



Prof. dr hab. inż. Waldemar Kuczyński  
Politechnika Koszalińska Wydział Mechaniczny  
Katedra Energetyki  
75 – 620 Koszalin, ul. Raławicka 15-17  
Tel. 94 3478-420, 437  
email: waldemar.kuczynski@tu.koszalin.pl



Koszalin 19.08.2021

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Walentego Kraśniewskiego pt.:  
„Zwiększenie trwałości eksploatacyjnej sworzni łańcuchowych ze stali 42CrMo4 z wykorzystaniem nowoczesnych rozwiązań inżynierii powierzchni”

Recenzję wykonano na zlecenie Dziekana Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej w Płocku dr hab. inż. Renaty Walczak prof. uczelni w oparciu o pismo nr Ldz. PO/1/2021 z dnia 26.07.2021 r.

Rozprawa doktorska powstała pod kierunkiem **dr hab. Ewy Marii Kasprzyckiej** oraz **dr inż. Bogdana Bogdańskiego** jako promotora pomocniczego.

### 1. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem przedłożonej do oceny rozprawy doktorskiej jest wykonana ocena możliwości trwałości i wydłużenia czasu eksploatacji łańcuchów napędowych, wykorzystywanych w szeroko rozumianym przemyśle. Zakres wykorzystania tego typu elementów konstrukcyjnych obejmuje m.in. realizację zadań automatyki lub przenoszenia odpowiednich sił w obszarze górnictwa, rolnictwa, budownictwa, hutnictwa czy też w sektorze rolniczym z uwzględnieniem przetwórstwa. Podstawową częścią składową łańcuchów napędowych są sworznie, które w procesie eksploatacji ulegają zużyciu ściernemu jak i korozyjnym, co w konsekwencji powoduje niekorzystne wydłużenie elementu przenoszącego czyli łańcucha. Zjawisko to jest z natury niepożądane i już na etapie projektowo-konstrukcyjnym prowadzi się działania mające zapewnić zarówno prawidłową budowę jak i eksploatację tych elementów maszyn i urządzeń. Jednym ze sposobów jest tzw. polepszenie właściwości wytrzymałościowych sworzni stosując modyfikację ich powierzchni.

Typowym materiałem wykorzystywanym do wytwarzania sworzni jest stal stopowa do ulepszania cieplnego zgodnie z normą DIN EN 10083-3:2006 o oznaczeniu 42CrMo4. W ramach realizacji rozprawy doktorskiej posłużono się tym materiałem, na próbkach którego przeprowadzono zaproponowane modyfikacje powierzchni. W metodyce badań zastosowano trzy odrębne powłoki, dwie o strukturze podwójnej oraz jednowarstwową. W przypadku powłok dwuwarstwowych były to: typu W/W-DLC, zbudowanej z dwóch stref, zewnętrznej diamentopodobnej oraz a-C:H:W modyfikowanej wolframem oraz międzywarstwowej z czystego wolframu, osadzonej na powierzchni stali 42CrMo4. W drugim przypadku była to powłoka typu Cr/Cr-DLC,

zbudowanej z zewnętrznej warstwy diamentopodobnej typu a-C:H:Cr modyfikowanej chromem z chromu. W przypadku powłoki jednowarstwowej jako powłokę wykorzystano czysty chrom Cr. Powłoki zostały naniesione na badane próbki metodą ArcPVD (Arc Physical Vapour Deposition) czyli *metodą odparowania łukiem elektrycznym*.

W badaniach budowy oraz właściwości powłok wykorzystano kilka metod. W przypadku analizy struktury powierzchni zastosowano mikroskopię skaningową (SEM+EDS+BSE), rentgenowską analizę fazową, pomiar grubości warstwy za pomocą kulo testera oraz chropowatość profilometrem. Analizę właściwości mechanicznych obejmującą pomiar twardości i modułu Younga oparto o badania wykonane Nano-Testerem. Parametry określające stopień adhezji warstw do podłoża określono metodą wyciskania wgłębniaka Rockwella i za pomocą testera zarysowania. Właściwości tribologiczne zidentyfikowano metodą kula-tarcza.

Na podstawie uzyskanych wyników badań Doktorant odniósł się do postawionej w pracy tezy, wskazując najodpowiedniejszą propozycję modyfikacji powierzchni stali 42CrMo4 wykorzystywanej w produkcji sworzni łańcuchowych. Zgodnie z tymi wskazaniem proponuje się stosować powłokę dwuwarstwową typu W/W-DLC poprawiającą zakres eksploatacji rozpatrywanych elementów konstrukcyjnych wykorzystywanych w budowie maszyn we wskazanych obszarach.

## 2. Struktura redakcyjna pracy

Rozprawę zredagowano na 110 stronach w 8 rozdziałach obejmujących analizę literatury z rozpatrywanego zakresu, cel, tezę i zakres pracy, wyniki badań własnych, dyskusji dotyczącej przedmiotu dysertacji oraz wniosków. W opracowaniu umieszczono również wymagany wykaz literatury, spis tablic oraz rysunków. Praca zawiera również wykaz ważniejszych oznaczeń oraz angielskich skrótów.

W szczególności w opracowaniu ujęto następujące informacje:

**Wprowadzenie określone jako Rozdział 1** zredagowane przez Autora w języku polskim oraz angielskim w syntetyczny sposób przedstawia zakres tematyczny realizacji rozprawy doktorskiej. Znajdują się tutaj opis proponowanych rozwiązań badawczych przeprowadzonych przez Doktoranta oraz informacja o uzyskanych wynikach.

**Rozdział 2** to analiza aktualnego stanu wiedzy odnoszącego się do przedmiotu rozprawy czyli łańcuchów napędowych. Przedstawiono tutaj rys historyczny dotyczący pierwszych konstrukcji oraz wykorzystania tego typu elementów w budowie i eksploatacji maszyn i urządzeń. Przedstawiono jakie znaczenie pod względem wykorzystania mają łańcuchy napędowe, przedstawiono ich klasyfikację oraz najczęściej występujące problemy wynikające z ich zużycia. Wskazano, że niejednokrotnie zakres eksploatacji prowadzi do znacznych „wydłużeń” łańcuchów napędowych, co może prowadzić nawet do ich uszkodzeń mechanicznych. Opisano w tym rozdziale również metody jakie się stosuje w celu zwiększenia trwałości i zakresu wykorzystania łańcuchów napędowych. Należą do nich przede wszystkim działania o charakterze badań wytrzymałościowych związanych z obróbką cieplną.

Procedury takie stosuje się przy wytwarzaniu płytek zewnętrznych i wewnętrznych wykonanych ze stali węglowych (45,55) lub stopowych typu 35HM, 40H, które doprowadza się do poziomu twardości w zakresie 38-49 HRC.

W przypadku sworzni, standardowo produkowanych ze stali stopowej typu 42CrMo4 (40HM), drogą hartowania i odpuszczania uzyskuje się twardość w zakresie 47 - 52 HRC. Uży-

skuje sie również w ten sposób odpowiednio dużą odporność na zużycie ścierne i podwyższoną wytrzymałość rdzenia sworznia na zginanie i obciążenie udarowe. Dodatkową odporność na zużycie osiąga się na drodze obróbki szlifowania oraz pokryć galwanicznych tzw. twardym chromem.

Tuleje łańcucha, które są najmniej narażone na zginanie, ale w znacznym stopniu ulegają destrukcji w wyniku ścierania w miejscu występowania oddziaływań o charakterze nacisku w kontakcie ze sworzniem, poddaje się walcowaniu i zwijaniu na zimno. Kolejnym etapem jest proces utwardzania powierzchniowego na drodze nawęglania powierzchniowego i obróbki cieplnej prowadzącej do uzyskania twardości ok. 52 HRC. Również w przypadku tulei wykonuje się szlifowanie średnicy wewnętrznej, co polepsza odporność na zużycie ścierne i daje odpowiednią geometrię.

Kolejnym elementem konstrukcyjnym łańcuchów napędowych są rolki, które tak jak tuleje poddaje się procesowi nawęglania i obróbki cieplnej aby osiągnąć twardość rzędu 53 HRC.

W tej części pracy Autor wskazał również na konieczność stosowania odpowiedniego smarowania łańcuchów napędowych w celu utrzymania ich prawidłowej eksploatacji. wymieniono poszczególne metody tego procesu wraz z ewentualnymi problemami technicznymi z nim związanymi.

W rozdziale 2 opisano również stosowane obecnie techniki prowadzące do zwiększenia trwałości i niezawodności części maszyn. W szczególności skupiono się na zagadnieniach związanych z technikami inżynierii powierzchni, wykorzystywanych w tym obszarze. Syntetycznie przedstawiono historię takich działań oraz obecnie stosowane metody z zakresu PVD (ang. Physical Vapour Deposition) metoda fizycznego osadzania powłok z fazy gazowej w konfiguracji:

- odparowania łukiem elektrycznym - Arc PVD,
- rozpylania magnetronowego - MS,
- odparowania wiązką elektronów - EB PVD.

Przeprowadzono tutaj krótką i syntetyczną analizę wiedzy z zakresu stosowania wyżej wymienionych metod oraz ich właściwości.

Opisano również możliwości wykorzystania powłok diamentopodobnych wraz z określeniem ich właściwości. Stwierdzono, że na podstawie danych literaturowym można przyjąć, że tego typu warstwy osadzone na różnych materiałach podłoża, badanych w różnych warunkach o charakterze zniszczeniowym, dają podstawę do twierdzenia, że mogą podnieść parametry wytrzymałościowe elementów konstrukcyjnych funkcjonujących w wysokoobciążonych węzłach tarcia. W szczególności odnosi się to do oddziaływań o charakterze tarcia ślizgowo-tocznego mającego miejsce w przypadku pracy sworzni łańcuchowych.

**Rozdział 3** to analiza stanu wiedzy z zakresu możliwości stosowania odpowiednich powłok w celu podwyższenia właściwości wytrzymałościowych rolkowych łańcuchów napędowych. Wyszczególniono tutaj takie propozycje warstw, które następnie poddano badaniom w trakcie realizacji rozprawy doktorskiej. Odnosi się to do następujących powłok:

- dwuwarstwowa diamentopodobna DLC typu a-C:H;W modyfikowana wolframem z międzywarstwową wolframu o oznaczeniu W/W-DLC,
- dwuwarstwową diamentopodobną typu a-C:H:Cr, modyfikowaną chromem z międzywarstwą z chromu o oznaczeniu w pracy Cr/Cr-DLC. Charakteryzuje się dobrą adhezją do podłoża stali, twardością oraz dobrymi właściwościami trybologicznymi.

Obie powłoki naniesiono na stal stopowa typu 42CrMo4 metodą odparowania łuku elektrycznego Arc PVD.



Na tym etapie pracy zaproponowano do badań wskazane wyżej powłoki ze względu na brak w literaturze tematu informacji dotyczących wpływu ich zastosowania na parametry wytrzymałościowe rozpatrywanych w dysertacji elementów konstrukcyjnych.

**Rozdział 4** przedstawia cel, tezę i zakres pracy. W informacji dotyczącej celu pracy podano, że w celach weryfikacyjnych przeprowadzono również badania wytrzymałościowe na próbkach pokrytych jednowarstwową powłoką typu Cr z czystego chromu. Sformułowano tezę pracy, która jest prawidłowo określona. W zakresie pracy podano obszar przeprowadzonych badań mających dać odpowiedź o prawidłowości lub jej braku zdefiniowanej tezy rozprawy doktorskiej. W tym rozdziale wskazano również wykorzystaną aparaturę badawczą.

**Rozdział 5** przedstawia metodykę wykonanych badań eksperymentalnych; klasyfikację wykorzystanych urządzeń pomiarowych, rodzaj zastosowanego materiału dla wytworzenia próbek, metodykę wytworzenia próbek badawczych, sposób wytworzenia na nich powłok (dwóch dwuwarstwowych typu W/W-DLC i Cr/Cr-DLC i jednej jednowarstwowej typu Cr weryfikacyjnej). Opisano metodykę badań tych powłok w zakresie określenia ich morfologii, składu chemicznego i fazowego, grubości, chropowatości, twardości i modułu Younga, adhezji, odporności na zużycie ścierne oraz odporności korozyjnej.

**Rozdział 6** przedstawia wyniki uzyskanych badań zgodnie z przyjętą w rozdziale 5 metodologią. Wszystkie uzyskane wyniki zostały zobrazowane ilustracjami w postaci zdjęć i uzyskanych zależności. Poszczególne wartości liczbowe przedstawiono w klarownej formie tabelarycznej. Odnoszą się one do wszystkich wskazanych w rozdziale 5 parametrów mających wpływ na określenie stopnia zwiększenia wytrzymałości na oddziaływania eksploatacyjne rozpatrywanych elementów konstrukcyjnych jakimi są sworznie łańcuchów napędowych. Na podstawie tych wyników wskazano jedną z powłok typu W/W-DLC jako wykazującą najlepsze parametry do zastosowania do podniesienia trwałości sworzni.

**Rozdział 7** noszący tytuł Dyskusja Wyników Badań, jest w zasadzie streszczeniem dotyczącym analizy literatury z rozpatrywanego zakresu oraz z przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Pojawia się tutaj również interpretacja uzyskanych wyników w odniesieniu do wszystkich rozpatrywanych właściwości i parametrów mechanicznych rozpatrywanych modyfikacji powierzchni stali stopowej typu 42CrMo4.

**Rozdział 8** to wnioski przedstawione w punktach i podsumowujący całość pracy.

**Rozdział 9** to wykaz literatury, w którym zawarto 125 pozycji z zakresu rozpatrywanego tematu. Liczba oraz tematyka przytoczonych w pracy opracowań wskazuje na odpowiednio wysokie rozpoznanie tematu opracowania.

Na końcu opracowania umieszczono wykaz tablic oraz rysunków jakie znalazły się w dysertacji.

### **3. Uwagi krytyczne redakcyjne i dyskusyjne do pracy.**

Oceniając pod względem redakcyjnym przedstawioną do recenzji rozprawę należy zwrócić uwagę na zwięzły a zarazem klarowny sposób przedstawienia rozpatrywanej tematyki. Zarówno część będąca analizą literatury jak i praktyczna opisująca metodykę i wyniki badań jest zredago-

wana dobrym językiem z prawidłowymi określeniami technicznymi. Nieliczne błędy stylistyczne czy też powtórzenia jak ma to np. miejsce na str. 27 nie mają wpływu na część merytoryczną opracowania.

Kolejnym niewielkim niedociągnięciem jest brak opisu osi na zależnościach z rys. 34b, 35b i 36b. Zauważa się to również w przypadku wykresu na rys. 42.

Uwagi krytyczne dyskusyjne dotyczą następujących zagadnień:

1. W części opisującej metodykę badań rozdz. 5 opisano zastosowaną aparaturę. Brakuje natomiast analizy statystycznej dotyczącej dokładności wykonanych pomiarów. Częstym uchybieniem w tego typu opracowaniach jest zbytne poleganie na klasie dokładności stosowanych urządzeń. Niemniej fakt taki jest dopuszczalny pod warunkiem podania ilości wykonanych prób w celu określenia wyznaczenia grupy reprezentatywnej. Takich informacji jednak nie podano w tej dysertacji.
2. Doktorant sam zauważa, że przeprowadzone badania wykonano na próbkach materiału a nie na sworzniach pokrytych badanymi powłokami. Wykonane badania są w zasadzie podstawowymi określającymi kierunek możliwych zastosowań mających podnieść wytrzymałość rozpatrywanych elementów konstrukcyjnych jakimi są sworznie łańcuchów napędowych. Natomiast brak badań eksploatacyjnych tych elementów w zasadzie powoduje, że tematem pracy było badanie próbek wykonanych z materiału z jakiego wytwarza się sworznie a nie one same.

Powyższe uwagi z zakresu redakcyjnego to wskazówki dla Autora na przyszłość, w jego dalszej działalności naukowej. Natomiast uwagi krytyczne pozostają do wyjaśnienia przez Autora tego opracowania.

#### **4. Ocena pracy i wniosek końcowy**

Biorąc pod rozwagę uwagi przedstawione powyżej stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca stanowi rozprawę doktorską. Zakres tematyczny oraz jego realizacja wskazują na osiągnięcie przez Autora odpowiednich kompetencji dla osób biegających się o stopień naukowy doktora. Obszar związany z możliwościami podniesienia zakresu wykorzystania takich elementów konstrukcyjnych jakimi są sworznie stosowane w łańcuchach napędowych jest bardzo istotny w odniesieniu do budowy i eksploatacji maszyn. Zastosowanie w tym celu modyfikacji powierzchni z wykorzystaniem inżynierii materiałowej świadczy o konieczności interdyscyplinalności działań prowadzonych w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna.

**Podsumowując** stwierdzam, że przedłożona praca zawiera oryginalne ujęcie problemu naukowego i świadczy o opanowaniu przez jej Autorka mgr inż. Pawła Walentego Kraśniewskiego naukowych metod doświadczalnych, stosowanych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, a tym samym wyczerpuje warunki określone przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm. tj. Ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce w art. 187 ust. 1-2 z dnia 20 lipca 2018 r. i Art. 179. Przepisy wprowadzające ustawę, uzasadnia dopuszczenie jej do publicznej obrony o co wnioskuje.