

RECENZJA

rozprawy doktorskiej pt. „Formation of the structure of a gray cast iron matrix composite reinforced with SiC and Al₂O₃ particles as an advanced material for brake discs”

(„Kształtowanie struktury kompozytu na osnowie żeliwa szarego z cząstkami SiC i Al₂O₃, jako nowoczesny materiał na tarcze hamulcowe”)

mgr inż. Mateusza Wojciechowskiego

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Formalną podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej z dnia 19 maja 2026 r. Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Jarosław Piątkowski, prof. PŚ. Rozprawa mieści się w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

2. Ocena istotności i celowości podjętego tematu

Hamulce tarczowe, wynalezione w XIX wieku, zrewolucjonizowały bezpieczeństwo i wydajność hamowania w motoryzacji, stając się standardem w pojazdach osobowych i ciężarowych.

Za początek hamulców tarczowych uważa się rok 1898 kiedy to Elmer Ambrose Sperry opracował je dla pojazdu elektrycznego, jednakże rozwiązanie to nie wpłynęło istotnie na rozwój tej technologii. Wkrótce potem, w 1902 roku, William Lanchester opatentował i rozwinął ten rodzaj hamulców, które jednak charakteryzowały się wysokim poziomem hałasu.

W latach 50. XX wieku hamulce tarczowe zaczęły zyskiwać na popularności, a ich konstrukcja ewoluowała. Klasyczne tarcze hamulcowe były wykonane z żeliwa szarego,

materiału o dobrej przewodności cieplnej i stosunkowo prostego w produkcji. Z czasem opracowano konstrukcję tarcz wentylowanych lepiej odprowadzających ciepło.

Obecnie tarcze hamulcowe wykonuje się głównie z żeliwa (również wermikularnego), natomiast w pojazdach sportowych stosuje się także tarcze ceramiczne (w praktyce ceramiczno-węglowe zawierające do około 70% SiC) oraz węglowe (stosowane głównie w lotnictwie, ale również w kolejach dużych prędkości czy też pojazdach Formuły 1), które charakteryzują się mniejszą gęstością i wyższą odpornością na wysokie temperatury.

Dane powyższe wskazują celowość podjętego w rozprawie tematu, zwłaszcza w aspekcie połączenia obydwu stosowanych już materiałów. Należy też zaznaczyć, że podejmowano już próby stosowania żeliwa szarego gatunku EN-GJL-150 umocnionego „pianką” z SiC z aktywowaną powierzchnią, a jedno rozwiązanie (wykorzystujące filtry piankowe o porowatości od 10 - 30 porów na cal) jest nawet przedmiotem patentu. W związku z tym proponowane w dysertacji rozwiązanie należy uznać za rozwinięcie poprzednio opracowanych metod będące właściwym kierunkiem rozwoju zarówno w aspekcie naukowym (zjawiska fizykochemiczne zachodzące na granicy cząstki ceramiczne SiC i Al_2O_3 - grafit + osnowa żeliwa) jak i praktycznym (opracowanie technologii kompozytowych tarcz hamulcowych).

3. Temat, cel i teza rozprawy doktorskiej

Temat pracy doktorskiej „Kształtowanie struktury kompozytu na osnowie żeliwa szarego z cząstkami SiC i Al_2O_3 , jako nowoczesny materiał na tarcze hamulcowe” poprawnie ujmuje szeroką gamę zagadnień, począwszy od opracowania koncepcji kompozytu żeliwno-ceramicznego, poprzez analizę termiczną i derywacyjną, badania mikrostruktury, właściwości mechanicznych i tribologicznych aż po weryfikację wyników badań w warunkach przemysłowych.

W pracy doktorskiej poprawnie określono trzy cele: główny, naukowy oraz użytkowy.

Teza pracy doktorskiej z jednej strony zakłada, że zastosowanie struktury porowatej we wnętrzu formy wpłynie na krystalizację grafitu płatkowego na reaktywnych cząstkach ceramiki SiC i Al_2O_3 , z drugiej natomiast opracowanie rozwiązania technologicznego umożliwiającego odlewanie kompozytowych tarcz hamulcowych z żeliwa i ceramiki o ulepszonych właściwościach tribologicznych.

4. Układ i treść rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Wojciechowskiego zatytułowana „Kształtowanie struktury kompozytu na osnowie żeliwa szarego z cząstkami SiC i Al_2O_3 , jako nowoczesny materiał na tarcze hamulcowe” liczy 146 stron. Składa się ona z 11 rozdziałów, przy czym cztery ostatnie to streszczenie, bibliografia, spis rysunków oraz atlas mikrostruktur. Poprzedzone są one wstępem ujmującym genezę podjętej tematyki badawczej.

W liczącej niewiele, bo 32 strony, części teoretycznej Autor nakreślił rys historyczny wytwarzania odlewów żeliwnych, także na potrzeby przemysłu motoryzacyjnego oraz prognoz rynkowych na najbliższe lata. Następnie szczegółowo opisał teoretyczne podstawy procesu krystalizacji żeliwa oraz scharakteryzował istniejące teorie zarodkowania grafitu. Część tę kończy opis teorii wg Riposana z zaznaczeniem roli siarczków złożonych jako warstwy przejściowej pomiędzy cząstkami tlenków a zarodkami grafitu, co jest zrozumiałe w kontekście możliwości modyfikacji tejże teorii w wyniku realizacji badań w niniejszej dysertacji. W następnej kolejności krótko opisał rodzaje grafitu w żeliwie szarym oraz, niejako z obowiązku, rolę węgla krzemu i tlenku glinu (choć poprawna nazwa to tritlenek diglinu) w zarodkowaniu grafitu. Część teoretyczną kończy krótka charakterystyka materiałów kompozytowych oraz, co nadzwyczaj słuszne, oddziaływaniem pomiędzy stopem a ceramiką, choć w praktyce Autor głównie koncentruje się tu na korzyściach wynikających ze stosowania ww. materiałów oraz wyzwaniach technologicznych. Podsumowanie części teoretycznej dobrze koresponduje z częścią badawczą i uzasadnia podjęcie tematu pracy.

Kolejna część pracy dotyczy koncepcji rozprawy doktorskiej. Autor przedstawił w niej cele badawcze, zakres badań, postawił tezę do udowodnienia oraz wyszczególnił oryginalne elementy pracy, choć to ostatnie korzystniej byłoby przedstawić po otrzymanych wynikach badań.

Metodyka badawcza przedstawia dane z laboratoryjnego oraz przemysłowego etapu badań. Poprawnie pokazuje użyte materiały oraz sprzęt użyty do badań wraz z zastosowanymi parametrami, z wyjątkiem badań tribologicznych.

Rozdział nr 4 zatytułowany „Badania wstępne” jest właściwie opisem firmy, w której wykonywane były badania oraz technologii w niej stosowanej. Jedynie w ostatnim podrozdziale znajdują się informacje dotyczące wyników badań przeprowadzonych w poprzednich latach.

Zasadnicze badania, zamieszczone w rozdziale piątym poprzedzone są wnikliwą analizą koncepcji kompozytu żeliwno-ceramicznego opartą głównie na oddziaływaniu na granicy

fazowej ceramika-stop. Jej wynikiem jest wybór czterech rodzajów materiałów ceramicznych. Należy tu zaznaczyć, że kompozyty bazie żeliwa szarego z wkładkami z węgliku krzemu są już, jak wspomniano wcześniej, znane w literaturze.

Część dotycząca właściwych badań materiałowych obejmuje:

1. Analizę termiczną i derywacyjną żeliwa szarego.
2. Badania twardości i wytrzymałości na zginanie.
3. Testy tribologiczne.
4. Badania mikrostruktury.

Część dotycząca oceny procesu krystalizacji żeliwa metodą ATD oraz badań mikrostruktury pozostawia niedosyt, co znajdzie odzwierciedlenie w pytaniach do Autora.

Badania tribologiczne będące istotnym elementem użytkowym pracy, Autor jednakże opisał właściwie wykazując wyższą odporność na zużycie ściernie opracowanych tarcz kompozytowych w porównaniu do tarcz z żeliwa szarego oraz idące za tym zwiększone zużycie przeciwpółki czyli klocka hamulcowego.

Wyniki badań laboratoryjnych posłużyły do wyboru jednego rodzaju materiału ceramicznego do wytworzenia kompozytowej tarczy hamulcowej w warunkach przemysłowych. Weryfikacja ta wykazała możliwość aplikacji proponowanego rozwiązania w przemyśle motoryzacyjnym przy uwzględnieniu ograniczeń takich, jak wyższy koszt produkcji związany z podwyższoną temperaturą odlewania, większym stopniem skomplikowania procesu wytwórczego czy też stosowaniem specjalnych narzędzi skrawających.

Dyskusja uzyskanych wyników przeprowadzona została na wysokim poziomie szczegółowości potwierdzając jednocześnie, że Doktorant wykazuje cechy dojrzałego badacza, potrafiącego właściwie interpretować i krytycznie oceniać otrzymane wyniki.

Rozbudowane wnioski wzbogacone o zalecenia technologiczne i kierunki dalszych badań dobrze korespondują z celami pracy i potwierdzają udowodnienie jej tezy.

Literatura liczy 92 pozycje, przy czym brak jest pozycji literaturowych Doktoranta.

Dysertację wieńczą: zatytułowany po polsku bogaty, dwuczęściowy atlas mikrostruktur zawierający zdjęcia wysokiej jakości oraz streszczenie w języku polskim.

5. Ogólna ocena oraz uwagi do pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Wojciechowskiego zatytułowana „Kształtowanie struktury kompozytu na osnowie żeliwa szarego z cząstkami SiC i Al₂O₃, jako nowoczesny

material na tarcze hamulcowe” stanowi oryginalne rozwiązanie wybranych problemów technologii kompozytowych tarcz hamulcowych. W wyniku badań poprawnie zinterpretowano zjawiska zachodzące na granicy żeliwo-material ceramiczny, opracowano podstawy technologii tarcz z kompozytu żeliwo szare EN-GJL-150-wkładka ceramiczna z 70% SiC oraz 30% Al₂O₃ oraz z powodzeniem zrealizowano badania przemysłowe.

Jak w każdej pracy, również naukowej, można dopatrzyć się błędów lub wątpliwości, z których ważniejsze przytaczam poniżej:

Str. 15: Nie jest prawdą, że żeliwo to wieloskładnikowy stop żelaza, węgla i innych pierwiastków, o zawartości węgla przekraczającej 2%. Istnieją rodzaje żeliwa o mniejszej zawartości węgla (np. żaroodporne żeliwo wysokochromowe lub żeliwo krzemowe odporne na korozję).

Str. 16: Na rys. 1.4 zaznaczono zakres zawartości węgla dla badanego żeliwa gatunku EN-GJL-150 jako podeutektyczne, pomimo, że w dalszej części pracy (np. na str. 76) figuruje ono jako nadeutektyczne.

Str. 43-51: W metodyce badawczej brak jest informacji na temat parametrów niezwykle istotnych badań tribologicznych, użytych urządzeń, sposobu pomiaru ubytku masy, itp.

Str. 52: Proszę podać formułę, wg której Autor obliczył eutektyczny równoważnik węglowy.

Str. 59: Rozdział 4 „Badania wstępne” jest niepoprawny, ponieważ opisuje: historię firmy Brembo, proces technologiczny tarcz hamulcowych z żeliwa wraz opisem elektrycznych pieców indukcyjnych do topienia, stosowanego namiaru, kontroli składu chemicznego, technologii modyfikacji grafityzującej, formowania, a nawet rodzajami technologii rdzeni piaskowych stosowanych w produkcji odlewów, jak również właściwości żeliwa szarego. Jedyne ostatni podrozdział wspomina o wstępnych badaniach przeprowadzonych w firmie Brembo w latach 2020–2022. Ponieważ stwierdzono w nim, że oceniono wpływ cząstek ceramicznych SiC+Al₂O₃ na czas odlewania, lokalizację obszarów krytycznych oraz rozkład makro- i mikroporowatości dziwi fakt, że nie przedstawiono, choćby szczerunkowo, wyników tych badań. Stanowiłyby one właściwy punkt wyjścia do badań podjętych przez Doktoranta i opisanych w pracy. Czy Doktorant brał udział w tych badaniach?

Str. 69: Na rys. 4.5 widnieje mikrostruktura żeliwa niemodyfikowanego oraz po modyfikacji grafityzującej. Proszę o jej interpretację w aspekcie bardziej rozdrobnionych wydzielen grafitu płatkowego w żeliwie niepoddanym modyfikacji.

Str. 75: Jaka norma opisuje żeliwo gatunku EN-GJL-400?

(...)

Str. 86: W badaniach odporności na zużycie stwierdzono, że przeprowadzono z wieloma powtórzeniami dla każdego z badanych materiałów. Informacje o liczności próby winny być zawarte w metodyce badawczej.

Str. 108: Brak jest informacji o metodyce pokrycia tarcz węglkami wolframu, molibdenu i tytanu, grubości warstwy, itp. Brak jest informacji o wynikach badań tarcz pokrytych węglkami zarówno w części laboratoryjnej jak i przemysłowej (Autor zamieścił cztery zdjęcia w atlasie mikrostruktur). Czy tarcze te były bądź będą poddane badaniom, np. odporności na zużycie ściernie?

Poza wyżej wymienionymi zdarzają się również pomniejsze błędy, do których można zaliczyć polskie artefakty na rys. 1.4, sentencję w języku polskim na str. 59, stosowanie błędnego skrótu ATD (zamiast *TDA – Thermal and derivative analysis*) czy też polskie artefakty w literaturze na str. 120-122.

Pomimo faktu, że recenzja dysertacji zawiera pewne uwagi krytyczne, nie umniejszają one jej naukowej i użytecznej wartości, a mogą być one pomocne podczas przygotowywania publikacji oraz planowania kolejnych badań i wdrożeń.

6. Wniosek końcowy

Reasumując, jednoznacznie stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (j.t. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571) Art. 187 stanowiący o rozprawie doktorskiej, w związku z powyższym stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Mateusza Wojciechowskiego do publicznej obrony.



Podpisał: dr hab. inż. Grzegorz Gumienny, prof. PŁ

(...) fragmenty recenzji utajnione ze względu na objęcie treści rozprawy doktorskiej tajemnicą prawnie chronioną