uszlachetniające (nie więcej niż 5%). Decyzję dotyczącą proporcji składników smarów plastycznych podejmuje wytwórca smaru przy uwzględnieniu wymaganych właściwości eksploatacyjnych.

Analizując skład i właściwości poszczególnych składników smarów plastycznych Doktorant określił m. in. ich udziały, tj.: w grupie olejów bazowych dominują oleje mineralne (ok. 86,4%); w grupie zagęszczaczy – mydła litowe (38,5%).

Dodatki uszlachetniające, pomimo ich niewielkiego udziału, są ważnym składnikiem w kształtowaniu właściwości użytkowych smaru. Są to: inhibitory utleniania, deaktywatory metali, inhibitory korozji, związki o działaniu adhezyjnym oraz substancje modyfikujące strukturę smaru plastycznego, dodatki o działaniu przeciwwzrostowym oraz przeciwwzrostowym działające w warunkach wysokich nacisków, a także modyfikatory tarcia.

W ocenie właściwości smarów plastycznych należy również brać pod uwagę biodegradowalność różnych olejów bazowych stosowanych w tych smarach. W świetle danych literaturowych w rozwoju smarów plastycznych istotne znaczenie mają: doskonalenie ich składu, obejmujące dobór olejów bazowych i zagęszczaczy oraz zastosowanie nowoczesnych dodatków uszlachetniających w celu poprawy ich właściwości użytkowych. **Uzasadnione jest zatem podjęcie przez Doktoranta badań nad zastosowaniem heksagonalnego azotku boru jako dodatku, którego działanie jest właśnie ukierunkowane na funkcje tribologiczne.**

Na kolejnych stronach rozprawy Doktorant zwięźle, ale bez uszczerbku w odniesieniu do istotnych informacji przedstawia zagadnienia dotyczące:

- **technologii wytwarzania i zastosowanie smarów plastycznych** zwracając m. in. uwagę, iż: *„technologia produkcji ma bezpośrednie przełożenie na właściwości użytkowe smaru plastycznego i determinuje tym samym jego potencjalne zastosowania”*;
- **struktury smarów plastycznych** podkreślając m. in. , że: *„zrozumienie tej mikrostruktury ma kluczowe znaczenie dla oceny właściwości użytkowych smaru, dlatego jej analiza wymaga zastosowania odpowiednich technik obserwacyjnych”*;
- **podstawy reologii smarów plastycznych**, bowiem *„właściwości reologiczne smarów plastycznych wpływają między innymi na sposób ich przepływu w układach smarowania, zdolność do rozprowadzania smaru na powierzchniach współpracujących oraz odporność na degradację mechaniczną. Tym samym zrozumienie właściwości reologicznych smarów plastycznych jest istotne z punktu widzenia ich skuteczności tribologicznej”*;
- **właściwości smarów plastycznych i metod ich badania** ponieważ smar plastyczny powinien być rozpatrywany jako elementem systemu tribologicznego , gdyż *„właściwości tribologiczne smarów plastycznych są ściśle związane z procesem smarowania w układzie ciernym, gdzie zamiast tarcia zewnętrznego między ciałami stałymi zachodzi tarcie wewnętrzne w obrębie substancji smarującej, a jednym z kluczowych aspektów tego procesu jest smarność”*.

Dużo uwagi poświęcił Doktorant zagadnieniu analizy zależności między współczynnikiem tarcia a warunkami pracy układów tarcowych oraz właściwościami reologicznymi olejów smarnych. Uwzględnił w tej analizie zależność sformułowaną przez Richarda Stribeck'a oraz Mayo Dyer Hersey'a (zwaną liczbą Stribeck'a lub charakterystyką Stribeck'a). Istotne jest tu stwierdzenie Autora rozprawy, w którym podkreśla, że *„dokładne zrozumienie zależności przedstawionych na charakterystyce Stribeck'a jest trudne, ponieważ oprócz warunków pracy układu tribologicznego i charakterystyki jego elementów trących, wymaga również uwzględnienia właściwości reologicznych środka smarnego. Szczególnie złożone jest to w przypadku smarów plastycznych, których lepkość strukturalna zmienia się w funkcji szybkości ścinania, a więc także w funkcji prędkości obrotowej, która zawarta jest w formule liczby Stribeck'a. Dodatkowo, zmiana obciążenia wpływa na oddziaływanie mechaniczne na strukturę smaru, co również powoduje zmianę jego lepkości. Z tego względu charakterystyki Stribeck'a sporządzone dla smarów plastycznych są trudne do jednoznacznego zinterpretowania i bardzo rzadko przedstawiane w literaturze”*.

Ta krytyczna analiza wskazuje i uzasadnia też konieczność podjęcia zróżnicowanych badań w celu pełniejszej analizy właściwości tribologicznych smarów plastycznych, umożliwiających ocenę ich właściwości przeciwwuzyciowych, przeciwzatarciowych oraz przeciwwartciowych.

Do pozostałych właściwości użytkowych smarów plastycznych związanych z ich strukturą wewnętrzną, powstającą w wyniku zagęszczania zalicza się konsystencję, temperaturę kroplenia, stabilność mechaniczną oraz lepkość strukturalną.

Znaczną część analizy publikacji (41 stron) Autor rozprawy skierował na scharakteryzowanie heksagonalnego azotku boru w roli dodatku do smarów plastycznych. W ekstremalnych warunkach pracy skojarzenia trącego (niska lub wysoka temperatura, ekstremalne naciski kontaktowe, warunki próżniowe, obecność promieniowania) smary plastyczne nie są w stanie wytworzyć odpowiednio trwałego filmu smarnego. Heksagonalny azotek boru może być wprowadzany jako dodatek (smar stały) do smarów plastycznych, aby poprawić właściwości tribologiczne substancji smarującej i warunki eksploatacji węzłów tarcia.

Rozdział 2 (s.82-s.87) - podsumowanie analizy stanu zagadnienia – wnioski programowe

Komponowanie smarów plastycznych wymaga odpowiedniego doboru składników, takich jak olej bazowy, zagęszczacz oraz dodatki. Celem jest uzyskanie środka smarnego o wymaganej skuteczności eksploatacyjnej. Kluczowe znaczenie mają cechy użytkowe smaru plastycznego, spośród których szczególnie istotne są właściwości tribologiczne, związane z procesem smarowania realizowanym w układzie ciernym. Właściwości te są uwarunkowane charakterystyką wszystkich elementów systemu tribologicznego oraz relacji zachodzących między nimi.

Wobec braku kompleksowego opisu właściwości fizykochemicznych heksagonalnego azotku boru nie jest możliwe porównanie wyników eksperymentów, uzyskanych przez różnych autorów. **To dodatkowo uzasadnia skoncentrowanie się przez mgra inż. Szymona Senyka na badaniach smarów plastycznych z dodatkiem heksagonalnego azotku boru.** W obszernym podsumowaniu (4 strony) analizy dotychczasowego stanu wiedzy na temat smarów plastycznych oraz zastosowania heksagonalnego azotku boru jako dodatku do tych środków smarnych, a także uwzględnieniu wyników własnych badań wstępnych, **Doktorant przedstawił szczegółową koncepcję opiniowanej rozprawy doktorskiej, zawartą w 11 punktach.**

Główne jej elementy są zawarte w stwierdzeniach (ujmuję je w skrócie):

- obiektami badań powinny być smary plastyczne, zawierające heksagonalny azotek boru (h-BN) o różnym udziale frakcji nanocząstek i mikrocząstek;
- szczególną uwagę należy zwrócić na właściwości fizykochemiczne h-BN tj.: morfologię i rozkład rozmiarów cząstek oraz parametry określające strukturę porowatą tych cząstek, a także na skład chemiczny i strukturę krystaliczną stosowanych dodatków;
- w celu identyfikacji właściwości fizykochemicznych h-BN należy skorzystać z odpowiednich technik badawczych, gdyż obiektem badań mają być także nanocząstki o specyficznych właściwościach tych elementów materii;
- należy dokonać wyboru bazowych smarów plastycznych w oparciu o odmienne środki zagęszczające i/lub oleje bazowe;
- niezbędne jest określenie właściwości reologicznych bazowych smarów plastycznych, ponieważ mogą one w istotny sposób decydować o skuteczności smarowania nanocząstkami i mikrocząstkami h-BN, wprowadzonego w różnych stężeniach masowych i o zróżnicowanej granulacji;
- ocena właściwości tribologicznych smarów plastycznych z dodatkiem h-BN powinna być przeprowadzona w oparciu o badania zrealizowane za pomocą różnych tribotesterów z odmiennymi modelowymi węzłami tarcia;
- określenie mechanizmów oddziaływania smarów plastycznych zawierających h-BN wymaga identyfikacji i analizy właściwości wszystkich elementów systemu tribologicznego oraz ich wzajemnych relacji;
- należy przeprowadzić badania określające inne parametry użytkowe smarów plastycznych z domieszką h-BN, gdyż cząstki stałe mogą istotnie wpływać na strukturę i stabilność

- smarów plastycznych; takie badania powinny obejmować przede wszystkim temperaturę kroplenia, konsystencję i stabilność mechaniczną smarów plastycznych;
- wskazane jest zobrazowanie - z zastosowaniem odpowiednich technik mikroskopowych, struktury smarów plastycznych i/lub ich zagęszczaczy przy obecności cząstek h-BN;
- celowa jest identyfikacja mechanizmów oddziaływania heksagonalnego azotku boru w analizowanych układach tribologicznych, która powinna opierać się na badaniach umożliwiających charakterystykę stanu powierzchni i warstwy wierzchniej elementów tworzących tribologiczne węzły tarcia.

Rozdział 3 (s.88-s.102) - teza, cele, zakres pracy oraz charakterystyka obiektów badań

Uwzględniając przeprowadzoną, gruntowną analizę stanu zagadnienia oraz badania wstępne Doktorant zaproponował następującą **tezę rozprawy**:

„Istnieje możliwość znacznej poprawy właściwości tribologicznych smarów plastycznych pracujących w warunkach tarcia ślizgowego w wyniku zastosowania nanocząstek i mikrocząstek heksagonalnego azotku boru, pod warunkiem odpowiedniego doboru ich stężenia, granulacji oraz uwzględnienia właściwości fizykochemicznych dodatku i rodzaju smaru bazowego. Prawdopodobnie należy spodziewać się lepszych efektów przy zastosowaniu heksagonalnego azotku boru o większym udziale frakcji nanocząstek”.

Uwagi

1. Wg mnie powinno sformułowanie hipoteza, a nie teza pracy. Teza to „twierdzenie zawierające treść podstawową dla jakiejś dziedziny, założenie, które zamierza się udowodnić. Teza doktorska jest pewnym założeniem, twierdzeniem, pytaniem lub konkluzją odnośnie do przedmiotu badania, którą należy w rozprawie doktorskiej udowodnić na podstawie przeprowadzonego empirycznego studium danego zagadnienia. Jest ona formułowana na podstawie informacji zawartej w literaturze przedmiotu, ogólnej wiedzy na dany temat i z reguły dotyczy pewnego fragmentu naszej niewiedzy o tym zagadnieniu.

Natomiast o **hipotezie naukowej** mówimy zwykle wtedy, gdy dla pewnych faktów nie znajduje się racji wśród uznanych twierdzeń. **T. Kotarbiński** wskazuje, że hipoteza to „takie przypuszczenie dotyczące zachodzenia pewnych zjawisk lub zależności między nimi, które pozwalają wyjaśnić jakiś niewytłumaczony dotąd zespół faktów, będących problemem. **K. Ajdukiewicz** zaznacza, że hipoteza to nieprzyjęta jeszcze racja rozważana w trakcie prób wyjaśnienia jakiegoś faktu, którą poddajemy dopiero procedurze sprawdzania.

2. Można bez szkody dla sformułowanej hipotezy (tezy) pominąć ostatnie zdanie (Prawdopodobnie należy ...).

Przedstawione **cele rozprawy**, wskazują problemy, które należy rozwiązać, tj.:

1. szczegółową ocenę właściwości fizykochemicznych pozyskanych azotków boru;
2. ustalenie właściwej zawartości heksagonalnego azotku boru w smarach plastycznych w oparciu o badania tribologiczne, przeprowadzone z użyciem różnych tribotesterów, w warunkach tarcia ślizgowego;
3. określenie wpływu heksagonalnego azotku boru na inne niż tribologiczne właściwości użytkowe smarów plastycznych.

Algorytm realizacji pracy doktorskiej został czytelnie i jednoznacznie przedstawiony na rys.3.1.

Główna, weryfikująca część pracy dotyczy badań tribologicznych, zrealizowanych w trzech etapach:

- etap 1 - testy w ruchu posuwisto-zwrotnym przeprowadzone na uniwersalnym nano- i mikrotesterze (UNMT) przy różnych wariantach wymuszeń - cel: określenie współczynnika tarcia oraz zużycia elementów pary ciernej;
- etap 2 - pomiary na aparacie czterokulowym, służące do analizy właściwości **smarnościowych smarów plastycznych**;
- etap 3 - badania w ruchu obrotowym z cykliczną zmianą kierunku obrotów, na stanowisku UNMT - cel: wyznaczenie charakterystyk Stribeck.

Równolegle były wykonywane badania dotyczące:

- analizy mikroskopowe, które uzupełniały badania tribologiczne – cel: identyfikacja mechanizmów oddziaływania heksagonalnego azotku boru w analizowanych układach ciernych;
- określenie innych właściwości użytkowych tej grupy środków smarnych, obejmujące kompozycje przygotowanych wcześniej próbek do badań tribologicznych – cel: wyznaczenie temperatury kroplenia, konsystencji i stabilności mechanicznej.
- obrazowania struktury zagęszczaczy smarów plastycznych, zawierających nanocząstki i mikrocząstki heksagonalnego azotku boru – cel: ocena rozmieszczenia tych cząstek w strukturze smarów plastycznych przy obecności oleju bazowego.

Do badań Doktorant wybrał dwa smary bazowe, tj. litowy oraz wapniowy, należące do najczęściej stosowanych w technice smarowniczej. Smary te nie zawierały dodatków uszlachetniających, podobnie jak oleje bazowe użyte do ich opracowania. Zostały przygotowane w rafinerii w Jedliczach (spółka ORLEN OIL).

Do badań porównawczych Doktorant zastosował bazowy smar litowy zawierający typowe dodatki uszlachetniające. Uzasadnieniem tej decyzji było zbadanie ich oddziaływania w smarze plastycznym z nanocząstkami i mikrocząstkami heksagonalnego azotku boru, ponieważ takie kompozycje nie były dotychczas przedmiotem rozważań w analizowanych publikacjach. **Ten aspekt Doktorant słusznie uznał za ważny, ponieważ smary plastyczne, zawierające inne smary stałe (np. dwusiarczek molibdenu, grafit) oraz wzbogacone rozpuszczalnymi dodatkami uszlachetniającymi są powszechnie spotykane na rynku środków smarnych.**

Smar litowy z dodatkami uszlachetniającymi został opracowany na bazie oleju mineralnego zagęszczonego mydłem kwasu 12-hydroksystearynowego litu. Zawierał on dwa dodatki wpływające na jego właściwości tribologiczne, tj.:

- dialkyloditiofosforan cynku, jako dodatek o działaniu przeciwzużyciowym w stężeniu <1%;
- siarkowany izobutylen, będący dodatkiem, który przeciwdziała wysokim naciskom; w stężeniu 0,3%.

Dodatki uszlachetniające zostały wprowadzone przez producenta do smaru, po jego schłodzeniu do odpowiedniej temperatury i przed homogenizacją. Charakterystyka badanych smarów została szczegółowo omówiona w rozprawie.

Głównymi badaniami identyfikującymi jakość zaproponowanych smarów były testy z zastosowaniem trzech systemów tribologicznych z różnymi smarami plastycznymi, a mianowicie

- węzeł tribologiczny zestawu uniwersalny nano-mikro tester (UNMT) stosowany w badaniach realizowanych w ruchu posuwisto-zwrotnym (rys. 3.8),
- węzeł tribologiczny aparatu czterokulowego T-02 (rys. 3.9),
- węzeł tribologiczny zestawu UNMT stosowany w badaniach realizowanych w ruchu obrotowym (rys. 3.10)

Modele i charakterystyki tych systemów oraz elementy węzłów tribologicznych zostały również w rozprawie szczegółowo zaprezentowane.

W rozdziale 4 (s.103-s.136) – metodyki badawcze, Doktorant z właściwą sobie szczegółowością i starannością przedstawił istotne dla omawianej problematyki informacje. Należy podkreślić, że te obszerne i złożone badania eksperymentalne oraz analizy były wykonywane w różnych ośrodkach naukowych, dysponujących odpowiednią aparaturą do realizacji tych prac. **Szeroki zakres badań został bardzo dobrze zaplanowany i konsekwentnie zrealizowany.**

Badania eksperymentalne zostały podzielone na główne obszary dotyczące metodyki badań:

- właściwości heksagonalnego azotku i bazowych smarów plastycznych;
- właściwości heksagonalnego azotku boru;
- stanów chemicznych pierwiastków występujących na powierzchni próbek heksagonalnego azotku boru;
- struktury krystalicznej heksagonalnego azotku boru;

- morfologii i rozmiarów cząstek heksagonalnego azotku boru;
- struktury porowatej cząstek heksagonalnego azotku boru;
- właściwości reologicznych bazowych smarów plastycznych;
- oporów tarcia i zużycia w ruchu posuwisto-zwrotnym na testerze UNMT;
- zużycia po testach tribologicznych realizowanych w ruchu posuwisto-zwrotnym na testerze UNMT;
- właściwości smarnościowych na aparacie czterokulowym;
- oporów tarcia w ruchu obrotowym na uniwersalnym testerze UNMT oraz wyznaczeniem charakterystyki Stribeck;
- badań mikroskopowych oddziaływania heksagonalnego azotku boru w analizowanych układach tribologicznych;
- badań temperatury kroplenia;
- konsystencji i stabilności mechanicznej;
- badań mikroskopowych struktury smarów plastycznych;
- badań na mikroskopie świetlnym.

Statystyczna analiza wyników badań obejmowała wyznaczenie: średniej arytmetycznej, odchylenia standardowego i współczynnika determinacji będącego miarą dopasowania przyjętego modelu do uzyskanych wyników badań.

Doktorant zamieścił charakterystyki wykorzystywanej aparatury badawczej wraz ze zdjęciami stanowisk, warunki i opis wykonanych pomiarów, a także odpowiednie zależności do wyznaczenia warunków obciążania próbek i parametrów realizacji procesu badawczego oraz obliczania liczby Stribeck.

W przypadkach pojawiających się problemów z realizacją badań Doktorant wprowadzał konieczne uzupełnienia do oprzyrządowania stanowisk badawczych i właściwego prowadzenia badań. Przykładami są: 1 – *zaprojektowanie i wykonanie odpowiedniego pojemnika na środek smary z osłoną chroniącą przed rozbryzaniem oleju na potrzeby testów w ruchu obrotowym*; 2 - *dostosowanie procedury testowej do smarów plastycznych w celu zapewnienia stabilności warstwy smarnej i uzyskania powtarzalnych wyników pomiarów*.

Uwaga: na str. 124 Doktorant stwierdza, że „Powierzchnia każdej tarczy, stanowiącej płaszczyznę, była doprowadzona do identycznej chropowatości opisanej wartością $Ra = 0,05 \mu m \pm 0,008$, aby wyeliminować wpływ tego parametru na wyniki badań”.

Dla uściślenia tej informacji wyjaśniam, nie negując tego, że powierzchnia tarczy była dobrze przygotowana, iż nie można być pewnym, że chropowatość powierzchni była identyczna. Parametr Ra będący średnią arytmetyczną bezwzględnych wartości rzędnych na długości odcinka elementarnego dostarcza informacji o ogólnej jakości wykończenia powierzchni. Wartość parametru Ra może być identyczna, chociaż topografia powierzchni może być różna (dobrze odzwierciedla to krzywa nośności powierzchni).

Rozdział 5 (s.137-s.272) - wyniki badań eksperymentalnych, zawiera obszerną, bardzo dobrze opracowaną dokumentację wykonanych badań wraz z interpretacją uzyskanych wyników. **Należy z dużym uznaniem podkreślić, że Doktorant starał się wyjaśnić istotę wzajemnych interakcji pomiędzy właściwościami heksagonalnego azotku boru i bazowych smarów plastycznych z punktu widzenia fizykalnych i chemicznych oddziaływań na procesy oraz zjawiska występujące w strefie kontaktu na powierzchniach trących materiałów.**

Wyniki badań skomentowane i zinterpretowane, przedstawione na licznych wykresach i w zestawieniach tabelarycznych dotyczą:

- właściwości heksagonalnego azotku boru;
- stanów chemicznych pierwiastków występujących na powierzchni próbek heksagonalnego azotku boru;
- struktury krystalicznej heksagonalnego azotku boru;
- morfologii i rozmiarów cząstek heksagonalnego azotku boru;
- struktury porowatej cząstek heksagonalnego azotku boru;

- właściwości reologicznych bazowych smarów plastycznych;
- oporów tarcia i zużycia w ruchu posuwisto-zwrotnym na testerze UNMT;
- właściwości smarnościowych na aparacie czterokulowym;
- oporów tarcia w ruchu obrotowym na testerze UNMT i charakterystyki Stribecką;
- oddziaływania heksagonalnego azotku boru w analizowanych układach tribologicznych;
- temperatury kroplenia;
- konsystencji i stabilności mechanicznej;
- struktury smarów plastycznych.

Uwagi: analizując przedstawione wyniki badań nasuwają się uwagi:

1. na osi rzędnych na wykresach (rys.5.13, rys.5.15, rys.5.17, rys.5.19, rys.5.21) jest opisany współczynnik tarcia μ , a przebiegi wykresów dotyczą zmiany obciążenia wężła tarcia w zależności od czasu (oś odciętych). Pytanie: czy współczynnik tarcia jest obliczany i rejestrowany on-line w sposób ciągły i nanoszony na ten wykresy?
2. podobne pytanie nasuwa się w odniesieniu do wykresów na rys.5.35, rys.5.37, rys.5.39, rys.5.41, rys.5.43 i rys.5.45;
3. także w odniesieniu do charakterystyk Stribecką (rys.5.36, rys.5.38, rys.5.40, rys.5.42, rys.5.44, rys.5.46);
4. str. 173 – zamiast „...częstotliwością oscylacyjną...” lepiej jest sformułować „częstotliwość oscylacji”
5. str. 241 – pojęcie „struktura” obejmuje już wzajemne relacje elementów stanowiących całość, a więc i budowę. Dlatego zdanie „... z charakterystyczną budową strukturalną...” chyba można by zapisać „... z charakterystyczną strukturą...”

Przeprowadzone, obszerne badania i analizy tribologicznych właściwości smarów plastycznych doprowadziły do sformułowania wniosków o charakterze poznawczym i użytkowym, (przedstawiam je w skrótowym, syntetycznym ujęciu):

- heksagonalny azotek boru w postaci nanocząstek dodany w odpowiednim stężeniu do smarów plastycznych skutecznie poprawia ich właściwości smarne;
- heksagonalny azotek boru zawierający wyłącznie mikrocząstki prowadzi na ogół do pogorszenia właściwości tribologicznych smaru;
- dobór smaru bazowego (smaru litowego lub wapniowego) i dodatków (diakiloditiofosforanu cynku lub siarkowanego izobutyleny) jest uzasadniony, ale też jego skuteczność jest uwarunkowana rodzajem pary cieplnej;
- działanie heksagonalnego azotku boru opiera się na mechanizmie ścinająco-ślizgowym, typowym dla tego rodzaju smaru stałego. Mechanizmem wspomagającym działanie dodatku, szczególnie dla nanocząstek, jest wypełnianie mikrouszkodzeń powierzchniowych;
- na podstawie charakterystyk Stribecką dla smarów plastycznych smarowanie analizowanymi kompozycjami odbywa się w obszarze dominacji zagęszczacza w warunkach smarowania elastohydrodynamicznego, co ma istotny wpływ na sposób formowania warstwy smarnej.

Wyniki badań właściwości użytkowych smarów plastycznych (temperatury kroplenia; konsystencji i stabilności mechanicznej i struktury) również są podstawą do sformułowania szeregu wniosków o znaczeniu poznawczym i aplikacyjnym (również przedstawiam je w skrócie), tj.:

- wpływ heksagonalnego azotku boru na właściwości użytkowe smarów plastycznych jest wyraźnie zależny od rodzaju smaru bazowego, a od głównie właściwości zagęszczacza;
- bardzo dobra przewodność cieplna heksagonalnego azotku boru i jego duża stabilność termiczna wpływają na zwiększenie temperatury kroplenia w wyniku zdyspergowania w smarach bazowych cząstek heksagonalnego azotku boru;
- mieszanie mechaniczne w obecności heksagonalnego azotku boru wpływa na zmiany konsystencji smarów plastycznych, przy czym wpływ ten jest silniejszy dla smarów litowych, a dla smarów wapniowych praktycznie nie występuje;

- lepkość strukturalna smarów bazowych ma istotny wpływ na ich właściwości użytkowe – smary wapniowe, wykazują wyższą lepkość w szerokim zakresie szybkości ścinania, natomiast posiadają niższą stabilność termiczną;
- na właściwości użytkowe smarów litowych i wapniowych, w tym ich stabilność mechaniczną, termiczną oraz właściwości tribologiczne wpływa sposób dyspersji cząstek heksagonalnego azotku boru.

Rozdział 6 (s.273-s.279) - podsumowanie wyników badań i ich analizy jest syntetycznym omówieniem całości rozprawy doktorskiej ze wskazaniem wyników, które są istotnymi osiągnięciami mgr inż. Szymona Senyka. Należą do nich między innymi:

- kompleksowa ocena właściwości fizykochemicznych heksagonalnego azotku boru jako składnika substancji smarującej, stanowiącej element systemu tribologicznego;
- opracowanie litowych i wapniowych smarów plastycznych, przy czym smar litowy został również wzbogacony o dialkyloditiofosforan cynku oraz siarkowany izobutylen. Połączenie tych dodatków z heksagonalnym azotkiem boru nie było dotychczas stosowane i przebadane, ani też publikowane;
- dokonanie oceny wpływu właściwości reologicznych smarów na wyniki badań tribologicznych;
- opracowanie dedykowanych rozwiązań specjalnych komór testowych do badań smarów plastycznych, umożliwiających utrzymanie smaru w strefie kontaktu powierzchni ciernych i dzięki temu uzyskanie miarodajnych wyników pomiarowych;
- wykazanie, że dodatek heksagonalnego azotku boru przy odpowiednim doborze jego granulacji i stężenia wpływa korzystnie na poprawę właściwości tribologicznych smarów litowych i wapniowych;
- stwierdzenie, że skuteczność działania smarów plastycznych zależy zarówno od ich składu, jak i od charakterystyki reologicznej w konkretnym układzie tribologicznym - dotyczy to także skuteczności smarowania nanocząstkami i mikrocząstkami heksagonalnego azotku boru;
- opracowanie charakterystyk Stribecka do oceny wpływu parametrów testowych oraz lepkości strukturalnej smarów plastycznych na ich właściwości tribologiczne, co stanowi uzupełnienie obecnego stanu wiedzy w tym zakresie;
- wykazanie, że oprócz heksagonalnego azotku boru istotny wpływ na skuteczność smarowania ma lepkość strukturalna smaru bazowego i jej interakcja z cząstkami heksagonalnego azotku boru, a dzięki zastosowaniu mikroskopowych obserwacji ich struktury także poszerzenie wiedzy dotyczącej wpływu na właściwości smarów plastycznych;
- uzyskanie istotnej wiedzy dla zastosowań eksploatacyjnych, dotyczącej wpływu długotrwałego oddziaływania mechanicznego na właściwości użytkowe (odporność na destrukcję) smarów plastycznych.

Zasadniczą część rozprawy zamykają **wnioski końcowe i prognozy badawcze** (s.280-s.282). Są one dobrze uporządkowanym, syntetycznym ujęciem głównych osiągnięć badawczych Doktoranta, wśród których jako najważniejsze (z czym w pełni się zgadzam) Doktorant wymienia:

1. opracowanie i wdrożenie innowacyjnej koncepcji badawczej, ukierunkowanej na szczegółową analizę właściwości fizykochemicznych heksagonalnego azotku boru z myślą o jego zastosowaniu jako dodatku do smarów plastycznych;
2. przeprowadzenie kompleksowych badań w warunkach tarcia ślizgowego, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowania charakterystyk Stribecka do oceny wpływu nanocząstek i mikrocząstek heksagonalnego azotku boru na właściwości tribologiczne smarów plastycznych;
3. określenie wpływu rodzaju smaru bazowego na skuteczność smarowania nanocząstkami i mikrocząstkami heksagonalnego azotku boru;
4. zidentyfikowanie roli nanocząstek i mikrocząstek heksagonalnego azotku boru w kształtowaniu, innych niż tribologiczne, właściwości użytkowych różnych rodzajów smarów plastycznych.

Z uznaniem stwierdzam także, że zaproponowane (i mam nadzieję podjęte w przyszłości) przez Doktoranta dalsze pięć perspektyw badawczych świadczy o głębokiej wiedzy i rozumieniu znaczenia tej problematyki dla poprawy trwałości i niezawodności maszyn i urządzeń technologicznych oraz ich racjonalnej, ekologicznej eksploatacji.

2. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej, sformułowania i procedury rozwiązywania postawionych zadań badawczych, **metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam w pełni pozytywnie.**

Mgr inż. Szymon Senyk bardzo dobrze opracował spójną merytorycznie analizę stanu wiedzy z zakresu właściwości środków smarnych – w szczególności smarów plastycznych. Wykazał, że dysponuje opanowaną, szeroką, logicznie uporządkowaną wiedzą, niezbędną do rozwiązywania złożonych problemów technicznych, technologicznych oraz realizacji badań wraz z merytoryczną analizą i oceną uzyskanych wyników.

Zrealizowany program badań tribologicznych był bardzo obszerny, zarówno pod względem liczby przeanalizowanych smarów plastycznych, jak i ich różnorodności, co istotnie poszerzyło aktualny stan wiedzy w zakresie możliwości wykorzystania nanocząstek i mikrocząstek heksagonalnego azotku boru jako dodatku do smarów plastycznych.

Uzyskane wyniki te mają również istotne znaczenie dla praktycznych zastosowań opracowywanych, nowych, zmodyfikowanych smarów plastycznych.

Udowodnienie przez Doktoranta korzystnego działania heksagonalnego azotku boru z dioksydodifosforanem cynku i siarkowanym izobutylenem wskazuje na celowość opracowania kompozycji smarów, które mogą zostać wykorzystane w aplikacjach wymagających dużej trwałości w różnych warunkach eksploatacyjnych.

3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do ważnego obszaru badawczego, związanego z opracowaniem skutecznie działających środków smarnych, niezbędnych do prawidłowej eksploatacji wszelkiego typu maszyn i urządzeń technologicznych.

Opiniowana rozprawa doktorska, lokuje się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Zawiera oryginalne cechy nowości, a także jednoznacznie wykazane walory użyteczne. Uzyskane wyniki znacząco poszerzają wiedzę w zakresie technologii i właściwości środków smarnych, w tym głównie smarów plastycznych.

Stwierdzam, że tak obszerna i wieloaspektowa rozprawa doktorska została opracowana bardzo przejrzysto i starannie pod względem redakcyjnym. Badania zostały wykonane i opracowane na bardzo dobrym poziomie. W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr inż. Szymona Senyka w pełni zasługuje na wyróżnienie.

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Szymona Senyka nt.: „**Eksperymentalne badania właściwości tribologicznych smarów plastycznych zawierających heksagonalny azotek boru o różnym udziale nanocząstek i mikrocząstek**” spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (ustawa z dnia 14 marca 2003 r., tekst ujednolicony z dnia 29 września 2014 r. wraz z rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r., a także ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, art.185.) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Kraków, dnia 26 sierpnia 2025 r.



Józef Gawlik

