

9. Podsumowanie i wnioski

Praca poświęcona jest opracowaniu nowego kompozytu, szczególnie na bazie materiału porowatego, z siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi.

Podstawą do niniejszego opracowania było zapotrzebowanie przemysłu sektora wytwórczego na innowacyjne materiały charakteryzujące się unikalnymi właściwościami, które nie są możliwe do uzyskania w przypadku zastosowania materiałów konwencjonalnych. Stąd też inżynieria materiałowa to jedna z najszybciej rozwijających się interdyscyplinarnych dziedzin nauki. Szczególne zainteresowanie z punktu widzenia zastosowania technologicznego w nowoczesnych gałęziach gospodarki wzbudzają nanomateriały inżynierskie. Obecnie największe nadzieje na radykalną poprawę właściwości materiałów wiąże się z kształtowaniem ich mikrostruktury w skali nanometrycznej, a w szczególności kształtowanie struktury warstwy powierzchniowej, zbliżonej do kompozytowej. Istotną rolę w tych badaniach odgrywa metalurgia proszków, gdzie nowe kompozycje materiałowe znajdują coraz szersze zastosowanie w przemyśle samochodowym i lotniczym (por. rozdział 3). Metalurgia proszków w znaczny sposób przewyższa inne metody wytwarzania, umożliwiając wykorzystanie w 95% materiału przeznaczonego na wykonanie elementu. W klasycznej metodzie obróbki skrawaniem poziom zużycia materiału wynosi zaledwie od 40-50%. Na podstawie przeprowadzonych porównań, technologię wytwarzania elementów za pomocą metalurgii proszków możemy nazwać bezodpadową. Ważnym czynnikiem wpływającym na zainteresowanie tą technologią jest niski stopień zużycia energii (por. rozdział 4).

Przedstawiona praca dotycząca opracowania nowego kompozytu, w szczególności na bazie materiału porowatego, do zastosowań w przemyśle samochodowym i lotniczym ma charakter wielowątkowy. Oprócz zadań badawczych i poznawczych, ukierunkowanych na poznanie mechanizmów **działania struktury nowego kompozytu, wzmocnionego siarczkowymi nanocząstkami o strukturze grafenopodobnej**, na jego własności fizykochemiczne ze szczególnym uwzględnieniem własności tribologicznych zakłada przeniesienie opracowanych wysoko zaawansowanych technologii do praktyki przemysłowej.

Oryginalnym podejściem jest koncepcja optymalizacji właściwości materiałów wsadowych (por. rozdział 6), które dotychczas wykorzystywano w stanie dostawy, bez optymalizacji tego stanu w kontekście parametrów stereologicznych mikrostruktury i właściwości materiału proszkowego, a także siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych (por. rozdział 7). Niezwykle

ważnym aspektem jest opracowanie metod przeróbki plastycznej oraz technik modyfikacji bazowych materiałów proszkowych (por. rozdziały 6 i 7). Istotnym elementem pracy są badania nad tarciem i zużyciem nowego kompozytu (por. rozdział 8).

Najskuteczniejszym sposobem zapobiegania zużyciu jest smarowanie powierzchni, poprzez wytworzenie powłok smarujących (por. rozdział 3). Na podstawie badań literaturowych wykazano, że modyfikacja warstwy wierzchniej nieorganicznymi grafenopodobnymi nanocząstkami części stosowanych na elementy maszyn pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych [101] w temperaturze do 900°C, osiągając współczynnik tarcia poniżej <0,1 i uzyskując 2-3-krotne zwiększenie trwałości elementów współpracujących jako para tarcza w porównaniu do elementów wykonanych z dotychczas stosowanych stopów i powłok (por. rozdział 3). Kompleksy molibdenu i wolframu stosowane jako dodatki smarne rozpuszczalne w oleju obniżają zużycie cierne, zmniejszają tarcie oraz są znakomitymi antyutleniaczami [82-85, 156]. Zatem można uznać, że są modyfikatorami tarcia obniżając oraz stabilizując współczynnik tarcia, wykazując również działanie przeciwpittingowe [230]. Działanie tribologiczne i przeciwuutleniające kompleksów molibdenu było badane również w pracy [231]. Zastosowanie oleju bez dodatków skutkowało dużym zużyciem adhezyjnym występującym przy współpracy aluminium ze stalą. Natomiast w wyniku zastosowania kompleksów molibdenu uzyskano zmniejszenie zużycia adhezyjnego przez tworzenie filmu powierzchniowego przy dużych prędkościach ślizgania. Niższy współczynnik tarcia występuje w tarcu o dużym udziale ślizgania aniżeli toczenia [232]. W praktyce istotne jest aby dodatek modyfikujący tarcie działał przez cały okres pracy. Dlatego też obecnie wiele światowych ośrodków naukowych prowadzi prace nad wieloma związkami nieorganicznymi takimi jak MoS₂, MoSe₂, WS₂, posiadającymi budowę podobną do fullerenów, nanorurek i grafenów. Zachowanie tych cząstek podczas procesów tarcia jest przedmiotem wielu badań [233-237]. Jak przedstawiono w rozdziale 8, wyniki badań tribologicznych mieszaniny z syntetyzowanymi nanocząstkami IF-WS₂, oraz mieszaniny z cząstkami mielonymi WS₂ pokazały bardzo niskie współczynniki tarcia ($\mu = 0,03$) i zużycia ($Z = 2,9 \cdot 10^{-12} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) przy smarowaniu granicznym. Wykazano również, że niski współczynnik tarcia i małe zużycie spowodowane jest obecnością skupisk podobnych do grafenów i rozwarstwieniem nanocząstek. Wywołana ścinaniem reorientacja nanocząstek podobnych do grafenów przy wzroście naprężeń stykowych zapewnia niski współczynnik tarcia w porównaniu do smarowania olejem. Zdolność dostosowania się struktury

połączenia jako funkcji parananocząstek podobnych do grafenów jest unikalna i umożliwia otrzymanie niskiego współczynnika tarcia i małego zużycia elementów ślizgowych.

Za bardzo ważne należy uznać rozwój i optymalizację metod mechanicznego rozwarstwiania materiałów do wytwarzania siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych i ich mieszanin (por. rozdział 7). Głównym wnioskiem z badania SPM jest to, że metoda rozwarstwiania obrotowego jest możliwa do wytwarzania na dużą skalę, płytek nano i mikrocząstek kompleksów molibdenu i wolframu. Rysunek 63 przedstawia obecność cienkich płatków o wielkości 200-500 nm. Niektóre z nich mają grubość płytek poniżej 15 nm. Większość otrzymanych tą metodą nanocząstek (zgodnie z rysunkiem 64) to nanocząstki MoS_2 o wymiarze około 60-100 nm.

Oznacza to, że siarczkowe nanocząstki grafenopodobne wykazują znacznie lepsze zdolności penetracji w połączeniu z płynami nośnymi ciekłych środków smarowych takich jak np. olej.

Dane doświadczalne przedstawione na rysunku 73 ukazują szerokie możliwości kontrolowania procesu impregnacji, a w szczególności grubości i porowatości uzyskiwanej warstwy filmu smarującego nowego kompozytu na bazie materiału porowatego.

Wykonując liczne interdyscyplinarne badania z zakresu inżynierii materiałowej, fizyki ciała stałego i mechaniki udowodniono, że w celu zmniejszenia współczynnika tarcia i zużycia elementu pracującego w ekstremalnych warunkach, gdzie podawanie smarowania podczas pracy jest niemożliwe, gromadzenie się siarczkowych grafenopodobnych nanocząstek w specjalnie ukształtowanych w materiale litym mikrokanalikach, umożliwia ich powolne uwalnianie na powierzchnię tarcia. Siły tarcia i reakcje zachodzące na powierzchni są wykorzystywane do wydzielania warstwy smaru przy styku tarciovym, tzn. mikrokanaliki w strukturze powłoki pełnią rolę rezerwarów dostarczających nanocząstki smarujące na powierzchnię styku, gdzie w wyniku tworzenia się filmu smarnego o wymaganym składzie chemicznym i strukturze następuje zmniejszenie tarcia. Taki sposób wprowadzania nanocząstek siarczków grafenopodobnych do twardej, odpornej na wysokie temperatury i utlenianie osnowy, zapewnia ich długotrwałe działanie również w wysokich temperaturach (por. rozdział 8). Przy czym zastosowanie powłoki wielowarstwowej wydaje się bardziej efektywne, niż zastosowanie mikrokanalików dla zużycia zmęczeniowego, natomiast zastosowanie mikrokanalików wypełnionych nanocząstkami smarów stałych wydaje się bardziej efektywne w przypadku zużycia ściernego i adhezyjnego [77-80, 237].

W pracy wykazano, że siarczkowe nanocząstki grafenopodobne stosowane jako dodatki do ciekłych środków smarnych zmniejszają współczynnik tarcia i intensywność zużycia w tempe-

raturze otoczenia. Natomiast przy podwyższonych i wysokich temperaturach nie można zastosować oleju ani smaru (por. rozdział 3), dlatego perspektywnym kierunkiem prac rozwojowych jest podawanie w strefę pracy pary trącej suchych siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych [234-237].

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych i przemysłowych udowodniono tezę pracy i sformułowano wnioski końcowe:

1. W celu zwiększenia właściwości przeciwiernych, antykorozyjnych i mechanicznych łożysk ślizgowych przeznaczonych do pracy w ekstremalnych warunkach, zasadne jest zastosowanie nowego kompozytu na bazie proszków stali nierdzewnych modyfikowanych siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi (MoS_2 i WS_2). Określono optymalny skład bazowej mieszanki proszkowej. Jak wykazują badania przemysłowe elementy wykonane z nowego kompozytu z powodzeniem mogą zastąpić wytwarzane dotąd elementy z materiału litego.
2. Dużą zaletą bazowych materiałów proszkowych jest ich porowatość, która może pełnić funkcję swoistego zbiornika środka smarującego (oleju). Wprowadzanie siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych do sieci porów uważa się za obiecujący sposób uzyskiwania trwałych właściwości przeciwiernych łożysk. Bardzo ważne jest ustalenie rzeczywistych warunków obciążenia współpracujących elementów.
3. Właściwości cierne podczas pracy w warunkach ograniczonego smarowania zależą w dużej mierze od przepuszczalności bazowego materiału porowatego. Wyższa przepuszczalność daje dużo lepsze właściwości cierne niż materiał o niższej przepuszczalności. Oznacza to, że pory w materiale przepuszczalnym mogą działać jako zbiorniki środka smarującego i dzięki temu obszar styku może wytrzymać dłuższe czasy ślizgania w warunkach ograniczonego smarowania, zanim powierzchnia zostanie uszkodzona i właściwości cierne ulegną zmianie. Przepuszczalność materiału łożyska porowatego nie ma natomiast dużego wpływu na współczynnik tarcia, gdy układ jest całkowicie wypełniony środkiem smarowym.
4. Uszczelnienie krawędzi przy powierzchni styku powoduje dłuższy czas pracy układu w warunkach ograniczonego smarowania zapobiegając wypływowi środka smarującego z materiału.
5. Badania przemysłowe wykazały, że prototypy tulei łożyskowych wykonane z nowego kompozytu w badanym układzie tribologicznym pracowały dobrze zapewniając równomierne zużycie w wyniku uwalniania podczas pracy w obszar kontaktu siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych. Właściwy dobór nośnika (np. oleju) siarczkowych nano-

cząstek grafenopodobnych pełni istotną rolę zarówno podczas procesu impregnacji porowatej osnowy kompozytu jak też późniejszej pracy układu tribologicznego.

6. Nanometryczne rozmiary cząstek grafenopodobnych pozwalają wnikać w pory (naturalnie lub specjalnie wytworzone, jak mikrokanaliki w materiale litym z powłoką twardą lub bez niej) i lokalne zagłębienia osnowy. Korzystny efekt działania siarczkowych struktur grafenopodobnych uzyskuje się poprzez gromadzenie nanocząstek w mikrorezerwuarach na powierzchni kontaktu.
7. Warstwowa budowa siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych zmniejsza ilość defektów powierzchniowych, podnosząc stabilność tribologiczną całej nanocząstki, co może stanowić o samoregenerującym się (określoną ilość razy) efekcie działania środka smarującego. Właściwości tribologiczne mogą być modyfikowane poprzez wprowadzenie innych pierwiastków do zeszyntezowanych nanocząstek grafenopodobnych.
8. Nowy kompozyt z siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi charakteryzuje się niskim współczynnikiem tarcia, dobrą wytrzymałością na wysokie obciążenia i dużą stabilnością mechaniczną i chemiczną.
9. Siarczkowe nanocząstki grafenopodobne można wprowadzić w objętość materiału litego poprzez specjalne, wykonane laserowo mikrokanaliki, które umożliwiają ich powolne uwalnianie na powierzchnię styku.

Podsumowanie

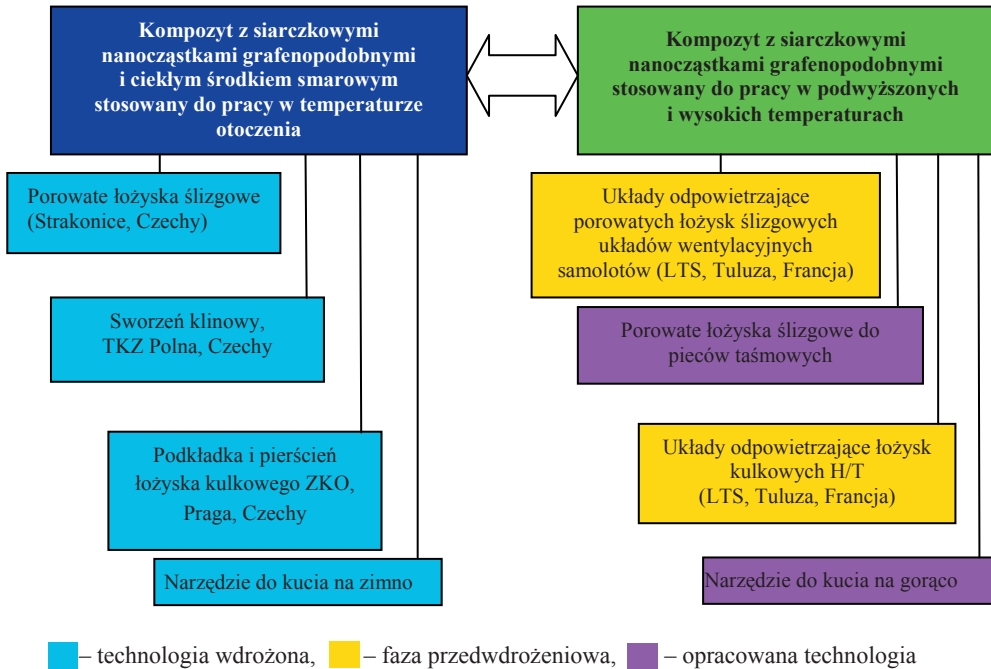
Optymalizacja parametrów procesu impregnacji siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi pozwoliła na uzyskanie stosunkowo niskiego współczynnika tarcia dla próbek tulei łożyskowych.

W Instytucie Obróbki Plastycznej opracowano pod kierunkiem Autorki, technologię wytwarzania wyrobów metalurgią proszków w połączeniu z obróbką plastyczną, obróbką cieplną i ciepłno-chemiczną. **Innowacyjna technologia pozwala na uzyskanie nowego kompozytu na bazie proszków stali nierdzewnej, o podwyższonych własnościach mechanicznych i tribologicznych i otwiera nowy kierunek wykorzystania materiałów proszkowych.**

Przeróbka plastyczna materiałów spiekanych z proszków metali i ich stopów oraz kompozytów na ich osnowie daje możliwości wytwarzania nowoczesnych wyrobów o określonej strukturze i własnościach mechanicznych oraz użytkowych. Innym zastosowaniem siarczkowych nanocząstek grafenopodobnych jest wprowadzenie ich w objętość materiału litego poprzez

specjalne, wykonane laserowo mikrokanaliki, które umożliwiają ich powolne uwalnianie na powierzchnię styku. Opracowana technologia otrzymywania siarczkowych nanostruktur grafenopodobnych została rozwinięta w projekcie EUROSTARS.

Na rysunku 130 przedstawione są elementy wytwarzane z nowych kompozytów, których technologia została opracowana w Instytucie Obróbki Plastycznej pod kierunkiem Autorki.



Rysunek 130. Zastosowanie nowych kompozytów z siarczkowymi nanocząstkami grafenopodobnymi