

Kraków, 26 listopada 2019 roku

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Piotra Romańskiego
pt.
Analityczno-eksperymentalny model korelacji parametrów procesowych
i właściwości mechanicznych wyrobów wyciskanych
ze stopu aluminium EN AW-6060

1.0. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Tematyka rozprawy dotyczy zagadnień związanych z procesem współbieżnego wyciskania profili ze stopu aluminium w gat. EN AW-6060, a w szczególności możliwości szybkiej identyfikacji i korelacji właściwości mechanicznych z parametrami ww. procesu. Geneza ww. tematyki związana jest z głównym profilem działalności zakładu produkcyjnego będącego miejscem pracy Autora rozprawy, który narzuca warunki związane z wysokowydajnymi procesami przetwórczymi wyrobów. Aktualnie w branży producentów dąży się do pełnej automatyzacji procesów, a tym samym eliminacji czynnika ludzkiego w cyklu produkcyjnym. Stąd też, niniejsza praca stanowi odpowiedź na zapotrzebowanie producentów wyrobów wyciskanych na nowe koncepcje i rozwiązania w zakresie automatyzacji, a tym samym optymalizacji cyklu produkcyjnego zgodnie z założeniami Industry 4.0.

2.0. Struktura rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska pt. „Analityczno-eksperymentalny model korelacji parametrów procesowych i właściwości mechanicznych wyrobów wyciskanych ze stopu aluminium EN AW-6060” zawiera 4 główne rozdziały, 180 stron, 44 tabele, 80 rysunków, spis literatury obejmujący 195 pozycji.

Rozdział nr 1 pt. „Analiza stanu zagadnienia” zawiera 4 podrozdziały, których treść koncentruje uwagę czytelnika na dwóch obszarach zagadnień. Pierwszy z nich to zagadnienia związane z historią aluminium, jego właściwościami, obszarami zastosowań oraz analizą rynku wyrobów aluminium, z kolei drugi obszar to zagadnienia związane z najpowszechniej stosowanym procesem przetwórczym aluminium i jego stopów tj. procesem wyciskania oraz z zabiegami obróbki cieplnej.

W podsumowaniu rozdziału 1 Autor wskazuje na wielkie możliwości aluminium i jego stopów jako materiału konstrukcyjnego i jednocześnie wskazuje luki w literaturze w obszarze badań związanych z opracowaniem „...korelacji kluczowych parametrów technologicznych, właściwości mechanicznych materiału i mikrostruktury...” pod kątem wykorzystania ich w rzeczywistym procesie produkcyjnym.

Kolejny rozdział główny nazwany przez Autora jako: Część eksperymentalna składa się z 8 podrozdziałów obejmujących między innymi: hipotezę pracy, cel pracy, program i metodykę badań, opis materiału, wyniki badań numerycznych i eksperymentalnych wraz z ich analizą oraz analizę końcową umożliwiającą określenie modelu korelacji parametrów procesowych i właściwości wyrobów, podsumowanie i wnioski końcowe.

W podrozdziale 2.1 na podstawie analizy literaturowej, doświadczenia zawodowego i badań własnych Autora, została sformułowana następująca hipoteza: „Istnieje możliwość efektywnej korelacji pomiędzy twardością Webstera, a parametrami obróbki cieplnej, umożliwiającej szybką ocenę struktury właściwości mechanicznych profili ze stopu EN AW-6060 uzyskiwanych przy ustabilizowanych warunkach wyciskania”. Do sformułowania ww. tezy Autor powołał się na następujące przesłanki:

- (a) „...istnieje ścisła relacja pomiędzy strukturą a właściwościami mechanicznymi badanego materiału...”
- (b) „...istnieje jednoznaczne przełożenie pomiędzy wynikami pomiaru twardości a innymi właściwościami mechanicznymi badanego materiału, przy czym w przypadku stopów utwardzalnych wydzieleniowo – są to relacje nieliniowe i wymagają stochastycznej korelacji opisującej parametry procesowe i właściwości mechaniczne...”
- (c) „...metoda Webstera pomiaru twardości jest wiarygodną, powtarzalną, nieniszczącą i co najważniejsze szybką metodą mobilnej oceny właściwości mechanicznych dla stopów utwardzalnych wydzieleniowo...”

Autor prezentuje w pracy dwa cele. Pierwszy z nich o charakterze poznawczym dotyczy określenia relacji pomiędzy twardością Webstera a właściwościami mechanicznymi wyznaczonymi w próbie jednoosiowego rozciągania profili wyciskanych ze stopu aluminium w gat. EN AW-6060 dla różnych parametrów technologicznych procesu wytwarzania. Drugi sformułowany cel dotyczy „...określenia korelacji pomiędzy danymi technologicznymi procesu wyciskania, parametrami obróbki cieplnej oraz danymi wyjściowymi w postaci twardości Webstera. Dalej Autor podkreśla, że „...Pozwoli to na opracowanie narzędzia analitycznego umożliwiającego szybkie szacowanie w warunkach przemysłowych, właściwości mechanicznych i strukturalnych wyrobów gotowych wyciskanych ze stopu

aluminium w gat. EN AW-6060...”. Chcąc udowodnić przedstawioną w pracy hipotezę oraz zrealizować założony cel poznawczy oraz cel użytkowy, Doktorant skonstruował program badań, który obejmował następujące zagadnienia:

- a) badania teoretyczne procesu wyciskania ze szczególnym uwzględnieniem stopów serii 6xxx,
- b) badania wstępne polegające na analizie właściwości materiału wsadowego tj. wlewków ze stopu aluminium w gat. EN AW-6060, które obejmowały badania właściwości mechanicznych i struktury oraz modelowanie numeryczne procesu wyciskania,
- c) badania eksperymentalne polegające na wytworzeniu w warunkach przemysłowych przedmiotowych profili, które koncentrowały się przede wszystkim na procesie wyciskania z przesycaniem na wybiegu prasy wlewków i następnie starzenia sztucznego profili,
- d) badania wpływu temperaturowo-czasowych parametrów procesu starzenia sztucznego na twardość Brinella, twardość Webstera, wytrzymałość na rozciąganie, umowną granicę plastyczności i wydłużenie całkowite oraz mikrostrukturę profili,
- e) opracowanie modelu analityczno-eksperymentalnego korelacji twardości Webstera wytworzonych profili oraz ich właściwości mechanicznych po różnych wariantach starzenia sztucznego,
- f) opracowanie narzędzia analitycznego umożliwiającego prognozowanie na podstawie szybkiego testu pomiaru twardości Webstera właściwości mechanicznych profili.

W podrozdziale 2.4 przedstawiono w sposób detaliczny zastosowaną w pracy metodykę badań oraz metodę szacowania niepewności pomiarowych. Kolejne podrozdziały tj. 2.5 – 2.8 prezentują uzyskane wyniki badań wraz z ich analizą. W części dotyczącej badań numerycznych procesu wyciskania (podrozdział 2.5) Autor dokonał analizy pięciu wariantów procesu wyciskania, które różniły się między sobą prędkością na wyjściu z prasy. Na podstawie obliczeń zostały wyznaczone rozkłady odkształceń zastępczych oraz intensywności naprężeń w kotlinie odkształcenia oraz rozkład temperatury w kotlinie odkształcenia i na wyjściu z prasy. Na podstawie analizy wyników badań do prac eksperymentalnych – głównie z powodu „...produktywności...” Autor wytypował do dalszych badań wariant nr 4 polegający na procesie wyciskania wlewków ze stopu EN AW-6060 o średnicy 178 mm w następujących warunkach: prędkość: 30 m/min, prędkość posuwu stempla: 7,48 mm/s, temperatura kontenera - 410°C, temperatura matrycy- 470°C, temperatura przetłoczeki -400°C, temperatura wsadu - 450°C.

Kolejnym etapem były badania związane z wytworzeniem w warunkach przemysłowych profili, które obejmowały identyfikację właściwości materiału wsadowego do procesu wyciskania – wlewka pod kątem właściwości mechanicznych oraz oceny jednorodności składu chemicznego i wielkości ziarna na przekroju poprzecznym wlewków. W podrozdziale 2.6.4 zaprezentowano wyniki badań związanych z wytworzeniem w procesie wyciskania współbieżnego z przesycaniem na wybiegu prasy profili będących przedmiotem analiz. Autor zaprezentował wyniki badań twardości Brinella i Webstera, wyniki próby jednoosiowego rozciągania w funkcji czasu starzenia naturalnego oraz w funkcji starzenia sztucznego w zakresie temperatury 175-205°C w czasie 0,5 – 14 h.

Uzyskane wyniki eksperymentalne stały się bazą danych do dalszej analizy statystycznej korelacji wyników twardości wyznaczonych metodą Webstera i metodą Brinella oraz właściwościami mechanicznymi wyznaczonymi w próbie jednoosiowego rozciągania. W dalszym etapie Autor

przeprowadził „... analizę ekonometryczną uzyskanych wyników (...) z wykorzystaniem narzędzi statystycznych ...”. Powyższa analiza obejmowała 6 etapów, które kolejno polegały na doborze zmiennych objaśniających do modelu (etap 1), wyborze postaci analitycznej modelu i jego klasyfikacji (etap 2), estymacji parametrów strukturalnych modelu za pomocą Klasycznej Metody Najmniejszych Kwadratów i analizie błędów (etap 3), ocenie dopasowanie modelu do danych empirycznych (etap 4), weryfikacji istotności zmiennych objaśniających (etap 5) i analizie rozkładu odchyłeń losowych (etap 6). Wyniki ww. analizy umożliwiły budowę modelu analityczno-eksperymentalnego do szacowania właściwości mechanicznych profili. Rozprawa kończy się dwoma rozdziałami głównymi nr 3 i 4, które stanowią podsumowanie pracy i wnioski końcowe.

3.0. Ocena rozprawy doktorskiej

Recenzowana praca stanowi interesujące analityczno-eksperymentalne studium poszukiwań relacji między parametrami starzenia sztucznego profili wyciskanych ze stopów aluminium w gat. EN AW-6060 i ich właściwościami mechanicznymi wyznaczanymi różnymi metodami.

Podjęcie przez Doktoranta takiej tematyki uważam za słuszne posunięcie w szczególności w kontekście możliwości opracowania nowych relacji właściwości mechanicznych oraz parametrów procesowych stopów aluminium w gat. EN AW-6060, które stanowiąc mogą wstępne założenia technologii produkcji profili wyciskanych oraz wdrożenia wyników w przemyśle, co wzorocowo wpisuje się w podstawowa misje badań naukowych, które powinny służyć nie tylko samej nauce, ale przede wszystkim gospodarce.

Hipoteza i cele pracy zostały sformułowane prawidłowo i jasno określają kierunki badań, które należało zrealizować w celu ich udowodnienia. Ponadto, dotyczą one zarówno aspektów naukowo-badawczych jak również mają istotne znaczenie użytkowe, co Autor w sposób jednoznaczny podkreślił w rozprawie.

Na podstawie szczegółowej analizy merytorycznej recenzowanej rozprawy stwierdzam że, do jej mocnych stron należą:

a) Oryginalność tematyki

Tematyka rozprawy dotyczy poszukiwań korelacji pomiędzy alternatywnymi metodami umożliwiającymi ocenę właściwości mechanicznych półwyrobów ze stopu aluminium w gat. EN AW-6060. Relacja pomiędzy wynikami twardości i wytrzymałością na rozciąganie materiałów generalnie jest znana i dotyczy powszechnie stosowanych metod pomiaru twardości, które z natury są metodami niszczącymi i czasochłonnymi. Przy czym o ile znane są relacje między twardością w skali Brinella, Vickers'a czy Rockwella i właściwościami wytrzymałościowymi to już trudno doszukać się takiej zależności w odniesieniu do właściwości plastycznych materiału, co jest przedmiotem badań w recenzowanej pracy. Autor podjął się określenia takiej relacji w przypadku pomiaru twardości metodą Webstera, która jest metodą powszechnie stosowaną do badania profili ze stopów aluminium, rur i blach. Powyższa metoda, która spełnia wymogi amerykańskiej normy ASTM B647 umożliwia w sposób mobilny i szybki pomiar twardości

elementów z aluminium i stopów aluminium. Wykorzystanie metody pomiaru twardości Webstera do prognozowania właściwości mechanicznych profili ze stopów aluminium znakomicie wpisuje się w aktualne zapotrzebowania zakładów przemysłowych w zakresie kontroli jakości oraz zapewnienia stabilności procesu produkcyjnego i powtarzalności jakości wytwarzanych wyrobów. Powyższe argumenty świadczą zatem o oryginalności i trafnej koncepcji recenzowanej pracy.

b) Ciekawy i wielowątkowy program doświadczalny

Praca ma charakter doświadczalny. Opracowany przez Doktoranta program badań obejmuje wiele wątków badawczych (analizy numeryczne, badania eksperymentalne, analizy ekonometryczne uzyskanych wyników badań) i zawiera trudne w realizacji, kosztowne i czasochłonne badania materiałowe oraz procesowe (proces wyciskania z przesycaniem na wybiegu prasy oraz proces starzenia sztucznego), które były realizowane w warunkach przemysłowych.

c) Wyniki badań doświadczalnych wpływu czasu i temperatury starzenia sztucznego stanowiące cenną eksperymentalną bazę danych

Wyniki badań doświadczalnych wpływu czasu i temperatury starzenia sztucznego stanowiące cenną eksperymentalną bazę danych w postaci relacji pomiędzy twardością w skali Brinella i w skali Webstera oraz właściwościami mechanicznymi wyznaczonymi w próbie jednoosiowego rozciągania w sumie dla 40 wariantów temperaturowo-czasowych (4 wartości temperatury i 10 wartości czasu starzenia sztucznego).

d) Opracowanie analityczno-eksperymentalnych modeli korelacji twardości Webstera i właściwości mechanicznych profili ze stopu aluminium w gat. EN AW-6060.

Opracowane modele wskazują na interesujący kierunek analiz materiałowych baz danych i parametrów procesowych, które ukazują nowe relacje będące cenne nie tylko z punktu widzenia naukowego, ale i również aplikacyjnego.

e) Opracowanie narzędzi analitycznych umożliwiających prognozowanie właściwości mechanicznych wytwarzanych profili w warunkach różnych parametrów procesu wyciskania i starzenia sztucznego.

Narzędzie analityczne umożliwiające prognozowanie właściwości materiału stanowi odpowiedź na zapotrzebowanie przemysłu polegające na minimalizacji błędów ludzkich w trakcie procesu produkcyjnego przy jednoczesnym zapewnieniu jak najwyższej wydajności linii produkcyjnych. Zastosowanie w przemyśle szybkich i mobilnych metod kontroli jakości produkowanych wyrobów jest standardem, stąd też optymalizacja takich metod jest właściwym i pożądanym kierunkiem w przemyśle, co czyni wyniki recenzowanej pracy szczególnie przydatne dla praktyki.

Rozprawa doktorska mgra inż. Piotra Romańskiego oprócz wymienionych wyżej zalet posiada również fragmenty, które wymagają szerszej dyskusji. Poniżej zostały zaprezentowane uwagi natury merytorycznej, do dyskusji z Doktorantem:

- (a) Zazwyczaj część literaturowa rozprawy doktorskiej zwana często „analizą stanu zagadnienia” powinna zawierać elementy, które uzasadniają hipotezę i cele pracy doktorskiej. Analizując przeprowadzoną przez Autora część literaturową pracy odczuwa się pewien niedosyt, który jest związany z brakiem literaturowej analizy metod pomiaru twardości i prób poszukiwania korelacji z innymi właściwościami materiału. Czy takie podejście do analizy było przedmiotem innych badań? Autor na stronie 62 pisze „...Autor niniejszej dysertacji zauważył pewne luki w dostępnej literaturze w zakresie opisu właściwości mechanicznych stopu aluminium EN AW-6060...”. Proszę o wskazanie (wylistowanie) ww. luk oraz pozycji literaturowych.
- (b) Dyskusyjnym dla recenzenta jest wybór próby udarności jako oceny właściwości mechanicznych wlewków z punktu widzenia uzyskania założonego w pracy celu zarówno poznawczego jaki i użytkowego. Jaki był cel badań udarności wlewków? Jaki jest związek tych badań z celem pracy?
- (c) W jaki sposób można wytłumaczyć stwierdzoną eksperymentalnie przez Doktoranta obserwację wyższych wartości twardości w skali Webstera w stosunku do twardości w skali Brinella profili po procesie starzenia naturalnego? Doktorant stwierdza, że „...metodą „czulszą” oceny twardości jest test Webstera...”. Czy w przypadku starzenia sztucznego Doktorant zauważył podobną sytuację?
- (d) Na podstawie uzyskanych wyników badań wpływu temperatury i czasu starzenia sztucznego profili z aluminium w gat. EN AW-6060 Doktorant wyznaczył zgodnie z Jego stwierdzeniem „...optymalny...” czas starzenia sztucznego, który wynosi 4h dla wartości temperatury starzenia sztucznego: 175°C, 185°C i 195°C. Co oznacza optymalny czas starzenia sztucznego z punktu widzenia warunków przemysłowych? W jaki sposób temperaturowo-czasowe warunki nagrzewania i chłodzenia wpływają na tzw. optymalny czas starzenia sztucznego?
- (e) Doktorant do badań mikrostruktury wytypował próbki profili po procesie starzenia sztucznego wg następujących wariantów: S1 - po starzeniu naturalnym, S2 - po starzeniu sztucznym: 185°C/1h, S3 - po starzeniu sztucznym-185°C/6h, S4 - po starzeniu sztucznym:175°C/10h oraz S5 - po starzeniu sztucznym: 195°C/12h. Jaki klucz zastosował Doktorant do wyboru próbek do badań mikrostruktury? Jaki był cel oceny mikrostruktury wg. ww. wariantów?
- (f) W części dotyczącej wyników badań Autor prezentuje wyniki w postaci czterech modeli opisujących korelację: twardość WB - R_m , twardość WB- $R_{p0,2}$, twardość WB- A_{50} , twardość WB-twardość HB. Nigdzie w wynikach analizy nie pojawia się model korelacji: twardość Webstera – wielkość ziarna lub inny parametr oceny struktury. Proszę o ustosunkowanie się do powyższej uwagi w kontekście sformułowanej hipotezy oraz celu użytkowego, w którym wyraźnie stwierdzono, że „... Istnieje możliwość efektywnej korelacji pomiędzy twardością Webstera, a parametrami obróbki cieplnej, umożliwiającą szybką ocenę struktury właściwości mechanicznych profili ze stopu EN AW-6060 uzyskiwanych przy ustalonych warunkach wyciskania...”.

Powyższe uwagi są oczywiście do dyskusji i nie umniejszają wartości merytorycznej pracy, którą oceniam bardzo wysoko i z tego punktu widzenia moim zdaniem praca zasługuje na wyróżnienie.

Z kolei dokładana analiza rozprawy pod kątem poprawności językowej oraz edycyjnej wykazała niestety wiele błędów gramatycznych i dwa błędy ortograficzne oraz wiele nieprawidłowych i niezręcznych sformułowań, które niestety wpływają na końcową ocenę rozprawy. Poniżej pozwalam sobie przedstawić przykłady błędów językowych oraz niezręcznych sformułowań:

- (a) str. 21-22 - „... stopy aluminium z magnezem umacnia się (...) stopy aluminium z krzemem umacnia się (...) stopy aluminium z magnezem i krzemem utwardza się (...) stopy aluminium z manganem umacnia się...” – powinno być: „stopy aluminium z magnezem umacniają się”, „stopy aluminium z krzemem umacniają się”, „stopy aluminium z magnezem i krzemem utwardzają się”, „stopy aluminium z manganem umacniają się”,
- (b) str. 37, 39, 55 - błąd ortograficzny: „...w skutek...” - prawidłowa pisownia: „wskutek”,
- (c) str. 45 - błąd ortograficzny „...nie odkształcone...” - prawidłowa pisownia: „nieodkształcone”,
- (d) str. 57 - „...dobre przewodzenie elektryczne i ciepłne...” - powinno być: „dobre przewodnictwo elektryczne i ciepłne”,
- (e) str. 61 - „...z uwagi na najbardziej uniwersalną kombinacje...” – powinno być: „z uwagi na najbardziej uniwersalną kombinację”,
- (f) str. 78 - „... naprężenia zastępcze Vonmisesa...” – powinno być: „naprężenia zastępcze von Misesa” (Richard von Mises),
- (g) str. 80 – „... Rys.40. Rozkład odkształceń zastępczych w komorze odkształcenia...” – powinno się stosować określenie „w kotlinie odkształcenia”, podobnie na str.81 (Rys.41) oraz na str. 83 (Rys.43)
- (h) str. 93 – w tekście „... mikrostruktura przedstawiona na rysunku 57a i 57b (...) na zdjęciu 57c...” - powinno być: „na rysunku 53a i 53b” oraz „na zdjęciu 53c”,
- (i) str. 99, 104 i 103 – opis osi na wykresach przedstawionych na rys.58, 64 i 65, które dotyczą twardości sugeruje, że jednostką twardości Brinella jest HB, a jednostką twardości Webstera jest WB - opis powinien być następujący: „Twardość HB”, „Twardość WB” – bez jednostki,
- (j) str. 131 - „...W tabeli 20 przedstawiono.....” powinno być: „W tabeli 30 przedstawiono wyniki”
- (k) str. 259 oraz str. 105 - w treści Autor powołuje się na temperaturę starzenia sztucznego 200°C („...Wyjątkiem jest tutaj temperatura 200°C...”), podczas gdy badania starzenia sztucznego były realizowane w temperaturze 205°C.

4.0. Wniosek końcowy

Opracowana rozprawa dotyczy aktualnej problematyki badawczej i w wielu miejscach wnosi nowe treści o znaczących walorach poznawczych i użytkowych. Doktorant podjął się realizacji trudnego, interdyscyplinarnego zadania. Postanowił zbadać, czy możliwe jest opracowanie relacji między szybkością

i mobilną metodą pomiaru twardości w skali Webstera i właściwościami mechanicznymi wyznaczonymi w próbie jednoosiowego rozciągania profili ze stopu aluminium w gat. EN AW-6060 oraz zastosować ww. relacje do praktyki przemysłowej. Rozprawa zawiera wartościowe wyniki świadczące o kompetencji, umiejętności dowodzenia tezy i planowania badań oraz o dużym doświadczeniu Doktoranta w ich realizacji.

Podsumowując, stwierdzam, że opiniowana praca mgra inż. Piotra Romańskiego zatytułowana: „Analityczno-eksperymentalny model korelacji parametrów procesowych i właściwości mechanicznych wyrobów wyciskanych ze stopu aluminium EN AW-6060” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 30 sierpnia 2018 roku (DZ.U.2018.1668), wobec czego wnoszę o dopuszczenie mgra inż. Piotra Romańskiego do publicznej dyskusji nad Jego rozprawą doktorską.

A handwritten signature in blue ink that reads 'Beata Smyrak'.