

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Grzegorza Kazimierskiego
Tytuł rozprawy: "*Technologia azotonasiarczania powierzchni stali z udziałem cząstek MoS₂ za pomocą atmosfery NH₃+H₂S*"

Recenzja została przygotowana na podstawie zlecenia prof. dr. hab. inż. Zofii Ledzion-Bieluń, przewodniczącej Rady Dyscypliny *Inżynieria Chemiczna* Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

1. Charakterystyka ogólna

Rozprawa liczy ogółem 103 strony, w tym 12 stron spisów pozycji bibliograficznych (64 pozycje cytowane oraz 104 pozycje tzw. uzupełniające). Praca składa się z 7. rozdziałów, podzielonych na zwarte tematycznie podrozdziały. Ogólnie ujmując, jej struktura nie odbiega od typowej struktury prac kwalifikacyjnych.

2. Ocena podjętego tematu

Podjęcie problematyki, którą zajął się Autor recenzowanej pracy, jest uzasadnione z poznawczego i technicznego punktu widzenia.

Rozwój technologii materiałowych, od kilkunastu lat bardzo intensywny w związku z rozwojem podstaw naukowych inżynierii materiałowej, pomiarowego i eksperymentalno-testowego instrumentarium badawczego, jak i systemów technologicznych, pozwalają na uzyskiwanie coraz wyższego poziomu eksploatacyjnych właściwości obiektów technicznych.

Bazując na efektach rozwoju wiedzy i techniki w zakresie technologii materiałowych w powyższych aspektach, Autor recenzowanej rozprawy postanowił zmierzyć się z istotnym problemem - poprawienia właściwości tribologicznych elementów wytwarzanych z typowego materiału konstrukcyjnego – stali C45.

3. Tytuł pracy

Tytuł rozprawy: "*Technologia azotonasiarczania powierzchni stali z udziałem cząstek MoS₂ za pomocą atmosfery NH₃+H₂S*" został sformułowany trafnie w sensie problemu badawczego, acz nie w pełni adekwatnie do zawartości rozprawy, bo jego sformułowanie kontekstowo zapowiada nieuzasadnione uogólnienie (na wszystkie gatunki stali).

4. Problem badawczy, cel, teza, zakres pracy

Ogólnie należy stwierdzić, że podjęty problem – twórcze, na drodze naukowo-badawczej poszukiwanie coraz lepszych sposobów (wydajniejszych, tańszych, bardziej ekologicznych, pozwalających na uzyskiwanie lepszych właściwości eksploatacyjnych) zwiększania trwałości elementów urządzeń technicznych - jest zasadny z punktu widzenia technicznego (praktycznego). Wzmocnieniem walorów uzyskanych efektów, na bazie solidnego state of the art, oraz po udowodnieniu możliwości fizycznej realizacji proponowanego sposobu, byłoby

dokonanie analizy porównawczej ich konkurencyjności (ekonomicznej, ekologicznej, a zwłaszcza technicznej - tribologicznej).

Jako cel pracy przyjęto opracowanie technologii wytwarzania warstw azotonasiarczanych na stali w atmosferze NH_3 z dodatkiem H_2S , a także jej drugiego wariantu – z wcześniejszym pokryciem powierzchni warstwą MoS_2 . W ujęciu redakcyjnym przedstawiono go, trochę niespójnie z tytułem rozprawy, jako dwa cele, co nie zmienia tego, iż jest zrozumiałe, poza tym, że nieco błędny przekaz sugeruje uogólnioną możliwość uszlachetniania warstwy wierzchniej każdej stali.

Tezy – udowodnione uzyskanymi wynikami – mają bardziej inżynierski charakter, stanowiąc intuicyjne stwierdzenie oparte na istniejącym stanie wiedzy (Autor nie wspomina o wykonaniu badań wstępnych, które dałyby podstawę do ich postawienia). Wiadome bowiem jest, iż:

- azotowanie zwiększa twardość warstwy wierzchniej stali, co zwiększa jej odporność na zużycie ścierne;
- obecność siarki w tej warstwie, tworząc siarczki żelaza, zmniejsza charakteryzujące ją dopuszczalne naprężenia ścinające, co powoduje łatwiejsze ścinanie mikronierówności w przypadku tarcia mieszanego (nie granicznego, jak stwierdzono), zabezpieczając warstwę wierzchnią przed destrukcją na większych głębokościach. Dlatego najlepszymi dodatkami do środków smarowych były związki siarki, które w warunkach wysokich nacisków i temperatury w styku wierzchołków mikronierówności elementów pary trącej ulegają dekompozycji pierwiastkowej i tworzą siarczki żelaza. Ze względów ekologicznych poprawianie właściwości smarów takimi dodatkami jest zarzucane;
- powszechnie znane są właściwości dwusiarczku molibdenu, jak - od dawna - grafitu, mechanicznie zmniejszającego tarcie w związku ze słabymi wiązaniami pomiędzy tworzącymi jego strukturę warstewkami.

Natomiast oryginalnością przyjętego przez Autora podejścia, która mogłaby stanowić kanwę tezy, jest wyrażane w treści pracy przekonanie o możliwości poprawienia tribologicznych właściwości stali w proponowany przez niego sposób – wykorzystania mieszaniny amoniaku i H_2S w procesie azotowania gazowego oraz poprzedzające go powierzchniowe modyfikowanie powierzchni stali z użyciem MoS_2 .

Zakres prac, przyjęty do udowodnienia fizycznej możliwości osiągnięcia założonego celu, w odniesieniu do uogólniającego (nieadekwatnie do zawartości rozprawy) zapisu tytułu i celów, musiałby/mogłyby ująć inne aspekty - w szczególności określenie zakresu obowiązywania (słuszności) opracowanej metody, zrealizowanej tylko w odniesieniu do niestopowej stali średniowęglowej C45, a także porównania jej, i jej efektów, z innymi stosowanymi sposobami. Ponadto, nie umniejszając ogólnych zalet tej wartościowej pracy - należy stwierdzić, iż wynikiem przedstawionych w niej badań jest metoda, a nie gotowa do realizacji technologia. Badania zrealizowane zostały z wykorzystaniem stanowisk laboratoryjnych; technologia będąca produkcyjnym sposobem wytwarzania wg określonej metody wymaga przeskalowania (słuszne stwierdzenie samego Autora) na urządzenia i warunki produkcyjne dla utrzymania określonych i ujętych w metodzie relacji w systemie wielkości: ciepło/pojemność cieplna – skład chemiczny (wsad/media) - czas/kinetyka. W tego typu pracach praktycznie nie jest możliwe przeniesienie wyników badań na warunki rzeczywiste z wykorzystaniem zasad modelowania w oparciu o teorię podobieństwa (analiza równaniowa, analiza wymiarowa).

Poza tym przyjęty zakres pracy w odniesieniu do planowanego i osiągniętego celu jest poprawny. Warto było do schematycznej jego prezentacji (s. 47) dodać dyskusję wyników i ich syntezę, która stanowi ważną część rozprawy pt. *Omówienie wyników badań* (Rozdz. 5) oraz przejawia się we wnioskach końcowych (ich formułowanie jest ważną częścią każdego raportu z badań, a szczególnie ważnym elementem ocennym dysertacji jako rozprawy kwalifikacyjnej).

5. Układ pracy, redakcja, literatura

Układ pracy można określić jako poprawny. Rozprawę rozpoczyna *Wprowadzenie*, ujmujące wciąż aktualne wyzwanie techniczne i naukowe związane z podnoszeniem tribologicznych walorów eksploatacyjnych elementów maszyn, ukierunkowane na stanowiące przedmiot rozprawy azotonasiarczanie.

Po *Wprowadzeniu* następuje Rozdział 2. pt. *Część teoretyczna*, która stanowi przedstawienie state of the art, głównie w kontekście technologicznym w odniesieniu do procesów i efektów użytkowych azotowania i azotonasiarczania; temu drugiemu poświęcono najwięcej uwagi, czyniąc to na podstawie chronologicznie, skrupulatnie ukazanych patentów.

Rozdział pt. *Część teoretyczna* zawiera kilka (6) podrozdziałów, zawierających - oprócz wymienionych powyżej problemów - omówienie H_2S jako źródła siarki podczas obróbki cieplno-chemicznej oraz właściwości MoS_2 , anonsując planowane, niestosowane dotychczas, nakładanie tego związku na powierzchnię stali przed, a nie po procesie azotowania.

Ostatnią partię tej części stanowi podrozdział 2.6. *Cele rozprawy*, w którym zawarto też omówione wyżej tezy i zakres prac.

Analizę stanu wiedzy oparto o 168. pozycji literatury przedmiotu; liczbę nieco przesadną, bowiem spośród nich cytowane są 64 pozycje, a reszta – to nieprzywoływane 104 tzw. pozycje uzupełniające. O ile nie można mieć uwag do pozycji dot. procesów azotowania, a szczególnie azotonasiarczania, to w przypadku pozycji dot. tribologicznych właściwości eksploatacyjnych przebija zafascynowanie Autora problemami tarcia w kosmosie. Brak podstawowej literatury tribologicznej ciąży nieco na poprawności używanych w rozprawie terminów (np. „*tarcie ślizgowe w odróżnieniu od tarcia ściernego*” – s. 35, „*smar suchy*” – s. 40, s. 91).

Zauważalny jest brak podsumowania analizy stanu wiedzy, co stanowiłoby podstawę sformułowania problemu badawczego i uzasadnienia przyjętego celu pracy oraz sformułowania tezy, które zamieszczono na końcu rozdz. 2 pt. *Część teoretyczna*. Niemniej część ta, wraz z wcześniejszym *Wprowadzeniem*, ujawnia (niestety kontekstowo, nie wprost), podejmowany w rozprawie jej główny problem. Emanacją zapowiedzi jego twórczej wartości jest podjęcie wątku wykorzystania termicznego, a zwłaszcza katalitycznego rozkładu siarkowodoru pod wpływem stali oraz powłoki MoS_2 na powierzchni azotonasiarczanych elementów.

Rozdział 3., zawierający opis materiałów do badań, aparatury badawczą oraz sposobu realizacji eksperymentów (siedmiu) zatytułowano „*Część eksperymentalna*”, wyłączając z niej do odrębnego rozdziału uzyskane wyniki. Informacje przedstawione tu mają charakter opisowy; nie zamieszczono planów badań, ani uzasadnienia wyboru metod, przyjętych parametrów, ilości składników etc. Niektóre z tych danych wynikają z kontekstu całości pracy (głównie *Części teoretycznej*), inne są podane w rozdziale 4. pn. *Wyniki badań*. Podawanie tych danych, pozwalające na odtworzenie i weryfikowanie prezentowanych efektów badań, jest konieczne w publikacjach naukowych (publiczna obrona pracy doktorskiej jest formą publikowania).

Klarowna prezentacja uzyskanych wyników w Rozdz. 4. stanowi mocną stroną rozprawy, wyróżniając się szczególnie wysokiej jakości ilustracjami. Przedstawione one zostały odpowiednio dla każdego z 7. eksperymentów.

Wyniki uzyskane w badaniach zostały omówione w Rozdz. 5, kończonym wyliczeniem zalet proponowanego sposobu modyfikowania warstwy wierzchniej badanej stali. Wnioski końcowe poprzedzone są Rozdz. 6. „Podsumowanie”, nie tylko odnoszącym się do uzyskanych wyników, ale też zawierającym uwagi na temat prognozy wdrożeniowej i pozatematyczne refleksje odnośnie do kosmicznych motywacji podjęcia tematyki rozprawy.

Redakcję rozprawy, niezależnie od przedstawionych wyżej uwag, charakteryzują: konsekwencja w dążeniu do modułowej klarowności strukturalnej (układu treści), staranność techniczna, której przejawem jest ponadstandardowa jakość rysunków, opisów fotografii i wykresów, a także poprawność językowa tekstu, poza nielicznymi mankamentami (nie licząc wątpliwości co do jednoznaczności hipotez i celu), np. nienaukowym określeniem „znakomity” (z tzw. „języka mówionego”). Poprawne, ciekawie ujęte, ale zbędne, są mające literacki, epicki charakter fragmenty dot. wspomnianej wyżej fascynacji Autora techniką kosmiczną (3/4 *Wstępu* i zapisy w innych częściach rozprawy), czy pomysłowości amerykańskich żołnierzy prowadzących smary do karabinów w paczkach świątecznych (s. 41).

6. Uwagi merytoryczne

Autor podjął, z dobrym skutkiem, problem poprawy tribologicznych właściwości eksploatacyjnych popularnej, średniowęglowej stali C45 do ulepszania cieplnego, Jest to stal łatwa w obróbce, stosowana na średnio obciążone i odporne na zużycie elementy maszyn, takie jak wały korbowe, osie, koła zębate, śruby. Ponieważ odporność na zużywanie ściernie (z czym zmaganie się Autor zapowiedział) w dużej mierze zależy od twardości, w celu jej zwiększenia stal poddawana jest różnorodnym obróbkom powierzchniowym: cementowania, azotowania, hartowania, nitrocementacji, chromowania.

Autor podjął problem dodatkowego, poza zwiększeniem twardości azotowaniem, zmniejszenia intensywności zużywania ściernego poprzez obniżenie wartości dopuszczalnych naprężeń stycznych w warstwie wierzchniej. Postanowił wykorzystać stosowaną w tym celu, ale zmodyfikowaną przez siebie, technologię azotonasiarczania oraz dodatkowo wprowadzić do warstwy wierzchniej MoS_2 . Zarówno siarka, jak i dwusiarczek molibdenu łagodzą proces tarcia – siarka pośrednio poprzez zmniejszanie sił stycznych w strefie tarcowego styku dzięki mniejszej wartości wytrzymałości na ścinanie siarczku żelaza, natomiast MoS_2 - dzięki łatwemu poślizgowi jego warstewek.

Wg Autora oryginalnością proponowanego sposobu, oprócz usprawnienia procesu azotonasiarczania, jest założenie możliwości skutecznego wprowadzenia przed azotowaniem do warstwy wierzchniej dwusiarczku molibdenu, co powinno dać efekt w postaci dodatkowego (oprócz żelaza), katalitycznego oddziaływania MoS_2 w procesie nasiarczania.

Przeprowadzone przez Autora eksperymenty przedstawione zostały sposób zwięzły, modułowo, wg logicznie zaplanowanego sposobu, z podaniem podstawowych parametrów. Mankamentem jest, przy czytelnej prezentacji uzyskanych wyników, ich powierzchowna (zdawkowa) analiza. Na przykład – zakładane pozytywne katalityczne oddziaływanie MoS_2 na rozpad H_2S nie zostało zbadane; można to pośrednio, z niewielkim stopniem wiarygodności,

próbować stwierdzić na podstawie fotografii, poprzez porównanie skutków w postaci uzyskanych grubości warstw.

Przedstawiony na fotografii na Rys. 59 b) finalny efekt obróbki AH_2SMoS_2 (azotonasiarczania z MoS_2 nałożonym przed azotowaniem) w postaci uzyskanych warstw, ukazuje stosunkowo grubą warstwę MoS_2 w stosunku do warstwy ϵ i ν' , relatywnie (wymiarów nie podano) kilkakrotnie grubszą niż w przypadku tej warstwy widocznej na Rys. 57 c), uzyskanej w wyniku obróbki $AMoS_2$ (też po nałożeniu MoS_2 , ale tylko z następnym azotowaniem).

Ponieważ nie są podane wartości bezwzględnych grubości tych warstw, ani powiększenia ich obrazu, nie jest jasne, czy relacje tych grubości dowodzą wytworzenia grubszej warstwy MoS_2 , czy cieńszej twardej warstwy ϵ i ν' jako skutku hamującego nasiarczanie przez wcześniej nałożoną warstwę MoS_2 .

Rozstrzygającym testem zasadności przyjętego podejścia są badania tribologiczne. Wybrano do tego celu tester T-05, o styku skoncentrowanym, również bez podania i uzasadnienia przyjętych parametrów tarcia.

W wyniku badań tarciovych stwierdzone zostało znaczące ograniczenie zużycia stali C45 sposobem AH_2SMoS_2 - ponad 2-krotnie większe od zmniejszenia sposobem AH_2S , ograniczającym go mniej niż 2-krotnie. To dużo, jednakże na rozstrzygające stwierdzenie korzyści ze stosowania tego sposobu obróbki mogą pozwolić prawidłowo przeprowadzone testy tribologiczne, w tym szczególnie tarciowej trwałości. Warstewki powłoki MoS_2 , podobnie jak to jest w przypadku grafitu, pełniące rolę smaru stałego, przenoszone są na partnera tarcia (tu nie badane), łagodząc tarcie. Należy wszakże brać pod uwagę to, że w czasie tarcia MoS_2 wyprowadzany jest ze strefy styku wraz z produktami zużycia (tu też nie badane). Wówczas w bezpośrednim kontakcie pozostaje warstwa ϵ , czyli ma się do czynienia z sytuacją sposobu AH_2S , nb. też, choć mniej, korzystną. Prosty do rejestrowania w przypadku tribotestera T-05 pomiar zmian oporów ruchu (i współczynnika tarcia) w dłuższym teście dałby podstawę do rozwiania wątpliwości co do trwałości tak wykonanej powierzchniowej struktury materiałowej. Uzyskany bowiem przez Autora efekt najmniejszego zużycia może okazać się krótkotrwały.

Zwłaszcza, że stwierdzona została zaskakująco duża, niemal 5-krotnie większa chropowatość uzyskanej warstwy wariantu AH_2SMoS_2 . Nie podano czy zużycie było mierzone po dotarciu; szczególnie w przypadku, gdy para tarcia tworzy styk skoncentrowany, może ono znacząco ograniczyć jej trwałość.

Należy przy tym zauważyć, że uzyskany, tribologiczny efekt nie stanowi, jak podano, synergii; występuje ona, gdy współdziałanie daje efekt większy niż suma poszczególnych oddzielnych działań. W rozpatrywanych przypadkach metoda AH_2S ogranicza zużycie o 0,0336 g, metoda $AMoS_2$ - o 0,0221, natomiast łączący obie metody - sposób AH_2SMoS_2 - o 0,0214 g. Różnicy wynoszącej 0,0007 g, przy stosunkowo dużych rozrzutach wyników tarciovych badań zużycia (tu nie podanych), w tym dokładności jego pomiarów, nie można uznać za potwierdzenie wystąpienia efektu synergii. Na marginesie powyższego należy zauważyć, że wszystkie te eksperymenty powinny cechować większa staranność o uzyskiwanie akceptowalnej powtarzalności (szczególnie istotnej właśnie w przypadku badań tribologicznych); podawać należy minimum danych dot. statystycznej obróbki wyników (liczebność prób, niepewność/błędy pomiarów, rozrzuty, odrzucanie wartości skrajnych etc.).

Przedstawione wyniki pozwalają na stwierdzenie osiągnięcia TRL 4. Autor ma – wyrażoną w *Podsumowaniu* - świadomość potrzeby dalszych badań, które umożliwiłyby wprowadzenie prezentowanego rozwiązania, jako technologii, do gospodarki. W charakterystyczny dla przyjętego w rozprawie sposobu, systemowo ujął obydwie proponowane procesy w podziale na etapy, niezbędne do podniesienia poziomu gotowości technologicznej i zrealizowania przeskalowania niezbędnego dla TRL 9. Jest oczywiste, że wykracza to poza ramy prac przyjętych jako podstawa prac stanowiących treść recenzowanej rozprawy.

Niezależnie od przedstawionych wyżej uwag i komentarzy, można uznać jako wystarczająco zweryfikowane twierdzenia Autora o tym, że proces azotowania stali C45, będącej przedmiotem badań, można skutecznie zrealizować z wykorzystaniem stosunkowo prostego, precyzyjnego dozowania siarkowodoru (H_2S). Mniej przekonuje to, iż jest zasadne (choć wykazano, iż możliwe) pod względem technologicznym i tribologicznym realizowanie tego procesu po uprzednim pokryciu powierzchni obrabianego materiału warstwą dwusiarczku molibdenu (MoS_2) – nie znaleziono w rozprawie dowodu na wzmożenie efektu katalitycznego oddziaływania (sam Autor w ostatnim wniosku końcowym określa to tylko jako prawdopodobne) na proces rozkładu siarkowodoru (H_2S), ani wyjaśnienia wątpliwości dot. skomentowanej wyżej relacji grubości warstw MoS_2 oraz ϵ .

Należy także podkreślić, że w związku z tym, iż nie określono zakresu stosowalności przedstawionych wyników, są one aktualne tylko w odniesieniu do materiału będącego przedmiotem badań – stali C 45 oraz przyjętych warunków eksperymentów. Nieuprawnione są uogólniające sformułowania, odnoszące się ogólnie do stali jako takiej w tytule, celu i tezach, również w podsumowaniu (Rozdz. 6.) oraz we wnioskach końcowych (Rozdz. 7.).

Uwagi dodatkowe

Przejawiająca się w rozprawie nadmierna tendencja do uogólniania uzyskanych wyników w aspekcie materiałowym (na stałe ogółem) wyraża się w ich odnośniku do trwałości eksploatacyjnej też ogółem (m.in. teza 1). Tymczasem jej zapisy powinny jednoznacznie ujmować, iż spośród wielu właściwości eksploatacyjnych dotyczą one tylko tribologicznych właściwości warstwy wierzchniej.

Celem starań Autora jest poprawa właściwości stali C 45 w aspekcie zużywania ściernego. Temu służą utwardzające warstwę wierzchnią technologie azotowania, zwiększające odporność na bruzdowanie i mikroskrawanie, będące mechanizmami tej formy zużywania. W niewielkim stopniu poprawia ją warstewka MoS_2 , zmniejszając współczynnik tarcia, łagodząc adhezyjną inicjację tych mechanizmów. Natomiast bardzo ważna jest jej rola w aspekcie innego rodzaju zużywania tribologicznego, określanego mianem katastroficznego – zacierania, w krańcowym efekcie prowadzącego do zatarcia. Ponieważ ma ono dominujący adhezyjny charakter, istotna jest w tym przypadku zmiana powinowactwa materiałów elementów trących, a zwłaszcza mechaniczna separacja ich powierzchni, co skutecznie zapewniają ślizgające się po sobie warstewki dwusiarczku molibdenu.

Zastosowany przez Autora test tribologiczny, w którym testowe elementy tworzyły liniowy styk skoncentrowany, może być „czuły” na tę postać destrukcji powierzchniowej (zacieranie), niemniej 10-krotnie większe (!) zużycie przeciwpróbki wskazuje na to, że dominowało zużywanie ściernie, i to głównie przeciwpróbki, a nie badanej próbki. W przypadku próbki (C 45) jego intensywność zależy głównie od twardej fazy azotków żelaza (utrudniającej

zużycie ściernie) dodatkowo jest łagodzona łatwo ścinającymi się siarczkami żelaza. Będący w styku MoS₂, zmniejszając współczynnik tarcia (tu niemierzony) procesy te łagodzi, dopóki nie jest wyprowadzony ze strefy tarcia wraz z produktami zużycia. Dopiero zbadanie tego problemu pozwoli na określenie przedmiotowej „trwałości eksploatacyjnej”.

Nie kwestionując wartości wyników z wykresu na rys. 46, ukazującego zużycie stali C 45 obrabianej omawianymi procesami, wykres na rys. 47, ukazujący 10-krotnie większe zużycie przeciwpróbki, dowodzi błędu metodologicznego. Do zbadania odporności materiałów na zużycie ściernie (nominalna intencja Autora) stosuje się przeciwpróbki z materiału bardziej, a nie mniej od nich wytrzymałego, lub tarcie w obecności tzw. luźnego ścierniwa (są zalecenia ściśle go określające). Zastosowany sposób to odwrócenie poprawnej sytuacji testowej.

W przypadku prac opisywanych w rozprawie wybór urządzenia tribologicznego (T-05) był właściwy, za wyjątkiem kształtu próbki. Większą wartość informacyjną miałyby wyniki badań, w których zamiast próbki tworzącej liniowy styk skoncentrowany, zastosowana byłaby próbka tej samej wielkości, ale z powierzchnią tarcia o kształcie cylindrycznym, zapewniająca tzw. styk rozłożony. Nie powodowałyby to tak rażącej dysproporcji w zużyciu układu próbka - przeciwpróbka, obserwowalny byłby efekt transferu MoS₂, a zarazem odpowiadałoby to większości rodzajów węzłów tarcia, do których wytwarzania stosowane są technologie, rozwijane w ramach przedstawionych w rozprawie badań.

Szczególnie, iż uzyskane efekty, ukierunkowywane tu na tarcie suche, mogą być dużo bardziej znaczące w odniesieniu do elementów smarowanych (przypadku łatwego do badania przy użyciu T-05), łagodząc skutki tarcia mieszanego, stanowiącego wciąż jedno z największych barier rozwoju węzłów tarcia.

Uwaga formalna: inżynierskie efekty proponowanych rozwiązań, chociaż są jeszcze na stosunkowo niskim poziomie TRL, mają techniczne, komercyjne walory; zastrzeżenie IP nie jest możliwe po opublikowaniu, czym jest też publiczna obrona rozprawy.

7. Ocena dysertacji i konkluzja

Zagadnienie naukowe i oryginalność wyników

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy aktualnego, w odniesieniu do realnego zapotrzebowania technicznego, problemu badawczego - zwiększenia efektywności technologii azotonasiarczania w celu poprawy tribologicznych właściwości eksploatacyjnych stali, zweryfikowanego na przykładzie stali C 45.

Uzyskane wyniki, z uwagi na systemowość podejścia, można określić jako oryginalne, mogące przysporzyć praktyce inżynierskiej cennych informacji.

Metody badawcze

Zastosowane metody badawcze ogólnie należy ocenić pozytywnie, szczególnie w odniesieniu do problemów technologicznych. Autor przeprowadził szereg prac właściwych do rozwiązania podjętego problemu, w tym wyboru do badań reprezentatywnych materiałów, pomiarów i analiz instrumentalnych, a także badań weryfikacyjnych, umożliwiających poczynienie istotnych obserwacji i uzyskanie wartościowych efektów.

Stopień rozwiązania zagadnienia

Stopień rozwiązania zagadnienia można ocenić jako zadowalający. Autor uczynił to samodzielnie, stwarzając możliwość sformułowania na bazie uzyskanych wyników badań przydatnych technicznie zaleceń inżynierskich.

Wniosek końcowy

Dysertację mgr. inż. Grzegorza Kazimierskiego oceniam pozytywnie. Uwagi zawarte w recenzji nie umniejszają merytorycznej wartości rozprawy. Zawarty w niej materiał badawczy jest oryginalnym dorobkiem Kandydata. Autor wykazał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Stwierdzam, że praca pt. „Technologia azotonasiarczania powierzchni stali z udziałem cząstek MoS₂ za pomocą atmosfery NH₃+H₂S” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2023.742 t.j.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony, a po pomyślnym jej przebiegu – nadanie Kandydatowi stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w ramach dyscypliny naukowej *Inżynieria chemiczna*.

