

Dr hab. inż. Marcin Kot  
Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Kraków, 2015-06-19



## RECENZJA

pracy doktorskiej mgr Katarzyny Dyja

pt „ Tribologiczne aspekty kształtowania blach stosowanych w lotnictwie”

Recenzję wykonałem na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej z dnia 15.04.2015r. Dokumentację merytoryczną do wykonania recenzji stanowił otrzymany egzemplarz rozprawy pt „*Tribologiczne aspekty kształtowania blach stosowanych w lotnictwie*”. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Janina Adamus, prof. Politechniki Częstochowskiej, a promotorem pomocniczym dr inż. Wojciech Więckowski.

### 1. Charakterystyka pracy

Tematyka pracy doktorskiej Katarzyny Dyja związana jest z procesem obróbki plastycznej na zimno typowych materiałów stosowanych w lotnictwie jak stopy aluminium i tytan, które charakteryzują się niską tłocznością. W pracy analizowano przede wszystkim problemy tribologiczne występujące podczas obróbki takich materiałów, wynikające z ich właściwości oraz ciężkich warunków pracy narzędzi podczas tłoczenia tj. dużych nacisków jednostkowych w warunkach tarcia granicznego. Dodatkowo wciąż rosnąca ilość produkowanych elementów ze stopów aluminium i tytanu oraz rosnące wymagania dotyczące ekologii procesów technologicznych wymuszają poszukiwanie nowych środków smarnych przyjaznych dla środowiska i materiałów na narzędzia, które wydłużą czas ich eksploatacji oraz poprawią jakość wyrobów. Doktorantka analizowała w pracy możliwość wyeliminowania z procesu tłoczenia olejów syntetycznych zawierających w składzie szkodliwe dodatki EP i zastąpienia ich przez smary na bazie olejów roślinnych oraz możliwości zastosowania powłok przeciwzużyciowych na narzędziach.

W pracy poszukiwano wpływu opracowanych nowych ekologicznych olejów oraz zaproponowanych powłok na obniżenie oporów tarcia i wyeliminowanie lub chociaż

ograniczenie szczepień adhezyjnych i przenoszenia kształtowanego materiału na powierzchnię narzędzi formujących. Praca realizowana była w ramach projektu POIG.0101.02-00-05/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka

Tematykę pracy oceniam jako nowoczesną i wpisującą się w ogólnoswiatowy nurt poszukiwania nowych, ekologicznych środków smarnych i technologii poprawiających właściwości narzędzi do obróbki plastycznej na zimno. Dotyczy to opracowywania smarów na bazie olejów roślinnych dla trudnych do obróbki materiałów stosowanych w lotnictwie jakimi są stopy aluminium i tytan, a także zastosowania cienkich powłok tribologicznych na powierzchnię narzędzi, co może dodatkowo ograniczyć zużycie adhezyjne w przypadku przerwania filmu smarnego, a przez to wpłynąć pozytywnie na trwałość narzędzi i jakość obrabianych wyrobów. Problemy poruszane w pracy są trudne do predykcji i wymagają prowadzenia wielu badań eksperymentalnych i taki też ma charakter praca doktorska mgr Katarzyny Dyja.

Rozprawa doktorska liczy 125 stron i jest napisana poprawnym językiem. Praca podzielona jest na 4 rozdziały obejmujące kolejno: przegląd literatury dotyczącej analizowanego zagadnienia, cel i tezę pracy, następnie wyniki badań wraz z ich dyskusją oraz podsumowanie pracy. Spis literatury zawiera 116 pozycji, w tym 4 których współautorką jest Doktorantka. Na początku zamieszczono wykaz oznaczeń stosowanych w pracy.

W części omawiającej aktualny stan wiedzy Autorka przedstawiła przegląd materiałów metalowych poddawanych obróbce plastycznej, stosowanych w przemyśle lotniczym. Wskazała na wciąż rosnące zapotrzebowanie na wyroby tłoczone z materiałów takich jak stopy aluminium i tytanu, które zapewniają wysokie właściwości wytrzymałościowe elementom strukturalnym przy ich niskiej masie. Niestety należą one do materiałów o dużej skłonności do przenoszenia odkształconego materiału na powierzchnię narzędzi, co w konsekwencji prowadzi do przyspieszonego zużycia narzędzi oraz pogorszenia jakości wyrobów. Doktorantka szczegółowo opisała problemy technologiczne tłoczenia blach z takich materiałów oraz typowe wady wyrobów tłoczonych z genezą przyczyn ich powstawania. Przedstawiła także proces obróbki plastycznej jako system tribologiczny wraz z analizą czynników mających wpływ na opory ruchu i zużycie narzędzi. W głównej mierze skupiła się na roli środków smarnych, warunków w jakich one pracują oraz na aspektach ekologicznych wynikających z zużycia dużej ilości smarów oraz zawartych w nich dodatków szkodliwych dla środowiska jak związki chloru, fosforu i siarki. Dokonała także analizy wymogów jakie są

stawiane przed środkami smarnymi w obróbce plastycznej od obniżenia tarcia, ograniczenia zużycia narzędzi, zapobiegania narostom po zabezpieczeniu korozyjnym wytłoczek i ich utylizację. Doktorantka dokonała przeglądu prac prowadzonych w ośrodkach w Polsce i na świecie nad zastosowaniem różnych smarów i dodatkowych wypełniaczy, głównie w postaci smarów stałych. Przytoczyła prace wskazujące na możliwość zastąpienia olejów mineralnych przez biodegradowalne oleje roślinne. Wskazała także na możliwość dalszej poprawy parametrów pracy wężła tarcia matryca-błacha-stempel przez nakładanie cienkich powłok przeciwozrywczych na powierzchniach narzędzi.

Przedstawiony przegląd literatury stanowił podstawę do wytypowania smarów do badań, metod badawczych oraz założeń do eksperymentów numerycznych.

Następnie Autorka rozprawy przedstawiła cel i tezę pracy.

Doktorantka postuluje, że zastosowanie smarów technologicznych na bazie ekologicznych olejów roślinnych gwarantuje obniżenie oporów tarcia oraz ograniczenie procesu przenoszenia kształtowanego materiału na powierzchnię narzędzi. Wskazuje także na możliwość dalszego zabezpieczenia narzędzi w przypadku przerwania filmu smarnego poprzez zastosowanie powłok antyadhezyjnych.

Katarzyna Dya postawiła sobie w ramach pracy kilka celów jak opracowanie ekologicznych smarów, sposobu ich nanoszenia oraz wykazania korzystnego działania powłok nakładanych na narzędzia.

W celu udowodnienia tezy pracy Autorka zrealizowała szeroki program badań. Stąd analizy prowadzone przez nią oparte są głównie o wyniki badań eksperymentalnych, chociaż część pracy to wyniki modelowania z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Prezentację programu badań w pracy Doktorantka rozpoczęła od przedstawienia wytypowanych do badań smarów i ich składów. Oparte są one o trzy oleje roślinne: rzepakowy, z oliwek i słonecznikowy oraz głównie na dodatkach w postaci kwasu stearynowego i borowego. W pracy Doktorantka wskazała, że podczas projektowania tych środków smarnych kierowała się długoletnim doświadczeniem w tym obszarze zespołu z Politechniki Częstochowskiej. Wyniki badań porównywała z wynikami uzyskanymi dla dwóch handlowych smarów. Następnie przedstawiła techniki badawcze, które wykorzystywała do badań tribologicznych, korozyjnych, pomiaru kąta zwilżania, pomiaru lepkości oraz próby tłoczenia półkulistych czasz. Dla matryc z powłokami przeprowadzono dodatkowo podstawowe pomiary mikrotwardości, odporności na zarysowanie, a dla jednej z badanych powłok o złożonej mikrostrukturze przeprowadzono także obserwacje

mikroskopowe przy użyciu wysokorozdzielczej mikroskopii transmisyjnej HRTEM. Po testach tribologicznych prowadzono dla wybranego smaru obserwacje powierzchni narzędzi roboczych przy użyciu mikroskopii skaningowej SEM oraz dokonując pomiarów chropowatości powierzchni, poszukując narostów będących wynikiem niekorzystnych połączeń adhezyjnych.

Główną częścią pracy Katarzyny Dyja jest część przedstawiająca wyniki badań eksperymentalnych. Doktorantka wskazała, że mniejsza lepkość kinematyczna proponowanych smarów na bazie olejów roślinnych niż mineralnych smarów handlowych może prowadzić do wyciskania ich ze strefy tarcia. Cechują się one natomiast lepszą zwilżalnością zwłaszcza w przypadku blach aluminiowych i tytanowych. Następnie zostały przedstawione wyniki badań tribologicznych w postaci zmian wartości współczynnika tarcia w funkcji nacisków jednostkowych podczas próby przeciągania pasa blachy. Dla większości przypadków przeciągania blach aluminiowych, tytanowych i stalowych wartości współczynnika tarcia dla stosowanych olejów roślinnych były nieznacznie wyższe lub porównywalne do wartości odpowiadających testom w których używano smary handlowe i oczywiście znacząco niższe niż dla tarcia bez środków smarnych. Przedstawione zostały także wyniki badań wskazujące na możliwe dalsze obniżenie sił tarcia poprzez wprowadzenie do olejów dodatków kwasu stearynowego i borowego. Najlepsze efekty uzyskano po takim zabiegu dla pary cieńej stal-tytan. Doktorantka przedstawiła także metodę nanoszenia kwasu borowego na powierzchnię tłoczonych blach. Co zasługuje na podkreślenie, opracowała w tym celu specjalne stanowisko do napyłania tego kwasu, a sposób nanoszenia smaru na powierzchnię blachy jest przedstawiony w zgłoszeniu patentowym nr P.409887.

Testy tribologiczne przeprowadzono także dla matryc z nałożonymi różnymi metodami powłokami. Dla wszystkich materiałów blach obserwowano znaczne obniżenie sił tarcia po zastosowaniu powłok, przy czym różna była ich skuteczność w zależności od materiału blachy.

W dalszej części pracy przedstawiono wyniki analiz numerycznych procesu tłoczenia, skupiając się na porównaniu krzywych odkształceń granicznych i poszukiwaniu miejsc występowania maksymalnych deformacji prowadzących do pęknięcia tłoczonych blach dla styku smarowanego i bez smaru. Model numeryczny odpowiadał geometrii elementów z urządzenia do tzw. "mieczkowania", na którym wykonano eksperymenty tłoczenia z wykorzystaniem wybranych opracowanych smarów. Dla wszystkich badanych blach uzyskano 10-20% wzrost głębokości tłoczenia do wystąpienia pęknięcia. Wielkości

deformacji maksymalnych odpowiadają tym uzyskanym z eksperymentów numerycznych. Na końcu części eksperymentalnej zamieszczono wyniki badań korozyjnych oraz zmywalności smarów z powierzchni blach.

Rozprawę doktorską Doktorantka zakończyła wnioskami, które co należy podkreślić są jednoznacznie udokumentowane wynikami badań zaprezentowanych w rozprawie.

Wykonany przez Doktorantkę program badawczy umożliwił:

- określenie właściwości tribologicznych dla trzech materiałów tłoczonych blach przy smarowaniu opracowanymi smarami technologicznymi na bazie olejów mineralnych,
- opracowanie metody i stanowiska do wprowadzania do smarów dodatku w postaci kwasu borowego,
- ograniczenie lub całkowite zapobieganie mechanizmowi powstawiania szczepień adhezyjnych i nalepiania warstw aluminium i tytanu na powierzchniach matryc w zakresie badanych nacisków jednostkowych.
- analizę możliwości zastosowania powłok tribologicznych na powierzchnie robocze matryc.
- analizę wpływu tarcia na proces tłoczenia, tj. określenie obszarów narażonych na powstawanie pęknięć przy braku i ze smarowaniem narzędzi, wykonaną na podstawie wyników modelowania MES.

## **2. Ocena pracy**

Praca doktorska przedstawiona do oceny ma logiczny układ składający się z przeglądu literatury z omawianej tematyki, przedstawionych badań eksperymentalnych i modelowania z wykorzystaniem MES wraz z ich opisem, analizą i wynikającymi z nich wnioskami. Napisana jest zwięzłym językiem, dobrą polszczyzną.

Praca mgr Katarzyny Dyja przedstawia zjawiska tribologiczne towarzyszące procesom kształtowania blach z materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym metodą tłoczenia na zimno. Proponowane ekologiczne smary na bazie olejów roślinnych oraz powłoki przeciwwżyciowe wymagają prowadzenia dalszych testów i w przyszłości mogą stanowić alternatywę dla powszechnie stosowanych smarów mineralnych. Praca zawiera wartościowe i oryginalne wyniki badań, a metodyka badań była trafnie dobrana dla osiągnięcia założonych w pracy celów.

Do najważniejszych osiągnięć i wartościowych elementów pracy zaliczam:

- opracowanie receptur przyjaznych dla środowiska smarów na bazie olejów roślinnych z dodatkami nietoksycznego kwasu borowego lub stearynowego, proponowanych do tłoczenia blach ze stopów aluminium i tytanu,
- opracowanie metody nanoszenia przez rozpylanie obydwu tych kwasów, co ułatwia wprowadzanie ich do smarów przed operacją tłoczenia,
- analizę możliwości aplikacji powłok antyadhezyjnych w celu ograniczenia sił tarcia i nalepiania materiału blach na powierzchniach matryc, zwłaszcza w przypadku przerwania filmu smarnego,
- analizę numeryczną procesu tłoczenia z uwzględnieniem tarcia na powierzchniach współpracujących oraz jego wpływu na odkształcenia wytłoczki i obszarów narażonych na pękanie.

Do słabszych stron pracy zaliczam:

- Badania tribologiczne prowadzono przy małej ilości powtórzeń, co nie daje możliwości oceny zużycia narzędzi, w tym także tych z nałożonymi powłokami. Ze względu na czasochłonność takich badań, można się było zdecydować na przeprowadzenie ich tylko dla wybranych smarów i powłok. Do oceny wpływu smarów technologicznych i powłok antyadhezyjnych na odporność na zużycie posługiwano się tylko pomiarami chropowatości powierzchni matryc przed i po próbie przeciągania.
- Badania tribologiczne przeprowadzono przy niezbyt dużych naciskach, w których blachy były odkształcane sprężysto. Jednak to właśnie podczas plastycznych odkształceń materiału formowanego dochodzi do znacznej intensyfikacji nanoszenia materiału blach na narzędzia prowadząc do ich zużycia.
- Na stronie 58 Autorka stwierdza "...oleje roślinne zmniejszają opory tarcia w różnym stopniu i zależy to w dużej mierze od rodzaju badanej pary trącej". Nie podjęto natomiast dyskusji dlaczego tak się dzieje.
- Na stronie 62 stwierdzono natomiast, że oddziaływanie dodatków jest dużo bardziej efektywne w przypadku tarcia tytanu niż aluminium ze stalą. Wynika to z faktu, że dla aluminium już same oleje bez dodatków obniżały współczynnik tarcia do około 0,1 (rys. 30) podczas, gdy dla tytanu wartości te wynosiły 0,3-0,5 (rys. 31). Natomiast dla

obydwu tych materiałów blach wartości współczynnika tarcia po wprowadzeniu dodatków do oleju były na poziomie 0,05-0,07 ( rys. 34-37).

- Wybrane powłoki nałożone są zdecydowanie różnymi technikami, stąd mają prawdopodobnie zdecydowanie różne grubości, których nie podano. Określone zatem w teście zarysowania obciążenie krytyczne, jako miara adhezji do podłoża, nie jest miarodajnym parametrem jakości połączenia powłoki z podłożem.
- Natomiast pomiar twardości przy obciążeniu 500 mN dla badanej cienkiej powłoki Cr/Cr<sub>2</sub>N-(a-C:H) jest także obarczony błędem wynikającym z wpływu podłoża na pomiar. Pomiar twardości dla takich powłok muszą być wykonywane przy obciążeniach co najmniej o rząd mniejszych.
- Wybór powłoki chromowej budzi pewne wątpliwości co do celowości jej badań. Osadzanie powłok twardego chromu Cr<sup>VI</sup> jest procesem silnie rakotwórczym stąd tendencja i zalecenia do wycofywania ich z aplikacji, gdzie mogą być zastąpione innymi materiałami.
- Brak podjętej dyskusji o znaczących różnicach w wynikach testów tribologicznych matryc z powłokami w zależności od materiału blachy.

Autor nie ustrzegł się błędów edytorskich i językowych, a niektóre z nich przytaczam poniżej:

- Rysunek 19 (str 47) przedstawia matryce z nałożonymi na nie powłokami, natomiast sam opis powłok jakie były badane znajduje się dopiero na stronie 67.
- Rysunek 33 (str 59) przedstawia zmiany średnich wartości współczynnika tarcia przy rosnących naciskach w strefie tarcia dla 15 kompozycji olejowych co sprawia, że jest on mało czytelny.
- Powłoka na bazie węgla w tekście pracy oznaczona jest a-C:H , ale na rysunkach np. 49 (str. 69) oznaczona jest a-C. Powłoki a-C:H i a-C mogą znacząco różnić się właściwościami, więc należało by konsekwentnie stosować oznaczenie a-C:H.
- Obrazy SEM w tabeli 7 (str. 75) są małe i trudno wnioskować czy widać na nich nalepianie materiału przeciąganych blach na powierzchnię matryc. Wyniki te pozostawiono bez komentarza.
- Przy wynikach modelowania MES np. rys. 61 (str. 79) podano, że rysunek "u góry" dotyczy przypadku bez smarowania, a "na dole" ze smarowaniem, natomiast nie podano jaki założono współczynnik tarcia w modelu.

Uwagi o charakterze dyskusyjnym:

- Rozdziały 3.1. i 3.2 przedstawiające tribologiczne aspekty kształtowania blach i wymagania stawiane smarom technologicznym nie powinny znaleźć się w części badania własne lecz w analizie literatury.
- Jednym z celów pracy było opracowanie taniej receptury smaru ekologicznego, natomiast szkoda, że w pracy nie przytoczono choćby orientacyjnego porównania ceny takich smarów z ceną smarów handlowych.
- Na stronie 58 stwierdzono, że w przypadku stosowania oleju rzepakowego zatarcie następowało przy nacisku 30 MPa. Nie potwierdzono tego obserwacjami powierzchni po teście, lecz przyjęto to tylko na podstawie wzrostu wartości współczynnika tarcia z 0,08 do 0,13.
- Opisując wyniki przedstawione na rysunku 35 (str 60) stwierdzono, że dodatki kwasu borowego i stearynowego poprawiają wytrzymałość filmu smarnego na przerwanie, ale skuteczniejszym wydaje się kwas stearynowy. Jednak jak wynika z rysunku, dla żadnego z tych dodatków do oleju film smarny nie został przerwany z zakresie nacisków do 49 MPa, a niższy jest tylko nieznacznie współczynnik tarcia dla oleju z dodatkiem kwasu stearynowego.

Przedstawione powyżej uwagi o charakterze dyskusyjnym i uwagi redakcyjne nie zmieniają mojej pozytywnej oceny pracy. Uwagi te należy rozpatrywać raczej jako sugestie, czy wskazówki do dalszej pracy naukowo-badawczej.

### **3. Ocena końcowa**

Na podstawie szczegółowej analizy rozprawy doktorskiej stwierdzam, że wnioski w niej przedstawione potwierdzają postawioną tezę badawczą. W mojej opinii praca mgr Katarzyny Dyja jest ciekawa i zawiera interesujące i wartościowe wyniki badań, a także elementy nowatorskie.

Recenzowana praca pt. „Tribologiczne aspekty kształtowania blach stosowanych w lotnictwie” spełnia także wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone ustawą o stopniach i tytułach naukowych z dnia 14 marca 2003r (Dziennik Ustaw RP nr 65 poz. 595 z późn. zm).

Wnoszę zatem do Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej o przyjęcie rozprawy doktorskiej i o dopuszczenie Pani mgr Katarzyny Dyja do publicznej obrony.

