

Silica nanoparticles as additives to lubricants. Literature review

Nanocząstki krzemionki jako dodatki do środków smarowych. Przegląd literaturowy

DOI: 10.15199/62.2024.5.6

A rev., with 69 refs., of research on the possibility of using SiO₂ nanoparticles as additives to lubricants, in which they act as thickeners and anti-wear additives. The effect of functionalization of SiO₂ nanoparticles on tribol. properties of lubricants such as coeff. of friction and anti-wear properties was discussed. The most important challenges in obtaining dispersions contg. SiO₂ nanoparticles were presented, the most essential of which were counteracting stability loss and detg. the effect of SiO₂ functionalization on dispersion properties.

Keywords: nanoparticles, silica, lubricants

Przedstawiono zastosowanie nanocząstek krzemionki, w szczególności jako dodatków do środków smarowych. W doniesieniach literaturowych przeważa ich zastosowanie jako nośników katalizatorów i napętniaczy polimerów. Jednym z nowych, rozwijających się obszarów zastosowania nanocząstek krzemionki są dodatki do środków smarowych, w których pełnią one funkcje m.in. zagęszczaczy i dodatków przeciwzużyciowych. Przedstawiono potencjalne korzyści ze stosowania nanocząstek krzemionki jako dodatków do środków smarowych, poparte publikowanymi w literaturze wynikami badań trybologicznych. Przedstawiono najważniejsze wyzwania związane z otrzymywaniem dyspersji zawierających nanocząstki krzemionki, z których najważniejsze są: przeciwdziałanie utracie stabilności oraz określenie wpływu funkcjonalizacji krzemionki na właściwości dyspersji.

Słowa kluczowe: nanocząstki, krzemionka, środki smarowe

Krzemionka od lat stanowi przedmiot badań wielu gałęzi przemysłu i nauki. W formie makroskopowych kryształów znana jest ludzkości od tysięcy lat, w szczególności pod postacią kwarcu i piasku kwarcowego. Jest to również jedna z najbardziej rozpowszechnionych substancji mineralnych w obrębie ziemskiej litosfery. Ponadto istnieją organizmy żywe (np. okrzemki) wykorzystujące krzemionkę jako biologiczną substancję budulcową. Chociaż wciąż badany jest długoterminowy wpływ nanocząstek krzemionki na środowisko¹⁾, na rynku obecne są liczne produkty, w tym spożywcze lub dopuszczone do kontaktu z żywnością, zawierające krzemionkę w swym składzie^{2, 3)}. Obecnie krzemionka jest powszechnie uważana za substancję biologicznie obojętną, a w szczególności nietoksyczną dla organizmów żywych.

Krzemionka w postaci nanocząstek istotnie różni się od krzemionki w formie makroskopowych kryształów. Mniejsze rozmiary cząstek oraz zdolność krzemionki do tworzenia przestrzennych, porowatych struktur są odpowiedzialne za znaczne rozwinięcie jej powierzchni właściwej. Wyróżnia się dwie główne metody otrzymywania nanocząstek krzemionki, metodę płomieniową oraz metodę zol-żel. Metoda płomieniowa polega na kontrolowanym spalaniu lotnych związków silanowych, takich jak tetrachlorek krzemu, w płomieniu tlenowo-wodorowym. Powstające protocząsteczki ditlenku krzemu agregują w podwyższonej temperaturze, tworząc ziarna nanocząstek krzemionkowych⁴⁾. Metoda zol-żel polega na kondensacji krzemionki ze związków krzemooorganicznych, takich jak tetraetoksylan⁵⁾ (TEOS), w środo-



Mgr inż. Kamil KORASIAK (ORCID: 0000-0002-6058-279X) w roku 2017 ukończył studia inżynierskie na Wydziale Chemicznym Politechniki Wrocławskiej, a w 2019 r. studia magisterskie na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej. Pracuje jako specjalista chemik w Łukasiewicz-ICSO „Blachownia”. Jest uczestnikiem V edycji programu MEiN „Doktorat Wdrożeniowy” realizowanego w Szkole Doktorów Politechniki Śląskiej. Specjalność – funkcjonalizacja nanocząstek, procesy homogenizacji, powłoki hydrofobizujące.



Dr inż. Julia WOCH (ORCID: 0000-0002-9766-0165) ukończyła studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Stopień doktora uzyskała na Uniwersytecie Opolskim. Obecnie jest główną specjalistką w Łukasiewicz-ICSO „Blachownia”. Specjalność – tworzenie dyspersji użytkowych, takich jak przemysłowe środki smarowe i eksploatacyjne, również z udziałem nanomateriałów (m.in. ciecze do obróbki metali, trudnopalne płyny hydrauliczne, płyny niskokrzepnące oraz aktywne dyspersje hydrofobizujące do powlekania opakowań).

***Adres do korespondencji:**

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Ciężkiej Syntezy Organicznej „Blachownia”,
ul. Energetyków 9, 47-225 Kędzierzyn-Koźle, tel.: (77) 487-36-30,
e-mail: kamil.korasiak@icso.lukasiewicz.gov.pl

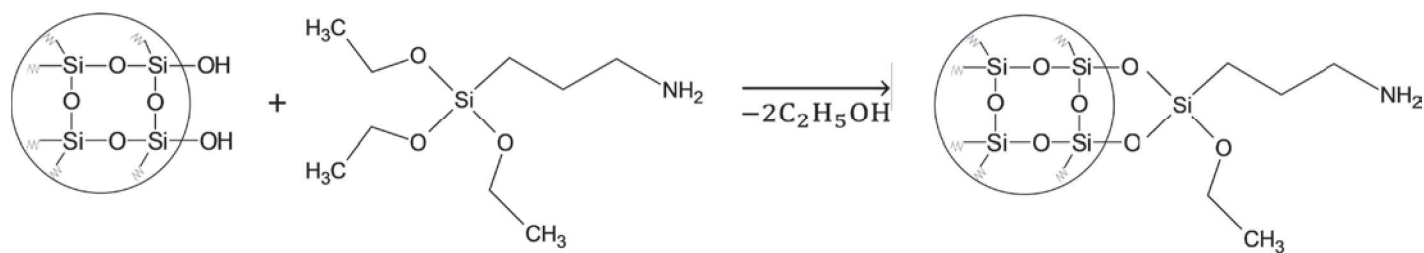


Fig. 1. Scheme of silica functionalization with alkoxysilanes, using APTES as an example³⁰⁾

Rys. 1. Schemat funkcjonalizacji krzemionki za pomocą alkoksylanów, na przykładzie APTES³⁰⁾

wisku wodnym i w obecności katalizatora. Katalizatorem może być zasada amonowa (metoda Stöbera⁶⁾) lub kwas chlorowodorowy⁷⁾. W literaturze przeważa zastosowanie krzemionki uzyskiwanej metodą zol-żel, ze względu na możliwość otrzymania nanocząstek o określonym kształcie i wymiarach. W takim przypadku do mieszaniny reakcyjnej wprowadza się odpowiedni surfaktant, który tworzy z wodą układ micelarny. Micele o kształcie zależnym od rodzaju surfaktanta stanowią matrycę, na powierzchni której kondensuje krzemionka^{8, 9)}.

Ze względu na rozwiniętą powierzchnię właściwą oraz dużą odporność chemiczną nanocząstek krzemionki badania nad ich zastosowaniem obejmują obszary, takie jak nośniki leków, materiały kompozytowe (w tym wypełniacze polimerów¹⁰⁾) oraz katalizatory. Najliczniej reprezentowane w literaturze zastosowanie nanocząstek krzemionki jako nośników katalizatorów obejmuje procesy, takie jak otrzymywanie gazu syntezowego^{11, 12)}, estryfikacja^{13, 14)}, redukcja nitrozwiązków¹⁵⁾, odsiarczanie^{16, 17)}, reakcja Suzukiego¹⁸⁾, reakcja Dielsa i Aldera¹⁹⁾, synteza węglanu styrenu²⁰⁾ oraz wiele procesów z obszaru chemii enzymów i biotechnologii. Nośniki krzemionkowe doskonale nadają się do immobilizacji enzymów na ich powierzchni²¹⁾, co umożliwia zastosowanie ich jako katalizatorów w licznych procesach biotechnologicznych, takich jak synteza *sec*-alkoholi²²⁾, odwodornienie steroidów²³⁾ i racemizacja²⁴⁾.

Proces wprowadzania podstawników do nanocząstek krzemionki nazywany jest funkcjonalizacją. Podstawniki mogą być wprowadzane na powierzchnię nanocząstek krzemionki na sposób adsorpcyjny lub kowalencyjny²⁵⁾. Sposób adsorpcyjny wykorzystuje siły adhezji wprowadzanej substancji do rozwiniętej powierzchni krzemionki

i inne słabe oddziaływania, takie jak siły van der Waalsa i wiązania wodorowe²⁶⁾. Zastosowanie sposobu kowalencyjnego polega na chemicznym przyłączeniu podstawnika z nośnikiem krzemionkowym. Do funkcjonalizacji sposobem kowalencyjnym stosuje się zazwyczaj alkoksylany z odpowiednim podstawnikiem, łańcuchem bocznym. Mechanizm reakcji polega na kondensacji grup silanowych (Si-OH) na powierzchni krzemionki z grupami alkoksyłowymi wprowadzanego podstawnika. Ze względu na efekty steryczne nie wszystkie grupy alkoksyłowe ulegają reakcji z krzemionką²⁷⁻²⁹⁾. Jedną z najczęściej stosowanych substancji do funkcjonalizowania nanocząstek krzemionkowych jest (3-aminopropyl)trietoksyilan (APTES), zawierający pierwszorzędową grupę aminową, która umożliwia dalszą rozbudowę struktury, np. poprzez reakcję z chlorkiem kwasowym. Schemat reakcji APTES z krzemionką przedstawiono na rys. 1.

Nanocząstki krzemionki, ze względu na swoje właściwości oraz podatność na chemiczną modyfikację, wciąż znajdują nowe zastosowania. Jednym z nich jest zastosowanie nanocząstek krzemionki jako dodatków do środków smarowych.

Zapotrzebowanie rynku na nowe dodatki do środków smarowych

Wciąż rosnący rynek środków smarowych³¹⁾ generuje zapotrzebowanie na nowe dodatki poprawiające ich właściwości. Dodatki do środków smarowych mają różne funkcje, takie jak: przeciwwzyciowe, przeciwwzartarciowe, zmniejszające tarcie, przeciwutleniające, przeciwkorozyjne i dyspergujące. Jednymi z najstarszych i wciąż powszechnie



Mgr Ilona SCUDŁO (ORCID: 0000-0002-5391-4899) w roku 2009 ukończyła studia na Wydziale Chemii Uniwersytetu Opolskiego. Od 2011 r. pracuje jako specjalista chemik w Łukasiewicz-ICSO „Błachownia”. Jest współautorką kilku opracowanych technologii, zgłoszeń patentowych oraz publikacji. Jest uczestniczką V edycji programu MEiN „Doktorat Wdrożeniowy” realizowanego w Szkole Doktorów Politechniki Śląskiej. Specjalność – otrzymywanie nowych dodatków do przemysłowych produktów eksploatacyjnych (cieczy, olejów oraz smarów) celem polepszenia ich właściwości użytkowych.



Dr hab. inż. Katarzyna SZYMAŃSKA (ORCID: 0000-0002-1653-9540) w roku 2003 ukończyła studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. W 2017 r. uzyskała stopień doktora habilitowanego nauk technicznych w zakresie inżynierii chemicznej. Od 2009 r. jest pracownikiem Katedry Inżynierii Chemicznej i Projektowania Procesowego tej samej uczelni. Specjalność – inżynieria procesowa i bioprocessowa, inżynieria materiałów nanostrukturalnych i (bio)katalizatorów, inżynieria mikroreaktorów chemicznych i enzymatycznych.

stosowanych dodatków zmniejszających tarcie i poprawiających właściwości przeciwzużyciowe są alkiloditiofosforany cynku (ZDDP)³². Pomimo dobrych właściwości przeciwzużyciowych i stosunkowo niskiej ceny, mają istotne wady, takie jak właściwości drażniące oczy i skórę³³ oraz możliwość zatruwania katalizatorów samochodowych produktami ich rozkładu^{33, 34}. Alkiloditiofosforany cynku wykazują również toksyczność wobec organizmów wodnych³⁵ oraz są źródłem emisji związków fosforu i siarki do środowiska. Konieczność redukcji emisji siarki oraz metali ciężkich (do których cynk jest zaliczany) powoduje zwiększenie zainteresowania badaniami i wprowadzaniem na rynek nowych, przyjaznych środowisku dodatków do środków smarowych, w tym nanododatków. W literaturze obecne są doniesienia o badaniach nad zastosowaniem jako dodatków do środków smarowych innych nanocząstek, takich jak grafen^{36–38}, disiarczki molibdenu³⁹, disiarczki wolframu⁴⁰, tlenek miedzi⁴¹, nanodiamenty⁴² i nanorurki węglowe^{43–45}. Do tej pory w komercyjnie dostępnych środkach smarowych zastosowano takie nanomateriały, jak fulereny, siarczki i tlenki metali oraz nanocząstki polimerowe³¹.

Istnieją dwa główne mechanizmy korzystnego wpływu nanocząstek na smarowanie⁴⁶. Pierwszym jest bezpośredni wpływ na poprawę właściwości filmu olejowego poprzez efekt łożyska^{47, 48} (*ball-bearing effect* lub *rolling effect*) lub poprzez tworzenie filmu ochronnego, zmniejszając w ten sposób tarcie⁴⁹ (rys. 2A i 2B). Drugim mechanizmem jest wpływ na strukturę powierzchni trących poprzez działanie wypełniające i/lub polerujące^{47, 48, 50} (rys. 2C i 2D).

Nanocząstki krzemionki jako dodatki do środków smarowych

Obecnie na rynku oferowane są nieliczne nanocząstki krzemionki jako dodatki zagęszczające do smarów⁵². Tymczasem mogą być one stosowane nie tylko jako zagęszczacze, ale również jako dodatki poprawiające parametry trybologiczne środków smarowych, takie jak współczynnik

tarcia. W literaturze opisano badania nad wpływem dodatku nanocząstek krzemionki do różnych środków smarowych, takich jak mineralny olej silnikowy^{53, 54}, olej przekładniowy⁵⁵, olej obróbczy^{48, 56}, oleje syntetyczne z grupy polialfaolefin (PAO)^{57–61}, oleje roślinne^{62, 63}, smary roślinne⁶⁴, emulsje Pickeringa⁶⁵, smary litowe^{66, 67} i olej silikonowy⁶⁸.

W pracy Kashefi i współpracowników⁵⁴ przedstawiono wpływ dodatku sferycznych nanocząstek krzemionki (w ilości do 1% obj.) na właściwości trybologiczne i reologiczne oleju silnikowego klasy SAE40. Wykazano, że olej z dodatkiem nanocząstek krzemionki miał charakter płynu pseudoplastycznego. Badania trybologiczne metodą kula-tarcza wykazały zmniejszenie średnicy śladu zużycia o 50% i współczynnika tarcia o 18% dla oleju z dodatkiem 0,1% obj. nanocząstek krzemionki. Zbadano również wpływ 0,1% obj. dodatku krzemionki na zawartość metali (żelaza, chromu, glinu, miedzi i ołowiu) w oleju silnikowym po 30-godzinnej pracy w silniku testowym. Wykazano znaczne (w przypadku żelaza o ponad 50%) zmniejszenie zawartości metali w oleju zawierającym nanocząstki krzemionki w porównaniu z olejem bez dodatków, co świadczy o mniejszym zużyciu elementów trących.

W pracy Sui i współpracowników⁵⁸ określono wpływ funkcjonalizacji różnymi podstawnikami zawierającymi grupy aminowe oraz wpływ wielkości ziarna nanocząstek krzemionki na współczynnik tarcia oraz średnicę śladu zużycia. Badanie przeprowadzono w aparacie czterokulowym dla dyspersji olejowych zawierających te nanocząstki. Zbadano również wpływ stężenia nanocząstek w dyspersji z olejem na ww. parametry trybologiczne. Wykazano, że spośród nanocząstek o średnicach 20, 50 i 100 nm najlepsze właściwości trybologiczne zapewniały te o największej średnicy. Spośród badanych stężeń masowych nanocząstek w dyspersji (0,5, 1, 2 i 4%) najlepsze wyniki uzyskano dla stężenia 1%. Wyniki badań wskazują na istnienie optimum w zakresie zarówno wielkości cząstek, jak i stężeń nanocząstek krzemionki, powyżej i poniżej

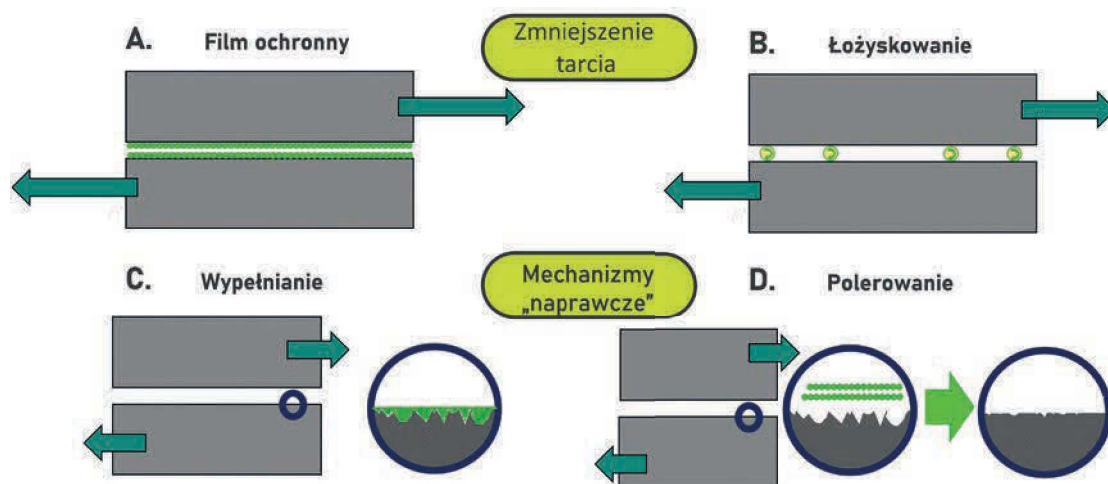


Fig. 2. Proposed mechanisms for the effect of nanoparticles on the tribological properties of lubricants⁵¹

Rys. 2. Proponowane mechanizmy wpływu nanocząstek na właściwości trybologiczne środków smarowych⁵¹

Table. Effect of functionalization of silica nanoparticles on the stability and tribological parameters of lubricants, using selected publications as an example

Tabela. Wpływ funkcjonalizacji nanocząstek krzemionkowych na stabilność i parametry trybologiczne środków smarowych, na przykładzie wybranych publikacji

Typ podstawnika	Baza smarowa	Wpływ podstawnika na stabilność	Parametry trybologiczne	Rok
Amina, diamina, triamina	olej PAO	nie badano	najlepsze wyniki dla krzemionki o $d = 100$ nm z podstawnikiem typu triamina; zmniejszenie współczynnika tarcia o 40%, średnicy śladów zużycia o 60%	2015 ⁵⁸⁾
Amid	REPSOL ISO 32, REPSOL ISO 68	nierozgałęziony podstawnik amidowy zapewnił największą stabilność dyspersji	najlepsze wyniki dla krzemionki z rozgałęzionym podstawnikiem amidowym; zmniejszenie współczynnika tarcia o 40%	2015 ⁶⁹⁾
PMLA	olej PAO	dyspersje stabilne w czasie 55 dni	zmniejszenie współczynnika tarcia o 40% i średnicy śladów zużycia o 90%	2016 ⁵⁹⁾
Triamina, alkil C18 (bifunkcjonalizacja)	olej PAO	podstawnik alkilowy zapewnił największą stabilność dyspersji	najlepsze wyniki dla krzemionki bifunkcjonalizowanej; zmniejszenie współczynnika tarcia o 40% i średnicy śladów zużycia o 60%	2016 ⁶⁰⁾
Struktura cieczy jonowej $[-(SO_4^-)(N^+R_3)]$	olej PAO, woda/glicerol	stabilne dyspersje (obie bazy smarowe)	zmniejszenie współczynnika tarcia o 20% i średnicy śladów zużycia o 50%	2021 ⁵⁶⁾

których pozytywny wpływ na właściwości trybologiczne środka smarowego jest mniejszy.

W pracy López i wspólr.⁶⁹⁾ przedstawiono sposób otrzymywania nanocząstek krzemionki funkcjonalizowanych podstawnikami zawierającymi grupy amidowe. W tym przypadku funkcjonalizacja przebiegała dwuetapowo. W pierwszym etapie krzemionka poddawana była reakcji z alkoksylanem zawierającym grupy aminowe, (3-aminopropyl)trietoksylan (APTES, schemat na rys. 1), lub (3-trimetoksylilopropyl)dietylenotriaminą (TMSDETA). Reakcje te przebiegały wg tego samego mechanizmu, czyli kondensacji grup silanolowych na powierzchni krzemionki z grupami alkoksylowymi wprowadzanego podstawnika. W przypadku APTES wprowadzona struktura zawierała jedną grupę aminową, natomiast w przypadku TMSDETA trzy grupy aminowe. W drugim etapie uzyskane krzemionki z przyłączonymi podstawnikami zawierającymi grupy aminowe poddawano reakcji z kwasem laurylowym lub chlorkiem dodekanoilu, uzyskując ostatecznie strukturę podstawnika o charakterze amidu. Funkcjonalizowane nanocząstki krzemionki zostały następnie wprowadzone do dwóch różnych olejów bazowych. Wykazano, że dodatek funkcjonalizowanych nanocząstek krzemionki spowodował zmniejszenie współczynnika tarcia (badanie w aparacie czterokulowym). Otrzymane dyspersje charakteryzowały się niewielką stabilnością, ze względu na skłonność zastosowanych nanocząstek do agregacji i sedymentacji.

Możliwość otrzymania stabilnej dyspersji nanocząstek krzemionki w oleju przedstawiono w pracy Wrighta i wspólr.⁵⁹⁾, w której stabilne w czasie 55-dniowego przechowywania dyspersje uzyskano dla nanocząstek krzemionkowych funkcjonalizowanych poli(metakrylanem laurylu). Wykazano, że dodatek funkcjonalizowanych nanocząstek krzemionki pozwolił na zmniejszenie współczynnika tarcia

o 40% oraz średnicy śladów zużycia o 90% (metoda kula-tarcza) względem oleju bez dodatków.

Inną metodę zapewnienia stabilności dyspersji nanocząstek krzemionki w oleju przedstawiono w pracy Sui i wspólr.⁶⁰⁾. W metodzie tej, nazywanej bifunkcjonalizacją, jednocześnie wprowadzono na powierzchnię krzemionki podstawniki aminowe, zapewniające poprawę właściwości trybologicznych, oraz długołańcuchowe podstawniki alkilowe, zwiększające hydrofobowość cząstek krzemionki, a tym samym stabilność ich dyspersji w oleju typu polialfaolefina (PAO). Dodatek uzyskanej krzemionki w ilości 1% mas. pozwolił na zmniejszenie współczynnika tarcia o 40% oraz średnicy śladu zużycia o 60% (badanie w aparacie czterokulowym) w porównaniu z olejem bez dodatków.

Kolejny sposób zapewnienia stabilności dyspersji nanocząstek krzemionki w środkach smarowych przedstawiono w pracy Hao i wspólr.⁵⁶⁾, w której zastosowano krzemionkę funkcjonalizowaną amfifilowymi podstawnikami jako dodatek do dwóch modelowych środków smarowych, oleju PAO oraz mieszaniny wody i glicerolu. Krzemionkę poddano dwuetapowej funkcjonalizacji. W pierwszym etapie wprowadzono na powierzchnię krzemionki grupy wodorosiarczanowe $[-SO_4H]$, a w drugim krzemionkę poddano reakcji z trzeciorzędową aminą, z utworzeniem struktury cieczy jonowej $[-(SO_4^-)(N^+R_3)]$. Wykazano, że dyspersje (zarówno wodne, jak i olejowe) zawierające nanocząstki krzemionki funkcjonalizowane amfifilowymi podstawnikami charakteryzowały się większą stabilnością w porównaniu z dyspersjami zawierającymi niefunkcjonalizowaną krzemionkę. Wykazano również, że zastosowanie amfifilowo funkcjonalizowanych nanocząstek krzemionki pozwoliło na zmniejszenie współczynnika tarcia maksymalnie o ok. 20%, a średnicy śladów zużycia maksymalnie o ok. 50% w porównaniu z bazami smarowymi bez dodatków.

Sposób otrzymywania dyspersji nanocząstek krzemionki ma istotne znaczenie dla zapewnienia odpowiedniej stabilności dyspersji. W pracy Sui i współpr.⁶¹⁾ opisano metodę dyspergowania nanocząstek krzemionki w oleju PAO, zakładającą utrzymywanie nanocząstek w postaci dyspersji w rozpuszczalniku przez wszystkie etapy procesu. W pierwszym etapie krzemionka była poddawana funkcjonalizacji polegającej na wprowadzeniu grup aminowych w obecności rozpuszczalnika, którym był etanol. Następnie do otrzymanej dyspersji dodano toluen i oddestylowano etanol, otrzymując dyspersję funkcjonalizowanych nanocząstek w toluenie. W etapie trzecim dyspersję tę wprowadzono do oleju PAO i oddestylowano toluen, uzyskując dyspersję nanocząstek w oleju. Taki sposób postępowania pozwolił na zmniejszenie średniej średnicy cząstek zdyspergowanych w oleju o ponad 40% (pomiar wykorzystujący metodę dynamicznego rozpraszania światła) względem konwencjonalnej metody, w której nanocząstki w postaci stałej są dyspergowane w oleju z zastosowaniem mieszania mechanicznego i homogenizacji ultradźwiękowej.

Podsumowanie

Rynek środków smarowych jest otwarty na nowości z obszaru dodatków na bazie nano- i mikrocząstek różnych substancji stałych poprawiających właściwości smarne. W ostatnich latach swoją pozycję na rynku ugruntowały m.in. oleje silnikowe oraz smary zawierające disiarczek molibdenu, a także smary grafitowe i teflonowe. W ciągu ostatnich dwóch dekad przeprowadzono wiele badań nad możliwością zastosowania nanocząstek krzemionki jako dodatków do środków smarowych. Stwierdzono, że nawet niefunkcjonalizowane nanocząstki krzemionki poprawiają właściwości trybologiczne środków smarowych⁵⁴⁾. Jednakże w licznych publikacjach zwrócono uwagę na niedostateczną stabilność układów zawierających nanocząstki krzemionki, wynikającą z ich skłonności do agregacji. Jedno z głównych proponowanych rozwiązań tego problemu stanowi funkcjonalizacja, czyli wprowadzanie kowalencyjnie przyłączonych podstawników do struktury nanocząstek krzemionki (tabela).

W zależności od rodzaju wprowadzonego podstawnika, uzyskuje się nanocząstki o większej hydrofobowości, odpowiedniej dla węglowodorowych baz smarowych lub o strukturze amfifilowej i odpowiedniej dla wodnych lub wodno-olejowych baz smarowych. Dodatek funkcjonalizowanych nanocząstek krzemionki zapewnia również poprawę parametrów trybologicznych środków smarowych, takich jak współczynnik tarcia i właściwości przeciwzużyciowe. Nanocząstki krzemionki, charakteryzujące się odpornością chemiczną, nietoksycznością, projektowalnością struktury oraz łatwością chemicznej modyfikacji (funkcjonalizacji), są perspektywnym kierunkiem dalszych badań w branży dodatków do środków smarowych.

Praca wykonana w ramach projektu doktorskiego pt. „Funkcjonalizowane nanomateriały krzemionkowe i ich zastosowanie jako komponenty środków smarowych”, realizowanego w ramach V edycji programu Ministra Edukacji i Nauki pn. „Doktorat wdrożeniowy”, nr umowy DWD/5/0516/2021.

Otrzymano: 01-03-2024

LITERATURA

- [1] J.G. Croissant, K.S. Butler, J.I. Zink, C.J. Brinker, *Nature Rev. Mater.* 2020, **5**, 886.
- [2] M.R. Kasaai, *J. Nanotechnol.* 2015, **2015**, 852394.
- [3] M.E. Vance, T. Kuiken, E.P. Vejerano, S.P. McGinnis, M.F. Hochella Jr., D. Rejeski, M.S. Hull, *Beilstein J. Nanotechnol.* 2015, **6**, 1769.
- [4] H. Barthel, L. Rösch, J. Weis, [w:] *Organosilicon chemistry set. From molecules to materials* (red. N. Auner, J. Weis), Wiley, 2005, 761.
- [5] H. Tamon, T. Kitamura, M. Okazaki, *J. Colloid Interf. Sci.* 1998, **197**, 353.
- [6] Y. Han, Z. Lu, Z. Teng, J. Liang, Z. Guo, D. Wang, M.-Y. Han, W. Yang, *Langmuir* 2017, **33**, 5879.
- [7] D.A. Donatti, A.I. Ruiz, D.R. Vollet, *Ultrason. Sonochem.* 2002, **9**, 133.
- [8] J. Aguado, D.P. Serrano, J.M. Escola, *Micropor. Mesopor. Mat.* 2000, **34**, 43.
- [9] S. Banerjee, A. Datta, *Langmuir* 2010, **26**, 1172.
- [10] D.E. Abulyazied, N.A. Mansour, A.M. Mazrouaa, M.G. Mohamed, *J. Res. Updates Polym. Sci.* 2016, **5**, 10.
- [11] C.C. Chong, Y.W. Cheng, M.B. Bahari, L.P. Teh, S.Z. Abidin, H.D. Setiabudi, *Int. J. Hydrogen Energy* 2021, **46**, 24687.
- [12] H.A. Razak, N. Abdullah, J. Gasang, H.D. Setiabudi, C.S. Yee, N. Ainirazali, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2019, **220**, 012058.
- [13] J.N. Appaturi, M. Selvaraj, J.R. Rajabathar, F. Khoerunnisa, S. Rigolet, T.J. Daou, P. Maireles-Torres, S.M. El-Bahy, Z.M. El-Bahy, E.-P. Ng, *Micropor. Mesopor. Mat.* 2022, **331**, 111645.
- [14] N. Ahmadi, A. Ramazani, S. Rezayati, F. Hosseini, *Eurasian Chem. Commun.* 2020, **2**, 862.
- [15] X. Le, Z. Dong, W. Zhang, X. Li, J. Ma, *J. Mol. Catal. A: Chem.* 2014, **395**, 58.
- [16] F. Mirante, N. Gomes, L.C. Branco, L. Cunha-Silva, P.L. Almeida, M. Pillinger, S. Gago, C.M. Granadeiro, S.S. Balula, *Micropor. Mesopor. Mat.* 2019, **275**, 163.
- [17] H.J. Mohammed, A.T. Jarullah, B.A. Al-Tabbakh, H.M. Hussein, *Energy Sources Part A: Recovery Util. Environ.* 2023, **45**, 1672.
- [18] A. Fihri, D. Cha, M. Bouhrara, N. Almana, V. Polshettiwar, *ChemSusChem* 2012, **5**, 85.
- [19] K. Matuszek, A. Chrobok, P. Latos, M. Markiton, K. Szymańska, A. Jarzębski, M. Swadźba-Kwaśny, *Catal. Sci. Technol.* 2016, **6**, 8129.
- [20] A. Siewniak, A. Forajter, K. Szymańska, *Catalysts* 2020, **10**, 1363.
- [21] C. Hou, N. Ghécy, D. Messmer, K. Szymańska, J. Adamcik, R. Mezzenga, A.B. Jarzębski, P. Walde, *ACS Omega* 2019, **4**, 7795.
- [22] D. Stradomska, M. Heba, A. Czernek, N. Kuźnik, D. Gillner, K. Maresz, W. Pudło, A. Jarzębski, K. Szymańska, *Catalysts* 2021, **11**, 518.
- [23] M. Tataruch, P. Wójcik, A.M. Wojtkiewicz, K. Zaczyk, K. Szymańska, M. Szalaniec, *Catalysts* 2020, **10**, 1460.
- [24] M. Heba, D. Stradomska, K. Szymańska, A. Jarzębski, K. Ambroziak, M. Masternak, A. Kolanowska, W. Pudło, N. Kuźnik, *Catalysts* 2021, **11**, 316.
- [25] A.B. Jarzębski, K. Szymańska, J. Bryjak, J. Mrowiec-Białoń, *Catal. Today* 2007, **124**, 2.
- [26] V. Puddu, C.C. Perry, *ACS Nano* 2012, **6**, 6356.
- [27] K.D. Behringer, J. Blümel, *J. Liq. Chrom. Rel. Technol.* 1996, **19**, nr 17–18, 2753.
- [28] E.F. Vasant, P. Van Der Voort, K.C. Vrancken, *Stud. Surf. Sci. Catal.*, Elsevier, 1995, 149.
- [29] G. Fang, J. Chen, J. Wang, J. He, S. Wang, *J. Chromatogr. A* 2010, **1217**, 1567.
- [30] E.J. Cueto-Díaz, A. Castro-Muñiz, F. Suárez-García, S. Gálvez-Martínez, M.C. Torquemada-Vico, M.P. Valles-González, E. Mateo-Martí, *Nanomaterials* 2021, **11**, 2893.
- [31] P.D. Srivayas, M.S. Charoo, *Tribol. Ind.* 2018, **40**, 594.
- [32] M.A. Nicholls, T. Do, P.R. Norton, M. Kasrai, G.M. Bancroft, *Tribol. Int.* 2005, **38**, 15.
- [33] R.K. Hewstone, *Sci. Total Environ.* 1994, **156**, 243.
- [34] B. Kim, J.C. Jiang, P.B. Aswath, *Wear* 2011, **270**, 181.
- [35] https://www.aronite.com/content/dam/aronite/how-we-add-value/exceptional-reliability/exceptional-reliability_zdtp_fnweb.pdf, dostęp 11.10.2023 r.
- [36] Y. Liu, S. Yu, Q. Shi, X. Ge, W. Wang, *Lubricants* 2022, **10**, 215.
- [37] X. Fan, Y. Xia, L. Wang, W. Li, *Tribol. Lett.* 2014, **55**, 455.
- [38] N.A. Ismail, N.W.M. Zulkifli, Z.Z. Chowdhury, M.R. Johan, *Diam. Relat. Mater.* 2021, **115**, 108357.

- [39] L. Liu, M. Zhou, X. Li, L. Jin, G. Su, Y. Mo, L. Li, H. Zhu, Y. Tian, *Materials* 2018, **11**, 1314.
- [40] P.C. Uzoma, H. Hu, M. Khadem, O.V. Penkov, *Coatings* 2020, **10**, 897.
- [41] A.A. Abdel-Rehim, S. Akl, S. Elsouly, *Lubricants* 2021, **9**, 16.
- [42] W. Liu, X. Qiao, S. Liu, P. Chen, *Nanomaterials* 2022, **12**, 3780.
- [43] S. Bhagavathi Kandy, G.P. Simon, W. Cheng, J. Zank, K. Saito, A.R. Bhattacharyya, *ACS Omega* 2019, **4**, 6647.
- [44] N. Kumar, P. Goyal, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2022, **1225**, 012052.
- [45] Y. Gu, L. Ma, M. Yan, C. He, J. Zhang, J. Mou, D. Wu, Y. Ren, *Tribol. Int.* 2022, **176**, 107875.
- [46] Y.J. Jason, H.G. How, Y.H. Teoh, H.G. Chuah, *Processes* 2020, **8**, 1372.
- [47] S.Y. Sia, A.A.D. Sarhan, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014, **70**, 1063.
- [48] S.Y. Sia, E.Z. Bassyony, A.A.D. Sarhan, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014, **71**, 1277.
- [49] S. Tarasov, A. Kolubaev, S. Belyaev, M. Lerner, F. Tepper, *Wear* 2002, **252**, 63.
- [50] G. Liu, X. Li, B. Qin, D. Xing, Y. Guo, R. Fan, *Tribol. Lett.* 2004, **17**, 961.
- [51] I. Scudło, K. Korasiak, J. Woch, S. Boncel, K. Szymańska, *Mat. Konf. 64. Zjazd PTChem, Lublin, 11–16 września 2022 r.*
- [52] https://products.evonik.com/assets/48/79/Fact_Sheet_AEROSIL_fumed_silica_for_Lubricat_and_Grease_applications_EN_EN_244879.pdf, dostęp 12.02.2024.
- [53] O. Seibert, P. Kejzlar, T. Bakalová, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020, **723**, 012029.
- [54] M.H. Kashefi, S. Saedodin, S.H. Rostamian, *J. Therm. Anal. Calorim.* 2022, **147**, 4073.
- [55] Z. Li, Q. Guan, S. Liu, J. Bao, H. Ding, W. Wang, *Wear* 2024, **538–539**, 205219.
- [56] L. Hao, P. Li, A. Aljabri, H. Li, G. Liu, Z. Xie, T. Li, *J. Mater. Res. Technol.* 2021, **15**, 5507.
- [57] F. Mariño, J.M. Liñeira del Río, D.E.P. Gonçalves, J.H.O. Seabra, E.R. López, J. Fernández, *Wear* 2023, **530–531**, 205025.
- [58] T. Sui, B. Song, F. Zhang, Q. Yang, *J. Nanomater.* 2015, **2015**, 492401.
- [59] R.A.E. Wright, K. Wang, J. Qu, B. Zhao, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2016, **55**, 8656.
- [60] T. Sui, B. Song, Y. Wen, F. Zhang, *Sci. Rep.* 2016, **6**, 22696.
- [61] T. Sui, M. Ding, C. Ji, S. Yan, J. Wei, A. Wang, F. Zhao, J. Fei, *Ceram. Int.* 2018, **44**, 18438.
- [62] Y. Singh, N.K. Singh, A. Sharma, *J. Bio-Tribo-Corros.* 2020, **7**, 16.
- [63] P. Mohan Rastogi, R. Kumar, N. Kumar, *Mater. Today: Proceed.* 2021, **46**, nr 20, 10109.
- [64] R. Kozdrach, J. Drabik, M. Szczerek, *Materials* 2023, **16**, 6245.
- [65] S. Chen, J. Wang, H. Lu, L. Xu, *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2022, **10**, 10816.
- [66] S.S. Rawat, A.P. Harsha, A.P. Deepak, *Appl. Nanosci.* 2019, **9**, 305.
- [67] S. Razavi, S. Sabbaghi, K. Rasouli, *Inorg. Chem. Commun.* 2022, **142**, 109601.
- [68] T. Dembelova, B. Badmaev, D. Makarova, A. Mashanov, U. Mishigdorzhyn, *Lubricants* 2023, **11**, 9.
- [69] T.D.-F. López, A.F. González, Á. Del Reguero, M. Matos, M.E. Díaz-García, R. Badía-Laíño, *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2015, **16**, 055005.



Science and industry

Challenges and opportunities

June 4-6, 2024

Lublin-Pulawy, Poland

Ladies and Gentlemen,

We would like to invite you to participate in the international conference, which is a continuation of the previously organized National Symposium **'Science and industry – spectroscopic methods in practice, new challenges and opportunities'**.

The event, which will indeed be such a cooperation platform for us, organized under the new name **'Science and industry - challenges and opportunities'**, will take place **on June 4-6, 2024** in Lublin and Pulawy, Poland and will bring together experts from the areas of natural sciences, engineering and technology, agriculture and forestry, veterinary as well as medical and health sciences, who will discuss the latest achievements in their fields.

The conference will be an opportunity to present scientific achievements, research and implementation achievements carried out in your home institutions and to talk about the effective transfer of knowledge generated in research centers to economic practice.

The event is organized by **the Institute of Chemical Sciences of UMCS, the Polish Chemical Society and the Łukasiewicz Research Network – New Chemical Syntheses Institute.**

We cordially invite you to participate!

Yours faithfully,
on behalf of the Organizing Committee
Zbigniew Hubicki



ATHENA



UMCS



UMCS

