

prof. dr hab. inż. **Zbigniew Konopka**
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów
Katedra Metalurgii i Technologii Metali
Politechnika Częstochowska

Częstochowa, dn.27.04.2022 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Radoń pt.: "Zużycie ściernie natryskiwanych plazmowo powłok na bazie wolframu i chromu do zastosowań na gładź cylindrową"

opracowana na zlecenie Dziekana
Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej

1. Ocena przedmiotu rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa dotyczy badania i oceny możliwości zastosowania twardych kompozytowych powłok WC-Co i Cr₃C₂-NiCr nakładanych plazmowo na tuleje cylindrowe w silnikach spalinowych. Przedmiotem rozprawy jest opracowanie technologii Atmospheric Plasma Spraying (APS) powłok na powierzchniach tulei cylindrowych wykonanych ze stopu AlSi, które jest zagadnieniem naukowo-badawczym o dużej wartości poznawczej oraz innowacyjnej, z dużym potencjałem wdrożenia wyników do praktyki przemysłowej. Badane w pracy zagadnienie lokuje się w aktualnym trendzie poszukiwania nowych rozwiązań zwiększających trwałość silników spalinowych połączonych ze zmniejszeniem ich masy i zwiększeniem osiągnięć.

Aktualnie bloki nowoczesnych silników spalinowych wykonywane są (ponad 60%) z okołoeutektycznych stopów Al-Si metodą odlewania wysokociśnieniowego z wtopkami tulei cylindrowych wykonanych z żeliwa szarego z grafitem płatkowym. Żeliwne tuleje cylindrowe wytwarzane są metodami odlewania odśrodkowego w formach metalowych lub grawitacyjnego w formach piaskowych. Próba zastąpienia żeliwnej tulei cylindrowej gładzią

wykonaną ze stopu Al-Si jest nowym wyzwaniem materiałowym i technologicznym ponieważ mimo korzystnych, odpowiednich właściwości mechanicznych i fizycznych stopów Al-Si (duża wartość ilorazu wytrzymałości do masy, duża przewodność cieplna, mała rozszerzalność cieplna) wymagana jest poprawa właściwości trybologicznych stopu. Powszechnie stosowanym rozwiązaniem stwarzającym możliwość poprawy odporności na ścieranie jest nakładanie powłok metalowych lub niemetalowych na takie powierzchnie, co umożliwia sterowanie właściwościami trybologicznymi.

W silniku spalinowym około 15% energii ze spalania paliwa jest zużywane na zniwelowanie oporów tarcia, w tym głównie w parze trącej pierścienie tłokowe-cylinder. Jest więc oczywistym, że zagadnieniom poszukiwania nowych materiałów i badaniom zmniejszenia tarcia w takim węzle ciernym poświęca się wiele uwagi we współczesnych badaniach naukowych i aplikacyjnych. Podjęcie badań opisanych w przedstawionej do recenzji pracy mieści się w tym trendzie badań i jest, moim zdaniem, ze wszech miar uzasadnione.

Konieczność kompleksowego zbadania struktury i właściwości powłok odpornych na ścieranie na podłożu ze stopu Al-Si w pełni uzasadnia podjęcie badań w tym zakresie. Ze względu na przedstawione powyżej elementy praca lokuje się w innowacyjnym obszarze badań naukowych.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy

Tekst rozprawy liczy 187 stron, który uzupełniają: bibliografia zawierająca 128 pozycji literaturowych oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Rozprawa składa się z dwóch głównych części. W pierwszej części przedstawiono przegląd literatury zawierający: wprowadzenie (rozdział 1), charakterystykę zagadnienia współpracy układu tuleja cylindrowa-pierścienie tłokowe w silniku spalinowym (rozdział 2), ocenę materiałów stosowanych na tuleje cylindrowe i pierścienie tłokowe (rozdział 3), charakterystykę materiałów elementów testowego silnika spalinowego (rozdział 4) oraz opis stanu zagadnienia w świetle literatury, założenia i tezę pracy (rozdział 5).

Ten obszerny (str. 5-63) fragment rozprawy jest ogólnym opisem przedstawionych wyżej zagadnień, w którym zamieszczono wiele informacji dotyczących różnych wyników badań materiałów stosowanych w silnikach spalinowych, opublikowanych w przytoczonym wykazie literatury. Niektóre dane jak: prędkość ścierania i nacisk (ciśnienie) zostały wykorzystane w badaniach własnych ścierania powłok. Wysoką ocenę wystawiam raportowi z badań elementów silnika testowego zamieszczonym w rozdziale 4. Przedstawiono w nim

bogată dokumentacjê zdjêciowâ makro i mikrostruktury badanych materiałow oraz analizy składu chemicznego. Informacje te sã o tyle wãzne, że próbki testowe zostały wycięte z bloku silnika i wykorzystane w badaniach wlasnych. W przegladzie literatury zabrakło szerszej informacji o stosowanych w pracy powłokach szczególnie w zastosowaniach trybologicznych. Badane w pracy powłoki sã znane, co potwierdzono w spisie literatury (powłoka WC-Co poz.107-113, 125-128 i powłoka Cr₃C₂-NiCr poz.122-124). Przegląd literatury napisano na poziomie dobrym pod wzgledem merytorycznym, jêzykowym i edytorskim. Niższa ocena wzgledem doskonałej wynika z faktu nadmiernego stosowania akapitów i miejscami nieczytelnego jêzyka, co utrudnia spójnã analizê przedstawionego materiału literaturowego. Czêść pierwszã pracy kończy opis stanu zagadnienia w świetle literatury, który stanowi raczej mieszaninê różnych wybranych informacji a nie próbê uzasadnienia koncepcji pracy. W zbyt obszernie sformułowanej tezie pracy kończãcej jej pierwszã czêść w brzmieniu: „Zastosowanie w tulejach monobloków silników ze stopu aluminium-krzem, natryskiwanych metodã APS powłok na bazie wolframu (WC-Co) lub chromu (Cr₃C₂-NiCr) oraz opracowanie ich powierzchni trãcej technika polerowania lub honowania na plateau, pozwoli uzyskać wyższã odporność na zużycie ścierne, w porównaniu do dotychczas stosowanych tulei z wtopkami żeliwnymi o powierzchni trãcej honowanej na plateau.” zabrakło istotnej informacji, na jakim podłożu będã natryskiwane powłoki?

Przedstawione opracowanie, mimo uchybień, dowodzi dużej wiedzy Autorki w obszarze naukowych zagadnień rozwiãzywanych w pracy. Tã czêść pracy oceniam dobrze, a poziom tego opracowania odpowiada wymogom pracy doktorskiej.

W drugiej czêści pracy stanowiãcej raport z badań wlasnych, Autorka przedstawia cele naukowe i praktyczne pracy oraz program badań (rozdział 6). W rozdziale 7 przedstawiono szczególowy opis zastosowanych materiałow z zestawem składów chemicznych i zdjêć mikrostruktury stopu AlSi (podłoża do nakładania powłok), kształtu zastosowanych proszków, próbek wzorcowych z żeliwa szarego i przeciwpróbek w badaniu tarcia. Szkoda, że nie pokazano mikrostruktury próbki testowej stopu AlSi11 przy powiększeniu np. 100x bo można byłoby zidentyfikować podstawowe składniki na podstawie ich kształtu i rozmieszczenia (dendryty roztworu stałego, faza eutektyczna czy faza wysoko-żelazowa) w przeciwieństwie do załączonych wyników mikroanalizy chemicznej w wybranych miejscach próbki i braku identyfikacji tych faz. Na przykład w pracy opisano "wydzielenia w kształcie płytek (rys.40,pkt 3) sã bogate w krzem", "jasne wydzielenia o kształcie wieloboków (rys.40,pkt 2) sã bogate w żelazo", itd., co niedostatecznie dokładnie

charakteryzuje mikrostrukturę stopu podłoża. W rozdziale 8 opisano szczegółowo metodykę badań właściwości wytworzonych powłok.

Dla osiągnięcia celu pracy zrealizowano program badawczy o bardzo szerokim zakresie obejmujący: wykonanie powłok z proszków WC-Co, WC-CoCr (typ I), Cr₃C₂-Ni i Cr₃C₂ NiCr (typ II) na próbkach testowych ze stopu AlSi11, analizę wpływu składu i morfologii proszku na strukturę, skład fazowy, geometrię powierzchni i właściwości mechaniczne powłok, określenie odporności na zarysowania i na zużycie ściernie. Zastosowano odpowiednio dobrane, nowoczesne techniki pomiarowe. W obu typach (I i II) zastosowano dwa różne co do składu proszki, ale w wynikach pracy zostały one zakwalifikowane do jednego typu. Do wytworzenia powłok zastosowano dwa rodzaje proszków w postaci kulistego aglomeratu drobnych cząstek (wariant A) o średnim wymiarze kulki 10-30 μm i mieszaniny cząstek kulistych i wielościennych o wymiarze 10-60 μm (wariant B). Nie znalazłem uzasadnienia dlaczego takie proszki zastosowano. Przedstawiono parametry natryskiwania plazmowego dla czterech wariantów powłok (IA,IB,IIA,IIB), które zostały prawdopodobnie ustalone w wyniku wcześniejszych badań. Nie podano jaka była temperatura stosowanej plazmy?

Wyniki badań przedstawiono w rozdziale 9. Makrostruktury wytworzonych powłok i wyniki pomiaru ich grubości dowodzą dużej jednorodności wyników (max. ok. 10% odchylenie od wartości średniej) i tym samym potwierdzają prawidłowość procesu natryskiwania plazmowego. Niedostatkim jest brak zdjęć mikrostruktury powłok przy różnych powiększeniach, które pozwoliłyby ocenić ich jakość i pośrednio prawidłowości zastosowanych parametrów procesu natryskiwania. Wysoką jakość połączenia powłoki z podłożem oceniono opisowo na podstawie widoków zarysowania powierzchni diamentowym wgłębnikiem obciążonym siłą 10N w płaszczyźnie prostopadłej do powłoki. Skuteczność stapiania cząstek proszku w powłokach oceniono na podstawie mikrostruktury ale w pracy zamieszczono tylko jedno zdjęcie powłoki IIB. Ocena uzyskanych wyników, oparta o doświadczenie Doktorantki, ma charakter jakościowy.

W badaniach porowatości powłok określono ich kształt, rozmiar (średnicę i długość) oraz ilość, co przedstawiono w atlasie porów (tabela 10 str. 108). W tabeli nie podano na jaką powierzchnię przypada podana ilość porów, więc należy przyjąć, że jest to powierzchnia obszaru obserwacji na mikroskopie skaningowym równa 8262 μm². Powłoki WC-Co miały pory bardziej zbliżone do kulistych i było ich mniej w porównaniu do powłok Cr₃C₂-NiCr. Określono twardości HV0,2 badanych powłok, które potwierdziły oczekiwany wynik większej twardości powłok z węglikiem wolframu od powłok z węglikiem chromu.

Wysoką ocenę wystawiam wynikom badań odporności na pękanie badanych powłok określonej metodą Palmqvista i określeniu takich właściwości powłok jak: twardość podczas wciskania wgłębnika (H_{IT}), twardość Vickersa (HV_{IT}), modułu sprężystości przy wciskaniu wgłębnika (E_{IT}) i odporności na zużycie H_{IT}/E_{IT} . Wyniki tych badań uznaję za pionierskie w badaniu tego typu powłok. Na podstawie oceny odcisków w mikrostrukturze powłoki stwierdzono większą odporność do pęknięć powłok WC-Co.

Obszerną sekwencję badań własnych stanowią wyniki testów na mikro i makro zarysowania (str.123-140). W bogatym materiale badawczym przedstawiającym mikrostruktury, skład chemiczny i charakterystykę geometrii rysy wielu składników powłok i porównawczo żeliwa z grafitem płatkowym dowiedziono większej odporności na zarysowanie i mniejszej wartości współczynnika tarcia badanych powłok od żeliwa.

Kluczowymi wynikami badań w pracy są ocena struktury geometrycznej powierzchni tarcia i zużycie ściernie w funkcji czasu mierzone zmianą wysokości parametru S_t określający różnicę wysokości pomiędzy linią wzniesień i wgłębień na powierzchni oraz zużycia wysokościowego Δh próbek testowych i wzorcowych. Z wyników tych badań (tab.20 i 21) wynika, że zużycie ściernie badanych powłok jest około dwukrotnie mniejsze od zużycia ściernego żeliwa dla powierzchni honowanych na plateau i około trzykrotnie mniejsze dla powierzchni polerowanych, co jest bezpośrednim dowodem prawdziwości postawionej tezy pracy.

Sekwencję badań własnych kończy podsumowanie i wnioski. Autorka przedstawia szeroką analizę wyników, a opis mechanizmu kształtowania się mikrostruktury tzw. splatów powłoki w procesie cieplnego natryskiwania plazmowego oceniam bardzo wysoko. Wnioski wynikające z analizy wyników są zgodne ze znaną do tej pory teorią. Opracowanie to dowodzi dojrzałości naukowej Doktorantki i jego zdolności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W moim przekonaniu Autorce udało się osiągnąć cel pracy, co potwierdza prawidłowość przyjętych założeń, odpowiednie zastosowanie naukowej metodyki badań i perfekcyjną realizację praktyczną wykonanych eksperymentów. Tą część pracy oceniam bardzo dobrze ponieważ uzyskano nie znane dotychczas wyniki potwierdzające możliwość ich zastosowania w praktyce. Przedstawione wyniki badań dowodzą, że możliwe jest sterowanie właściwościami trybologicznymi materiałów węzła ściernego w silniku spalinowym przez opis mechanizmu zmian strukturalnych, geometrycznych i mechanicznych powłok. Uzyskane wyniki są nowatorskie i wnoszą nową wiedzę w teorię i praktykę materiałów inżynierskich i wytwarzanie bardziej funkcjonalnych części maszyn.

3. Uwagi

W pracy nie dostrzegłem błędów i uchybień w zakresie edycji pracy, prezentacji wyników i interpretacji. Brakuje kilku istotnych informacji do kompleksowej oceny uzyskanych wyników, które chciałbym uzyskać od Doktorantki jako odpowiedź na następujące pytania:

1. Proszę o uzasadnienie wyboru badanych w pracy powłok i kontekście ich technologii, właściwości i potencjalnych zastosowań,
2. Jaka była temperatura stosowanej plazmy i jak ona wpływa na zjawisko topienia stosowanych proszków?.
3. Czy zwiększenie odporności na zużycie ściernie tulei z naniesionymi powłokami nie grozi zwiększeniem zużycia pierścieni tłokowych w silniku?.

4. Ocena końcowa

Stwierdzam, że rozprawa Pani mgr inż. Magdaleny Radoń spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim ponieważ:

- sformułowano problem naukowy i określono jego cel,
- zaplanowano i zrealizowano badania stosując nowoczesne narzędzia naukowe według przyjętej metodyki badań, co dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktorantkę,
- logicznie zinterpretowano uzyskane wyniki i sformułowano wnioski, co wskazuje na szeroką ogólną wiedzę teoretyczną Kandydatki,
- Doktorantka osiągnęła cel pracy, a uzyskane wyniki wnoszą oryginalny wkład naukowy i praktyczny w teorię i praktykę w zakresie nowych materiałów na elementy silników spalinowych.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Magdaleny Radoń pt.: ” **Zużycie ściernie natryskiwanych plazmowo powłok na bazie wolframu i chromu do zastosowań na gładź cylindrową**” spełnia wymogi określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Panią mgr inż. Magdalenę Radoń do publicznej dyskusji nad Jej rozprawą doktorską przed Radą Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

Koncepta Uligm