



Politechnika Wroclawska

Wydział Mechaniczny

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii

Załącznik II

MACIEJ PASZKOWSKI

AUTOREFERAT

Wrocław, dnia 21 stycznia 2018 r.

SPIS TREŚCI

1. Dane osobowe.....	3
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	4
4. Wskazanie osiągnięcia naukowego	4
5. Przebieg pracy naukowej	5
5.1. Działalność naukowo-badawcza przed doktoratem	5
5.2. Działalność naukowo-badawcza po doktoracie	10
6. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników stanowiących podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego.....	13
6.1. Problematyka badawcza	13
6.2. Cel naukowy	17
6.3. Osiągnięte wyniki	17
7. Podsumowanie działalności naukowo-badawczej	26

1

DANE OSOBOWE

1. Imię i nazwisko: Maciej Paszkowski
2. Stopień naukowy: doktor nauk technicznych
3. Miejsce i adres zatrudnienia:
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii
ul. Ignacego Łukasiewicza 7/9
50-371 Wrocław
tel. +48 71 320 31 12, fax. +48 71 322 76 45
adres e-mail: maciej.paszowski@pwr.edu.pl

2

POSIADANE DYPLOMY I STOPNIE NAUKOWE

12 lipca 2004 r.

Magister inżynier,

Politechnika Wrocławska,

Wydział Podstawowych Problemów Techniki,

Kierunek: Fizyka techniczna,

Specjalność: Inżynieria biomedyczna,

Temat pracy magisterskiej: *„Wpływ podatności na efektywność mechanicznego wspomagania serca”*,

Promotor: dr hab. Zbigniew Nawrat (Instytut Protez Serca Fundacji Rozwoju Kardiologii, Zabrze),

Recenzent: prof. dr hab. inż. Romuald Będziński (Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra).

9 grudnia 2008 r.

Doktor nauk technicznych,

Politechnika Wrocławska,

Wydział Mechaniczny, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn,

Specjalność: Budowa i eksploatacja maszyn,

Temat rozprawy doktorskiej: *„Identyfikacja zjawiska tiksotropii smarów*

plastycznych w układach smarowania maszyn” (wyróżnienie Rady Wydziału

Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej za rozprawę doktorską),

Promotor: prof. dr hab. inż. Ryszard Czarny (Politechnika Wrocławska, Wrocław),

Recenzenci: dr hab. Andrzej Kulczycki (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa), prof. dr hab. inż. Wojciech Wieleba (Politechnika Wrocławska, Wrocław).

3 PRZEBIEG PRACY ZAWODOWEJ W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH

Od 1 marca 2009 r. do 30 września 2010 r.

Asystent naukowo-dydaktyczny,
Politechnika Wrocławska,
Wydział Mechaniczny,
Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn,
Zakład Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii.

Od 1 października 2010 r. do dzisiaj

Adiunkt w charakterze nauczyciela akademickiego naukowo-dydaktycznego,
Politechnika Wrocławska,
Wydział Mechaniczny,
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii.

4 WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

Jako osiągnięcie naukowe, stanowiące podstawę do wszczęcia postępowania habilitacyjnego, wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.), przedstawiam cykl powiązanych tematycznie publikacji, na których składa się niżej wymieniona książka autorska oraz sześć artykułów naukowych opublikowanych w specjalistycznych periodykach indeksowanych w bazie *Web of Science*, którego przewodni temat definiuję jako:

„Prognozowanie intensywności przebiegu zjawisk tiksotropowych i przyściennych zachodzących podczas przepływu smarów plastycznych w układach smarowania maszyn”

KSIAŻKA

1. **Paszkowski Maciej:** *„Przepływy smarów plastycznych w układach smarowniczych i węzłach tarcia. Wybrane zagadnienia”*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2017 (127 STRON, ISBN 978-83-7493-002-4)

Recenzenci wydawniczy:

prof. dr hab. inż. Ryszard Czarny (Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego, Kalisz; prof. em. Politechniki Wrocławskiej)
dr hab. inż. Jolanta Drabik, prof. nadzw. ITeE-PIB (Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom)

ARTYKUŁY NAUKOWE

1. **Paszkowski Maciej, Wróblewski Roman, Walaszczyk Aleksandra:** *„Studies of the influence of temperature and the energy state of the surface layer of adsorbents on*

wall effects in soap-based greases”, Tribology Letters 65 (1), 2017, s. 1-11 (**punktacja MNiSW 2015-2016: 35, IF 2016: 1.891, udział autorski: 70%**)

2. Czarny Ryszard, **Paszkowski Maciej**, Knop Piotr: „*The wall effect in the flow of commercial lubricating greases*”, Journal of Tribology - Transactions of the ASME 138 (3), 2016, s. 031803-1 - 031803-6 (**punktacja MNiSW 2015-2016: 30, IF 2016: 1.521, udział autorski 50%**)
3. **Paszkowski Maciej**: „*Effect of grease thickener and surface material on rheological properties of boundary layer*”, Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects 486, 2015, s. 462-467 (**punktacja MNiSW 2013-2016: 30, IF 2015: 2.760, udział autorski: 100%**)
4. **Paszkowski Maciej**, Olsztyńska-Janus Sylwia, Wilk Iwona: „*Studies of the kinetics of lithium grease microstructure regeneration by means of dynamic oscillatory rheological tests and FTIR-ATR spectroscopy*”, Tribology Letters 56 (1), 2014, s. 107-117 (**punktacja MNiSW 2013-2016: 35, IF 2014: 1.739, udział autorski: 45%**)
5. **Paszkowski Maciej**, Olsztyńska Sylwia-Janus: „*Grease thixotropy: evaluation of grease microstructure change due to shear and relaxation*”, Industrial Lubrication and Tribology 66 (2), 2014, s. 223-237 (**punktacja MNiSW 2013-2016: 20, IF 2014: 0.444, udział autorski: 80%**)
6. **Paszkowski Maciej**: „*Assessment of the effect of temperature, shear rate and thickener content on the thixotropy of lithium lubricating greases*”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J, Journal of Engineering Tribology 227 (3), 2013, s. 209-219 (**punktacja MNiSW 2013-2016: 20, IF 2013: 0.660, udział autorski: 100%**)

5

PRZEBIEG PRACY NAUKOWEJ

5.1. DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWO-BADAWCZA PRZED DOKTOREM

Podstawowym celem mojej działalności naukowo-badawczej realizowanej przed doktorem była identyfikacja zjawisk, które zachodzą w smarach plastycznych podczas ich przepływu przez elementy konstrukcyjne systemów smarowania maszyn i urządzeń, ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska tiksotropii. Optymalnie zaprojektowany system smarowania powinien w sposób niezawodny dystrybuować środek smarny do wszystkich punktów odbioru. Dystrybucja ta powinna być precyzyjna i najlepiej w pełni zautomatyzowana. Zaprojektowanie takiego systemu jest szczególnie trudne jeżeli zaopatruje on w środek smarny maszyny silnie obciążone, zawierające dużą (dochodzącą nawet do kilkuset) liczbę różnego rodzaju skojarzeń trących, rozmieszczonych nieliniowo, w dużej odległości od siebie. Łączna długość przewodów smarowych w systemach rozległych może sięgać nawet 500 metrów (systemy stosowane w przemyśle górnym). Dodatkowym problemem mogą być trudne warunki otoczenia, w których układ ten ma pracować (wysoka

bądź niska temperatura, duża wilgotność powietrza, itp.). Wszystkie wymienione czynniki sprawiają, że zaprojektowanie systemu centralnego smarowania dobrze spełniającego swoją rolę jest dużym wyzwaniem nawet dla doświadczonego konstruktora specjalizującego się w tej konkretnej dziedzinie. **Podczas konstruowania systemu smarowania ważne jest określenie podstawowych parametrów, które będą decydować o jego sprawnym funkcjonowaniu. Jednym z najważniejszych jest dobór odpowiedniego smaru plastycznego, który powinien zmniejszać opory tarcia i zużycie skojarzeń trących oraz zabezpieczać je przed działaniem środowiska zewnętrznego, a także gwarantować możliwie jak najmniejsze opory przepływu podczas jego transportu, głównie przez przewody smarownicze.** Drugą, nie mniej ważną kwestią jest umiejętny dobór pompy smarowniczej, która powinna wytworzyć ciśnienie umożliwiające pokonanie oporów przepływu smaru plastycznego w elementach konstrukcyjnych systemu centralnego smarowania oraz zapewnić precyzyjną dystrybucję środka smarnego bezpośrednio do punktów odbioru. Źle dobrany smar plastyczny pod kątem właściwości reologicznych i tribologicznych oraz pompa smarownicza nieodpowiedniego typu i mocy, a także dynamicznie zmieniające się warunki pracy, mogą powodować znaczne zwiększenie kosztów eksploatacji takiego systemu. W przypadku konieczności intensywnego smarowania par trących dochodzi często w takich przypadkach do dystrybucji zbyt dużych objętości środka smarnego. Prowadzi to w konsekwencji do wypływu dużej objętości smaru plastycznego przez uszczelnienia wężła tarcia, a w skrajnych przypadkach zagrożenia dla środowiska naturalnego (szczególnie problem ten dotyczy łożysk wielkogabarytowych). Przy dystrybucji zbyt małych ilości smaru plastycznego dochodzi z kolei do niewystarczającego zabezpieczenia powierzchni roboczych, co może skutkować awarią smarowanej maszyny. Nie mniej istotnym aspektem jest ekonomia smarowania. Mając na uwadze fakt, iż w roku 2016 globalne zużycie środków smarnych sięgnęło prawie 36 mln m³ (i z roku na rok rośnie) to nawet kilkuprocentowe zmniejszenie ilości zużycia tych środków przekłada się na wielomiliardowe oszczędności. Aby optymalnie dobrać środek smarny oraz pompę smarowniczą, a także parametry sterowania (m.in. częstotliwość dystrybucji smaru plastycznego) we wstępnie zaprojektowanym układzie smarowniczym, konieczna jest przede wszystkim wnikliwa analiza oporów przepływu.

Poznanie i opis zjawisk wpływających na właściwości reologiczne smarów plastycznych ma, jak już wspomniałem w poprzednim akapicie, podstawowe znaczenie w budowie układów centralnego smarowania oraz w późniejszym, niezawodnym działaniu tych układów. Jednym z tych zjawisk jest tiksotropia, której przebieg jest zależny od wielu czynników (temperatury, intensywność ścinania, rodzaj smaru i in.) i która, z uwagi na jej złożoność, nie została do tej pory dokładnie zbadana i wyjaśniona. Wnikliwa analiza w szczególności tego zjawiska była tematem mojej pracy doktorskiej, realizowanej pod kierunkiem prof. Ryszarda Czarnego z Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii Politechniki Wrocławskiej. Na prace naukowo-badawcze otrzymałem w 2006 roku grant promotorski finansowany ze środków Komitetu Badań Naukowych.

Termin tiksotropia pochodzi od greckich słów: *thixis* (mieszać, potrząsać) oraz *trepo* (obrać, zmieniać). Zjawisko to definiuje się jako izotermiczny spadek lepkości strukturalnej substancji podczas ścinania, a następnie jej wzrost i częściową resolidyfikację substancji w tych

samych warunkach ciśnienia i temperatury, po ustaniu ścinania¹. Zjawisko tiksotropii dotyczy zawiesin, które posiadają mikrostrukturę, składającą się z cząstek, które ulegają agregacji bądź flokulacji. W układach takich występują między cząstkami oddziaływania fizyczne, które powodują, że w czasie relaksacji naprężeń wytwarza się przestrzenna, usieciowana mikrostruktura. Są to przede wszystkim siły przyciągania van der Waalsa-Londona, siły elektrostatycznego odpychania (szczególnie istotne gdy cząstki fazy zdyspergowanej mają kształt anizometryczny) oraz oddziaływania steryczne. Ważną rolę mogą odgrywać również ruchy Browna, jednakże ich występowanie ograniczone jest tylko do układów koloidalnych. Należy w tym miejscu podkreślić, że w znacznej części prac naukowych dotyczących reologii zawiesin nienewtonowskich, opis zjawiska tiksotropii upraszcza się do procesu zmian strukturalnych w substancji zachodzących w czasie ścinania, przy niezmiennych warunkach ścinania, w zakresie małych lub umiarkowanych gradientów prędkości ścinania, w określonym przedziale czasu, pomijając jednocześnie odbudowę mikrostruktury (resolidyfikację). W przeważającej części cieczy tiksotropowych warunki panujące podczas pierwszego cyklu ścinania determinują intensywność odbudowy mikrostruktury i zachowanie się jej w cyklach kolejnych.

Podstawowe właściwości reologiczne smarów plastycznych wynikają z cech strukturalnych smarów, tj. z jednej strony z dyspersji i anizotropii cząstek zagęszczacza tworzących szkielet mikrostruktury, a z drugiej strony z energii wiązań pomiędzy elementami strukturalnymi w szkielecie i ich oddziaływaniami z bazą olejową. Właściwości te zależą również od czynników zewnętrznych, intensywności przepływu, jak również od parametrów konstrukcyjnych elementów układów smarowniczych. Wśród nich należy wymienić m.in. kształt i wymiary przewodów smarowych, rozdzielaczy, a także powierzchni roboczych zespołów ślizgowych. Proces transportu smaru z agregatu smarowniczego do punktów odbioru kontrolowany jest przez szereg wskaźników i/lub przekaźników ciśnienia oraz przekaźników czasowych, znajdujących się zazwyczaj w urządzeniu sterowniczym. Zaopatrzenie łożysk w odpowiednią objętość smaru plastycznego, tak aby zapewnić ich prawidłowe smarowanie nie jest rzeczą prostą. Należy dostarczyć taką ilość środka smarnego do węzła tribologicznego aby zapełnić odpowiedni obszar szczeliny smarowej lub wytworzyć odpowiednio gruby film smarny, przy jednoczesnym zachowaniu podstawowych zasad ekonomii smarowania. Do tak skomplikowanego procesu konieczna jest wiedza z zakresu reologii środków smarnych, konstrukcji maszyn oraz hydromechaniki. Podczas dostarczania smaru plastycznego do konkretnych par trących pompa smarownicza w układzie smarowania maszyn musi wytworzyć ciśnienie, które pozwoli pokonać szereg oporów przepływu, w tym przede wszystkim w przewodach magistrali smarowej, rozdzielaczach dozujących, przewodach doprowadzających oraz punktach odbioru (węzłach tarcia). Przyrosty ciśnienia związane z oporami przepływu smaru w większości elementów smarowniczych mają charakter miejscowy, natomiast w przewodach głównych magistrali smarowej i przewodach doprowadzających przyrost ciśnienia jest ciągły. Opory przepływu smaru w przewodach są najgroźniejsze dla prawidłowego funkcjonowania układów smarowniczych. Wynika to głównie z tego, że ilość środka smarnego jest w nich największa. W pierwszych sekundach tłoczenia porcji smaru do przewodu głównego magistrali smarowej pompa musi pokonać opór płynięcia tego smaru, wynikający z istnienia granicy płynięcia (naprężenia stycznego granicznego). Wartość tego

¹ Freundlich H., *Thixotropie*, Hermann, Paryż, Francja, 1935

oporu uzależniona jest od stanu mikrostruktury, jej podatności na odkształcenia sprężyste i plastyczne, a także od natężenia przepływu generowanego przez pompę smarowniczą oraz aktywności chemicznej i fizycznej środowiska, w tym temperatury otoczenia. Po przekroczeniu granicy płynięcia opory przepływu smaru maleją na skutek niszczenia trójwymiarowej siatki zagęszczacza. Krzywa obrazująca przebieg zmian oporów w poszczególnych częściach układu smarowniczego w funkcji odległości od pompy smarowniczej, wygląda podobnie jak krzywa spadku wartości lepkości strukturalnej smaru plastycznego w funkcji czasu jego ścinania, przy stałym gradiencie prędkości ścinania. Wraz z czasem, wartość lepkości strukturalnej smaru zbliża się do lepkości dynamicznej ośrodka dyspersyjnego, czyli oleju bazowego. Smar plastyczny zachowuje się wówczas podobnie jak ciecz newtonowska, której lepkość nie zależy od czasu ścinania. W układach smarowniczych smar plastyczny podawany jest do punktów odbioru w sposób cykliczny. Między kolejnymi cyklami dystrybucji smaru do węzłów tarcia, w fazie relaksacji tego smaru zachodzi częściowa odbudowa jego mikrostruktury (resolidyfikacja), której towarzyszy wzrost lepkości strukturalnej smaru. Jest to spowodowane oddziaływaniami fizykochemicznymi między flokułami zagęszczacza. Intensywność odbudowy mikrostruktury jest zależna m.in. od fizycznego stanu mikrostruktury w chwili relaksacji naprężeń w smarze oraz od warunków ścinania jakie zachodziły przed procesem odbudowy. W wyniku przyrostu wartości lepkości strukturalnej smaru plastycznego pomiędzy cyklami ścinania w układzie smarowniczym dokładne dozowanie smaru w zakresie ilości jak i czasokresu smarowania jest bardzo kłopotliwe.

W chwili obecnej, w oparciu o aktualną literaturę przedmiotu, można stwierdzić że zjawisko tiksotropii smarów plastycznych ma następujący wpływ na funkcjonowanie systemów smarowniczych i węzłów tarcia:

1. Powoduje istotny wzrost oporów przepływu smarów mydlanych w elementach konstrukcyjnych systemów smarowniczych (w szczególności w magistralach smarowych i przewodach doprowadzających) między kolejnymi etapami ich dozowania przez pompę smarowniczą, nawet o 25%.
2. Powoduje powstawanie szeregu zjawisk inercyjnych, które mogą doprowadzić do wzrostu energii pobieranej przez pompy smarownicze, a w skrajnych przypadkach do ich uszkodzenia (dotyczy w szczególności rozległych systemów smarowniczych).
3. Utrudniania prawidłowe dozowanie smarów plastycznych do punktów odbioru w zakresie ilości i czasokresu, czego skutkiem może być duża objętość smaru przedostająca się do środowiska naturalnego bądź niedosmarowanie węzłów tarcia.
4. W odkrytych i smarowanych smarami plastycznymi węzłach tarcia (w szczególności wielkogabarytowych), powoduje istotny przyrost ich momentu ruchowego i utrudnienia w odprowadzaniu ciepła.

Dokonując przeglądu literatury naukowej nie znalazłem w trakcie realizacji doktoratu prac naukowych, które kompleksowo wyjaśniałyby mechanizm zmian tiksotropowych w smarach plastycznych. Biorąc pod uwagę ważność problemu, szczególnie w sytuacji gdy automatyzacja systemów smarowania maszyn i urządzeń staje się coraz bardziej powszechna, konieczne było przeprowadzenie badań teoretycznych i doświadczalnych w tym zakresie. W ramach pracy doktorskiej, realizowanej w latach 2005-2008 w Katedrze

Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii Politechniki Wrocławskiej, podjąłem się zbadania jednoczesnego wpływu udziału procentowego zagęszczacza (12-hydroksystearynianu litu) w smarze plastycznym (w zakresie od 4 do 9 %), temperatury (od -20 do +80 °C) oraz intensywności ścinania tego smaru (od 8.1 do 48.6 s⁻¹) na przyrost lepkości strukturalnej (resolidyfikację) w przebiegu tiksotropii. Ze względu na dużą ilość kombinacji wielkości wejściowych, wykorzystałem do realizacji zamierzonego celu eksperyment planowany (plan rotatabilny). **Badania wykazały niejednoznaczny wpływ udziału procentowego zagęszczacza, temperatury i intensywności ścinania na odbudowę mikrostruktury smaru między kolejnymi cyklami jego dystrybucji przez pompę systemu smarowniczego.** W czasie badań laboratoryjnych uwzględniłem warunki ścinania smarów plastycznych jakie panują w elementach konstrukcyjnych systemów smarowniczych, w tym m.in. zakres gradientu prędkości ścinania, a klasy konsystencji badanych smarów plastycznych o różnym udziale procentowym zagęszczacza mieściły się w przedziale od 0 do 3 (wg PN-85/C-96-04095), czyli były typowe dla tych, które eksploatowane są w tego typu systemach. Badanie przeprowadziłem za pomocą reometru rotacyjnego Rheotest 2.1 pracującego w układzie współosiowych cylindrów, wyposażonego w zmodyfikowaną przez mnie głowicę pomiarową, składającą się z cylindra pomiarowego wykonanego z politetrafluoroetylenem (PTFE), zawierającego nacięcia w kształcie linii śrubowej. Taka modyfikacja umożliwiła mi ograniczenie poślizgu badanego smaru plastycznego przy ścianie cylindra pomiarowego oraz zmniejszenie wpływu efektu Weissenberga na wyniki pomiarów. Uzyskane podczas badań (z wykorzystaniem eksperymentu planowanego – planu rotacyjnego) płaszczyzny odpowiedzi pokazały jednoznacznie, że istnieją warunki, w których resolidyfikacja smarów litowych w przebiegu tiksotropii jest największa. Funkcje te nie są funkcjami monotonicznymi i posiadają wyraźne ekstrema. **Największy przyrost lepkości strukturalnej zaobserwowano dla smaru litowego o udziale procentowym zagęszczacza wynoszącym 7.5 %, ścinanego z gradientem prędkości tego ścinania 8.1 s⁻¹ w temperaturze 28 °C.** Zaproponowałem zależność matematyczną, umożliwiającą prognozowanie przyrostu lepkości strukturalnej smaru w fazie jego relaksacji, która może znaleźć szerokie zastosowanie przy konstruowaniu rozległych układów smarowania maszyn, w celu porównania różnych kombinacji wartości gradientu prędkości ścinania smaru, temperatury otoczenia oraz konsystencji smarów litowych, pod kątem ich tiksotropii i generowania dodatkowych oporów przepływu. Badania reologiczne, przeprowadzone z wykorzystaniem reometru rotacyjnego uzupełniłem badaniami spektroskopowymi FTIR-ATR mikrostruktury zagęszczacza smaru litowego. Oceniałem zakres zmian zachodzących w mikrostrukturze smaru bezpośrednio po procesach ścinania oraz częściowej odbudowy mikrostruktury. Badania wykazały, że podczas ścinania smaru następuje niszczenie mostków wodorowych (łączyjących grupy OH) między asocjatami mydła litowego. Towarzyszy temu wyraźny spadek intensywności pasm drgań grup CH₂ i CH₃ pochodzących od cząsteczek 12-hydroksystearynianu, co przemawia za tym, że podczas przepływu smaru łączą się ze sobą łańcuchy węglowodorowe pojedynczych włókien. Podczas procesu resolidyfikacji smaru następuje ponowny wzrost wiązań wodorowych, które uległy zniszczeniu podczas jego ścinania. Dodatkowo zaobserwowałem m.in. zmniejszenie się ilości grup COOH, co świadczy o zmianie struktury łańcuchowej flokuł mydła. **W oparciu o badania spektroskopowe zaproponowałem model niszczenia i odbudowy mikrostruktury smaru litowego w przebiegu tiksotropii.** Badania doświadczalne mikrostruktury zagęszczacza z wykorzystaniem mikroskopu sił atomowych AFM, pracującego głównie w trybie detekcji faz,

potwierdziły wyniki uzyskane z wykorzystaniem reometru rotacyjnego i spektroskopii FTIR-ATR. Dodatkowo udowodniłem, że cząstki mydła w badanym smarze, ze względu na ich rozdrobnienie, nie wykazywały ruchów Browna, czyli intensywnych i nieuporządkowanych ruchów drgających, które mogłyby powodować dezorientację włókien podczas przepływu smaru.

Wstępne wyniki badań doświadczalnych prowadzonych w ramach doktoratu prezentowane były na konferencjach o charakterze międzynarodowym i krajowym, w tym m.in. na *16th International Colloquium Tribology*, największej konferencji tribologicznej w Europie, odbywającej się cyklicznie w Stuttgarcie oraz na *XXVIII Jesiennej Szkole Tribologicznej* w Łagowie:

Paszkowski Maciej: „*Identification of the thixotropy of lithium greases*”, *16th International Colloquium Tribology – Lubricants, materials and lubrication engineering*, 15-17 stycznia 2008 r., Ostfildern, Stuttgart, Niemcy (**liczba cytowań, wg bazy *Web of Science* na dzień 21 stycznia 2018 r.: 2**)

Paszkowski Maciej: „*Wpływ zawartości zagęszczacza na zjawisko tiksotropii smarów plastycznych*”, *XXVIII Jesienna Szkoła Tribologiczna – Problemy tribologiczne w projektowaniu, wytwarzaniu i eksploatacji maszyn i urządzeń*, 11-14 września 2007 r., Łagów, Polska

Pierwszy z referatów spotkał się z dużym zainteresowaniem wśród naukowców z różnych rejonów świata, w tym m.in. profesorów Pieta M. Lugta z Uniwersytetu Twente w Holandii i Rafaata Ahmeda El-Adlyego z Instytutu Badań Naftowych w Egipcie, a także przedstawiciele firm produkujących środki smarne.

5.2. DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWO-BADAWCZA PO DOKTORACIE

Badania doświadczalne prowadzone przed doktoratem pozwoliły na sprecyzowanie kierunków dalszych badań nad zjawiskami zachodzącymi podczas przepływu smarów plastycznych w systemach smarowania maszyn i urządzeń. Tym samym po uzyskaniu stopnia doktora kontynuowałem pracę naukową w dyscyplinie *budowa i eksploatacja maszyn*. **W marcu 2012 roku otrzymałem z wydawnictwa INTECH propozycję napisania rozdziału do książki traktującej o zagadnieniach tribologicznych, pt.: *Tribology - fundamentals and advancements* pod redakcją prof. Jürgena Gegnera z Uniwersytetu Siegen w Niemczech. W rozdziale przedstawiłem gruntowną analizę wybranych zjawisk występujących podczas przepływu smarów plastycznych przez elementy konstrukcyjne systemów smarowniczych.** Opublikowany materiał spotkał się z szerokim zainteresowaniem o czym świadczy ogólna liczba pobrań rozdziału w wersji elektronicznej z oficjalnej strony internetowej wydawnictwa INTECH (www.intechopen.com, na dzień 7 stycznia 2018 r.) wynosząca 3070, z czego 957 pobrań pochodziło z obszaru Stanów Zjednoczonych:

Paszkowski Maciej: „*Some aspects of grease flow in lubrication systems and friction nodes*” w książce *Tribology - fundamentals and advancements* (red. Jürgen Gegner), InTech, Rijeka, Chorwacja, 2013, s. 77-106, ISBN 978-953-51-1135-1 (**liczba cytowań, wg bazy *Web of Science* na dzień 21 stycznia 2018 r.: 5**)

Po doktoracie stale uzupełniałem swoją wiedzę z zakresu reologii i tribologii środków smarnych, wykorzystując nowocześniejszą i dokładniejszą aparaturę pomiarową, w tym m.in.

reometr rotacyjny z łożyskowaniem powietrznym Physica Anton Paar MCR 101, zakupiony dzięki moim staraniom do laboratorium naukowo-dydaktycznego Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii Politechniki Wrocławskiej. Rezultaty badań dotyczących zjawiska tiksotropii smarów plastycznych, realizowanych w latach 2005-2008, uzupełnione o istotne wnioski oparte na doświadczeniu zdobytym po doktoracie, zostały opublikowane w pismach naukowych indeksowanych w bazie *Web of Science*:

Paszkowski Maciej: „*Assessment of the effect of temperature, shear rate and thickener content on the thixotropy of lithium lubricating greases*”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J, Journal of Engineering Tribology* 227 (3), 2013, s. 209-219 (**liczba cytowań, wg bazy *Web of Science* na dzień 21 stycznia 2018 r.: 3**)

Paszkowski Maciej, Olsztyńska Sylwia-Janus: „*Grease thixotropy: evaluation of grease microstructure change due to shear and relaxation*”, *Industrial Lubrication and Tribology* 66 (2), 2014, s. 223-237 (**liczba cytowań, wg bazy *Web of Science* na dzień 21 stycznia 2018 r.: 2**)

Za drugą, z wymienionych publikacji otrzymałem w roku 2015 nagrodę *Outstanding Paper Award Emerelad Literati Network*, przyznaną przez radę naukową pisma *Industrial Lubrication and Tribology*. Publikacje te, ze względu na ich ważność, umieściłem w cyklu powiązanych tematycznie prac naukowych, stanowiących podstawę do wszczęcia postępowania habilitacyjnego.

Moje dalsze badania naukowe opierały się przede wszystkim na wykorzystaniu nowej metody pomiarów reologicznych, tj. testów dynamiczno-oscylacyjnych, służących m.in. do oceny zmian jakie zachodzą w mikrostrukturze zagęszczacza smarów plastycznych w przebiegu tiksotropii. Zadowolony z wyników badań spektroskopowych prezentowanych we wcześniejszych pracach naukowych, poszukiwałem równolegle możliwości zastosowania metody FTIR-ATR do oceny szybkości odbudowy mikrostruktury zagęszczacza smarów plastycznych po procesie ich ścinania w elementach konstrukcyjnych systemów smarowniczych. Informacje takie pozwoliłyby eksploatatorom systemów smarowniczych na maksymalne zredukowanie skutków resolidyfikacji smarów litowych na funkcjonowanie tychże systemów, poprzez m.in. optymalne nastawy czasokresu smarowania. Uchwycenie szybkości zmian zachodzących w mikrostrukturze zagęszczacza dałoby jednocześnie pełen obraz mechanizmu tiksotropowego smarów plastycznych i stanowiłoby zwieńczenie moich badań doświadczalnych w tym zakresie. Cel został przeze mnie osiągnięty, a skutkiem udanego powiązania metod reologicznych i spektroskopowych w ocenie kinetyki procesu resolidyfikacji smarów litowych była bardzo dobrze przyjęta praca naukowa, opublikowana w piśmie *Tribology Letters*:

Paszkowski Maciej, Olsztyńska-Janus Sylwia, Wilk Iwona: „*Studies of the kinetics of lithium grease microstructure regeneration by means of dynamic oscillatory rheological tests and FTIR-ATR spectroscopy*”, *Tribology Letters* 56 (1), 2014, s. 107-117 (**liczba cytowań, wg bazy *Web of Science* na dzień 21 stycznia 2018 r.: 3**)

Wyniki kontynuowanych przeze mnie badań, dotyczących zjawiska tiksotropii smarów plastycznych prezentowałem na wielu konferencjach, w tym m.in. na *5th World Tribology Congress*, odbywającej się w Turynie:

Paszkowski Maciej, Olsztyńska-Janus Sylwia: „*Research on the kinetics of the lithium grease thixotropic microstructure reconstruction*”, 5th World Tribology Congress „WTC 2013”, 8-13 września 2013 r., Turyn, Włochy

Po wyjaśnieniu mechanizmu zmian tiksotropowych skupiłem się na **identyfikacji zjawisk przyściennych w smarach plastycznych, zachodzących podczas ich przepływu przez elementy konstrukcyjne systemów smarowniczych**. Specjalistyczna wiedza z tego zakresu mogłaby pozwolić konstruktorom systemów smarowniczych na ograniczenie oporów przepływu eksploatowanych w nich smarów plastycznych, poprzez odpowiedni dobór materiałów, głównie na przewody magistrali smarowej i doprowadzające. **W trakcie mojej pracy badawczej analizowałem zjawiska przyścienne zachodzące w smarach plastycznych przepływających w pobliżu materiałów elastomerowych, termoplastycznych oraz metalowych**. Do tego celu wykorzystaniem reometr rotacyjny, pracujący w układzie płytka-płytką. Badaniom poddałem głównie smary mydlane (konwencjonalne i kompleksowe) oraz polimocznikowe. Analizowałem wpływ materiału ścianki na zmiany wartości lepkości strukturalnej smarów w obszarze warstwy przyściennej oraz modułów zachowawczego i odzysku w zakresie liniowej i nieliniowej lepkośćsprężystości tych smarów. Wyniki moich prac opublikowałem w pismach *Colloids and Surfaces A – Physicochemical and Engineering Aspects* oraz *Journal of Tribology – Transactions of the ASME*:

Paszkowski Maciej: „*Effect of grease thickener and surface material on rheological properties of boundary layer*”, *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects* 486, 2015, s. 462-467 (**liczba cytowań, wg bazy Web of Science na dzień 21 stycznia 2018 r.: 5**)

Czarny Ryszard, Paszkowski Maciej, Knop Piotr: „*The wall effect in the flow of commercial lubricating greases*”, *Journal of Tribology - Transactions of the ASME* 138 (3), 2016, s. 031803-1 - 031803-6 (**liczba cytowań, wg bazy Web of Science na dzień 21 stycznia 2018 r.: 0**)

Najważniejszym efektem moich prac badawczych realizowanych w tym obszarze było **opracowanie całkowicie nowej metody oceny poślizgu smarów mydlanych przy ścianie materiału, poprzez analizę stopnia usieciowania ich mikrostruktury zagęszczacza w obszarze warstwy przyściennej**. Ciekawym jest również fakt, że zaproponowaną metodę można wykorzystać do oceny smarności smarów plastycznych, czyli ich zdolności do tworzenia warstwy granicznej, chroniącej powierzchnie robocze węzłów tarcia w warunkach smarowania elastohydrodynamicznego. Istotnym aspektem było również powiązanie stopnia usieciowania zagęszczacza w obszarze warstwy przyściennej z temperaturą smaru i energią powierzchniową materiału ścianki. Wyniki badań eksperymentalnych zostały opublikowane w 2017 roku w piśmie *Tribology Letters*:

Paszkowski Maciej, Wróblewski Roman, Walaszczyk Aleksandra: „*Studies of the influence of temperature and the energy state of the surface layer of adsorbents on wall effects in soap-based greases*”, *Tribology Letters* 65 (1), 2017, s. 1-11 (**liczba cytowań, wg bazy Web of Science na dzień 21 stycznia 2018 r.: 0**)

Moje doświadczenia w zakresie oceny zjawisk przyściennych zachodzących w smarach plastycznych przedstawiałem na wielu konferencjach o charakterze międzynarodowym i krajowym, w tym m.in. na 7th *International Colloids Conference* w Barcelonie, *International*

Symposium on Surfactants in Solution w Portugalii oraz *International Conference on Advances in Tribology* w Indiach:

Paszkowski Maciej, Wróblewski Roman, Walaszczyk Aleksandra: „*The influence of temperature and surface free energy of the wall material on rheological properties of boundary layer in lubricating greases*”, 7th International Colloids Conference, 18-21 czerwca 2017 r., Sitges, Barcelona, Hiszpania

Paszkowski Maciej: „*Effect of grease thickener and surface material on rheological properties of a wall layer*”, 20th International Symposium on Surfactants in Solution „SIS 2014”, 22-27 czerwca 2014 r., Coimbra, Portugalia

Paszkowski Maciej: „*Effect of grease thickener and surface material on rheological properties of a wall layer*”, International Conference on Advances in Tribology „ICAT 2014”, 21-24 lutego 2014 r., Calicut, Kerala, Indie

Oprócz badań doświadczalnych w zakresie identyfikacji zjawisk tiksotropowych i przyściennych zachodzących w smarach plastycznych, prowadziłem również szereg innych, dotyczących m.in. wpływu dodatków uszlachetniających (MoS₂, PTFE, grafitu i sproszkowanej miedzi) oraz temperatury na granicę płynięcia i energię kohezji handlowych smarów mydlanych. W czasie pracy na stanowisku adiunkta w charakterze nauczyciela akademickiego naukowo-dydaktycznego badałem także wpływ zjawiska triboelektryzacji węzłów tarcia na właściwości reologiczne smarów plastycznych i olejów smarnych. Wyniki tych badań zostały zaprezentowane na konferencjach o charakterze krajowym, tj. na XXXV i XXXVI *Jesiennej Szkole Tribologicznej*, odbywających się w latach odpowiednio 2016 i 2017. Od roku 2016 kieruję również projektem, mającym na celu opracowanie kompozycji smarowej do smarowania węzłów tarcia silnie obciążonych, zawierających w charakterze dodatków uszlachetniających struktury węglowe, w tym m.in. nanocząstki grafenu. W oparciu o badania wstępne nowej kompozycji smarowej zgłoszono wniosek do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej o udzielenie ochrony patentowej. Zaproponowany środek smarny ma spełniać wszystkie wymogi jakie stawiane są smarom plastycznym eksploatowanym w systemach smarowniczych, w tym dotyczących minimalizacji zjawisk obliteracji przewodów smarowych i rozdzielaczy systemów smarowniczych. Inne projekty, realizowane w ramach pracy naukowej w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii Politechniki Wrocławskiej, dotyczyły szeroko pojętej tribologii.

6

OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO I OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW STANOWIĄCYCH PODSTAWĘ WSZCZĘCIA POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO

6.1. Problematyka badawcza

Obserwowany w ostatnim czasie duży postęp w automatyzacji działania maszyn i urządzeń powoduje konieczność automatyzacji systemów ich smarowania. Wprowadzane obecnie powszechnie zautomatyzowane systemy centralnego smarowania są pożądane zarówno ze względów technicznych, ekonomicznych, jak również z uwagi na ochronę środowiska. Umiejętne, precyzyjne, racjonalne i zgodne z zapotrzebowaniem dozowanie środków smarnych zarówno w zakresie ilości jak i czasokresu smarowania skutkuje tym, że w

porównaniu ze smarowaniem tradycyjnym znacznie mniej tych środków przedostaje się do środowiska naturalnego. Niektóre źródła podają, że zużycie smarów plastycznych dostarczanych do punktów odbioru z wykorzystaniem systemów centralnego smarowania, może być nawet 90% mniejsze w stosunku do smarowania ręcznego. Jak wspomniano w *rozdziale 5.1*, aby system smarowniczy funkcjonował sprawnie to oprócz prawidłowego doboru jego elementów konstrukcyjnych równie istotną rzeczą jest znajomość właściwości reologicznych eksploatowanego w nim smaru plastycznego oraz jego zachowania się na każdym etapie dystrybucji w tymże systemie. Smar plastyczny powinien charakteryzować się możliwie jak najmniejszym oporem przepływu w magistrali smarowej, rozdzielaczach i przewodach doprowadzających, a jednocześnie posiadać odpowiednią konsystencję i zdolność wytworzenia wystarczająco grubego filmu smarnego na współpracujących powierzchniach węzła tarcia. Smary plastyczne są bardzo złożonymi reologicznie cieczami o budowie dwufazowej. Są to zatem układy polidispersyjne, chemicznie i fizycznie niejednorodne². Częstki zagęszczaczy w smarach plastycznych składają się z dużej liczby cząsteczek i stanowią odrębną fazę o określonej objętości fazowej i granicy międzyfazowej. Kształt cząstek zagęszczaczy mydlanych oraz innych organicznych i nieorganicznych, a także dyspersyjność i ich udział procentowy w pełnej objętości smaru, mają duży wpływ na własności fizyczne ostatecznej kompozycji smarowej. Te dwa ostatnie czynniki decydują m.in. o łatwości tworzenia się różnego rodzaju wiązań energetycznych między elementami mikrostruktury, a co za tym idzie o jej trwałości i stabilności mechanicznej podczas ścinania w systemach smarowniczych.

O pompowalności smarów plastycznych w systemach smarowniczych w danej chwili decydują oprócz warunków środowiska przede wszystkim aktualny stan mikrostruktury zagęszczacza oraz zjawisko tiksotropii. Jak wspomniano w *rozdziale 5.1*, zjawisko tiksotropii smarów plastycznych definiuje się jako częściowo odwracalną przemianę żel→żol→żel. Nie w każdych warunkach smary plastyczne wykazują takie właściwości. Podczas intensywnego ścinania smarów w węzłach tarcia silnie obciążonych, np. łożyskach tocnych, degradacja ich mikrostruktury jest nieodwracalna. W takich przypadkach gradient prędkości ścinania smaru w obszarze styku (między elementami tocznymi a bieżniami łożyska), podczas smarowania elastohydrodynamicznego wynosi około 10^7 s^{-1} , a w kieszeniach koszyka łożyska około 10^4 s^{-1} ³. Podczas ścinania smaru w tak ekstremalnych warunkach, dochodzi do wyraźnego spadku jego konsystencji w wyniku fizycznego, nieodwracalnego rozpadu mikrostruktury zagęszczacza, co z kolei powoduje przyspieszony wypływ oleju bazowego z węzła tarcia i zwiększenie jego kontaminacji. Wyciek ten wpływa również na trwałość eksploatowanego smaru i elementy konstrukcyjne łożyska. Degradacja częściowo odwracalna zachodzi podczas ścinania smaru w zakresie umiarkowanych lub małych gradientów prędkości ścinania, w tym m.in. podczas przepływu smaru przez elementy konstrukcyjne układów smarowniczych (przewody magistrali smarowej i doprowadzające, rozdzielacze dozujące, zawory) oraz w niektórych węzłach tarcia, w tym łożyskach wolnobrotowych, słabo obciążonych. Gradient prędkości ścinania w elementach konstrukcyjnych systemów smarowniczych waha się w zależności od ich konstrukcji w przedziale zwykle od 10^{-2} do 10^2 s^{-1} . W przypadku takiej

² Paszkowski M., *Some aspects of grease flow in lubrication systems and friction nodes*, w książce: *Tribology – fundamentals and advancements* (red. J. Gegner), InTech, Rijeka, Chorwacja, 2013, 77-106

³ Lugt, P. M., *Grease lubrication in rolling bearings*, John Wiley & Sons: Hoboken, Nowy Jork, USA, 2012

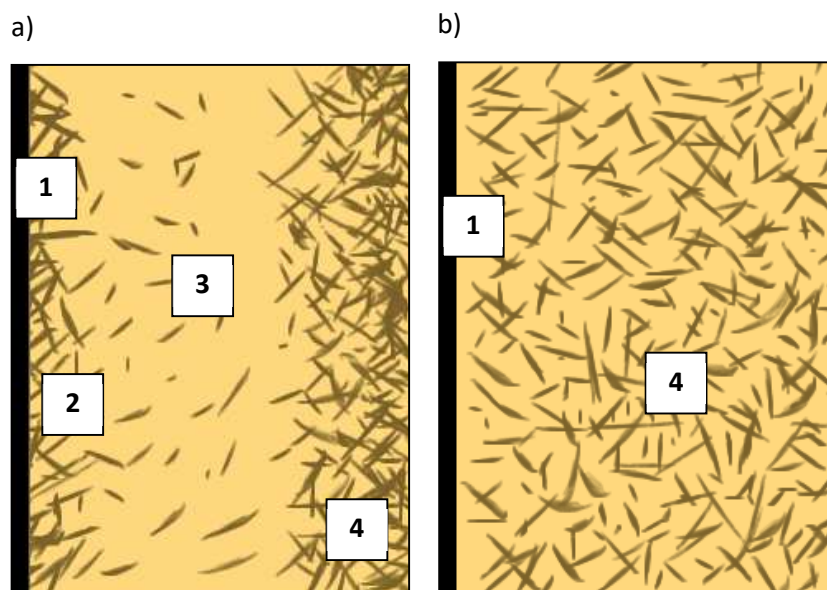
intensywności ścinania mikrostruktura zagęszczacza nie ulega nieodwracalnej degradacji i posiada ona możliwość częściowej odbudowy w fazie relaksacji smaru, w przerwach między kolejnymi etapami dozowania. Odbudowa wspomnianej mikrostruktury może spowodować wzrost lepkości strukturalnej smaru nawet o 25% w porównaniu z wartością tej lepkości, zmierzoną bezpośrednio po jego ścinaniu. **O ile zmiany właściwości reologicznych smarów plastycznych jakie zachodzą podczas ich ścinania (przemiana żel→zol) w układach smarowniczych są dość dobrze poznane i były tematem wielu prac naukowych, o tyle proces resolidyfikacji (przemiana zol→żel), a w szczególności ocena szybkości zmian jakie zachodzą w mikrostrukturze w czasie relaksacji smaru nie była dotąd wyjaśniana.**

Jak podkreślono w szczegółach w *rozdziale 5.1*, od smarów plastycznych wymaga się z jednej strony jak najlepszych właściwości tribologicznych, a z drugiej strony jak najmniejszych i niezależnych od warunków otoczenia oporów przepływu podczas ich eksploatacji. Podczas rozruchu węzła tribologicznego lub układu smarowniczego, przepływ smaru plastycznego rozpoczyna się tuż przy ścianie smarowanego lub transportującego ten smar elementu. **Największa wartość lepkości strukturalnej smaru występuje w momencie rozpoczęcia jego przepływu. Przy ścianie materiału, z którym smar plastyczny ma bezpośredni kontakt mogą kształtować się wówczas dwie warstwy: powierzchniowa i przyścienna, które mają inne właściwości reologiczne aniżeli masa smaru.** Tworzenie się warstwy przyściennej jest wynikiem grupowania się cząstek zagęszczacza na powierzchni ścianki materiału, z którym przepływający smar ma bezpośredni kontakt. Za grupowanie się cząstek na smarowanej powierzchni odpowiedzialne są przede wszystkim oddziaływania fizykochemiczne. W wyniku dyfuzji cząstek zagęszczacza na powierzchnię ścianki, w jej pobliżu tworzy się obszar zubożały w zagęszczacz, o zmniejszonej lepkości strukturalnej. Obszar ten posiada właściwości reologiczne zbliżone do cieczy newtonowskiej. Część asocjatów zostaje „wyciągnięta” z masy smaru. Struktura zagęszczacza jest w tym obszarze rozrzedzona i mniej usieciowana. Konsekwencją tego jest występowanie poślizgu smaru i zmniejszenie oporów jego przepływu w pobliżu ścianki. Zjawisko to z punktu widzenia reologii nazywane jest *efektem Segré-Silberberga*, *efektem sigma* lub po prostu *zjawiskiem przyściennym*. Po raz pierwszy zostało ono zauważone w roku 1962⁴. Na rys. 1 przedstawiono sposób formowania się warstw powierzchniowej i przyściennej w smarze plastycznym.

Zjawiska przyścienne odgrywają istotną rolę w oporach przepływu smarów plastycznych. Poprzez odpowiedni dobór materiałów konstrukcyjnych możemy ograniczyć te opory, w momencie rozruchu systemu smarowniczego nawet o 35%. Dotyczy to w szczególności smarów mydlanych, których cząstki zagęszczacza o kształcie anizometrycznym (w odniesieniu do ich długości i wymiarów poprzecznych) posiadają na swoich końcach centra aktywne. Wpływ formowania się warstwy przyściennej na spadek oporów przepływu smaru plastycznego jest szczególnie widoczny w przypadku przewodów osiowosymetrycznych o małych średnicach, gdzie przepływ smaru jest zwykle laminarny. Wytworzenie w smarze warstwy przyściennej prowadzi do zmniejszenia gradientu ciśnienia wzdłuż przewodu. Wraz ze wzrostem średnicy przewodu wpływ warstwy przyściennej na opory przepływu zdecydowanie maleje. Zjawiska przyścienne zachodzące w smarach plastycznych odgrywają również bardzo ważną rolę podczas smarowania stałych powierzchni roboczych węzłów

⁴ Segré G., Silberberg A., *Behavior of macroscopic rigid spheres in Poiseuille flow. Part II. Experimental results and interpretation*, Journal of Fluid Mechanics, 1962, 14, 136-157

tarcia. Smary plastyczne, mające zdolność tworzenia zubożonej w zagęszczacz warstwy przyściennej charakteryzują się większą smarnością podczas smarowania elastohydrodynamicznego łożysk tocznych, wskutek tworzenia przez nie trwałej warstwy powierzchniowej. Zależności te można dostrzec korelując badania reologiczne tych smarów z tribologicznymi, wykonanymi z wykorzystaniem interferometru optycznego pracującego w układzie kula-tarcza⁵. W literaturze przedmiotu można znaleźć również informacje na temat wpływu samego poślizgu smarów plastycznych w pobliżu elementów konstrukcyjnych łożysk tocznych na proces smarowania tych łożysk.



Rys. 1. Kształtowanie się warstw powierzchniowej i przyściennej w smarze płynącym w pobliżu ścianki materiału, który a) posiada zdolność do adsorpcji cząstek zagęszczacza, b) nie posiada zdolności do adsorpcji cząstek zagęszczacza, 1 – ścianka materiału, 2 – warstwa powierzchniowa (zaadsorbowane cząstki zagęszczacza smaru na powierzchni ścianki materiału), 3 – warstwa przyścienna (obszar zubożały w zagęszczacz, o mniejszej lepkości strukturalnej), 4 – masa smaru⁶

Podsumowując, w oparciu o dostępną literaturę naukową dotyczącą zjawisk przyściennych zachodzących w smarach plastycznych można stwierdzić, że:

1. Warstwa przyścienna zubożała w zagęszczacz zmniejsza opory przepływu smaru plastycznego w elementach konstrukcyjnych systemów smarowniczych (magistralach smarowych, przewodach doprowadzających, rozdzielaczach dozujących i zasilaczach) nawet o 35%.
2. Zaadsorbowana w wyniku zjawisk przyściennych warstwa zagęszczacza na stalowych powierzchniach roboczych węzłów tarcia, może decydować m.in. o smarności smaru plastycznego. Dotyczy to w szczególności wolnoobrotowych i słabo obciążonych węzłów tarcia.

Obecnie istnieje wiele prac dotyczących wpływu rodzaju smarów handlowych oraz materiałów ścianki i jej chropowatości na naprężenia styczne w obszarze warstwy

⁵ Couronné I., Vergne P., Mazuyer D., Truong-Dinh N., Girodin D., *Effects of grease composition and structure on film thickness in rolling contact*, Tribology Transactions, 2003, 46 (1), 31-36

⁶ Paszkowski, M., *Effect of grease thickener and surface material on rheological properties of boundary layer*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2015, 480, 462-467

przyściennej. Większość prac dotyczących tej tematyki opierała się głównie na badaniach reologicznych warstwy przyściennej w smarach, prowadzonych w układzie współosiowych cylindrów, przy narastającym gradiencie prędkości ścinania. Nie wykorzystywano do analizy zjawisk przyściennych o wiele dokładniejszych testów dynamiczno-oscylacyjnych, które potwierdziłyby zmniejszone usieciowanie zagęszczacza w obszarze warstwy przyściennej. Dokonując wnikliwego przeglądu literaturowego nie znalazłem również prac naukowych, które korelowałyby stan energetyczny warstwy wierzchniej materiałów ścianki z intensywnością zjawisk przyściennych w smarach plastycznych z różnymi rodzajami zagęszczacza.

6.2. Cel naukowy

Celem moich prac naukowo-badawczych, przedstawionych do oceny w ramach postępowania habilitacyjnego było znalezienie przyczyn oraz implikacji zjawisk tiksotropowych i przyściennych zachodzących w smarach plastycznych eksploatowanych w systemach smarowniczych, a także ocena intensywności przebiegu tych zjawisk.

Zakres tematyczny zawarty w przedstawionym do oceny cyklu publikacji, stanowiącym podstawę do wszczęcia przewodu habilitacyjnego, obejmuje:

1. Analizę mechanizmu zmian strukturalnych zachodzących w procesie resolidyfikacji smarów plastycznych eksploatowanych w systemach smarowniczych oraz określenie szybkości tych zmian.
2. Analizę wpływu rodzaju zagęszczacza w smarach plastycznych, temperatury oraz stanu energetycznego warstwy wierzchniej elementów konstrukcyjnych systemu smarowniczego na zjawiska przyścienne.
3. Propozycję nowej, dokładniejszej metody oceny zjawisk przyściennych w smarach mydlanych, poprzez pomiar stopnia usieciowania mikrostruktury tych smarów w pobliżu powierzchni elementów konstrukcyjnych systemu smarowniczego z wykorzystaniem reologicznych testów dynamiczno-oscylacyjnych.

6.3. Osiągnięte wyniki

Wyniki badań resolidyfikacji smarów plastycznych w przebiegu tiksotropii

Pierwszym etapem prowadzonych przeze mnie badań doświadczalnych była ocena kinetyki odbudowy mikrostruktury zagęszczacza smaru mydlanego w fazie jego relaksacji, po procesie ścinania w warunkach panujących w systemach smarowania maszyn. Prace doświadczalne prowadzone w tym zakresie były kontynuacją wcześniejszych moich badań, omówionych szczegółowo w *rozdziale 5.1*, w których stwierdziłem, że istnieje niejednoznaczna relacja między temperaturą smaru litowego, gradientem prędkością jego ścinania, udziałem procentowym zagęszczacza a odbudową mikrostruktury i wzrostem lepkości strukturalnej tego smaru. Nie wyjaśniłem wówczas zmian jakie zachodzą w mikrostrukturze zagęszczacza w fazie relaksacji smaru, ze szczególnym uwzględnieniem punktu płaszczyzny odpowiedzi, gdzie przyrost lepkości strukturalnej był największy. Warunki te są niebezpieczne z punktu widzenia prawidłowego funkcjonowania systemów smarowniczych, gdyż powodują największy wzrost oporów przepływu eksploatowanych w nich smarów plastycznych zagęszczanych 12-

hydroksystearynianem litu. **Do badań kinetyki odbudowy mikrostruktury zagęszczacza litowego wykorzystałem reologiczne testy dynamiczno-oscylacyjne. Przeanalizowałem zmiany wartości modułów zachowawczego i stratności badanego smaru w fazie relaksacji, w zakresie jego liniowej lepkości stosując trójinterwałowy test tiksotropowy (3ITT). Test ten umożliwił mi oszacowanie ilościowe (w %) odbudowy mikrostruktury zagęszczacza w 60 minucie i po 24-godzinnej relaksacji smaru. Dodatkowo oceniłem stabilność mechaniczną mikrostruktury zagęszczacza przy zmiennej częstotliwości oscylacji i stałej amplitudzie odkształcenia. Badania przeprowadziłem po 1-godzinnym ścinaniu smaru w warunkach ustalonych i po 3, 6, 12 oraz 24 godzinach jego relaksacji, co było nowością w tego typu badaniach. Znając wartość odkształcenia krytycznego oraz modułu zachowawczego w punkcie stanowiącym granicę liniowej lepkości, na poszczególnych etapach 24-godzinnej resolidyfikacji smaru, wyznaczyłem zmiany gęstości jego energii kohezji (w $J \cdot m^{-3}$). Gęstość energii kohezji służy do ilościowej oceny stopnia i siły flokulacji cząstek fazy zdyspergowanej w układzie heterogenicznym. Jest ona miarą sumy wszystkich oddziaływań fizykochemicznych między tymi cząstkami. Im wyższa wartość gęstości energii kohezji, tym mikrostruktura jest bardziej sflokułowana⁷. Gęstość energii kohezji powiązana jest z naprężeniem w smarze według zależności zaproponowanej przez Tadrosa⁸. Zależność ta nie była wcześniej wykorzystywana w ocenie właściwości reologicznych smarów plastycznych.** Cennym uzupełnieniem badań reologicznych okazały się badania spektroskopowe FTIR-ATR, wykonane na spektrofotometrze z przystawką grzewczą z kryształem diamentu. Zastosowana przystawka umożliwiała rejestrowanie widm w stałej temperaturze. W trakcie badań rejestrowano widma smaru przed ścinaniem, po ścinaniu oraz w trakcie 24-godzinnej resolidyfikacji. **Podczas resolidyfikacji smaru, zmiany zachodzące w próbce rejestrowano w jednoczynowych odstępach czasu w ciągu pierwszej godziny oraz w 15-minutowych odstępach w kolejnych 23 godzinach procesu. Tego typu metodę badawczą do oceny mikrostruktury smaru plastycznego w fazie jego resolidyfikacji zastosowano po raz pierwszy.**

Badania doświadczalne wykazały, że smary zagęszczane 12-hydroksystearynianem litu, wytworzone na bazie oleju mineralnego wykazują silne właściwości tiksotropowe. W czasie ścinania smaru dochodzi do niszczenia usieciowanej mikrostruktury zagęszczacza. W procesie relaksacji naprężeń w smarze asocjaty mydła próbują wrócić do wyjściowego stanu równowagi, powodując przez to wzrost lepkości strukturalnej smaru. Potwierdza to analiza parametrów reologicznych i spektralnych. Przeprowadzone badania wskazują na to, że obie zastosowane metody pomiarowe, tj. reometria i spektroskopia oscylacyjna świetnie się uzupełniają w przypadku oceny zmian fizycznych i chemicznych jakie zachodzą w mikrostrukturze smaru litowego, podczas jego relaksacji po procesie ścinania. Badania reologiczne z wykorzystaniem 3-interwałowych testów tiksotropowych w zakresie liniowej lepkości wykazały istotny wzrost wartości modułu odzysku, przy jednoczesnym spadku wartości modułu stratności w czasie resolidyfikacji smaru litowego. Największe zmiany w mikrostrukturze zagęszczacza zauważyłem w ciągu pierwszej godziny relaksacji naprężeń w smarze. W tym czasie mikrostruktura odbudowała się w około 24%. Stopień odbudowy mikrostruktury po 24 godzinach wyniósł prawie 35%. Największe zmiany zachodzące w smarze

⁷ Tadros F. Th., *Rheology of dispersions: principles and applications*, John Wiley & Sons, USA, 2010

⁸ Tadros F. Th., *Use of viscoelastic measurements in studying interactions in concentrated dispersions*, Langumir, 1990, 6, 28-35

w ciągu pierwszej godziny jego resolidyfikacji potwierdziły badania stabilności mechanicznej siatki zagęszczacza przy zmiennej częstotliwości oscylacji oraz badania energii kohezji. Gęstość energii kohezji smaru w czasie 24-godzinnej relaksacji naprężeń wzrosła o ponad $30 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$ w stosunku do smaru bezpośrednio po ścinaniu. Analiza wyników uzyskanych z fourierowskiej spektroskopii w podczerwieni z metodą ATR pokazała, że wraz ze wzrostem czasu relaksacji nastąpiły zmiany konformacyjne dotyczące składników smaru. Największe zmiany absorbancji względnej w obrębie mikrostruktury zaobserwowałem dla pasm pochodzących od drgań asymetrycznych grupy karboksylowej $-\text{COO}^-$ zagęszczacza stearynianu i drgań grup hydrofobowych CH oleju bazowego, odpowiednio 8% i 14%. Po 24-godzinnej relaksacji wartości te wyniosły odpowiednio 19% i 23%. Mniejsze zmiany rzędu kilku procent zaobserwowałem dla grup metylowych i metylenowych pochodzących od cząsteczek 12-hydroksystearynianu litu. Potwierdza to fakt, że oddziaływania hydrofobowe biorą udział w procesie tworzenia się nowych struktur przestrzennych zagęszczacza. Nie wszystkie parametry spektralne uległy zmianom. Brak zmian stwierdziłem dla pasma drgań grup $-\text{CH}_2$ najbardziej wewnętrznych w łańcuchu oleju. Świadczy to o braku ich modyfikacji strukturalnych w trakcie procesu powrotu do równowagi. Proces ścinania nie wpływa na silne wiązania w oleju wynikające z sił przyciągania międzycząsteczkowego oddziałujących pomiędzy zagęszczaczem a składnikami oleju. Modyfikacjom ulegają jedynie końce łańcuchów i słabe oddziaływania pomiędzy nimi.

Wyniki badań zjawisk przyściennych w smarach plastycznych

Kolejnym etapem prowadzonych przeze mnie badań doświadczalnych, realizowanych po obronie pracy doktorskiej, była analiza *efektu Segré-Silberberga* w smarach plastycznych eksploatowanych w systemach smarowniczych, zwanego również *zjawiskiem przyściennym*. Opis zjawiska i jego wpływ na funkcjonowanie systemów smarowniczych przedstawiłem szczegółowo w *rozdziale 6.1*. W pracach dotyczących tego tematu badałem tworzenie się warstw powierzchniowej i przyściennej w kompozycjach smarowych wyprodukowanych w warunkach laboratoryjnych z zastosowaniem instalacji półtechnicznej modelującej warunki pracy instalacji przemysłowej do wytwarzania smarów plastycznych. Były to głównie smary zagęszczane mydłem litowym konwencjonalnym i kompleksowym, a także polimocznikiem. Udział procentowy zagęszczacza w smarach wynosił 10%, a fazą dyspersyjną był olej polialfaolefinowy (PAO). Dodatkowo poddałem również analizie smary handlowe zagęszczane mydłem litowym o odpowiednio drugiej i trzeciej klasie konsystencji (ŁT4-S2, ŁT4-S3), wapniowym (STP) oraz sulfonianem wapnia (HUTPLEX EP2), wytworzone na bazie oleju mineralnego. Zjawiska przyścienne obserwowałem w pobliżu ścianek płytek (adsorbentów) wykonanych z tworzyw elastomerowych: kauczuku silikonowego (MVQ), kauczuku akrylonitrylo-butadienowego (NBR), kauczuku etylenowo-propylenowo-dienowego (EPDM); tworzyw termoplastycznych: polietylenu (PE), poliamidu 6 (PA 6), polioksymetyleny (POM), politetrafluoroetyleny (PTFE) oraz metali: stopu aluminium 2017, stopu miedzi C11000, stopu brązu B476 i stali 304. Materiały te mogą być wykorzystywane do produkcji elementów konstrukcyjnych systemów smarowniczych w tym: magistrali smarowych, przewodów doprowadzających, dozowników, rozdzielaczy i zaworów. Umiejętny dobór tych materiałów może skutkować istotnym zmniejszeniem oporów przepływu smarów plastycznych, które mają z nimi bezpośredni kontakt. Badania reologiczne prowadziłem na reometrze rotacyjnym pracującym w układzie płytka-płyłka, a nie jak to miało miejsce w większości prac naukowych

dotyczących tego tematu, z wykorzystaniem współosiowych cylindrów. Jedną z wielu zalet zastosowania wrzeciona pomiarowego w postaci płytki było m.in. łatwiejsze przygotowanie adsorbentów, w pobliżu których analizowałem zjawiska przyścienne. Adsorbenty z tworzyw elastomerowych były wycinane z arkusza za pomocą wykrojnika, natomiast z tworzyw termoplastycznych i metali toczone na tokarce i poddawane dalszej obróbce wykończeniowej celem uzyskania odpowiedniej chropowatości. Należy zwrócić uwagę na fakt, że warunkiem zarejestrowania zjawisk przyściennych w smarach plastycznych jest zastosowanie adsorbentu o gładkiej powierzchni (średnia arytmetyczna odchylenie profilu chropowatości R_a poniżej $2\ \mu\text{m}$). Tak przygotowane materiały naklejałem na płytkę standardowego wrzeciona pomiarowego. Po każdorazowej modyfikacji wrzeciona wyznaczałem jego moment bezwładności i poddawałem kalibracji silnik reometru. **Ta autorska metoda modyfikacji głowicy pomiarowej reometru rotacyjnego umożliwiła mi wykorzystanie podczas pomiarów m.in. reologicznych testów dynamiczno-oscylacyjnych w celu dokładniejszej niż dotychczas analizy zjawisk przyściennych.** Formowanie się warstwy przyściennej w smarach w obecności różnych adsorbentów badałem dwuetapowo: przy zmiennym gradiencie prędkości ścinania oraz co jest nowością w warunkach ścinania oscylacyjnego o małej amplitudzie odkształcenia. W pierwszym etapie badań smary plastyczne ścinałem przy narastającym gradiencie prędkości ścinania w zakresie od 10^{-4} do $10^0\ \text{s}^{-1}$, co umożliwiło mi zarejestrowanie zmian lepkości strukturalnej oraz naprężenia stycznego w smarze w obszarze jego warstwy przyściennej. W drugim etapie smary plastyczne ścinałem oscylacyjnie przy stałej częstotliwości oscylacji, w określonym zakresie amplitudy odkształcenia, rejestrując wartości modułów zachowawczego i stratności w funkcji naprężenia. Dodatkowo wyznaczałem zmiany wartości modułu zachowawczego w punkcie krytycznym stanowiącym granicę liniowej lepkośćprężystości tego smaru. Moduł zachowawczy zmierzony w punkcie krytycznym stanowił miarę energii zachowanej i oddawanej w każdym cyklu odkształcenia smaru plastycznego. **W pracach doświadczalnych realizowanych w późniejszym okresie odkryłem nowe możliwości wykorzystania reologicznych testów dynamiczno-oscylacyjnych. Okazały się one bardzo pomocne w ocenie stopnia usieciowania mikrostruktury zagęszczacza w obszarze warstwy przyściennej smaru plastycznego powstałej na skutek adsorpcji fizycznej i chemicznej cząstek tej mikrostruktury na powierzchnię adsorbentu. Badałem zmiany wartości modułów zachowawczego i stratności oraz współczynnika tłumienia w zakresie liniowej lepkośćprężystości smaru przy stałej wartości jego odkształcenia i zmiennej częstotliwości oscylacji, co umożliwiło mi wyznaczenie modułu plateau dla obszaru przyściennego. Stanowi to nowość w reologicznych badaniach zjawisk przyściennych zachodzących w smarach plastycznych. Moduł plateau opisany szczegółowo w pracy Ferrego⁹ posłużył w tym przypadku do oceny stanu mikrostruktury zagęszczacza smarów w obszarze ich warstwy przyściennej.** Został on opracowany przez badaczy w oparciu o jedną z teorii dotyczącej dynamiki splątanych polimerów – model tubowy de Gennesa, nazywany również reptacyjnym¹⁰. Moduł plateau odzwierciedla architekturę molekularną fazy zdyspergowanej w układach dyspersyjnych. Wartość tego modułu jest odwrotnie proporcjonalna do tzw. masy cząsteczkowej splątania (ang. *entanglement molecular weight*), którą definiuje się jako masę cząsteczkową asocjacji pomiędzy sąsiednimi tymczasowymi punktami ich splątania wg modelu tubowego de Gennesa. W chwili obecnej, w aktualnej literaturze przedmiotu można

⁹ Ferry J. D., *Viscoelastic properties of polymers*, 3rd ed., Wiley, Nowy Jork, 1980

¹⁰ Gennes P. G., *Scaling concepts in polymer physics*, Cornell University Press, Nowy Jork, USA, 1979

znaleźć szereg informacji na temat nowych możliwości zastosowania modułu plateau do scharakteryzowania cech fazy zdyspergowanej układów dyspersyjnych. W przypadku badań reologicznych smarów plastycznych moduł plateau wyznaczałem stosując metodę MIN, zaproponowaną przez Wu^{11,12}. Należy w tym miejscu podkreślić, że dotychczasowe badania modułu plateau smarów plastycznych służyły jedynie do oceny stopnia usieciowania zagęszczacza znajdującego się w masie tych smarów. Przewagą badań doświadczalnych warstwy przyściennej w smarach plastycznych z wykorzystaniem zaproponowanej przez mnie metody jest to, że można za jej pomocą analizować z dużą dokładnością stopień powiązania ze sobą cząstek fazy zdyspergowanej. Ma ona jednak zastosowanie jedynie do smarów, których cząstki zagęszczacza mają kształt włókien. Dotychczasowa metoda reologiczna analizy zjawisk przyściennych poprzez pomiar naprężeń stycznych w smarze, powstających w wyniku odkształcenia fazy zdyspergowanej, nie dawała tylu informacji na temat stanu mikrostruktury zagęszczacza, a na uzyskane wyniki istotnie wpływała również lepkości kinematyczna ośrodka dyspersyjnego. **Zastosowanie reologicznych testów dynamiczno-oscylacyjnych zdecydowanie poszerzyło dotychczasową wiedzę na temat zjawisk przyściennych i pozwoliło na poznanie mechanizmu zmian zachodzących w mikrostrukturze zagęszczacza smaru plastycznego przepływającego w pobliżu dowolnego materiału. Analiza modułu plateau w obszarze warstwy przyściennej z wykorzystaniem nowej metody daje również szerokie możliwości pośredniej oceny zdolności wytwarzania przez smar plastyczny filmu smarnego na powierzchniach roboczych węzłów tribologicznych wykonanych z różnych materiałów. Zaproponowana metoda pomiarowa może być zatem cenna w przypadku oceny właściwości tribologicznych smarów plastycznych oraz w poszerzeniu wiedzy na temat mechanizmu smarowania nimi węzłów tribologicznych. W kolejnych badaniach podjąłem się oceny wpływu temperatury w zakresie od -20 do 60 °C na właściwości reologiczne warstwy przyściennej w smarach handlowych płynących w pobliżu adsorbentów. Istotnym osiągnięciem naukowym jest korelacja badań modułu plateau i zwilżalności adsorbentów, służąca ocenie wpływu swobodnej energii powierzchniowej warstwy wierzchniej tych adsorbentów na stopień usieciowania mikrostruktury zagęszczacza smaru w obszarze jego warstwy przyściennej.** Badania zwilżalności adsorbentów prowadziłem z wykorzystaniem goniometru. Swobodną energię powierzchniową adsorbentów obliczałem na podstawie pomiarów statycznego kąta ich zwilżania za pomocą pięciu cieczy wzorcowych, tj. wody czystej, diiodometanu, formamidu, glikolu etylenowego i gliceryny, korzystając z dwóch metod składowych dyspersyjnej i polarnej: Owensa-Wendta¹³ oraz Wu¹⁴.

Badania doświadczalne wykazały, że największe wartości lepkości strukturalnej badanych smarów plastycznych wytworzonych w warunkach laboratoryjnych i zagęszczanych odpowiednio mydłem litowym konwencjonalnym oraz kompleksowym, a także polimocznikiem zaobserwowano w pobliżu materiałów elastomerowych MVQ i NBR. W przypadku smaru litowego konwencjonalnego przyrost wartości lepkości strukturalnej był prawie identyczny dla obu tworzyw. Nieco mniejszą lepkość w pobliżu MVQ wykazywały dwa pozostałe smary, tj. smar litowy kompleksowy i polimocznikowy. Najmniejszą wartość lepkości

¹¹ Liu C., He J., Van Ruymbek E., Keunings R., Bailly, C., *Evaluation of different methods for the determination of the plateau modulus and the entanglement molecular weight*, Polymer, 2006, 47 (13), 4461-4479

¹² Wu S., *Chain structure and entanglement*, Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics, 1989, 27 (4), 723-741

¹³ Owens D. K., Wend R. C., *Estimation of the surface free energy of polymers*, Journal of Applied Polymer Science, 1969, 13, 1741-1747

¹⁴ Wu S., *Polymer interface and adhesion*, Marcel Decker, Nowy Jork, USA, 1982

zarejestrowałem w pobliżu materiału termoplastycznego PA 6 (w przypadku smarów mydlanych) oraz PE (w przypadku smaru polimocznikowego). Badanymi adsorbentami były: MVQ, NBR, PE, PA 6 i stop aluminium 2017. Różnice w wartościach lepkości strukturalnej zaobserwowane w obszarze warstwy przyściennej smarów mydlanych przepływających w pobliżu MVQ i PA 6 sięgały prawie 20 kPa·s, co stanowi 28%. Zdecydowanie mniejszy spadek lepkości strukturalnej zauważyłem dla smaru polimocznikowego i wynosił on 14%. Różnice w zmierzonej lepkości można tłumaczyć tym, że materiały mające zdolność adsorpcji cząstek zagęszczacza na swojej powierzchni powodują powstanie pewnej objętości smaru zubożonej w zagęszczacz, znajdującej się w określonej odległości od ścianki. Objętość ta charakteryzuje się zdecydowanie mniejszą wartością lepkości strukturalnej niż masa smaru. W przypadku materiałów nie posiadających zdolności adsorpcji cząstek zagęszczacza, rozkład tych cząstek w pełnej objętości smaru jest bardziej równomierny i nie ma wyraźnego, lokalnego spadku ich stężenia w pobliżu ścianki. Wartość lepkości strukturalnej smaru znajdującego się w warstwie przyściennej jest wówczas wyższa. Wyniki badań uzyskane podczas ścinania smarów z narastającym gradientem prędkości tego ścinania zostały potwierdzone w reologicznych testach dynamiczno-oscylacyjnych. Największe wartości modułu zachowawczego zmierzone w punkcie krytycznym zaobserwowałem dla wszystkich badanych smarów plastycznych w pobliżu materiałów elastomerowych MVQ i NBR. Najmniejszą wartość tego modułu zarejestrowałem z kolei dla smarów mydlanych, przepływających w pobliżu tworzywa termoplastycznego PA 6. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem reologicznych testów dynamiczno-oscylacyjnych pokazały również nieco odmienne zachowanie się smaru polimocznikowego przepływającego w pobliżu materiału termoplastycznego PE w porównaniu ze smarami mydlanymi.

Zaproponowana przeze mnie metoda została wykorzystana do zbadania zjawisk przyściennych zachodzących podczas przepływu handlowych smarów plastycznych, tj. ŁT4-S3 oraz STP. Badanymi adsorbentami były: MVQ, NBR, PE, stop miedzi C11000 oraz stali 304. Wyniki badań potwierdziły, że rodzaj materiału ścianki ma istotny wpływ na kształtowanie się warstwy przyściennej również w tych smarach plastycznych. Wykazałem, że największy wpływ na zmianę lepkości strukturalnej smarów w pobliżu ścianki mają stopy metali. Różnice w zmierzonych wartościach lepkości strukturalnej warstwy przyściennej smarów przepływających w pobliżu powierzchni wykonanych z tworzyw elastomerowych oraz stopów metali wyniosły aż prawie 50%. Również w tym przypadku wartości modułu zachowawczego zmierzone w punkcie krytycznym znalazły potwierdzenie w wynikach zmian lepkości strukturalnej uzyskanych przy narastającym gradiencie prędkości ścinania. Największe wartości tego modułu zarejestrowano dla materiałów elastomerowych oraz polioksometylenu, najmniejsze natomiast dla stopów metali. Mikrostruktura zagęszczacza w obszarze warstwy przyściennej powstającej w pobliżu ścianek metalowych charakteryzowała się zatem najmniejszą stabilnością mechaniczną. Wyniki badań reologicznych udowadniają, że poślizg badanych smarów handlowych ŁT4-S3 i STP w pobliżu elementów konstrukcyjnych systemów smarowniczych wykonanych ze stopów miedzi C11000 lub stali 304 może przyczynić się do istotnego zmniejszenia oporów przepływu tych smarów, w początkowej fazie ich płynięcia.

Podczas analizy wpływu temperatury w zakresie od -20 do 60 °C oraz swobodnej energii powierzchniowej adsorbentów na intensywność zjawisk przyściennych badałem dwa smary plastyczne, tj. ŁT4-S2 oraz HUTPLEX EP2. Smary charakteryzowały się bardzo zbliżonymi

dopuszczalnymi zakresami temperatury eksploatacji oraz tą samą klasą konsystencji. Oba zostały wytworzone na bazie oleju mineralnego, przy czym baza olejowa HUTPLEX EP2 posiadała pięciokrotnie większą wartość lepkości kinematycznej od bazy olejowej ŁT4-S2. Badanymi adsorbentami były w tym przypadku: EPDM, PU, PTFE, stopy miedzi C11000 oraz brązu B476. Wyniki badań wykazały, że temperatura ma istotny wpływ na intensywność zjawisk przyściennych w tych powszechnie dostępnych i popularnych smarach plastycznych. Smar ŁT4-S2 w temperaturze -20 °C charakteryzował się zdecydowanie większą wartością lepkości strukturalnej w pobliżu badanych adsorbentów od smaru HUTPLEX EP2. Różnice w zarejestrowanych wartościach lepkości były bardzo duże i wynosiły około 80%. W przypadku smaru litowego w temperaturze ujemnej nie było widać wyraźnego wpływu materiału ściarki na formowanie się warstwy przyściennej. Z kolei w przypadku smaru zagęszczanego sulfonianem wapnia różnice w wartościach lepkości strukturalnej zarejestrowanych w pobliżu adsorbentów były duże i sięgały 67 kPa·s. W zakresie wartości temperatury od 0 do 60 °C oba smary mydlane przepływające w pobliżu adsorbentów zachowywały się bardzo podobnie. Największy wpływ materiału ściarki na zmiany strukturalne w obszarze warstwy przyściennej badanych smarów można było zaobserwować w temperaturze 60 °C. Wynikało to najprawdopodobniej ze zwiększonej ruchliwości cząstek zagęszczaczy mydlanych w obu smarach, na skutek zmniejszenia się lepkości baz olejowych wraz ze wzrostem temperatury. W tym przypadku widoczne było intensywne tworzenie się warstwy powierzchniowej smarów na adsorbentach metalowych, w odróżnieniu od kauczuku EPDM i tworzywa termoplastycznego PU. W kolejnym etapie badań oceniałem korelacje między stanem energetycznym warstwy wierzchniej adsorbentów a stopniem usieciowania mikrostruktury zagęszczaczy w obszarze warstwy przyściennej smarów w warunkach, w których wpływ materiału ściarki był najbardziej widoczny, tj. w temperaturze 60 °C. Największe wartości swobodnej energii powierzchniowej (SEP) wśród badanych adsorbentów zaobserwowałem dla stopu miedzi C11000 i wyniosły one odpowiednio 38.0 oraz 39.8 mJ/m² dla metod Owensa-Wendta oraz Wu. Wartości te były nieznacznie większe od drugiego z badanych stopów – brązu B476. W przypadku kauczuku EPDM wartości SEP wyniosły 31.9 oraz 33.4 mJ/m². Najmniejszą energię powierzchniową ze wszystkich badanych materiałów wykazywał natomiast PTFE, tj. 25.7 oraz 29.1 mJ/m². Wartości te były mniejsze od C11000 o odpowiednio 12.3 oraz 10.7 mJ/m². Wyniki badań doświadczalnych wskazują na to, że zachodzi silna korelacja między średnimi wartościami modułu plateau a stanem energetycznym warstwy wierzchniej badanych adsorbentów. Wartości modułu plateau dla smarów mydlanych przepływających w pobliżu czterech z pięciu badanych materiałów malała wraz ze wzrostem ich swobodnej energii powierzchniowej. Wyjątek w tym przypadku stanowił PTFE, którego warstwa wierzchnia charakteryzowała się najmniejszą energią powierzchniową ze wszystkich badanych materiałów. Wskazuje to na istnienie pewnego progu energetycznego (minimalnej wartości SEP adsorbentów), w przypadku którego następuje całkowity poślizg smaru przy ściarence, bez dyfuzji asocjantów zagęszczacza mydlanego na smarowaną powierzchnię. W takich przypadkach również wytwarza się warstwa zubożała w zagęszczacz, charakteryzująca się małym stopniem usieciowania mikrostruktury i inicjująca poślizg smaru. Największe wartości modułu plateau zarejestrowano w pobliżu EPDM i wyniosły one dla smarów ŁT4-S2 oraz HUTPLEX EP2 odpowiednio 34.3 oraz 24.8 kPa. W przypadku zastosowania adsorbentu w postaci stopu miedzi C11000 wartości modułu plateau smarów ŁT4-S2 oraz HUTPLEX EP2 były wyraźnie mniejsze i wyniosły odpowiednio 24.4 oraz 19.6 kPa. Smar HUTPLEX EP2

przeptywający w pobliżu badanych adsorbentów wykazywał zdecydowanie mniejsze wartości modułu plateau w porównaniu ze smarem ŁT4-S2. Mimo faktu, że smar HUTPLEX EP2 posiadał bazę olejową o większej lepkości kinematycznej, to cząstki sulfonianu wapnia łatwiej dyfundowały na powierzchnię ścianek adsorbentów, tworząc jednocześnie zubożałą w zagęszczacz warstwę przyścienną. Celem uzupełnienia, należy również podkreślić, że badania modułu plateau przeprowadzone dla masy smarów handlowych ŁT4-S2 oraz HUTPLEX EP2 za pomocą standardowej płytki piaskowanej, wykonanej ze stali 316L o chropowatości $Ra = 2.8 \mu m$, nie wskazały istotnych różnic w stopniu usieciowania mikrostruktury ich zagęszczaczy. Z wyników badań doświadczalnych można wywnioskować zatem jednoznacznie, że swobodna energia powierzchniowa adsorbentów wynikająca ze struktury elektronowej ich warstwy wierzchniej implikuje takie zjawiska reologiczne i tribologiczne jak poślizg smaru plastycznego przy ściankach elementów konstrukcyjnych układów smarowniczych oraz tworzenie się filmu smarnego na powierzchniach roboczych węzłów tarcia. W przypadku smarów plastycznych duża wartość energii powierzchniowej adsorbentów inicjuje poślizg smaru przy ściance tych adsorbentów, co jest istotnym spostrzeżeniem. Jak wykazano w literaturze przedmiotu innych badaczy^{15,16}, wpływ swobodnej energii powierzchniowej adsorbentów na zachowanie się olejów smarnych mających z nimi bezpośredni kontakt jest z kolei zdecydowanie odmienny. Duża wartość energii powierzchniowej adsorbentów utrudnia poślizg oleju smarnego przy ściance, co w konsekwencji może prowadzić do zwiększenia oporów przepływu tego oleju przez elementy konstrukcyjne układów smarowniczych.

Podsumowanie

Głównym celem prowadzonych przeze mnie prac naukowo-badawczych było prognozowanie intensywności przebiegu zjawisk tiksotropowych i przyściennych występujących w smarach plastycznych przepływających przez elementy konstrukcyjne układów smarowania maszyn w ujęciu jakościowym. Podczas badań uwzględniono typowe warunki panujące w czasie eksploatacji zautomatyzowanych układów smarowniczych. Istotnym osiągnięciem naukowym była także identyfikacja przyczyn oraz implikacji obserwowanych zjawisk z punktu widzenia funkcjonowania tych układów. Intensywność odbudowy mikrostruktury smaru plastycznego z zagęszczaczem litowym w przebiegu tiksotropii zbadałem z wykorzystaniem reometrycznych i spektroskopowych metod badawczych. Ocenie ilościowej podlegała zmiana parametrów reologicznych i spektralnych badanego smaru. Obie wspomniane metody pozwoliły na uchwycenie zmian fizycznych i chemicznych zachodzących w mikrostrukturze zagęszczacza smaru plastycznego w funkcji czasu relaksacji, które decydują o istotnym wzroście lepkości strukturalnej tego smaru po procesie jego ścinania w układzie smarowniczym. Uzyskane wyniki badań doświadczalnych wskazują na to, że istnieje możliwość takiego sterowania intensywnością przepływu i czasem dozowania smarów litowych aby wyraźnie zredukować wpływ odbudowy ich mikrostruktury na generowanie dodatkowych oporów przepływu. **Ze względu na to, że intensywność zmian zachodzących w mikrostrukturze zagęszczacza jest największa w ciągu pierwszej godziny**

¹⁵ Kalin M., Polajnar M., *The effect of wetting and surface energy on the friction and slip in oil-lubricated contacts*, Tribology Letters, 2013, 52 (2), 185–194

¹⁶ Kalin M., Velkavrh I., Vižintin J., *The stribeck curve and lubrication design for non-fully wetted surfaces*, Wear, 2009, 267 (5–8), 1232–1240

relaksacji smaru litowego, najbardziej optymalnym wydaje się zatem dawkowanie do węzłów tarcia małych objętości smarów litowych w możliwie najkrótszych odstępach czasu (poniżej jednej godziny), co umożliwi większą kontrolę i precyzję procesu smarowania za pomocą zautomatyzowanych układów smarowania maszyn.

W oparciu o aktualną literaturę przedmiotu, można również stwierdzić, że istotnie poszerzyłem stan wiedzy na temat zjawisk przyściennych zachodzących w smarach plastycznych mających bezpośredni kontakt ze smarowanym materiałem. Badania doświadczalne wykazały, że intensywność zjawisk przyściennych występujących podczas eksploatacji smarów plastycznych w układach smarowania maszyn zależy od rodzaju smaru, temperatury oraz materiałów zastosowanych na elementy konstrukcyjne tych układów, w tym przede wszystkim stanu energetycznego ich warstwy wierzchniej. Wymienione czynniki powodują lokalne zmiany stopnia usieciowania mikrostruktury zagęszczacza smarów plastycznych oraz ich lepkości strukturalnej i naprężenia stycznego. Mikrostruktura smaru plastycznego znajdująca się w pobliżu materiału mającego zdolność do intensywnej adsorpcji fizycznej i chemicznej cząstek zagęszczacza charakteryzuje się zdecydowanie mniejszym stopniem usieciowania oraz mniejszą trwałością i stabilnością mechaniczną, co prowadzi w konsekwencji do powstania dużych gradientów prędkości ścinania w pobliżu smarowanego materiału. **Wyniki badań pokazały, że odpowiedni dobór materiałów na elementy konstrukcyjne układów smarowniczych powoduje zmniejszenie lepkości strukturalnej smaru plastycznego w obszarze jego warstwy przyściennej nawet o kilkadziesiąt procent, a to z kolei może przekładać się na istotną redukcję oporów przepływu smarów transportowanych za pomocą tych układów w momencie rozruchu pompy smarowniczej. Potwierdziłem tym samym tezę, że kryterium doboru materiałów w szczególności na przewody smarowe układów smarowniczych powinno obejmować również zdolność wytwarzania przez nie warstwy przyściennej w smarach plastycznych celem zredukowania oporów przepływu tych smarów. W szczególności dotyczy to układów, gdzie smar plastyczny transportowany jest na duże odległości. W chwili obecnej głównymi kryteriami doboru materiałów na przewody jest ich wytrzymałość mechaniczna (w tym graniczna wartość ciśnienia roboczego) i zakres temperatury eksploatacji.**

Wyniki prowadzonych przeze mnie badań wskazują na to, że wiedza z zakresu prognozowania intensywności przebiegu zjawisk tiksotropowych i przyściennych może mieć istotne znaczenie dla konstruktorów i użytkowników szczególnie rozległych systemów smarowniczych, których eksploatacja jest wyjątkowo trudna i wymaga dużej wiedzy teoretycznej i praktycznej. Może się ona jednocześnie przyczynić do większej precyzji smarowania i bardziej racjonalnego zużycia środków smarnych w postaci smarów plastycznych.

7

PODSUMOWANIE DZIAŁALNOŚCI NAUKOWO-BADAWCZEJ

Tabela 1. Zestawienie liczbowe artykułów w czasopismach naukowych, monografiach oraz rozdziałów w monografiach i opracowaniach zwartych bez materiałów konferencyjnych, przed i po uzyskaniu stopnia doktora

Rodzaj publikacji	Liczba publikacji	
	przed uzyskaniem stopnia doktora	po uzyskaniu stopnia doktora
Artykuły naukowe w czasopismach punktowanych MNiSW (część A)	0	7
Artykuły naukowe w czasopismach punktowanych MNiSW (część B)	3	11
Artykuły naukowe indeksowane w bazie <i>Web of Science</i>	0	8
Artykuły naukowe w pozostałych czasopismach	1	3
Autorstwo monografii	0	1
Rozdziały w monografiach i opracowaniach zwartych	0	2
Liczba publikacji międzynarodowych	2	12
Liczba publikacji krajowych	2	12
łącznie liczba publikacji	4	24

Tabela 2. Zestawienie liczbowe referatów, streszczeń, komunikatów, wystąpień na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych, przed i po uzyskaniu stopnia doktora

Rodzaj konferencji	Forma prezentacji	Liczba prezentacji	
		przed uzyskaniem stopnia doktora	po uzyskaniu stopnia doktora
Międzynarodowa	wykład	4	3
	plakat	0	11
Krajowa	wykład	3	14
	plakat	0	0
łącznie liczba prezentacji		7	28

Tabela 3. Zestawienie liczbowe cytowań publikacji wg baz cytowań: *Web of Science*, *Scopus* oraz *Google Scholar* (nie wliczając autocytowań) przed i po uzyskaniu stopnia doktora¹⁷

Baza cytowań	Liczba cytowań	
	przed uzyskaniem stopnia doktora	po uzyskaniu stopnia doktora
Web of Science	0	35 (47)
Scopus	0	22
Google Scholar	0	59
Indeks Hirscha na podstawie bazy <i>Web of Science</i>	0	3 (4)

Tabela 4. Zestawienie liczbowe patentów międzynarodowych i krajowych, zgłoszeń patentowych oraz opracowań wdrożeniowych przed i po uzyskaniu stopnia doktora

Patenty, zgłoszenia patentowe oraz wdrożenia	Liczba dokumentów	
	przed uzyskaniem stopnia doktora	po uzyskaniu stopnia doktora
Uzyskane patenty międzynarodowe	0	0
Uzyskane patenty krajowe	0	0
Zgłoszenia patentowe	0	2
Wdrożone rozwiązania konstrukcyjne, technologiczne	0	0
Łączna liczba dokumentów	0	2

Tabela 5. Zestawienie liczbowe wykonanych recenzji artykułów w czasopismach naukowych, przed i po uzyskaniu stopnia doktora

Rodzaj czasopisma	Liczba recenzji	
	przed uzyskaniem stopnia doktora	po uzyskaniu stopnia doktora
Ze wskaźnikiem <i>Impact Factor (IF)</i>	0	5
Bez wskaźnika <i>Impact Factor (IF)</i>	0	2
Łączna liczba recenzji	0	7

¹⁷ W nawiasach podano liczbę cytowań publikacji oraz obliczony Indeks Hirscha uwzględniając cytowania w źródłach oczekujących na rejestrację w bazie *Web of Science*. Wykaz wspomnianych źródeł znajduje się w załączniku IV.

Tabela 6. Zestawienie liczbowe udziałów w projektach międzynarodowych i krajowych, przed i po uzyskaniu stopnia doktora

Rodzaj projektu	Liczba projektów	
	<i>przed uzyskaniem stopnia doktora</i>	<i>po uzyskaniu stopnia doktora</i>
Międzynarodowy	0	0
Krajowy	1	3
Łączna liczba projektów	1	3

Szczegółowy opis osiągnięć naukowo-badawczych przedstawiono na podstawie kryteriów zdefiniowanych w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 r., art. 3 pkt 4 w obszarze nauk technicznych, art. 4 określający kryteria oceny w zakresie osiągnięć naukowo-badawczych dla wszystkich obszarów wiedzy oraz art. 5 w zakresie dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego oraz współpracy międzynarodowej we wszystkich obszarach wiedzy (Dz. U. nr 19, poz. 1165) i znajduje się on w kolejnych załącznikach wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego.



.....
Maciej Paszkowski