

RECENZJA

pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Grzegorza Rzepki z Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej pt.: „Kształtowanie mikrostruktury połączenia dwuwarstwowego obudowy turbosprężarki ze stopów żelaza w warunkach oddziaływania naprężeń cieplno-mechanicznych” wykonanej pod opieką promotora Pana prof. dr hab. inż. Jana Sieniawskiego i promotora pomocniczego dr. inż. Jacka Nawrockiego opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej (pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny z dnia 28 września 2020 roku).

W pogoni za efektywnością spalania w silniku samochodowym oraz dotrzymaniem norm emisji CO₂ konstruktorzy prowadzą próby nad rozwiązaniami technicznymi pozwalającymi na uzyskanie planowanych wymagań umożliwiających wzrost mocy silnika. Nie jest to problem łatwy ponieważ potrzeba nowych rozwiązań technicznych i technologicznych wymagających stosowania nowych konstrukcji i materiałów. Osiągnięcia w tym zakresie są często chronione przez firmy produkujące samochody i ich poddostawców. Zatem przedstawiona w rozprawie tematyka jak najbardziej wpisuje się w ten trend, bowiem dotyczy opracowania elementu silnika/turbosprężarki, która jest obecnie stosowana w samochodach już niekoniecznie klasy premium. W wielu rozwiązaniach turbosprężarek podstawowymi tworzywami są żeliwo szare lub sferoidalne specjalne, które do niedawna spełniały wymagania bezawaryjnej pracy tego elementu silnika. Podnoszenie temperatury spalania powodujące m. in. wzrost naprężeń cieplno-mechanicznych w obudowie turbosprężarki i jej pękanie wymaga nowych rozwiązań materiałowych i konstrukcyjnych co Doktorant przedstawił w swojej rozprawie.

Tytuł pracy odpowiada jej treści a praca stanowi właściwe podejście do zagadnienia poszukiwania optymalnych parametrów wytwarzania odlewu dwuwarstwowego (kołnierza obudowy łożyska turbosprężarki) na bazie żeliwa szarego EN-GJL-250 i warstwy wzmacniającej z żeliwa sferoidalnego specjalnego GJS-XSiMo5-1 lub staliwa żaroodpornego GX40CrNiNb25-20 mające, zamyśle Autora rozprawy, spełniać warunek odporności na zmęczenie cieplne. W związku z powyższym uznaję, że podjęta przez mgr. inż. Grzegorza Rzepkę tematyka badawcza jest aktualna i mieści się w zakresie dyscypliny Inżynieria materiałowa.

Praca napisana jest w nietypowym układzie dla rozpraw doktorskich, czyli składa się z przeglądu literatury i części opisującej badania własne, które obejmują obszerne badania wstępne dotyczące symulacji numerycznej rozkładu naprężeń i temperatury (1 i 2 etap), badania materiałowe połączenia dwuwarstwowego na modelu rzeczywistym (1. stadium badań) a dopiero po analizie wyników tych badań postawiona została tez pracy i wykonane zostały badania 2. stadium. Wyniki tych badań doprowadziły Doktoranta do udowodnienia tezy. Powyższa uwaga ma

podkreślić dużą z jednej strony zawilgość treści pracy a z drugiej strony wskazać na szeroki jej zakres badawczy i duże umiejętności w tworzeniu odpowiedniej metodyki badawczej. Jej treść przedstawiona została na 118 stronicach. W pracy przytoczono 61 pozycji literaturowych, w tym 56 opublikowanych po 2000 roku. Praca składa się z merytorycznie istotnych 5 rozdziałów.

W pierwszych dwóch rozdziałach Doktorant wprowadzając czytelnika w tematykę rozprawy przedstawia wybraną wiedzę na temat rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych stosowanych w produkcji turbosprężarek silników samochodowych, podkreślając zależności pomiędzy masą silnika, jego trwałością i uzyskiwanymi mocami. Zaraz na wstępie mgr G. Rzepka podkreśla, na podstawie wyników badań własnych i firmy Borg Warner, że zastosowanie żeliwa szarego EN-GJL-250 na obudowę łożyska trubosprężarki nie spełnia warunku odporności na zmęczenie cieplne i jest przyczyną pęknięcia obudowy łożyska. Podobnie jak zaproponowane zmiany konstrukcji obudowy. Analiza tych wyników badań i stanu literatury pozwoliły Doktorantowi na stwierdzenie, że jedynym wyjściem jest zastosowanie w obudowie łożyska materiału dwuwarstwowego charakteryzującego się większą żarowytrzymałością. W związku z tym w dalszej części rozprawy przytaczany jest stan zagadnienia w zakresie rozwoju procesów wytwarzania elementów maszyn jako połączeń dwuwarstwowych. Z przedstawionego obszernego przeglądu literatury wynika, że najczęstsze zastosowanie w wytwarzaniu części maszyn wzmocnionych warstwowo/powierzchniowo mają metody odlewnicze, które pozwalają na wykonywanie odlewów warstwowych dwoma sposobami. Pierwszy to zalewanie formy dwoma różnymi stopami, w tym zadaniem jednego jest zwiększyć jakość użytkową elementu np. odporność na zużycie ściernie. Drugą metodą jest zalewanie formy we wnętrzu której, umieszcza się wkładkę ze stopu w stanie stałym. Jest to moim zdaniem dobre wprowadzenie czytelnika w tematykę rozprawy. Wartościowym zakończeniem przeglądu literatury jest jej syntetyczne podsumowanie oraz przyjęcie celu i zakresu pracy a także założenia, że metoda odlewania dwuwarstwowego elementu obudowy turbosprężarki w układzie stan ciekły (żeliwo sferoidalne SiMo lub staliwo żaroodporne) - stan stały (żeliwo szare) będzie najwłaściwsza ze względów technologicznych i ekonomicznych.

Dalsza część pracy to rozdziały zatytułowane „Badania własne”, które w pierwszej części dotyczą symulacji numerycznej stanu naprężeń cieplno-mechanicznych i rozkładu temperatury w obudowie dwuwarstwowej łożyska zaproponowanego jako jego autorskie rozwiązanie konstrukcyjne. Badania symulacyjne miały na celu wykazanie, że przyjęte założenia materiałowe (zastosowano tylko materiały certyfikowane przez wytwórców silników) powinny czynić zadość warunkowi odporności na zmęczenie cieplne odlewu dwuwarstwowego poprzez określenie stanu naprężeń cieplno-mechanicznych.

Doktorant przeprowadził kompleksowe badania symulacyjne numeryczne obejmujące 4 stopy odlewnicze, tj. 2 gatunki żeliwa sferoidalne SiMo, żeliwo wermikularne oraz staliwo żaroodporne. Na podstawie analizy stanu naprężeń wg badań pierwszego etapu (obudowa z GJL-250) określona została wartość krytyczna naprężenia cieplno-mechanicznego na poziomie 269 MPa w temperaturze ok. 500°C. Ten wynik został przyjęty przez Doktoranta jako kryterium doboru materiału kołnierza obudowy łożyska.

W dalszej części pracy (2. etap badań symulacyjnych - obudowa dwuwarstwowa) Doktorant przedstawia metodykę badań, przebieg ich realizacji oraz wyniki, które moim zdaniem zostały zaplanowane i wykonane poprawnie. Symulacje obejmowały wyżej wymienione stopy żelaza

zastosowane na materiał kołnierza. Do dalszych badań zostały wybrane, wg mnie, arbitralnie bez bardziej szczegółowego/wyczerpującego uzasadnienia stopy GJS-XSiMo5-1 i GX40CrNiNb25-20 mające tworzyć połączenie dwuwarstwowe (s.44).

W punkcie 4.3 Doktorant przedstawił wyniki badań materiałowych wybranych połączeń dwuwarstwowych na modelu rzeczywistym. Wyniki badań mikroskopowych, rozkładu pierwiastków na połączeniu potwierdziły (poza połączeniem żeliwo szare-żeliwo SiMo5-1, gdzie obraz mikrostruktury nie potwierdza istnienia strefy przejściowej ale wyniki badań twardości tak) zmiany wskazujące na istnienie poprawnego połączenia dwuwarstwowego, podobnie jak wyniki analizy tomografii. *Te różnice wymagają komentarza w czasie obrony.*

Obszerne badania wstępne i dane literaturowe pozwoliły sformułować na stronie 53 tezę pracy, którą oceniam jako wystarczająco poprawną, chociaż w części oczywistą. W tezie pojawia się fragment dotyczący konieczności odwęglenia powierzchniowego żeliwa sferoidalnego, który słabo koresponduje z wynikami badań wstępnych przedstawionych na stronie 51 (6 wiersz od góry). *Cytat: Stwierdzono, że zastosowanie materiałów EN-GJL-250 + GJS-XSiMo5-1 umożliwia uzyskanie dobrej jakości połączenia przy niespełnionym warunku minimalnej wartości różnicy zawartości węgla [39,40].*

Udowodnienie tezy przedstawiono w drugiej części rozprawy nazwanej przez Autora stadium 2. badań. Zawarto w niej opis przebiegu badań nad odwęglaniem warstwy wierzchniej żeliwa GJS-XSiMo5-1 na walcowym odlewie modelowym. Uzyskane wyniki przedstawiające warunki temperaturowe i skład atmosfery pieca stanowią wartości kryterium doboru parametrów odwęglania powierzchniowego tego żeliwa. Nie do końca zrozumiała jest celowość przeprowadzonych badań twardości warstwy odwęglonej?

W dalszej części pracy (rozdz. 4.4.3) Doktorant zajął się wykonywaniem w formach z masy piaskowych modelowych odlewów dwuwarstwowego kołnierza obudowy łożyska turbosprężarki w celu określenia warunków ich wytwarzania. Moim zdaniem przyjęty wg rys. 71 sposób wypełniania wnęki formy tzw. zalewaniem z góry nie jest poprawny, ponieważ tworzy warunki do powstawania porowatości gazowej i dlatego bardzo rzadko jest stosowany w odlewnictwie. Zalewanie boczne jest najczęściej stosowane, bowiem jest mniej wadotwórcze (rys. 78), co też Doktorant stwierdza na stronie 68. Zatem próby bocznego zalewania odlewów warstwowych z wkładką staliwną należy uznać za bardziej wiarygodne. Zakres badań wykonanych odlewów próbnych obejmował m. in. pomiary twardości metodą Brinella i Vickersa, badania jakości połączenia metodą tomografii rtg, rozkład pierwiastków w strefie połączenia oraz mikrostrukturę i na tej podstawie przeprowadzona została analiza szerokości strefy przejściowej. Jest to duża ilość dobrej jakości wyników postawiona jednak bez głębszej analizy. Wniosek końcowy z tych badań postawiony przez Doktoranta to, „że duży wpływ na jakość połączenia ma temperatura zalewania żeliwa oraz temperatura wkładki ze staliwa GX40CrNiNb25-20 i żeliwa GJS-XSiMo5-1 a także stosunek masy wkładki do ciekłego żeliwa”.

Przydatność odlewów dwuwarstwowych do pracy w warunkach obciążenia mechanicznego i cieplnego obudowy łożyska turbosprężarki mgr inż. Grzegorz Rzepka wyznaczył na podstawie prób zmęczenia cieplnego w temperaturze 500°C w czasie 60 min oraz chłodzenia w wodzie i wyników próby statycznego rozciągania w temp. 250°C. Wyniki tych prób odniesiono do wyników badań materiałów referencyjnych i wyników symulacji numerycznej. Rezultaty tych

badania wykazały, że połączenie żeliwo szare GJL-250 i żeliwo sferoidalne GJS-XSiMo5-1 nie spełnia warunku odporności na zmęczenie cieplne w przeciwieństwie do połączenia żeliwo szare - staliwo.

Badania własne rozprawy kończy rozdział opisujący metodykę i wyniki statycznej próby rozciągania. W tym celu Doktorant podjął próbę wykonania odlewów próbek w pierwszym podejściu z góry skazaną na niepowodzenia (rys. 123 i 124) i wg mnie nie powinna znaleźć się w pracy, ale druga już była udana (patrz rys. 125). Doktorant poddał tym badaniom nadal 2 rodzaje odlewów dwuwarstwowych, mimo iż odlewy warstwowe żeliwo szare - żeliwo sferoidalne nie spełniły warunku odporności na zmęczenie cieplne, zatem dalsze badania tego materiału były, moim zdaniem, nie uzasadnione. W podsumowaniu rozdziału Doktorant stwierdził, że materiałem, który spełnił założone warunki pracy obudowy łożyska turbosprężarki jest połączenie warstwowe żeliwa GJL-250 i staliwa GX40CrNiNb25-20.

Wykonany zakres badań oceniam pozytywnie i świadczy on o dobrym rozeznaniu Doktoranta w tematyce badań symulacyjnych i materiałowych.

Rozdział zatytułowany „Analiza wyników badań i podsumowanie” jest w istocie streszczeniem pracy.

Rozprawa napisana jest na ogół poprawnym językiem i zawiera niewiele błędów formalnych oraz edytorskich. Niemniej wielokrotne używanie wyrazu „dla” zamiast „w celu” uważam za niepoprawne, np. s. 56, cytat: Próby odwęglania prowadzono w atmosferze ochronnej gazów obojętnych, dla zapobiegania niepożądanemu utlenieniu”. Dalsze przekłady takich uchybień można znaleźć na wielu stronach pracy.

Inne niektóre niedociągnięcia edytorskie wynikają z niewłaściwego stosowania nazewnictwa odlewniczego, np. jest „wnęka odlewu” a powinno być „wnęka formy”; jest „układ zasilający” powinno być „układ wlewowy”; jest „modele formierskie” powinno być „modele odlewu” itp. S. 63 - nie ma pojęcia „technologii odlewu piaskowego”.

Pytanie: Jaka jest pojemność pieca łukowego i jakie była zawartość węgla w żeliwie po wytopie w tym piecu? Błędny podpis pod rys. 53.

Powtórzony został rysunek o tej samej zawartości tj. rys. 72 i 122.

Z jakiego materiału wykonane są płyty formierskie na rys. 76, 78?

W sumie, poza tymi uwagami, głównie dotyczącymi strony edycyjnej, uważam recenzowaną pracę doktorską jako spełniającą wymagania stawiane tego typu rozprawom. Recenzowaną rozprawę oceniam jako wartościową pod względem poznawczym i w przyszłości użytecznym a największym osiągnięciem Autora jest opracowanie technologii wytwarzania nowego dwuwarstwowego materiału przeznaczonego na wybrany element obudowy łożyska turbosprężarki silnika spalinowych.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr. inż. Grzegorza Rzepki pt. „Kształtowanie mikrostruktury połączenia dwuwarstwowego obudowy turbosprężarki ze stopów żelaza w warunkach oddziaływania naprężeń cieplno-mechanicznych” spełnia wymagania stawiane przez Ustawę o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych wobec czego wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej o dopuszczenie Kandydata do publicznej obrony.