

Prof. dr hab. inż. Tomasz Węgrzyn  
Katedra Transportu Drogowego  
Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej  
Politechnika Śląska  
ul. Krasińskiego 8  
40-019 Katowice  
e-mail: Tomasz.Wegrzyn@polsl.pl

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgra inż. Konrada Toboty**

**nt.**

**„ Natryskiwanie termiczne powłok NiCr wzbogaconych Re”**

### **1. Podstawa opracowania**

Niniejsza recenzja opracowana została na podstawie prośby zawartej w piśmie od Pana Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Warszawskiej, z dnia 08.08.2023 r.

### **2. Tytuł rozprawy doktorskiej - aktualność podjętego tematu**

Natryskiwanie termiczne jest procesem powlekania, w którym stopione lub uplastycznione materiały są nanoszone na powierzchnię. Metodami natryskiwania naddźwiękowo HVOF oraz natryskiwania plazmowego można uzyskać powłoki zabezpieczające znaczne obszary przy większej szybkości osadzania w porównaniu z innymi procesami powlekania. Doktorant zaproponował wykonanie powłoki ochronnej NiCr wzbogaconej Re do zastosowań w budowie kotłów energetycznych o zwiększonej trwałości eksploatacyjnej. Od jakości wykonanych powłok zależy trwałość eksploatacyjna konstrukcji kotłów i bezpieczeństwo ich użytkowania. Dla uzyskania właściwej powłoki istotne jest poprawne: zaprojektowanie konstrukcji, dobranie materiałów do natryskiwania cieplnego, realizowanie procesu technologicznego, a także wpływ mają doświadczenie i kwalifikacje personelu wykonującego natryskiwanie termiczne. Każda próba prowadząca do podwyższania jakości zarówno procesów natryskiwania jak i modyfikacji w celu uzyskania lepszych właściwości użytkowych powierzchni jest bardzo zasadna. Do tej pory nie opracowano rozwiązania technologiczno-materiałowego, które mogłoby być zastosowane w sposób uniwersalny. W związku z tym dobór materiałów do konkretnych zastosowań jest

zagadnieniem ciągle zgłębianym przez naukowców, a tematyka jest aktualna. Jednym z kierunków badań prowadzonych przez doktoranta jest możliwość dobierania materiału powłokowego oraz odpowiedniego sposobu nanoszenia powłoki i kształtowania jej struktury, która stanowi o właściwościach eksploatacyjnych, trwałości i niezawodności konstrukcji kotła energetycznego. Zaproponowana przez Autora modyfikacja powłok NiCr renem jest pomysłem autorskim, całkowicie nowatorskim i stanowi niezwykle ważny element nowości naukowej. Pomysł na wprowadzenie proszku renu do stopu NiCr oraz naniesienie go na powierzchnię bazową ma na celu inicjację zjawisk dyfuzyjnych w formułującej się powłoce oraz metoda mechanicznej syntezy jako próba wprowadzenia renu do roztworu może być traktowana jako ważny i oryginalny dorobek doktoranta.

Z tego punktu widzenia podjęcie przez Autora ocenianej rozprawy badań nad efektami procesu natryskiwania jest zrozumiałe i w pełni uzasadnione. Tematykę rozprawy i jej zakres należy ocenić jako niezwykle aktualne, stanowiące ważny krok na drodze projektowania kotłów energetycznych o podwyższonej sprawności eksploatacyjnej.

### **3. Charakterystyka i ocena rozprawy - ocena merytoryczna (ocena układu rozprawy doktorskiej, ocena zastosowanego piśmiennictwa)**

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Konrad Tobota podjął próbę zbadania efektu zastosowania proszku renu w procesie natryskiwania cieplnego do wykonania elementów konstrukcji kotłów energetycznych o podwyższonej sprawności eksploatacyjnej. Przewód doktorski został otwarty w dyscyplinie „Budowa i eksploatacja maszyn” i doskonale mieści się w nowej dyscyplinie „Inżynieria mechaniczna”. Układ rozprawy doktorskiej jest prawidłowy. Rozprawa podzielona jest na 8 rozdziałów, całość liczy 149 stron, zawiera spis literatury obejmujący 91 pozycji. Przegląd piśmiennictwa jest wykonany bardzo starannie. Cytowane pozycje literaturowe są aktualne. Większość pozycji literaturowych stanowią najnowsze publikacje międzynarodowe, w tym artykuły Autora dysertacji. W rozprawie można zauważyć racjonalne zaplanowanie eksperymentu i prawidłowy dobór metod badawczych. Należy docenić staranne i dokładne opracowanie uzyskanych wyników badań w warunkach laboratoryjnych i na obiekcie rzeczywistym.

**W rozdziale 1.** pt. „Kotły energetyczne” zawarto wprowadzenie dotyczące podziału, charakterystyki, projektowania różnego rodzaju kotłów energetycznych. Przedstawiono dotychczasowe materiały i sposoby wykonywania ważniejszych elementów kotła energetycznego i znaczenie wykorzystania najnowocześniejszych osiągnięć materiałowo-technologicznych w zastosowaniu budowy urządzeń energetycznych. Analizowano bardzo dokładnie najważniejsze przyczyny niszczenia powierzchni roboczych kotłów energetycznych. Opisano efekt różnego rodzaju korozji, erozji, pełzania występujący podczas eksploatacji kotłów energetycznych.

**W rozdziale 2.** pt. „Spawalnicze technologie nanoszenia powłok” Autor opisał dokładnie najważniejsze metody napawania i natryskiwania cieplnego. Przedstawił wady i zalety podstawowych procesów wykorzystywanych w budowie kotłów energetycznych.

**W rozdziale 3.** pt. „Dobór materiałów i metody nakładania powłok” autor uzasadnił wybór dwóch metod nakładania powłok, które realizował w badaniach: natryskiwanie płomieniowe naddźwiękowe HVOF oraz natryskiwanie plazmowe APS. Opisano starannie powstawanie powłoki natryskiwanej. Przedstawiono zasady przygotowania powierzchni i mechanizm zakleszczania. Autor uzasadnił, jaką rolę może odgrywać ren jako składnik materiału powłokowego w procesie natryskiwania cieplnego. Przedstawił najważniejsze wykresy równowagowe renu dwuskładnikowe i trójskładnikowe z metalami stosowanymi do wytwarzania powłok. W opracowaniu tego rozdziału Autor wykazał się znaczną wiedzą zarówno z inżynierii mechanicznej, fizyki ciała stałego i inżynierii materiałowej.

**W rozdziale 4.** pt. „Cel pracy i program badań” podano, że celem rozprawy jest próba opracowania technologii natryskiwania cieplnego powłok ochronnych na fragmenty ścian szczelnych kotłów energetycznych z użyciem proszku NiCr z dodatkiem Re. Zaplanowano warunki technologiczne i parametry obu badanych procesów natryskiwania cieplnego wraz ze sposobem wprowadzania renu do roztworu fazy gamma i obróbką cieplną (wyżarzanie próżniowe). Podano szczegółowo program badań i sposób ich realizacji. Przedstawiono właściwości proszku NiCr, proszku renu oraz otrzymanego proszku NiCrRe z uwzględnieniem morfologii i rozkładu wielkości cząstek elementarnych obu proszków. Podano sposób wytwarzania proszku NiCrRe i parametry mielenia. Podano sposób przygotowania materiału podłoża, którym była stal 16Mo3 z informacją o stanie powierzchni. Ustalono parametry natryskiwania cieplnego metodą HVOF oraz APS.

**W rozdziale 5** pt. „Wyniki badań” szczegółowo opisano rezultaty badań i sposób ich wykonania. Analizowano mikrostrukturę powłoki uzyskanej w obu procesach natryskiwania. Identyfikowano skład wtrąceń przy pomocy rentgenowskiej spektroskopii dyspersyjnej EDS. Wykazano obecność wtrąceń renu w osnowie fazy gamma, które były równomiernie rozproszone w całej objętości obu badanych powłok. Następnie przeprowadzono badania tribologiczne. Badania wykazały, że obie powłoki charakteryzują się dobrą odpornością na zużycie ściernie, co jest fundamentem zastosowania w erozyjnym środowisku eksploatacyjnym. Wyznaczony współczynnik tarcia i wymiary bruzdy po wgłębniku były korzystniejsze dla powłoki wykonanej metodą HVOF.

Następnie wykonano próbę zginania. Sporządzono wykresy naprężenie – odkształcenie po próbie zginania statycznego dla obu powłok. Analizowano przy jakim naprężeniu powłoka traci przyczepność. Wykazano, że w obu przypadkach powłoka charakteryzowała się odpowiednio wysoką przyczepnością. Zauważono, że w przypadku zastosowania

natryskiwania HVOF powłoka pękała po przekroczeniu naprężenia na poziomie 770 MPa, a w przypadku natryskiwania plazmowego powłoka pękała po przekroczeniu naprężenia na poziomie 630 MPa. Wynik obu pomiarów można traktować jako bardzo pozytywny. W dalszej kolejności wykonano pomiar twardości powłok uzyskanych obiema metodami. W przypadku zastosowania natryskiwania HVOF uzyskano powłokę, której twardość wynosiła 400 HV. W przypadku zastosowania natryskiwania plazmowego APS uzyskano powłokę, której twardość wynosiła 220 HV i była nieznacznie wyższa od materiału podłoża 190 HV. Jest to bardzo cenna obserwacja, gdyż w niektórych zastosowaniach dąży się do uzyskania jak największej twardości powłoki, a w innych zastosowaniach dąży się do uzyskania powłoki o porównywalnej twardości z podłożem. W tym przypadku ważniejsze jest uzyskanie jak najwyższej twardości, co pozwoli osiągnąć lepszą odporność ścianki kotła na zagrożenia erozyjne. Następnym punktem badań było wyznaczenie współczynnika przewodnictwa cieplnego podłoża i obu rodzajów powłok w celu sprawdzenia, czy powłoka spełnia warunki aplikacji przemysłowej. Uzyskano pozytywny wynik, wartość współczynnika przewodnictwa cieplnego dla wszystkich porównywanych materiałów jest podobny i wynosi ok 39 W/mK w temperaturze 500° C. Przeprowadzono także próby szoku termicznego powłok, które zakończyły się pozytywnym wynikiem, gdyż nie stwierdzono uszkodzenia powłoki i obniżenia przyczepności. Następnie przeprowadzono obróbkę cieplną powłok jako symulację zachowania się powłok w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych oraz próbę zainicjowania procesów dyfuzyjnych wtrąceń renu z osnową. Ustalono parametry procesu. Wyżarzanie próżniowe w temperaturze 700° C nie miało wpływu na rozszerzalność i dystrybucję wtrąceń renu w powłokach. Zauważono, że obróbka cieplna nieznacznie obniża twardość podłoża przez rozrost ziaren przy linii wtopienia.

**W rozdziale 6.** pt. „Ocena wyników i dobór technologii do aplikacji przemysłowej” przeprowadzono badania dla powłoki uzyskanej tylko w procesie natryskiwania HVOF, który w dotychczasowych badaniach dał lepsze efekty niż proces natryskiwania plazmowego APS.

Wykonano natryskiwanie HVOF na obiekcie rzeczywistym, czyli na próbkach ścian szczelnych kotła. Wykonano penetracyjne próby szczelności powłok wykonanych przy zastosowaniu proszku NiCr oraz NiCrRe. Analizowano przyczepność docelowej powłoki. Wykazano, że powłoka uzyskana z użyciem proszku NiCrRe charakteryzuje się wysoką przyczepnością na poziomie 60 MPa, co jest bardzo dobrym wynikiem mając na uwadze wartości przyczepności innych powłok technicznych.

Badano mikrostrukturę powłoki naniesionej autorską metodą na obiekt rzeczywisty. Badania szczelności na obiekcie rzeczywistym nie wykazały dyskwalifikujących defektów w zastosowaniach przemysłowych. Stwierdzono, że podczas prób technologicznych w pracującym kotle nie wykazano śladów zużycia i degradacji po miesiącu eksploatacji w temperaturze 400° C.

W rozdziale 7. pt. „Podsumowanie i dyskusja wyników” dokonano podsumowania dotychczasowego stanu wiedzy na podstawie przeglądu literatury i podano najważniejsze rezultaty uzyskane w części badań własnych. Umiejętnie ustosunkowano się do otrzymywanych wyników. Podkreślono, jak ważną rolę może odegrać dodatek Re w natryskiwaniu cieplnym obiema badanymi metodami, z których lepsze okazało się natryskiwanie HVOF.

W rozdziale 8. pt. „Wnioski” podano 11 najważniejszych wniosków, z których wynika, że został zrealizowany cel pracy.

#### 4. Najważniejsze uwagi ogólne i szczegółowe

Koncepcja badań doświadczalnych została sformułowana przez Doktoranta starannie i poprawnie. Realizację badań oceniam bardzo pozytywnie. Eksperymentalna część rozprawy jest przejrzysta i zawiera szereg wartościowych wyników i informacji. Doceniam trafnie przyjęty zakres metod badawczych oraz dużą ilość przeprowadzonych badań. Forma prezentowania wyników, profesjonalny sposób ich analizy oraz przedstawione wnioski świadczą o dojrzałości badawczej Doktoranta. Szata graficzna rozprawy jest bardzo profesjonalnie dopracowana i świadczy o dużej wiedzy informatycznej Doktoranta. W trakcie analizy rozprawy nasunęły mi się dwie uwagi o charakterze ogólnym i trzy uwagi szczegółowe nie mające wpływu na wysoką ocenę merytoryczną pracy.

Do uwag ogólnych zaliczam:

1. W pracy nie przedstawiono tezy, chociaż można się jej domyślić, gdyż Doktorant w swojej rozprawie skutecznie dowodzi, że zastosowanie Re w procesie natryskiwania cieplnego powłok NiCr pozwoli na uzyskanie ścian szczelnych kotła energetycznego o lepszych właściwościach użytkowych.
2. Czy Doktorant ma koncepcję badań przyszłościowych nad dalszym udoskonaleniem procesu natryskiwania cieplnego?

Do uwag szczegółowych zaliczam:

1. Dlaczego nie sprawdzano powłok wykonanych w procesie natryskiwania plazmowego z użyciem proszku NiCrRe na obiekcie rzeczywistym?
2. Jakie najważniejsze korzyści można uzyskać przez zastosowanie nowo opracowanego przez Autora proszku NiCrRe w procesie natryskiwania cieplnego w stosunku do dotychczasowej metody?
3. Czy przyczepność powłoki NiCrRe jest lepsza w stosunku do standardowej powłoki NiCr?

4. Drobne niedociągnięcia edycyjne (np. brak spacji w jednostkach), niektóre zdania są pisane w 1 osobie.

## 5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgra inż. Konrada Toboty nt. „Natryskiwanie termiczne powłok NiCr wzbogaconych Re” jest bardzo interesującą dysertacją o aktualnej tematyce. Praca doktorska reprezentuje zarówno dyscyplinę w chwili otwarcia przewodu „Budowa i eksploatacja maszyn” jak i aktualną dyscyplinę „Inżynieria mechaniczna”. Niepodważalnym walorem i oryginalnym osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie modyfikacji procesu natryskiwania cieplnego, pozwalającej uzyskać powłoki o lepszej jakości, dzięki czemu można z powodzeniem stosować nowo opracowany autorski proces w budowie elementów kotłów energetycznych.

Podjęty w rozprawie temat jest ważny i wnosi duży wkład w rozwój dyscypliny naukowej. Doktorant wykonał badania w warunkach laboratoryjnych i eksploatacyjnych, a ich wynik sprawdził z powodzeniem na obiekcie rzeczywistym. Doktorant wykazał się umiejętnością dobrego planowania i wykonywania badań oraz analizy merytorycznej uzyskanych wyników. Autor osiągnął cel postawiony w pracy, dochodząc do wyników mających znaczenie nie tylko poznawcze, ale przede wszystkim użytkowe. Całość recenzowanej rozprawy w pełni potwierdza wiedzę teoretyczną Doktoranta oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej.

**Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określone w wszystkie wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

*Tomasz Węprzyn*

Katowice, 29 VIII 2023 r