



AGH

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Metali Nieżelaznych
Katedra Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych
dr hab. inż. Krzysztof Żaba, prof. AGH

Kraków, 20 września 2021 r.

Recenzja

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Majchrowicza pt. „Mikrostruktura i właściwości modelowych stopów Mg-Sn przetwarzanych w procesie walcowania z udziałem odkształceń ścinających”,
opracowana na zlecenie Z-cy Przewodniczącej Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej, prof. dr hab. inż. Anny Boczkowskiej,
pismo z dnia 08 września 2021 r.**

Praca wpisuje się w aktualne trendy badawcze, dotyczące analizy zjawisk, występujących w stopach magnezu, poddanych odkształceniu plastycznemu. Analiza tych zjawisk, choć będąca przedmiotem publikacji, wciąż stanowi źródło inspiracji do dalszych, badań i rozwiązywania istniejących problemów. Głównym problemem w przetwórstwie magnezu jest słaba odkształcalność, wynikająca z ograniczonej aktywności mechanizmów odkształcenia plastycznego w temperaturze pokojowej. Na wzrost odkształcalności magnezu może wpłynąć modyfikacja tekstury krystalograficznej lub stosowanie odpowiednich pierwiastków stopowych.

W ostatnich latach problematyka w zakresie możliwości kształtowania plastycznego stopów magnezu stała się jednym z istotniejszych obszarów badawczych w dyscyplinie inżynierii materiałowej. Z doniesień badaczy wynika jednak, że podjęta w pracy tematyka nie została dotychczas scharakteryzowana w sposób kompleksowy i jednoznaczny, pomimo szeregu metod badawczych oraz mnogości wyników badań i wymaga ciągłego doskonalenia i optymalizacji stosowanych technologii.

Autor rozprawy podjął próbę oceny możliwości intensyfikacji odkształcalności magnezu poprzez zastosowanie dodatków stopowych oraz wprowadzenie znacznych odkształceń ścinających podczas przeróbki plastycznej. Zastosowanie dodatków stopowych w postaci cyny i cynku pozwoliło na uzyskanie modelowych stopów Mg-6Sn i Mg-6Sn-1Zn (% wag), które poddano walcowaniu ze zróżnicowaniem prędkości obrotowych walców (z ang. Differential Speed Rolling – DSR), przy różnym udziale odkształceń ścinających, kontrolowanym poprzez współczynnik asymetrii prędkości obwodowych walców roboczych. Przetworzone plastycznie modelowe stopy poddano następnie kompleksowej analizie mikrostruktury i właściwości.

Z powyższych względów uważam, że problematyka i temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Majchrowicza zostały trafnie sformułowane i zasługują na uznanie. Wybór tematyki jest jak najbardziej aktualny i wpisuje się w trendy badawcze w obszarze możliwości wzrostu odkształcalności magnezu poprzez zastosowanie dodatków stopowych oraz kształtowanie plastyczne metodą DSR.

Ocena rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa, napisana pod opieką naukową prof. dr hab. inż. Zbigniewa Pakieły, obejmuje 168 stron, zawiera 9 rozdziałów, wnioski końcowe i bibliografię, streszczenie w języku polskim i angielskim, 78 rysunków w postaci schematów, wykresów i fotografii, 25 tabel oraz 245 pozycji literaturowych, 117 z ostatnich dziesięciu lat, w tym jednej opublikowanej przez Autora dysertacji w języku angielskim. Dodatkowo, część wyników uzyskanych podczas realizacji badań w ramach rozprawy doktorskiej została opublikowana przez doktoranta i współautorów w 2021 r. w czasopiśmie Materials.

Część I dysertacji, obejmuje Wprowadzenie (rozdział 1, strony 15-21) oraz Analizę stanu zagadnienia, która podzielona została na cztery rozdziały (2-5), zawarte na stronach 21-62. W rozdziale drugim Autor skupia się na wybranych problemach, związanych z odkształceniem plastycznym magnezu i jego stopów. W rozdziale trzecim Doktorant przedstawia zagadnienia dotyczące czynników wpływające na odkształcalność magnezu i jego stopów. W rozdziale czwartym przedstawiona została charakterystyka stopów Mg-Sn natomiast w rozdziale piątym metody przeróbki plastycznej stopów Mg z udziałem odkształceń ścinających, w tym metod dużego odkształcenia plastycznego oraz walcowania z udziałem odkształceń ścinających

Analiza literaturowa, oparta w większości o publikacje anglojęzyczne, została wykonana na wysokim poziomie, obejmując najważniejsze zagadnienia dotyczące tematyki podjętej w pracy.

Na podstawie analizy stanu zagadnienia Autor, w rozdziale szóstym dysertacji, przedstawia cel, tezę i określa zakres pracy (str. 62-65), co stanowi zakończenie Części I dysertacji. Według Doktoranta *„najbardziej efektywnymi sposobami zwiększenia odkształcalności magnezu jest zastosowanie odpowiedników pierwiastków stopowych oraz modyfikacja tekstury krystalograficznej”*.

Celem pracy jest „zwiększenie odkształcalności modelowych stopów Mg-6Sn i Mg-6Sn-1Zn poprzez wprowadzenie odkształceń ścinających podczas przeróbki plastycznej metodą walcowania ze zróżnicowaniem prędkości obrotowej walców”. Natomiast teza pracy została sformułowana następująco: „wprowadzenie odkształceń ścinających podczas przeróbki plastycznej modelowych stopów Mg-6Sn i Mg-6Sn-1Zn prowadzi do zwiększenia ich odkształcalności poprzez obniżenie intensywności tekstury podstawy i modyfikację mikrostruktury”.

Sformułowany cel i teza są właściwe i jednoznacznie określają istotę rozprawy.

Cel pracy, według Doktoranta, powinien zostać osiągnięty, a teza udowodniona, poprzez realizację prac badawczych, określonych w pracy jako zasadniczych, które zakresem, (str. 64-65) przedstawionym w czterech punktach, obejmują dobór parametrów walcowania konwencjonalnego i procesu DSR oraz wytworzenie pasm ze stopów Mg-6Sn, Mg-6Sn-1Zn przy różnym udziale odkształceń ścinających, kontrolowanym wartością współczynnika asymetrii prędkości obrotowych walców roboczych, charakterystykę mikrostruktury i tekstury stopów Mg-Sn, przetworzonych w procesie walcowania konwencjonalnego i DSR, z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej, dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych, transmisyjnej mikroskopii elektronowej oraz dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego, ocenę właściwości mechanicznych wytworzonych pasm oraz ocenę odkształcalności wytworzonych pasm w próbach tłoczności metodą Erichsena.

Zasadniczy zakres badań został poprzedzony badaniami wstępnymi, w ramach których scharakteryzowano badane materiały w stanie wyjściowym, określono ewolucję mikrostruktury, tekstury i zmianę właściwości mechanicznych stopu Mg-6Sn w kolejnych przepustach podczas walcowania konwencjonalnego, porównano mikrostrukturę, teksturę i właściwości mechaniczne stopu Mg-6Sn po walcowaniu konwencjonalnym i metodą DSR.

Zakres badań jest bardzo szeroki, ale dopiero metodyka badawcza, przedstawiona w dalszej części dysertacji, prezentuje realny, imponujący obszar wykonanych prac badawczych i stopień ich zaawansowania.

Część II dysertacji, obejmująca badania własne, została podzielona na trzy rozdziały (7-9), zawarte na stronach 65-150.

W rozdziale 7 (str. 65-77) Doktorant przedstawia informacje dotyczące zastosowanych materiałów oraz metodyki badań własnych. W podrozdziale 7.1. (str. 65) Autor zamieszcza informacje dotyczące zastosowanych w pracy materiałów w postaci modelowych stopów Mg-6Sn, Mg-6Sn-1Zn, wytworzonych przez Instytut Metali Nieżelaznych w Oddziale Metali Lekkich w Skawinie w procesie odlewania, a następnie poddanych obróbce cieplnej i wyciskaniu do postaci prętów o średnicy 25mm oraz komercyjnego stopu AZ61A o takiej samej średnicy, jako materiału referencyjnego. Powody zastosowania modelowych stopów zostały przedstawione przez Autora na str. 63.

Przedstawiona w podrozdziałach 7.2-7.6 (str. 66-77) metodyka badawcza została opracowana bardzo skrupulatnie i przejrzysto. Doktorant zaproponował kompleksowe podejście do kwestii opracowania zagadnień niezbędnych do prawidłowego wykonania

eksperymentów. W pracy zastosowano bardzo szeroki aparat badawczy, wykorzystujący nowoczesne metody i urządzenia do przygotowania próbek, wykonywania poszczególnych badań oraz ich analizy.

W podrozdziale 7.2 (str. 66-70) Autor przedstawił informacje dotyczące metodyki procesu walcowania. W ramach badań wstępnych, do proces konwencjonalnego walcowania wzdłużnego stopu Mg-6Sn, Doktorant wykorzystał zestaw walcowniczy firmy SKET GmbH typu AP 001 znajdujący się w Leibniz Institute for Solid State and Materials Research w Dreźnie (Niemcy), natomiast w ramach badań zasadniczych, do procesu walcowania asymetrycznego oraz walcowania konwencjonalnego, Autor zastosował zestaw walcowniczy MH-S1H znajdujący się na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie.

W dalszej części rozdziału 7 przedstawiono informacje dotyczące metodyki badań mikrostrukturalnych (7.3, str. 71-72), tekstury i składu fazowego (7.4, str. 73-74), właściwości mechanicznych (7.5, str. 74-76) oraz odkształcalności (7.6, str. 76-77). Mikrostrukturę scharakteryzowano pod względem wielkości ziarna oraz rozkładu dezorientacji granic ziaren metodą dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD) przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) Hitachi SU-70 wyposażonego w działo z emisją polową Schottky'ego. Próbki do badań EBSD zostały przygotowane przez mechaniczne szlifowanie i polerowanie jonowe przy użyciu systemu Hitachi IM4000 Ion Milling System. Dane analizowano za pomocą dedykowanego oprogramowania HKL Channel 5. Obserwacje mikrostruktury pasm po walcowaniu i wyżarzaniu wykonano przy użyciu mikroskopu świetlnego Zeiss Axio Observer. Charakterystykę wydzieliń powstałych w stopach Mg-6Sn i Mg-6Sn-1Zn przeprowadzono przy wykorzystaniu transmisyjnego mikroskopu elektronowego (TEM) JEOL JEM-1200EX. Teksturę i skład fazowy badano metodą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) przy użyciu dyfraktometrów: Seifert GmbH HZG-4 (w przypadku badań wstępnych stopu Mg-6Sn po walcowaniu konwencjonalnym) oraz Bruker D8 Discover (w pozostałych przypadkach). Ilościową analizę fazową wykonano metodą Reference Intensity Ratio – RIR, przy użyciu oprogramowania Match!. Do wyznaczenia pełnych figur biegunowych (0002) i obliczenia funkcji rozkładu orientacji wykorzystano cztery niekompletne figury biegunowe, tj. (0002), (10-10), (10-11) i (10-12), które poddano analizie za pomocą oprogramowania LaboTex. Do badań właściwości mechanicznych i anizotropii zastosowano statyczną próbę jednoosiowego rozciągania przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z005. Do badań wykorzystano zminiaturyzowane próbki do rozciągania o długości bazy pomiarowej 10 mm i przekroju poprzecznym 1,6 x 1,2 mm, które zostały wycięte pod kątami 0°, 45° i 90° do kierunku RD lub ED. Do analizy odkształceń wykorzystano metodę cyfrowej korelacji obrazu (DIC), w której rejestrowane za pomocą kamer CCD obrazy plamkowe poddawane były analizie za pomocą cyfrowych metod komputerowych przy użyciu oprogramowania VIC-2D.

Uważam, że wykorzystanie tak szerokiego potencjału wysoko zaawansowanych metod i aparatury badawczej, pozwoliło na kompleksową charakteryzację materiałów wsadowych oraz uzyskanych w wyniku kształtowania plastycznego metodą walcowania konwencjonalnego i procesu DSR.

Wyniki badań wstępnych (rozdział 8, str. 78-100) podzielono na cztery podrozdziały. W podrozdziale 8.1 (str. 78-82) przedstawiono charakterystykę badanych materiałów w stanie wyjściowym, w 8.2. (str. 83-95) charakterystykę stopu Mg-6Sn poddanego kształtowaniu plastycznemu metodą walcowania konwencjonalnego, natomiast w 8.3 (str. 95-99) charakterystykę stopu Mg-6Sn po procesie DSR zrealizowanym przy dużej wartości współczynnika asymetrii $R = 3$, w celu oceny potencjału tej metody walcowania asymetrycznego. Wyniki badań przedstawiono w postaci ewolucji mikrostruktury i tekstury oraz zmiany właściwości mechanicznych. Podrozdział 8.4 (str. 99-100) stanowi podsumowanie wyników badań wstępnych.

Na podstawie wyników wstępnych eksperymentów, wsady ze stopów Mg-6Sn i Mg-6Sn-1Zn postanowiono poddać w ramach badań zasadniczych czterem przepustom przy jednostkowej redukcji grubości równej 15%. Podczas walcowania nie stosowano żadnych środków smarnych ani nie podgrzewano walców roboczych. Po każdym kolejnym przepuszczeniu, wsady były ponownie wygrzewane w 400°C przez 10 minut oraz obracane o kąt 180° wokół kierunku walcowania. Proces walcowania prowadzono przy współczynniku asymetrii R (tj. stosunku prędkości obwodowych górnego i dolnego walca) wynoszącym $R = 1, 1.25, 2$ i 3 przy stałej prędkości walca górnego równej 4 m/min. Proces prowadzony przy $R = 1$ odpowiadał konwencjonalnemu walcowaniu wzdłużnemu. Zmiana współczynnika R w zakresie od 1,25 do 3 umożliwiła natomiast wprowadzenie różnego udziału odkształceń ścinających.

Uważam, że przedstawione założenia badań zasadniczych, wynikające z badań wstępnych (rozdział 8) oraz analizy literaturowej są właściwie sformułowane i pozwalają na osiągnięcie założonego celu oraz udowodnienie tezy dysertacji.

Wyniki badań, określonych przez Autora jako zasadnicze, przedstawiono w obszernym rozdziale 9 (str. 101-145) złożonym z pięciu podrozdziałów. Doktorant zaprezentował wyniki badań stopu Mg-6Sn po procesie DSR w podrozdziale 9.1 oraz analogiczne wyniki dla stopu Mg-6Sn-1Zn, w podrozdziale 9.2 i stopu AZ61, w podrozdziale 9.3, podzielone na wyniki badań mikrostruktury (9.1.1, str. 101-107, 9.2.1, str. 120-127, 9.3.1, str. 137-139), tekstury (9.1.2, str. 107-112, 9.2.2, str. 127-131, 9.3.2, str. 139-140) i właściwości mechanicznych (9.1.3, str. 113-119, 9.2.3, str. 131-136, 9.3.3, str. 140-143). W kolejnym podrozdziale 9.4 (str. 143-145) Autor zaprezentował porównawcze wyniki badań odkształcalności stopów Mg-6Sn, Mg-6Sn-1Zn i AZ61 po procesie DSR. Natomiast w podrozdziale 9.5 (str. 146-149) Doktorant zamieścił informacje podsumowujące wyniki badań dla wszystkich stopów (modelowych i komercyjnego) po procesie DSR.

Wyniki badań materiałów ze stopów Mg-6Sn i Mg-6Sn-1Zn po walcowaniu metodą DSR wskazują, że stosowanie coraz wyższych wartości współczynnika asymetrii w zakresie $R=1-3$ wpłynęło na wzrost efektywności rozdrobnienia ziarna (Rys. 9.1, Rys. 9.10) oraz obniżenie intensywności tekstury podstawy (Rys. 9.6, Rys. 9.15), powodując wzrost wytrzymałości na rozciąganie oraz granicy plastyczności. Natomiast plastyczność tych stopów wzrastała po procesie metodą DSR przy $R = 1,25$, podczas gdy dla wyższych wartości parametru R obserwowano stopniowy spadek wydłużenia. Według Doktoranta przyczyną

należy upatrywać w tym, że „determinującym czynnikiem był w tym przypadku wyższy stopień nagromadzenia defektów struktury w postaci niskokątowych granic dyslokacyjnych i granic bliźniaczych w pasmach przetwarzanych przy $R = 2$ i 3 , które przy dużym nagromadzeniu wydzieleni fazy Mg_2Sn ograniczały zdolność do jednorodnego odkształcenia plastycznego. Ponadto, zaobserwowano znaczny wzrost granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie (o ok. 50 MPa) na skutek wprowadzenia dodatku Zn do stopu Mg-6Sn będący efektem zmniejszenia wielkości ziarna (Rys. 9.1, Rys. 9.10), zwiększenia ilości umacniających wydzieleni fazy Mg_2Sn (Tabela 9.1, Tabela 9.5) oraz modyfikacji ich wielkości i orientacji krystalograficznej (Rys. 9.5, Rys. 9.14), a także umocnienia roztworowego atomami Zn (Tabela 8.1).”

Zastosowanie wyżarzania rekrytalizującego stopów Mg-6Sn i Mg-6Sn-1Zn, po walcowaniu metodą DSR, spowodowało spadek średniej wielkości ziarna, na skutek wprowadzania coraz większych odkształceń ścinających, przy coraz wyższych wartościach współczynnika R , a także obniżenie intensywności tekstury podstawy. Autor stwierdza, że „stopniowy spadek intensywności tekstury podstawy, a tym samym coraz częściej występujące odchylenie płaszczyzn podstawy $\{0001\}$ od płaszczyzny walcowania, sprzyjały łatwiejszej aktywacji mechanizmów poślizgu podstawowego $\langle a \rangle$ czy bliźniakowania typu $\{10\text{-}12\}\langle 10\text{-}11 \rangle$ dominujących podczas odkształcenia plastycznego stopów Mg w temperaturze pokojowej. Przekładało się to na wzrost plastyczności i odkształcalności stopów Mg-6Sn i Mg-6Sn-1Zn (Rys. 9.28c).” Spadek średniej wielkości ziarna sprzyjał uzyskiwaniu wyższych wartości wydłużenia oraz liczby Erichsena (Rys. 9.28d).

Komercyjny stop AZ61, po procesie DSR, wykazywał wyższą wytrzymałość oraz odkształcalność w stosunku do stopów modelowych. Doktorant tłumaczy to tym, że „wyższa wytrzymałość stopu AZ61 była już widoczna na etapie badań wstępnych (Tabela 8.1), co było spowodowane większym umocnieniem roztworowym atomami Al w porównaniu do atomów Sn”, natomiast „lepsza odkształcalność wynikała przede wszystkim z wyraźnie niższej intensywności tekstury podstawy (Rys. 9.23) oraz większej skłonności do umocnienia odkształceniowego stopu AZ61 charakteryzującego się wyższym współczynnikiem umocnienia, podczas gdy zdolność do jednorodnego odkształcenia plastycznego stopów Mg-Sn była ograniczana przez duży udział wydzieleni fazy Mg_2Sn „. Jednak zastosowanie współczynnika asymetrii w zakresie $R = 2\text{-}3$ pozwoliło na uzyskanie dla stopu Mg-6Sn-1Zn wydłużenia do zerwania wyższego w porównaniu do stanu wyjściowego, podczas gdy wartość wydłużenia dla stopu AZ61 uległa redukcji. Dodatkowo wyniki wskazały na znacznie wyższą wytrzymałość i lepszą odkształcalność stopu Mg-6Sn-1Zn w stosunku do stopu Mg-6Sn. Stop Mg-6Sn-1Zn po kształtowaniu metodą DSR przy $R = 3$ osiągał wyższe wartości wydłużenia do zerwania ($A = 18,8\%$) niż stop AZ61 ($A = 17,9\%$), pomimo znacznie wyższej intensywności tekstury podstawy.

W końcowej części Dyplomant przedstawił propozycje kolejnych badań zmierzających do wzrostu intensywności odkształcalności stopów magnezu. Jednym ze sposobów może być modyfikacja tekstury poprzez proces celowego wygenerowania bliźniaków odkształcenia w mikrostrukturze materiału przed walcowaniem. Kolejnym są badania właściwości mechanicznych w wysokiej temperaturze, stabilności cieplnej i odporności na pełzanie.

Rozdział 10 (str. 150-151) to podsumowanie tej, napisanej na wysokim poziomie, dysertacji, zredagowane w formie 6 wniosków, stanowiących kompleksowe wytyczne które mogą być wykorzystane przy dalszych pracach, dotyczących procesu walcowania asymetrycznego DSR stopów magnezu.

Za osiągnięcia Doktoranta uważam:

- kompleksową analizę charakterystyki mikrostruktury, tekstury i właściwości mechanicznych modelowych stopów Mg-6Sn, Mg-6Sn-1Zn oraz stopu AZ61 jako materiału referencyjnego, poddanych procesowi DSR przy różnym współczynniku asymetrii $R = 1-3$, a tym samym różnym udziale wprowadzanych odkształceń ścinających, zrealizowaną z zastosowaniem zaawansowanych metod i urządzeń badawczych oraz analizy wyników, stanowiące nowość w światowej literaturze przedmiotu,
- określenie warunków (parametrów) realizacji procesu DSR oraz wykazanie potencjału tej metody, umożliwiających wzrost odkształcalności modelowych stopów Mg-6Sn, Mg-6Sn-1Zn, co w perspektywie może mieć znaczenie aplikacyjne.

Lektura pracy była dużą przyjemnością z uwagi na jej logiczny układ oraz sposób przedstawienia, zarówno informacji w części analizy literaturowej, jak i wyników badań. Znaczna ilość zrealizowanych badań eksperymentalnych i materiałowych, niewątpliwie świadczy o dużej wiedzy Doktoranta w wielu obszarach badawczych, zaprezentowanych w dysertacji, jak i o umiejętności planowania eksperymentów oraz właściwej analizy i wnioskowania.

Uzyskane przez Doktoranta wyniki badań modelowych stopów Mg-6Sn i Mg-6Sn-1Zn po walcowaniu konwencjonalnym i asymetrycznym metodą DSR pozwoliły na udowodnienie przyjętej tezy, że wprowadzenie odkształceń ścinających podczas przeróbki plastycznej prowadzi do zwiększenia ich odkształcalności, ujawnionej przez obniżenie intensywności tekstury podstawy i modyfikację mikrostruktury. Dodatkowo, przedstawiono, że metoda asymetrycznego walcowania DSR stanowi skuteczną modyfikację konwencjonalnego procesu walcowania w celu uzyskania materiałów ze stopów Mg-Sn o podwyższonej odkształcalności.

Praca została zredagowana poprawną polszczyzną, zarówno w znaczeniu ogólnym, jak i technicznym.

Przedstawiona do oceny dysertacja stanowi oryginalne osiągnięcie Doktoranta. Badania zostały zrealizowane na wysokim poziomie z dbałością o szczegóły, z zachowaniem zasad prawidłowej realizacji eksperymentu naukowego, udokumentowane dużą ilością wykresów i tablic. Dysertację można ją określić jako kompendium wiedzy, które może być wykorzystane przy dalszych pracach naukowo-badawczych oraz aplikacyjnych, dotyczących procesu walcowania asymetrycznego DSR stopów magnezu.

Uwagi krytyczne

Lektura rozprawy nasuwa pewne uwagi i wątpliwości, które mają charakter dyskusyjny.

1. W pracy brak jest kompleksowej, krytycznej analizy literaturowej na końcu każdego z rozdziałów 2-5, na podstawie której powinno formułować się cel, tezę i zakres badań. Autor przedstawił jedynie informacje w rozdziale 6 „Cel, teza i zakres pracy”, na stronie 62, stwierdzając, że *„Studia literaturowe wykazały, iż głównym problemem w szerszym wykorzystaniu stopów Mg do przeróbki plastycznej jest ich słaba odkształcalność wynikająca z ograniczonej aktywności mechanizmów odkształcenia plastycznego w temperaturze pokojowej. W magnezie i jego stopach aktywowany jest przede wszystkim poślizg dyslokacji w płaszczyźnie podstawy (0001) w kierunkach <11-20> oraz bliźniakowanie typu {10-12}<10-11>. Silna tekstura podstawy powstająca podczas procesów przeróbki plastycznej stopów Mg dodatkowo utrudnia ich aktywację”*.
2. W rozdziale 6. Doktorant zamieścił stwierdzenie, że: *„Liczne badania na drodze modelowania komputerowego wykazały, że dodatek Sn wyraźnie obniża uogólnioną energię błędu ułożenia magnezu i prowadzi do łatwiejszej emisji dyslokacji częściowych”*. Nie przedstawiono jednak w jakich badaniach zostało to wykazane.
3. Autor w sposób lakoniczny przedstawia w podrozdziale 7.1. informacje dotyczące wytwarzania stopów Mg-Sn, które, jako modelowe, stanowiły jeden z dwóch elementów założonej w celu i tezie pracy poprawy odkształcalności magnezu, informując, że *„Stopy Mg-Sn zostały wytworzone przez Instytut Metali Nieżelaznych w Oddziale Metali Lekkich w Skawinie w procesie odlewania. Następnie, wlewki poddano wygrzewaniu w piecu próżniowym w temperaturze 520°C i 480°C przez 6 godzin odpowiednio dla stopu Mg-6Sn i Mg-6Sn-1Zn i wyciskaniu na gorąco w temperaturze 420°C do postaci prętów o średnicy 25 mm”*.
4. W rozdziale 7 Materiały i metodyka badawcza przedstawiono wyniki badań w postaci fotografii (rys. 7.1), wykresów/rozkładów (rys. 7.2, 7.3) i tabeli (7.3), które powinny zostać zaprezentowane w rozdziałach 8 i/lub 9.
5. Na str. 75 zamieszczono informację: *„Pomiary DIC prowadzono za pomocą dwóch kamer na powierzchniach czołowej i bocznej rozciąganych próbek...”*. Nie podano jednak informacji o zastosowanych kamerach, czy też być może systemie pomiarowym. Autor wskazuje jedynie odnośnik literaturowy, informując, że *„...szczegółowy opis procedury można znaleźć w [203]”*
6. w dysertacji nie zaprezentowano rzeczywistych urządzeń/stanowisk i procesów w trakcie realizacji prac badawczych (np. walcarek/procesu walcowania, pomiarów metodą DIC, itd.)
7. -str. 62 – użyte stwierdzenie *„...umożliwia wielkoseryjną produkcję dużych blach...”* jest niefortunne. Co oznacza określenie dużych blach? Grubych, długich, szerokich?

Pomimo starannego zredagowania rozprawy wystąpiły w niej błędy edycyjne i niedopatrzenia:

- strona edycyjna w rozdziałach 1-5 oraz 7 pozostawia dużo do życzenia pod kątem zamieszczonych schematów i wykresów, zaczerpniętych z literatury, charakteryzujących się zróżnicowaną wielkością, czcionką, opisami, itd.
- w wielu przypadkach opisy rysunków lub osi na wykresach są w języku angielskim (np. rys. 1.1, 1.2, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 4.1, 5.1, 5.6). Skoro praca została zredagowana w języku polskim to nie powinna zawierać takich elementów, mimo, że dotyczy to przypadków zaczerpniętych z anglojęzycznej literatury. Czy nie jest np. dostępny w literaturze układ fazowy Mg-Sn (rys. 4.1) z polskimi opisami osi?
- liczne schematy nie zostały wykonane samodzielnie przez Autora, natomiast wykonano ksero, skan i zamieszczono w pracy, np. (rys. 1.3, 2.3, 2.4, 2.5, 4.1, 7.6).
- zróżnicowana wielkość czcionki w oznaczeniu a), b), ... np. na rys. 8.2, 8.3, 8.5, 9.1.
- zróżnicowany rodzaj czcionki na wykresach i schematach np. na rys. 8.4, 8.5, 8.6, 8.11, 8.13, 9.9.
- słabo widoczne oznaczenia na rys. 9.27a.

Powyższe uwagi merytoryczne i edycyjne nie umniejszają dużej wartości dysertacji. Uważam rozprawę doktorską za bardzo wartościową i oryginalną.

Ocena końcowa

Ocena przedstawionej do zaopiniowania rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Majchrowicza upoważnia mnie do stwierdzenia, że Autor dokonał wnikliwej analizy stanu zagadnienia i na tej podstawie trafnie sformułował cele rozprawy. Poprzez bardzo szerokie badania materiałowe oraz wnikliwą analizę cele zostały przez Doktoranta osiągnięte.

Podsumowując moją recenzję stwierdzam, że mgr inż. Kamil Majchrowicz wykazał się bardzo dobrą znajomością przedmiotu badań i poprawnie oraz bardzo starannie zredagował dysertację. Wykazał się przy tym bardzo dobrym przygotowaniem merytorycznym, umiejętnością wykorzystania metod, technik i narzędzi badawczych, zdolnością do samodzielnego planowania i realizacji badań naukowych oraz ich analizy.

Recenzowana rozprawa doktorska może być przypisana do dyscypliny naukowej Inżynieria Materiałowa.

Wniosek

Przedłożona do zaopiniowania rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Majchrowicza pt. „Mikrostruktura i właściwości modelowych stopów Mg-Sn przetwarzanych w procesie walcowania z udziałem odkształceń ścinających” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim przez Ustawę o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule z Zakresu Sztuki z dnia 14.03.2003r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595) z późniejszymi zmianami.

W związku z powyższym wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie mgr inż. Kamila Majchrowicza do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.

dr hab. inż. Krzysztof Żaba, prof. AGH

