

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**pt. "Zużycie ściernie natryskiwanych plazmowo powłok na bazie wolframu i chromu do zastosowania na gładź cylindrową"** mgr inż. Magdaleny Radoń wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, zgodnie z pismem nr RM-530-09-04/19/2022 z dnia 23 marca 2022 r.

#### **1. Dane ogólne**

Przedłożona do recenzji rozprawa składa się z 10 rozdziałów zawierających w części zasadniczej 196 stron tekstu, 159 rysunków i 21 tabel. Wykaz literatury zawiera 128 pozycji, ściśle związanych z tematem pracy.

#### **2. Ocena istotności problemu naukowego i technologicznego oraz wyboru tematu rozprawy**

Zmiany legislacyjne dotyczące norm emisji spalin dla nowych samochodów, które nastąpiły na przestrzeni ostatnich trzech dekad, w sposób znaczący wpłynęły na to jak projektowane i produkowane są nowe auta i ich podzespoły. Dwa najważniejsze trendy jakie można wyróżnić to z jednej strony redukcja masy całkowitej samochodu, a z drugiej tzw. downsizing, czyli dążenie do zastępowania większych silników, o dużej pojemności, mniejszymi o takiej samej mocy. Choć dzisiaj ten drugi trend został już, jak się wydaje wyhamowany i zastąpiony rightsizingiem, czyli doborem optymalnej pojemności silnika spalinowego do cyklu spalania, to odcisnął on niezaprzeczalne piętno na tym jak wyglądają dzisiejsze jednostki napędowe w samochodach osobowych.

W ostatnich latach można zaobserwować coraz większy udział odlewów aluminiowych, w szczególności tych wytwarzanych w procesie odlewania ciśnieniowego w konstrukcji samochodów. Poza tradycyjnymi już elementami jakimi są bloki silnika czy łoża wału korbowego (ang. bedplate), aluminium zaczyna wypierać stal także w przypadku części strukturalnych auta (ang. body in white).

Trend ten spowodowany jest kilkoma czynnikami. Bez wątplenia głównym jest chęć zmniejszenia masy samochodu, co ma bezpośrednie przełożenie na spalanie oraz emisję spalin. Przykładowo szacuje się, że obniżenie całkowitej masy samochodu o 100 kg powoduje

zmniejszenie zużycia paliwa o około 0,5 l/km co z kolei przyczynia się do obniżenia emisji dwutlenku węgla do atmosfery o około 8,5 g/km. Dodatkowo duże elementy aluminiowe pozwalają uzyskać spore uproszczenie konstrukcji, w miejsce kilku części stalowych łączonych ze sobą, można zastosować pojedynczy odlew. Jednocześnie wyższe wymagania stawiane własnościom mechanicznym odlewów o takich zastosowaniach, które muszą zapewnić bezpieczeństwo osób podróżujących samochodem, wykorzystanie specyficznych technologii łączenia (nitowanie, spawanie), jak i sam ich rozmiar wymusza rozwój zarówno nowych stopów aluminium, jak i szereg zmian w samym procesie odlewania ciśnieniowego.

Aby zmniejszyć ciężar silnika spalinowego koncerny samochodowe zaczęły odchodzić od produkowania bloków z żeliwa, na rzecz stopów aluminium. Choć takie rozwiązanie było stosowane już w połowie XX wieku, np. American Motors Corporation wprowadziła do sprzedaży wyposażonego w sześciocylindrowy blok ze stopów aluminium Dodge Rambler w 1961r., to z początku nie zyskało ono popularności wśród klientów. Ówczesne ograniczenia technologiczne spowodowały, że bloki te były zbyt drogie w produkcji. Jednocześnie złe nawyki klientów, przyzwyczajonych do bloków żeliwnych, dotyczące serwisowania silników sprawiły, że często ulegały one przegrzaniu. Dopiero rozwój technologii odlewania, jak również stopów aluminium w połączeniu z presją, jaką wywarły na koncerny samochodowe wprowadzane normy emisji spalin zapoczątkowały masowe wprowadzanie bloków silnika ze stopów aluminium. Choć jednostki napędzane benzyną zaczęły być produkowane powszechnie ze stopów aluminium od lat 70. XX wieku, a silniki Diesla, ze względu na większe wymagania odnośnie własności mechanicznych dopiero od połowy lat 90. XX wieku, to jak wykazują dane produkcyjne dopiero w 2005 r. udział bloków wykonanych ze stopów aluminium wyniósł 50% całkowitej produkcji.

W przemyśle motoryzacyjnym bezwzględna przewagą stopów aluminium jako materiału, nad żelazem szarym jest jego mniejsza gęstość, a w konsekwencji masa finalnego produktu o zbliżonych wymiarach geometrycznych. Ta różnica, nawet po uwzględnieniu zmian konstrukcyjnych związanych z mniejszą wytrzymałością stopów Al, przekłada się na zmniejszenie masy bloków silnika o 40 do 50%. Dodatkowo, lepsze przewodnictwo cieplne stopów aluminium, pozwala na szybsze odprowadzenie ciepła z komory spalania. W efekcie można zaprojektować znacznie cieńszą koszulkę wodną otaczającą cylindry, niż w przypadku bloku żeliwnego. Co więcej, ponieważ wiele pozostałych elementów silnika spalinowego jest również wykonanych ze stopów aluminium, jak np.: głowica silnika czy tłoki cylindrów, pozwala to uniknąć naprężenia związanego z różnymi współczynnikami rozszerzalności

cieplnej. Może ono stanowić problem w przypadku połączenia żeliwny blok - aluminiowa głowica.

Na niekorzyść bloków odlanych ze stopów aluminium przemawia ich mniejsza sztywność. Musi ona być kompensowana odpowiednią konstrukcją. Co więcej ze względu na niższą temperaturę topnienia, muszą one być dodatkowo wzmocnione w rejonie komory spalania. Realizuje się to w praktyce albo poprzez zastosowanie odlewanych odśrodkowo tulei z żeliwa szarego (których pośrednio dotyczy recenzowana rozprawa), które następnie są wkładane jako wtopki do formy odlewniczej bloku silnika lub wciskane do odlanego bloku na zimno, albo nakładane poprzez zastosowanie specjalnej obróbki powierzchni wewnętrznej tulei cylindra, najczęściej polegającej na napyleniu cienkiej warstwy żeliwa za pomocą plazmy (tzw. bloki linerless).

Problematyka opiniowanej rozprawy mieści się zatem w ważnym i aktualnym obszarze zagadnień dotyczących opracowania innowacyjnych powłok na bazie wolframu i chromu do zastosowań na wewnętrzne tuleje cylindrów, których wytwarzanie jest przedmiotem pracy. Z tego względu wybór tematu rozprawy uważam za ważny z naukowego i technologicznego punktu widzenia.

### **3. Ocena merytoryczna rozprawy. Oryginalność i kompletność tez naukowych**

W rozdziale 1, Autorka przedstawiła motywacje stojące za podjęciem przedstawianych w pracy badań. Podkreślono, że pomimo postępującej hybrydyzacji i elektryfikacji układów napędowych silniki spalinowe będą ważnym elementem przemysłu motoryzacyjnego przez co najmniej kilka dziesięcioleci. Słowa te znajdują potwierdzenie, jednym z nich jest fakt, że recenzowana praca ma typowy charakter użytkowy i powstała dla potrzeb poznawczych z dużym potencjałem wdrożeniowym, zawiera również wciąż aktualne aspekty naukowo-badawcze. W Rozdziale 2 zajęto się problematyką współpracy elementów silnika tuleja cylindrowa - pierścienie tłokowe silnika spalinowego. Na podstawie przeglądu literatury uwypuklono w tym zakresie następujące, kluczowe dla Autorki tematy badawcze skupiające się głównie na modelach opisujących straty tarcia w analizowanym układzie trącym oraz model średniego ciśnienia efektywnego tarcia. Temat ten jest szczególnie istotny przy szacowaniu mocy silnika przy którym uwzględnia się wartość momentu obrotowego wału korbowego, uzyskanego w wyniku dostarczenia energii spalania oraz straty jego wartości na skutek tarcia. Innym, podejmowanym przez badaczy zagadnieniem jest tematyka współpracy par trących tuleja-pierścienie tłokowe w aspekcie ich podatności do zacierania się z uwzględnieniem obciążenia cieplnego tulei cylindrowych i pierścieni oraz obniżania się grubości filmu olejowego w punktach zwrotnych tłoka. Na podstawie dostępnych wyników badań można powiedzieć, że

charakter przebiegu zużycia gładzi tulei cylindrowej jest podobny do zmian wartości temperatury na wysokości tulei i zmian wartości ciśnienia w przestrzeni nad denkiem tłoka.

W Rozdziale 3 zajęto się materiałami stosowanymi na elementy grupy blok cylindrowy-tuleja cylindrowa-pierścienie tłokowe. Powołując się na dostępną literaturę, analizy własne oraz badania realizowane w Katedrze Odlewnictwa i Spawalnictwa Politechniki Rzeszowskiej omówiono szczegółowo obecny stan technologii materiałów stosowanych do wytworzenia każdego z elementów grupy. Stwierdzono, że tematyka jest tak specjalistyczna i ważna z punktu widzenia konkurencyjności, że zajmują się nią głównie laboratoria firm pracujących dla motoryzacji, zaś wyniki często objęte są klauzulą poufności. W przeprowadzonej analizie zwrócono uwagę na proces przygotowania gładzi tulei cylindrowych, która powinna zapewnić utrzymanie warstwy filmu olejowego oraz pojawiające się tendencje wyeliminowania żeliwnych wtopiek z bloków silników, co skutkować będzie dalszym obniżeniem ich masy. Zwrócono uwagę na ważność tematy powłok stosowanych na gładzie cylindrowe, które powinny charakteryzować się odpowiednimi właściwościami takimi jak na przykład wysoka twardość, niska wartość współczynnika tarcia, wysoka odporność na zużycie ściernie, wysoka wartość współczynnika przewodzenia ciepła oraz odporność korozyjna. W tym aspekcie wyodrębniono i scharakteryzowano powłokę chromową, powłokę Nikasil i NiCom (Mahle), powłoki na bazie żelaza i jego tlenków, powłokę Ni-Co-YSZ, powłoki ceramiczne, powierzchnię gładzi „Mirror Like”.

W Rozdziale 4 przedstawiono charakterystykę materiałową elementów testowego silnika samochodowego, którym był silnik Toyota Proace 1,5. Przedstawiono wyniki badań materiałowych bloku silnika, tulei wtopki żeliwnej oraz pierścieni tłokowych. Wnioski z badań, zauważony charakter zużycia poszczególnych elementów stanowiły ważny element do opracowania stanowiska badawczego służącego ocenia podatności nowo opracowanych powłok na zużycie ściernie. Elementy badanego silnika stanowiły również jeden z materiałów wykorzystywanych do badań własnych.

Przegląd piśmiennictwa pracy obejmuje 128 pozycji literaturowych, jest wykonany bardzo starannie. Omawiane pozycje pochodzą w większości z renomowanych czasopism, 22 pozycje pochodzą z okresu po roku 2015, co wskazuje na ciągły monitoring dostępnej, ukazującej się w świecie literatury, dotyczącej rozpatrywanego zagadnienia.

W rozdziale 5 przedstawiono tezy, cel i zakres pracy. Ocena stanu zagadnienia na podstawie analizy danych literaturowych oraz wyniki badań własnych pozwoliły Doktorantce na sformułowanie następującej tezy pracy:

*„Zastosowanie w tulejach monobloików silników ze stopu aluminium-krzem, natryskiwanych metodą APS powłok na bazie wolframu (WC-Co) lub chromu ( $Cr_3C_2-NiCr$ ) oraz opracowanie ich powierzchni trącej techniką polerowania lub honowania na plateau, pozwoli uzyskać wyższą odporność na zużycie ściernie, w porównaniu do dotychczas stosowanych tulei z wtopkami żeliwnymi o powierzchni trącej honowanej na plateau”.*

Sprecyzowano również cele pracy oraz bardzo szeroki program badań (Rozdział 6).

Cele naukowe rozprawy określono jako:

- 1) opracowanie natryskiwanych cieplnie powłok na bazie wolframu (WC-Co) lub na bazie chromu (Cr C.-NiCr), próbek testowych, z uwagi na uzyskanie wysokiej odporności na zużycie ściernie tulei cylindrowych ze stopu aluminium-krzem,
- 2) określenie wpływu składu chemicznego, morfologii i wartości parametrów materiałowych składników mikrostruktury powłok na ich podatność na zarysowanie,
- 3) opracowanie i określenie wpływu wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni gładzi próbek testowych i wzorcowych oraz warunków ich współpracy w smarowanym węźle trącym, na zużycie ściernie.

Celem praktycznym rozprawy brzmi następująco:

- 1) opracowanie i opisanie mikrostruktury i struktury geometrycznej powierzchni trących powłok zapewniających lepszą odporność na zużycie ściernie w smarowanym węźle trącym, w porównaniu do honowanego na plateau żeliwa szarego, stosowanego dotychczas na tuleje - wtopki.

Dla wypełnienia celów pracy zaproponowano bardzo szeroki zakres badań własnych obejmujący:

- opracowanie wartości parametrów natryskiwania cieplnego powłok (metodą APS) na podłożu ze stopu aluminium-krzem,
- wykonanie testowych próbek w postaci płytek ze stopu aluminium-krzem z natryśniętymi metoda APS powłokami,
- wykonanie wzorcowych płytek z żeliwa stosowanego na tuleje wtopki,
- wykonanie stalowych przeciwpróbek i naniesienie na nich, metodą galwaniczną, powłoki z chromu,
- określenie wpływu składu chemicznego i morfologii proszku do natryskiwania na skład chemiczny i morfologię składników mikrostruktury powłok i wartości ich właściwości materiałowych,

- kreślenie odporności na zarysowanie próbek testowych i wzorcowych w próbie nano scratch test i scratch test,
- wykonanie próbek i przeciwpróbek do badań odporności na zużycie ściernie,
- przygotowanie stanowiska do badań zużycia ściernego,
- wykonanie badań odporności na zużycie ściernie.

Dla udowodnienia tezy, realizacji celów pracy posługiwano się następującymi metodami i narzędziami badawczymi:

- badania metalograficzne z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej,
- mikroanalizę składu chemicznego składników mikrostruktury,
- badania właściwości materiałowych składników mikrostruktury,
- badania odporności na zarysowanie składników mikrostruktury (nano scratch test),
- badania odporności na zarysowanie powłok (scratch test),
- badania struktury geometrycznej powierzchni trącej (profilometr),
- badania odporności na zużycie ściernie.

W rozdziale 7 rozprawy szczegółowo opisano materiał stosowany do badań – próbki podłoża Al.-Si, na który nanoszono badane powłoki, próbki wzorcowe z żeliwa oraz materiał na przeciwpróbki. Szczególną uwagę poświęcono przygotowaniu próbek podłoża do natryskiwania plazmowego powłok. Jako materiał podłoża posłużył scharakteryzowany w rozdziale 4 blok silnika z którego ścianki zewnętrznej wycinano próbki o odpowiednich wymiarach. Przed naniesieniem powłok próbki były przygotowywane zgodnie z procedurą własną Doktorantki opracowaną na podstawie badań własnych oraz analizy literatury.

Z podobną starannością przygotowano próbki wzorcowe, wykonane z żeliwa z grafitem płatkowym. Materiał na próbki wzorcowe pobrano z odlewu żeliwnej tulei cylindrowej pozyskanej z firmy Mahle.

Przeciwpróbki przygotowano ze stali H9S2 wzorując się na budowie chromowanych pierścieni tłokowych.

W badaniach, z punktu widzenia składu chemicznego stosowano dwa rodzaje powłok testowych odpowiednio z dużą zawartością wolframu oraz z dużą zawartością chromu. Każdy z wariantów powłok natryskiwano z zastosowaniem proszków o kształcie kulek (wersja A) lub z zastosowaniem proszku będących mieszaniną kulek i cząstek o kształcie wielościanów (B). Proces natryskiwania plazmowego zrealizowano zgodnie z autorską procedurą na profesjonalnym, zrobotyzowanym stanowisku Sulzer Metco. Wydaje się, że z punktu widzenia użytkowego bardzo ważny aspekt stanowi określenia grubości nanoszonych powłok oraz

trwałości połączenia powłoka – podłoże. Temat też został poddany w pracy gruntownej analizie, jednak prosiłbym o próbę podjęcia dyskusji nad następującymi aspektami tego połączenia i jego destrukcji:

- 1) *Proszę spróbować określić, czy w przypadku destrukcji połączenia podłoże-powłoka destrukcja ta ma charakter kohezyjny, adhezyjny, czy może mieszany?*
- 2) *Od jakich elementów zależy według Pani Doktorantki charakter tej destrukcji i co może mieć na ten charakter wpływ?*
- 3) *Czy Pani Doktoranta widzi możliwość zaproponowania bardziej jednoznacznego miernika do określania tego typu destrukcji?*

Po naniesieniu, przed poddaniem próbom użytkowym powłoki były w odpowiedni sposób przygotowywane. Uzyskiwano powierzchnię Mirror Like oraz honowano na plateau. *Proszę o wyjaśnienie, co było głównym powodem takiego a nie innego przygotowania powierzchni trących?*

W rozdziale 8 przedstawiono szczegółowo metodykę badawczą. Cennymi elementami tego rozdziału są szczegółowo przedstawione stosowane metodyki badawczej oraz charakterystyka aparatury. Zarówno warunki przeprowadzonych prób, jak ich dokumentacja zostały zaprezentowane w pracy na bardzo wysokim poziomie. Należy stwierdzić, że w zastosowana metodyka badawcza, wszechstronność przeprowadzonych prób uwzględniająca zarówno aspekty typowo mechaniczne (jak np. analiza procesu pęknięcia i zużycia powłok) jak i materiałowe (analizy mikrostruktury, mikroanaliza rentgenowska, badania metalograficzne) świadczą o szerokiej, dogłębnej wiedzy Doktorantki i Jej przygotowaniu do pracy naukowej.

W rozdziale 9 przedstawiono gruntowną analizę uzyskanych wyników, zmierzającą do udowodnienia postawionej tezy badawczej. Podsumowując bardzo dobrze przeprowadzoną i udokumentowaną część badawczą pracy Doktorantka określiła charakter zużycia badanych powłok stwierdzając, że w przypadku obu badanych powłok ich zużycie ściernie odbywało się mechanizmem rysowania drobnymi cząstkami materiału, które znalazły się między powierzchniami trącymi, przy czym powłoki Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr były bardziej podatne na pęknięcie Palmqvista w kierunku równoległym do powierzchni podziału podłoże-powłoka niż powłoki WC-Co, co było przyczyną wystąpienia w nich mechanizmu zużycia lamelarnego. Całość pracy Autorka kończy 6 wnioskami, które w precyzyjny i klarowny sposób podsumowują badania przeprowadzone w ramach pracy wraz z odniesieniem się do tezy głównej, która została udowodniona. We wnioskach ujęto również ewentualny kierunek kontynuacji badań zmierzających do optymalizacji składu opracowanych powłok.

#### 4. Wniosek końcowy

Pod względem naukowym praca nie budzi zastrzeżeń. Sformułowana teza została udowodniona przy zastosowaniu metodyki badań, sposobów ich opracowania oraz interpretacji, które odpowiadają standardom rozpraw naukowych.

Przedstawione w mojej opinii uwagi i pytania należy traktować w większości przypadków bardziej jako przyczynek do wyjaśnienia przez Doktorantki zagadnień, które moim zdaniem nie do końca zostały w pracy dobrze opisane, niż uwagi krytyczne umniejszające walorom całej pracy. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że praca doktorska Pani mgr inż. Magdaleny Radoń pt. „Zużycie ściernie natryskiwanych plazmowo powłok na bazie wolframu i chromu do zastosowania na gładź cylindrową” spełnia wymagania określone w art. 13 ust 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki, wobec czego wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej o dopuszczenie Kandydatki do publicznej obrony.