

dr hab. inż. Rafał Świercz, prof. uczelni
Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

Warszawa, dn. 21.02.2025 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej
pt.:

„Modelowanie i optymalizacja procesu cięcia elektroerozyjnego z zastosowaniem
metod sztucznej inteligencji”

Autor: mgr inż. Łukasza Łomozik

Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Sokołowski

Promotor pomocniczy: dr inż. Grzegorz Dyrbuś

Opiekun pomocniczy: dr hab. inż. Henryk Bąkowski

Opracowano na zlecenie
Przewodniczącej Rady Dyscypliny
Inżynieria Mechaniczna
Politechniki Śląskiej

Pani dr hab. inż. Alicji Piaseckiej-Belkhat, prof. PŚ
z dnia 18.12.2024 r.

1. Treść i zakres rozprawy

Recenzowana praca dotyczy badania wpływu parametrów i warunków obróbki wycinania elektroerozyjnego na wybrane wskaźniki technologiczne procesu. Głównym przedmiotem zainteresowania doktoranta była optymalizacja procesu wycinania elektroerozyjnego z wykorzystywaniem metod sztucznej inteligencji umożliwiającą dobór parametrów i warunków obróbki w zależności od oczekiwanych wskaźników technologicznych.

Biurowo Dziekana

We wprowadzeniu do rozprawy Autor w zwięzły sposób przedstawił problematykę poruszanego zagadnienia.

W rozdziale II przedstawił cel i zakres pracy. Wskazał szczegółowe cele rozprawy obejmujące:

- Analizę wpływu parametrów technologicznych na wybrane wielkości charakteryzujące proces WEDM, takie jak prędkość usuwania materiału, szerokość szczeliny erozyjnej oraz chropowatość powierzchni obrabianej.
- Opracowanie modeli procesu WEDM. Modele te będą zastosowane do przewidywania wyników obróbki na podstawie zdefiniowanych parametrów technologicznych, co umożliwi lepszą kontrolę nad procesem oraz jego optymalizację.
- Opracowanie oprogramowania do dynamicznej optymalizacji procesu cięcia elektroerozyjnego, które umożliwi bieżące dostosowywanie parametrów technologicznych do specyficznych wymagań jakościowych obrabianych powierzchni oraz wymagań wydajnościowych, wykorzystując metody sztucznej inteligencji.
- Wdrożenie opracowanego oprogramowania w przedsiębiorstwie, mające na celu praktyczne zastosowanie narzędzia do optymalizacji procesu cięcia elektroerozyjnego w warunkach produkcyjnych.

Następnie Autor streścił poszczególne rozdziały pracy, scharakteryzował stosowane pojęcia oraz przedstawił zastosowane narzędzia programistyczne.

W rozdziale III Autor przybliżył etapy rozwoju technologii obróbek elektroerozyjnych oraz aktualną teorię opisującą zjawiska fizyczne występujące w trakcie wyładowań elektrycznych determinujące proces usuwania materiału. Dokonano identyfikacji głównych parametrów i warunków obróbki wpływających na przebieg procesu wycinania elektroerozyjnego.

W rozdziale IV Autor przedstawił stan zagadnienia dotyczącego technologii wycinania elektroerozyjnego. Istotną część rozdziału stanowi opis wpływu parametrów i warunków obróbki wycinania elektroerozyjnego na dokładność geometryczną części, chropowatość powierzchni obrabianej, prędkość usuwania materiału oraz stabilność procesu obróbki. Szczególną uwagę skoncentrowano na analizie dotychczas stosowanych metod sztucznej inteligencji w modelowaniu i optymalizacji procesu wycinania elektroerozyjnego. W oparciu o analizę stanu badań (104 – pozycje literaturowe) Autor zidentyfikował luki w istniejącym stanie wiedzy dotyczącym badanego zagadnienia i na tej podstawie sformułował temat oraz cel i zakres rozprawy.

Rozdział V zawiera opis zastosowanych metod budowania modeli predykcyjnych procesu WEDM obejmujący metody statystyczne takie jak: analizę korelacji, regresję liniową, wielomianową i logistyczną oraz metody uczenia maszynowego obejmujące: drzewa decyzyjne, las losowy, wzmacnianie gradientowe, maszyny wektorów nośnych, sztuczne sieci neuronowe. Następnie scharakteryzowano zastosowane metody optymalizacji tj.: algorytm genetyczny, algorytm ewolucji różnicowej, algorytm optymalizacji rojem cząstek, algorytm mrówkowy.

W rozdziale VI przedstawiono zagadnienia związane z odpowiednim przygotowaniem wyników badań doświadczalnych do budowy modeli predykcyjnych badanego procesu. Scharakteryzowano przyjęte metody oceny jakości modeli regresyjnych i klasyfikacyjnych oraz metodę interpretacji modeli opartych na uczeniu maszynowym w postaci SHapley Additive exPlanations.

Rozdział VII zawiera opis warunków badań oraz metodyki badawczej. W kolejnych etapach przedstawiono plany badań dla przyjętych zmiennych niezależnych tj.: napięcia otwartej przerwy (VS), natężenia prądu (CC), napięcia wyładowania (VM), czasu impulsu (ON), czasu wyłączenia impulsu (OFF), napięcia serwomechanizmu (SV), wzmocnienia sprzężenia zwrotnego (SVG), naciągu drutu (T), prędkości przewijania elektrody (WF), natężenia przepływu dielektryka (FR). Jako badane wskaźniki technologiczne procesu przyjęto: prędkość usuwania materiału (MRR), parametry profilu chropowatości: Ra, Rq, Rz, szerokość szczeliny erozyjnej (Kw) oraz ciągłość procesu cięcia (C). Badania doświadczalne realizowano przy zastosowaniu nowoczesnej, specjalistycznej aparatury.

W rozdziale VIII przedstawiono opisy i analizy statystyczne wyników badań doświadczalnych realizowanych w ramach dysertacji.

W rozdziale IX w oparciu o przyjęte kryteria oceny przedstawiono wyniki modelowania procesu WEDM dla poszczególnych metod tj. sztuczne sieci neuronowe, regresja liniowa, regresja wielomianowa, maszyny wektorów nośnych, XGBoost, las losowy, drzewo decyzyjne, regresja logistyczna. W kolejnych etapach dla najkorzystniejszych modeli dokonano ich oceny jakościowej dla badanych wskaźników technologicznych.

Istotną część rozdziału stanowi pogłębiona analiza opracowanych modeli predykcyjnych procesu wycinania elektroerozyjnego. Scharakteryzowano wpływ badanych zmiennych niezależnych na przebieg zjawisk fizycznych determinujących proces usuwania materiału i skutki jakościowe obróbki.

W rozdziale X Autor skoncentrował swoją uwagę na optymalizacji procesu WEDM. W kolejnych etapach przedstawił kryteria optymalizacji, funkcje celu oraz zastosowane algorytmy optymalizacyjne tj. algorytm genetyczny (GE), ewolucji

różnicowej (DE), optymalizacji roju cząstek (PSO) oraz algorytmu mrówkowego (ACO). W oparciu o zdefiniowane kryteria selekcji i przeprowadzone analizy wykazano skuteczność zastosowanego algorytmu genetycznego w wielokryterialnej optymalizacji parametrów technologicznych badanego procesu.

Rozdział XI zawiera opis architektury opracowanego i wdrożonego oprogramowania do wyznaczania optymalnych parametrów procesu WEDM w zależności od oczekiwanych wskaźników technologicznych obróbki.

W rozdziale XII przedstawiono podsumowanie i wnioski oraz plan przyszłych badań.

Bibliografia obejmuje 104 pozycje literaturowe. Cytowane źródła literaturowe są adekwatne do tematyki rozprawy i obejmują aktualne artykuły z czasopism naukowych, materiałów konferencyjnych i opracowań książkowych.

2. Ocena ważności podjętego problemu naukowego

Obróbka elektroerozyjna należy do zaawansowanych technologii umożliwiających kształtowanie złożonych geometrycznie części z materiałów trudnoobrabialnych. W procesie wycinania elektroerozyjnego (WEDM – Wire Electrical Discharge Machining) materiał usuwany jest z przedmiotu obrabianego w wyniku wyładowań elektrycznych zachodzących pomiędzy elektrodą drutową a materiałem obrabianym. Elektrody izolowane są od siebie przepływającym dielektrykiem. W wyniku oddziaływania efektów termicznych wyładowań elektrycznych zachodzących pomiędzy elektrodą roboczą a materiałem obrabianym następuje proces lokalnego topnienia, wrzenia i odparowania zarówno materiału obrabianego jak i elektrody roboczej. Złożoność zjawisk fizycznych determinujących proces usuwania materiału powoduje trudności w identyfikacji wpływu parametrów i warunków obróbki na jej skutki jakościowe.

Jednym z kluczowych problemów opracowania technologii wycinania elektroerozyjnego jest wyznaczenie wpływu szerokiego spektrum parametrów energetycznych i hydromechanicznych na dokładność geometryczną wykonywanych elementów, cechy topografii obrobionych powierzchni oraz wydajność procesu. Trudności w opracowaniu uniwersalnych modeli procesu wycinania elektroerozyjnego uwarunkowane są stochastycznym charakterem wyładowań elektrycznych i odmiennymi warunkami usuwania materiału, które zależą w istotny sposób nie tylko od parametrów obróbki ale również od własności materiału obrabianego i elektrody roboczej (takich jak: temperatura topnienia, temperatura wrzenia, przewodność cieplna).

Zastosowanie wycinania elektroerozyjnego w wytwarzaniu złożonych geometrycznie części do przemysłu lotniczego, kosmicznego czy też energetycznego wymaga opracowania dedykowanych do danego materiału i możliwości technologicznych obrabiarki modeli predykcyjnych.

Wyznaczanie zależności pomiędzy parametrami technologicznymi warunkującymi przebieg zjawisk fizycznych determinujących proces usuwania materiału a cechami topografii obrabianych powierzchni, wydajnością usuwania materiału oraz stabilnością procesu jest kluczowe dla rozszerzenia istniejącego stanu wiedzy. Dobór najkorzystniejszych parametrów obróbki często dla przeciwnych kryteriów takich jak uzyskanie wymaganej dokładności geometrycznej, minimalizacja chropowatości powierzchni przy jednoczesnej możliwie największej wydajności procesu wymaga opracowania zaawansowanych modeli predykcyjnych i algorytmów optymalizacyjnych.

Dlatego wybór tematyki rozprawy, uważam za słuszny zarówno ze względów poznawczych jak i użytkowych.

3. Ocena merytoryczna

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy doktorskiej Pana Łukasza Łomozika stwierdzam, że analiza stanu zagadnienia, dobór aparatury naukowo-badawczej, przedstawiony plan i metodyka badań doświadczalnych jest prawidłowa.

Opiniowana rozprawa realizowana była w oparciu o zróżnicowane nowoczesne metody badawcze, aparaturę i urządzenia technologiczne oraz stanowi istotne osiągnięcie doktoranta w obszarze badań nad technologią wycinania elektroerozyjnego.

Za największe, oryginalne osiągnięcia naukowe Doktoranta uważam, opracowanie zaawansowanych modeli predykcyjnych procesu wycinania elektroerozyjnego łączących szereg parametrów technologicznych procesu i przyjęte wskaźniki technologiczne w oparciu o zaawansowane zróżnicowane metody takie jak maszyny wektorów nośnych (SVC) czy XGBoost (XGB). Wyznaczone modele oraz algorytmy optymalizacyjne umożliwią dostosowanie parametrów obróbki dla zakładanych a priori wartości wskaźników technologicznych.

Istotne z punktu widzenia rozszerzenia dotychczasowej wiedzy jest opisanie wpływu szerokiego zakresu parametrów procesu WEDM na chropowatość obrobionej powierzchni, wydajność usuwania materiału, stabilność procesu oraz szerokość szczeliny międzyelektrodowej.

Na uwagę zasługują przeprowadzone szerokie badania różnych postaci modeli predykcyjnych i optymalizacyjnych procesu WEDM obejmujące zastosowanie:

- metod statystycznych do wyznaczania modeli badanego procesu tj.: analizy korelacji, regresji liniowej, wielomianowej i logistycznej,
- metod uczenia maszynowego do wyznaczania modeli badanego procesu tj.: drzewa decyzyjne, las losowy, wzmacnianie gradientowe, maszyny wektorów nośnych, sztuczne sieci neuronowe,
- algorytmów optymalizacyjnych takich jak: algorytm genetyczny, ewolucja różnicowa, optymalizacja roju cząstek oraz algorytm mrówkowy.

Przeprowadzone oryginalne badania miały charakter interdyscyplinarny i ukierunkowane były na wdrożenie opracowanych rozwiązań w przedsiębiorstwie produkcyjnym.

4. Uwagi do pracy

Generalnie, praca napisana jest na dobrym poziomie z zastosowaniem właściwej terminologii. Nie mniej jednak Autor nie uniknął błędów językowych, edytorskich i stylistycznych np.:

- układ redakcyjny pracy jest niekiedy nieczytelny. Cel i zakres pracy przedstawiono w rozdziale 2 przed analizą stanu zagadnienia i uzasadnieniu podjęcia tematyki badawczej. Ponadto rozdział Zakres pracy zamiast skoncentrowanych informacji dotyczących zaplanowanych badań stanowi swoiste streszczenie poszczególnych rozdziałów dysertacji.
- str. 23, „Drut jest nawijany na szpulę a następnie ...- powinno być odwijany ze szpuli
- str. 24, Rys. 3.8 –przedstawione oznaczenia są nieczytelne,
- str. 26, 27, Rys. 4.1, 4.2 - błędne tłumaczenie tytułu wykresu,
- str. 30, „niska prędkość przewijania drutu prowadzi do ciągłych wyładowań” – pytanie, które się nasuwa jaka jest korelacja pomiędzy liczbą wyładowań elektrycznych a prędkością przewijania?
- str. 30, „powierzchnia bardziej szorstka” - powinno być chropowata,
- str. 34, „współczynnika determinacji (R-value) - powinno być korelacji,
- str. 90, MRR – prędkość usuwania materiału, dla przedstawionego w rozprawie równania opisującego MRR, korzystniej byłoby zdefiniować MRR jako wydajność objętościową usuwania materiału,
- Rys. 8.1-8.6– brak jednostek na osiach wykresów,
- Str. 98, formatowanie akapitu (Rys. 8.4- 8.6),
- Str. 100, „Występuje niemal pełna korelacja pomiędzy parametrami chropowatości (R_a , R_q , R_z), co jest zgodne z oczekiwaniami, ponieważ

wszystkie te zmienne opisują właściwości chropowatości powierzchni” - opisują wysokość profilu chropowatości i są ze sobą skorelowane.

- „czas trwania impulsu” - powinno być czas impulsu,

Pewien niedosyt budzi fakt braku podjęcia próby rejestrowania i analizy przebiegów napięcia i natężenia prądu elektrycznego w trakcie obróbki. Uzyskanie informacji na temat rzeczywistej charakterystyki przebiegów napięciowo prądowych wyładowań elektrycznych umożliwiło by rozszerzenie stosowalności opracowanych algorytmów optymalizacyjnych do innych układów sterowania obrabiarek.

Pomimo szerokiego spektrum analizowanych modeli interesującym zagadnieniem nie podjętym w rozprawie są metody głębokiego uczenia oparte na sieciach neuronowych uwzględniających równania fizyczne. Modele te mogły by zwiększyć szybkość obliczeń, dokładność prognozowania przy zwiększonym poziomie użyteczności wyników.

Pewnym mankamentem jest również brak jednoznacznie wskazanego w metodyce badań zakresu zmienności przyjętych zmiennych niezależnych.

Poniżej wymieniono uwagi o charakterze dyskusyjnym z prośbą do Autora rozprawy o ustosunkowanie się:

1. Przedstawione wyniki pomiarów szerokości szczeliny erozyjnej zawierają się w przedziale od 0,2 mm do 0,3 mm. W metodyce prowadzonych badań wskazano iż średnica elektrody drutowej wynosiła 0,2 mm. W związku z powyższym szerokość szczeliny powinna być większa niż 0,2 mm. Nasuwa się pytanie z czego wynika uzyskanie szerokości szczeliny erozyjnej równej elektrody drutowej i jaka jest niepewność pomiarowa podanych wyników szerokości szczeliny.
2. Przedstawione na rys. 8.7 wyniki wskazują na ujemną korelację pomiędzy parametrami definiującymi energię wyładowania elektrycznego (CC – natężeniem prądu, ON – czasem impulsu) a MRR. Proszę o pogłębioną dyskusję nad uzyskanym rezultatem w odniesieniu do wpływu wskazanych parametrów obróbki wycinania elektroerozyjnego na MRR.
3. W przedstawionym interfejsie użytkownika opracowanej aplikacji optymalizacyjnej, jako zmienne warunkujące proces wycinania wskazano wysokość materiału i średnicę elektrody drutowej, przy czym w badaniach doświadczalnych tych zmiennych nie wzięto pod uwagę. Czy opracowany algorytm optymalizacyjny można uogólnić dla różnych wysokości materiału ciętego i w jakim zakresie?
4. W warunkach produkcyjnych w celu uzyskania pożądanego stanu warstwy wierzchniej i dokładności geometrycznej wycinanych elektroerozyjnie części

proces obróbki realizowany jest w kilku przejściach. Czy opracowany algorytm optymalizacyjny może zostać wykorzystywany do wyznaczenia optymalnych parametrów obróbki dla obróbki stopniowanej uwzględniającej kilka przejść obróbkowych (np. cięcie zgrubne, półwykańczające i wykańczające)?

5. W pracy dokonano analizy wpływu szerokiego zakresu parametrów obróbki na przyjęte wskaźniki technologiczne. Nie ujęto jednak wpływu zastosowanej polaryzacji elektrod, co mogłoby mieć kluczowe znaczenie przy realizacji przejść półwykończeniowych i wykończeniowych obróbki. Proszę o dyskusję w tym zakresie.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Uważam, że recenzowana rozprawa prezentuje wysoki poziom merytoryczny i zawiera wiele elementów nowości i oryginalności. Przedstawione rezultaty mają zarówno istotne znaczenie naukowe jak i użytkowe i stanowią ważny wkład w rozwój technologii wycinania elektroerozyjnego. Ponadto stwierdzam, że Autor wykazał się szeroką interdyscyplinarną wiedzą, umiejętnością planowania i realizacji badań naukowych oraz umiejętnością oceny uzyskanych wyników.

Niezależnie od wymienionych uprzednio uwag krytycznych Autor wykazał się umiejętnością prowadzenia badań naukowych przy zastosowaniu nowoczesnych metod, a uzyskane wyniki pogłębiają wiedzę o procesie wycinania elektroerozyjnego.

Uwzględniając powyższe stwierdzam, że rozprawa doktorska opracowana przez Pana mgr. inż. Łukasza Łomozika pt. „Modelowanie i optymalizacja procesu cięcia elektroerozyjnego z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji” spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa i może być dopuszczona do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Prof. R. Świercz

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)