



## Właściwości tribologiczne smarów plastycznych zawierających tlenek grafenu lub heksagonalny azotek boru

IGOR JAKUB DĄBROWSKI, KRZYSZTOF GOCMAN,  
TADEUSZ KAŁDOŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,  
Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, ul. gen. S. Kaliskiego 2,  
00-908 Warszawa, dabrowski.igo@gmail.com, tadeusz.kaldonski@wat.edu.pl

**Streszczenie.** Celem publikacji jest przedstawienie wyników badań bazy smaru plastycznego o klasie konsystencji 2 według klasyfikacji NLGI uszlachetnionej różnymi stężeniami tlenku grafenu GO, wyprodukowanego przez Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie, lub heksagonalnego azotku boru h-BN, wytworzonego w Wojskowej Akademii Technicznej. W pierwszej części publikacji przedstawiono podstawowe wiadomości na temat grafenu oraz jego zastosowań, w szczególności w zakresie tribologii. W drugiej części artykułu zaprezentowano wyniki badań właściwości tribologicznych próbek uszlachetnionych tlenkiem grafenu lub heksagonalnym azotkiem boru w ilościach: 0,05%, 0,1%, 0,5%, 1% i 2% masy. Ponadto oceniono właściwości tribologiczne tzw. „pasty grafenowej”, wykonanej z płatkowego tlenku grafenu rozpuszczonego w wodzie. Pomiary zrealizowano przy wykorzystaniu aparatu czterokulowego T-02 i uniwersalnego mikronanotestera UNMT w Zakładzie Tribologii, Inżynierii Powierzchni i Logistyki Płynów Eksploatacyjnych Wydziału Mechanicznego Wojskowej Akademii Technicznej. Otrzymane wyniki wykazały korzystny wpływ wprowadzania do bazowego smaru plastycznego dodatków w postaci tlenku grafenu lub heksagonalnego azotku boru na jego właściwości tribologiczne. Tzw. „wodna pasta” z tlenku grafenu GO okazała się tak samo skuteczna jak smar plastyczny zawierający znaczną koncentrację GO (1% lub 2% m/m).

**Słowa kluczowe:** grafen, smar plastyczny, tlenek grafenu, heksagonalny azotek boru

**DOI:** 10.5604/01.3001.0013.5556

## 1. Wprowadzenie

Grafen oraz innego rodzaju nanostruktury węglowe od dawna stanowią obiekt badań ośrodków naukowych z całego świata. Przeprowadzane są w nich różnego rodzaju testy, których celem jest opracowanie ekonomicznych metod wytwarzania materiałów grafenowych oraz ich zastosowania w szerokim spektrum dziedzin techniki. Zainteresowanie grafenem wynika z jego niezwykłych właściwości elektrycznych, mechanicznych, termicznych, optycznych i chemicznych, które sprawiają, że nanostruktury węglowe stanowią potencjalny substytut wielu dziś stosowanych materiałów, takich jak krzem czy stal. Obecnie główną przeszkodą stojącą na drodze powszechnemu stosowaniu materiałów grafenowych są trudności związane z ich wytwarzaniem, uniemożliwiające przemysłową produkcję dobrej jakości grafenu. Kolejny problem stanowią koszty uzyskania grafenu, warunkujące dużą cenę substancji, co sprawia, że jej szerokie zastosowanie jest aktualnie nieekonomiczne.

Do potencjalnych obszarów zastosowania materiałów grafenowych należy zaliczyć również tribologię. Przesłankę do podejmowania badań określających tribologiczne zastosowanie grafenu stanowi struktura cząstki, zbliżona do struktury smarów stałych, stosowanych jako dodatki do olejów i smarów plastycznych (grafit, heksagonalny azotek boru, disiarczek molibdenu), oraz jego właściwości mechaniczne.

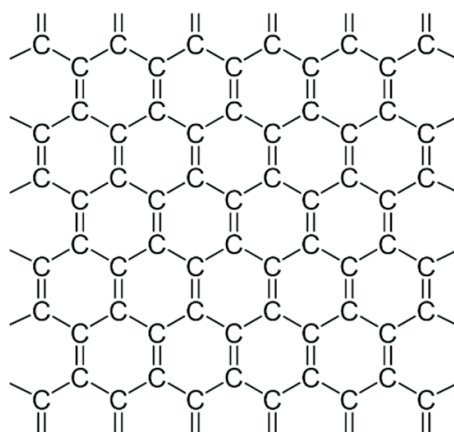
W literaturze można odnaleźć kilka publikacji, głównie anglojęzycznych, w których zamieszczone są wyniki różnorodnych testów określających wpływ wprowadzania poszczególnych odmian nanostruktur węglowych w strukturę materiałów kompozytowych współpracujących tarciowo [3, 15], zastosowania ich jako powłok ochronnych [2, 30] oraz wykorzystywania ich jako dodatków poprawiających właściwości tribologiczne substancji smarnych [8, 10, 17, 22]. Nieliczne wyniki badań dotyczących wprowadzania materiałów grafenowych do substancji smarnych wskazują, że ich stosowanie przyczynia się do zmniejszenia wartości współczynnika tarcia oraz do zmniejszenia zużycia współpracujących elementów.

## 2. Podstawowe informacje o grafenie

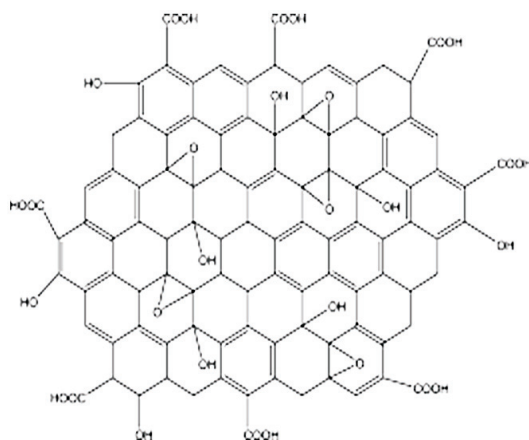
Zagadnieniom związanym z właściwościami, metodami wytwarzania oraz obszarami zastosowań materiałów grafenowych zostało poświęconych już wiele publikacji krajowych i zagranicznych [1, 2, 4, 9, 14, 16, 24, 26, 28, 29, 30, 32], w tym także ostatnia publikacja autorów [7], dlatego też w niniejszej pracy przypomniane zostaną wyłącznie podstawowe informacje na ten temat.

Materiały węglowe stanowią od dłuższego czasu obiekt badań instytutów naukowych znajdujących się na całym świecie, co wynika z posiadanych przez te materiały właściwości. Jednym z nich, któremu poświęcono najwięcej uwagi, jest

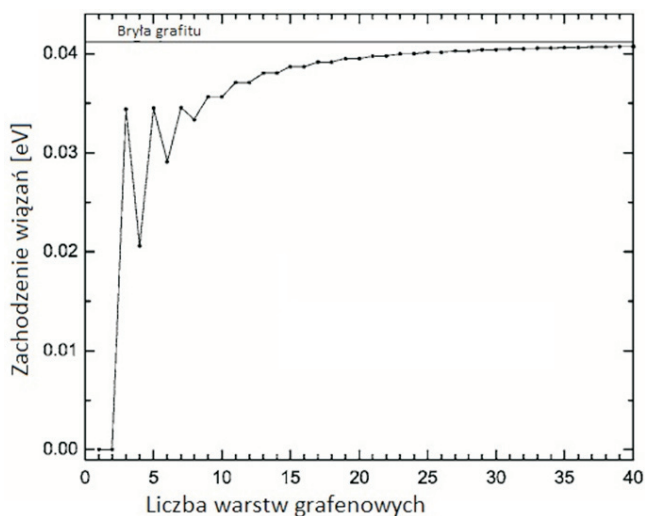
grafen. Pod tym pojęciem rozumiana jest zwykle pojedyncza (grubość 1 atomu), płaska, heksagonalna struktura, w składzie której zawarte są atomy węgla (rys. 1), jednak w praktyce znacznie częściej wykorzystywane są struktury o większej grubości (do 10 atomów, nazywane grafenem płatkowym) i zawierające ponadto inne niż węgiel pierwiastki lub grupy funkcyjne (np. tlenowe w tlenku grafenu) (rys. 2), co wynika z trudności w otrzymaniu idealnej struktury grafenowej przy zachowaniu rozsądnych kosztów produkcji. Należy zwrócić uwagę na podobieństwa występujące pomiędzy grafenem a grafitem — ten drugi składa się z pojedynczych warstw grafenowych, podobnie jak grafen wielowarstwowy. Różnicą pomiędzy grafenem płatkowym a grafitem są reprezentowane przez dany materiał właściwości elektryczne, zmieniające się znacząco przy grubości 10 warstw — wszystko powyżej tej granicy uważane jest za grafit (rys. 3) [25].



Rys. 1. Struktura grafenu [34]

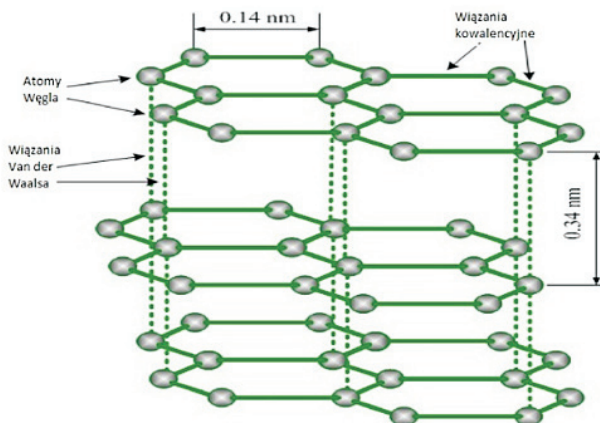


Rys. 2. Struktura tlenku grafenu [35]

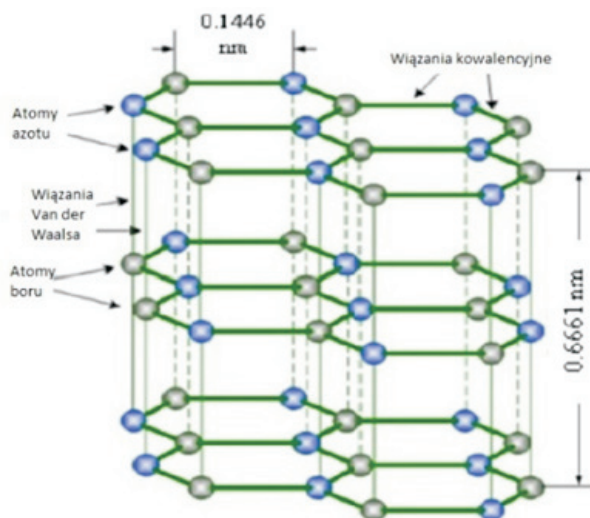


Rys. 3. Różnica w energii pomiędzy ostatnią i pierwszą warstwą energetyczną w punkcie K [25]

Cechą charakterystyczną struktur grafenowych są występujące w nich wiązania, mianowicie mocne i krótkie wiązania kowalencyjne między atomami węgla w płaszczyźnie poziomej oraz słabe wiązania van der Waalsa, zachodzące w kierunku prostopadłym do powierzchni (rys. 4). Warto zwrócić uwagę, że struktura grafenu płatkowego jest niezwykle zbliżona do struktury heksagonalnego azotku boru (rys. 5), stąd jego wybór do badań porównawczych jako materiału referencyjnego w stosunku do tlenku grafenu.



Rys. 4. Struktura grafenu płatkowego [36]



Rys. 5. Struktura heksagonalnego azotku boru [37]

Wiązania przedstawione na rysunku 4 przesądzają o niezwykłych właściwościach elektrycznych (ruchliwość elektronów na poziomie  $2 \cdot 10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ), termicznych (przewodność cieplna na poziomie  $1500 \div 5300 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ), optycznych (przejrzystość około 97,7%) i mechanicznych grafenu (wytrzymałość około 200 razy większa niż stali), dzięki którym może on być zastosowany w wielu różnorodnych obszarach techniki, takich jak elektronika, materiały kompozytowe, medycyna oraz wiele innych. Grafen może być na przykład stosowany w [14, 16]:

1. Sprzęcie sportowym, np. rakiety tenisowe;
2. Przechowywaniu energii;
3. Medycynie, np. w dostarczaniu leków jako platforma transportująca cząstki leków oraz przeciwciał do odpowiednich komórek organizmu;
4. Antybakteryjnych opatrunkach;
5. Tranzystorach i kondensatorach;
6. Szybach;
7. Lekkich i wytrzymałych elementach karoserii pojazdów i konstrukcji budowlanych;
8. Detektorach gazu;
9. Wielu innych dziedzinach życia i obszarach nauki.

Należy jednak zaznaczyć, że właściwości poszczególnych materiałów grafenowych są uzależnione od grubości struktury, zawartości w niej innych niż węgiel pierwiastków oraz jej uporządkowania, co zależy od zastosowanej metody wytwarzania.

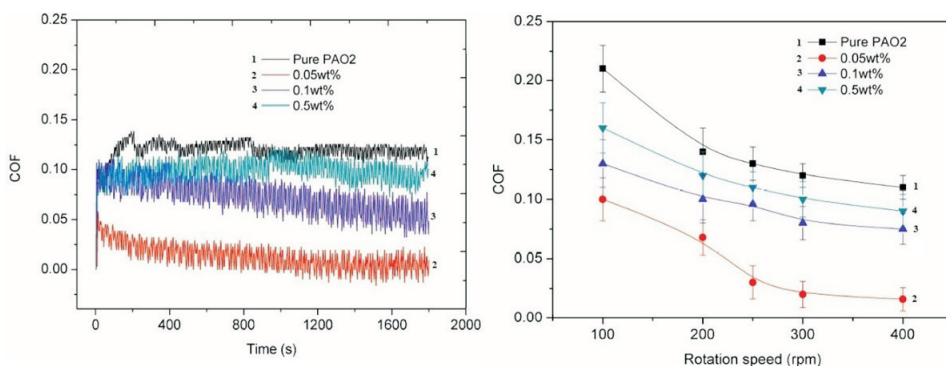
### 3. Zastosowanie grafenu w tribologii

Materiały grafenowe, jak zostało to już wcześniej wspomniane, od dawna stanowią obiekt badań dotyczących możliwości ich zastosowania w wielu różnorodnych obszarach techniki. Jednym z nich jest tribologia, w ramach której analizowany jest głównie wpływ grafenu na poprawę właściwości węzłów tarcia, poprzez:

1. Wprowadzanie materiałów grafenowych do substancji smarnych [2, 6, 8, 10, 12, 17, 20, 21, 22, 23, 31];
2. Nanoszenie materiałów grafenowych jako powłok ochronnych [2, 30];
3. Stosowanie materiałów grafenowych w materiałach kompozytowych [3, 15].

Na podstawie powyższych publikacji można stwierdzić, że najczęściej badania były prowadzone w zakresie zastosowania grafenu i jego odmian jako dodatku poprawiającego właściwości tribologiczne substancji smarnych, takich jak oleje oraz smary plastyczne. Wyniki, jakie można odnaleźć w literaturze, wskazują, że wprowadzanie materiałów grafenowych do substancji smarnych wpływa na ogół korzystnie na ich właściwości tribologiczne, zmniejszając wartość współczynnika tarcia oraz wartość zużycia.

W ramach pracy [13] ocenie poddano wpływ wprowadzania grafenu płatkowego do bazy oleju PAO 2 (ang. *polyalphaolefin-2*) w stężeniu 0,05%, 0,1% oraz 0,5% masy. Do testów wykorzystano tribotester FALEX 1506 w konfiguracji czterokulowej. Na rysunku 6 przedstawiono zmiany wartości współczynnika tarcia COF (ang. *Coefficient of Friction*) dla testów z obciążeniem zadaniem 120 N (po lewej) oraz wyniki tego samego parametru dla testów prowadzonych przy zmiennej prędkości obrotowej górnej kuli aparatu (po prawej).

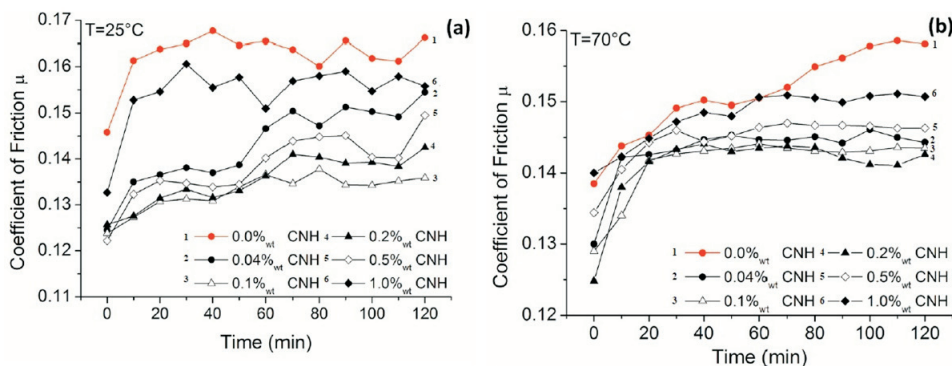


Rys. 6. Wartość współczynnika tarcia dla poszczególnych próbek podczas testów z obciążeniem 120 N przy stałej (po lewej) oraz zmiennej prędkości obrotowej (po prawej) [13]

Na podstawie rysunku 6 można zauważyć, że wprowadzanie do oleju PAO2 każdej ilości tlenku grafenu przyczyniło się do zmniejszenia wartości współczynnika tarcia, a najkorzystniejsze wyniki otrzymano dla próbki zawierającej 0,05% (m/m)

grafenu w przypadku obu wariantów badania. Dodatkowo należy zwrócić uwagę, że w przypadku 10-krotnego zwiększenia stężenia masowego dodatku w oleju (0,5%) wartość współczynnika tarcia wzrosła, zbliżając się do wyników otrzymanych dla czystego oleju.

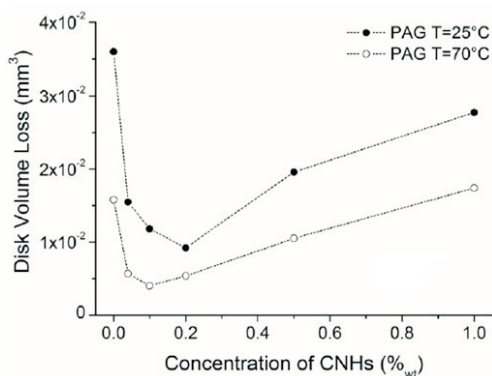
Pracę [31] poświęcono opisaniu wpływu innej nanostruktury węglowej (CNHs, ang. *Carbon Nanohorns*) na właściwości tribologiczne oleju PAG (ang. *Poly-Alkylene Glycol*). W badaniach wykorzystano stężenia 0,04%, 0,1%, 0,2%, 0,5% i 1% masy, które poddano testom na tribotesterze Bruker UMT-2. Na rysunku 7 przedstawiono wyniki wartości współczynnika tarcia dla skojarzenia kula-dysk w temperaturach 25°C i 70°C. Prędkość poślizgu wynosiła 75 mm/s, natomiast wartość nacisków w punkcie styku 1 GPa.



Rys. 7. Wartość współczynnika tarcia w zależności od stężenia CNHs dla 25°C (a) i 70°C (b) [31]

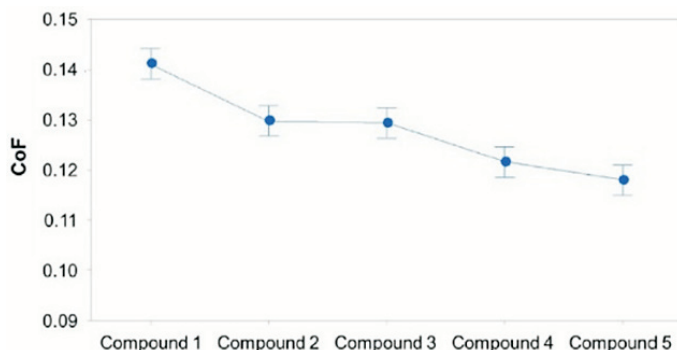
Wyniki przedstawione na rysunku 7 wskazują, że wprowadzanie do oleju innej struktury węglowej — CNHs, podobnie jak w przypadku tlenku grafenu (rys. 6), jest zasadne jedynie do pewnego stopnia. W tym przypadku najkorzystniejsze wartości współczynnika tarcia otrzymano dla stężeń 0,1% oraz 0,2% w temperaturze 25°C, natomiast dla stężenia 1% wykazano wartość współczynnika zbliżoną do czystego oleju PAG. Podobną tendencję można zaobserwować dla pomiarów w temperaturze 70°C, jednak w tym wypadku najkorzystniejsze wyniki otrzymano dla stężenia 0,2%. Należy również zwrócić uwagę, że wyniki dla stężenia 0,2% nie odbiegały znacząco od wyników dla stężeń 0,04%, 0,1% oraz 0,5%.

Na kolejnym rysunku (rys. 8) przedstawiono wartość zużycia objętościowego dysku w zależności od stężenia CNHs, z którego wynika, że zbyt duża obecność tej odmiany grafenu nie jest korzystna, powodując zwiększone zużycie. Zdaniem autora pracy [31] zwiększona wartość zużycia dysku zaobserwowana dla większych stężeń badanego dodatku węglowego wynikała z tworzenia się aglomeratów cząstek, charakteryzujących się znaczną twardością. Aglomeraty te zamiast rozdzielać współpracujące tarciowo powierzchnie, przyczyniały się do ich rysowania.



Rys. 8. Wartość zużycia w zależności od stężenia CNHs dla 25°C i 70°C [31]

Zagadnienie wpływu wprowadzania materiałów grafenowych do smarów plastycznych zostało opisane w pracy [22]. W jej ramach przeanalizowano wartość współczynnika tarcia dla próbek zawierających 0,5%, 1%, 5% oraz 10% masy grafenu płatkowego przy obciążeniach 5 N, 10 N oraz 15 N. Otrzymane wyniki wskazują, że wprowadzanie większych ilości grafenu do smaru przyczyniało się do obniżenia wartości współczynnika tarcia. Na rysunku 9 przedstawiono uśrednione wartości współczynnika tarcia dla poszczególnych próbek, uwzględniając wszystkie warianty zadanych obciążeń. Próbką oznaczoną jako „COMPOUND 1” określa próbkę czystego smaru, a kolejne numery wskazują zwiększenie zawartości grafenu.



Rys. 9. Średnia wartość współczynnika tarcia dla poszczególnych stężeń grafenu [22]

Natomiast brakuje w literaturze jakichkolwiek informacji na temat wpływu na procesy tarcia i zużywania elementów pary trącej smarowanych substancją wykonaną z tlenku grafenu rozpuszczonego w wodzie, w ilości umożliwiającej uzyskanie konsystencji smaru plastycznego. Płatkowy tlenek grafenu jest hydrofilowy i dobrze się rozpuszcza w wodzie, tworząc jednorodną mieszaninę [33]. Interesujące byłoby



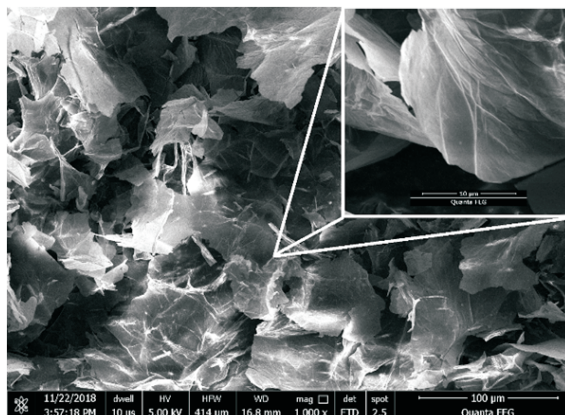
porównanie właściwości tribologicznych takiej substancji z bazą smaru plastycznego zawierającego określoną ilość GO.

Opisane pokrótce właściwości materiałów grafenowych, ich struktura (zbliżona do smarów stałych, takich jak grafit, heksagonalny azotek boru h-BN, disiarczki molibdenu  $\text{MoS}_2$ ), oraz niekompletne i często rozbieżne wyniki badań zamieszczonych w literaturze [2, 3, 6, 8, 10, 12, 13, 15, 17, 20÷23, 30, 31] stanowiły przesłankę do podjęcia badań dotyczących właściwości tribologicznych smarów plastycznych uszlachetnionych tlenkiem grafenu. Wydaje się, że w zastosowaniu tribologicznym struktura ta może wykazać się lepszą skutecznością niż czysty grafen. Warto również zwrócić uwagę, że zależnie od substancji smarującej (olej, baza smaru), do której wprowadzono materiały grafenowe, ich korzystny wpływ na właściwości tribologiczne był obserwowany przy różnych stężeniach:

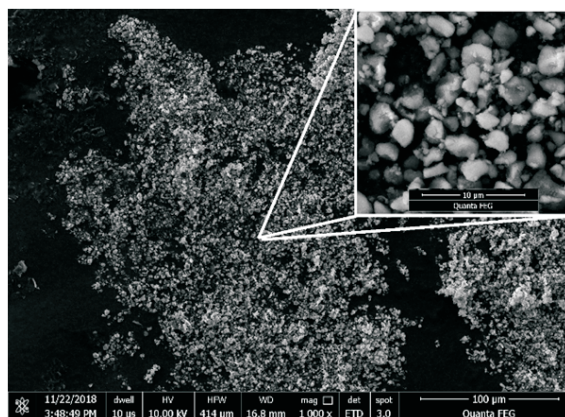
- w przypadku olejów poprawa właściwości była obserwowana już przy niewielkich stężeniach dodatków, a ich dalsze zwiększanie wpływało negatywnie;
- w przypadku smarów plastycznych najkorzystniejsze wyniki otrzymano dla największych stężeń dodatków.

## 5. Obiekt badań

W ramach przeprowadzonych badań wykorzystano wielowarstwowy tlenek grafenu GO, wytworzony przy użyciu zmodyfikowanej metody Hummersa (rys. 10), wyprodukowany przez Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych (ITME) w Warszawie [33]. Dodatkowo, w badaniach tribologicznych wykorzystany został heksagonalny azotek boru h-BN (rys. 11) — jako materiał porównawczy w stosunku do tlenku grafenu.



Rys. 10. Tlenek grafenu



Rys. 11. Heksagonalny azotek boru

W tabeli 1 oraz na rysunkach 12÷14 przedstawione zostały dane dotyczące tlenku grafenu.

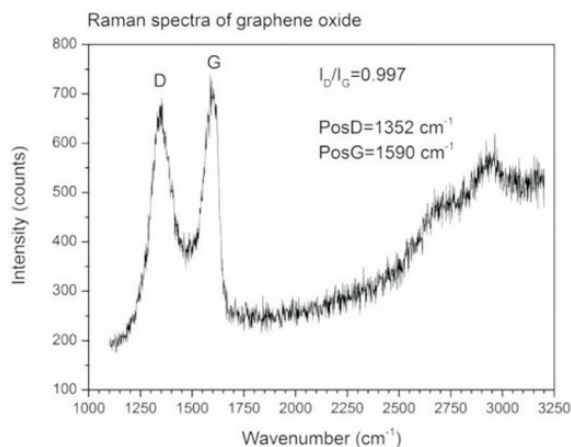
TABELA 1

Parametry płatkowego tlenku grafenu [33]

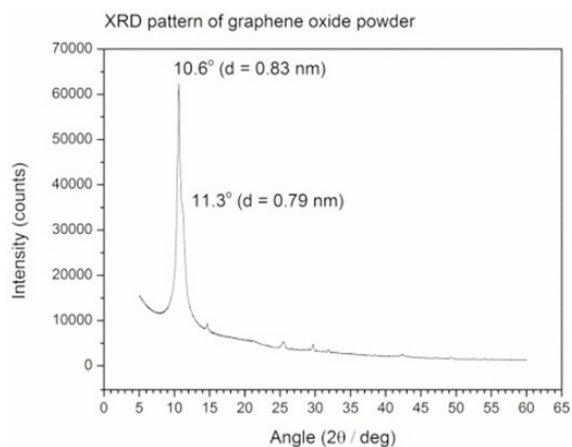
Parametr	Jednostka miary	Wartość	
Wygląd	-	Od jasnobrązowej do ciemnobrązowej.	
Gęstość objętościowa	[g/cm <sup>3</sup> ]	~0,2	
Gęstość nasypowa	[g/cm <sup>3</sup> ]	0,0037	
Powierzchnia właściwa	[m <sup>2</sup> /g]	5 (suszony sublimacyjnie) 11 (suszony rozpyłowo)	
Rozpuszczalność w H <sub>2</sub> O	-	Tworzy jednorodną zawiesinę	
Zawartość składników	Węgiel	%	40÷42
	Tlen		45÷52
	Siarka		1÷3
	Azot		< 0,3
	Wodór		2,5÷3

Zgodnie z analizą widma Ramana (rys. 12), struktura tlenku grafenu charakteryzowała się nieuporządkowaniem oraz znaczną liczbą defektów (pasma D i G). Na podstawie widma XRD (ang. *X-ray Diffraction*, dyfraktometria promieni rentgenowskich) (rys. 13) można zauważyć wyraźny pik dla kąta ugięcia  $2\theta$  około  $11^\circ$ . Widmo XPS (ang. *X-ray Photoelectron Spectroscopy*, rentgenowska spektrometria

fotolektronów) wskazuje (rys. 14) udział poszczególnych wiązań w strukturze GO, który w największym stopniu stanowiły wiązania C-C, C=C oraz C-O.

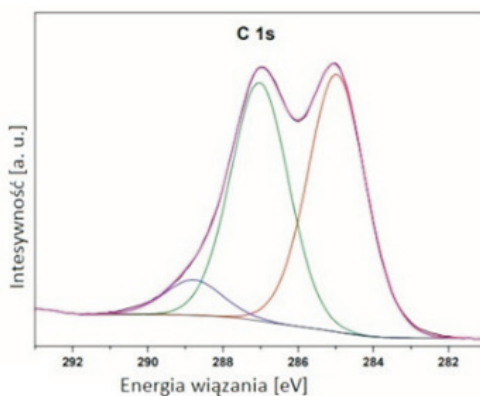


Rys. 12. Spektrometria Ramana tlenku grafenu [33]



Rys. 13. Dyfrakcja rentgenowska XRD tlenku grafenu [33]

Materiałem referencyjnym, który został wykorzystany w tych badaniach, był heksagonalny azotek boru, nazywany również „białym grafitem”, produkcji Wojskowej Akademii Technicznej. Jego struktura, zbliżona do grafitu, sprawia, że jest on bardzo dobrym dodatkiem poprawiającym właściwości tribologiczne olejów i smarów plastycznych [18]. Substancja ta cechuje się znaczną stabilnością chemiczną i termiczną, a także jest bezpieczna w użytkowaniu. W tabeli 2 przedstawiono wybrane właściwości heksagonalnego azotku boru.



GO	Pik energii wiązania (eV)	Koncentracja w skali atomowej (%)	Wiązanie
C1s	285	33.60	C – C and C=C
C1s	287.04	30.94	C – O (epoxy, hydroxyl groups)
C1s	288.22	4.59	C = O (carbonyl groups)
O1s	532.9	23.1	C – O

Rys. 14. Spektrometria XPS tlenku grafenu [33]

TABELA 2

Charakterystyka heksagonalnego azotku boru [18]

Parametr	Jednostka	Wartość
Gęstość	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,000÷2,355
Twardość w skali Mosh'a	-	1÷2
Przewodność właściwa	[Ω cm]	10 <sup>14</sup>
Temperatura topnienia (w obecności azotu)	[°C]	3000
Widmo pasma w podczerwieni	[cm <sup>-1</sup> ]	1390 i 810
Temperatura utleniania	[°]	> 1000
Rozmiar ziaren	[μm]	< 2 (średnia ~0,6 μm)

Opisane wcześniej substancje zostały wprowadzone do bazy smaru plastycznego o klasie konsystencji 2 według klasyfikacji NLGI (ang. *National Lubricating Greases Institute*, USA), która została wyprodukowana przez Centrum Badawczo-Analityczne Rafinerii Czechowice-Dziedzice, na specjalne zamówienie [11]. Baza była przechowywana w szczelnym metalowym pojemniku, a jej dobór był uwarunkowany jej dostępnością oraz czystością (brakiem jakichkolwiek dodatków). Zgodnie z [11] baza charakteryzowała się gęstością 0,883 g/cm<sup>3</sup> i penetracją około 270.

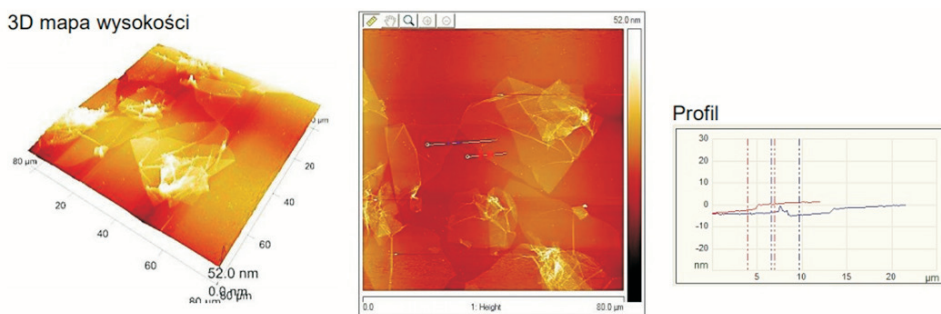
## 6. Przygotowanie próbek

Do badań zostały przygotowane następujące próbki smaru plastycznego:

1. Zawierające tlenek grafenu GO w stężeniach 0,05%, 0,1%, 0,5%, 1% oraz 2% masy.
2. Zawierające heksagonalny azotek boru h-BN w stężeniach 0,05%, 0,1%, 0,5%, 1% oraz 2% masy.

Przygotowanie próbek polegało na odmierzeniu odpowiedniej ilości substancji, do której następnie wprowadzono właściwą ilość bazy smaru, w celu uzyskania odpowiedniego stężenia. Następnie próbkę podgrzewano do temperatury około 80°C (w celu uniknięcia wydzielenia z zagęszczacza oleju) i przez 15 minut poddawano ręcznemu mieszaniu. Proces podgrzewania i mieszania prowadzono trzykrotnie, w celu uzyskania jednorodnej mieszaniny. Wymieszana próbka była pozostawiana w celu ostygnięcia do temperatury pokojowej.

Ponadto do badań pozyskano z Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie próbkę tzw. „wodnej pasty grafenowej” wykonanej z opisanego wcześniej płatkowego tlenku grafenu (tabela 1) rozpuszczonego w wodzie w stężeniu ~4,5% (m/m) [33]. Na rysunku 15 przedstawiono obraz AFM (ang. *Atomic Force Microscope*) „pasty grafenowej” oraz płatków grafenu.



Rys. 15. Obraz „pasty grafenowej” oraz profil GO o grubości ~1÷2 μm [33]

## 7. Aparatura badawcza

Badania właściwości tribologicznych smaru plastycznego uszlachetnionego różnymi stężeniami tlenku grafenu lub heksagonalnego azotku boru zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu następujących urządzeń:

1. Aparatu czterokulowego T-02 (produkcji Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu) — rys. 16, na którym zbadano parametry normatywne  $P_t$  i  $G_{oz}$  oraz nienormatywny parametr  $p_{oz}$  (opis w tabeli 3);

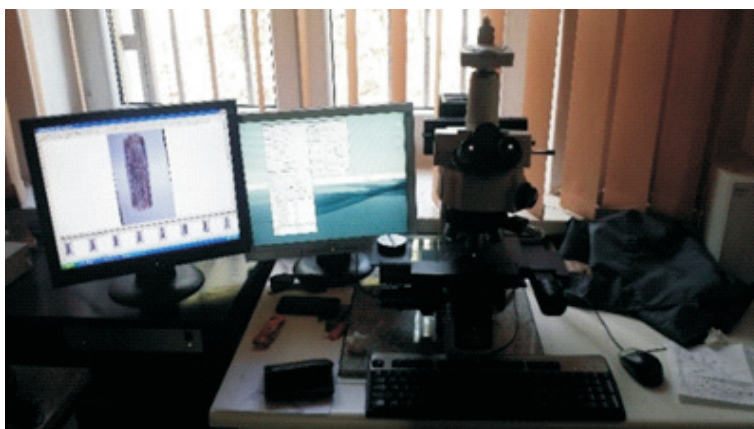
2. Uniwersalnego mikronanotestera UNMT (produkcji CETR, CA, USA) (rys. 18), na którym zmierzono wartość współczynnika tarcia oraz wartość zużycia płytki wzorcowej i kulki.

Pomiar śladów zużycia kulek z aparatu czterokulowego oraz mikronanotestera UNMT zrealizowano, obliczając średnią z długości śladów zużycia kulki w kierunku prostopadłym i równoległym do kierunku rys. Obserwacje prowadzono przy wykorzystaniu mikroskopu Nikon Eclipse LV100 (rys. 17). W przypadku testów na zestawie UNMT analizowany był inny rodzaj ruchu (posuwisto-zwrotny) niż w przypadku aparatu czterokulowego (obrotowy) — rys. 19.

W tabeli 3 przedstawione zostały informacje na temat parametrów, których pomiar zrealizowano na aparacie czterokulowym T-02.



Rys. 16. Aparat czterokulowy T-02

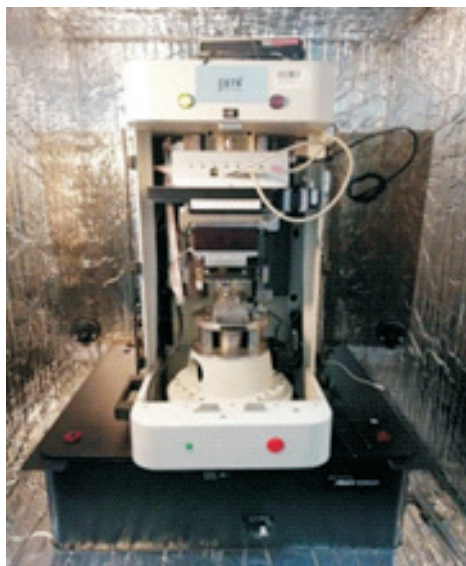


Rys. 17. Mikroskop Nikon Eclipse

TABELA 3

Parametry zmierzone na aparacie czterokulowym T-02

Lp.	Parametr	Opis	Wzór
1.	$G_{oz}$	Graniczne obciążenie zużycia obliczane było po biegu trwającym $60 \pm 1$ sekund, przy obciążeniu wynoszącym 147,10 daN (150 kG), co powoduje, że zadane naciski w punkcie styku wynosiły $5352,6 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$ . Prędkość obrotowa górnej kuli podczas trwania testu wynosi 500 obr./min.	$G_{oz} = 0,52 P/d_s^2$ [daN/mm <sup>2</sup> ] P — obciążenie zadane $d_s$ — średnia średnica skaz zużycia na trzech dolnych kulach
2.	$P_t$	Najniższe (płynnie wzrastające) obciążenie, podczas którego po czasie t następuje skokowy wzrost momentu tarcia w układzie. Pomiar polega na ustawieniu na dźwigni obciążenia 0 N, które wzrasta z prędkością 409 N/s, przy prędkości obrotowej górnej kuli wynoszącej 500 obr./min.	$P_t = t * 409$ [N]
3.	$P_{oz}$	Parametr odzwierciedlający naciski powierzchniowe w węzle tarcia po zakończonym badaniu. Realizacja pomiaru stanowiła przedłużenie testów $P_t$ (ze względu na małą ilość posiadanego GO), których nie przerywano w chwili osiągnięcia skoku momentu tarcia, a prowadzono aż do uzyskania na urządzeniu maksymalnego dopuszczalnego obciążenia, wynoszącego 784,53 daN (800 kG), przy którym aparat samoczynnie się wyłączył.	$P_{oz} = 0,52 P_{max}/d_s^2$ [daN/mm <sup>2</sup> ] $P_{max}$ — maksymalne obciążenie zadane $d_s$ — średnia średnica skaz zużycia trzech kul



Rys. 18. Mikronanotribotester UNMT



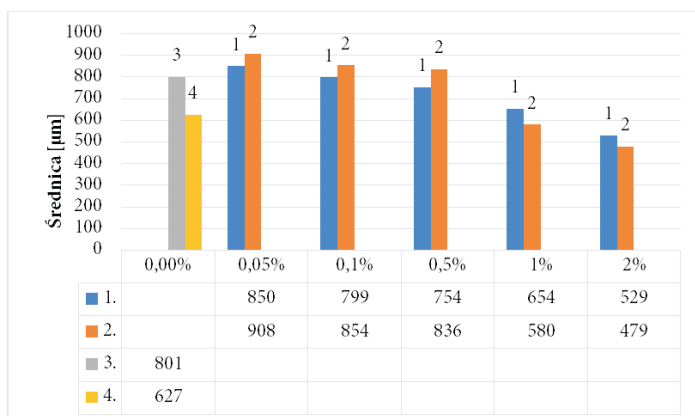
Rys. 19. Skojarzenie posuwisto-zwrotne UNMT

Wszystkie badania zrealizowano w Zakładzie Tribologii, Inżynierii Powierzchni i Logistyki Płynów Eksploatacyjnych, który wchodzi w skład Instytutu Pojazdów Mechanicznych i Transportu Wydziału Mechanicznego Wojskowej Akademii Technicznej.

## 8. Wyniki badań oraz ich analiza

### 8.1. Aparat czterokulowy T-02

Wyniki badań parametru  $G_{oz}$  zostały przedstawione w tabelach 4 i 5 oraz na rysunkach 20 i 21. W tabeli 6 oraz na rysunku 22 zamieszczono wyniki parametru  $P_t$ , natomiast w tabelach 7 i 8 oraz na rysunkach 23 i 24 przedstawiono wyniki badań parametru  $p_{oz}$ .



Rys. 20. Średnice śladów zużycia na dolnych kulach dla poszczególnych stężeń dodatków podczas oceny  $G_{oz}$



TABELA 4

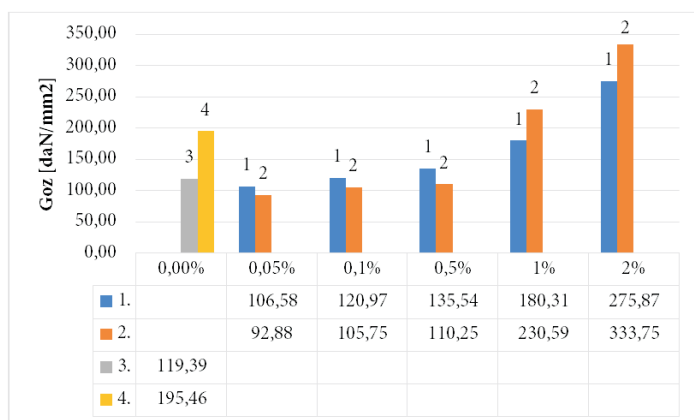
Średnice śladów zużycia na kulach dla poszczególnych stężeń dodatków podczas oceny  $G_{oz}$

Stężenie	Pomiar [ $\mu\text{m}$ ]			Wartość średnia [ $\mu\text{m}$ ]	Odchylenie standardowe [ $\mu\text{m}$ ]	Współczynnik zmienności [%]	
	1	2	3				
0,00%	788	800	815	801	14	2	
Pasta grafenowa	654	617	609	627	24	4	
h-BN	0,05%	853	801	896	850	47	6
	0,1%	862	761	774	799	55	7
	0,5%	713	793	755	754	40	5
	1%	660	695	608	654	44	7
	2%	569	524	495	529	38	7
GO	0,05%	880	925	920	908	25	3
	0,1%	910	810	842	854	51	6
	0,5%	816	796	897	836	54	6
	1%	613	530	596	580	44	8
	2%	485	482	471	479	7	2

TABELA 5

Wartość parametru  $G_{oz}$  dla poszczególnych stężeń dodatków

Stężenie	Pomiar [ $\text{daN}/\text{mm}^2$ ]			Wartość średnia [ $\text{daN}/\text{mm}^2$ ]	Odchylenie standardowe [ $\text{daN}/\text{mm}^2$ ]	Współczynnik zmienności [%]	
	1	2	3				
0,00%	123,32	119,68	115,16	119,39	4,09	3	
Pasta	178,82	201,23	206,32	195,46	15	7	
h-BN	0,05%	105,14	119,23	95,38	106,58	11,99	11
	0,1%	102,97	132,13	127,79	120,97	15,73	13
	0,5%	150,69	121,80	134,12	135,54	14,50	11
	1%	175,44	158,61	206,88	180,31	24,50	14
	2%	236,13	278,70	312,77	275,87	38,40	14
GO	0,05%	98,82	89,48	90,35	92,88	5,16	6
	0,1%	92,46	116,76	108,02	105,75	12,31	12
	0,5%	115,02	120,73	95,00	110,25	13,51	12
	1%	203,44	272,87	215,47	230,59	37,11	16
	2%	325,92	329,72	345,60	333,75	10,44	3

Rys. 21. Wartość parametru  $G_{oz}$  dla poszczególnych stężeń dodatków

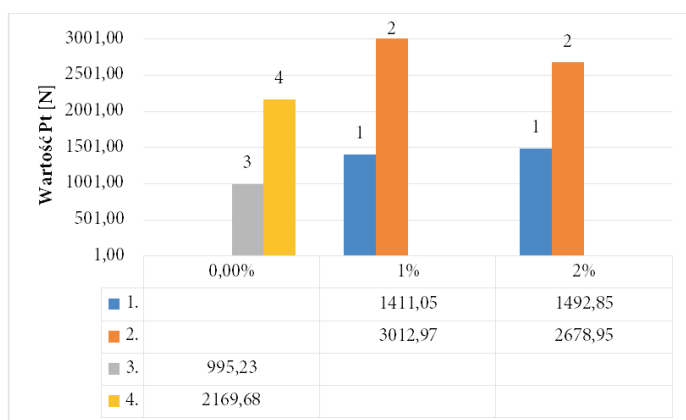
Zgodnie z wynikami zamieszczonymi w tabelach 4 i 5 oraz ich wizualizacjami przedstawionymi na rysunkach 20 i 21 można stwierdzić, że:

- wprowadzanie do bazy smaru plastycznego dodatków w ilości do 0,5% masy nie przyniosło znaczących zmian w stosunku do właściwości czystego smaru;
- dalsze zwiększanie ilości dodatków w bazie smaru (stężenia 1% i 2%) przyniosło zauważalne zmiany średnic śladów zużycia dolnych kul, przekładające się na korzystniejsze wartości parametru  $G_{oz}$ ;
- wartość zużycia oraz parametru  $G_{oz}$  dla pasty grafenowej była zbliżona do wyników próbki zawierającej 1% (m/m) heksagonalnego azotku boru — 22% poprawa w stosunku do czystej bazy smaru;
- najlepsze wyniki zostały uzyskane dla próbki zawierającej 2% GO — wartość parametru  $G_{oz}$  wzrosła o 180% w stosunku do próbki czystej bazy (wzrost o 131% dla stężenia 2% h-BN);
- w przypadku małych stężeń dodatków korzystniejszy wpływ zaobserwowano dla próbek zawierających h-BN.

TABELA 6

Wartość parametru  $P_t$  dla poszczególnych stężeń dodatków

Stężenie	Pomiar [N]			Wartość średnia [N]	Odchylenie standardowe [N]	Współczynnik zmienności [%]	
	1	2	3				
0,00%	1022,50	1002,05	961,15	995,23	31	3	
Pasta	2188,15	2091,85	2229,05	2169,68	70	3	
h-BN	1%	1451,95	1329,25	1451,95	1411,05	71	5
	2%	1411,05	1431,50	1636,00	1492,85	124	8
GO	1%	3190,20	2958,70	2863,00	3012,93	165	5
	2%	2515,35	2801,65	2719,85	2678,95	147	6

Rys. 22. Wartość parametru  $P_t$  dla poszczególnych stężeń dodatków

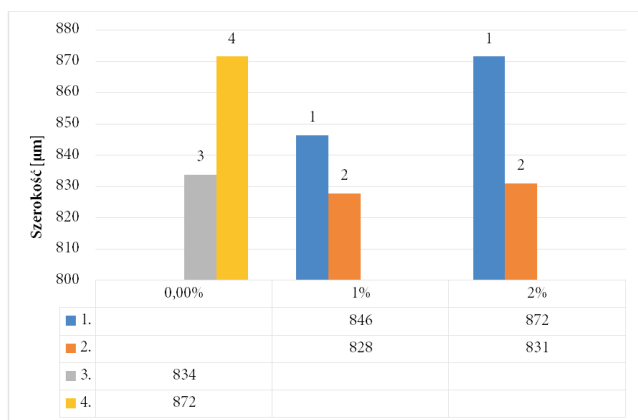
W przypadku pomiarów parametru  $P_t$  stwierdzono, że:

- wprowadzanie do bazy smaru plastycznego obu rodzaju dodatków wpłynęło na poprawę analizowanego parametru;
- najkorzystniejsze wyniki otrzymano dla próbek zawierających GO (poprawa o 203% w przypadku próbki zawierającej 1% GO i o 169% w przypadku próbki zawierającej 2% GO);
- wyniki otrzymane dla „pasty grafenowej” były lepsze niż dla próbek zawierających h-BN, ale gorsze niż dla próbek zawierających GO.

TABELA 7

Wyniki pomiarów średnic śladów zużycia dolnych kul dla parametru  $p_{oz}$

Stężenie	Pomiar [ $\mu\text{m}$ ]			Wartość średnia [ $\mu\text{m}$ ]	Odchylenie standardowe [ $\mu\text{m}$ ]	Współczynnik zmienności [%]	
	1	2	3				
0,00%	815	840	846	834	16	2	
Pasta	841	879	895	872	27	3	
h-BN	1%	822	847	870	846	24	3
	2%	841	879	895	872	27	3
GO	1%	844	843	797	828	27	3
	2%	809	851	833	831	21	3

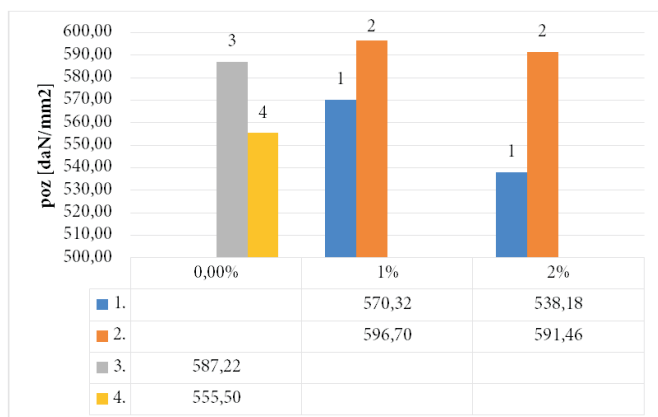


Rys. 23. Średnice śladów zużycia na kulach dla poszczególnych stężeń dodatków do oceny parametru  $p_{oz}$

TABELA 8

Wartość parametru  $p_{oz}$  dla poszczególnych stężeń dodatków

Stężenie	Pomiar [daN/mm <sup>2</sup> ]			Wartość średnia [daN/mm <sup>2</sup> ]	Odchylenie standardowe [daN/mm <sup>2</sup> ]	Współczynnik zmienności [%]	
	1	2	3				
0,00%	613,61	577,92	570,12	587,22	23,19	4	
Pasta	569,26	559,54	537,70	555,50	16	3	
h-BN	1%	603,69	567,99	539,27	570,32	32,27	6
	2%	576,33	528,41	509,79	538,18	34,33	6
GO	1%	573,15	574,44	642,51	596,70	39,68	16
	2%	623,79	563,34	587,24	591,46	30,45	3



Rys. 24. Wartość parametru  $p_{oz}$  dla poszczególnych stężeń dodatków

Na podstawie rysunków 23 i 24 oraz danych z tabeli 8 można stwierdzić, że:

- próbki zawierające h-BN charakteryzowały się gorszymi wartościami badanego parametru w stosunku do próbki czystej bazy smaru (spadek o 3% dla stężenia 1% h-BN i spadek o 8% dla stężenia 2% h-BN);
- wyniki uzyskane dla „pasty grafenowej” były gorsze o 5% w stosunku do czystej bazy smaru;
- próbki zawierające GO charakteryzowały się nieznacznie lepszą wartością badanego parametru (wzrost o 2% dla stężenia 1% GO i wzrost o 1% dla stężenia 2% GO).

Na odwrócenie tendencji zmian  $p_{oz}$  w stosunku do  $P_t$ , w przypadku azotku boru, mogło mieć wpływ łatwiejsze odwirowanie cząstek h-BN, m.in. ze względu na jego 10-krotnie większą gęstość od GO, podczas narastającego nadal płynnie obciążenia po przekroczeniu  $P_t$ . Znacznie mniejsze objawy tego typu wykazał także GO. Innymi słowy, GO wykazał się większą odpornością na zacieranie w warunkach badań na aparacie czterokulowym. Wyniki otrzymane dla próbek „pasty grafenowej” są, podobnie jak w przypadku parametru  $G_{oz}$ , zbliżone do wyników otrzymanych dla próbki zawierającej 1% h-BN.

## 8.2. Uniwersalny mikronotester UNMT

W celu uzupełnienia wyników badań otrzymanych na aparacie czterokulowym podjęto dodatkowe testy na mikronotesterze UNMT. Charakterystyka warunków badań została przedstawiona w tabeli 9. Obciążenie zostało tak dobrane, aby zadane naciski jednostkowe ( $5323,6 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$ ) w strefie styku kulki z płytką były bliskie naciskom zastosowanym w ocenie parametru  $G_{oz}$  na aparacie czterokulowym ( $5352,6 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$ ) [19].

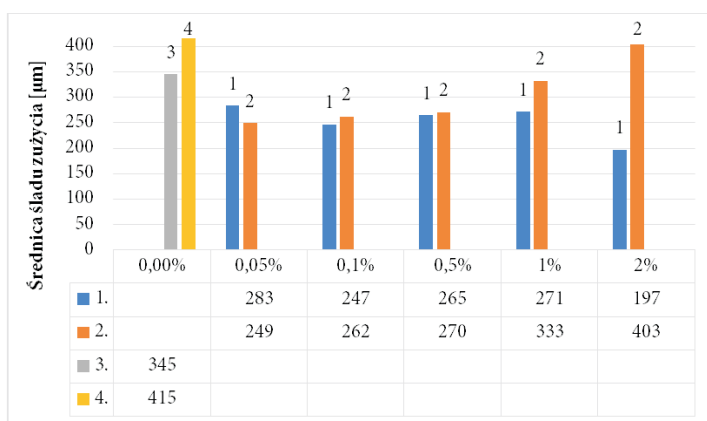
Wyniki badań na uniwersalnym mikronotesterze UNMT zostały przedstawione na rysunkach:

- rys. 25 — średnica śladów zużycia na kuli,
- rys. 26 — szerokość śladów zużycia na płytce wzorcowej,
- rys. 27 — uśrednione wartości współczynnika tarcia, zmierzone w okresie ustabilizowanego ruchu, dla próbek zawierających GO i h-BN,
- rys. 28 — przebiegi wartości współczynników tarcia dla wybranych próbek w czasie całego testu.

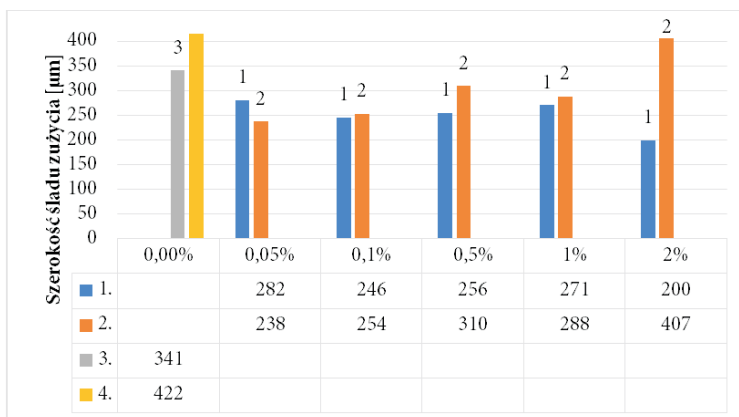
TABELA 9

Parametry testów na zestawie UNMT

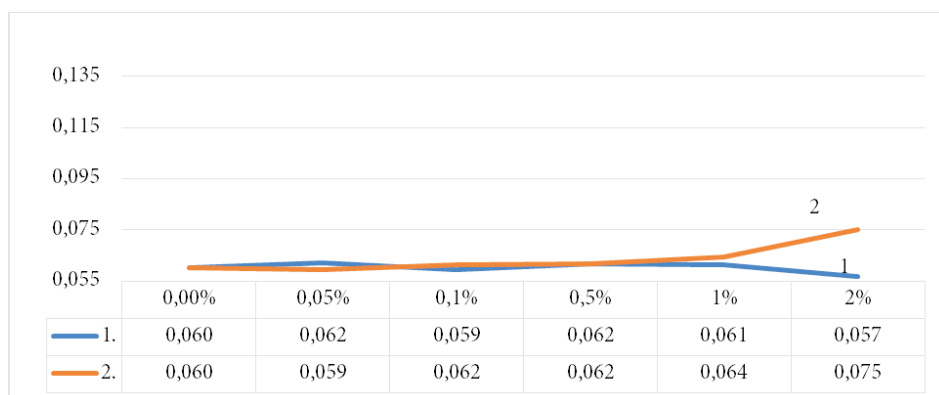
Parametr	Jednostka	Wartość
Rodzaj ruchu	-	posuwisto-zwrotny
Obciążenie/ naciski	[N] / [MN*m <sup>-2</sup> *s]	150/5323,6
Amplituda	mm	1
Częstotliwość	Hz	25
Całkowita liczba cykli	-	22 500
Prędkość liniowa	mm/s	50
Czas trwania	min	15



Rys. 25. Średnica śladów zużycia na kulach dla poszczególnych stężeń



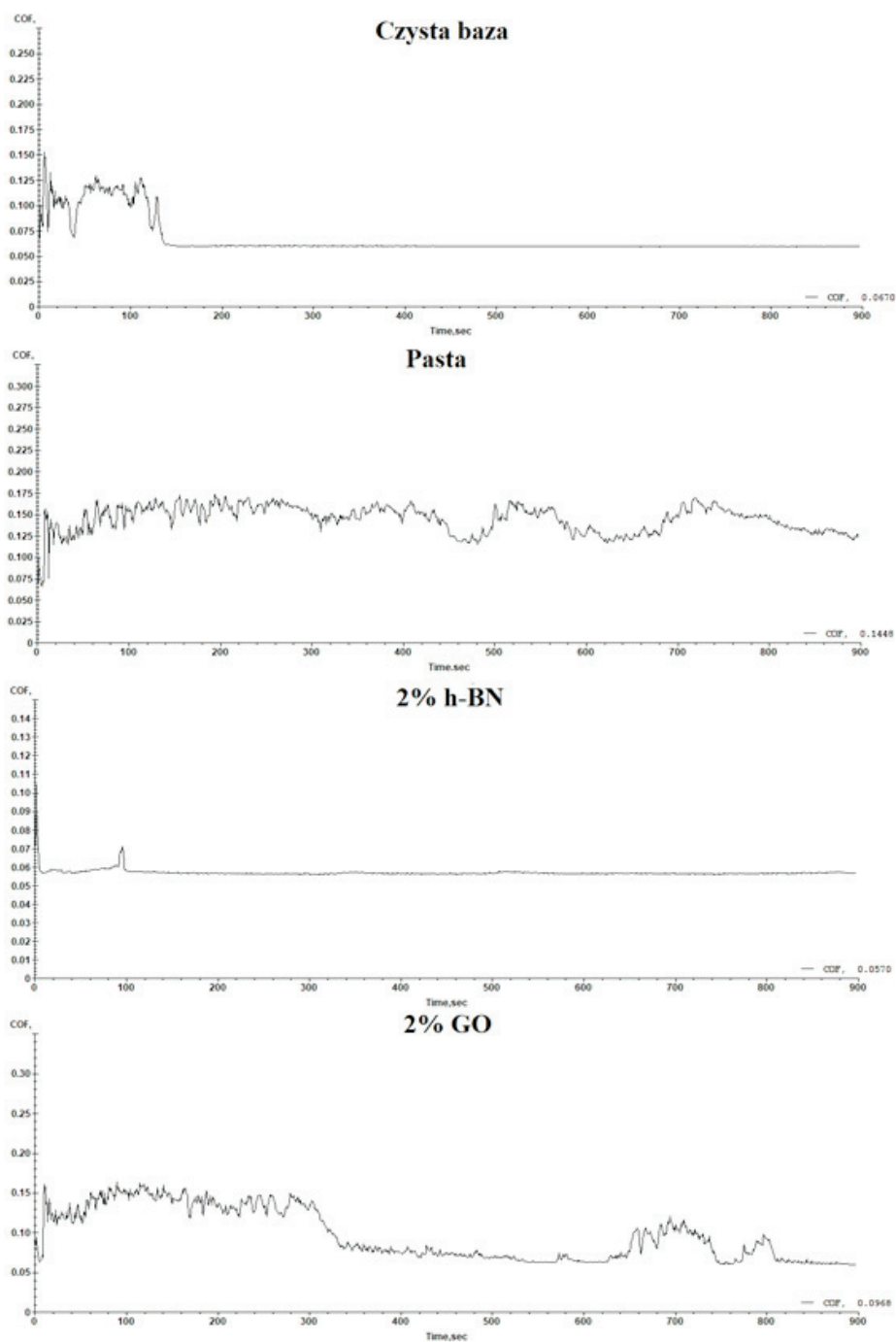
Rys. 26. Szerokość śladu zużycia na płytce dla poszczególnych stężeń



Rys. 27. Wartość współczynnika tarcia dla poszczególnych stężeń obu dodatków

Zgodnie z wynikami przedstawionymi na rysunkach 25÷28 należy stwierdzić, że:

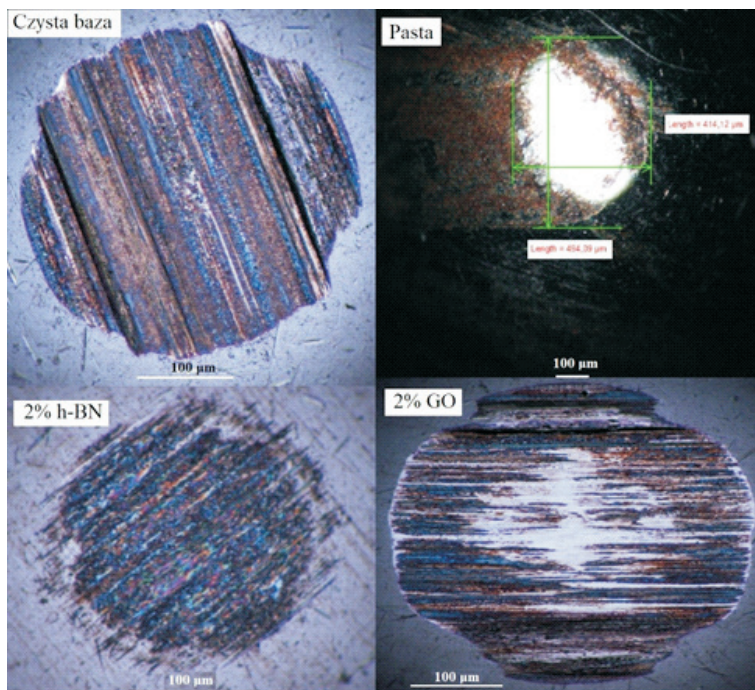
- wprowadzanie do bazowego smaru każdej ilości h-BN przyczyniło się do zmniejszenia średnicy śladu zużycia na kuli, z czego najkorzystniejsze wyniki otrzymano dla próbki zawierającej 2% h-BN (spadek o 43% w stosunku do czystej bazy);
- wprowadzanie do bazowego smaru GO w ilości do 0,5% przynosiło podobny efekt, jednak dalsze zwiększanie zawartości GO w próbce wpłynęło na zwiększenie średnicy śladu zużycia na kuli;
- najlepsze wyniki zostały otrzymane dla próbek zawierających 2% GO (zwiększenie średnicy śladu zużycia kuli o 17% w stosunku do próbki czystego smaru oraz zwiększenie szerokości zużycia płytki o 19%) oraz dla „pasty grafenowej” (zwiększenie średnicy śladu zużycia kuli o 20% w stosunku do próbki czystego smaru oraz zwiększenie szerokości zużycia płytki o 24%);
- wprowadzanie do bazowego smaru dowolnego dodatku do stężenia 1% nie przynosiło zauważalnych zmian wartości współczynnika tarcia w stosunku do czystej bazy smaru, jednak zwiększanie zawartości h-BN do 2% dało nieznaczną poprawę (spadek współczynnika tarcia o 6%), a w przypadku GO pogorszenie (wzrost współczynnika o 25%);
- wartość współczynnika tarcia w trakcie testu była najstabilniejsza dla próbki zawierającej 2% h-BN oraz dla czystej bazy smaru, natomiast w przypadku próbek zawierających tlenek grafenu wartość ta ulegała ciągłym zmianom, co jest szczególnie widoczne w przypadku „pasty grafenowej”.



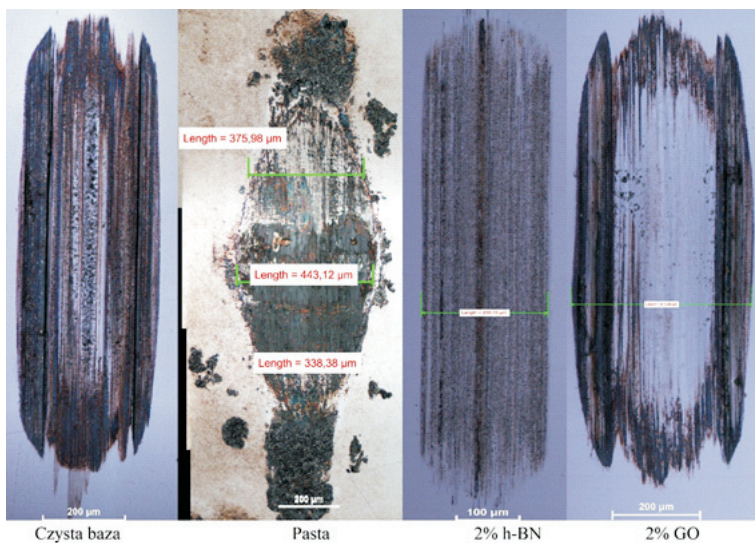
Rys. 28. Przebieg współczynnika tarcia dla wybranych próbek w czasie całego testu



Na rysunkach 29 i 30 przedstawiono ślady zużycia na kulach oraz płytkach wzorcowych dla wybranych próbek.



Rys. 29. Ślady zużycia kul dla wybranych próbek



Rys. 30. Szerokość śladów zużycia dla wybranych próbek

Porównując ze sobą średnicę skaz zużycia kul (rys. 29) oraz płytki wzorcowej (rys. 30), można zauważyć, że próbka smaru zawierająca 2% GO pozostawiła prawie dwukrotnie większe ślady zużycia ściernego niż próbka zawierająca 2% h-BN. Dodatkowo, na rysunku 29 można zauważyć zwiększenie rys na płytce na skrajnych bokach śladu, co może oznaczać wyciśnięcie z punktu styku tlenku grafenu, który uległ aglomeracji i przyczynił się do zwiększenia szerokości śladu. Ślad zużycia płytki dla próbki zawierającej „pastę grafenową” wyróżniał się na tle pozostałych próbek kształtem oraz pojawieniem się oznak korozji.

## 9. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

- W przypadku pomiarów parametru  $G_{oz}$  stwierdzono, że wprowadzanie dodatków do stężenia 0,5% nie powoduje istotnych zmian śladów zużycia kul. Natomiast dla stężeń 1% i 2% GO i h-BN widoczne było wyraźne zmniejszenie średnic skaz zużycia, oznaczające zwiększenie parametru  $G_{oz}$ . Wyniki otrzymane dla „pasty grafenowej” były zbliżone do wyników dla próbek zawierających 1% h-BN, a najlepsze, w stosunku do czystej bazy smaru, otrzymano dla próbki zawierającej 2% GO;
- W przypadku pomiarów parametru  $P_t$  próbki zawierające GO oraz próbka „pasty grafenowej” wykazały się znacznie lepszymi wynikami w stosunku do próbek zawierających h-BN;
- W przypadku pomiarów parametru  $p_{oz}$  również otrzymano korzystniejsze wyniki dla próbek zawierających GO oraz dla próbki „pasty grafenowej”;
- W przypadku pomiarów średnic skaz zużycia kul oraz szerokości zużycia płytek wzorcowych na uniwersalnym mikronanotesterze UNMT stwierdzono, że do stężenia 0,5% obu dodatków zużycie tylko nieznacznie się zmniejszyło w stosunku do czystej bazy, natomiast przy stężeniach 1% i 2% korzystniejsze wyniki otrzymano dla próbek zawierających h-BN. Interesujące, że dla próbek zawierających znaczne ilości tlenku grafenu (2%, „pasta grafenowa”) ślady zużycia kul i płytki były większe niż dla czystej bazy smaru;
- W przypadku pomiarów wartości współczynnika na uniwersalnym mikronanotesterze UNMT stwierdzono, że wprowadzanie GO oraz h-BN do stężenia 1% nie powoduje widocznych różnic zmian tego parametru, jednak przy stężeniu 2% próbka zawierająca GO wykazała zwiększenie wartości współczynnika tarcia, w przeciwieństwie do próbki zawierającej h-BN, w przypadku której wartość współczynnika tarcia zmniejszyła się. Dodatkowo, przebiegi współczynnika tarcia w czasie trwania całego testu dla próbek zawierających znaczne ilości tlenku grafenu (2%, „pasta grafenowa”) były bardzo niestabilne;

- Wyniki uzyskane dla próbek zawierających stosunkowo dużą zawartość tlenku grafenu (2% (m/m) GO, „pasta grafenowa”) wykazywały poprawę właściwości tribologicznych w przypadku testów dla ruchu obrotowego, jednak były one zdecydowanie gorsze dla testów dla ruchu posuwisto-zwrotnego, co może wynikać z tworzenia się aglomeracji cząstek grafenu wzmagających rysowanie współpracujących powierzchni.

Trzeba zwrócić uwagę, że przeprowadzone badania mają charakter wstępny (z powodu zbyt małych ilości posiadanego GO), a otrzymane wyniki są obarczone niepewnością pomiarową, dlatego też należy zrealizować większą liczbę szczegółowych badań na różnych tribotesterach i przy różnej, także zwiększonej, zawartości GO. Badania takie są zaplanowane i będą realizowane w najbliższym czasie, łącznie z testami stanowiskowymi łożysk tocznych. Bardzo ważne jest także zbadanie wpływu zawartości GO na inne normatywne właściwości smaru plastycznego.

Źródło finansowania badań — dofinansowanie z Działu Spraw Studenckich Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.03.2019 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 16.05.2019.

Igor Dąbrowski <https://orcid.org/0000-0002-3937-9623>

Krzysztof Gocman <https://orcid.org/0000-0002-6515-7178>

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

## LITERATURA

- [1] ALEKSANDRZAK M., *Badania nad syntezą i funkcjonalizacją grafenu i tlenku grafenu*, (rozprawa doktorska), Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin 2015.
- [2] BERMAN D., ERDEMIR A., SUMANT A.V., *Graphene: a new emerging lubricant*, *Materials Today*, no. 1, 2014, pp. 31-42.
- [3] CHMIELEWSKI M., *Właściwości tribologiczne kompozytów Cu-C zawierających grafen, nanorurki i nanoproszek grafitu*, *Tribologia*, nr 5, 2014, s. 45-56.
- [4] DĄBROWSKA A., *Grafen. Otrzymywanie, charakterystyka, zastosowanie*, Uniwersytet Warszawski, Warszawa 2016.
- [5] DĄBROWSKA E., *Zastosowanie tlenku grafenu i grafenu w technologii diod laserowych*, *Przegląd Elektrotechniczny*, Wydawnictwo SIGMA NOT, nr 9, 2015, s. 202-211.
- [6] DĄBROWSKI I., *Badanie właściwości smarnościowych smaru plastycznego z dodatkiem grafenu*, (praca dyplomowa), Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2018.
- [7] DĄBROWSKI I., NOGAS P., KAŁDOŃSKI T., NASIŁOWSKA B., DJAS M., *Zastosowanie materiałów grafenowych w tribologii – analiza stanu zagadnienia i badania wstępne*, *Biuletyn WAT*, vol. 68, nr 2, 2019, s. 81-108.
- [8] D'AGOSTINO V., *Graphene Oxide Nanosheets as Effective Friction Modifier for Oil Lubricant: Materials, Methods, and Tribological Results*, Hindawi Publishing Corporation, ISRN Tribology, vol. 2013, pp. 1-8.

- [9] DASARI B., NOURI J., BRABAZON D., NAHER S., *Graphene and derivatives – synthesis techniques, properties and their energy applications*, Energy, 2017, pp. 766-778.
- [10] DOU X., KOLTONOW A.R., HE X., JANG H.D., WANG Q., CHUNG Y., HAUNG J., *Self-dispersed crumpled graphene balls in oil for friction and wear reduction*, Proceedings of the National Academy of Sciences, January 2016, pp. 1528-1533.
- [11] GIEMZA B., *Badania i modelowanie charakterystyk eksploatacyjnych porowatych łożysk ślizgowych impregnowanych smarami plastycznymi*, (rozprawa doktorska), Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2007.
- [12] GOMEZ C.V., *Structural and electronic properties of graphene oxide for different degree of oxidation*, Materials Today: Proceedings, vol. 3, iss. 3, 2016, pp. 796-802.
- [13] GUO Y., ZHANG S., *The tribological Properties of Multi-Layered Graphene as Additives of PAO 2 Oil in Steel-Steel Contacts*, Lubricants, no 4, 2016, pp. 30-42.
- [14] HEBDA M., *Grafen – materiał przyszłości*, Czasopismo Techniczne, Mechanika, zesz. 22, 8-M/2012, s. 46-53.
- [15] HENKER B., MYALSKI J., *Wpływ dodatków węglowych na właściwości tribologiczne kompozytów spiekanych na podstawie aluminiowej*, Tribologia, nr 5, 2015, s. 29-40.
- [16] HUCZKO A., DĄBROWSKA A., KURCZ M., *Grafen. Otrzymywanie, charakterystyka, zastosowania*, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2016.
- [17] JANG H., *Self-dispersed crumpled graphene balls in oil for friction and wear reduction*, PNAS, February 9/2016, vol. 113, no. 6, pp. 152-33.
- [18] KAŁDOŃSKI T., *Tribologiczne zastosowania azotku boru*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2013.
- [19] KAŁDOŃSKI T.J., *Badania i ocena alkoksymetyloimidazolowych cieczy jonowych jako nowych smarów dla stalowych węzłów tribologicznych*, (rozprawa doktorska), Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2012.
- [20] KINOSHITA H., *Tribological properties of monolayer graphene oxide sheets as water-based lubricant additives*, Carbon, 66, 2014, pp. 720-723.
- [21] KRASODOMSKI W., KRASODOMSKI M., SKIBIŃSKA A., MAZELA W., *Nanocząstki węglowe w środkach smarowych. Część I – stan wiedzy*, Nafta – Gaz, nr 3, 2014, s. 186-191.
- [22] MURA A., CURA F., ADAMO F., *Evaluation of graphene compound as lubricant for spline couplings*, Tribology International, no 117, 2018, pp. 162-167.
- [23] NOGAS P., *Badanie właściwości smarnościowych oleju z dodatkiem grafenu*, (praca dyplomowa), Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2018.
- [24] PAPAGEORGIOU D.G., *Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites*, Progress in Materials Science, 90, 2017, pp. 75-127.
- [25] PARTOEMS B., PEETERS F.M., *From graphene to graphite: Electronic structure around the K point*, Physical Review B 74, 2006, pp. 1-11.
- [26] RAO C.N.R., *Graphene. Synthesis, Properties and Phenomena*, Wiley-VCH, Singapore 2013.
- [27] SENYK S., *Ocena właściwości smarnościowych olejów przekładniowych zawierających heksagonalny azotek boru*, (praca dyplomowa), Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2018.
- [28] SMĘDOWSKI Ł., *Grafen – metody otrzymywania a zastosowanie i właściwości*, Karbo, 2013, s. 79-87, [https://www.researchgate.net/publication/281816720\\_Grafen\\_\\_metody\\_otrzymywania\\_a\\_zastosowanie\\_i\\_wlasciwosci](https://www.researchgate.net/publication/281816720_Grafen__metody_otrzymywania_a_zastosowanie_i_wlasciwosci), [dostęp: 22.08.2018 r.].
- [29] ŚWIERCZ R., *Grafen – kierunki rozwoju, zastosowanie*, Mechanik, nr 12, 2015, s. 67-69, [http://www.mechanik.media.pl/pliki/do\\_pobrania/artykuly/22/15\\_67\\_70.pdf](http://www.mechanik.media.pl/pliki/do_pobrania/artykuly/22/15_67_70.pdf), [dostęp: 22.08.2018 r.].

- [30] WRÓBLEWSKI E., BABIAK M., ISKRA A., *Innowacyjne zastosowanie grafenu w konstrukcji silników spalinowych w aspektach redukcji tarcia oraz zużycia paliwa*, *Ekonomika Transportu i Logistyka*, nr 74, 2017, s. 457-466.
- [31] ZIN V., *Improved Tribological and Thermal Properties of Lubricants by Graphene Based Nano-additive*, *RSC Advances*, January 2016, pp. 59477-59485.
- [32] ŻELECHOWSKA K., *Nanotechnologia w praktyce*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.
- [33] *Karta charakterystyki tlenku grafenu GO*, [http://www.itme.edu.pl/media/offer/Karta\\_informacyjna\\_GO\\_proszek.pdf](http://www.itme.edu.pl/media/offer/Karta_informacyjna_GO_proszek.pdf), [dostęp: 13.09.2018 r.].
- [34] <http://graphenewholesale.com/graphene-structure/>, [dostęp: 13.09.2018 r.].
- [35] <http://tirupatigraphite.co.uk/structure-and-properties>, [dostęp: 13.09.2018 r.].
- [36] <https://universe-review.ca/I13-16-GHstructure.png>, [dostęp: 13.09.2018 r.].
- [37] [https://www.researchgate.net/publication/258712674\\_Semiconducting\\_hexagonal\\_boron\\_nitride\\_for\\_deep\\_ultraviolet\\_photonics/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/258712674_Semiconducting_hexagonal_boron_nitride_for_deep_ultraviolet_photonics/figures?lo=1), [dostęp: 10.10.2018 r.].

I. J. DĄBROWSKI, K. GOCMAN, T. KAŁDOŃSKI

#### **Tribological properties of grease containing graphene oxide or hexagonal boron nitride**

**Abstract.** The purpose of this paper is to present the results of research of tribological behavior of basic greases (of 2. NLGI class) including different mass concentration concentration (0.05%, 0.1%, 0.2%, 0.5%, 1%, 2%) of additives: graphene oxide (produced by the Institute of Electronic Materials Technology, Warsaw) and hexagonal boron nitride (produced by the Military University of Technology, Warsaw). In the first part of this publication there is elementary information about graphene and its applications, especially in tribological field. The next part of the paper contains the results of research on the mentioned above samples, which were investigated with four-ball apparatus T-02 and Universal Micro/Nano Tester UNMT (CETR, CA, USA), at the Department of Tribology and Service Fluids Logistics at the Faculty of Mechanical Engineering, Military University of Technology. The results proved a positive effect of adding graphene oxide or hexagonal boron nitride to basic grease on its tribological properties. In case of "water dispersion of graphene oxide", its tribological properties were similar to the samples including significant concentration of GO.

**Keywords:** graphene, grease, graphene oxide, hexagonal boron nitride

**DOI:** 10.5604/01.3001.0013.5556

