

Wojciech Krasodomski, Anna Rembiesa-Śmiszek, Agnieszka Skibińska
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Nanocząstki w środkach smarowych

Wstęp

Współczesne trendy w zakresie jakości środków smarowych, związane z szybkim rozwojem różnych gałęzi przemysłu, wskazują na konieczność stosowania nowoczesnych środków smarowych. Dodatki poprawiające właściwości tribologiczne środków smarowych zapewniają niezawodność działania urządzeń mechanicznych, co wiąże się ze zmniejszeniem energochłonności procesów tribologicznych i poprawą funkcjonowania urządzeń przemysłowych. W tym celu coraz częściej wykorzystywane są nanocząstki, gdyż modyfikacja składu środków smarowych nanocząsteczkami jest jedną z potencjalnych możliwości poprawy ich jakości.

Nanotechnologia jest obecnie jednym z najintensywniej rozwijających się kierunków badań, a jej najszybszy rozwój obserwowany jest w Stanach Zjednoczonych, czego uzasadnieniem jest skupienie największego potencjału finansowego na tamtym obszarze. Początkowy rozwój nanotechnologii rozpoczął się w momencie wynalezienia tunelowego mikroskopu skaningowego, jednak nanomateriały znane były już dużo wcześniej. Jednym z najpopularniejszych i łatwo dostępnych nanometaliałów jest sadza, od lat powszechnie używana jako wypełniacz mieszanek gumowych, stosowanych do produkcji opon.

Nanomateriały znajdują liczne zastosowania w różnych dziedzinach nauki. Wykazują one niejednokrotnie inne, specyficzne właściwości niż ich odpowiedniki w skali makro. Wyjątkowe właściwości nanostruktur powodują ciągle zwiększanie ich produkcji, z czym związane jest powiększenie skali ich stosowania w różnych dziedzinach przemysłowych [5, 10], np. w elektronice czy przemyśle kosmetycznym.

Nanotechnologia dzieli się na wiele szczegółowych obszarów, wśród których można wyróżnić nanotribologię. W ostatnich latach prowadzone były badania nad za-

stosowaniem nanocząstek jako komponentów środków smarowych w celu poprawy ich właściwości tribologicznych. Z nielicznych publikacji wynika, że najczęściej podejmowane były próby wprowadzania nanokomponentów do syntetycznych olejów polialfaolefinowych (PAO) oraz do olejów mineralnych [13].

Istotnym problemem eksploatacji środków smarowych jest poprawa właściwości przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych. W przeciwdziałaniu nadmiernemu zużyciu istotne są nie tylko odpowiedni dobór materiałów konstrukcyjnych, właściwa obróbka powierzchniowa oraz sposób smarowania, ale również właściwy dobór środka smarowego o odpowiednich parametrach [8]. Urządzenia przemysłowe pracujące w trudnych warunkach wymagają stosowania środków smarowych odpornych na wysokie temperatury i ciśnienia. W ekstremalnych warunkach (wysokich ciśnieniach i temperatury) może dojść do przzerwiania ciągłości filmu smarowego, a tym samym do uszkodzenia smarowanych powierzchni.

Zwiększenie trwałości filmu smarowego w węźle tarcia wymaga doskonalenia materiałów smarowych i prawidłowego ich doboru. Zastosowanie dodatków przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych umożliwia zwiększenie trwałości filmu smarowego. Trwałość warstwy smarującej określana jest na podstawie badań tribologicznych [8].

Dotatki przeciwzatarciowe zapobiegają nadmiernemu zużyciu i zespawaniu elementów trących, które ma miejsce w chwili pojawienia się ekstremalnie dużych obciążeń. Tradycyjne dodatki przeciwzużyciowe zawierają w swoim składzie atomy siarki oraz związki siarkowo-chlorowe czy siarkowo-fosforowe, które w trudnych warunkach, reagując chemicznie z podłożem metalicznym, tworzą warstwę chroniącą przed nadmiernym zużyciem (siarczki, fos-

forki i chlorki). Związki te mają mniejszą niż metale wytrzymałość na ścinanie, przez co przeciwdziałają szepieniu adhezyjnemu powierzchni tarcia (zespawaniu) [2, 14].

Dodatkami przeciwzużyciowymi, których zadaniem jest zmniejszenie zużycia powierzchni trących przy umiarkowanych obciążeniach, są np. ditiofosforany metali. Wysokopolarne cząsteczki dodatków adsorbują się na powierzchni tarcia, zapobiegając kontaktowi metal–metal, przez co uzyskuje się zmniejszenie zużycia. Najczęściej stosowane są dialkilditiofosforany cynku i siarkowane węglowodory. Stężenie tych dodatków w oleju mineralnym mieści się w przedziale 0,5÷8,0% (*m/m*) [11].

Obecnie na świecie, w początkowej fazie badań, prowadzone są próby zastosowania nanocząstek jako dodatków smarnych [13]. Nieliczne badania wykazują, że umożliwia to zwiększenie trwałości filmu smarowego. Najczęściej w badaniach nad poprawą właściwości tribologicznych środków smarowych wykorzystywane są nanocząst-

ki metali, tlenków metali, pierwiastków ziem rzadkich lub siarczki metali [15].

Wybór do zastosowania w środkach smarnych nanocząstek, celem poprawy charakterystyk tribologicznych, związany jest z ich charakterystycznymi właściwościami fizykochemicznymi, np. wysoką aktywnością powierzchniową. Tworzenie powłok ochronnych na współpracujących ze sobą powierzchniach jest możliwe dzięki małym wymiarom cząstek. Nanocząstki w oleju tworzą układy koloidalne typu zole, co jest jedną z ich najważniejszych właściwości w kontekście zastosowania ich jako dodatków poprawiających właściwości tribologiczne olejów. Wytworzenie koloidalnej dyspersji typu zol jest możliwe dzięki pokrywaniu nanocząstek metali związkami powierzchniowo czynnymi. Są to substancje organiczne zbudowane z polarnej grupy i łańcucha alkilowego. Jego odpowiednia długość i struktura umożliwiają właściwe zdyspergowanie nanocząstek w oleju i tym samym wytworzenie układu koloidalnego typu zol.

Mechanizmy działania nanocząstek

Nanocząstki mogą wpływać na przebieg procesów tarcia według mechanizmu ich bezpośredniego oddziaływania na poprawę właściwości tribologicznych, zgodnie z którym nanocząstki zachowują się jak kulki łożyskowe lub tworzą na powierzchni tarcia warstewki graniczne. Drugi mechanizm zakłada, że ubytki materiału w wyniku tarcia są kompensowane przez nanocząstki [6].

Zastosowanie nanocząstek metali jako komponentów środków smarowych jest uzasadnione nie tylko ze względu na ich zdolności do obniżenia współczynnika tarcia lub redukcji zużycia. Oddziaływanie metali miękkich (miedzi) z powierzchniami w węzłach tarcia oparte jest głównie na zjawiskach adhezji i dyfuzji. Ponadto nanocząstki związków metali są odporne na działanie wysokiej temperatury, co umożliwia stosowanie takich środków smarowych w wysokich temperaturach [3, 9].

Nanostruktury miedzi i jej stopów wykazują doskonałe właściwości przeciwzużyciowe i przeciwzatarciowe. Hipotezy dotyczące mechanizmu działania nanocząstek miedzi jako dodatków do środków smarowych zakładają dwa możliwe mechanizmy: nanocząstki miedzi zachowują się jak kulki w łożyskach lub tworzą mikrofilm na powierzchni metalu. Prawdopodobnie mikrofilm tworzy się w wyniku lokalnego wzrostu temperatury w trakcie zachodzenia procesu tarcia. Na podstawie przeprowadzonych testów tribologicznych wykazano, że nanocząstki miedzi w warunkach podwyższonej temperatury poprawiają właściwości przeciwzużyciowe i przeciwzatarcio-

we środków smarnych. Film, który tworzą nanocząsteczki miedzi na powierzchni metalu powoduje, że powierzchnie trące nie mają ze sobą bezpośredniego kontaktu, co skutkuje mniejszym zużyciem materiału [1, 13].

W przypadku zastosowania jako modyfikatorów tarcia nanocząstek niklu stwierdzono, że mają one pozytywny wpływ na poprawę właściwości tribologicznych olejów smarowych [3].

Natomiast aplikacja nanocząstek tlenku cynku do oleju syntetycznego wykazuje, że nie poprawiają one właściwości przeciwzużyciowych badanego oleju, wykazują natomiast poprawę właściwości przeciwzatarciowych przy najmniejszym z wytypowanych stężeń wagowych, równym 0,3% (*m/m*) [2].

Znanym z literatury przykładem nanocząstek poprawiających właściwości tribologiczne środków smarowych są nanostruktury pochodzenia węglowego, takie jak np. fulereny. Fulereny są odmianą alotropową czystego węgla występującego w formie cząsteczkowej. Mają one przestrzenną strukturę i składają się z parzystej liczby atomów węgla, tworząc zamkniętą, pustą w środku bryłę. Z danych przedstawionych w literaturze wynika, że fulereny zdyspergowane w oleju mineralnym poprawiają jego charakterystykę tribologiczną – zmniejszają współczynnik tarcia w stosunku do czystego oleju. Im większa zawartość fulerenów w oleju, tym mniejszy jest współczynnik tarcia [7].

Innymi nanostrukturami zaliczanymi do grupy fulerenów są nanocebulki węglowe. Zbudowane są one z hek-

sagonalnych monowarstw grafitowych w nanometrycznej skali. Odległość pomiędzy poszczególnymi powłokami jest podobna jak w graficie. Otrzymywane są one podczas poddawania materiału węglowego przekształceniom w warunkach wysokich temperatur i ciśnienia, a także na drodze przekształcenia nanorurek węglowych w wyniku

działania wysokiego ciśnienia. Z nielicznych publikacji wynika, że nanocebulki węglowe zdyspergowane w oleju syntetycznym mają lepsze właściwości tribologiczne niż grafit. Ponadto nanocebulki węglowe, ze względu na ich nanometryczne rozmiary, łatwiej można zdyspergować w oleju [12].

Badania laboratoryjne

Porównywano trzy grupy uszlachetnionych smarów i olejów:

- produkty zawierające dodatki: A – dodatek smarny, na bazie siarkowanych kwasów tłuszczowych i estrów kwasów tłuszczowych, B – dodatek smarny z siarką aktywną, C – dodatek przeciwzużyciowy, pochodzący z dialkiloditiofosforanu cynku, poprawiający właściwości tribologiczne;

- smary zawierające klasyczne cząstki stałe, tj. tlenek cynku, tlenek glinu, tlenek miedzi i grafit;
- próbki smarów z dodatkiem nanocząstek tlenków metali, jak również produkty zawierające wielościenne nanorurki węglowe.

Próbki smarów do badań przygotowano sporządzając dyspersje nanocząstek oraz analogicznych dodatków o konwencjonalnych rozmiarach w typowym smarze li-

Tablica 1. Próbki smarów z dodatkami konwencjonalnymi

Próbka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16	17	18	19	20	21
	[% (m/m)]														
Smar litowy	100	98	98	98	95	99	98	97	96,5	99	95	99	95	99	95
Dodatek A	–	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Dodatek B	–	–	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Dodatek C	–	–	–	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Grafit CR 2	–	–	–	–	5	1	2	3	3,5	–	–	–	–	–	–
Tlenek cynku	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	5	–	–	–	–
Tlenek glinu	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	5	–	–
Tlenek miedzi	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	5

Tablica 2. Obciążenie zespawania dla próbek smarów

Próbka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	16	17	18	19	20	21
Obciążenie zespawania [kG]	126	200	500	200	160	200	200	200	200	126	200	126	160	126	200

Tablica 3. Próbki smarów z nanocząsteczkami

Próbka	10	11	12	13	14	15	22	23	24	25	26
	[% (m/m)]										
Smar litowy	99	95	99	95	99	95	99	98	97	96,5	95
Nanotlenek cynku	1	5	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Nanotlenek glinu	–	–	1	5	–	–	–	–	–	–	–
Nanotlenek miedzi	–	–	–	–	1	5	–	–	–	–	–
Wielościenne nanorurki węglowe	–	–	–	–	–	–	1	2	3	3,5	5

Tablica 4. Obciążenie zespawania dla próbek smarów

Próbka	10	11	12	13	14	15	22	23	24	25	26
Obciążenie zespawania [kG]	160	160	160	160	160	200	160	200	200	250	315

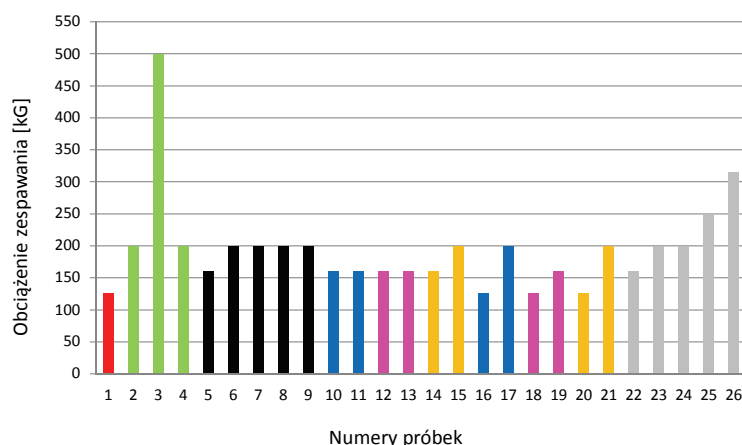
towym, przy użyciu mieszadła mechanicznego w podwyższonej temperaturze.

Skład próbek smarów przedstawiono w tablicach 1 i 3.

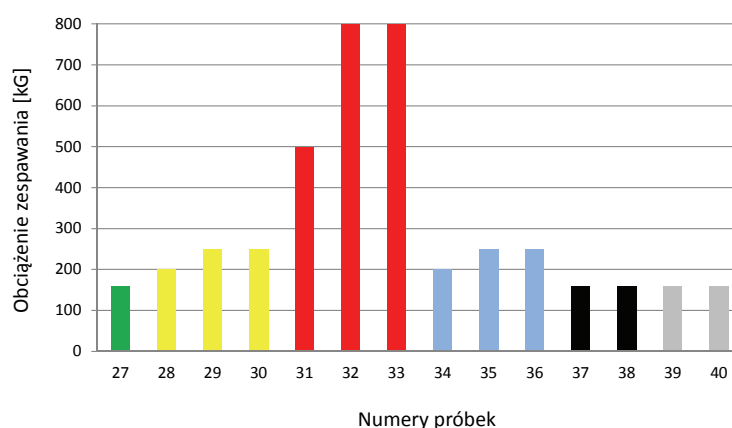
W celu porównania właściwości smarnych otrzymanych smarów wszystkie próbki poddano badaniu na aparacie czterokulowym firmy Stanhope Seta. Badania właściwości smarnych wykonywano zgodnie z normą PN-C-04147:1976. Wyniki badań umieszczono w tablicach 2 i 4 oraz na rysunku 1.

Następnie przygotowano próbki olejowe, sporządzając dyspersje oleju SAE 30/95, pochodzące z selektywnej rafinacji ropy naftowej, z dodatkami nanocząstek oraz z analogicznymi dodatkami o konwencjonalnych rozmiarach. Do wszystkich próbek wprowadzano 0,5% (*m/m*) dyspergatora (dodatek D), celem zapewnienia jednorodności podczas badania. Skład próbek smarów przedstawiono w tablicy 5.

Kolejno wszystkie próbki poddano ultrasonifikacji (zdyspergowanie nanocząstek) w następujących warunkach: całkowity czas procesu – 5 minut, praca pulsacyjna, impuls 4 s, przerwa 2 s, amplituda 60% (*m/m*), maksymalna temperatura próbki 60°C. Próbkę podczas ultrasonifikacji chłodzono w naczyniu z lodem. Otrzymane wyniki przedstawiono w tablicy 5 i na rysunku 2.



Rys. 1. Wartość obciążenia zespawania dla poszczególnych próbek smarów z nanocząsteczkami i innymi dodatkami



Rys. 2. Wartość obciążenia zespawania dla poszczególnych próbek olejów z nanocząsteczkami i innymi dodatkami

Tablica 5. Próbkę olejów z nanocząsteczkami

Próbka	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	[% (<i>m/m</i>)]													
Olej SAE 30/95	100	98	97	97	98	97	97	98	97	97	99	99,25	99,25	99,25
Dodatek A	–	2	2	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Dodatek B	–	–	–	–	2	2	2	–	–	–	–	–	–	–
Dodatek C	–	–	–	–	–	–	–	2	2	2	–	–	–	–
Grafit CR 2	–	–	0,5	–	–	0,5	–	–	0,5	–	0,5	0,25	–	–
Wielościennie nano- nurki węglowe	–	–	–	0,5	–	–	0,5	–	–	0,5	–	–	0,5	0,25
Dodatek D	–	–	0,5	0,5	–	0,5	0,5	–	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Tablica 6. Obciążenie zespawania dla próbek olejów

Próbka	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Obciążenie zespawania [kG]	160	200	250	250	500	800	800	200	250	250	160	160	160	160

Omówienie wyników badań

Z badań przeprowadzonych w aparacie czterokolumnowym wynika, że zastosowanie 1% (*m/m*) nanocząstek tlenku cynku poprawia właściwości przeciwzatarciowe smarów, w stosunku do smaru bez dodatków, o jeden stopień. Jednak zastosowanie większej ilości nanocząstek tlenku cynku wydaje się nieuzasadnione, ponieważ nie poprawia to właściwości smarnych – obciążenie zespawania dla smaru z 1% (*m/m*) i z 5% (*m/m*) nanocząstek tlenku cynku jest takie samo. Natomiast zastosowanie dodatku 1% (*m/m*) tlenku cynku o klasycznych rozmiarach nie poprawia właściwości przeciwzatarciowych smaru w stosunku do smaru bez dodatków. Z kolei zastosowanie 5% (*m/m*) tlenku cynku o klasycznych rozmiarach jest uzasadnione, ponieważ podnosi wartość obciążenia zespawania aż o dwa stopnie w stosunku do smaru bez dodatków.

W przypadku zastosowania 1% (*m/m*) nanocząstek tlenku glinu zaobserwowano poprawę właściwości przeciwzatarciowych smaru w stosunku do smaru bez dodatków o jeden stopień. Jednak zastosowanie większej ilości nanocząstek tlenku glinu wydaje się nieuzasadnione, ponieważ nie poprawia to właściwości smarnych – obciążenie zespawania dla smaru z 1% (*m/m*) i z 5% (*m/m*) nanocząstek tlenku glinu jest takie samo.

W przypadku zastosowania 1% (*m/m*) nanocząstek tlenku miedzi zaobserwowano poprawę właściwości przeciwzatarciowych smaru o jeden stopień w stosunku do smaru bazowego. Zastosowanie 5% (*m/m*) nanocząstek tlenku miedzi powoduje wzrost obciążenia zespawania o dwa stopnie w stosunku do smaru bazowego – o tyle samo co 5% (*m/m*) tlenku miedzi o rozmiarach konwencjonalnych. W tym przypadku nieuzasadnionym wydaje się stosowanie nanocząstek tlenku miedzi w ilości większej niż 1% (*m/m*). Natomiast zastosowanie 1% (*m/m*) tlenku miedzi nie poprawia właściwości przeciwzatarciowych w stosunku do smaru bazowego.

Z przeprowadzonych badań wynika, że przy stężeniach 1% (*m/m*) badane tlenki metali o rozmiarach nano dają lepsze efekty poprawy właściwości smarnych w porównaniu do konwencjonalnych tlenków metali, których zastosowanie w ilościach 1% (*m/m*) nie wpływa na zwiększenie obciążenia zespawania w stosunku do smaru bazowego bez dodatków.

W przypadku zastosowania grafitu i wielościennych nanorurek węglowych jako dodatku do smaru zaobserwowano poprawę właściwości przeciwzatarciowych w stosunku do smaru bez dodatków. Dodatek zarówno 1% (*m/m*) grafitu, jak i 1% (*m/m*) wielościennych nanorurek węglowych

podnosi wartość obciążenia zespawania o jeden stopień w stosunku do smaru bazowego.

Natomiast dodatek zarówno 2% (*m/m*) grafitu, jak i 2% (*m/m*) wielościennych nanorurek węglowych podnosi wartość obciążenia zespawania o dwa stopnie w stosunku do smaru bazowego. Dalsze zwiększanie ilości grafitu (do 3,5% (*m/m*), a nawet do 5% (*m/m*)) nie powoduje już wzrostu obciążenia zespawania. Z kolei zwiększanie ilości wielościennych nanorurek węglowych poprawia właściwości przeciwzatarciowe – ilość 3,5% (*m/m*) powoduje wzrost obciążenia zespawania o 3 stopnie, a 5% (*m/m*) o 4 stopnie w stosunku do smaru bazowego. W przypadku stosowania małej ilości, rzędu 1÷3% (*m/m*), grafitu i wielościennych nanorurek węglowych nie zaobserwowano różnic pomiędzy poziomem obciążenia zespawania. Oba dodatki podobnie wpływają na właściwości smarne. Przy poziomie dozowania 3,5÷5% (*m/m*) daje się zaobserwować różnicę na korzyść wielościennych nanorurek węglowych.

W przypadku próbek olejowych dodatek zarówno 0,5% (*m/m*) grafitu, jak i 0,5% (*m/m*) wielościennych nanorurek węglowych w oleju z 2% (*m/m*) dodatku smarnego A poprawia właściwości przeciwzatarciowe – podnosi wartość obciążenia zespawania o jeden stopień w stosunku do kompozycji bez dodatków grafitowych.

Natomiast dodatek zarówno 0,5% (*m/m*) grafitu, jak i 0,5% (*m/m*) wielościennych nanorurek węglowych w oleju z 2% (*m/m*) dodatku przeciwzużyciowego C poprawia właściwości przeciwzatarciowe – podnosi wartość obciążenia zespawania o jeden stopień w stosunku do kompozycji bez dodatków grafitowych. Dodatek zarówno 0,5% (*m/m*) grafitu, jak i 0,5% (*m/m*) wielościennych nanorurek węglowych w oleju z 2% (*m/m*) dodatku smarnego B znacznie poprawia właściwości przeciwzatarciowe – podnosi wartość obciążenia zespawania o trzy stopnie w stosunku do kompozycji bez dodatków grafitowych.

Kompozycje w oleju grafitu i wielościennych nanorurek węglowych w ilościach 0,5% (*m/m*) nie poprawiają właściwości przeciwzatarciowych. Kompozycja 2% (*m/m*) dodatku smarnego B w oleju znacznie poprawia właściwości przeciwzatarciowe w stosunku do oleju bazowego – podnosi wartość obciążenia zespawania o trzy stopnie. W przypadku zastosowania obu komponentów – 0,5% (*m/m*) dodatków grafitowych z 2% (*m/m*) dodatku smarnego zawierającego siarkę aktywną (B) – zaobserwowano synergiczne działanie tych komponentów. Uzyskano najwyższe obciążenie zespawania (800 kG), czyli wzrost o 7 stopni w stosunku do oleju bazowego.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że przy stężeniach 1% (*m/m*) badane tlenki metali o rozmiarach nanocząstek dają lepsze efekty poprawy właściwości smarnych niż konwencjonalne tlenki metali.

Zaobserwowano synergiczne działanie w oleju dodatków grafitowych (zarówno wielościennych rurek węglowych, jak i grafitu konwencjonalnego) z dodatkiem smarnościowym zawierającym siarkę aktywną.

Literatura

- [1] Battez H., Gonzalez R., Viesca J. L., Fernandez J. E., Fernandez J. M. D., Machado A., Chou R. Riba J.: *CuO, ZrO₂ and ZnO nanoparticles as antiwear additives in oil Lubricants*. „Wear” 2008, vol. 265, s. 422–428.
- [2] Battez H. A., Rico J. E. F., Arias N. A., Rodriguez J. L. V., Rodriguez R. C., Fernandez J. M. D.: *The tribological behaviour of ZnO nanoparticles as an additive to PAO6*. „Wear” 2006, vol. 261, s. 256–263.
- [3] Chou R., Battez A. H., Cabello J. L., Viesca J. I., Osorio A., Sagastume A.: *Tribological behaviour of polyalphaolefin with the addition of nickel nanoparticles*. „Tribology International” 2010, vol. 43, s. 2327–2332.
- [4] He-long Yu, Shi Pei-jing, Xu Bin-shi, Wang Xiao-li, Liu Qian: *Tribological properties and lubricating mechanisms of Cu nanoparticle in lubricant*. Trans. Nonferrous Met. Soc. China 2008, vol. 18, s. 636–641.
- [5] Kontarowski A.: *Geneza i kierunki rozwoju nanotechnologii*. „Logistyka” 2011, nr 6.
- [6] Kontarowski A.: *Wytwarzanie powłok ochronnych skojarzeń tarczowych środków transportu w procesach tarcia*. Logitrans, VII Konferencja Naukowo-Techniczna.
- [7] Lee J., Cho S., Hwang Y., Lee Ch., Kim S. H.: *Enhancement of Lubrication Properties of Nano-Oil by Controlling the Amount of Fullerene Nanoparticles*. „Tribology Letters” 2007, vol. 28, s. 202–203.
- [8] Lijewski M., Wiśniewski T., Leshchynsky V.: *Wpływ procesu azotowania i modyfikacji warstwy wierzchniej nanokompozytem smarów stałych na właściwości tribologiczne i trwałość części układów pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych*. „Obróbka plastyczna metali” 2011, tom XXII, z. 3.
- [9] Makowski R.: *Metoda określenia wpływu modyfikacji środków smarowych cząsteczkami miedzi na zużycie elementów systemu tribologicznego*. „Logistyka” 2011, nr 3.
- [10] Malina D., Sobczak-Kupiec A., Kowalski Z.: *Nanocząstki srebra – przegląd chemiczny metod syntezy*. „Czasopismo Techniczne” Politechniki Krakowskiej 2010, z. 10. Chemia z. 1-Ch.
- [11] Podniało A.: *Paliwa, oleje i smary w ekologicznej eksploatacji*. „Wydawnictwa Naukowo-Techniczne” 2009.
- [12] Pottuz L. J., Vacher B., Ohmae N., Martin J. M., Epicier T.: *Anti-wear and Friction Reducing Mechanisms of Carbon Nano-onions as Lubricant Additives*. „Tribology Letters” 2008, vol. 30, s. 69–80.
- [13] QiuHong P., Xifeng Z.: *Synthesis and Tribological Behavior of Oil-Soluble Cu Nanoparticles as Additive in SF15W/40 Lubricating Oil*. „Rare Metal Materials and Engineering” 2010, vol. 39, s. 1711–1714.
- [14] Viesca J. L., Battez A. H., Gonzalez R. Ch., Cabello J. J.: *Antiwear properties of carbon coated copper nanoparticles used as an additive to polyalphaolefin*. „Tribology International” 2011, vol. 44, s. 829–833.
- [15] Zhang M., Wang X., Fu X., Xia Y.: *Performance and anti-wear mechanism of CaCO₃ nanoparticles as a green additive in poly-alpha-olefin*. „Tribology International” 2000, vol. 42, s. 1029–1039.



Dr Wojciech KRASODOMSKI – Kierownik Laboratorium Analiz Dodatków w Zakładzie Dodatków i Nowych Technologii Chemicznych Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Zajmuje się zarówno zagadnieniami analitycznymi, jak i technologią dodatków oraz badaniami eksperckimi.



Mgr inż. Anna REMBIESA-ŚMISZEK – asystent w Zakładzie Olejów, Środków Smarowych i Asfaltów Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Absolwentka Wydziału Inżynierii i Technologii Chemicznej Politechniki Krakowskiej, specjalności Technologia Ropy i Gazu.



Mgr inż. Agnieszka SKIBIŃSKA – asystent w Zakładzie Olejów, Środków Smarowych i Asfaltów Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Absolwentka Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej o specjalności Technologia Chemiczna Węgla i Ropy Naftowej.