

dnia 25.10.2022 r.  
PK/127/136/8/136/2022

Warszawa, 17. października 2022 r.

Dr hab. inż. Szymon Gontarz, prof. PW  
Instytut Pojazdów i Maszyn Roboczych  
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych  
Politechniki Warszawskiej  
Ul. Narbutta 84  
02-524 Warszawa

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Marcin Kułakowski

pt.: „Badania wpływu parametrów i warunków procesu cięcia mechanicznego na lokalne zmiany właściwości laserowanych blach elektrotechnicznych”

Podstawa opracowania: pismo z dnia 1.06.2022 r., Rektor Politechniki Koszalińskiej, dr hab. Danuta Zawadzka, prof. PK.

## 1. Ogólna charakterystyka rozprawy oraz ocena tematu i celu pracy.

Dzisiejszego świata nie sposób wyobrazić sobie bez urządzeń elektrycznych, są one obecnie nieodłącznym elementem otoczenia człowieka. Przeciętny człowiek nie zdaje sobie sprawy z mnogości i różnorodności tego typu technosfery, dzięki której funkcjonujemy w codziennym życiu. Co więcej, jej rozwój wciąż gwałtownie wzrasta. Uogólniając, do produkcji urządzeń elektrycznych potrzebne są specjalne materiały, takie jak przewodniki, półprzewodniki, izolatory i materiały magnetyczne. Materiały magnetyczne ze względu na różnorodność właściwości i szerokość zastosowania stanowią szczególną grupę materiałów wykorzystywanych w technice. Największe znaczenie na rynku materiałów magnetycznych mają materiały magnetyczne miękkie. Produkuje się je w dużych ilościach i o różnych właściwościach, według Transparency Market Research w 2017 roku wartość globalnego rynku blach elektrotechnicznych wyniosła 20 mld dolarów. Najpopularniejszym typem była stal o niezorientowanych ziarnach, a największe zastosowanie miała w produkcji silników. Natomiast głównym obszarem wykorzystania blach elektrotechnicznych o ziarnie zorientowanym są rdzenie transformatorów dystrybucyjnych i mocy. Co więcej, wartość urządzeń gdzie wykorzystuje się takie materiały w samej Europie przekroczyła wartość 250 mln euro. W 2026 roku, przewiduje się, że wartość rynku blach elektrotechnicznych sięgnie 35 mld dolarów. Za ten silny i stabilny wzrost odpowiada głównie przemysł motoryzacyjny, głównie dzięki rosnącemu popytowi na auta elektryczne oraz hybrydowe, ale również pewnego rodzaju rewolucja energetyczna, która zmierza w kierunku rozproszonej generacji i kogeneracji energii.

Te uwarunkowania, wraz ze współcześnie kreowaną polityką surowcową, sprawiają, że technologie wytwarzania oraz obróbki stali elektrotechnicznej nabierają coraz większego znaczenia, gdyż wpływają one bezpośrednio na efektywność procesów jak i samych urządzeń. Współczesny sposób produkcji zakłada proces walcowania na zimno. Natomiast by przenieść do urządzeń elektrycznych właściwości magnetyczne blach elektrotechnicznych, wytworzonych w danym procesie technologicznym, przy jak najmniejszych stratach, ważny jest dobór odpowiedniej technologii wytwarzania detali z arkuszy blach dostępnych na rynku. Obecnie jest wiele metod wycięcia pożądanego przez nas kształtu z arkusza blachy, tj.: wycinanie za pomocą wykrojników, cięcie laserowe, plazmowe czy strumieniem wody. Każda z tych metod ma swoje wady i zalety, a dobór metody odpowiedniej dla danego detalu determinowany jest jego przeznaczeniem i gabarytami, kosztami produkcji czy wymaganą dokładnością wykonania. Do produkcji wielkoseryjnej korzystnym rozwiązaniem technicznym jest zastosowanie procesu cięcia mechanicznego i właśnie tego procesu dotyczy recenzowana praca doktorska. Dodatkowo, Doktorant słusznie zauważył, że współcześnie, aby jeszcze poprawić właściwości blach elektrotechnicznych stosuje się technologie ulepszania powierzchniowego tj. metoda laserowania, która nie wpływa na skład chemiczny blach, ale zmienia budowę struktury krystalicznej. Jest to już stosunkowo znana metoda, która coraz częściej zastępuje lub uzupełnia proces wyżarzania blachy czy gotowych wytworzonych detali. Dzięki powyższym, można tworzyć wysoko efektywne urządzenia bazujące na anizotropowych blachach, dla których jednym z ograniczeń jest fakt wrażliwości na naprężenia mechaniczne i zgnioty (wynika to głównie z domieszki krzemu). Mając powyższe na względzie, Doktorant obrał za cel komplementarne zbadanie wpływu parametrów cięcia mechanicznego na nożycach krążkowych na zmiany właściwości anizotropowych laserowanych blach elektrotechnicznych.

Proponowane zagadnienie jest o tyle atrakcyjne, że poprzez wzięcie pod uwagę aktualnie wytwarzane technologicznie blachy, przez wykorzystanie w badaniach nowoczesnych narzędzi symulacyjnych oraz technik eksperymentalnych, można będzie dobrać optymalne parametry cięcia, co będzie miało praktyczne zastosowanie w przemyśle. Doktorantowi więc, należy się pochwała za zależenie praktycznego celu, któremu towarzyszy komplementarne podejście uwzględniające modelowanie, analizę numeryczną oraz weryfikację eksperymentalną. Dodatkowo, pracę warto wyróżnić, z uwagi na w znacznym stopniu samodzielne, przygotowanie sobie warsztatu pracy doświadczalnej i symulacyjnej.

Jednoznacznie więc stwierdzam, że temat pracy należy uznać za aktualny i ważny, szczególnie z punktu widzenia badań wdrożeniowych. Ambitny cel oraz komplementarny zakres rozprawy doktorskiej, świadczą o rozległym spektrum zainteresowań naukowych i umiejętnościach Doktoranta.

## 2. Ocena zawartości merytorycznej.

W krótkim wstępie Doktorant przedstawił tło i zarys problemów dotyczących wymagań stawianym blachom elektrotechnicznym. Swój wywód ukierunkowuje w stronę potrzeby

opracowania zaleceń dotyczących projektowania procesu cięcia blach elektrotechnicznych, aby można było uzyskać zarówno wysokiej jakości krawędź cięcia, jak i minimalną ingerencję we właściwości magnetyczne ciętych blach. Autor nie zdradza, że będzie zajmował się blachami laserowanymi. Za to już na pierwszej stronie, możemy napotkać niejasną, a może nawet sprzeczną myśl dotyczącą rozwiązania problemu braku możliwości wyeliminowania negatywnego wpływu nieprawidłowej realizacji procesów technologicznych. Jako antidotum na to, uznaje się odpowiedni skład chemiczny oraz strukturę stali, obróbkę cieplną oraz wytyczne w zakresie projektowania procesów technologicznych obróbki materiału. Dodatkowo, w omawianym rozdziale pojawiają się dwie ilustracje, które według mnie, nie wnoszą nic ważnego do tematu – również w tekście rozdziału brakuje do nich odwołań. Podsumowując wstęp, choć nakreślony jest w nim całokształt pracy, to nie zostało zdradzone dlaczego i o czym będzie traktować dysertacja.

Rozdział drugi rzuca światło na zarysowaną tematykę poprzez wnikliwą analizę stanu wiedzy. Aczkolwiek Autor zapewnia, że zrobił przegląd literatury wnoszącej nowe elementy wiedzy z zakresu tematu rozpraw, brzmi to nieadekwatnie gdyż znajdują się w niej pozycje z 1972 roku. Kilka razy, w pracy można przeczytać sformułowanie 'materiały magnetyczne' użyte w domyśle jako materiały ferromagnetyczne. Należy pamiętać, że jest kilka innych zachowań magnetycznych materiałów innych niż ferromagnetyczne. Ponadto wspomniana charakterystyczna duża energia zewnętrznego pola magnetycznego dotyczy całego procesu przemagnesowania, a nie tylko namagnesowania. Natomiast wreszcie zostaje wprowadzone zagadnienie technologii laserowania, której warto było poświęcić więcej uwagi. Wnioskuje to choćby z faktu uzasadnienia stosowania blach laserowanych na rdzenie transformatorów, wyłącznie brakiem przewidzenia procesu wyżarzania dla tych obiektów. Takie ujęcie nie pokazuje istoty stosowania procesu dla tych konkretnych obiektów. W podrozdziale 2.2 nie odnajdziemy charakterystyk technologii cięcia blach elektrotechnicznych, choć tytuł na to wskazuje. Niestety kolejne podrozdziały również przynoszą wątpliwości i pytania: dlaczego rozdział nadrzędny '2.3. Mechaniczne cięcia plastyczne' posiada podrozdziały dotyczące cięcia strugą wodno-ścierną, cięcia gazowego, plazmowego czy laserowego? W żadnej z technologii cięcia nie został poruszony temat cięcia blach laserowanych dlatego też nie jestem w stanie zrozumieć po co, oprócz cięcia mechanicznego, wprowadzono opis innych technik. Tym bardziej niezrozumiałe jest przejście, bez słowa komentarza, do rozdziału 2.4 gdzie opisano szczegółowo parametry procesu cięcia, ale już tylko w odniesieniu do mechanicznego cięcia plastycznego. Wartościowy przegląd literatury można odnaleźć dopiero od rozdziału 2.7, z tym że na początku odniesiono się ogólnie do cięcia materiałów metalowych, a dopiero później do tego co jest przedmiotem dysertacji czyli blach elektrotechnicznych. Po raz kolejny tytuł rozdziału (2.7.2) nie odzwierciedla zawartości, gdzie w tym przypadku możemy znaleźć coś więcej niż informacje o cięciu mechanicznym tych materiałów. Zaskoczeniem jest również rozdział 2.8, w którym ciężko odczytać ścieżkę dedukcji, którą Autor chce nas doprowadzić do głównej myśli doktoratu. Rozdział 2.9 stanowi podsumowanie przeglądu literaturowego w postaci sformułowanych 12 wniosków. W tak podanej formie bardzo ciężko jest je zweryfikować, natomiast należy się domyślać, że mają one prowadzić do postawionych celów

doktoratu. Główne cele rozprawy, choć bardzo ciekawe, nie wskazują na cięcie mechaniczne. Dlatego uznaję je za zbyt ogólne jak i sformułowanie 'opracowanie naukowych podstaw procesu cięcia'. Również w celach szczegółowych brak jest informacji o technice cięcia i raczej nie jest możliwe opracowanie uniwersalnego modelu matematycznego procesu cięcia dowolną techniką. Rozdział drugi kończy się sformułowaniem hipotezy, do której odniosę się w dalszej części mojej recenzji. Natomiast podsumowując omawiany rozdział, muszę niestety stwierdzić, że znajdujące się w nim informacje nie wnoszą dużo do tematu rozprawy jak również nie odnajduję w nim konsekwencji prowadzonej myśli, która towarzyszyła doktorantowi.

Rozdział trzeci zawiera badania właściwości mechanicznych anizotropowych blach elektrotechnicznych laserowanych (ET 110-30LS) - należących do grupy konwencjonalnych blach elektrotechnicznych (CGO). Dodatkowo przedstawiono ich właściwości magnetyczne oraz skład chemiczny. Te informacje będą stanowiły podstawę fizyczną do etapu modelowania numerycznego, dlatego stanowią ważny etap. Tym bardziej należy się wyjaśnienie dlaczego twardość była mierzona dwoma metodami? Dlaczego nie podano analizy błędu pomiarowego? I skąd wynika wniosek o anizotropowości właściwości mechanicznych, z pomiaru twardości? Natomiast w kolejnym rozdziale przeanalizowano próby rozciągania próbek z badanej stali. Badania zostały wykonane zgodnie z odpowiednią normą, aczkolwiek ich reprezentacja nie jest do końca zrozumiała. Po co zostały wygenerowane rysunki od 3.8 do 3.23 skoro doktorant się do nich nie odwołuje. Przeprowadzone testy weryfikujące potwierdziły różnice w zakresie przeciętnej wytrzymałości na rozciąganie w zależności od kierunku, ale czy były one niezbędne żeby potwierdzić to zjawisko i podjąć decyzję o prowadzeniu dalszych analiz dla wszystkich przypadków?

Rozdział czwarty zawiera opis modelu fizycznego i matematycznego procesu. Opracowano ciągłe i przyrostowe modele matematyczne, tj: modele kontaktu narzędzie-obiekt, równania konstytutywne, równania dynamiki ruchu oraz warunki jednoznaczności. Pomysł wykorzystania rachunku wariacyjnego do celu uważam za bardzo ciekawy, jednakże opis zdefiniowanego problemu jest bardzo ogólny i ciężko jest odnaleźć konkretnie zdefiniowany funkcjonal jak i sposób jego rozwiązania. Podczas analizy, autor odwołuje się do licznych prac prof. dr. hab. inż. Leona Kukiełki, w których jak sam stwierdza: „Opis składowych modelu matematycznego można odnaleźć w pracach L. Kukiełki, które są oryginalnym rozwiązaniem umożliwiającym uniwersalne zastosowanie w analizach procesów technologicznych obróbki.” Ta konstatacja jest sprzeczna z 12. wnioskiem wynikającym z analizy literaturowej (rozdział 2.9). Rozdział kończy zdefiniowanie równania ruchu w formie dyskretnej i wniosek, że ze względu na nadmiar niewiadomych równania nie można dokładnie rozwiązać. Natomiast proponuje się rozwiązanie przybliżone, które nie zostało tutaj wystarczająco pokazane.

W rozdziale 5. dopiero widać oryginalny wkład autora, który potwierdza swoje wysokie kwalifikacje w korzystaniu z narzędzi typu ANSYS LS-DYNA oraz LS-Prepost. Początkowe ogólne wywody na temat symulacji i narzędzi, wraz z ilustracjami tj. 5.1 i 5.2, są zbyteczne, gdyż nic nie wnoszą do rozpatrywanego zagadnienia. Wybór odpowiedniego narzędzia powinien być

uzasadniony wynikami uzyskiwanymi w czasie jego wykorzystywania i tak jest w tym przypadku. Wykorzystując m.in. metodę bezsiatkową SPH, doktorant opracował konkretne aplikacje, które zostały wykorzystane do analizy zjawisk fizycznych zachodzących w obszarach kontaktu narzędzi tnących z kształtowanym materiałem. Zakładając występowanie w materiale przestrzennych stanów naprężeń, zostały stworzone efektywne modele zarówno dla płaskich stanów odkształceń jak i stanów przestrzennych. Dzięki temu możliwe było prognozowanie lokalnych zmian właściwości anizotropowych laserowanych blach elektrotechnicznych w wyniku procesu cięcia. Stanowi to niewątpliwie wartościowy wkład w obszar badawczy, a przeprowadzona walidacja przekonuje do wyniku. Natomiast mam zastrzeżenia co do jakości obrazu uzyskiwanego z wizyjnego toru pomiarowego, gdzie albo nieprawidłowo dobrano parametry sprzętu lub akwizycji obrazu lub nie zapewniono odpowiednich warunków oświetleniowych. Prognozowanie szerokości strefy odkształconej w strefie cięcia pokazało szerokie możliwości analityczne prowadzonych autorskich analiz numerycznych, czego zwieńczeniem było pokazanie możliwych defektów w przypadku cięcia mechanicznego blach elektrotechnicznych. Zwrócono uwagę i przeprowadzono analizę zjawiska skręcania arkusza oraz powstawania nadmiernych zadziórów, które są charakterystyczne i bardzo istotne w przypadku cięcia tego rodzaju materiału. Rozdział 5. kończy zbiór trafnych i cennych wniosków z przeprowadzonych analiz numerycznych.

Rozdział 6. ujawnia szerokie zainteresowania mechaniką eksperymentalną, które idą w parze z wiedzą, doświadczeniem i umiejętnościami Doktoranta w tej dziedzinie. Przeprowadzana w ramach badań eksperymentalnych analiza parametryczna procesu cięcia została ujęta bardzo szeroko. Wynika to ze złożoności problemu, dlatego słusznie podzielono badania na kilka etapów. Stanowisko do badań oraz jego opis, poza tabelą 6.1, nie budzą zastrzeżeń. Do identyfikacji nieliniowego przypadku wielowymiarowego uznano obiekt badań jako 'czarną skrzynkę', a tok postępowania jest zgodny z algorytmem zaproponowanym przez prof. Kukiełkę. Dzięki temu nie jest konieczna znajomość zachodzących w nim zjawisk fizycznych, ale też wątpliwe staje się to podejście w nawiązaniu do celu głównego rozprawy, tj. „Wyjaśnienie zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi cięcia...”. Niepodważalnie z takiej analizy autor uzyska pewne prawidłowości związane z tymi zjawiskami, ale czy faktycznie efekty fizyczne zostaną przez to bardziej poznane? Do powyższych wątpliwości, chciałbym żeby Doktorant odniósł się podczas publicznej obrony. Niemniej jednak, uzyskane wyniki wykazują dość dobrą zgodność z wynikami symulacji numerycznych, choć ich dokładne porównanie wymagałoby dodatkowej pracy i rozdziału w rozprawie.

W pierwszym etapie eksperymentu przeprowadzono badania wpływu najbardziej istotnych parametrów technologicznych procesu na jakość ciętej krawędzi dla zmiennych kierunków cięcia względem kierunku walcowania arkusza blachy. Badania zostały wykonane skrupulatnie, a analiza powierzchni ciętej krawędzi jak i jej topografia są wystarczającymi reprezentacjami wyników. Zgodnie z przyjętym algorytmem, metodyka ujmuje analizę statystyczną wyników, której efektem, poprzez zastosowanie funkcji regresji wielorakiej, jest zdefiniowanie zależności w postaci wielomianu dla obliczonego przedziału ufności zmiennych. Otrzymane wyniki zostały przedstawione w postaci wykresów przestrzennych powierzchni

opisujących szerokość strefy przełomu, prędkość cięcia, luz między narzędziami, wysokość zadzioru, szerokość strefy zaokrąglenia krawędzi w różnych konfiguracjach. Wyniki zostały zaprezentowane zarówno dla blach z powłoką elektroizolacyjną jak i bez powłoki. Natomiast statystyczna ocena istotności kierunku cięcia pozwoliła potwierdzić odpowiednie postawione hipotezy jak i odrzucić te, które się nie potwierdziły. Skoro praca dotyczyła blach elektrotechnicznych, to nie mogło zabraknąć analizy wpływu parametrów cięcia na właściwości magnetyczne materiału. Badanie uznaję za bardzo cenne i oryginalne, natomiast mam jedną uwagę. Otóż, zgodnie z tytułem, praca doktorska dotyczy 'lokalnych zmian właściwości...' i jest to zgodne w przypadku analiz mechanicznych, ale w przypadku badań magnetycznych, z racji stosowanej techniki pomiarowej, otrzymujemy wynik uśredniony, na który oczywiście mają wpływ lokalne zmiany przełomu materiału. Dotyczy to również samych właściwości magnetycznych materiału anizotropowego, którego próbka w postaci pierścienia niweluje jej wpływ. Chciałbym też zwrócić uwagę doktorantowi, że zgodnie z tym co napisał i poparł literaturą: „największe zmiany parametrów pętli histerezy powoduje cięcie laserowe”. Jest to podyktowane występowaniem dużych naprężeń i odkształceń termicznych w strefie cięcia. W związku z tym, chciałbym dowiedzieć się, czy zdaniem doktoranta, zaobserwowane zmiany pętli histerezy w przypadku cięcia mechanicznego również zależą od naprężeń termicznych, czy innych czynników. Warty dostrzeżenia jest fakt sformułowania przez autora, zadania optymalizacji wielokryterialnej oraz przedstawienia jego rozwiązania dla procesu cięcia anizotropowej blachy elektrotechnicznej laserowanej. Taki wynik stanowi bardzo ciekawy i oryginalny międzydziedzinowy wkład, gdyż wiąże obszar mechaniki i magnetyzmu, co jest rzeczą unikatową.

Rozdział siódmy w sposób rzeczowy podsumowuje rozprawę. Znajdziemy tutaj odpowiednie pogrupowane wnioski, aczkolwiek zabrakło mi bardziej krytycznego spojrzenia określającego ograniczenia opracowanych rozwiązań. Ten brak poniekąd uzupełnia ostatni, krótki, rozdział 7.6. Możemy tutaj zapoznać się z dostrzeżonymi przez Doktoranta możliwymi dalszymi kierunkami prac zmierzających do rozwoju poruszonych w dysertacji zagadnień.

### 3. Ocena redakcyjnej strony rozprawy.

Przedstawiona do recenzji rozprawa podzielona jest na 7 rozdziałów oraz zestawienie literatury, jak również posiada streszczenie w języku polskim i angielskim oraz spis rysunków. Większość rozdziałów posiada swoje podrozdziały. Monografia została zawarta na około 140 stronach, gdzie znajdziemy 135 ilustracji i wykresów oraz wiele tabel. Spis literatury jest bardzo bogaty i obejmuje 194 pozycje oraz dodatkowo 17 źródeł internetowych. Pracę poprzedzają spis treści oraz spis najważniejszych oznaczeń, skrótów i definicji użytych w rozprawie. Tak ogólnie rysujący się układ monografii jest klasyczny i tym samym poprawny, jednakże bliższe spojrzenie ujawniło kilka mankamentów.

Już na wstępie należałoby zamieścić spis słów kluczowych. Idea ich stosowania jest oczywista, bo ułatwia powiązanie zainteresowań merytorycznych potencjalnego czytelnika

z dziełem danego autora. Zakres rozprawy jest bogaty szczególnie w środki i konkretne rozwiązania numeryczne i eksperymentalne, dlatego tym bardziej należałoby wskazać słowa kluczowe je identyfikujące.

Jak już wspomniałem, główny nurt pracy układa się klasycznie, ze wstępem, zdefiniowanym celem i zakresem pracy, przeglądem stanu wiedzy, określeniem przedmiotu badań i proponowanej metodyki, przedstawieniem wyników i analiz z symulacji modelowych jak i eksperymentów. Jednakże czytając kolejne rozdziały, trzeba często domyślać się bezpośredniego ich powiązania. Dlatego główna moja uwaga dotyczy samego prowadzenia myśli przewodniej pracy doktorskiej. O ile tytuły rozdziałów i podrozdziałów są sformułowane prawidłowo to gorzej jest z ich zawartością. Po ich przeczytaniu stwierdzam, że stanowią obszerne opracowania, często bardzo dobre, ale niestety trudno je powiązać ze sobą i odnaleźć klucz przyczynowo-skutkowy pomiędzy nimi. Przez to odbiór pracy jest zdecydowanie utrudniony. Zdarza się również, że zawartość rozdziału nie odpowiada jego pełnej treści (np. rozdział 2.3), a struktura podrozdziałów czasem wydaje się wręcz pomieszana (np. podrozdziały w rozdziałach 2 i 3). Zdarzyło się kilka razy, że Autor wyprowadza pewną swoją oryginalną myśl, a następnie sam jej częściowo zaprzecza (np. przedostatni akapit rozdziału 2.9). Często brakuje precyzji wyrażania się, jak np. w rozdziale 3.1 kiedy Autor pisze, że pomiar twardości potwierdza anizotropię właściwości mechanicznych. Twardość jest tylko jedną z właściwości mechanicznych i nie można w oparciu o nią twierdzić, że inne również są anizotropowe.

Największą część pracy stanowią autorskie analizy numeryczne (rozdział 5) oraz badania eksperymentalne (rozdział 6). Świadczy to o profilu doktoranta i stanowi główny autorski wkład w obszar badawczy. Wszystkie rozdziały pracy zawierają bogaty materiał ilustracyjny co wynika z badawczej specyfiki doktoratu. Jednakże zdarzają się ilustracje niepotrzebne, a nawet takie do których nie ma odniesienia w tekście pracy.

Analizując pracę można zauważyć, że Autor zdecydował się sformułować jawnie hipotezę rozprawy (strona 38 rozprawy). W pracach o charakterze aplikacyjnym, często trudno zaproponować rzeczową i nietrywialną hipotezę czy tezę badawczą. Niestety i w tym przypadku doktorantowi się to nie udało. Nie czynię dalszych wywodów oceniając jej postać. Natomiast na miejscu doktoranta, mając świadomość utylitarnego zakresu pracy, poprzestałbym na zdefiniowaniu zakresu badawczego pracy, który poniekąd istnieje w zdefiniowanych przez autora celach głównych i dodatkowych.

Zmierzając ku końcowi tej części recenzji chciałbym zwrócić uwagę na bardzo bogaty spis literatury, do której odniósł się Doktorant. Natomiast nie jestem w stanie zrozumieć dlaczego wśród literatury występuje jedynie jedno odwołanie do publikacji Doktoranta [Bohdal Ł., Kułakowska A., Kułakowski M., Finite Element Analysis and Experimental investigation of cut surface formation of magnetic silicon steel in shear cutting. *Materials* 2021, 14 (21) 6415], którego dodatkowo nie jestem w stanie odnaleźć w tekście dysertacji. Wiem, że autor posiada dorobek publikacyjny, dlatego tym bardziej jest to dla mnie niezrozumiałe.

Praca ogólnie napisana jest na dobrym poziomie edytorskim, a jej duży atut to staranność opracowania, szczególnie odnosi się to do graficznego materiału rozprawy. Natomiast na wielu stronach rozprawy zaznaczyłem chochliki drukarskie i błędy językowe, wymagające poprawienia.

#### 4. Wnioski końcowe

Podsumowując całość przedstawionej dysertacji trzeba podkreślić wagę problemu postawionego w pracy i docenić metody użyte do jego analizy. Dzięki żmudnej pracy Doktoranta udało się pokazać komplementarne podejście w analizie wpływu parametrów procesu cięcia mechanicznego na zmiany właściwości laserowanych blach elektrotechnicznych. Jakość blach elektromagnetycznych jest wciąż przedmiotem intensywnych prac badawczo-rozwojowych w Japonii, ale i również w innych częściach świata. Osiągnięcia inżynierii materiałowej w tej dziedzinie muszą iść w parze z rozwojem i optymalizacją procesów technologicznych obróbki tych materiałów. Tylko wtedy osiągnięty zostanie zamierzony postęp w rozpatrywanej dziedzinie. Analizując całokształt recenzowanej dysertacji stwierdzam, że:

- zagadnienie naukowe, którego rozwiązania podjął się Doktorant, zostało wybrane i sformułowane prawidłowo (pomijając słabo sformułowaną hipotezę rozprawy);
- jeden wyznaczony cel główny pracy został osiągnięty, natomiast drugi wymaga komentarza, o który poprosiłem w tekście recenzji. Realizacja założonych celów szczegółowych pracy doktorskiej stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie rozpatrywanej dyscypliny naukowej inżynierii mechanicznej, a pierwszy z nich stanowi autorską aplikację istniejącego już modelu;
- do rozwiązania zdefiniowanego problemu Doktorant umiejętnie skorzystał ze współczesnego dorobku naukowo-technicznego w zakresie mechaniki, materiałoznawstwa, symulacji komputerowych jak również fizyki materiałów magnetycznych i miernictwa magnetycznego oraz wizyjnego;
- realizując pracę, Doktorant wykazał się samodzielnością oraz umiejętnością organizowania badań doświadczalnych oraz symulacyjnych;
- wyniki rozprawy poszerzają wiedzę dotyczącą zachowania blach elektrotechnicznych laserowanych podczas cięcia mechanicznego oraz odkrywają ciekawe zależności związane ze zmianą ich właściwości w wyniku tegoż procesu.

Opiniowana praca posiada więc oryginalne autorskie cechy nowości jak również walory użyteczne. Natomiast przedstawione w recenzji uwagi, choć zdecydowanie wpływają negatywnie na całokształt pracy, to nie zakrywają zasadniczej jej wartości merytorycznej. Jako najważniejsze rezultaty mgr. inż. Marcina Kułakowskiego trzeba tu wymienić:

- określenie istotności wpływu głównych parametrów technologicznych procesu cięcia mechanicznego na jakość technologiczną anizotropowych blach

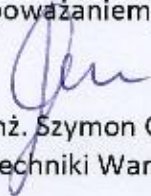


elektrotechnicznych laserowanych, z naniesioną powłoką elektroizolacyjną i bez niej,

- określenie wpływu warunków procesu na zmiany kształtów pętli histerezy magnetycznej i związanych z nią właściwości ferromagnetycznych,
- przeprowadzenie wnikliwej analizy numerycznej MES w modelowaniu procesu cięcia blach elektrotechnicznych laserowanych,
- dostarczenie bogatych wyników eksperymentalnych,
- przeprowadzenie licznych optymalizacji mających na celu ułatwienie wyboru przez technologa najlepszego rozwiązania dla zadanych kryteriów.

Te dokonania pracy oceniam pozytywnie i podkreślając komplementarne ujęcie zagadnienia, konsekwencję w dążeniu do rozwiązania oraz niepodważalny potencjał aplikacyjny wyników otrzymanych w ramach rozprawy doktorskiej uważam, że praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim wszczętym przed 30 kwietnia 2019 roku, w tym względnie obowiązujące przepisy tj.: ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789 ze zm.) oraz rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r., poz. 261), w związku z art. 179 ust. 1-3 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669 ze zm.) i rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych (Dz. U. z 2018 r., poz. 1818). Pozwala to sformułować wniosek o dopuszczenie Autora pracy do publicznej jej obrony.

Z poważaniem,

  
dr. hab. inż. Szymon Gontarz,  
prof. Politechniki Warszawskiej