

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Eksperymentalne badania właściwości tribologicznych smarów plastycznych zawierających heksagonalny azotek boru o różnym udziale nanocząstek i mikrocząstek

Podstawowe problemy tribologiczne dotyczą procesów tarcia, zużywania oraz smarowania. Istota badań w tym obszarze sprowadza się do poprawy efektywności maszyn i urządzeń, ograniczenia strat energetycznych oraz kosztów ich eksploatacji. W tym celu proponowane są określone rozwiązania, wśród których znaczącą rolę odgrywają środki smarne, stosowane między innymi w celu ograniczenia intensywności zużywania elementów układów tribologicznych oraz minimalizacji oporów tarcia. Jedną z grup środków smarnych są smary plastyczne, których właściwości mogą być ulepszone dzięki innowacyjnym dodatkom. Takim dodatkiem może być heksagonalny azotek boru (h-BN). Możliwość jego zastosowania wynika z budowy strukturalnej oraz korzystnych właściwości fizykochemicznych.

Zapoczątkowane w tym temacie rozważania naukowe koncentrowały się głównie na mikrocząstkach heksagonalnego azotku boru stosowanych jako dodatek do smarów plastycznych. Pojawienie się na rynku nanocząstek h-BN otworzyło nowe możliwości badawcze, jednak dotychczasowe analizy nie wykorzystwały w pełni tego potencjału. Zabrakło kompleksowych badań porównawczych obejmujących zarówno mikrocząstki, jak i nanocząstki h-BN, które uwzględniałyby zróżnicowane warunki tribologiczne oraz pozwalały na określenie ich skuteczności w relacji do rodzaju smaru bazowego.

Zasadniczą kwestią podjętą w pracy było określenie i porównanie wpływu nanocząstek i mikrocząstek heksagonalnego azotku boru na właściwości tribologiczne smarów plastycznych. W badaniach wykorzystano cztery rodzaje h-BN, o odmiennej granulacji, które wprowadzono w stężeniach masowych 1%, 3%, 5% i 10% do dwóch bazowych smarów plastycznych – litowego i wapniowego – niezawierających dodatków uszlachetniających. Dla porównania użyto również smaru litowego wzbogaconego dialkiloditiofosforanem cynku i siarkowanym izobutylenem, który również modyfikowano dodatkiem h-BN.

Postępowanie badawcze zostało podzielone na trzy etapy. W pierwszym z nich skupiono się na właściwościach fizykochemicznych h-BN oraz ocenie właściwości reologicznych bazowych smarów plastycznych. Do identyfikacji stanów chemicznych wykorzystano rentgenowską spektroskopię fotoelektronów, natomiast do analizy struktury krystalicznej zastosowano dyfrakcję rentgenowską. Badania potwierdziły, że wszystkie próbki dodatku zawierały azotek boru o strukturze heksagonalnej. Obrazowanie cząstek przeprowadzono za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej, a szczegółowa analiza ich rozmiarów wskazała na odmienną zawartość nanocząstek i mikrocząstek. Analiza niskotemperaturowych izoterm adsorpcji pozwoliła określić powierzchnię właściwą, całkowitą objętość i rozmiary porów, ujawniając różnice w strukturze porowatej cząstek. Właściwości reologiczne smarów bazowych określono na podstawie pomiarów lepkości strukturalnej w zakresie szybkości ścinania $1\text{--}100\text{ s}^{-1}$. Smar wapniowy cechował się najwyższą lepkością, natomiast smary litowe generowały niższe opory przepływu w całym analizowanym zakresie. Użycie zaawansowanych metod badawczych w celu szczegółowej analizy właściwości fizykochemicznych h-BN, stosowanego jako dodatek do smarów plastycznych, okazało się innowacyjne i dostarczyło podstaw do interpretacji wyników dalszych badań.

Drugi etap prac obejmował kompleksową ocenę właściwości tribologicznych smarów z dodatkiem h-BN, pracujących w warunkach tarcia ślizgowego. Przeprowadzono testy oporów tarcia i zużycia w ruchu posuwisto-zwrotnym na tribotesterze UNMT, testy przeciwwzrostowe i przeciwwzrostowe na aparacie czterokulowym T-02, a także pomiary w ruchu obrotowym na UNMT, które posłużyły do sporządzenia charakterystyk Stribeck.

Stwierdzono, że właściwości tribologiczne analizowanych kompozycji były rezultatem kilku czynników, takich jak: rodzaj smaru bazowego, charakterystyka fizykochemiczna i stężenie heksagonalnego azotku boru oraz warunki pracy ślizgowego węzła tarcia. Wyniki jednoznacznie wskazywały, że obecność cząstek heksagonalnego azotku boru wpłynęła na poprawę właściwości tribologicznych smarów plastycznych. Skuteczność smarowania przygotowanymi kompozycjami była ściśle związana z granulacją i stężeniem h-BN.

Najkorzystniejsze efekty osiągnięto dla kompozycji zawierających heksagonalny azotek boru, który charakteryzował się najmniejszą granulacją i największym udziałem frakcji nanocząstek. Połączenie niewielkich rozmiarów cząstek tego rodzaju h-BN z ich rozwiniętą porowatością umożliwiło tworzenie odpornych warstw smarujących i wpłynęło na poprawę właściwości tribologicznych litowych i wapniowych smarów plastycznych. Odpowiednio dobrane stężenie tego dodatku (3% lub 5%) zapewniało największą skuteczność działania smaru plastycznego. Zbyt mała (1%) lub zbyt duża (10%) zawartość prowadziła do pogorszenia właściwości tribologicznych. Pozostałe rodzaje smaru stałego okazały się mniej skuteczne, co wynikało przede wszystkim z większych rozmiarów ich cząstek i mniejszego udziału frakcji nanocząstek.

Wykazano również, że rodzaj smaru bazowego wpływał na skuteczność smarowania nanocząstkami i mikrocząstkami heksagonalnego azotku boru. Szczególnie istotna była lepkość strukturalna kompozycji bazowej. Z tej perspektywy wartościowe okazały się charakterystyki Stribeck, uwzględniające jednocześnie wpływ lepkości smaru plastycznego oraz parametrów pracy układu ciernego, takich jak prędkość i obciążenie. Ich analiza wskazywała na złożony mechanizm smarowania, związany ze składem i strukturą smarów plastycznych.

Najlepsze właściwości tribologiczne odnotowano dla smarów litowych zawierających dialkyloditiofosforan cynku oraz siarkowany izobutylen w połączeniu z odpowiednio dobranym h-BN (dodatkiem o najmniejszej granulacji). Synergiczne działanie wszystkich tych dodatków przyczyniało się do ograniczenia oporów tarcia oraz poprawiało odporność smaru plastycznego na zużycie i zacieranie.

Przeprowadzona po badaniach tribologicznych analiza powierzchni śladów zużycia ujawniła obecność boru w miejscach kontaktu, co wskazywało na skuteczne osadzanie się cząstek h-BN na powierzchniach elementów ciernych. Mechanizm działania azotku boru opierał się przede wszystkim na efekcie ścinająco-ślizgowym, typowym dla materiałów o budowie warstwowej. Szczególnie w przypadku nanocząstek istotna była także ich zdolność do poprawy stanu powierzchni poddanej tarcia. Ponadto, badania wykazały, że użycie smarów zawierających heksagonalny azotek boru, wykazujący największy udział nanocząstek, prowadziło do wyraźnego ograniczenia intensywności zużywania elementów ciernych. W procesie formowania warstwy smarującej i jej skuteczności istotna była także struktura porowata cząstek heksagonalnego azotku boru.

W ostatnim etapie badań oceniono inne właściwości użytkowe smarów plastycznych zawierających h-BN, takie jak temperatura kroplenia, konsystencja i stabilność

mechaniczna. Dokonano również analizy mikrostruktury smarów plastycznych, która miała istotne znaczenie w interpretacji wyników badań.

Obecność h-BN, zwłaszcza w postaci nanocząstek, prowadziła do wzrostu temperatury kroplenia oraz poprawy stabilności mechanicznej kompozycji. Największe korzyści przyniosło użycie smarów zawierających 5% h-BN o najmniejszej granulacji i rozwiniętej porowatości. Mikroskopowa analiza struktury smarów prowadziła do wniosku, że dyspersja cząstek h-BN różniła się w zależności od rodzaju smaru – w smarach litowych, charakteryzujących się mniej zagregowaną siecią włókien zagęszczacza, cząstki smaru stałego łatwiej integrowały się z jego strukturą. Z kolei w smarach wapniowych, cechujących się bardziej zwartą siecią przestrzenną, osadzenie tych cząstek było utrudnione. Sposób integracji cząstek heksagonalnego azotku boru ze strukturą smaru plastycznego wpływał istotnie na ich właściwości tribologiczne oraz na stabilność termiczną i mechaniczną.

Przeprowadzone badania wykazały, że skuteczność heksagonalnego azotku boru jako dodatku do smarów plastycznych zależy przede wszystkim od jego granulacji, stężenia oraz rodzaju smaru bazowego. Najlepsze właściwości tribologiczne osiągnięto dla kompozycji zawierających 3–5% dodatku h-BN, charakteryzującego się największym udziałem frakcji nanocząstek i rozwiniętą porowatością. Obecność dialkiloditiofosforanu cynku i siarkowanego izobutyleny uzupełniała działanie h-BN, prowadząc do synergicznego efektu poprawy właściwości użytkowych smarów plastycznych.

Uzyskane wyniki dostarczyły solidnych podstaw do dalszego rozwoju nowoczesnych smarów plastycznych z nanocząstkami heksagonalnego azotku boru. Przyjęte w dysertacji podejście, łączące wnikliwą analizę właściwości fizykochemicznych h-BN, szeroko zakrojone badania tribologiczne oraz ocenę innych właściwości użytkowych smarów plastycznych, pozwoliło nie tylko lepiej zrozumieć mechanizmy smarowania środkami zawierającymi nanocząstki i mikrocząstki h-BN, lecz także wskazać czynniki istotne przy doborze dodatków (smarów stałych) do smarów plastycznych z myślą o rzeczywistych układach tribologicznych.

mgr inż. Szymon Senyk