

Dr hab. inż. Marek Hawryluk, prof. Politechniki Wrocławskiej

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

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

1. Ocena istotności problemu naukowego

Współczesny rozwój technologii wytwarzania, szczególnie w obszarze precyzyjnych elementów aparatury pomiarowej, powoduje rosnące zapotrzebowanie na materiały i półwyroby o bardzo wysokiej dokładności wymiarowej oraz ściśle kontrolowanych własnościach mechanicznych. Jednym z takich elementów są ultracienkie rurki ze stopów metali nieżelaznych stosowane do wytwarzania sprężyn Bourdon'a, stanowiących podstawowy element mechanicznych przyrządów do pomiaru ciśnienia. W skali przemysłowej produkcja tego typu komponentów jest realizowana m.in. przez firmę WIKA Polska SGF – światowego lidera w zakresie technologii pomiarowych, wytwarzającego rocznie kilkadziesiąt milionów przyrządów pomiarowych. W związku z rozwojem oferty produktowej oraz rosnącymi wymaganiami jakościowymi i funkcjonalnymi kluczowych elementów aparatury pomiarowej, istotnego znaczenia nabiera rozwój technologii wytwarzania ultracienkich rurek o średnicach poniżej 3 mm i grubości ścianki poniżej 0,2 mm.

W praktyce przemysłowej procesy ciągnięcia rurek z powszechnie stosowanych materiałów, takich jak brąz CuSn8 czy mosiądz CuZn37, są stosunkowo dobrze rozpoznane technologicznie. Znacznie większe trudności pojawiają się jednak w przypadku stopów o bardziej wymagających właściwościach mechanicznych, takich jak brąz berylowy CuBe₂. W szczególności przy bardzo małych średnicach rurek bezpośrednie wykorzystanie dotychczasowej wiedzy technologicznej okazuje się niewystarczające, a dobór parametrów procesu często opiera się na kosztownej i mało efektywnej metodzie „prób i błędów”. Problem ten obejmuje m.in. właściwy dobór warunków smarowania, geometrii narzędzi oraz prędkości ciągnięcia, które w istotny sposób determinują stabilność procesu, warunki tarcia oraz końcowe własności mechaniczne wyrobu.

W tym kontekście szczególnego znaczenia nabiera rozwój metod projektowania procesów technologicznych z wykorzystaniem modelowania numerycznego, umożliwiającego analizę zjawisk zachodzących w strefie odkształcenia bez konieczności prowadzenia licznych i kosztownych prób przemysłowych. Zastosowanie symulacji komputerowych w połączeniu z badaniami eksperymentalnymi pozwala na identyfikację optymalnych parametrów procesu oraz ograniczenie ryzyka technologicznego związanego z wdrażaniem nowych rozwiązań produkcyjnych.

W tym aspekcie podjęcie w rozprawie doktorskiej problematyki dotyczącej identyfikacji warunków technologicznych procesu ciągnięcia ultracienkich rurek ze stopu CuBe₂ na korku swobodnym, z uwzględnieniem wpływu właściwości reologicznych środków smarnych, geometrii narzędzi oraz prędkości ciągnięcia, należy uznać za w pełni uzasadnione zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Przedstawione w pracy podejście badawcze, obejmujące integrację badań eksperymentalnych z modelowaniem numerycznym procesu ciągnięcia, umożliwi identyfikację kluczowych parametrów technologicznych determinujących stabilność procesu oraz jakość wytwarzanych rurek.

Dlatego zagadnienia przedstawione w recenzowanej rozprawie doktorskiej, w której Autor podejmuje próbę opracowania metodyki doboru parametrów procesu ciągnięcia ultracienkich rurek ze stopu CuBe₂ z wykorzystaniem badań eksperymentalnych oraz symulacji komputerowych, należy uznać za aktualne i istotne z punktu widzenia rozwoju wiedzy w zakresie technologii przeróbki plastycznej metali, a podjętą tematykę za w pełni uzasadnioną zarówno naukowo, jak i aplikacyjnie.

2. Merytoryczna ocena pracy

Recenzowana praca doktorska pana mgr inż. **Mateusza Wasilewskiego** została napisana w języku polskim w klasycznej formie rozprawy doktorskiej. Praca obejmuje łącznie ok. 180 stron i składa się ze streszczenia, wykazu ważniejszych oznaczeń, dziewięciu rozdziałów merytorycznych, a także podsumowania, wniosków końcowych oraz spisu literatury. Studium literaturowe (obejmujące ponad 140 pozycji – głównie w języku angielskim, w tym aktualne artykuły naukowe z lat 2020–2025,

uzupełnione literaturą polską i klasycznymi monografiami) zostało przeprowadzone rzetelnie i z krytycznym podejściem do omawianych zagadnień, w tym zagadnień dotyczących podstaw teoretyczno-doświadczalnych procesu ciągnięcia i technologii smarowania. W opinii recenzenta wybrane pozycje literaturowe są adekwatne do tematyki rozprawy, przy czym w zestawieniu literatury nie występują źródła autorstwa samego Doktoranta, Mateusza Wasilewskiego. Układ pracy jest przejrzysty i logiczny, a jej struktura odpowiada standardom stosowanym w rozprawach doktorskich z zakresu inżynierii materiałowej oraz technologii przeróbki plastycznej metali. W pierwszej części Doktorant dokonał przeglądu i analizy stanu zagadnienia, który podsumował i opisał tezę, cel i zakres badawczy. W dalszej części pracy Autor przeprowadził bardzo obszerne badania, analizując proces ciągnięcia w wielu różnych konfiguracjach, obejmujących m.in. wpływ rodzaju smaru, geometrii korka oraz prędkości ciągnięcia na przebieg procesu technologicznego. Wyniki tych licznych eksperymentów zostały następnie powiązane z oceną chropowatości powierzchni otrzymanych rurek oraz ich własności mechanicznych, co zasługuje na szczególne uznanie. Ostatnia część pracy poświęcona została matematycznemu modelowaniu procesu ciągnięcia rurek na korku swobodnym, w tym opracowaniu modelu sprężysto-plastycznego stopu CuBe₂, wyznaczeniu kryterium pęknięcia oraz analizie wyników symulacji komputerowych procesu.

Praca ma wyraźnie interdyscyplinarny charakter, gdyż obejmuje zagadnienia z zakresu technologii wytwarzania cienkościennych wyrobów metalowych metodą ciągnięcia, tribologii procesów przeróbki plastycznej, charakterystyki materiałowej stopów miedzi, a także modelowania numerycznego procesów technologicznych. Szczególne miejsce zajmują w niej zagadnienia dotyczące technologii ciągnięcia ultracienkich rurek ze stopu brązu berylowego CuBe₂ na korku swobodnym, z uwzględnieniem wpływu warunków smarowania, geometrii narzędzi oraz prędkości ciągnięcia na przebieg procesu, jakość powierzchni oraz własności mechaniczne otrzymanych wyrobów. Zostało to dodatkowo wzmocnione od strony naukowej modelowaniem numerycznym procesu ciągnięcia, co znacząco podnosi walory naukowe dysertacji, czyniąc ją wartością zarówno w aspekcie merytorycznym, jak i aplikacyjnym.

3. Szczegółowa charakterystyka rozprawy doktorskiej Mateusza Wasilewskiego

W opinii recenzenta struktura pracy jest logiczna i spójna, a przyjęta metodyka badawcza umożliwia kompleksową analizę badanego procesu technologicznego w oparciu o które, sformułowano podsumowanie i opracowano wnioski końcowe. Poszczególne, szczegółowe kwestie natury dyskusyjnej i krytycznej oraz uwagi z pytaniami zostały zawarte na końcu podsumowania każdego z rozdziałów (podrozdziałów) pracy doktorskiej.

Po części wprowadzającej, obejmującej: spis treści; streszczenie, listę symboli i skrótów, terminologii używanej w procesach ciągnięcia Doktorant w **rozdziale pierwszym** dokonał wprowadzenia do tematyki pracy, w którym przedstawiono przesłanki podjęcia badań oraz ich znaczenie z punktu widzenia praktyki przemysłowej.

U1. Doktorant trochę nad wyraz stosuje terminologię modelowania matematycznego, podczas gdy wykorzystuje modelowanie numeryczne przy użyciu programu Simufact.

W rozdziale drugim (43 strony) zaprezentowano przegląd literatury obejmujący charakterystykę wyrobów metalowych ze stopów miedzi (rozdział 2.1), podstawowe zagadnienia związane z procesem ciągnięcia rurek (rozdział 2.2), a także problemy tarcia i smarowania w procesach przeróbki plastycznej (rozdział 2.3) oraz technologii wytwarzania cienkościennych rurek metodą ciągnięcia (rozdział 2.4). Podrozdział 2.1. w sposób syntetyczny i logiczny charakteryzuje miedź oraz wybrane grupy jej stopów (mosiądze i brązy), ze szczególnym uwzględnieniem ich składu chemicznego, właściwości mechanicznych, odporności korozyjnej oraz obszarów zastosowań. Przegląd ten prowadzi konsekwentnie do brązu berylowego, który został wskazany jako materiał badawczy w dalszej części rozprawy, co zapewnia spójność merytoryczną między wprowadzeniem a częścią eksperymentalną dysertacji.

Podrozdział 2.2. przedstawia podstawowe zagadnienia związane z procesem ciągnięcia rurek, w tym mechanizm odkształcenia plastycznego, charakterystyczny stan naprężenia oraz wpływ kluczowych parametrów technologicznych, takich jak geometria narzędzi, warunki tarcia czy rodzaj smarowania, na przebieg procesu. Omówiono również główne metody ciągnięcia rurek – w szczególności ciągnięcie swobodne oraz z użyciem korków (cylindrycznego i swobodnego) – wraz z analizą stref odkształcenia, warunków stabilności procesu oraz równowagi sił działających na narzędzia w strefie deformacji.

W tym kontekście Autor trafnie opisuje mechanizm przemieszczania się swobodnego korka w rurce jako funkcję geometrii układu oraz warunków smarowania i prędkości ciągnięcia, które determinują

przebieg tarcia, równomierność grubości ścianki oraz jakość powierzchni. Słusznie wskazano również, że zastosowanie cylindrycznego korka pływającego stabilizuje proces ciągnięcia, ograniczając nierównomierność odkształcenia i koncentracje naprężeń, co sprzyja uzyskaniu przewidywalnych właściwości funkcjonalnych elementu.

Podrozdział 2.4 przedstawia technologię wytwarzania cienkościennych rurek metodą ciągnięcia, obejmującą kolejne etapy procesu – od przygotowania materiału, poprzez operacje ciągnięcia realizowane na różnych typach ciągarok, aż po operacje wykończeniowe, takie jak cięcie, odłuszczenie i wyżarzanie. Zwrócono uwagę na iteracyjny charakter procesu oraz znaczenie poszczególnych operacji technologicznych w kształtowaniu właściwości mechanicznych i jakości powierzchni finalnych wyrobów. Przegląd ten stanowi spójne i logiczne wprowadzenie do dalszej części rozprawy, umożliwiając właściwe osadzenie podjętej problematyki badawczej w aktualnym stanie wiedzy oraz wskazując najważniejsze kierunki dotychczasowych badań w tym obszarze.

U2. Szkoda, że dopiero pod koniec tego podrozdziału wyjaśniono do czego wykorzystywane są ultracienkie rurki ciągnięte. Sprężyna Bourdon'a jest elementem pomiarowym manometru, wykonanym z cienkościennej rurki o zakrzywionym kształcie, która pod wpływem ciśnienia ulega sprężystemu odkształceniu. Zmiana kształtu rurki jest proporcjonalna do wartości ciśnienia i stanowi podstawę mechanicznego pomiaru ciśnienia w tego typu przyrządach.

U3. Znaczna część rysunków w tym podrozdziale jest słaba jakościowo.

Podrozdział 2.3 omówiono wpływ tarcia, parametrów technologicznych oraz właściwości środków smarnych na przebieg procesu ciągnięcia rurek, ze szczególnym uwzględnieniem zmian temperatury w strefie odkształcenia oraz warunków pracy narzędzi. Podkreślono znaczenie odpowiedniego doboru smarowania, które ogranicza siły tarcia, stabilizuje warunki procesu oraz wpływa na trwałość narzędzi i jakość powierzchni wyrobów.

Rozdział trzeci poświęcony został sformułowaniu tezy, celu oraz zakresu pracy. Autor, opierając się na przeprowadzonej analizie literatury przedmiotu, wskazał na wyraźnie zauważalną lukę badawczą dotyczącą procesów ciągnięcia rurek, zwłaszcza ultracienkich rurek wykonywanych ze stopów metali nieżelaznych. Jak wynika z przedstawionego przeglądu literatury, zdecydowana większość dostępnych opracowań naukowych odnosi się do procesu ciągnięcia drutów bądź rurek o stosunkowo dużych średnicach i znacznych grubościach ścianek. Natomiast zagadnienia związane z wytwarzaniem rurek o bardzo małych średnicach – rzędu kilku milimetrów lub mniejszych – oraz o niewielkiej grubości ścianki są w literaturze naukowej podejmowane sporadycznie i mają charakter fragmentaryczny. W szczególności dotyczy to nowych generacji materiałów, takich jak brąz berylowy CuBe_2 , który ze względu na specyficzne właściwości mechaniczne, wysoką wytrzymałość oraz ograniczoną podatność na odkształcenie plastyczne stanowi materiał wymagający szczególnego podejścia technologicznego w procesach przeróbki plastycznej.

Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy Autor sformułował tezę pracy, *zgodnie z którą odpowiednie wykorzystanie narzędzi modelowania numerycznego oraz właściwy dobór parametrów technologicznych procesu – w szczególności rodzaju środków smarnych oraz geometrii narzędzi – w przemysłowym procesie ciągnięcia rurek na korku swobodnym może przyczynić się do zwiększenia efektywności procesu wytwarzania ultracienkich rurek ze stopu CuBe_2 przy jednoczesnym zachowaniu wysokich własności wytrzymałościowych i plastycznych otrzymanych wyrobów.*

Głównym celem pracy było określenie wpływu kluczowych parametrów technologicznych procesu ciągnięcia, takich jak rodzaj środka smarnego, geometria narzędzi oraz prędkość ciągnięcia, na przebieg procesu technologicznego, warunki tarcia w strefie odkształcenia, jakość powierzchni oraz własności mechaniczne ultracienkich rurek wykonanych ze stopu CuBe_2 .

W celu weryfikacji przyjętej tezy oraz realizacji założonego celu pracy Autor zaplanował i przeprowadził szeroki zakres badań o charakterze zarówno teoretycznym, jak i eksperymentalnym. Badania te obejmowały między innymi przemysłowe próby ciągnięcia rurek ze stopu CuBe_2 , a także szczegółową analizę właściwości stosowanych środków smarnych. W tym zakresie wykonano badania reologiczne smarów, w tym analizę termogravimetryczną (TGA) pozwalającą na ocenę ich stabilności termicznej oraz pomiary lepkości dynamicznej umożliwiające określenie zachowania smarów w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków procesu technologicznego.

Istotnym elementem programu badawczego były również eksperymentalne pomiary parametrów procesu, w tym siły ciągnięcia oraz temperatury rurek w trakcie odkształcania. Dodatkowo przeprowadzono analizę ilości środka smarnego pozostającego na powierzchni wyrobów po procesie ciągnięcia, co pozwoliło na lepsze zrozumienie mechanizmów tarcia i smarowania zachodzących w strefie kontaktu narzędzie–materiał. Zakres badań obejmował ponadto ocenę jakości powierzchni

otrzymanych rurek poprzez pomiary parametrów chropowatości oraz szczegółową analizę ich własności mechanicznych. W ramach tych badań określono między innymi twardość materiału, wytrzymałość na rozciąganie, granicę plastyczności oraz wydłużenie całkowite, co umożliwiło kompleksową ocenę wpływu parametrów technologicznych procesu na właściwości użytkowe otrzymanych wyrobów.

U.4. Można zauważyć, że w tezie pracy Autor przypisuje modelowaniu numerycznemu bardzo dużą rolę w optymalizacji procesu ciągnięcia. Należy jednak podkreślić, że metody MES opierają się na licznych uproszczeniach oraz idealizacjach, a przyjmowane w modelach warunki tarcia często różnią się od rzeczywistych warunków przemysłowych. Ponadto poprawność interpretacji wyników symulacji w dużym stopniu zależy od doświadczenia modelarza, dlatego wyniki obliczeń powinny być zawsze weryfikowane eksperymentalnie.

Kolejne rozdziały pracy mają charakter badawczo-analityczny. W rozdziale czwartym Autor szczegółowo scharakteryzował materiał badawczy – stop brązu berylowego CuBe_2 – przedstawiając jego skład chemiczny, właściwości fizyczne oraz zastosowaną obróbkę cieplną. W rozdziale tym zaprezentowano również technologię ciągnięcia zastosowaną w badaniach, obejmującą opis stanowiska badawczego, konfigurację narzędzi oraz podstawowe parametry procesu technologicznego.

U5. Autor podaje standardową technologię obróbki cieplnej, w tabeli 6 czas wyżarzania podano jako 10–60 min, ale w eksperymencie znacząco skraca go do 230 s, nie uzasadniając ani nie wyjaśnia powodów takiej modyfikacji, co budzi wątpliwości w kontekście rzetelności przedstawionej technologii

U6. Z opisu w tekście poniżej wynika, że prawy rysunek to przekrój poprzeczny, jednak nie wiadomo, co oznacza $G=10$ oraz jeżeli to sama rurka (lewy i prawy rysunek) i z legendy powiększenie jest 50 mikro, to coś jest nie tak, bo rysunek po prawej powinien mieć większe powiększenie na legendzie.

U7. Nie rozumiałe jest w jakim celu podano poniższe zdanie na końcu rozdziału 4.1: „Do ciągnięcia zastosowano ciągnadło o stałej geometrii $2\alpha = 30^\circ$, natomiast wartości kątów 2β zmieniano w zakresie: $23,8 - 29,4^\circ$ ”

U8. Opis w tekście pod rys. 42 nie jest zrozumiały, bowiem, wykres pokazuje na osi X różnicę kątów $\alpha - \beta$ w zakresie 0 do 3.5, podczas gdy w opisie są informacje o kątach 2β wynoszących 24 i 26 Stopni.

U9. W tekście w wielu miejscach, również w tym rozdziale kilka razy pojawia się sformułowanie „efektywność procesu ciągnięcia”, lecz nie do końca wiadomo, co to oznacza dla autora.

Rozdział piąty poświęcono badaniom właściwości reologicznych stosowanych środków smarnych. Autor przedstawił w nim charakterystykę analizowanych smarów oraz wyniki analiz termogravimetrycznych, umożliwiających ocenę ich stabilności w podwyższonych temperaturach. Uzupełnieniem tych badań były pomiary lepkości dynamicznej, pozwalające określić właściwości płynięcia smarów oraz ich zachowanie w warunkach odpowiadających rzeczywistym warunkom pracy w procesie ciągnięcia. Jednak rozdział pozostaje w dużej mierze opisowy i nie wskazuje jednoznacznie, jak wyniki badań wpływają na decyzje procesowe. Brakuje też odniesienia do ograniczeń wynikających z różnic pomiędzy warunkami laboratoryjnymi a rzeczywistym procesem przemysłowym.

W podrozdziale 5.1. Własności badanych środków smarnych opisano charakterystykę fizykochemiczną bardzo obszernie, lecz Autor nie wiąże tych danych z rzeczywistymi efektami w procesie ciągnięcia ultracienkich rurek. Dobrym uzupełnieniem byłoby przeanalizowanie, które właściwości decydują o skuteczności smarowania w warunkach wysokiego nacisku i temperatury.

Podrozdział 5.2. Ocena termogravimetryczna (TGA) środków smarnych opisano obszernie, lecz brak odniesienia do przemysłowych warunków pracy, np. czy wykryte substancje lotne mogłyby wpływać na tarcie lub stabilność filmu smarnego w czasie ciągnięcia. Autor powinien wskazać konsekwencje praktyczne wynikające z analizy TG/DTG.

W podrozdziale 5.3. Badanie lepkości dynamicznej smarów przedstawiono rzetelnie pomiar lepkości dynamicznej, lecz analiza ogranicza się do charakterystyki newtonowskiej, bez krytycznej oceny zachowania smaru przy zmiennych obciążeniach i temperaturach w rzeczywistym procesie.

U9. Brakuje dyskusji, które smary mogą faktycznie utrzymać stabilny film smarny przy wysokich prędkościach i w intensywnych strefach tarcia.

W rozdziale szóstym przeprowadzono szczegółową analizę parametrów procesu ciągnięcia. W pierwszej kolejności przedstawiono metodykę pomiaru podstawowych wielkości procesowych, takich jak siła ciągnięcia czy temperatura materiału w trakcie procesu. Następnie dokonano analizy wpływu poszczególnych parametrów technologicznych – rodzaju środka smarnego, geometrii korka oraz prędkości ciągnięcia – na przebieg procesu technologicznego oraz warunki jego realizacji.

W podrozdziale 6.2. Analiza wpływu rodzaju smaru na proces ciągnięcia przedstawiono analizę wpływu różnych środków smarnych na przebieg procesu ciągnięcia, w tym na wartość siły ciągnięcia, temperaturę procesu oraz maksymalną osiąganą prędkość ciągnięcia. Wyniki zestawiono w tabeli zawierającej wartości siły ciągnięcia, temperatury oraz prędkości procesu dla poszczególnych wariantów smarowania.

U10: Dlaczego analiza właściwości smarnych została przeprowadzona przy bardzo małej prędkości ciągnięcia (1 m/min), podczas gdy w dalszej części pracy analizowane są warunki procesu przy znacznie większych prędkościach, a Autor nie uzasadnia ani nie wyjaśnia przyczyn tak wyraźnego skrócenia czasu trwania procesu?

W podrozdziale 6.3. Analiza wpływu geometrii korka na proces ciągnięcia Autor analizuje wpływ kąta korka na parametry procesu ciągnięcia, wskazując zakres geometrii zapewniający najkorzystniejsze warunki procesu oraz minimalne wartości siły ciągnięcia. Wyniki przedstawiono w tabeli zawierającej wartości siły ciągnięcia oraz temperatury procesu dla analizowanych wariantów geometrycznych.

U11: Dlaczego analiza wpływu geometrii korka została przeprowadzona przy prędkości ciągnięcia 6 m/min, podczas gdy w poprzednim podrozdziale dotyczącym właściwości smarów zastosowano prędkość 1 m/min, a Autor nie wyjaśnia przyczyn tak istotnej zmiany warunków procesu?

W podrozdziale 6.4. Analiza wpływu prędkości ciągnięcia na proces ciągnięcia Autor analizuje wpływ prędkości ciągnięcia na siłę procesu, temperaturę oraz warunki smarowania, wskazując na optymalny zakres prędkości procesu wynoszący około 10 m/min. Wyniki przedstawiono w tabeli zawierającej wartości siły ciągnięcia i temperatury dla różnych prędkości ciągnięcia.

U12: Czy wnioski dotyczące efektywności zastosowanych środków smarnych, sformułowane na podstawie badań prowadzonych przy prędkości 1 m/min, mogą być bezpośrednio odnoszone do warunków procesu analizowanych w tym podrozdziale, gdzie rozpatrywane są wielokrotnie większe prędkości ciągnięcia?

Rozdział siódmy dotyczy analizy chropowatości powierzchni otrzymanych rurek. Autor zaprezentował w nim metodykę pomiarów oraz wyniki badań pozwalające określić wpływ parametrów technologicznych procesu na jakość powierzchni wyrobów. Szczególną uwagę poświęcono zależności pomiędzy prędkością ciągnięcia a wartościami parametrów chropowatości powierzchni.

Ciekawą i nieco nieintuicyjną obserwacją jest fakt, że powierzchnia wewnętrzna rurek (od strony korka) charakteryzuje się mniejszą chropowatością niż powierzchnia zewnętrzna, mimo że od strony ciągadła dostarczany był większy strumień środka smarnego. Autor wiąże to z odmiennymi warunkami smarowania oraz możliwością występowania efektu pseudohydrodynamicznego na powierzchni zewnętrznej, co stanowi interesujący wniosek z punktu widzenia tribologii procesu ciągnięcia.

U13. W rozdziale przedstawiono bardzo dużą liczbę parametrów chropowatości (R_p , R_v , R_z , R_t , R_a , R_q), jednak w analizie i dyskusji wyniki wnioski formułowane są w dużej mierze w sposób zbiorczy. Warto byłoby wskazać, które z analizowanych parametrów mają kluczowe znaczenie dla oceny jakości powierzchni w kontekście dalszego użytkowania rurek.

U14. Autor wskazuje możliwe mechanizmy wyjaśniające mniejszą chropowatość powierzchni wewnętrznej (zmiana lepkości smaru, ograniczona wymiana środka smarnego, mała szczelina między korkiem a rurką), jednak przedstawione wyjaśnienie ma charakter głównie jakościowy. Brakuje próby jego ilościowego potwierdzenia lub odniesienia do wyników badań literaturowych dotyczących warunków smarowania w procesie ciągnięcia na korku swobodnym.

W kolejnym, ósmym rozdziale pracy przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych otrzymanych rurek cienkościennych. Obejmowały one zarówno opis zastosowanej metodologii pomiarowej, jak i analizę wpływu poszczególnych parametrów procesu – rodzaju środka smarnego, geometrii narzędzi oraz prędkości ciągnięcia – na właściwości mechaniczne wyrobów.

W podrozdziale 8.1. Metodologia pomiarów Autor przedstawia metodykę badań własności mechanicznych rurek, obejmującą statyczną próbę rozciągania zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1 oraz pomiar mikrotwardości metodą Vickersa. Opis przygotowania próbek i aparatury badawczej jest szczegółowy i pozwala na odtworzenie procedury eksperymentalnej.

W podrozdziale 8.2. Analiza wpływu rodzaju smaru na własności mechaniczne rurek przedstawiono wpływ różnych środków smarnych na własności wytrzymałościowe i plastyczne rurek ze stopu CuBe₂, wykazując wyraźne różnice pomiędzy smarami olejowymi i polimerowymi. Wyniki

wskazują, że zastosowanie oleju Masterdraw zapewnia najbardziej korzystny kompromis pomiędzy wytrzymałością a zdolnością do prowadzenia procesu przy wyższych prędkościach ciągnięcia.

W podrozdziale 8.3. Analiza wpływu geometrii korka na własności mechaniczne rurek Autor analizuje wpływ geometrii korka na własności mechaniczne rurek, wskazując na istnienie optymalnej wartości różnicy kątów $\alpha - \beta \approx 2,5^\circ$, dla której obserwuje się najniższe własności wytrzymałościowe oraz największą plastyczność materiału. Uzyskane wyniki są powiązane z warunkami smarowania w strefie odkształcenia i zostały odniesione do koncepcji funkcji U wykorzystywanej w projektowaniu narzędzi. W podrozdziale 8.4. Analiza wpływu prędkości ciągnięcia na własności mechaniczne rurek przedstawiono wpływ prędkości ciągnięcia na parametry wytrzymałościowe i plastyczne rurek, wykazując niewielki wzrost $R_{p0,2}$, R_m i twardości wraz ze wzrostem prędkości oraz wyraźny spadek wydłużenia całkowitego. Autor interpretuje te zmiany w kontekście wzrostu oporu odkształcenia, nagrzewania strefy odkształcenia oraz zmian warunków smarowania.

U15. Czy przedstawione różnice w wartościach własności mechanicznych (szczególnie dla geometrii korka i prędkości ciągnięcia) są statystycznie istotne, biorąc pod uwagę stosunkowo niewielkie zmiany wartości $R_{p0,2}$, R_m oraz twardości?

U16. W jaki sposób można jednoznacznie oddzielić wpływ poszczególnych czynników procesu (smarka, geometrii narzędzia i prędkości ciągnięcia) na własności mechaniczne rurek, skoro wszystkie te parametry jednocześnie wpływają na warunki tarcia, temperaturę oraz stopień umocnienia materiału w procesie ciągnięcia?

Ostatni, **dziwiaszty rozdział pracy** poświęcony został matematycznemu modelowaniu procesu ciągnięcia rurek na korku swobodnym. Autor opracował model sprężysto-plastyczny badanego stopu $CuBe_2$ oraz wyznaczył graniczne wartości kryterium pęknięcia materiału. Na tej podstawie przeprowadzono symulacje komputerowe procesu ciągnięcia, których wyniki poddano szczegółowej analizie oraz porównaniu z rezultatami badań eksperymentalnych.

W podrozdziale 9.1. Opracowanie modelu sprężysto-plastycznego stopu brązu berylowego $CuBe_2$ Autor przedstawia procedurę wyznaczenia właściwości mechanicznych stopu $CuBe_2$ na podstawie statycznych prób rozciągania oraz badań plastometrycznych. Na podstawie uzyskanych wyników opracowano model materiałowy opisany równaniem Hensela-Spittela, a także przygotowano tabelaryczne dane krzywych płynięcia wykorzystywane następnie w symulacjach numerycznych procesu ciągnięcia.

W podrozdziale 9.2. Opracowanie granicznych wartości kryterium pęknięcia dla badanego materiału przedstawiono metodę wyznaczenia granicznej wartości kryterium pęknięcia Cockrofta-Lathama dla badanego materiału. Wartość krytyczną określono poprzez porównanie wyników badań eksperymentalnych próbek z karbem z wynikami symulacji numerycznych procesu ich rozciągania.

W podrozdziale 9.3. Warunki brzegowe przyjęte do procesu ciągnięcia Autor opisuje model numeryczny procesu ciągnięcia rurek opracowany w środowisku programu Simufact z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Zdefiniowano właściwości materiałowe, geometrię narzędzi, parametry procesu, współczynniki tarcia oraz warunki cieplne przyjęte w symulacjach.

W podrozdziale 9.4. Analiza wyników symulacji komputerowych procesu ciągnięcia rurek przedstawiono wyniki symulacji numerycznych dotyczących wpływu wybranych parametrów technologicznych, takich jak współczynnik tarcia, prędkość ciągnięcia oraz geometria korka, na przebieg procesu ciągnięcia rurek. Analizowano m.in. siłę ciągnięcia, rozkład naprężeń w materiale, naciski na narzędzia, zmianę grubości ścianki rurek, rozkłady odkształceń oraz temperaturę materiału w trakcie procesu.

U17. W badaniach materiałowych oraz w próbach wyznaczania kryterium pęknięcia zastosowano stosunkowo niewielką liczbę próbek (po trzy próby w danym wariantcie badań). Czy taka liczba próbek jest wystarczająca do wiarygodnego wyznaczenia parametrów modelu materiałowego oraz wartości krytycznej kryterium pęknięcia, które następnie stanowią podstawę dalszych analiz numerycznych?

U18. Model materiałowy wykorzystujący równanie Hensela-Spittela został opracowany na podstawie badań plastometrycznych, jednak w pracy nie przedstawiono szerzej procedury weryfikacji poprawności uzyskanych parametrów modelu. W jaki sposób zweryfikowano, że przyjęty model materiałowy prawidłowo opisuje zachowanie badanego stopu w rzeczywistych warunkach procesu ciągnięcia rurek?

U19. W modelu numerycznym zastosowano określoną liczbę elementów skończonych, jednak w pracy nie przedstawiono analizy zbieżności siatki. Czy przeprowadzono analizę wpływu gęstości siatki elementów skończonych na uzyskiwane wyniki symulacji, tak aby potwierdzić, że wyniki nie są zależne od przyjętej dyskretyzacji modelu?

U20. W pracy przyjęto wartości współczynnika tarcia charakterystyczne dla procesów przemysłowych (około 0,07–0,1), jednak nie wskazano jednoznacznie, na podstawie jakich badań, pomiarów lub źródeł literaturowych wartości te zostały określone. Wymaga wyjaśnienia, czy są to wartości wynikające z badań własnych, danych literaturowych czy też przyjęte jedynie jako wartości orientacyjne dla podobnych procesów technologicznych.

U21. W symulacjach numerycznych zastosowano stałą wartość współczynnika tarcia w całym czasie trwania procesu, podczas gdy w rzeczywistych warunkach przemysłowych współczynnik tarcia zmienia się w trakcie procesu wraz ze zmianą warunków smarowania, temperatury oraz przebiegu odkształcenia materiału. Powstaje zatem pytanie, na ile uzasadniona jest szczegółowa analiza wyników symulacji (np. rozkładów naprężeń, temperatur czy sił procesu), skoro jeden z kluczowych parametrów modelu ma charakter przybliżony i w rzeczywistości zmienny w trakcie procesu.

Ostatnie rozdziały (nienumerowane) „**Podsumowanie**” oraz „**Wnioski końcowe**” stanowią spójne i logiczne zwięzienie przeprowadzonych w pracy badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych dotyczących procesu ciągnięcia cienkościennych rurek ze stopu CuBe₂ na korku swobodnym. W **podsumowaniu** Autor w sposób uporządkowany syntetyzuje najważniejsze wyniki badań, wskazując na kluczowe zależności pomiędzy właściwościami reologicznymi środków smarnych, geometrią narzędzi oraz prędkością ciągnięcia a warunkami tarcia, stabilnością procesu oraz kształtowaniem własności mechanicznych wyrobów. Na szczególne podkreślenie zasługuje powiązanie wyników badań przemysłowych z analizą numeryczną, które umożliwiło pogłębioną interpretację zjawisk zachodzących w strefie odkształcenia oraz identyfikację optymalnych parametrów technologicznych. **Wnioski końcowe** zostały sformułowane w sposób logiczny i wynikają bezpośrednio z przeprowadzonych badań, co potwierdza spójność przyjętej metodyki badawczej oraz poprawność interpretacji uzyskanych rezultatów. Mają one wysoki walor poznawczy i aplikacyjny, stanowiąc istotny wkład w rozwój wiedzy dotyczącej projektowania technologii wytwarzania ultracienkich rurek ze stopów metali nieżelaznych. **Ostatni rozdział** to literatura obejmująca 147 pozycji.

Należy podkreślić, że poruszane w pracy doktorskiej zagadnienia, wydają się być istotne dla określenia możliwości praktycznego wykorzystania uzyskanych wyników zarówno na pograniczu dyscypliny Inżynieria Materiałowa oraz Mechaniczna, co tym bardziej podkreśla z jednej strony interdyscyplinarny, a z drugiej wdrożeniowy charakter realizowanego doktoratu.

U22. Podsumowująca: Całość dysertacji koncentruje się na analizie początkowej fazy procesu ciągnięcia ultracienkich rurek na korku swobodnym przeznaczonych na sprężyny Bordona, co pozwala szczegółowo ocenić wpływ geometrii narzędzi i warunków tarcia na lokalne naprężenia i odkształcenia. Jednakże z punktu widzenia procesów przemysłowych istotne jest również zachowanie ciągłości i stabilności procesu w dalszej części produkcji, gdzie parametry tarcia, smarowania i odkształcenia ulegają zmianom w trakcie cyklu ciągnięcia. W związku z tym pozostaje kluczowe, główne pytanie, w jakim stopniu uzyskane wyniki, ograniczone do początkowej fazy i krótkich odcinków rurek, mogą być odniesione do pełnego przebiegu procesu ciągnięcia w warunkach przemysłowych. Zwłaszcza w aspekcie przeznaczenia tych rurek do precyzyjnych przyrządów pomiarowych, bowiem prawdopodobnie, pod drodze jest jeszcze wiele innych trudności technologicznych.

4. Podsumowanie

Zaproponowana przez Autora metodyka badań oraz jej zastosowanie należy uznać za wartościowe i oryginalne osiągnięcie naukowe. Obszar badawczy – proces ciągnięcia ultracienkich rurek ze stopu CuBe₂ – jest niszowy, a niniejsza rozprawa w istotny sposób uzupełnia i rozwija wiedzę w tym zakresie. Szczególne znaczenie ma aspekt aplikacyjny przeprowadzonych badań, gdyż uzyskane wyniki pozwalają lepiej zrozumieć wpływ warunków smarowania, geometrii narzędzi oraz prędkości ciągnięcia na przebieg procesu, jakość powierzchni i własności mechaniczne rurek, co jest istotne z punktu widzenia procesów przemysłowych.

Do głównych osiągnięć Doktoranta w ramach rozprawy należy zaliczyć:

- opracowanie oryginalnej, kompleksowej metodyki badawczej;
- przeprowadzenie bardzo dużej liczby badań eksperymentalnych, w tym w warunkach zbliżonych do przemysłowych, co samo w sobie stanowi znaczący walor naukowy pracy;
- zastosowanie modelowania numerycznego procesu ciągnięcia, które nie tylko podnosi poziom naukowy rozprawy, ale również może być niezwykle przydatne dla technologów zajmujących się projektowaniem i optymalizacją procesów ciągnięcia;

- identyfikację zależności pomiędzy parametrami procesu (smarowanie, geometria narzędzi, prędkość) a wynikowymi własnościami mechanicznymi i warunkami tarcia w strefie odkształcenia;
- stworzenie solidnej podstawy do dalszych badań i optymalizacji procesów ciągnięcia ultracienkich rurek, w tym potencjalnego rozszerzenia analizy na pełny cykl przemysłowy produkcji.

Wskazane w recenzji uwagi krytyczne, dotyczące m.in. przyjętych wartości współczynników tarcia, liczby próbek badawczych czy ograniczeń analizy MES, nie obniżają istotnie końcowej oceny pracy. Są one raczej propozycjami dyskusji i mogą stanowić wskazówki dla dalszych badań w warunkach przemysłowych. Należy również docenić złożoność i czasochłonność przeprowadzonych badań oraz przygotowania próbek do eksperymentów, co dodatkowo podkreśla wartość merytoryczną i praktyczną przedstawionej rozprawy.

5. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że przedłożona do opinii rozprawa doktorska pt.: „*Analiza teoretyczno-doświadczalna procesu ciągnięcia na korku swobodnym precyzyjnych rurek cienkościennych ze stopu CuBe₂*” w wykonaniu mgr inż. Mateusza Wasilewskiego:

- w sposób satysfakcjonujący rozwiązuje istotne problemy o znaczeniu poznawczym i technologicznym w zakresie procesów ciągnięcia cienkościennych rurek, uwzględniając zarówno badania eksperymentalne w warunkach przemysłowych, jak i analizę numeryczną procesu;
- wykazuje wysoki poziom merytoryczny i interdyscyplinarne podejście, łącząc tribologię, mechanikę materiałów oraz modelowanie numeryczne, przy czym zastosowane symulacje MES znacząco podnoszą wartość naukową pracy, umożliwiając jednocześnie identyfikację krytycznych parametrów procesu, przewidywanie zachowania materiału i mogą stanowić istotne narzędzie wspomagające projektowanie i optymalizację technologii ciągnięcia;
- demonstruje niezbędną wiedzę teoretyczną i praktyczną, a także umiejętność samodzielnego, twórczego prowadzenia badań eksperymentalnych, ich analizy oraz syntezy wyników w sposób spójny i logiczny.

W świetle powyższego rozprawa spełnia wymagania określone w Ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, a jej Autor zasługuje na dopuszczenie do publicznej obrony.

Marek Hawryluk
Marek Hawryluk