



Dr hab. inż. Jerzy JÓZWIK, prof. Uczelni
POLITECHNIKA LUBELSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

Telefon: +48 606 296 823; j.jozwik@pollub.pl

RECENZJA

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Krzysztofa Kuźmickiego pt.: „Wdrożenie koncepcji ustalenia dziedziczności technologicznej procesu wytwarzania drugiej generacji zespolonych piast samochodowych z łożyskiem tocznym z wykorzystaniem nowoczesnych systemów pomiarowych”, w związku z prowadzonym przez Radę Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach przewodem o nadanie stopnia doktora.

Zamawiający

Opinię wykonano na zlecenie dr hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk, Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach.

Informacje ogólne

Recenzja obejmuje ocenę treści merytorycznych rozprawy, ocenę wartości naukowej, tez i rozwiązania problemu badawczego, jak również ocenę językową i redakcyjną rozprawy oraz wnioski końcowe. Promotorem rozprawy jest Pan prof. dr hab. inż. Stanisław Adamczak, dr h.c. Na stronie tytułowej rozprawy nie wskazano promotora pomocniczego. Pracę przedstawiono na 162 stronach maszynopisu, w układzie siedmiu rozdziałów głównych i podrozdziałów, wraz z wykazem ważniejszych skrótów i oznaczeń, streszczeniami w języku polskim i angielskim, spisem literatury obejmującym 110 pozycji, uzupełnionym o wykaz siedmiu norm i jedno źródło internetowe, spisem 65 rysunków i 36 tabel oraz trzema załącznikami (A, B i C) zawierającymi pełne zestawienia wyników pomiarów.

Pracę rozpoczyna wprowadzenie w problematykę dziedziczności technologicznej, po którym następują: analiza aktualnego stanu wiedzy o zespolonych piastach łożyskowych i dziedziczności technologicznej, sformułowanie celu, tezy i sposobu realizacji pracy, analiza konstrukcji piasty łożyskowej drugiej generacji wraz z modelem matematycznym łańcucha wymiarowego dla luzu osiowego, opis procesu technologicznego i metody badań, a w dalszej części – ocena wyników przeprowadzonych badań oraz podsumowanie i wnioski. Rozprawa powstała w odpowiedzi na rzeczywiste potrzeby przemysłu, tj. problemy F&T Kraśnik S.A. związane z wdrożeniem produkcji zespolonych piast łożyskowych drugiej generacji, co nadaje jej wyraźny charakter aplikacyjny. Autor nakreślił także kierunki dalszych prac badawczych, co pozwala stwierdzić, że przyjęta metodyka i obszar badawczy będą dalej rozwijane.

Temat, treść rozprawy, tezy i rozwiązanie problemu naukowego

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Krzysztofa Kuźmickiego jest ustalenie dziedziczności technologicznej wymiarów w procesie wytwarzania elementów składowych zespolonej piasty samochodowej drugiej generacji, opartej na konstrukcji dwurzędowego łożyska kulkowego skośnego, z wykorzystaniem matematycznych metod opisu oraz nowoczesnych systemów pomiarowych. Autor podejmuje ważny i aktualny problem naukowy ilościowego opisu przenoszenia cech geometrycznych pomiędzy kolejnymi operacjami technologicznymi (toczenie – obróbka cieplna – szlifowanie) w warunkach rzeczywistej, wielkoseryjnej produkcji wyrobów precyzyjnych. Znaczenie tej problematyki potwierdza obszerna, trafnie dobrana literatura przedmiotu, poczynawszy od prac klasyków zagadnienia, aż po współczesne publikacje dotyczące modelowania dziedziczności technologicznej, cyfrowych

bliźniaków i predykcji jakości geometrycznej. Praca została wykonana w ośrodku o uznanych tradycjach metrologicznych i dużym potencjale naukowym, a jej bazę stanowią m.in. wcześniejsze publikacje współautorskie Doktoranta i Promotora dotyczące zastosowania specyfikacji geometrii wyrobów (GPS) oraz modelu łańcucha wymiarowego w projektowaniu piast łożyskowych.

Temat i treść pracy są spójne. Treści merytoryczne prezentowane w rozprawie cechuje duży poziom szczegółowości, adekwatny do rozważanych problemów. Autor przeprowadził szerokie studium literatury, wykazując umiejętność syntetyzowania wiedzy z zakresu konstrukcji piast łożyskowych kolejnych generacji oraz zjawiska dziedziczności technologicznej. Celem głównym pracy jest ustalenie relacji zachodzących między wymiarami, czyli dziedziczności technologicznej, w ramach realizowanego procesu wytwarzania poszczególnych elementów składowych zespolonej piasty łożyskowej drugiej generacji. Realizację celu głównego wsparto pięcioma celami pomocniczymi, obejmującymi opracowanie stanu wiedzy, analizę konstrukcji wraz z budową modelu matematycznego łańcuchów wymiarowych, badanie zdolności maszyn technologicznych, przygotowanie i przeprowadzenie eksperymentu oraz statystyczne opracowanie wyników z budową modeli matematycznych. Teza pracy, wynikająca z przeglądu literatury i doświadczenia własnego Autora, brzmi: „W procesie wytwarzania części maszyn występuje dziedziczność technologiczna wymiarów, której identyfikacja i wykorzystanie umożliwia optymalizację naddatków prowadzącą do poprawy jakości wyrobu i obniżenia kosztów produkcji”.

W odniesieniu do tak sformułowanej tezy nasuwają się dwie uwagi dyskusyjne. Po pierwsze, sam fakt występowania dziedziczności technologicznej wymiarów jest w świetle przytoczonej w rozdziale drugim literatury twierdzeniem dobrze ugruntowanym, można więc było pokusić się o tezę ambitniejszą, o charakterze ilościowym, np. dotyczącą osiągalnej dokładności predykcji wymiarów po obróbce cieplnej. Po drugie, końcowa część tezy, dotycząca optymalizacji naddatków i obniżenia kosztów produkcji, została w pracy wykazana pośrednio – poprzez zbudowanie i rekomendowanie modeli regresji oraz wykazanie zapasów względem tolerancji procesowych – natomiast samego rachunku optymalizacji naddatków ani kwantyfikacji efektów ekonomicznych w rozprawie nie przeprowadzono. Pewne zastrzeżenie budzi również tytuł rozprawy, który jest długi i semantycznie złożony („wdrożenie koncepcji ustalenia dziedziczności...”); w odczuciu recenzenta prostsze sformułowanie lepiej oddałoby rzeczywistą zawartość pracy. Uwagi te nie podważają poprawności wyводу naukowego.

Mimo powyższych uwag moja ocena pracy w zakresie tematu, treści rozprawy, tez i rozwiązania problemu naukowego jest jednoznacznie pozytywna. Podjęty problem badawczy został rozwiązany, a jego rozwiązanie wnosi istotny wkład w dyscyplinę naukową Inżynieria Mechaniczna i przynosi wymierne korzyści o charakterze użytkowym.

Ocena wartości naukowej rozprawy

Autor podejmuje ważny i trudny do jednoznacznego rozwiązania problem naukowy ilościowego ustalenia dziedziczności technologicznej wymiarów w rzeczywistym procesie produkcyjnym. Na wartość naukową rozprawy składają się w mojej ocenie trzy zasadnicze osiągnięcia.

Po pierwsze, zbudowano i zweryfikowano model matematyczny łańcucha wymiarowego dla luzu osiowego piasty łożyskowej drugiej generacji (ośmioelementowy łańcuch wymiarowy wraz z równaniem tolerancji wyprowadzonym metodą częściowej zmienności). Przeprowadzona analiza wykazała, że obliczona wartość nominalna luzu osiowego (0,0183 mm) różni się od przyjętej przez konstruktora (0,015 mm), a wyznaczone pole tolerancji luzu (0,288 mm) jest ponad czternastokrotnie większe od dopuszczonego (0,020 mm). Synteza łańcucha przeprowadzona trzema metodami (jednakowej tolerancji, jednakowej klasy tolerancji i jednakowego wpływu) wykazała z kolei, że tolerancje wymiarów składowych wymagane dla zachowania zmienności są technologicznie i ekonomicznie nieosiągalne. Wyprowadzony stąd wniosek o konieczności stosowania kompensacji selekcyjnej w montażu jest poprawny, dobrze udokumentowany i ma dużą wartość praktyczną oraz dydaktyczną.

Po drugie, zaplanowano i zrealizowano metodycznie poprawny eksperyment przemysłowy. Badaniem objęto trzy typy pierścieni (pierścienie wewnętrzne ze stali łożyskowej 100Cr6 oraz kołnierzowy pierścień zewnętrzny ze stali do hartowania indukcyjnego wg EN ISO 683-1), wykonywane w pełnym ciągu technologicznym: kucie, toczenie, obróbka cieplna, operacje szlifierskie i montaż. Dla każdego typu pierścienia badania prowadzono na trzech próbach 50-elementowych (łącznie 450 pierścieni), zróżnicowanych parametrami toczenia (posuw 0,25 i 0,1 mm/obr, promień naroża płytki skrawającej 1,2 i 0,4 mm). Na szczególne podkreślenie zasługuje poprzedzenie badań właściwych oceną zdolności obrabiarek – uzyskane wskaźniki C_m i C_{mk} (1,70–2,22) przekraczają wymaganą w branży motoryzacyjnej wartość referencyjną 1,67, co uwiarygodnia wyniki eksperymentu. Pomiary wykonywano po każdej operacji technologicznej z użyciem środków pomiarowych przewidzianych procesem, w tym stanowiska Hommel-Etamic T8000.

Po trzecie, przeprowadzono wieloetapową, poprawnie dobraną analizę statystyczną wyników: badanie normalności rozkładów (test Shapiro-Wilka), ocenę wpływu predyktorów dychotomicznych (korelacja punktowo-dwuseryjna), ocenę jednorodności wariancji (test Levene'a) wraz z testem λ Wilksa, analizę zależności kaskadowych (test Pearsona) oraz regresję liniową z oceną współczynnika determinacji R^2 , statystyki F , statystyki Durбина-Watsona i wykresów normalności reszt. Najważniejszym rezultatem poznawczym jest wykazanie silnych, istotnych statystycznie zależności pomiędzy średnicami bieżni po toczeniu a średnicami po obróbce cieplnej (współczynniki korelacji dochodzące do $r = 0,90$) przy jednoczesnym braku istotnych korelacji ze średnicami po szlifowaniu wykończającym. Efektem pracy są cztery rekomendowane do stosowania w produkcji równania regresji dziedziczności technologicznej, m.in. $dwlc = 1,146 \cdot dwlt - 5,872$ ($R^2 = 0,75$) dla pierścienia wewnętrznego lewego oraz $dzpc = 0,9077 \cdot dzpt + 6,741$ ($R^2 = 0,809$) dla bieżni prawej pierścienia zewnętrznego. Modele te umożliwiają prognozowanie wymiarów po obróbce cieplnej na podstawie stanu po toczeniu, a w konsekwencji racjonalizację naddatków obróbkowych i międzyoperacyjnej kontroli jakości.

Praca jako całość nie budzi większych zastrzeżeń, niemniej jednak nasuwają się pytania i uwagi o charakterze merytorycznym i metodycznym. Do najważniejszych z nich należą:

- Przyjęty plan eksperymentu nie jest pełnym planem czynnikowym 2×2 – nie zbadano kombinacji posuwu 0,1 mm/obr z promieniem naroża 0,4 mm, co utrudnia separację efektów głównych obu predyktorów i ocenę ich interakcji. Czy Autor rozważał uzupełnienie planu badań i jak uzasadnia jego redukcję?
- W rozprawie zabrakło szacowania niepewności pomiaru: nie przedstawiono budżetu niepewności torów pomiarowych (z uwzględnieniem metod A i B), odniesienia do spójności pomiarowej i wzorcowania zastosowanych środków pomiarowych, ani badania powtarzalności i odtwarzalności (analiza systemu pomiarowego MSA, R&R). Jest to istotne tym bardziej, że dane w załącznikach zapisane są z rozdzielczością 0,005 mm, a odchylenia standardowe analizowanych zmiennych są rzędu 0,002–0,018 mm. Proszę o komentarz dotyczący wpływu rozdzielczości zapisu wyników na rezultaty testów statystycznych oraz o informację o warunkach termicznych pomiarów.
- Test Levene'a wykazał brak jednorodności wariancji ($p = 0,000$), a mimo to w dalszej analizie zastosowano klasyczną regresję najmniejszych kwadratów. Czy Autor rozważał regresję ważoną lub inne metody odporne, względnie jak uzasadnia odporność wyciągniętych wniosków na stwierdzonej heteroskedastyczność?
- Część modeli regresji charakteryzuje się umiarkowanym dopasowaniem ($R^2 = 0,33$ – $0,49$), co Autor uczciwie odnotowuje. Modele mają charakter lokalny – zbudowano je dla wąskiego zakresu zmienności średnic i konkretnych warunków produkcyjnych. W jaki sposób planowana jest ich walidacja na kolejnych partiach produkcyjnych oraz aktualizacja w czasie (dryft procesu, zużycie narzędzi)?
- Stwierdzony brak korelacji pomiędzy wymiarami po toczeniu i obróbce cieplnej a wymiarami po szlifowaniu zinterpretowano jako brak dziedziczenia w końcowej fazie procesu. W odczuciu recenzenta wynika on w znacznej mierze z natury obróbki wykończeniowej realizowanej „na wymiar” – wymiar końcowy jest wymuszany przez układ sterowania i kontroli czynnej szlifierki, a nośnikiem dziedziczności pozostają

wówczas inne cechy (naprężenia własne, odchyłki kształtu, struktura geometryczna powierzchni), których w tej fazie nie analizowano. Czy Autor podziela tę interpretację?

- W analizie dziedziczności pominięto operację kucia (stan wyjściowy odkuwek), mimo że cytowana w pracy literatura wskazuje na dziedziczenie mikrostrukturalne i wymiarowe z operacji przeróbki plastycznej. Dyskusja fizykalnych mechanizmów silnej korelacji toczenie – obróbka cieplna (relaksacja naprężeń, przemiany fazowe) mogłaby być również głębsza.

Konkludując, Autor wykonał bogaty eksperyment naukowy o rzadko spotykanej, w pełni przemysłowej skali, wykazał się umiejętnością planowania badań, syntezy wiedzy oraz poprawnego wnioskowania statystycznego. Przedstawione treści merytoryczne i wyniki badań pozwoliły na udowodnienie postawionej tezy, osiągnięcie celu pracy oraz wyciągnięcie jednoznacznych wniosków naukowych, poznawczych i użytkowych. Wartość wyników potwierdza ich częściowa publikacja we współautorskich artykułach w czasopiśmie indeksowanym (m.in. *Transportation Research Procedia* 2023, *Strojnicki vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 2025) i monografii (2024), a także bezpośrednie zastosowanie w praktyce produkcyjnej F&T Kraśnik S.A.

Ocena językowa i redakcyjna rozprawy

Ocena redakcyjna rozprawy obejmuje: strukturę pracy, poprawność językową, stosowanie odpowiednich skrótów, odnośników i cytowań, zamieszczanie rysunków, wzorów i tabel wraz z ich właściwym opisem, opracowanie literatury i norm oraz streszczeń w języku polskim i angielskim. Układ rozprawy i podział treści pomiędzy poszczególne rozdziały są logiczne, a język pracy fachowy i profesjonalny. Analiza rozprawy pod kątem redakcyjnym nie budzi większych zastrzeżeń, niemniej jednak Autor nie ustrzegł się drobnych niedociągnięć i niedoskonałości. Do najważniejszych z nich należą:

- w wykazie ważniejszych skrótów i oznaczeń niektóre symbole mają przypisane podwójne znaczenia (np. L – luz osiowy i liczba danych w próbie; R – suma promieni bieżni i współczynnik korelacji; M – odległość osiowa i mediana grupy), co utrudnia śledzenie zapisu matematycznego,
- zidentyfikowano liczne błędy rysunkowe w postaci braku osi symetrii dla elementów osiowo symetrycznych, jak również niepoprawnie wrysowane elementy toczne łożyska, w szczególności stożków i wiele innych (np. rys. 2÷7 - str. 14÷16, rys. 3 - str. 14, i inne)
- nieliczne literówki i omyłki edytorskie, np. „Sokolovskiego” (rozdz. 2.2) – zaś w spisie literatury autor podaje „Sokolovskiy” (raczej bez odmiany językowej powinno być po prostu Sokołowski) oraz oczywista omyłka na str. 122, gdzie przy współczynniku determinacji $R^2 = 0,75$ napisano, że model wyjaśnia „15%” zmienności zmiennej zależnej (powinno być 75%),
- wzory statystyczne testu Levene’a przywołano za źródłem internetowym [S1], podczas gdy należało sięgnąć do podręcznikowej literatury statystycznej,
- jakość edycyjna części rysunków (histogramy i wykresy zgodności z rozkładem normalnym generowane z programu STATISTICA) jest niejednorodna – małe czcionki opisów osi i zróżnicowane proporcje obniżają czytelność prezentowanych danych,
- nagłówki kolumn tabeli 5 (rozkład twardości warstwy hartowanej) są nieczytelne i wymagają korekty,
- zapis literatury jest w przeważającej mierze staranny (styl numeryczny, identyfikatory DOI), choć zdarzają się niekonsekwencje i pozycje o niepełnych danych bibliograficznych (np. [27]).

Przytoczone nieliczne usterki mają charakter typowo redakcyjny i nie obniżają wartości naukowej i poznawczej ocenianej rozprawy doktorskiej. Struktura pracy i treści merytoryczne odpowiadają standardom stawianym rozprawom doktorskim. Streszczenia w języku polskim i angielskim poprawnie oddają zawartość pracy. Uwzględniając całokształt przedstawionych treści, część językowo-redakcyjną rozprawy oceniam pozytywnie.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Biorąc pod uwagę całość pracy należy stwierdzić, że zaprezentowane wyniki posiadają wymiar poznawczy i naukowy, a także wyraźny wymiar użyteczny. Autor osiągnął postawione cele i zgromadził obszerny, wiarygodny materiał badawczy pozwalający na udowodnienie postawionej w rozprawie tezy. Na podstawie analizy rozprawy oraz powiązanego z nią dorobku publikacyjnego można stwierdzić, że Doktorant jest przygotowany do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej i wydatnie poszerzył swoją wiedzę w obszarze badań naukowych z zakresu dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

Podsumowując moją ocenę stwierdzam, że:

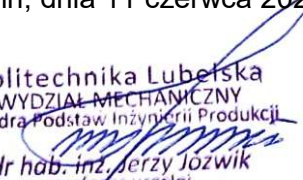
- rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, wykonane samodzielnie przez Autora,
- dokumentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna,
- wnosi istotny wkład w rozwój i podniesienie ogólnego poziomu wiedzy w zakresie ilościowego opisu dziedziczności technologicznej w procesach wytwarzania precyzyjnych elementów łóżysk,
- Autor wykazał się umiejętnościami samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, planowania eksperymentu i wyciągania z niego poprawnych wniosków.

Uwzględniając przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską i jej naukowy wkład w dyscyplinę Inżynieria Mechaniczna stwierdzam, że zaprezentowana przez Pana mgr inż. Krzysztofa Kuźmickiego rozprawa pt.: „Wdrożenie koncepcji ustalenia dziedziczności technologicznej procesu wytwarzania drugiej generacji zespolonych piast samochodowych z łożyskiem tocznym z wykorzystaniem nowoczesnych systemów pomiarowych” to oryginalne i wartościowe pod względem naukowym, ale także praktycznym osiągnięcie oraz rozwiązanie problemu określonego w tytule, celu i zakresie pracy, a jednocześnie oryginalne rozwiązanie w zakresie implementacji wyników własnych badań naukowych noszących znamiona bezpośredniego przemysłowego zastosowania.

Rozprawa spełnia wymagania ustawy (art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz.U. z 2024 r. poz. 1571)) i wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach o jej przyjęcie oraz dopuszczenie Autora do publicznej obrony rozprawy.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę oryginalne połączenie modelowania matematycznego łańcuchów wymiarowych z wieloetapową analizą statystyczną rzeczywistego procesu produkcyjnego, skalę i rzetelność przeprowadzonego eksperymentu przemysłowego, udokumentowany i powiązany tematycznie z rozprawą dorobek publikacyjny Doktoranta, a także bezpośrednie wdrożenie wyników badań w praktyce produkcyjnej F&T Kraśnik S.A., wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej stosowną uchwałą, zgodnie z regulacjami obowiązującymi w Politechnice Świętokrzyskiej.

Lublin, dnia 11 czerwca 2026 r.

Politechnika Lubelska
WYDZIAŁ MECHANICZNY
Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji

dr hab. inż. Jerzy Józwik
profesor uczelni

.....
dr hab. inż. Jerzy Józwik, prof. Uczelni