

Kraków, 10 marca 2026 roku

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Mateusza Wasilewskiego
pt.
„Analiza teoretyczno – doświadczalna procesu ciągnięcia na korku
swobodnym precyzyjnych rurek cienkościennych ze stopu CuBe2”

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Maciej Suliga, Prof. PCz.

Recenzja została wykonana na zlecenie
Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Częstochowskiej
- dr hab. inż. Rafała Prusaka, Prof. PCz.

Podstawę prawną do opracowania recenzji stanowi art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r.
„Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późn. zm.)

1.0 Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedmiot rozprawy doktorskiej dotyczy zagadnień związanych z procesem kształtowania półwyrobów w postaci rur o małych średnicach, przeznaczonych na krytyczne elementy sensorów i manometrów ciśnienia – rurki Bourdona. Jakość wykonania ww. elementów determinują kluczowe parametry eksploatacyjne, takie jak dokładność pomiarowa, powtarzalność wskazań, wytrzymałość zmęczeniowa oraz bezpieczeństwo układu pomiarowego. Problematyka ta staje się szczególnie istotna wraz z postępującą miniaturyzacją, która zwiększa atrakcyjność rurek Bourdona w aparaturze medycznej, lotniczej oraz mikroinstalacjach przemysłowych, jednocześnie znacząco utrudniając proces projektowania i wytwarzania ww. elementów. Z naukowego punktu widzenia, wytwarzanie miniaturowych rurek Bourdona stanowi interdyscyplinarne wyzwanie z pogranicza mechaniki precyzyjnej, materiałoznawstwa i inżynierii procesowej. W skali mikro zjawiska fizyczne, takie jak naprężenia własne, mikrotwardość czy jednorodność struktury, odgrywają dominującą rolę nad parametrami makroskopowymi takim jak geometria. Z kolei aplikacyjny charakter pracy wynika z bezpośredniego związku między jakością wytwarzania a funkcjonalnością gotowego wyrobu. W praktyce przemysłowej, szczególnie przy wymiarach mikrometrycznych, nawet minimalne odchyłki geometryczne, chropowatość powierzchni czy niejednorodność grubości ścianki mają wpływ na próg czułości, zwiększenie histerezy i niestabilność wskazań. Dlatego proces wytwarzania ww. elementów w postaci rur o małych średnicach

stosowanych w urządzeniach pomiarowych wymaga nie tylko zaawansowanego parku maszynowego, ale także ściślejszej, wieloparametrowej kontroli jakości na każdym etapie procesu.

Kluczowym aspektem jest dobór materiału, którego wybór jest determinowany kompromisem między wymaganą sprężystością, wytrzymałością zmęczeniową i żywotnością, a podatnością do precyzyjnego kształtowania w procesie ciągnięcia. Wymagania te sprawiają, że opracowanie i optymalizacja technologii stanowi interdyscyplinarny problem badawczo-rozwojowy o wysokim znaczeniu zarówno dla postępu nauk inżynierskich, jak i dla innowacji w sektorze wysokich technologii.

Recenzowana praca posiada przede wszystkim charakter pracy eksperymentalnej, której zasadnicze badania zostały zrealizowane w warunkach przemysłowych z wykorzystaniem parku technologicznego firmy WIKA Polska spółka z ograniczoną odpowiedzialnością sp. k. – wiodącego producenta w dziedzinie wyrobów do pomiaru ciśnienia, temperatury, poziomu, siły, przepływu, a także kalibracji urządzeń SF6. Jednocześnie istotną część prac skoncentrowana była na obliczeniach numerycznych pozwalających na opracowanie parametrów procesu ciągnięcia (środki smarne, prędkość ciągnięcia, geometria narzędzia) pod kątem uzyskania największej efektywności procesu ciągnięcia na korku swobodnym rur ze stopu CuBe2.

2.0. Ocena rozprawy doktorskiej

Struktura rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska pt: „Analiza teoretyczna – doświadczalna procesu ciągnięcia na korku swobodnym precyzyjnych rurek cienkościennych ze stopu CuBe2” liczy 189 stron i zawiera 12 głównych rozdziałów, 30 tabel, 146 rysunków oraz spis literatury obejmujący 147 pozycji. Rozprawa posiada klasyczny układ tj. składa się z części teoretycznej i części eksperymentalnej. Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do tematyki pracy doktorskiej. Rozdział nr 2 zawiera analizę stanu zagadnienia na podstawie literatury naukowej i branżowej i koncentruje się na następujących obszarach: a) charakterystyce wyrobów metalowych ze stopów miedzi, b) analizie procesu ciągnięcia rur, c) analizie tarcie i smarowania w procesie ciągnięcia oraz d) opisie technologii wytwarzania rur metodą ciągnięcia. Uważam, że analiza literaturowa została przeprowadzona na podstawowym poziomie. W szczególności w podrozdziale „Charakterystyka wyrobów metalowych ze stopów miedzi” Autor przedstawił podstawowe, znane powszechnie informacje pozbawione krytycznej analizy np. właściwości materiałów na bazie miedzi pod kątem możliwości zastosowania w rurkach Bourdona. Pozostałe podrozdziały dotyczą podstawowych zagadnień ciągnięcia rur, z uwzględnieniem roli parametrów procesowych, rodzaju narzędzi oraz środków smarnych. Powyższa analiza została opracowana na podstawie informacji pochodzących z materiałów branżowych, ze stron internetowych, publikacji naukowych, podręczników akademickich i książek. Dobór literatury uważam za prawidłowy. Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej została sformułowana teza i cel pracy (rozdział nr 3).

Teza o brzmieniu „...Modelowanie numeryczne oraz odpowiedni dobór smarów i geometrii narzędzi w przemysłowym procesie ciągnięcia rurek trudno odkształczanych w korku swobodnym umożliwi poprawę efektywności procesu wytwarzania ultracienkich rurek ze stopu CuBe2, przy zachowaniu ich wysokich własności wytrzymałościowych i plastycznych...” stała się podstawą

do opracowania programu badawczego, którego celem było jej udowodnienie. Autor przedstawił również cel pracy, który polegał na określenie wpływu parametrów technologicznych procesu ciągnięcia, tj. rodzaju środka smarnego, geometrii narzędzi oraz prędkości ciągnięcia, na efektywność procesu ciągnięcia, warunki tarcia, chropowatość powierzchni i własności mechaniczne rur ze stopu CuBe₂. Teza i cel pracy zostały sformułowane prawidłowo. Autor pracy opracował program badań, który obejmował osiem zasadniczych zagadnień badawczych tj. a) przemysłowe próby ciągnięcia rurek z brązu berylowego CuBe₂, b) badanie reologiczne smarów: badanie termogravimetryczne TGA oraz badanie lepkości dynamicznej, c) eksperymentalne badania siły ciągnięcia, eksperymentalne badania temperatury rurek w procesie ciągnięcia, d) badania ilości smaru na powierzchni rurek po ciągnięciu, e) badania chropowatości powierzchni rurek po ciągnięciu, f) badania własności mechanicznych rurek po ciągnięciu i g) symulacje komputerowe procesu ciągnięcia rurek na korku swobodnym. Założony program badań jest szeroki i dotyczy najważniejszych zagadnień istotnych z punktu widzenia osiągnięcia oczekiwanej efektywności procesu ciągnięcia.

W kolejnym rozdziale Autor zdefiniował właściwości zastosowanego w pracy stopu CuBe₂ oraz scharakteryzował technologię ciągnięcia rur wykorzystaną w ramach pracy. Podczas charakterystyki materiału Autor wskazał skład chemiczny i właściwości mechaniczne wyrobów w różnych stanach umocnienia wytworzonych ze stopu CuBe₂ oraz zdjęcia mikrostruktury, pomijając moim zdaniem ważne parametry strukturalne takie jak np. wielkość ziarna. Kolejne rozdziały tzn. rozdziały nr 5, 6, 7 i 8 zawierają wyniki badań eksperymentalnych wraz z metodyką badawczą oraz analizą uzyskanych wyników. W szczególności Autor przedstawił w ww. rozdziałach wyniki (i) badań reologicznych smarów (rozdział 5), (ii) badań parametrów procesu ciągnięcia (rozdział 6), (iii) badań wpływu prędkości ciągnięcia na chropowatość powierzchni rur (rozdział 7) oraz (iiii) badań własności mechanicznych wytworzonych rur cienkościennych (rozdział 8). Natomiast rozdział 9 poświęcony był obliczeniom numerycznym, których celem było opracowanie matematycznego modelu procesu ciągnięcia rur na korku swobodnym. W szczególności w wyniku zrealizowanych symulacji komputerowych Autor opracował model sprężysto-plastyczny stopu brązu berylowego CuBe₂ (9.1), wyznaczył graniczne wartości kryterium pęknięcia dla badanego materiału (9.2) oraz warunki brzegowe przyjęte do procesu ciągnięcia (9.3) i na końcu dokonał analizy uzyskanych wyników symulacji komputerowych procesu ciągnięcia rurek (9.4).

Praca kończy się rozdziałami „Podsumowanie” oraz „Wnioski”, w których została zaprezentowana kompleksowa analiza uzyskanych wyników w ramach pracy doktorskiej oraz sformułowane wnioski.

Stwierdzam, że układ pracy jest prawidłowy. Autor przeprowadził analizę stanu zagadnienia, sformułował tezę pracy i cel, w celu udowodnienia tezy i osiągnięcia celu pracy opracował samodzielnie program badań, który opierał się na badaniach eksperymentalnych i obliczeniach numerycznych i następnie zrealizował zaplanowane prace z wykorzystaniem aparatury badawczej.

Ocena merytoryczna pracy

Recenzowana praca stanowi interesujące analityczno-eksperymentalne studium poszukiwań możliwości zastosowanie brązu berylowego CuBe₂ jako materiału do wytwarzania rur o średnicach poniżej 3mm oraz grubości ścianek mniejszych niż 0,2mm. W szczególności głównym wyzwaniem badawczym w pracy była identyfikacja oraz kwantyfikacja zależności zachodzących pomiędzy parametrami technologicznymi procesu ciągnięcia – tj. geometrią narzędzia, prędkością ciągnięcia oraz warunkami trybologicznymi – a ewolucją mikrostruktury, właściwościami mechanicznymi oraz topografią powierzchni rur wykonanych ze stopu CuBe₂. Uważam, że podjęta tematyka w pracy doktorskiej jest oryginalna i jest odpowiedzią na aktualne potrzeby przemysłu przetwórczego w branży metali nieżelaznych. Wyroby z rur cienkościennych opartych na rurce Bourdona należy dziś traktować jako grupę produktów o wysokiej wartości technicznej i rynkowej. Są one potrzebne zarówno w klasycznym przemyśle procesowym, jak i w sektorach nowoczesnych: półprzewodnikach, gazach medycznych, systemach dystrybucji gazów, technologiach wodorowych, energetyce odnawialnej oraz instalacjach IIoT.

Podsumowując, tematyka pracy wpisuje się w zagadnienia z zakresu inżynierii materiałowej i jest nie tylko aktualna, ale również perspektywiczna z punktu widzenia rozwoju nowych zaawansowanych wyrobów i materiałów.

Zrealizowane w ramach pracy doktorskiej badania dotyczą zagadnień procesu ciągnięcia rur i analizy złożonych zależności pomiędzy parametrami procesowymi, właściwościami środków smarnych oraz geometrią narzędzi w procesie ciągnięcia na korku swobodnym rur ze stopu CuBe₂. Autor poprzez połączenie badań eksperymentalnych oraz symulacji numerycznych nie tylko udowodnił sformułowaną tezę naukową, lecz także wypracował praktyczne wytyczne bezpośrednio wykorzystywane w przemyśle. Praca wyróżnia się holistycznym podejściem do analizy czynników wpływających na proces. Autor nie ograniczył się do badania pojedynczych zmienności, lecz wykazał, że stabilność procesu ciągnięcia jest wynikiem wzajemnego oddziaływania pięciu kluczowych czynników: warunków smarowania (z naciskiem na reologię smarów i adhezję środka smarnego do powierzchni materiału), tarcia, geometrii narzędzi oraz prędkości ciągnięcia. To kompleksowe ujęcie, potwierdzone zarówno badaniami eksperymentalnymi, jak i modelowaniem numerycznym, pozwala uniknąć jednostronnej optymalizacji kosztem innych parametrów – cecha niezwykle cenna w złożonych procesach przemysłowych. Szczególnie wartościowe w pracy są wyniki badań eksperymentalnych, które były realizowane w warunkach przemysłowych w firmie Wika. Autor w efekcie zrealizowanych eksperymentalnych prac udowodnił, między innymi, że funkcja U stanowi użyteczne narzędzie do wyznaczania optymalnej konfiguracji geometrii ciągadła i korka swobodnego dla rur o średnicach poniżej 3 mm i grubości ścianek mniejszych niż 0,2 mm. Wyznaczony optymalny zakres różnicy kątów $\alpha - \beta$ mieszczący się w przedziale $(2 \div 2,5)$ został zweryfikowany zarówno poprzez symulacje komputerowe, jak i badania eksperymentalne w warunkach przemysłowych. Ponadto, Autor wyznaczył granice stabilności procesu ciągnięcia w kontekście współczynnika tarcia. Wykazano, że dla zapewnienia stabilnego ciągnięcia na korku swobodnym współczynnik tarcia musi zawierać się w wąskim przedziale od 0,04 do 0,07. Przekroczenie górnej granicy ($\mu > 0,07$) prowadzi do niepożądanego wzrostu siły ciągnięcia oraz wyężenia materiału, co – jak słusznie zauważa autor – destabilizuje proces i zwiększa ryzyko zerwania rurki. Tego rodzaju

ilościowe określenie bezpiecznego zakresu parametrów tribologicznych jest rzadkością w literaturze przedmiotu i stanowi istotną wartość dodaną rozprawy.

Na koniec warto podkreślić, że wyniki pracy posiadają bezpośrednie zastosowanie w produkcji wysokospecjalistycznych wyrobów. Autor słusznie wskazuje, że otrzymana wiedza może być wykorzystana przy projektowaniu technologii wytwarzania cienkościennych rur ze stopów miedzi przeznaczonych do produkcji sprężyn Bourdona – elementów kluczowych dla precyzyjnych przyrządów pomiarowych ciśnienia, gdzie jednorodność właściwości materiału i wysoka jakość powierzchniowe są warunkiem koniecznym dla zapewnienia dokładności pomiarów i długoterminowej stabilności działania.

Podsumowując tą część stwierdzam, że Autor pracy zrealizował szeroki programu badań eksperymentalnych wraz z obliczeniami numerycznymi i wykazał się samodzielnością naukową w rozwiązywaniu problemu badawczego osiągając założony w pracy cel.

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Mateusza Wasilewskiego oprócz wymienionych wyżej zalet posiada również fragmenty, które wymagają podjęcia szerszej dyskusji.

Uwagi natury formalnej i edycyjnej

W trakcie lektury rozprawy odnosi się wrażenie nadmiernego stosowania pojęć i sformułowań posiadających charakter „żargonu technologicznego”. W rozprawach doktorskich należy stosować przede wszystkim język naukowy (akademicki), który powinien być precyzyjny i jednoznaczny (unikanie niejasnych sformułowań i potocznych wyrażen), formalny (bez kolokwializmów i języka potocznego), spójny logicznie (argumentacja powinna być uporządkowana i jasno powiązana) i co najważniejsze powinien bazować na terminologii specjalistycznej właściwej dla danej dyscypliny.

Uwaga nr 1. Autor w całej pracy konsekwentnie używa pojęcia „rurki” zarówno w tytułach rozdziałów jak i w tekście, które bezpośrednio nie dotyczą zagadnień rurki Bourdona, tak jak np. w podrozdziale 2.2. „Podstawowe zagadnienia z zakresu ciągnięcia rurek”, który dotyczy ogólnej charakterystyki procesu ciągnięcia. Zwracam uwagę, że w aktualnie obowiązującej terminologii nie istnieje pojęcie „rurka” tylko „rura”. Norma PN-EN 10079:2008 „Wyroby stalowe” definiuje jednoznacznie i dosłownie: „... 3.57 Rura - Wyrób wydrążony, o stałym przekroju wzdłuż długości, o dowolnej długości, dostarczany w prostych odcinkach lub w zwojach..... Uwaga 1: Termin rurka jest przestarzały i nie powinien być stosowany. Uwaga 2: Nie dokonuje się żadnego rozróżnienia ze względu na wymiar, metodę wytwarzania lub przeznaczenie.....” Zgodnie z normą jedyny wyjątek stanowi pojęcie „rurka Bourdona” i w tym kontekście w miejscach, których Autor odnosi się do bezpośrednio do rurki Bourdona jest to prawidłowe, ale w rozdziałach, które dotyczą np. ogólnej charakterystyki procesu ciągnięcia takie sformułowanie jest nieprawidłowe.

Uwaga nr 2. Autor pracy nieprecyzyjnie określa skład chemiczny stopu CuBe₂ wskazując jako jednostkę [%] – proszę wskazać czy jest to % masowy czy % objętościowy? (por. Tabela 2 – kolumna 3 oraz Tabela 5).

Uwaga nr 3. Nieprecyzyjne sformułowane tytułów tabel, np. „...Tabela 3: Grupa wolframowa, skład chemiczny, własności...” – co oznacza grupa wolframowa?, „...Tabela 4 Przewodnik gatunków węglików do procesów ciągarskich...” – co oznacza słowo przewodnik?

Uwaga nr 4. Niepoprawnie sformułowane w języku polskim zdanie „...Rys.16 Właściwości węglików od ilości kobaltu oraz wielkości ziarna [70]...” .

Uwaga nr 5. W podrozdziale 6.4. „Analiza wpływu prędkości ciągnięcia na proces ciągnięcia”, str.100, w Tabeli 22 - brak jednostki prędkości ciągnięcia.

Uwaga nr 6. Tabela 30. Wartość naprężenia uplastyczniającego stopu brązu CuBe₂ – brak opisu wierszy i kolumn.

Uwaga nr 7. W spisie literatury w pozycjach [5] [9] [12] [13] znajdują się jedynie linki do artykułów bez podania autorów i tytułów literatury.

Uwagi merytoryczne

Poniżej zostały zaprezentowane uwagi natury merytorycznej - do dyskusji z Autorem rozprawy doktorskiej:

Pytanie nr 1. W rozprawie brakuje jednoznacznie zdefiniowanych wymagań odnośnie właściwości półwyrobów wytwarzanych w procesie ciągnięcia. Proszę o podanie wymagań zdefiniowanych w normach dotyczących właściwości mechanicznych, wielkości ziarna, parametrów jakości powierzchni oraz geometrii rur będących przedmiotem badań. Czy Autor skonfrontował uzyskane wyniki badań właściwości mechanicznych, jakości powierzchni z wymaganiami norm? Proszę o komentarz.

Pytanie nr 2. Na stronie 57 rozprawy Autor pisze: „...W odniesieniu do omawianych w pracy cienkościennych rurek o małym przekroju, przyjęte standardowe wartości czasu obróbki cieplnej (podane w tabeli 6) okazały się nieadekwatne, co skutkowało znaczną niejednorodnością w rozkładzie wielkości ziaren, zbyt dużym rozmiarem ziarna oraz zbyt niskimi własnościami mechanicznymi, co w konsekwencji powodowało problemy technologiczne, w tym pęknięcie rurek w trakcie procesu ciągnięcia...”. Proszę o odpowiedź, co Autor miał na myśli pisząc „... zbyt duży rozmiar ziarna...”? Jaka zatem powinna być oczekiwana wielkość ziarna? Dlaczego Autor nie zamieścił wyników badań wielkości ziarna i ogranicza się do podania jedynie właściwości mechanicznych wyrobu? Proszę o komentarz.

Pytanie nr 3. Czy w trakcie badań nad wpływem prędkości ciągnięcia, rodzaju smaru oraz geometrii narzędzia (korek) zostały przeprowadzone badania geometrii wytworzonych półwyrobów tzn. czy dokonano pomiaru zmienności grubości ścianki wzdłuż osi rury oraz centryczności rury? Proszę o komentarz.

Pytanie nr 4. Na stronie 176 Autor stwierdza, że „...nie odnotowano natomiast zmiany grubości ścianki rurki w zależności od prędkości ciągnięcia i geometrii korka w badanym zakresie tolerancji...”. Wynik ten jest w bezpośredniej sprzeczności z niemal całą dostępną literaturą przedmiotu oraz standardową wieloletnią praktyką przemysłową. Czy Autor może skomentować tę rozbieżność oraz wskazać jakie założenia przyjęte w modelu mogły na nią wpłynąć? Proszę o komentarz.

Pytanie nr 5. Autor potwierdza znaną z literatury zależność, że stabilność filmu smaru zależy od iloczynu lepkości i prędkości ciągnięcia. Stwierdza również, że maksymalna ilość smaru wciągniętego do strefy odkształcenia występuje przy prędkości 10 m/min, powyżej której warunki smarowania systematycznie pogarszają się (por. Rys. 77 str. 102). Autor nigdzie nie wyjaśnia pozornej sprzeczności pomiędzy tym

wynikiem a stwierdzeniem, że maksymalna stabilna prędkość procesu wynosi 15 m/min. Proszę o komentarz.

Pytanie nr 6. Wnioski dotyczące przewagi oleju mineralnego Masterdraw (wysoka lepkość dynamiczna, odporność termiczna) są sformułowane jako ogólne zalecenia dla procesu ciągnięcia rur ze stopu CuBe2. Czy wg Autora otrzymane wyniki można uogólnić na inne stopy Cu (np. CuCrZr, CuNiSi) czy np. na materiały o wyższym module Younga (np. stal nierdzewna)? Proszę o komentarz.

Sformułowane powyżej uwagi nie zmieniają faktu, że Autor rozprawy zrealizował postawiony cel oraz wykonał zaplanowane w doktoracie badania.

3.0. Podsumowanie i wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie w obszarze projektowania procesów przetwórstwa metali nieżelaznych, poprzez analizę złożonych zależności pomiędzy parametrami procesowymi, właściwościami środków smarnych oraz geometrią narzędzi w procesie ciągnięcia na korku swobodnym rur ze stopu CuBe2. Autor poprzez połączenie badań eksperymentalnych oraz symulacji numerycznych nie tylko udowodnił sformułowaną tezę naukową, osiągnął założony cel, lecz również wypracował praktyczne wytyczne bezpośrednio wykorzystywane w przemyśle. Tym samym stwierdzam, że recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu, dowodzi ogólnej wiedzy teoretycznej doktoranta w zakresie inżynierii materiałowej, a także potwierdza umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.

Wobec powyższego, stwierdzam, że opiniowana praca doktorska mgr inż. Mateusza Wasilewskiego zatytułowana: „Analiza teoretyczno – doświadczalna procesu ciągnięcia na korku swobodnym precyzyjnych rurek cienkościennych ze stopu CuBe2” spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określonej w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Beata Smyrak