

dr hab. inż. Tomasz Dyl, prof. UMG

Gdynia, 26.02.2026r.

Uniwersytet Morski w Gdyni

Wydział Mechaniczny

ul. Morska 81-87

81-225 Gdynia

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej

pod tytułem

„Analiza teoretyczno-doświadczalna procesu ciągnięcia na korku swobodnym precyzyjnych rurek cienkościennych ze stopu CuBe2”

Autor: mgr inż. Mateusz Wasilewski

Promotor: dr hab. inż. Maciej Suliga, prof. PCz

Recenzję opracowano na podstawie pisma Pana dr hab. inż. Rafała Prusak, prof. PCz, Prodzikana ds. nauki Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów o numerze R-WIPiTM.BOD.511.4.2025 (l.dz. 7/2026; l.dz. 18/2026), odnośnie powołania przez Radę Dyscypliny Naukowej *Inżynieria Materiałowa* Politechniki Częstochowskiej na posiedzeniu w dniu 15.01.2026r. na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Mateusza Wasilewskiego pod tytułem „Analiza teoretyczno-doświadczalna procesu ciągnięcia na korku swobodnym precyzyjnych rurek cienkościennych ze stopu CuBe2” za co uprzejmie dziękuję. Postępowanie awansowe w zakresie nauki w celu uzyskania stopnia doktora wszczęto dnia 09.12.2025r. w *Dziedzinie Nauk Inżynieryjno-Technicznych* i dla *Dyscypliny Inżynieria Materiałowa*.

1. Charakterystyka i ocena rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Wasilewskiego pod tytułem „Analiza teoretyczno-doświadczalna procesu ciągnięcia na korku swobodnym precyzyjnych rurek cienkościennych ze stopu CuBe₂” napisana jest pod opieką promotora Pana dr hab. inż. Macieja Suligi, prof. PCz, obejmuje ona streszczenie, wykaz ważniejszych oznaczeń, wprowadzenie, dziewięć rozdziałów, podsumowanie, wnioski i literaturę.

W rozprawie doktorskiej zawarto zagadnienia związane z procesami wytwarzania wyrobów metalowych ze stopów miedzi. W szczególności dokonano charakterystyki technologii wytwarzania rurek cienkościennych poprzez obróbkę plastyczną metodą ciągnięcia.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska napisana jest na odpowiednim poziomie, ma strukturę typową dla analiz teoretycznych i prac doświadczalnych, zawiera w sobie analizę przeglądu literatury, tezę, cel i zakres pracy, metodykę badawczą oraz wyniki eksperymentalnych badań procesu ciągnięcia precyzyjnych rurek cienkościennych, analizę wyników symulacji komputerowych ciągnięcia rurek na korku swobodnym, na koniec przedstawiono podsumowanie pracy i wnioski. Układ pracy, pod względem struktury, podziału treści, kolejności rozdziałów uważam za właściwy. Całość rozprawy zawarta jest na 189 stronach, tekstu, wraz z rysunkami (razem 146), wzorami (razem 23) i tabelami (wszystkich 31). W literaturze wykazano 147 materiałów źródłowych, które dobrano i wykorzystano w sposób odpowiedni.

W pracy przeprowadzono bardzo wnikliwy przegląd literatury, w którym przedstawiono charakterystykę wyrobów metalowych ze stopów miedzi, opisano podstawowe zagadnienia z zakresu ciągnięcia rurek, opisano bardzo istotne zjawiska dotyczące tarcia i smarowania w procesie ciągnięcia, a także przedstawiono proces ciągnięcia rurek, który można stosować dla wybranych stopów miedzi. Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury określono, że opisywane w publikacjach naukowych procesy ciągnięcia odnoszą się w większości przypadków do ciągnięcia drutów. Autor zaznaczył, że brakuje odniesień dotyczących rurek o średnicach mniejszych niż 5 mm oraz grubości ścianek mniejszych niż 0,3 mm.

Po przeprowadzonej analizie stanu wiedzy oraz na podstawie wyników badań własnych Doktorant przyjął następującą tezę pracy:

„Modelowanie numeryczne oraz odpowiedni dobór smarów i geometrii narzędzi w przemysłowym procesie ciągnięcia rurek trudno-odkształcalnych na korku swobodnym, umożliwi poprawę efektywności procesu wytwarzania ultracienkich rurek ze stopu CuBe₂, przy zachowaniu ich wysokich własności wytrzymałościowych i plastycznych.”

Natomiast celem pracy było określenie wpływu parametrów technologicznych procesu ciągnięcia: rodzaju środka smarnego, geometrii narzędzi, prędkości ciągnięcia, na efektywność procesu ciągnięcia, warunki tarcia, chropowatość powierzchni i właściwości mechaniczne ultracienkich rurek ze stopu CuBe₂.

Doktorant w dążeniu do udowodnienia tezy oraz aby osiągnąć założony cel pracy, zrealizował szeroki zakres badań teoretycznych i eksperymentalnych, które to obejmowały:

- przemysłowe próby ciągnięcia rurek z brązu berylowego CuBe₂;
- badanie reologiczne smarów: badanie termograwimetryczne i badanie lepkości dynamicznej;
- doświadczalny pomiar siły ciągnięcia;
- eksperymentalny pomiar temperatury rurek w procesie ciągnięcia;
- prace badawcze dotyczące określenia ilości smaru na powierzchni rurek po ciągnięciu;
- pomiary chropowatości powierzchni rurek po ciągnięciu;
- pomiary parametrów mechanicznych rurek po ciągnięciu;
- symulacje komputerowe procesu ciągnięcia rurek na korku swobodnym.

Do realizacji założeń pracy oraz weryfikacji tezy przeprowadzono szczegółową analizę wyników badań. W odpowiedni sposób dobrano materiał do badań jakim był stop miedzi CuBe₂. Określono właściwości mechaniczne oraz strukturalne rurek cienkościennych. Prawidłowo opracowano proces ciągnięcia a pobrane do badań próbki umożliwiły przeprowadzenie wieloparametrowej analizy ciągnięcia ultracienkich rurek z brązu berylowego CuBe₂.

Przeprowadzono badania reologiczne smarów. Przedstawiono charakterystykę fizykochemiczną środków smarnych zastosowanych w badaniach nad procesem ciągnięcia ultracienkich rurek. Wykonano ocenę termograwimetryczną smarów, a następnie określono temperatury, dla ubytków masy środka smarnego. Przeprowadzono także badania lepkości dynamicznej, a mianowicie miary oporu cieczy przed płynięciem, jest to stosunek naprężenia ścinającego do prędkości ścinania. W pracy dokonano analizy właściwości mechanicznych, w odniesieniu do zmiany parametrów procesowych: rodzaju smaru, geometrii narzędzi oraz prędkości ciągnięcia. Rozpatrywano wpływ tych zmiennych, na jakość powierzchni ultracienkich rurek, a mianowicie chropowatość powierzchni i parametrów mechanicznych. Wyniki badań

materiałowych obejmowały pomiary twardości, wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności oraz wydłużenia. Na zakończenie pracy wyznaczono poprzez modelowanie numeryczne istotne charakterystyki procesu ciągnięcia rurek ze stopu CuBe2. Parametry modelu zostały zweryfikowane na podstawie przemysłowych prób ciągnięcia, co pozwoliło stwierdzić, że symulacje procesu ciągnięcia są możliwe do wykorzystania przy opracowywaniu nowych technologii wytwarzania rurek ze stopów miedzi.

W pracy doktorskiej zamieszczono próbę wypełnienia braku w obecnym stanie wiedzy, w zakresie ustalania warunków symulacji komputerowych, pozwalających wykorzystywać różnorodne środki smarne w połączeniu z analizą wpływu geometrii narzędzi oraz parametrów procesu na ciągnięcie rurek ze stopu CuBe2 na korku swobodnym. Na podstawie przesłanek literaturowych i wyników wstępnych badań własnych Autor przyjął, że istnieją takie parametry procesu ciągnięcia ultracienkich rurek ze stopu brązu berylowego, dla których możliwe będzie wykonanie symulacji komputerowych, przy równoczesnym porównaniu z przemysłowymi próbami ciągnięcia.

Główną częścią pracy własnej Doktoranta było modelowanie procesu ciągnięcia rurek na korku swobodnym. Symulacje komputerowe procesu ciągnięcia na korku swobodnym rurek z brązu CuBe2 przeprowadzono w oparciu o program Simufact 2023.2. Zastosowany komputerowy program komercyjny do rozwiązania problemu obliczeniowego oparty jest na metodzie elementów skończonych. Zdefiniowano warunki brzegowe do których należy zaliczyć parametry narzędzi oraz właściwości fizyko-chemiczne odkształcanego materiału: naprężenie uplastyczniające, gęstość, ciepło właściwe, temperaturę, pojemność cieplną, współczynniki wymiany ciepła, tarcie. Modelowanie numeryczne umożliwiło: określenie wpływu technologii ciągnięcia rurek na naprężenia wzdłużne, siłę i naprężenia ciągnięcia, określenie wpływu technologii ciągnięcia rurek na nacisk całkowity, określenie wpływu technologii ciągnięcia rurek na położenie korka w ciągadle, określenie wpływu technologii ciągnięcia rurek na odkształcenia plastyczne, określenie wpływu technologii ciągnięcia rurek na rozkład temperatury. Bardzo istotnym aspektem pracy było przeprowadzenie badań doświadczalnych. Na podstawie których, stwierdzono, że reologia smarów, geometria narzędzi i prędkość ciągnięcia, wpływają w sposób decydujący na parametry procesu ciągnięcia na korku swobodnym cienkościennych rurek precyzyjnych ze stopu CuBe2.

W pracy określono istotny wpływ parametrów procesowych na właściwości mechaniczne ultracienkich rurek ze stopu CuBe₂. Proces ciągnięcia rurek ma wpływ nie tylko na stan naprężenia, a także na stan odkształcenia. Po przeprowadzonych symulacjach komputerowych, stwierdzono, że w ustabilizowanym procesie ciągnięcia, następuje pogrubienie ścianki rurki w stożku zgniatającym pomiędzy ciągnadłem i korkiem, a stopień tego pogrubienia zależy głównie od warunków tarcia. Nie zauważono natomiast zmiany grubości ścianki rurki w zależności od prędkości ciągnięcia i geometrii korka w badanym zakresie tolerancji.

Autor we wnioskach wskazuje, że udowodniono w pracy tezę naukową i wykazano, że analiza numeryczna i odpowiedni dobór środków smarnych a także geometrii narzędzi, w przemysłowym procesie ciągnięcia na korku swobodnym rurek ze stopu CuBe₂, umożliwia wzrost efektywności procesu wytwarzania tychże wyrobów, przy zachowaniu odpowiednich właściwości mechanicznych.

Rozprawa doktorska jest prawidłowo zredagowana, posiada odpowiednią strukturę, jest napisana spójnie i właściwie. Doktorant prawidłowo napisał pracę ze względu na język techniczny, a także zgodnie z zasadami dotyczącymi opracowywania dysertacji naukowych.

Tytuł rozprawy doktorskiej jest w sposób przemyślany sformułowany i skrupulatnie odzwierciedla jej zawartość. Rozprawa doktorska jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego, wnosi teoretyczną, analityczną i doświadczalną oraz badawczą wartość dodaną do zagadnień związanych z Dziedziną Nauk Inżynierjno-Technicznych w Dyscyplinie Naukowej *Inżynieria Materiałowa*.

2. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Mateusza Wasilewskiego pod tytułem „Analiza teoretyczno-doświadczalna procesu ciągnięcia na korku swobodnym precyzyjnych rurek cienkościennych ze stopu CuBe₂” napisana jest w sposób właściwy, a zarazem prawidłowy tak jak zostało to opisane w charakterystyce ogólnej i wpisuje się w dyscyplinę *Inżynieria Materiałowa*.

Niemniej jednak podczas wnikliwej lektury recenzowanej rozprawy odnotowałem uwagi krytyczne oraz zapytania o charakterze dyskusyjnym. Nie są one umniejszeniem wartości rozprawy, natomiast z pewnością pomogą Doktorantowi w sposób korzystniejszy wykorzystać wyniki badań i w odpowiedni sposób zamieścić je w przyszłych publikacjach.

Zatem mam prośbę do Doktoranta o wyjaśnienie pewnych kwestii.

- Autor pracy zamieścił streszczenie tylko w języku polskim, brak jest tego streszczenia w języku angielskim.
- Wykaz ważniejszych oznaczeń zawiera osiemnaście symboli, a w pracy znajduje się ich znacznie więcej. Szczególnie brakuje najważniejszych oznaczeń dotyczących określenia średnicy rurek cienkościennych przed i po procesie ciągnięcia. Powinno się w tym miejscu zamieszczać symbole, które przyczynią się do lepszego odczytania i zrozumienia rozprawy.
- Doktorant przedstawił bardzo obszerny przegląd literaturowy, możliwe że aż nadmiernie zagłębiający się w opisy znanej technologii ciągnięcia z ogólnodostępnej literatury. W którym to opisał charakterystykę wyrobów metalowych ze stopów miedzi, podstawowe zagadnienia z zakresu ciągnięcia rurek, tarcie i smarowanie w procesie ciągnięcia, technologie wytwarzania rurek cienkościennych metodą ciągnięcia. Kwintesencją tego rozdziału była sentencja, a mianowicie stwierdzenie, że proces wytwarzania ultracienkich rurek ze stopów miedzi do przemysłu mechanicznego jest złożoną technologią, której poszczególne operacje technologiczne odgrywają rolę w kształtowaniu właściwości rurek i wykonywanych z nich produktów finalnych, typu sprężyny Bourdon'a, które następnie wchodzi w skład manometrów. Proszę wyjaśnić czy sprężyny kształtowane są bezpośrednio poprzez proces ciągnięcia?
- W pracy Autor powołuje się na działalność Firmy WIKA Polska SGF, jednak nie jest jasne co analiza teoretyczno-doświadczalna procesu ciągnięcia na korku swobodnym precyzyjnych rurek cienkościennych ze stopu CuBe2 spowoduje w rozwoju produkcji czy asortymentu zakładu, a co jest kwestią naukową w rozważanej pracy. Doktorant opisuje w pracy, że w firmie WIKA Polska SGF występuje zastosowanie stopów miedzi takich jak brąz cynowy (CuSn8), mosiądz (CuZn37), brąz berylowy (CuBe2), które znajduje w komponentach potrzebnych do wytwarzania manometrów. Specjalnym zastosowaniem podanych stopów miedzi jest sprężyna Bourdon'a, wytwarzana z ultracienkich rurek. Wyroby te otrzymuje się poprzez obróbkę plastyczną a dokładnie w wyniku ciągnięcia na korku swobodnym.
- Na rysunku 1 przedstawiono oddziaływanie ciśnienia na rurkę Bourdon'a, które to oparte jest o elastyczną sprężynę oraz zgiętą rurkę w kształcie litery C o przekroju owalnym.

Cisnienie jest doprowadzane do wewnętrznej powierzchni rurki Bourdon'a, a jej przekrój staje się bardziej okrągły. Naprężenia powstałe w wyniku tego procesu powodują zwiększenie promienia kształtu litery C. Widoczne jest na rysunku, że stosowana rurka ma kształt przekroju owalny. Natomiast Autor pracy zaznacza, że materiałem wsadowym dla analizowanego w pracy procesu ciągnięcia jest to rurka w stanie wyżarzonym o wymiarach 2,86 mm x 0,215 mm ($d \times t$, gdzie: d – średnica, t – grubość ścianki), ze stopu CuBe2. A następnie przeprowadzono ciągnięcie rurki z wykorzystaniem ciągarce bębnowej jednostopniowej na średnicę 2,305 mm oraz grubość ścianki 0,196 mm. Oznacza to, że badana rurka w analizie teoretycznej i w pracach doświadczalnych ma przekrój okrągły. Zatem proszę wyjaśnić, czy badane były wyroby o przekroju owalnym czy okrągłym. W jaki sposób są wytwarzane rurki o przekroju owalnym?

- Na rysunkach 57 - 59 przedstawiono układ pomiarowy siły ciągnięcia i temperatury podczas ciągnięcia i jego schemat poglądowy. Brak jest schematu szczegółowego systemu pomiaru siły ciągnięcia, a także nie przedstawiono widoku układu pomiarowego stosowanego w warunkach przemysłowych zamieszczonego na ciągarce, byłoby to wartością dodaną do oceny pracy własnej Doktoranta.
- W pracy dokonano również analizę chropowatości powierzchni. Przy ocenie jakości powierzchni zastosowano się do normy ISO 4287 wykonując szereg pomiarów parametrów chropowatości. Na rysunkach 81 i 82 przedstawiono niefiltrowane profile chropowatości powierzchni. Warto nadmienić, że chropowatość powierzchni odnosi się do małych odstępów oraz małych szczytów i dolin obrabianej powierzchni. Odległość między dwoma grzbietami lub dwoma dolinami jest bardzo mała, co jest mikroskopijnym błędem kształtu geometrycznego. Chropowatość powierzchni jest ogólnie kształtowana przez zastosowaną metodę obróbki, a także inne czynniki, takie jak tarcie między narzędziem a powierzchnią części podczas obróbki, odkształcenie plastyczne metalu warstwy powierzchniowej w systemie procesowym. Ze względu na różnice w metodach obróbki i materiałach przedmiotu obrabianego głębokość, gęstość, kształt i tekstura śladów pozostawionych na obrabianej powierzchni są różne. Jedną z podstawowej oceny chropowatości powierzchni jest jednostkowa długość każdego parametru, długość próbkowania to długość linii odniesienia do oceny chropowatości powierzchni. Zasadniczo jako długość odniesienia zgodnie z normą ISO 1997 należy stosować 0,08 mm, 0,25 mm, 0,8 mm, 2,5 mm, 8 mm.

Jaka długość próbkowania została zastosowana w celu wyznaczenia wyników pomiarów chropowatości zależnych od geometrii narzędzia (korka) czy dla różnych prędkości po procesie ciągnięcia?

- Parametry chropowatości zgodnie z normą powinny być podawane w jednostkach „ μm ” a nie tak jak to podano w pracy w „ nm ”. Tak zamieszczone dane wpływają na niższą czytelność uzyskanych wyników w celu porównania do jakości technologicznej uzyskanej po przeprowadzeniu innych procesów obróbki gładkościowej, przykładowo po polerowaniu czy nagniataniu.
- Dane opisujące krzywe płynięcia analizowanego materiału badawczego z brązu zgodnie z opisem Autora wprowadzono do stosowanego w pracy programu komputerowego w postaci Tabeli 30 zamieszczonej na stronie 136, w której wartości naprężenia uplastyczniającego, zależne są od wartości odkształcenia rzeczywistego. Jednak podana tabela jest nieczytelna, a jeszcze podzielona w połowie bez opisu. Proszę wyjaśnić zamieszczone dane w Tabeli 30.
- W rozdziale „9.2. Opracowanie granicznych wartości kryterium pęknięcia dla badanego materiału” Autor opisuje metodę porównawczą do wyznaczania granicznych wartości znormalizowanego kryterium pęknięcia Cokrofta – Lathama. Polegała ona na badaniach doświadczalnych i analizie numerycznej wykonanych dla próbek wiosełkowych o zróżnicowanych przewężeniach w strefie karbu. Do badań numerycznych wykorzystano program komputerowy oparty na metodzie elementów skończonych. Jednak nie określono jaki to program, czy komercyjny, czy własny, nie określono warunków brzegowych symulacji komputerowych, czy są one takie same jak w przypadku modelowania numerycznego procesu ciągnięcia?
- W pracy brakuje wyraźnego przedstawienia porównania rozkładu zużycia narzędzi, rozkładu naprężenia zastępczego i rozkładu odkształcenia zastępczego dla różnych kątów ciągnięcia. Zamieszczenie tego typu porównania danych w formie trójwymiarowej grafiki po procesie symulacji komputerowych byłoby wartością dodaną do recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Zaprezentowane uwagi szczegółowe są bardziej o charakterze dyskusyjnym, mają być pomocne w opracowywaniu dalszych publikacjach naukowych i nie wpływają na pozytywną wartość merytoryczną rozprawy doktorskiej.

3. Wniosek końcowy

Po przeanalizowaniu przedstawionej do recenzji rozprawy stwierdzam, że Doktorant wykazał się opanowaniem warsztatu badawczego i samodzielnością prowadzenia analizy procesu ciągnięcia na korku swobodnym rurek ze stopu CuBe₂, która to umożliwia wzrost efektywności procesu ich wytwarzania, przy zachowaniu odpowiednich właściwości mechanicznych. Wykonał połączoną analizę badań przemysłowych i numerycznych w zakresie parametrów energetyczno – siłowych, która to wykazała, że w procesie ciągnięcia rurek w ciągadłach konwencjonalnych na korku swobodnym, współczynnik tarcia dla stabilnego procesu ciągnięcia mieści się w zakresie od 0,04 do 0,07. Zwiększenie współczynnika tarcia powyżej 0,07, powoduje przyrost siły ciągnięcia i wyężenia materiału, co skutkuje destabilizacją procesu ciągnięcia i zerwaniem rurki. Autor wykazał, że stabilność procesu ciągnięcia, zależy od warunków smarowania (reologii smarów i adhezji środka smarnego do powierzchni ciągnionego materiału), tarcia, geometrii narzędzi oraz prędkości ciągnięcia. Niewątpliwą istotą pracy było opracowanie technologii ciągnięcia, która umożliwia sterowanie właściwościami mechanicznymi, dedykowanymi pod określoną specyfikację produktu.

Podsumowując wyrażam opinię, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Mateusza Wasilewskiego pod tytułem „Analiza teoretyczno-doświadczalna procesu ciągnięcia na korku swobodnym precyzyjnych rurek cienkościennych ze stopu CuBe₂” spełnia warunki określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r., stosownie do postanowień Ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, i na tej podstawie rekomenduję Radzie Dyscypliny Naukowej *Inżynieria Materiałowa* Politechniki Częstochowskiej przyjęcie rozprawy i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



dr hab. inż. Tomasz Dyl,

prof. UMG