

Rafał KOZDRACH*

WPLYW NANODODATKÓW CERAMICZNYCH NA CHARAKTERYSTYKI TRIBOLOGICZNE BIODEGRADOWALNYCH SMARÓW PLASTYCZNYCH

THE INFLUENCE OF CERAMIC ADDITIVES ON TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF BIODEGRADABLE LUBRICATING GREASES

Słowa kluczowe:

smar plastyczny, właściwości przeciwzużyciowe, właściwości przeciwwzatarciowe, powierzchnia tarcia, krzemionka amorficzna, krzemiany warstwowe, dodatki smarne, aparat czterokulowy

Key words:

lubricating grease, antiwear properties, anticuffing properties, friction surface, amorphous silica, silicates of stratified, lubricating additives, four-ball machine

Streszczenie

W publikacji przedstawiono wyniki badań wpływu dodatków ceramicznych na właściwości tribologiczne wybranych kompozycji smarowych. Do modyfikacji smarów plastycznych wytworzonych na bazie mineralnej, syntetycznej oraz

* Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. 48 364-42-41, fax 48 364-47-65, e-mail: rafal.kozdrach@itee.radom.pl.

roślinnej i zagęszczonych stearynianem litu zastosowano płomieniową krzemionkę amorficzną Aerosil® oraz montmorylonit jako przedstawiciel krzemionów warstwowych.

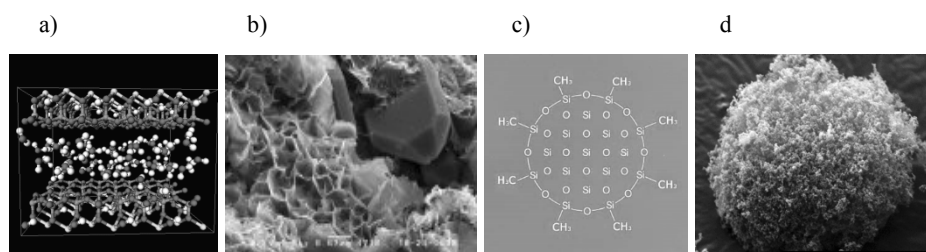
Za pomocą aparatu czterokulowego wykonano testy tribologiczne dla smarów bazowych, tzn. niezawierających dodatków modyfikujących, i porównano je z wynikami uzyskanymi dla smarów plastycznych zmodyfikowanych wyżej wymienionymi dodatkami. Do oceny tych właściwości wykorzystano wyniki badań granicznego obciążenia zużycia, obciążenia zespawania, obciążenia zacierającego, granicznego obciążenia zatarcia oraz granicznego nacisku zatarcia. Na podstawie wyników badań tribologicznych wybranych kompozycji smarowych stwierdzono, że zastosowane dodatki modyfikujące w postaci krzemionki amorficznej oraz montmorylonitu korzystnie wpływają na zmianę wartości poszczególnych parametrów określających poziom właściwości smarnych badanych kompozycji smarowych.

WPROWADZENIE

Właściwości smarów plastycznych zależą od ich składów oraz technologii wytwarzania i są kształtowane między innymi za pomocą odpowiednio dobranych dodatków uszlachetniających [L. 1]. Typowe pakiety dodatków uszlachetniających smary plastyczne zawierają między innymi antyutleniacze (podwyższające odporność smaru na utlenianie), dodatki przeciwzużyciowe i przeciwzatarciowe polepszające właściwości tribologiczne produktu oraz przeciwkorozyjne (zmniejszające agresywność smaru wobec metali) czy adhezyjne (polepszające przyczepność smaru do elementów konstrukcyjnych maszyn). Nie tylko obecność dodatku decyduje o właściwościach użytkowych smaru, ale również sposób wbudowania go w strukturę smaru plastycznego. Wprowadzanie dodatków do smarów plastycznych sprawia wiele trudności technologicznych, ponieważ cząsteczki dodatku adsorbują się na powierzchni zagęszczacza, co w konsekwencji może prowadzić do obniżenia efektywności działania takiego komponentu, a nawet do zmniejszenia stabilności smaru [L. 1–6]. Do smarów plastycznych należy stosować odpowiednie, specjalnie wyselekcjonowane dodatki w ilości determinującej poprawę ich właściwości użytkowych. Smary plastyczne bardzo dobrze mieszają się ze stałymi dodatkami smarnymi, które zmniejszają siłę tarcia oraz zwiększają odporność węzła tarcia na obciążenia i zatarcie. W trudnych warunkach pracy dodatki te zwiększają skuteczność działania środka smarnego dzięki odporności na czynniki chemiczne oraz lepszej odporności na działanie wysokich temperatur. Najczęściej wśród tego typu dodatków stosuje się grafit, disiarczek molibdenu, politetrafluoroetylen, miedź oraz chloroparafiny [L. 2, 7]. Współcześnie dąży się jednak do tego, aby substancje smarne były coraz bardziej przyjazne dla środowiska i jednocześnie nie pogarszały swych właściwości smarnych. W związku ze wzrastającą rolą ochrony środowiska naturalnego należy stosować środki, które nie zawierają w swym składzie

metali ciężkich, chlorowców, siarki czy fosforu [L. 8], dlatego postanowiono zastosować nietoksyczne dodatki w postaci krzemionki amorficznej oraz krzemianu warstwowego, które mają za zadanie poprawić właściwości tribologiczne badanych smarów plastycznych.

Współczesna nauka swoją innowacyjność zawdzięcza nanotechnologii, w której stosuje się struktury mające przynajmniej jeden rozmiar poniżej 100 nm [L. 9]. Wprowadzenie nanododatków do struktury smaru powoduje wyraźne poprawienie właściwości przeciwzatarciowych oraz przeciwwżyciowych, od których zależą właściwości użytkowe kompozycji smarowych. Te cechy tłumaczą wielkie zainteresowanie innowacyjnymi nanododatkami ceramicznymi. Negatywne aspekty występowania nanododatków to ich wysoki koszt, ograniczona dostępność i trudności z osiągnięciem odpowiedniego stopnia dyspersji w strukturze smaru. Udział nanododatków ceramicznych wprowadzanych do kompozycji smarowych na poziomie 7–10% wystarcza, aby osiągnąć określone, wysokie wymagania stawiane smarom plastycznym. Szczególnie dużą rolę odgrywają wielowarstwowe nanokrzemiany, z których najczęściej wykorzystywany jest montmorylonit o wzorze $M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$ i rozmiarze cząstek 100–150 nm. Są one zbudowane z pakietów trójwarstwowych zawierających jedną warstwę oktaedryczną umieszczoną pomiędzy dwiema warstwami tetraedrycznymi (Rys. 1a). Warstwa oktaedryczna jest zbudowana z tlenku glinu lub magnezu i połączona z dwiema zewnętrznymi, krzemowymi warstwami (tetraedrycznymi) poprzez wspólne atomy tlenu. Zmodyfikowany za pomocą czwartorzędowych soli amoniowych staje się hydrofobowy i jest kompatybilny w stosunku do smarów plastycznych, modyfikujący ich właściwości smarne. Do powierzchni MMT są chemicznie przyłączone organiczne hydrofobujące środki, co umożliwia trwałe związanie MMT ze smarami plastycznymi [L. 10–17].



Rys. 1. Budowa nanododatków ceramicznych: a) skład chemiczny montmorillonitu, b) zdjęcie SEM struktury montmorillonitu (powiększenie 500×), c) skład chemiczny krzemionki amorficznej, d) zdjęcie SEM struktury krzemionki amorficznej (powiększenie 4000×)

Fig. 1. The chemical structure of ceramic additives: a) the chemical composition of montmorillonite, b) SEM image of structure of montmorillonite (magnification 500×), c) the chemical composition of amorphous silica, d) SEM image of structure of amorphous silica (magnification 4000×)

Drugim po krzemianach warstwowych najczęściej stosowanym nanododatkiem ceramicznym jest krzemionka amorficzna, czyli dwutlenek krzemu o wymiarach cząstek 7–40 nm, tworzący rozbudowane struktury przestrzenne, w których każdy atom krzemu jest połączony z czterema atomami tlenu, a każdy atom tlenu łączy się z dwoma atomami krzemu (**Rys. 1c**). Powierzchnia krzemionki zawiera także atomy wodoru i grupy hydroksylowe. Dzięki swojemu charakterowi polarnemu łatwo wiąże się z cząsteczkami olejów dzięki siłom van der Waalsa. Modyfikacja krzemionki dimetylodichlorosilanem znacznie zmniejsza zjawisko aglomeracji ziaren krzemionki, pozwalając na łatwiejsze i bardziej skuteczne wbudowanie cząsteczek w strukturę smaru plastycznego, nawet przy łagodnych warunkach mieszania. Jest ona substancją o wysokiej temperaturze topnienia i wrzenia i niezwykle odporna chemicznie, ponadto nietoksyczna, co jest niezwykle ważne przy komponowaniu biodegradowalnych środków smarowych. To doskonały środek zagęszczający oraz antysedymencyjny. Poprawa właściwości tribologicznych przypisywana jest dużej powierzchni właściwej oraz bardzo dobrym oddziaływaniom na granicy faz [**L. 18–25**].

Celem pracy było zbadanie wpływu zastosowanych nanododatków ceramicznych na zmianę podstawowych parametrów tribologicznych dla kompozycji smarowych mających zastosowanie w przemyśle spożywczym opracowanych w Instytucie Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu.

PRZEDMIOT I METODYKA BADAŃ

Opracowano grupę modelowych kompozycji smarowych z zastosowaniem nietoksycznych składników stanowiących fazę dyspergującą i zdyspergowaną. Substancje stanowiące fazę dyspergującą podzielono na trzy grupy: mineralną, syntetyczną oraz roślinną. Z każdej grupy wytypowano olej o najlepszych właściwościach tribologicznych oraz fizykochemicznych. Jako fazę zdyspergowaną zastosowano stearynian litu. Wykorzystując wybrane składniki, wytworzono smary mieszczące się w drugiej klasie konsystencji i mające zastosowanie w przemyśle spożywczym. Przyjęto następujące oznaczenia wytworzonych kompozycji: olej mineralny (parafinowy) z zagęszczaczem litowym (smar A), olej roślinny (rzepakowy) z zagęszczaczem litowym (smar B) oraz olej syntetyczny (Priolube 3970) z zagęszczaczem litowym (smar C). Tak wytworzone smary plastyczne zmodyfikowano następnie nanododatkami ceramicznymi w postaci płomieniowej krzemionki amorficznej Aerosil[®] oraz krzemianu warstwowego w postaci montmorylonitu. Do struktury każdego smaru plastycznego wprowadzono wyżej wymienione dodatki w ilości 8% m/m. Tak wytworzone kompozycje smarowe oznaczono następnie symbolami: A1 (smar na oleju mineralnym zmodyfikowany krzemionką), A2 (smar na oleju mineralnym zmodyfikowany krzemianem warstwowym), B1 (smar na oleju roślinnym zmodyfikowany krzemionką), B2 (smar na oleju roślinnym zmodyfikowany krzemianem warstwowym), C1 (smar na oleju syntetycznym zmodyfikowany krzemionką),

C2 (smar na oleju syntetycznym zmodyfikowany krzemianem warstwowym). We wczesnej fazie eksperymentu podjęto badania nad ilością dodatku, jaką należy wprowadzić do kompozycji smarowej. Przeprowadzono testy z kompozycjami zawierającymi od 1 do 10% dodatku.

Właściwości smarne badanych kompozycji zostały określone poprzez pomiar granicznego obciążenia zużycia ($G_{oz/40}$), obciążenia zespawania (F_z), obciążenia zacierającego (F_t), granicznego obciążenia zatarcia (F_{oz}) oraz granicznego nacisku zatarcia (f_{oz}) na aparacie czterokulowym. Elementami testowymi były kulki o średnicy 12,7 mm wykonane ze stali łożyskowej ŁH 15, chropowatości powierzchni $Ra = 0,3 \text{ } \mu\text{m}$ i twardości 60–65 HRC. Pomiar granicznego obciążenia zużycia ($G_{oz/40}$) wykonano przy obciążeniu węzła tarcia siłą 392,4 N przez cały czas trwania testu – 3600 s oraz przy prędkości obrotowej kulki wynoszącej 500 obr./min zgodnie z warunkami testu przewidzianymi w WTWT-94/MPS-025. Pomiar obciążenia zespawania przeprowadzono zgodnie z normą PN-76/C-04147. Oznaczenie to polegało na przeprowadzeniu 10-sekundowych biegów zespołu czterech kulek w obecności środka smarowego pod coraz większym obciążeniem aż do zespawania kulek. Natomiast pomiar właściwości smarnych w warunkach zacierania (tj. pod ciągle wzrastającym obciążeniem w czasie biegu badawczego) prowadzono zgodnie z metodyką opracowaną przez ITE – PIB. Badanie wykonano przy liniowo wzrastającym obciążeniu od 0 do 7200 N w czasie 18 s przy prędkości wrzeciona 500 obr./min. i prędkości narastania obciążenia 409 N/s. Gdy następuje nagły wzrost momentu tarcia to poziom obciążenia węzła określany jest jako obciążenie zacierające F_t . Pomiar prowadzono do momentu osiągnięcia granicznego momentu tarcia 10 Nm lub maksymalnego obciążenia aparatu 7200 N. Ten punkt określono jako graniczne obciążenie zatarcia F_{oz} . Za wynik końcowy przyjmowano średnią arytmetyczną, z co najmniej trzech oznaczeń nieróżniących się od siebie więcej niż 10%. Do obróbki statystycznej wyników zastosowano test Q-Dixona przy poziomie ufności 95%.

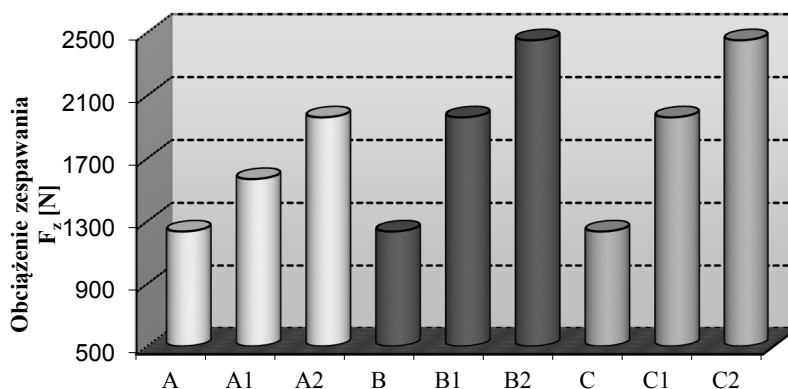
Graniczny nacisk zatarcia jest miarą właściwości przeciwzatarciowych środków smarowych w warunkach zacierania. Oznaczenie tego parametru polegało na wyliczeniu jego wartości zgodnie ze wzorem: $f_{oz} = 0,52 \times F_{oz} / d_{oz}^2$, gdzie F_{oz} – graniczne obciążenie zatarcia, a d_{oz} – średnica skazy powstałej na kulkach stalowych użytych do badania.

Dla wyznaczenia wielkości śladu zużycia powierzchni kulek testowych zastosowano mikroskop optyczny. Uzyskane wyniki posłużyły do określenia wielkości $G_{oz/40}$ oraz f_{oz} , czyli oceny właściwości przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych smarów plastycznych poddanych badaniom tribologicznym [L. 26].

WYNIKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH SMARÓW PLASTYCZNYCH

Poniżej przedstawiono wyniki badań tribologicznych (właściwości przeciwzatarciowych i przeciwzużyciowych) smarów plastycznych utworzonych na różnych olejach bazowych oraz zmodyfikowanych nanododatkami ceramicznymi.

Dla wybranych kompozycji smarowych wyznaczono obciążenie zespawania F_z . Uzyskane wyniki przedstawiono na **Rys. 2**.



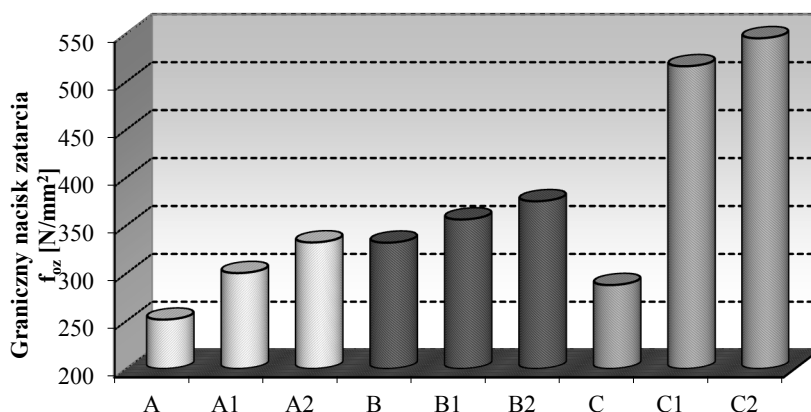
Rys. 2. Obciążenie zespawania węzła tarcia smarowanego kompozycjami wytworzonymi na różnych olejach bazowych i zmodyfikowanych nanododatkami ceramicznymi

Fig. 2. Welding load of tribosystem lubricated compositions with different base of oils and modified ceramic additives

Ocena właściwości przeciwzatarciowych przy skokowo narastającym obciążeniu węzła tarcia wykazała korzystny wpływ zastosowanych modyfikatorów na trwałość filmu smarowego (**Rys. 2**). Najkorzystniejszymi właściwościami przeciwzatarciowymi charakteryzują się smary wytworzone na bazie roślinnej (B2) i syntetycznej (C2) – wzrost wartości F_z o 56% w porównaniu z kompozycjami podstawowymi, które zostały zmodyfikowane montmorillonitem. Kompozycja smarowa wytworzona na oleju parafinowym (A2) nie wykazywała tak korzystnych zmian właściwości przeciwzatarciowych jak dwie pozostałe kompozycje, choć zauważalna jest poprawa właściwości w stosunku do kompozycji podstawowej pozbawionej dodatku modyfikacyjnego. Najkorzystniejsze działanie krzemionki amorficznej na poprawę właściwości przeciwzatarciowych w porównaniu z kompozycjami podstawowymi można zaobserwować dla smarów plastycznych wytworzonych na bazie olejów roślinnych (B1) i syntetycznych (C1) – wzrost wartości F_z o 59% w porównaniu z kompozycjami podstawowymi, natomiast dla kompozycji wytworzonej na oleju mineralnym (A1) działanie tego modyfikatora jest mniejsze (wzrost o 27%). Zarówno krzemionka amorficzna, jak i krzemian warstwowy poprawiają właściwości

przeciwzatarciowe kompozycji smarowych w stopniu zadowalającym, lecz skuteczniejsze działanie przeciwzatarciowe reprezentuje krzemian warstwowy.

Miarą właściwości przeciwzatarciowych badanych kompozycji smarowych w warunkach zacierania jest graniczny nacisk zatarcia f_{oz} . Uzyskane wyniki badania tego parametru przedstawiono na **Rys. 3**.



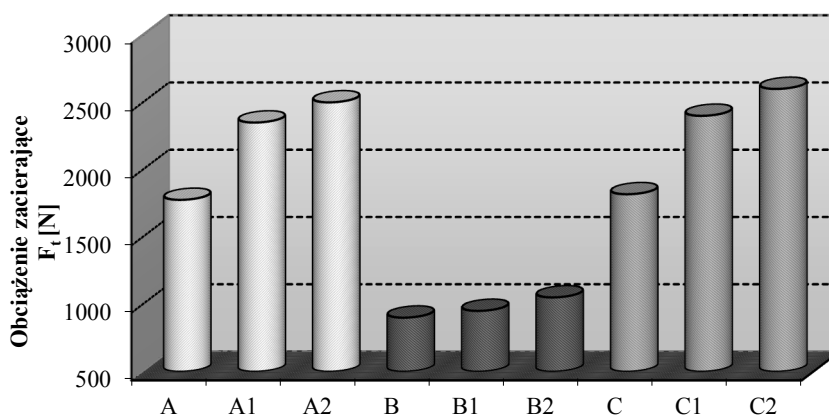
Rys. 3. Graniczny nacisk zatarcia węzła tarcia smarowanego kompozycjami wytworzonymi na różnych olejach bazowych i zmodyfikowanych nanododatkami ceramicznymi

Fig. 3. Limiting pressure of seizure of tribosystem lubricated compositions with different base of oils and modified ceramic additives

Najkorzystniejszymi właściwościami przeciwzatarciowymi w warunkach zacierania charakteryzują się smary wytworzone na bazie syntetycznej, które zostały zmodyfikowane krzemionką amorficzną (C1) oraz montmorillonitem (C2). Wzrost wartości f_{oz} odpowiednio o 87 i 100% w porównaniu z kompozycją podstawową. Kompozycje smarowe wytworzone na oleju mineralnym i roślinnym nie wykazywały tak korzystnych zmian właściwości przeciwzatarciowych jak kompozycje sporządzone na oleju syntetycznym (**Rys. 3**). Wyznaczone wartości granicznego nacisku zatarcia wykazały, że zastosowanie krzemianu warstwowego najkorzystniej wpływa na poprawę właściwości przeciwzatarciowych kompozycji smarowych zastosowanych w eksperymencie. Zastosowanie krzemionki amorficznej jako modyfikatora poprawia właściwości przeciwzatarciowe w stosunku do podstawowych kompozycji smarowych, ale wykazuje słabsze działanie przeciwzatarciowe niż krzemian warstwowy. Zastosowanie krzemianu warstwowego w postaci montmorillonitu oraz krzemionki modyfikowanej w postaci Aerosilu w smarach plastycznych wykazało pozytywny wpływ tych substancji na odporność warstwy wierzchniej na zacieranie. Parametr f_{oz} dostarcza informacji o ciśnieniu panującym w strefie tarcia w momencie zatarcia. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że badane substancje nie wpływają na tworzenie wysokoodpornych na zacieranie warstw

wierzchnich. Wyższy parametr f_{oz} w przypadku modyfikowanego nanododatki smaru na bazie oleju syntetycznego wskazuje, że charakter tworzonego filmu sprzyja znacznej redukcji zużycia.

Dla wszystkich sporządzonych kompozycji smarowych wyznaczono właściwości przeciwwzatarciowe w warunkach liniowo wzrastającego obciążenia, charakteryzowane obciążeniem zacierającym F_t . Uzyskane wyniki przedstawia **Rys. 4**.



Rys. 4. Obciążenie zacierające węzeł tarcia smarowany kompozycjami wytworzonymi na różnych olejach bazowych i zmodyfikowanych nanododatki ceramicznymi

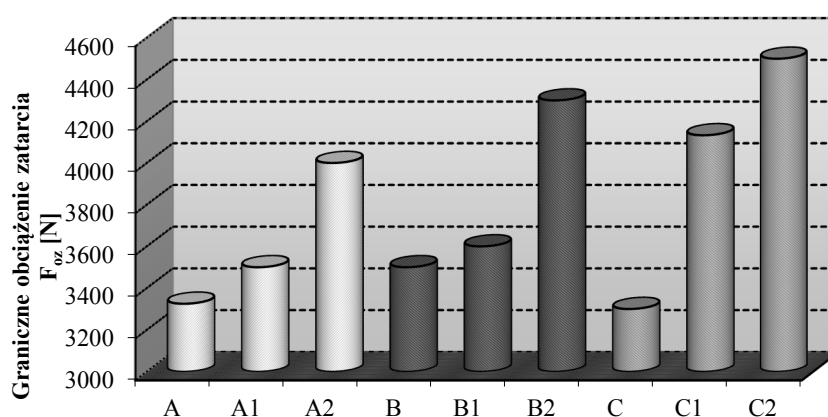
Fig. 4. Scuffing load of tribosystem lubricated compositions with different base of oils and modified ceramic additives

Obciążenie zacierające określa poziom właściwości przeciwwzatarciowych badanych smarów w warunkach liniowo wzrastającego obciążenia. Właściwości charakteryzowane przez parametr F_t określają zdolność filmu smarnego do przenoszenia obciążeń. Najkorzystniejszymi właściwościami przeciwwzatarciowymi w warunkach liniowo wzrastającego obciążenia charakteryzują się smary wytworzone na bazie syntetycznej oraz mineralnej, które zostały zmodyfikowane montmorillonitem (A2 oraz C2). Wzrost wartości F_t odpowiednio o 41 i 43% w porównaniu z kompozycją podstawową. Nieco słabszymi właściwościami charakteryzują się smary na bazie mineralnej i syntetycznej, które zostały zmodyfikowane amorficzną krzemionką (A1 oraz C1). Wzrost wartości F_t o 32% w porównaniu z kompozycją podstawową. Kompozycje smarowe wytworzone na oleju roślinnym nie wykazywały tak korzystnych zmian właściwości przeciwwzatarciowych jak kompozycje sporządzone na oleju mineralnym czy syntetycznym (**Rys. 4**). Najwyższą trwałość filmu smarnego zapewnia zastosowanie krzemianu warstwowego, który umożliwia uzyskanie smaru o największej wartości F_t . Można zatem zakładać, że skuteczność przeciwdziałania zacieraniu będzie zależeć od struktury warstwy granicznej tworzonej przez zastosowane

modyfikatory. Poszczególne cząsteczki nanododatków w filmie smarowym są ściślej upakowane, co wpływa na zwiększenie ich wzajemnych oddziaływań, a więc zwiększa się odporność filmu smarowego do przenoszenia większych obciążeń.

Wyznaczono także graniczne obciążenie zatarcia węzła tarcia smarowanego badanymi kompozycjami smarowymi. Uzyskane wyniki przedstawia **Rys. 5**.

Graniczne obciążenie zatarcia pozwala określić poziom właściwości przeciwzatarciowych badanych smarów plastycznych. Najkorzystniejszymi właściwościami przeciwzatarciowymi charakteryzuje się smar wytworzony na bazie syntetycznej, który został zmodyfikowany montmorillonitem (C2). Wzrost wartości F_{oz} o 36% w porównaniu z kompozycją podstawową. Nieco słabszymi właściwościami charakteryzują się smary na bazie roślinnej, które zostały zmodyfikowane amorficzną krzemionką (B1) oraz krzemianem warstwowym (B2).



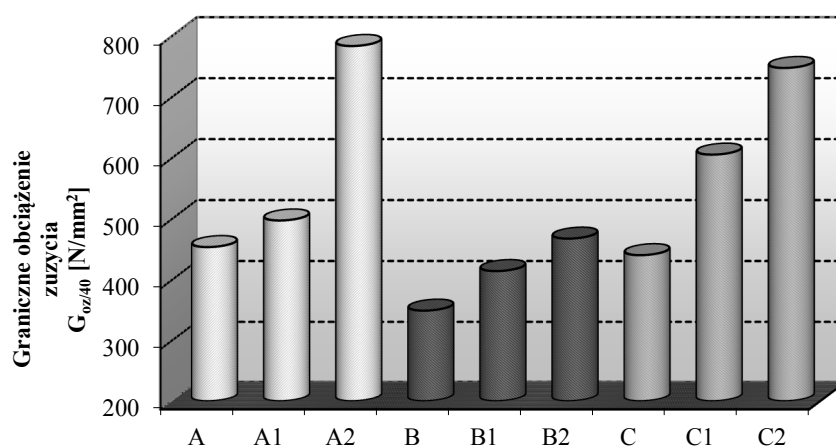
Rys. 5. Graniczne obciążenie zatarcia węzła tarcia smarowanego kompozycjami wytworzonymi na różnych olejach bazowych i zmodyfikowanych nanododatkami ceramicznymi

Fig. 5. Limiting load of scuffing of tribosystem lubricated compositions with different base of oils and modified ceramic additives

Wzrost wartości F_{oz} odpowiednio o 23 i 19% w porównaniu z kompozycją podstawową. Kompozycje smarowe wytworzone na oleju mineralnym i zmodyfikowane zastosowanymi nanododatkami ceramicznymi nie wykazywały tak korzystnych zmian właściwości przeciwzatarciowych jak kompozycje sporządzone na oleju roślinnym czy syntetycznym (**Rys. 5**). Najskuteczniejsze działanie środka smarowego po przerwaniu filmu smarowego zapewnia zastosowanie krzemianu warstwowego, który umożliwia uzyskanie smaru o największej wartości F_{oz} . Wartości F_{oz} mieszczą się w granicach 3200–4400 N, co może świadczyć o tym, że różnice w składzie dodatków odgrywają istotną rolę jedynie w warunkach umiarkowanych wymuszeń. W trakcie procesu zacierania wzra-

stające ciśnienie w strefie tarcia powoduje, że na współpracujących powierzchniach nie ma już filmu smarnego. Działanie ochronne przed unieruchomieniem węzła tarcia są w stanie zapewnić dodatki mogące wejść w reakcję z materiałem pary ciernej. Efektem tego jest ograniczenie możliwości powstawania szczepów adhezyjnych.

Właściwości przeciwzużyciowe badanych smarów plastycznych zweryfikowano poprzez wyznaczenie granicznego obciążenia zużycia $G_{oz/40}$ węzła tarcia smarowanego ocenianymi kompozycjami. Uzyskane wyniki przedstawia **Rys. 6**.



Rys. 6. Graniczne obciążenie zużycia węzła tarcia smarowanego kompozycjami wytworzonymi na różnych olejach bazowych i zmodyfikowanych nanododatkami ceramicznymi

Fig. 6. Limiting load of wear of tribosystem lubricated compositions with different base of oils and modified ceramic additives

Badania właściwości smarnych wytworzonych smarów plastycznych wykazały, że wprowadzone nanododatki ceramiczne zmieniły zdolność smarów do przeciwzużyciowej i przeciwzatarciowej ochrony węzła tarcia. Zmodyfikowane smary plastyczne charakteryzowały się różnymi w stosunku do smarów podstawowych wartościami wyznaczonych wskaźników. Każdy z zastosowanych modyfikatorów właściwości smarnych wprowadzony do smaru podstawowego miał korzystny wpływ na jego właściwości przeciwzużyciowe (**Rys. 6**). Po zbadaniu każdego z wytworzonych smarów plastycznych stwierdzono mniejsze zużycie węzła tarcia niż po badaniu kompozycji podstawowych (pozbawionych modyfikatorów). O trwałości warstwy granicznej świadczy wartość granicznego obciążenia zużycia $G_{oz/40}$. Im większy wskaźnik, tym większa trwałość warstwy granicznej i zmniejszenie zużycia. Najlepszymi właściwościami przeciwzuży-

ciowymi charakteryzuje się smar wytworzony na bazie mineralnej, który został zmodyfikowany montmorillonitem (A2) – wzrost wartości $G_{oz/40}$ o 73%. Nieco słabszymi właściwościami charakteryzuje się smar wytworzony na bazie syntetycznej (C2) – wzrost wartości $G_{oz/40}$ o 68%, najslabsze działanie krzemianu warstwowego zaobserwowano dla kompozycji wytworzonej na oleju roślinnym (B2) – wzrost wartości $G_{oz/40}$ o 34%. Natomiast najkorzystniejsze działanie krzemionki amorficznej na poprawę właściwości przeciwzużyciowych w porównaniu z kompozycjami podstawowymi można zaobserwować dla smaru plastycznego wytworzonego na bazie oleju syntetycznego (C1) – wzrost wartości $G_{oz/40}$ o 37%, nieco gorsze w przypadku zastosowania oleju roślinnego (B1) – wzrost wartości $G_{oz/40}$ o 19%, natomiast dla kompozycji wytworzonej na oleju mineralnym zaobserwowano najslabsze działanie tego modyfikatora.

Kryteria jakości środków smarowych szczególnie dla przemysłu spożywczego są ustalane indywidualnie przez producentów maszyn. W wyniku przeprowadzonej analizy rynku można stwierdzić, że kompozycje smarowe, które posiadają $G_{oz/40} > 600 \text{ N/mm}^2$, mają bardzo dobre właściwości przeciwzużyciowe, te, których graniczne obciążenie zużycia mieści się w przedziale $400\text{--}600 \text{ N/mm}^2$, zapewniają skuteczną ochronę przeciwzużyciową, natomiast jeśli $G_{oz/40} < 400 \text{ N/mm}^2$, to mówimy wtedy o niedostatecznych właściwościach przeciwzużyciowych.

Uzyskany poziom właściwości przeciwzużyciowych czyni większość badanych kompozycji smarowych skutecznymi produktami smarnymi w warunkach stałego obciążenia węzła tarcia.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały wyraźny wpływ rodzaju zastosowanych dodatków na właściwości przeciwzatarciowe i przeciwzużyciowe smarów plastycznych poddanych badaniom. Modyfikowanie smarów plastycznych nanododatkami ceramicznymi powoduje poprawę ich właściwości smarnych. Zastosowane w eksperymencie oleje bazowe oddziałują synergicznie z montmorillonitem oraz krzemionką amorficzną, powodując wzrost wskaźników opisujących właściwości tribologiczne badanych smarów plastycznych. Dodatek montmorillonitu powoduje utworzenie ochronnego filmu na powierzchni, który wpływa na wzrost odporności węzła na zacieranie. W wyniku poprawy własności warstwy granicznej rozpoczęcie zacierania następuje przy większym obciążeniu węzła tarcia.

Zaobserwowano, że amorficzna krzemionka jest skutecznym modyfikatorem właściwości przeciwzatarciowych i przeciwzużyciowych dla syntetycznych smarów litowych.

Pod wpływem zastosowanych modyfikatorów następuje wzrost parametru G_{oz} , co świadczy o dużej odporności na przerywanie warstwy granicznej.

Świadczy to o pozytywnym wpływie użytych dodatków na poprawę charakterystyk tribologicznych badanych smarów plastycznych.

Celowe jest prowadzenie badań nad wyjaśnieniem mechanizmu tak skutecznego działania montmorillonitu oraz krzemionki amorficznej w litowych smarach plastycznych.

LITERATURA

1. Mucha J., Stańkowski L.: Smary plastyczne cz. 2 - POiSwE 5/1993, s. 22–23.
2. Środki smarowe dla przemysłu spożywczego, POiSwE 37/1997, s. 10–12.
3. Smary plastyczne – wiadomości ogólne (cz. I), POiSwE 30/1996, s. 11–14.
4. Czarny R.: Smary plastyczne, WNT, Warszawa 2004, s. 32–52.
5. Torrance A.A., Morgan J.E., Wang. T.Y.: An additives influence on the pitting and wear of ball bearing steel, *Wear* 192/1996, s. 117–123.
6. Korff J., Fessenbecker A.: Additives for biodegradable lubricants, *NLGI Spokesman* 7/1993, s. 19–24.
7. Mucha J., Stańkowski L.: Smary plastyczne cz.1 – POiSwE 4 /1993, s. 25–26.
8. Janecki J., Drabik J., Pawelec E., Bajaj J.: Badanie wpływu nietoksycznych dodatków na charakterystyki tribologiczne smarów plastycznych-PE 4/1998, s. 159–171.
9. Mazurkiewicz A.: Nanonauki i nanotechnologie. Stan i perspektywy rozwoju, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2007.
10. Olejnik M.: Nanokompozyty polimerowe – rola nanododatków. *Techniczne Wroby Włókiennicze*, 5/2008, s. 25–31.
11. Sinha Ray S., Okamoto M.: Polymer layered silicates and nanocomposites are view from preparation to processing, *Progress Polymer Science* 28/2003, pp. 1539–1549.
12. Kacperski M.: Nanokompozyty polimerowe. Cz. II. Nanokompozyty na podstawie polimerów termoplastycznych i krzemianów warstwowych, *Polimery* 2/2003, s. 83–90.
13. Królikowski W., Rosłaniec Z.: Nanokompozyty polimerowe – Kompozyty 4/2004, s. 3–16.
14. Giannelis E.P., Krishnamoorty R., Manias E.: Polymer silica nanocomposites: model systems for confined polymers and polymer brushes, *Advance Polymer Science* 118/1999, pp. 108–122.
15. Piecyk L.: Nanokompozyty termoplastyczne – Tworzywa sztuczne 2/2006, s. 20–25.
16. Pagacz J., Pielichowski K.: Modyfikacja krzemianów warstwowych do zastosowań w nanotechnologii, *Czasopismo Techniczne* 1/2007, s. 133–147.
17. Mencil K., Kelar K., Jurkowski B.: Technologia otrzymywania nanokompozytów poliamidowo-montmorillonitowych. *Czasopismo Techniczne* 3/2009, s. 229–235
18. Malesa M.: Nanonapełniacze kompozytów polimerowych. Część II. Krzemionka, *Elastomery* 2/2006, s. 10–15.
19. Morefield E.: Colloidal silicon dioxide, *Handbook of Pharmaceutical Excipients*, 3rd ed., Arthur H. Kibbe, Washington, USA, 2000, pp. 143–145.
20. Aerosil R.: Manufacture, properties and applications, *Technical Bulletin Pigments N.11*, Degussa-HulsAG, Germany.

21. Albertini B., Passerini N., Gonzalez-Rodriguez M.L., Perissutti B., Rodriguez L.: Effect of Aerosil R on the properties of lipid controlled release microparticles, *Journal of Controlled Release* 100/2004, pp. 233–246.
22. Jonat S., Hasenzahl S., Drechsler M., Albers P., Wagner K.G., Schmidt P.C.: Investigation of compacted hydrophilic and hydrophobic colloidal silicon dioxides as glidants for pharmaceutical excipients, *Powder Technology*, Volume: 141, Issue: 1–2, 2004, pp. 31–43.
23. Meyer K., Zimmermann I.: Effect of glidants in binary powder mixtures, *Powder Technology* Volume: 139, Issue: 1, 2004, pp. 40–54.
24. Jonat S., Hasenzahl S., Gray A., Schmidt P.C.: Mechanism of glidants: investigation of the effect of different colloidal silicon dioxide. Types on powder flow by atomic force and scanning electron microscopy, *Journal of Pharmaceutical Science*, 93/2004, pp. 2635–2644.
25. Jonat S., Albers P., Gray A., Schmidt P.C.: Investigation of the glidant properties of compacted colloidal silicon dioxide by angle of repose and X-ray photoelectron spectroscopy, *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, Volume: 63, Issue: 3, 2006, pp. 356–359.
26. Szczerek M., Tuszyński W.: *Badania tribologiczne. Zacieranie*. ITeE, Radom 2000.
27. Krawiec S.: The synergistic effect of copper powder with PTFE in a grease lubricant under mixed friction conditions. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2/2011, s. 379–390.
28. Krawiec S.: Wpływ synergizmu wybranych wypełniaczy w smarze na zwiększenie trwałości ślizgowych węzłów maszyn, *Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej*. Monografie 27/1998, s. 7–138.
29. Krawiec S.: Synergizm proszku PTFE i cyny w smarze litowym podczas tarcia mieszanego. *Tribologia* 2/2007, s. 367–380.

Summary

The paper presents the results of research of ceramic additives on the change of the tribological properties of selected lubricating compositions. The study used of greases based on paraffin oil of pharmaceutical purity, rapeseed oil, and synthetic oil Priolube 3970. As a thickener of lubricating greases, lithium stearate was used. The lubricating compositions were produced using modified ceramic additives in the form of flame amorphous silica Aerosil and laminated silicates in the form of montmorillonite. These additives in amount of 8% m/m were introduced to the structure of each grease. In the early phase of the experiment, tribological tests of compositions containing from 1 to 10% additives were carried out to determine the optimum amount of lubricating compositions. The tribological tests were carried out using four-balls apparatus for lubricating greases not containing the modified additive, and the results were compared to the results obtained for lubricating greases modified with additives mentioned above.

The tribological properties of the tested compositions were determined by measurement of the limiting load of wear ($G_{oz}/40$), welding load (F_z), scuffing load (F_t), limiting load of scuffing (F_{oz}), and the limiting pressure of seizure (F_{oz}). The research affirmed, that the flame amorphous silica is a less effective modifier for reducing anti-scuffingly by stepwise increasing load of the friction, under conditions of linearly increasing load, seizure, and anti-wear under constant load of the friction than montmorillonite regardless of the base oil. However, the flame amorphous silica improves the resistance to scuffing of the surface layer and wear in relation the basic lubricating compositions.