

Radom dn. 15.08.2022

Dr hab. inż. Marek Kowalik - prof. UTH
Wydział Mechaniczny
Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu

PK/UM/BU/8/87/2022

19. 08. 2022

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Kułakowskiego
pt.: **BADANIA WPLYWU PARAMETRÓW I WARUNKÓW PROCESU
CIĘCIA MECHANICZNEGO NA LOKALNE ZMIANY
WŁAŚCIWOŚCI LASEROWANYCH BLACH
ELEKTROTECHNICZNYCH**

wykonana na podstawie uchwały Senatu Politechniki Koszalińskiej
uchwała nr 61/2022 z dnia 25 maja 2022 r.

1. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana praca doktorska mgr inż. Marcina Kułakowskiego łącznie zawiera 160 stron. Tekst pracy zawiera 135 rysunków i 34 wzory matematyczne. W spisie literatury znajduje się 194 pozycje, przede wszystkim artykułów zagranicznych czasopism technicznych i kilka pozycji książkowych oraz 17 stron internetowych. Praca podzielona jest na siedem rozdziałów opatrzone wstępem i wnioskami. Rozdział drugi jest analizą stanu wiedzy z zakresu cięcia blach elektrotechnicznych opartym na przeglądzie literatury (29 stron ok. 18% pracy) W rozdziale trzecim Doktorant przedstawił wyniki badań wytrzymałościowych blach wzdłuż i poprzecznie do kierunku walcowania. Rozdział czwarty opisuje podstawowe zależności wykorzystane do modelowania procesu cięcia. Rozdział piąty (36 stron tj. 22% pracy) obejmuje analizę numeryczną cięcia metodą MES z wykorzystaniem autorskich aplikacji w systemie ANSYS LS –Dyna. W szóstym rozdziale (35 stron tj. 22% pracy) Doktorant przedstawia wyniki badań eksperymentalnych dla różnych parametrów technologicznych i wnioski. W rozdziale siódmym zawarte są wnioski z podziałem na posumowanie, elementy oryginalne, aplikacyjne , naukowe i uytylitarne. Praca jako całość ma charakter teoretyczno-doświadczalny, a proporcja między tymi częściami jest zachowana. Struktura wewnętrzna pracy jest prawidłowa i logicznie ułożona. Układ pracy jest tradycyjny: teoria - metoda - doświadczenie - dyskusja wyników i wnioski. Strona edytorska jest dobrze opracowana, tekst objaśniono rysunkami dobrej jakości.

2. Ocena aktualności naukowej podjętej tematyki

Przedstawiona do opinii praca dotyczy cięcia blach elektrotechnicznych, które ze względu na wysoką zawartość krzemu i małą grubość kilku dziesiątych milimetra są elementami trudnymi technologicznie. Od powierzchni przecięcia wymagana jest prostopadłość, bark zaokrągleń krawędzi, a przede wszystkim zadziórów ze względu na pakietowanie w rdzeniach maszyn elektrycznych. Na parametry magnetyczne blachy mają wpływ naprężenia jakie

pozostawia technologia kształtowania w materiale, tak więc badania w tym kierunku dadzą perspektywę podniesienia sprawności maszyn elektrycznych. Optymalizacja parametrów technologicznych pod kątem sterowania własnościami wyrobu wpisuje się w aktualne trendy inżynierii mechanicznej.

3. Szczegółowa charakterystyka rozdziałów rozprawy

Rozdział pierwszy *Wstęp* zawiera bardzo ogólną charakterystykę zastosowania blach elektrotechnicznych. Wskazuje na utrzymujący się, stale rosnący trend konsumpcji przez szeroko rozumiany przemysł blach na elementy o własnościach magnetycznych. Autor słusznie stwierdza, że cięcie mechaniczne pomimo rozwoju technik cięcia wysokoenergetycznego jest nadal dominującą technologią, a rosnące wymagania jakościowe w tym przypadku odnoszą się nie tylko do dokładności geometrycznej wyrobu, ale również do stanu naprężeń jakie pozostawia technologia w materiale, co istotnie wpływa na jego własności magnetyczne. Rozdział kończy krótki opis zawartości pracy. W opinii recenzenta wstęp powinien w stopniu ogólnym zarysowywać problematykę pracy w aspekcie tytułu, w którym mowa o blachach laserowanych, cięciu mechanicznym i lokalnych zmianach właściwości.

W rozdziale drugim *Analiza stanu wiedzy* opisana następująca problematyka: charakterystyka blach elektrotechnicznych i ich cięcia, parametry technologiczne cięcia plastycznego, siły występujące podczas cięcia plastycznego, ocena jakości cięcia. Autor przedstawia aktualne problemy badawcze odnośnie cięcia plastycznego blach, wnioski z aktualnego stanu wiedzy, cele i hipotezę badawczą. Zdaniem recenzenta zbyt ubogi jest opracowany punkt 2.1. Czytelnik bardzo mało dowiaduje się o blachach poddanych tzw. laserowaniu, jego parametrach, wydajności, głębokości oddziaływania na blachę elektrotechniczną. Cytowana jest tylko jedna pozycja literatury i internetowa strona katalogu produktu. Laserowa obróbka blachy transformatorowej nie jest technologią powszechnie znaną, a autora do wyjaśnień zobowiązuje użycie tego słowa w tytule pracy. Recenzent sugeruje autorowi uzupełnienie tego niedostatku podczas prezentacji pracy w czasie obrony.

W punkcie 2.3 *Mechaniczne cięcie plastyczne* autor błędnie umieścił podpunkty 2.3.1 do 2.3.2 opisujące cięcie strugą wodną, gazowe i plazmowe, które nie są technologiami cięcia plastycznego, a wspomnianie ich w aspekcie cięcia jakichkolwiek blach o grubości poniżej 1 mm jest niecelowe. W przypadku blach transformatorowych możemy mówić o technicznym sensie stosowania tylko cięcia mechanicznego i laserowego. W punkcie 2.4 do 2.6 definiuje główne parametry cięcia takie jak prędkość cięcia, luz, siły, promienie zaokrągleń krawędzi. W opinii recenzenta parametry powinny być uporządkowane w dwie grupy tj. parametry ściśle procesowe: prędkość, siły, luz oraz parametry związane z geometrią wyrobu takie jak wielkość zadziórów, zaokrąglenie krawędzi i płaskość. Powinna być zdefiniowana prędkość cięcia dla wykrawania i cięcia nożycami krążkowymi. Recenzent dostrzegła kilka niefortunnych określeń np. *nadmiar zmiennych wejściowych* (str.20.), *ciąc przy luzie mniejszym* (str. 21), w punkcie 2.2 nie wspomniano o płaskości detali wykrawanych. Na stronie 28 w końcowych zadaniach punktu 2.7. posługuje się potocznymi określeniami wygładzanie powierzchni stempla. Punkt 2.9 *Wnioski z aktualnego stanu wiedzy* formułuje 11 dość ogólnych posumowań z przeglądu literatury bez wyraźnego pokazania kryterium według jakich prace innych badaczy były analizowane. W opinii recenzenta hipoteza pracy jest dość ogólna, można na podstawie przedstawionego w rozdziale materiału zaryzykować stwierdzenie o dominującym parametrze, ewentualnie zjawisku wpływającym na własności magnetyczne blachy w strefie cięcia.

Rozdział trzeci poświęcony jest określeniu własności mechanicznych badanych blach elektrotechnicznych pokrytych powłoką izolacyjną i bez powłoki. Doktorant dokonał pomiaru twardości oraz określił parametry wytrzymałościowe w próbie rozciągania. Badania rozciągania zostały przeprowadzone na próbkach pobranych wzdłuż i poprzecznie do kierunku

walcowania. Własności magnetyczne zostały określone wg danych producenta blachy. Uzyskane wyniki prób rozciągania zweryfikowano statystycznymi testami istotności stwierdzając różnice w zakresie przeciętnej wytrzymałości na rozciąganie R_m wzdłuż i poprzecznie do kierunku walcowania. W przedstawionym w rozdziale materiale budzi zastrzeżenia pomiar twardości blachy o grubości 0,3mm metodą Brinella (odcisk pomiarowy ok. 5mm przy grubości blachy 0,3mm to bardzo dużo) oraz wykresy naprężeń rzeczywistych σ - ϵ rys.3.14 do rys.3.23. Brak jest również komentarza odnośnie charakteru wykresów z prób rozciągania, Doktorant zasłania się testami istotności. Końcowe zdanie rozdziału *Ponieważ testy.....* jest oczywistością. Dla blach z anizotropią różna wytrzymałość próbek pobieranych poprzecznie i wzdłużnie do kierunku walcowania to standard.

W rozdziale czwartym *Modelowanie procesu cięcia* czytelnik otrzymuje ogólny opis modelu cięcia głównie oparty na rozwiązaniach prof. L. Kukielki bazujących na uaktualnionym opisie Lagrange'a stanu deformacji plastycznej ciała lepko-plastycznego. Przedstawiona jest redukcja obiektu przestrzennego do modelu płaskiego na przykładzie cięcia nożycami krążkowymi, model kontaktu, wpływ tarcia oraz sformułowane jest przyrostowe i dyskretne równanie ruchu. Rozdział kończy stwierdzenie o niemożliwości rozwiązania równań ze względu na mnogość niewiadomych i konieczność całkowania względem czasu z uwzględnieniem warunków brzegowych. Zdaniem recenzenta brakuje rozdziałowi podsumowania, kilku zdań oceniających przydatność prezentowanego modelu w planowanych badaniach. Rozdział sprawia wrażenie niedokończonego, u czytelnika powstaje pytanie to co uzyskujemy z całkowania i jaki opis otrzymujemy. Krytycznie należy zauważyć, że na tym etapie pracy doktorant zadeklarował przedmiot badań tj. blachę elektrotechniczną o grubości 0,3 mm, nie określił jaką technologią ww. blacha będzie cięta.

Obszerny (37str.) rozdział piąty *Analiza numeryczna procesu cięcia blach elektrotechnicznych laserowanych* zawiera wyniki analiz numerycznych procesu cięcia blachy elektrotechnicznej z uwzględnieniem anizotropii własności mechanicznych. Autor opracował aplikacje MES wykorzystując programy komercyjne ASSYS LS-Dyna i LS-Prepost przy pomocy, których możliwe jest określenie w funkcji czasu stanu naprężeń i odkształceń w zespole cięta blacha–narzędzie. Wyniki symulacji przeprowadzone za pomocą algorytmu implementowanego przez autora pozwalają analizować proces cięcia na modelach 2D i 3D. Przeprowadzone analizy numeryczne dość dobrze korespondowały z następującymi wartościami stosowanymi w praktyce technologicznej: kąt pochylenia krawędzi tnącej α , prędkość cięcia v i luz cięcia h_c . Doktorant w wyniku obliczeń określił ograniczenia tych parametrów stwierdzając, że stosowanie zwiększonych prędkości cięcia v i luzu cięcia h_c powoduje zwiększenie szerokości strefy wpływu naprężeń. Symulacje numeryczne zostały zweryfikowane poprzez obserwację wybranych punktów strefy cięcia za pomocą kamery szybkoobrotowej i porównane na tych samych ilustracjach oraz zestawione z fotografiami powierzchni przecinanej pod dużym powiększeniem. W rozdziale prezentowane jest wiele wyników symulacji numerycznych, dotyczących zasadniczego aspektu pracy tj. szerokości strefy, w której występują naprężenia spowodowane procesem cięcia niekorzystne ze względu na własności magnetyczne blachy oraz wad typu geometrycznego tj. zadziórów i niepłaskości powierzchni blachy bardzo utrudniających pakietowanie, a właśnie w ten sposób elementy te są wykorzystywane. Jest obszerny materiał dający wiele informacji do opracowania procesu technologicznego. Istotnym problemem technicznym jest w przypadku blach elektrotechnicznych ich montaż ze względu na zadziory, które zależą nie tylko od luzu, ale od zużycia czyli od promienia zaokrąglenia krawędzi tnących z tego powodu często konieczne jest pakietowanie już na wykrojniku. Z pewnością zaokrąglenie krawędzi wpłynie na zwiększenie szerokości strefy wpływu naprężeń. Uwzględnienie tego parametru dałoby lepszy bardziej rzeczywisty obraz prezentowanego procesu.

W rozdziale szóstym *Badanie eksperymentalne procesu cięcia* doktorant prezentuje stanowisko badawcze zbudowane na bazie nożyc krążkowych uzupełnione kamerą szybkoblatkową oraz komputerowym sprzętem rejestrującym. Przedmiotem badań jest blacha elektrotechniczna o grubości 0,30 mm z pokryciem izolacyjnym i bez pokrycia. Cięcie jest przeprowadzane wzdłużnie i poprzecznie do kierunku walcowania blachy ze zmienną prędkością cięcia i luzem pomiędzy nożami. Kryterium oceny procesu są: parametry geometryczne powierzchni cięcia szerokość strefy zaokrąglenia krawędzi s_r , szerokość strefy przelomu poślizgowego s_p i wysokość zadzioru h_c . Wygląd powierzchni rozdzielenia różnił się w zależności od luzu h_c i prędkości cięcia v . Autor przedstawia dokumentację fotograficzną zestawioną z topografią, z której wywodzi opinie na temat stanu naprężeń w strefie rozdzielczej odwołując się do opisów powierzchni ciętej na bazie literatury. Wyniki są poddane analizie statystycznej i przedstawione graficznie na wykresach dla s_p , s_r , h_c w funkcji h_c i v . Doktorant nie zadeklarował jaka jest wzorcowa powierzchnia cięcia. Czytelnik może tylko intuicyjnie domyślać się, że nie powinien występować zadzior, powierzchnia przecinana powinna być prostopadła, a przelom na całej powierzchni powinien być poślizgowy i nie powinno występować zaokrąglenie powierzchni. Niejasny jest sposób przeprowadzenia badań własności magnetycznych w szczególności kształtu próbki, mowa jest tylko o pierścieniu 120/90 mm, jak był wykonany, jak uzyskano parametry powierzchni przecinanej wyszczególnione na rys.6.33 i 6.34, jak wpłynęła na pomiary anizotropia blachy. W podpisach rysunków 6.37 i 6.38 h_c powinno być μm . Rozdział kończy 13 stwierdzeń i wniosków o charakterze ogólnym i badawczym oraz porównawczym wynikających z cytowanej literatury. W opinii recenzenta badania eksperymentalne wykazały wpływ badanych parametrów na własności magnetyczne blachy i dają pewne wskazówki do projektowania procesów cięcia mechanicznego elementów na rdzenie magnetyczne maszyn elektrycznych zmniejszając straty energetyczne.

W rozdziale siódmym pracy Doktorant zamieszcza podsumowanie, wnioski z podziałem na poznawcze ogólne, użytkowe i kierunki dalszych badań. Konkluzje te bezpośrednio wynikają z przeprowadzonych badań lub analiz. Niektóre sformułowania jednak mają częściowo charakter postulatyczny i są fragmentarycznie hipotezami. W opinii recenzenta w dyskusji wyników są dopuszczalne tym bardziej, że Doktorant przestawił dalsze działania badawcze.

4. Nowości naukowe stanowiące oryginalny dorobek doktoranta

Z przedstawionego omówienia wynika, że rozprawa pomimo wskazanych niedociągnięć spełnia wymagania pod względem układu i podziału treści oraz jest akceptowalna kompletność materiału stawiana w tego typu pracach. Jako oryginalne osiągnięcie doktoranta należy uznać przeprowadzenie badań wytrzymałości blach elektrotechnicznych, adaptację stanowiska badawczego pod kątem prowadzonych eksperymentów oraz opracowanie aplikacji komercyjnych programów komputerowych. Przedstawiony materiał jest merytorycznie poprawny, autor wykazał się znajomością literatury przedmiotu. Sformułował hipotezę i zaplanował poprawnie badania eksperymentalne w celu weryfikacji. Posługiwał się nowoczesną aparaturą badawczą oraz opracował materiał badawczy wykazując się znajomością metod statystycznych. Otrzymane wyniki pozwoliły określić optymalne parametry technologiczne dla cięcia blach krzemowych elektrotechnicznych na taśmy do produkcji rdzeni magnetycznych. Na tej podstawie recenzent stwierdza, że Doktorant opanował metodykę prowadzenia samodzielnie badań naukowych.

5. Uwagi krytyczne wymagające wyjaśnienia i problemy do dyskusji na obronie pracy

- Jak wygląda technologia tzw. laserownia blachy krzemowej, jaki jest zasięg występowania skutków laserowego oddziaływania ablacyjnego w funkcji grubości blachy, jaką metodą są badane skutki tej obróbki blachy i jak zostały zweryfikowane w pracy
- Jakie skutki powoduje w procesie cięcia lakier izolacyjny, czy zidentyfikowano to w badaniach wytrzymałości, na jakim poziomie badania stwierdziły wpływ obróbki laserowej na wytrzymałość
- Proszę o komentarz do wykresów naprężeń rzeczywistych σ - ϵ rys.3.14 do rys.3.23
- Proszę uzasadnić wybór nożyc krążkowych do cięcia blach elektrotechnicznych. Elementy rdzeni magnetycznych to wielokąty, lub pierścienie z wewnętrznymi żłobkami, to detale przede wszystkim wykrawane, raczej trudno wykonać je na nożycach krążkowych. Techniczny sens zastosowania nożyc krążkowych wg. recenzenta to tylko rozkrój arkusza na taśmy wykorzystywane do wykrawania.
- Jak prowadzono badanie własności magnetycznych, przedstawić schemat, konstrukcję próbki i w jaki sposób określono zmiany magnetyczne w bardzo małym obszarze pobliżu krawędzi
- Cięcie wszelkiego gatunku blach cienkich jest trudne ze względu na zużycie noża krążkowego, jak będzie wpływał promień zaokrąglenia ostrza na badane parametry, proszę przedstawić na symulacji

6. Wniosek końcowy

W podsumowaniu recenzent stwierdza, że rozprawa stanowi rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego technologii cięcia blach elektrotechnicznych. Ponadto Autor wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz aspektami użytkowymi zastosowania jej wyników. Przedstawiona dysertacja wskazuje na opanowanie przez Doktoranta podstaw prowadzenia badań teoretycznych i doświadczalnych w zakresie procesów obróbki plastycznej pod kątem optymalizacji parametrów technologicznych. Tym samym spełnia wymagania ustawy z dnia 27 lipca 2005 roku „Prawo o Szkolnictwie Wyższym” oraz ustawy z dnia 18 marca 2011 o zmianie ustawy - „Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz o zmianie niektórych innych ustaw” wraz z późniejszymi zmianami. Wnoszę więc o dopuszczenie mgr inż. Marcina Kułakowskiego do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.

Marek Kowalek