

prof. dr hab. Marzena Dzida
Uniwersytet Śląski w Katowicach
Instytut Chemii
ul. Szkolna 9
40-006 Katowice

Katowice, dnia 26 maja 2026 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej magistra inżyniera Wiktora Stanka,
z tytułu „Ocena właściwości tribologicznych i możliwości
zastosowania nanocząstek metalicznych i tlenkowych w innowacyjnych
produktach chłodząco-smarujących, wykorzystywanych
w procesie obróbki metali”**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Wiktora Stanka powstała w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” w Katedrze Technologii i Chemii Materiałów Uniwersytetu Łódzkiego oraz w firmie FUCHS OIL Corporation (PL) Sp. z o.o. Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. Michał Cichomski, prof. UŁ, natomiast funkcję opiekuna z ramienia partnera przemysłowego pełni dr inż. Tadeusz Hładki.

W recenzowanej pracy mgr inż. Wiktor Stanek postawił sobie za cel opracowanie stabilnych, o ulepszonych właściwościach tribologicznych, nanofluidów na bazie wybranych dostępnych komercyjnie olejów. Ich zastosowanie ma ograniczyć tarcie i zużycie powierzchni trących, umożliwić wyższe prędkości skrawania oraz wydłużyć żywotność narzędzi skrawających.

Praca doktorska zasadniczo posiada układ stosowany w tego typu opracowaniach i zawiera *Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów, Wprowadzenie, Analizę stanu wiedzy, Część doświadczalną, Wyniki badań, Podsumowanie i wnioski końcowe, Literaturę liczącą 173 pozycje, Streszczenie, Abstract, Dorobek naukowy oraz Załącznik zawierający Raport wdrożeniowy*. Materiał ten został zaprezentowany na 248 stronicach. *Analiza stanu wiedzy* została podzielona na 3 części, których celem jest wprowadzenie w przedmiot i zakres badań stanowiących rozprawę. Zarówno *Wprowadzenie* jak i zagadnienia omówione

w rozdziałach *Tribologia*, *mikro/nanotribologia*, *Ciecze chłodząco-smarujące*, *Nanotechnologia* zostały zaprezentowane przez pryzmat obróbki skrawaniem. Rozdział 3 *Nanotechnologia* mógłby mieć tytuł nanocząstki lub nanomateriały, co odpowiadałoby jego treści. Ponadto praca zyskałaby gdyby we wstępie teoretycznym znalazł się rozdział na temat stanu wiedzy o właściwościach nanofluidów z cieczami bazowymi tego samego lub podobnego typu co w pracy. Proszę zatem, aby na obronie Doktorant w zwarty sposób omówił to zagadnienie. Część teoretyczną kończy *Podsumowanie analizy stanu wiedzy*. *Część doświadczalną* otwiera rozdział *Cel i zakres pracy* w którym Doktorant sformułował zwięźle cel pracy oraz w formie graficznej zakres badań. W rozdziale *Obiekty badań i metody ich otrzymywania* Doktorant przedstawia i uzasadnia wybór przedmiotu badań. Jako fazę rozproszoną Doktorant wybrał nanocząstki srebra, tlenku bizmutu(III), siarczku bizmutu(III), tlenku miedzi(II), tlenku tytanu(IV) oraz siarczku wolframu(IV). Jako fazę rozpraszającą Doktorant wybrał ciecze chłodząco-smarujące na bazie olejów: mineralnego SN-70 i wzbogaconego dodatkami uszlachetniającymi HFN, nieemulgujących z wodą oraz ciecze chłodząco-smarujące na bazie olejów: mineralnego, półsyntetycznego, syntetycznego, emulgujących z wodą. Te ostatnie zostały rozcieńczone w wodzie tworząc odpowiednie emulsje E1, E2 i E3. W Tablicy 3 (str. 57) prezentującej właściwości cieczy bazowych nie została podana temperatura w której zmierzone zostało napięcie powierzchniowe oraz przewodnictwo właściwe cieczy chłodząco-smarujących. Dlaczego podana w Tablicy 3 (str. 57) zawartość wody wynosi ok. 90%? Skład chemiczny środków chłodząco smarujących będących przedmiotem badań albo nie jest podany albo jest podany ogólnikowo, dla przykładu: trójglicerydy, estry kwasów tłuszczowych – ok. 20 % lub sulfonowane węglowodory i kwasy tłuszczowe – ok. 10 % (str. 56). Rozumiem, że są to ciecze komercyjnie dostępne dlatego ich dokładny skład nie jest znany. Można jednak było pokusić się o zaproponowanie układu referencyjnego o ściśle określonym składzie. W rozdziale 6.4. *Otrzymywanie nanopłynów stosowanych w badaniach* Doktorant przedstawił sposób otrzymywania nanofluidów oraz wyniki badań ich stabilności wraz z wynikami analizy wpływu typu surfaktatu na stabilność nanofluidów. Jednak opisy otrzymywania nanofluidów oraz badania ich stabilności zostały przedstawione zbyt ogólnikowo. Z opisu wynika, że Autor nie kontrolował/stabilizował temperatury podczas

sonikacji, gdzie lokalnie może dochodzić do bardzo dużego jej wzrostu. Autor nie opisał w jakich warunkach przeprowadził badania stabilności sedymentacyjnej, takich jak: temperatura, dostęp do światła oraz w jakim okresie czasu prowadził badania. Tablice 6 i 7 (str. 60 i 61) nie zawierają składu badanych dyspersji (w tekście także nie został podany) jak również czasu po jakim dokonano badania stabilności sedymentacyjnej. W podpisie pod Rys. 22 (str. 62) również nie został podany skład dyspersji oraz czas po jakim dokonano obserwacji. Generalnie w pracy zabrakło zbiorczego zestawienia badanych nanofluidów, ze stężeniem nanocząstek i surfaktantu oraz nazwą cieczy bazowej. Proszę o przedstawienie takiego zestawienia na obronie. Spośród sześciu rozważanych surfaktantów (o niejasnych nazwach), stabilne sedymentacyjnie układy Doktorant otrzymał dla 2-heksylo-1-dekanolu. Dlatego też ten surfaktant został wybrany do dalszych badań. Rozdział 7 rozprawy zawiera opis metod badawczych stosowanych przez Doktoranta. W opisie nie zostały podane niepewności pomiarowe. Temperatura, w tym temperatura węzła tarcia, jest ważnym parametrem w badaniach tribologicznych. Jednak warunki temperaturowe podczas tych badań zostały omówione bardzo ogólnikowo. Proszę o omówienie pomiarów temperatury podczas obrony. Najbardziej obszerną część pracy, bo zajmującą aż 122 strony, stanowią *Wyniki badań*. W rozdziale 8 Doktorant przedstawia wyniki kompleksowych badań struktury nanocząstek. Tutaj można znaleźć również na ich temat informacje natury ogólnej. Informacje te mogły być z powodzeniem zamieszczone w podrozdziale 6.1. *Nanomateriały stosowane w badaniach*. W rozdziale 9 Doktorant prezentuje wyniki badań stabilności nanofluidów w okresie 4 tygodni oraz ich właściwości fizykochemiczne. Dla nanofluidów składających się z 0; 0,025; 0,05; 0,075; 0,1 i 0,15 % obj. nanocząstek oraz SN lub HFN, Doktorant zbadał gęstość, lepkość kinematyczną oraz napięcie powierzchniowe. Dla nanofluidów składających się z 0; 0,5; 1,0 i 1,5 % obj. nanocząstek oraz emulgującego z wodą oleju mineralnego, półsyntetycznego lub syntetycznego, Doktorant zbadał gęstość oraz lepkość kinematyczną. Natomiast dla emulsji zawierających 0; 0,05; 0,1 i 0,15 % obj. nanocząstek, Doktorant zbadał gęstość, lepkość kinematyczną, napięcie powierzchniowe, pH oraz przewodnictwo właściwe. Szczegółowa analiza wymienionych właściwości pozwoliła Doktorantowi wybrać do dalszych badań tribologicznych nanofluidy zawierające 0,05% obj. nanocząstek. Dodatkowo Autor zbadał stabilność sedymentacyjną nanofluidów

składających się z 2-heksylo-1-dekanolu oraz od 1,0 do 8,0% obj. badanych nanocząstek. Doktorant wykazał, że nanofluidy zawierające $\leq 5\%$ obj. nanocząstek są stabilne przez okres 4 tygodni. Podobnie jak w rozdziale 6.4. i tutaj Doktorant nie podał temperatury w jakiej badał stabilność nanofluidów. Ciekawe byłoby zbadanie stabilności sedymentacyjnej w różnych warunkach temperaturowych, odpowiadających warunkom pracy cieczy roboczej. W podpisie pod Rys. 56 (str. 104) nie podany został czas po którym dokonano obserwacji stabilności sedymentacyjnej. W rozdziale 9.4 (str. 119 i 123) dowiadujemy się, że napięcie powierzchniowe oraz przewodnictwo właściwe zostały zbadane w temperaturze otoczenia. Co to znaczy temperatura otoczenia? W kolejnym rozdziale Doktorant zaprezentował wyniki badań tribologicznych w mikro i makro skali z węzłem tarcia typu kula-tarcza, przy obciążeniu odpowiednio 100 mN i 30 N na dystansie 1000 m, dla wytypowanych nanofluidów zawierających olej nieemulgujący z wodą SN lub HFN oraz 0,05% obj. nanocząstek Ag, Bi_2O_3 , Bi_2S_3 , CuO, TiO_2 lub WS_2 . Na rysunku Rys. 67 b) (str. 130) można zauważyć zmianę przebiegu współczynnika tarcia w funkcji drogi dla układu HFN + Bi_2S_3 . Proszę o komentarz tego efektu. Przed i po badaniach tribologicznych Doktorant przeprowadził analizę topografii powierzchni kul i tarcz oraz określił wartości zużycia objętościowego tarcz i kul po badaniach tribologicznych. W przypadku badań w mikroskali największą redukcję tarcia wynoszącą $\sim 16\%$ Doktorant uzyskał dla nanofluidów na bazie oleju SN z nanocząstkami Bi_2S_3 i Ag. Dla nanofluidów na bazie oleju HFN redukcja tarcia wyniosła do $\sim 7\%$. Natomiast smarowanie olejem SN + 0,05% obj. Bi_2S_3 zmniejszyło zużycie objętościowe kul o ponad 93% w porównaniu do smarowania czystym olejem SN. Zastosowanie oleju HFN + 0,05% obj. Bi_2S_3 spowodowało około 84% redukcję objętościowego zużycia kul w porównaniu do zastosowania czystego oleju HFN. Przy zastosowaniu oleju SN z dodatkiem 0,05% obj. Bi_2S_3 Doktorant uzyskał zmniejszenie zużycia objętościowego dysku o prawie 81%. Z kolei przy zastosowaniu oleju HFN + 0,05% obj. Bi_2S_3 uzyskał redukcję zużycia objętościowego dysku o 98%. Oba wyniki w porównaniu do czystego oleju. W przypadku badań w makroskali największą redukcję tarcia wynoszącą 44% oraz 36% Doktorant uzyskał odpowiednio dla nanofluidów na bazie oleju SN oraz HFN z nanocząstkami Bi_2S_3 . Natomiast smarowanie olejem SN + 0,05% obj. Bi_2S_3 zmniejszyło zużycie objętościowe kul o ponad 72% w porównaniu do smarowania

czystym olejem SN. Zastosowanie oleju HFN + 0,05% obj. Bi_2S_3 spowodowało 47% redukcję objętościowego zużycia kul w porównaniu do zastosowania czystego oleju HFN. Przy zastosowaniu oleju SN z dodatkiem 0,05% obj. Bi_2S_3 zużycie objętościowe dysku zmniejszyło się o 83%. Z kolei przy zastosowaniu oleju HFN + 0,05% obj. Bi_2S_3 redukcja zużycia objętościowego dysku wyniosła 56%. Oba wyniki w porównaniu do zastosowania czystego oleju. Doktorant przeprowadził również analizę składu chemicznego na powierzchni tarcz w miejscach wytarcia. Oznaczył obecność pierwiastków takich jak Fe, Cr, Mn, Si, które wchodziły w skład stali C45, a także Ag, Bi, Cu, Ti, W i S, które pochodzą z zastosowanych nanocząstek. Zaobserwował akumulację siarki na powierzchni warstw wierzchnich podczas stosowania olejów z dodatkiem nanocząstek Bi_2S_3 i WS_2 , które w ten sposób utworzyły warstwę przeciwzużyciową. Dla tych samych nanofluidów w 11 rozdziale Doktorant zaprezentował wyniki badań tribologicznych z wykorzystaniem układu typu kula-kula. Ponownie, najlepsze wyniki Doktorant uzyskał dla nanofluidów z Bi_2S_3 . Dodatek 0,05% obj. Bi_2S_3 do SN spowodował obniżenie zużycia o 81% względem oleju bazowego. Natomiast obciążenie zatarcia wzrosło o 33% w odniesieniu do czystego oleju SN (pozwoliłam sobie na unifikację wyników do dwóch cyfr znaczących). Dodatek 0,05% obj. Bi_2O_3 do HFN spowodował obniżenie zużycia o 72% względem oleju bazowego. Z kolei dodatek 0,05% obj. Bi_2S_3 do HFN spowodował obniżenie zużycia o 67% względem oleju bazowego. Natomiast w przypadku obu nanofluidów obciążenie zatarcia wzrosło o 30% w porównaniu do czystego oleju. Najlepsze działanie tych nanofluidów Doktorant potwierdził badaniami spektrometrii fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją falową. Ostatnim przeprowadzonym przez Doktoranta testem były badania tribologiczne nanofluidów w skojarzeniu pary trącej „rolka-kłoczek”. W tych badaniach, obok testowanych wcześniej, Doktorant zbadał nanofluidy na bazie emulsji. W ten sposób Doktorant chciał ocenić synergistyczne efekty między cieczą chłodząco-smarującą a dodatkiem nanomateriałów w warunkach ekstremalnego ciśnienia. Tu rodzi się pytanie co to znaczy „ekstremalne ciśnienie”? Doktorant wykazał, że również w przypadku tych testów nanofluidy na bazie SN i HNF z 0,05% obj. Bi_2S_3 okazały się najlepsze. Zapewniały najniższe temperatury pracy, najniższe współczynniki tarcia, najwyższe wartości Bruggera oraz najmniejsze zużycie. Dodatkowo Doktorant poddał testom nanofluidy na bazie emulsji.

I po raz kolejny najbardziej korzystne wyniki uzyskał dla nanofluidów zawierających 0,05% obj. Bi_2S_3 . Dla nanofluidu E1 + 0,05% obj. Bi_2S_3 współczynnik tarcia zmniejszył się o 46% w stosunku do emulsji E1, jednocześnie temperatura pracy osiągnęła 35°C . Doktorant wykazał, że obniżenie temperatury koreluje z uzyskanymi minimalnymi śladami wytarcia, które były wyraźnie mniejsze niż dla emulsji referencyjnej E1 oraz pozostałych nanofluidów na bazie E1. Z kolei wartość Bruggera dla tego nanofluidu była 22 razy większa niż emulsji bazowej E1. Analogiczną tendencję zaobserwowano w przypadku objętościowego zużycia klocków, czyli ponad 115-krotną redukcję względem emulsji E1, co jest wynikiem bardzo niskiego oporu tarcia oraz wyjątkowej stabilności warstwy smarnej utworzonej przez nanocząstki Bi_2S_3 . Dla nanofluidu E2 + 0,05% obj. Bi_2S_3 współczynnik tarcia zmniejszył się o 43% w stosunku do emulsji E2. Jednocześnie temperatura pracy spadła z 69°C do 34°C , najniższej spośród wszystkich badanych układów, co znalazło odzwierciedlenie w minimalnych śladach zużycia na powierzchni klocka. Emulsja E2 osiągnęła wartość Bruggera równą 20 N/mm^2 , co stanowi najniższy wynik spośród badanych układów. Natomiast wartość Bruggera dla emulsji E2 + 0,05% obj. Bi_2S_3 była 23 razy większa niż emulsji bazowej E2. Ponownie w przypadku objętościowego zużycia klocków uzyskano ponad 111-krotną redukcję względem emulsji bazowej E2. Tak znaczna różnica jest w pełni zgodna z jednoczesnym obniżeniem współczynnika tarcia i temperatury pracy oraz stabilizacją warstwy smarnej. W przypadku nanofluidów na bazie emulsji E3 ponownie najlepsze właściwości charakteryzowały układ z 0,05% obj. Bi_2S_3 . Uzyskano zmniejszenie współczynnika tarcia o 47% w stosunku do emulsji E3, zmniejszenie temperatury pracy do 34°C , wartość Bruggera była 24 razy większa niż emulsji bazowej E3, a objętościowe zużycie klocków o ponad 139 razy mniejsze względem emulsji bazowej E3. W tym miejscu warto byłoby przeanalizować właściwości zaproponowanych przez Doktoranta nanofluidów na tle obecnego stanu wiedzy. Rozdział 13 stanowi opis badań przedwdrozeniowych toczenia wzdłużnego stali C45 z wykorzystaniem nanofluidów o najlepszych właściwościach tribologicznych, czyli na bazie emulsji E1, E2 i E3 z 0,05% obj. nanocząstek Bi_2S_3 lub Bi_2O_3 . Najlepsze wyniki Doktorant uzyskał dla nanofluidu na bazie emulsji E3 z dodatkiem 0,05% obj. nanocząstek Bi_2S_3 . Trwałość ostrza wzrosła o około 43% w porównaniu do zastosowania emulsji

bazowej E3, przy jednoczesnej najniższej chropowatości. Doktorant powinien pochylić się nad liczbą cyfr znaczących wyników prezentowanych w tablicach w tym rozdziale. W załączniku Doktorant zamieścił raport wdrożeniowy dla firmy Plast-Met Automotive Systems Sp. z o.o. z siedzibą w Olkuszu z przeprowadzonych testów w Zakładzie nr 2 podpisany przez Mariusza Stankiewicza oraz Łukasza Urbaniaka. Celem wdrożenia było zastosowanie syntetycznego chłodziwa z nanocząstkami do obróbki szlifierką do płaszczyzn KENT USA KGS1224AHD. Test trwał przez pięć miesięcy, przez pierwszy miesiąc stosowane było chłodziwo syntetyczne, a przez kolejne cztery miesiące chłodziwo syntetyczne z nanocząstkami. Podczas testu wyznaczano parametry cieczy roboczej takie jak: stężenie, przewodność właściwa, pH, skażenie mikrobiologiczne (bakterie, grzyby, drożdże), zawartość azotanów(III) oraz azotanów(V), wygląd oraz zawartość oleju obcego. Przeprowadzono również ford test korozji na wiórkach żeliwnych. W czasie testów nie stosowano środków pielęgnujących. Pomimo zanieczyszczenia olejem obcym i skażenia mikrobiologicznego, emulsja odzyskała stabilność oraz poprawiła swoje właściwości fizykochemiczne, co pozwoliło wydłużyć jej trwałość dzięki dolewaniu świeżego chłodziwa. Ponadto przeprowadzono serię kontrolnych analiz szlifowania stali C45 w celu oceny wpływu chłodziwa syntetycznego z dodatkiem nanocząstek na jakość wykończenia powierzchni. Badania wykazały, że zastosowanie emulsji wzbogaconej nanocząstkami znacząco poprawiło jakość obrabianej powierzchni, parametry chropowatości materiału po szlifowaniu poprawiły się z klasy 8 na 10. Dodatkowo wydłużyła się żywotność tarczy szlifierskiej z 6 do 9 tygodni, co przełożyło się na oszczędności w tym zakresie rzędu 25–30%. Podobną poprawę jakości wykończenia powierzchni uzyskano podczas szlifowania stali NC11LV stosowanej w przemyśle motoryzacyjnym. Jednak w całym raporcie nie znalazłam informacji o składzie chemicznym wdrożonego chłodziwa. Jeśli skład jest zastrzeżony to powinno to zostać jasno zaznaczone. W związku z tym, że Doktorant ubiega się o stopień doktora w dyscyplinie nauki chemiczne proszę, aby na obronie Doktorant omówił raport wdrożeniowy pod kątem chemicznym.

Podsumowując, najważniejszym osiągnięciem jest opracowanie przez Doktoranta innowacyjnych nanofluidów o polepszonych właściwościach tribologicznych, które poprawiają warunki pracy szlifierki. Zatem cel pracy został zrealizowany, prowadząc do

wdrożenia innowacyjnego nanofluidu w firmie Plast-Met Automotive Systems Sp. z o.o. Zaprezentowane przez mgr. inż. Wiktora Stanka rezultaty mają wartość zarówno poznawczą jak i użyteczną, stanowiąc ważny wkład do badań nad projektowaniem płynów roboczych o pożądanych właściwościach.

Doktorant opublikował wyniki swoich badań w dwóch pracach naukowych, jest współautorem jednego zgłoszenia patentowego oraz brał udział w jedenastu konferencjach.

Autor wykazał się starannością przy opracowywaniu dysertacji, wiadomo jednak, że w tak obszernym tekście nie można uniknąć błędów, a jednym z obowiązków recenzenta jest je wskazać. Pozwolę sobie zwrócić uwagę na kilka z nich. W pracy można znaleźć błędy edytorskie (np.: heksylodekanol, NO₂, NO₃) oraz błędy stylistyczne. Dla przykładu w rozdziale *Nanotechnologia*, na str. 40 Doktorant pisze: „*Inną kategorię stanowią kompozyty, które nie charakteryzują się innym rodzajem wiązań w stosunku do wymienionych trzech, ponieważ powstają przez powiązanie wiązań atomowych.*” Proszę o wyjaśnienie tego stwierdzenia. Jednak błędy te nie mają wpływu na wartość merytoryczną ocenianej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Wiktora Stanka.

Podsumowując, stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca doktorska mgr. inż. Wiktora Stanka stanowi oryginalne rozwiązanie interdyscyplinarnego problemu techniczno-chemicznego oraz wdrożenie otrzymanych rozwiązań w praktyce. Spełnia zatem stawiane pracom doktorskim wymogi określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1668 ze zmianami). W związku z tym wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Wiktora Stanka do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki chemiczne.