

RECENZJA

pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Bogdana Kupca doktoranta Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej pt.: „Wpływ mikrostruktury i struktury geometrycznej powierzchni na zużycie ścierne żeliwa szarego dual phase” wykonanej pod opieką promotora Pana prof. dr hab. inż. Antoniego Władysława Orłowicza opracowana na zlecenie Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa (pismo Dziekana Wydziału z dnia 11.07.2019 roku).

Żeliwo szare ma wiele zastosowań w różnych dziedzinach gospodarki i jest nadal atrakcyjnym stopem żelaza na odlewy stosowane w wielu maszynach i urządzeniach ale też w motoryzacji. Z powodzeniem konkuruje w wielu zastosowaniach ze stopami lekkimi ze względu na zdolność do tłumienia drgań, wysoką odporność na zmęczenie cieplne itp.

W pogoni za obniżaniem masy samochodów klasyczne żeliwo szare przegrywało ze względu na prawie 3 razy większą gęstość od stopów aluminium czy magnezu, dotyczy to głównie bloku silnika, który jest elementem samochodu o największej masie a jego powierzchnie cylindrów powinny charakteryzować się dużą odpornością na zużycie ścierne i zmęczenie cieplne. Jednakże rozwój w zakresie inżynierii materiałowej i inżynierii powierzchni spowodowały, że obecnie standardem jest stosowanie bloków silnika popularnych marek samochodów odlewanych ze stopów aluminium z tzw. wtopkami z żeliwa szarego stopowego lub w silnikach dużej mocy z żeliwa wermikularnego. Istotą postępu w tej dziedzinie jest opracowanie takiej struktury powierzchni cylindra (wtopki) aby w czasie pracy silnika na rozważanej powierzchni utworzyła się warstwa z jednej strony o dużej odporności na zużycie ścierne a z drugiej pozwalająca na wytworzenie się warstwy o odpowiednio zróżnicowanej chropowatości w celu wytworzenia warunków smarowania hydrodynamicznego.

Tej właśnie tematyki dotyczy recenzowana rozprawa doktorska, w której mgr inż. Bogdan Kupiec, przy założonym zakresie zmienności krzemu i miedzi w żelwie sferoidalnym, podjął próbę uzyskania mikrostruktury martenzytyczno-ferrytycznej oraz określenia jej wpływu na odporność na zużycie ścierne odpowiadające warunkom zużycia pary ciernej pierścień tłokowy-cylinder.

Tytuł pracy odpowiada jej treści a praca stanowi właściwe podejście do zagadnienia poszukiwania optymalnych parametrów wytwarzania żeliwa sferoidalnego z przeznaczeniem głównie do pracy w warunkach zużycia ściernego. W związku z powyższym uznaję, że podjęta przez mgr. inż. Bogdana Kupca tematyka badawcza jest aktualna i mieści się w zakresie dyscypliny Inżynieria materiałowa.

Praca napisana jest w tradycyjnym układzie dla rozpraw doktorskich, czyli składa się z przeglądu literatury i części obejmującej badania własne. Jej treść przedstawiona została na 150 stronicach. W pracy przytoczono 114 pozycji literaturowych, w tym 49 opublikowanych po 2000 roku. Praca składa się z merytorycznie istotnych 6 rozdziałów oraz wstępu i streszczenia.

W części literaturowej Doktorant wprowadzając czytelnika w tematykę rozprawy przedstawia podstawową wiedzę na temat rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych stosowanych w produkcji bloków cylindrowych silników samochodowych, podkreślając zależności/relacje pomiędzy masą silnika, jego trwałością i uzyskiwanymi mocami. Następnie zwraca uwagę na tendencję wzrostu wartości maksymalnej ciśnienia spalania w kolejnych nowych opracowaniach silników, która ciągle wzrasta a to pociąga za sobą z jednej strony obniżenie emisji szkodliwych składników spalin a z drugiej strony zwiększające się wymagania materiałowe. Tym wymaganiom materiałowym dla silników wysokoprężnych czyni zadość, jak do tej pory, żeliwo z grafitem wermikularnym ale w dalszym ciągu pozostaje problem obniżenia masy silnika. Istotnym fragmentem pracy jest przedstawienie istniejących w literaturze światowej i polskiej (ośrodek rzeszowski, warszawski i krakowski) istotnych różnic w warunkach pracy bloków cylindrowych z żeliwa (z grafitem płatkowym, sferoidalny oraz wermikularnym) i siluminów wysokokrzemowych lub wieloskładnikowych w kontekście ich odporności na zmęczenie cieplne, odporność korozyjną i warunki odprowadzania ciepła/chłodzenia bloku silnika a także zmian/utruty właściwości mechanicznych ze wzrostem temperatury w wielogodzinnym cyklu badawczym.

W nawiązaniu do tematyki pracy, w rozprawie w rozdz. 3 przedstawione zostały, poznane dotychczas sposoby polegające na odpowiedniej obróbce honowaniem gładzi tulei roboczej cylindra lub głębokim trawieniu osnowy stopu umożliwiające powstanie mikroobszarów smarowania hydrodynamicznego. Opisane zostały również takie metody jak wykonywanie mikroobszarów metodą ablacji laserowej i honowania oraz plastycznego kształtowania wgłębień poprawiające warunki smarowania w układzie cylinder-pierścienie tłokowe.

Wartościowym fragmentem przeglądu literatury bezpośrednio nawiązującym do celu pracy jest rozdział 4 zatytułowany *Obróbka cieplna żeliwa*. Doktorant przedstawił w nim wpływ składu chemicznego i warunków nagrzewania na temperaturę grafityzacji oraz temperaturę przemiany eutektoidalnej, w tym znany wpływ krzemu i manganu. Opisane zostały również warunki poprawnego i niewłaściwego procesu austenizowania oraz jego skutki dla mikrostruktury obejmujące proces nagrzewania i chłodzenia oraz co jest istotą tej pracy obróbka cieplna prowadzona w celu uzyskania mikrostruktury dwufazowej.

Przeгляд literatury kończy zestawienie przykładowych metod podnoszenia odporności na zużycie ściernie tulei cylindrowych wykonanych z żeliwa lub monobloków ze stopów Al-Si oraz konkluzja będąca podstawą podjęcia się przez Doktoranta tej tematyki. Jest to dobre wprowadzenie w analizowane zagadnienia oraz zakres pracy i postawioną tezę.

Tezę pracy w brzmieniu jak w rozprawie, choć zbyt skomplikowaną w treści, uważam za uzasadnioną i właściwie charakteryzującą problem oraz wskazującą jasno co jest do udowodnienia w rozprawie. Adekwatnie do postawionej tezy określony jest szczegółowy

naukowy i użyteczny cel pracy polegający na ustaleniu warunków obróbki cieplnej umożliwiającej uzyskanie mikrostruktury martenzytowo-ferrytycznej żeliwa sferoidalnego o równomiernym rozłożeniu martenzytu w osnowie ferrytycznej pozwalający, po jego wyeksponowaniu przez głębokie trawienie, na uzyskanie wymaganego wzrostu odporności na zużycie ściernie tulei cylindrowych.

W dalszej części pracy Doktorant opisuje przygotowanie materiałów do badań i metodykę badań, które moim zdaniem zostały zaplanowane i wykonane wzorcowo, tym bardziej, że część badania zrealizował wykonując wytopy w warunkach przemysłowych. Odlewami próbnymi były płyty o wymiarach 150x200x15mm. Zrealizowane badania obejmowały żeliwo z grafitem sferoidalnym o czterech różnych składach chemicznych, różniących się zawartością Cu i Si, których głównym celem było uzyskanie struktury osnowy dwufazowej poprzez obróbkę cieplną polegającą na chłodzeniu w wodzie a potem w ciekłym azocie z zakresu temperatury początku i końca przemiany eutektoidalnej przy nagrzewaniu $T_{Ac1}^p - T_{Ac1}^k$ oraz chłodzeniu $T_{Ar1}^p - T_{Ar1}^k$. W celach porównawczych niektóre badania wykonano na wysokokrzemowym stopie Al-Si i żeliwie szarym z grafitem płatkowym. Komplementarny zakres badań obejmował m. in.:

- badania metalograficzne,
- badania dylatometryczne powiązane z techniką zamrażania mikrostruktury,
- określenie temperatury początku i końca przemiany eutektoidalnej przy nagrzewaniu i chłodzeniu, stanowiące istotę recenzowanej pracy,
- badania mikrostruktury osnowy żeliwa otrzymanej techniką jej zamrażania z zakresu temperatur przemiany eutektoidalnej, weryfikujące warunki obróbki cieplnej,
- określenie warunków obróbki podzerowej żeliwa zapewniającej pełną przemianę przechłodzonego austenitu w martenzyt,
- wykonanie podstawowych badań właściwości materiałowych wymienionych wyżej żeliw i siluminu wysokokrzemowego metodą nanoindentacji,
- badania odporności na zarysowanie,
- badania odporności na zużycie ściernie,
- badania struktury geometrycznej powierzchni trącej próbek.

Wykonany zakres badań oceniam bardzo wysoko i świadczy on o dobrym rozeznaniu Doktoranta w zakresie wymagań materiałowych i eksploatacyjnych tworzyw stosowanych w silnikach samochodowych w układzie tuleja cylindrowa – tłok. Otrzymane wyniki badań dają temu wyraz, zarówno w zakresie mikrostruktury wytworzonej przeprowadzoną obróbką cieplną wynikającą z ustalonych doświadczalnie jej parametrów a także prezentacją wyników i ich analizą. Są to podrozdziały zatytułowane: *Określenie wartości i zakresu temperatur przemiany eutektoidalnej przy nagrzewaniu i chłodzeniu*, *Opracowanie atlasu mikrostruktur próbek z żeliwa sferoidalnego w I-szym i IV-tym wariacie mikrostruktury, hartowanych z zakresu temperatur przemiany eutektoidalnej w wodzie*, *Opracowanie dwuskładnikowej mikrostruktury osnowy żeliwa sferoidalnego, zawierającego wydzielenia ferrytu i martenzytu*, *Opracowanie dwuskładnikowej mikrostruktury osnowy żeliwa sferoidalnego, zawierającej 30% wydzielenia ferrytu i 70% martenzytu oraz 50% wydzielenia ferrytu i 50% martenzytu*.

Przeprowadzone badania właściwości materiałowych m. in. metodą indentacji uważam za właściwe, bowiem są to badania porównawcze oddające specyfikę zjawisk w układzie tłok-cylinder a ich wyniki pozwalają na prognozowanie odporności na zużycie ściernie.

Wyniki badań (rozdz. 6.4.3) wartości współczynnika tarcia, siły tarcia i emisji akustycznej w próbie zarysowania potwierdziły większą przydatność nowo opracowanego żeliwa w zakresie wartości mierzonych parametrów w odniesieniu do materiałów wzorcowych (AlSi31,3; żeliwo z Mahle).

W końcowej części rozprawy (rozdz. 6.4.4) Doktorant podjął próbę szczegółowego określenia struktury geometrycznej powierzchni trących (odpowiednik gładzi) próbek przygotowanych z opracowanego żeliwa o mikrostrukturze ferrytyczno-martensytycznej oraz stopów wzorcowych przed i po próbach ścieralności. Głównym wskaźnikiem oceniającym podatność/odporność tworzywa na ścieranie była wartość parametru wysokościowego S_t oraz ubytek wysokości ΔS_t . Zaprezentowane wyniki badań (tab. 8 i wykresy na rys. 103 – 108) i ich analiza stanowią dobry dowód na, z jednej strony, uzyskanie pozytywnych wyników badań udowadniających postawioną tezę pracy, a z drugiej strony dowodzą dużych umiejętności Doktoranta w prowadzeniu rzetelnej analizy uzyskanych wyników. Podkreślić należy również, że w tym rozdziale Doktorant zamieścił dokładną procedurę przygotowania powierzchni wyjściowych do badań.

Postawione wnioski z przeprowadzonych badań i analiz uważam za właściwe, poza wnioskiem nr 4, który jest w zasadzie powtórzeniem wniosku nr 2 a ponadto jest niefortunnie sformułowany, tj. „Wyniki badań zrealizowane w tej pracy...” raczej powinno być uzyskane lub otrzymane.

Rozprawa napisana jest na ogół poprawnym językiem i zawiera niewiele błędów formalnych oraz edytorskich. Jednak używanie wyrazu „opracowanie” w wielu miejscach pracy jest nadużyciem Doktoranta i wg mojej opinii powinno być zastąpione wyrazem „wykonane/y”. Próbkę do badań wykonujemy a nie opracowujemy i tak na s. 67 przedostatnie zdanie od dołu strony: „Powierzchnię trącą próbek z żeliwa sferoidalnego w czterech wariantach składu chemicznego o mikrostrukturze ferrytyczno-martensytycznej, opracowano techniką trawienia.” powinno być napisane po przecinku „wykonano techniką trawienia”. Dalsze przekłady takich uchybień można znaleźć na stronach 29, 53, 72, 73, 109.

I inne niektóre niedociągnięcia stylistyczne:

s. 56, jest „Dla realizacji celów pracy, szczególną uwagę zwrócono na:” a powinno być: „Realizując cel pracy, szczególną uwagę”.

Niekiedy Doktorant na początku zdań typu „W celu poprawy warunków współpracy takich tulei z pierścieniami tłokowymi, ...” stosuje niewłaściwie „Dla poprawy itd...”, czyli np. „Dla ustalenia wartości temperatury” (s. 73) zamiast „w celu ustalenia wartości temperatury ..”, s. 70, Rys. 53 brak odnośnika do literatury i wymiarów próbek stosowanych w badaniach zamrażania struktury.

W sumie poza nielicznymi uwagami, głównie dotyczącymi strony edycyjnej, uważam recenzowaną pracę doktorską za wyróżniającą, przede wszystkim ze względu na precyzyjny,

zwięzły opis wykonanych badań i ich różnorodność ale też właściwą i adekwatną do postawionej tezy wartość. Recenzowaną rozprawę oceniam jako wartościową pod względem poznawczym i użytecznym a największym osiągnięciem Autora jest opracowanie nowego żeliwa sferoidalnego z przeznaczeniem na tuleje cylindrowe silników spalinowych, wyznaczenie parametrów obróbki cieplnej w celu uzyskania mikrostruktury ferrytyczno-martenzytycznej oraz opracowanie preparacji powierzchni a także wykazanie większej odporności na zużycie ścierne od tworzyw dotychczas stosowanych.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że praca doktorska mgr. inż. Bogdana Kupca pt. „*Wpływ mikrostruktury i struktury geometrycznej powierzchni na zużycie ścierne żeliwa szarego dual phase*” spełnia wymagania stawiane przez Ustawę o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych wobec czego wnioskuję do Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej o dopuszczenie Kandydata do publicznej obrony.

