

Em prof. dr hab. inż. Ferdynand Romankiewicz  
(Uniwersytet Zielonogórski)  
ul. Zachodnia 41/5  
65-552 Zielona Góra

Zielona Góra, 8.09.2019 r.

## **R E C E N Z J A**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Bogusława Augustyna pt. „Kształtowanie struktury i właściwości wybranych stopów magnezu w procesie odlewania półciąglego”, opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Odlewnictwa AGH w Krakowie dr hab. inż. Rafała Dańki, prof. AGH; pismo z dnia 16.07.2019 r. (WO-sd. 510-29-1/2019).**

Stopy magnezu charakteryzują się na ogół gorszymi właściwościami mechanicznymi oraz ograniczonym zakresem temperatury pracy w porównaniu do powszechnie stosowanych materiałów w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym, co powoduje, że ich zastosowanie jest ograniczone. Niewątpliwie wpływ na taką sytuację mają również trudności technologiczne związane z ich topieniem i odlewaniem. Pomimo tego niska gęstość tych stopów ( $1,8\text{g/cm}^3$ ) sprzyja ich rozszerzającemu się zastosowaniu w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym, a nawet technice kosmicznej. Najczęściej stopy magnezu są stosowane m. in. na: elementy karoserii, obręcze kół, obudowy skrzyń biegów, kokpity, różne elementy przyrządów, a nawet bloki silników samochodowych. Zastosowanie wyrobów ze stopów magnezu istotnie redukuje masę współczesnych pojazdów, co ma szczególne znaczenie w technice lotniczej, gdyż

w konsekwencji zmniejsza zużycie paliwa i ogranicza emisje gazów cieplarnianych z sektora transportu. Czynniki te wymuszają rozszerzenie zastosowania wyrobów ze stopów magnezu, co powoduje dynamiczny wzrost ich produkcji w gospodarce światowej. Uzasadnia to podejmowanie badań nad doskonaleniem technologii wytwarzania stopów magnezu mających na celu optymalizację składu chemicznego o raz poprawę ich struktury i właściwości mechanicznych.

Z przedstawionych względów uważam, że dokonany przez mgr inż. Bogusława Augustyna wybór problematyki badawczej i tematu rozprawy doktorskiej jest w pełni uzasadniony.

Recenzowana rozprawa obejmuje 168 stron, składa się z części teoretycznej (I cz.) oraz części eksperymentalnej (II cz.), które łącznie zawierają 10 rozdziałów oraz bibliografii obejmującej 99 pozycji źródłowych. Zawiera 139 rysunków i 52 tabele oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

Autor we wprowadzeniu do rozprawy (rozd. 1) bardzo dobrze uzasadnił celowość podjęcia oraz ukierunkowania zaplanowanych badań. Zwrócił uwagę na złożoność procesu odlewania półciągnego ze względu na wpływ wielu czynników na przebieg krystalizacji wlewka, jednorodność składu chemicznego oraz strukturę. Słusznie stwierdził, że najistotniejszą rolę w procesie odlewania półciągnego odgrywają takie czynniki jak: prędkość odlewania, szybkość krzepnięcia oraz intensywność chłodzenia. Jest zatem uzasadnione podjęcie badań nad wpływem tych czynników na kształtowanie struktury wlewków.

W rozdziale drugim zatytułowanym „Ogólna charakterystyka magnezu i jego stopów” Autor zawarł informacje o technologii odlewania stopów magnezu oraz przedstawił zasady oznaczania tej grupy stopów (na

przykładzie stopu AZ91D) według ASTM B951, a także według normy PN-EN 1754:2002. Scharakteryzował wpływ wybranych pierwiastków na magnez i jego stopy pod kątem syntezy stopów. Opisał wpływ dodatków stopowych na strukturę i własności stopów magnezu z uwzględnieniem tworzonych układów równowagi fazowej. Zaprezentował technologię topienia stopów magnezu oraz strukturę wybranych stopów. Podał przykłady zastosowania elementów konstrukcyjnych ze stopów magnezu w technice motoryzacyjnej i lotniczej. Dużo uwagi poświęcił Autor procesom modyfikacji stopów magnezu analizując mechanizm wpływu różnych dodatków modyfikujących na rozdrobnienie struktury.

W rozdziale trzecim zatytułowanym „Odlewanie półciągle” Autor wnikliwie przeanalizował proces odlewania półciąglego charakteryzując różne rozwiązania krystalizatorów oraz technologii odlewania. Dokonał również analizy wpływu parametrów tego procesu na ukształtowanie izoterm rozkładu temperatury decydującego o kształcie profilu, tzw. „jeziorka” w krystalizującym wlewk. Do głównych parametrów procesu odlewania zaliczył: temperaturę metalu, prędkość odlewania i ilość wody chłodzącej (natężenie przepływu).

W rozdziale czwartym zatytułowanym „Kształtowanie plastyczne stopów magnezu” przedstawił Autor rodzaje oraz ważne aspekty procesu wyciskania. Przeanalizował wpływ temperatury procesu oraz prędkości odkształcania i stopnia zgniotu na strukturę odkształcanych stopów magnezu AZ31 oraz właściwości mechaniczne AZ91.

Przedstawione w teoretycznej części rozprawy rozważania Autora stanowiły dobrą podstawę do określenia celu i sformułowania tez pracy.

Autor przyjął (rozd. 5), że *"Celem ogólnym pracy było badanie wybranych z grup Mg-Al. Oraz Mg-Zn, odlewanych we wlewki w systemie półciąglym pionowym VDC(z ang. Vertical Direct Casting), pod kątem otrzymania materiałów o możliwie najwyższych właściwościach"*.

Za cel szczegółowy uznał natomiast *„Określenie możliwości kształtowania struktury i właściwości stopów magnezu przeznaczonych do procesów przeróbki plastycznej, poprzez sterowanie parametrami odlewania i modyfikacji w procesie odlewania półciąglącego"*.

Autor słusznie założył, że powyższe cele pracy mogą być osiągnięte w badaniach na stopach MgAl9Zn (AZ91), MgZn6 oraz MgZn6Zr (ZK60A).

Tezy rozprawy sformułował następująco:

- *„Poprzez dobór właściwych parametrów odlewnia półciąglącego (prędkość odlewania i/lub intensywność chłodzenia) można sterować frontem krystalizacji w celu kształtowania struktury odlewu dla uzyskania dobrej jednorodności składu chemicznego"*.
- *„Poprzez sterownie parametrami procesu odlewania i procesem modyfikacji możliwe jest uzyskanie: rozdrobnienia średniej wielkości ziarna wzdłuż średnicy wlewka, zmniejszenie rozrzutu wielkości ziarna wzdłuż średnicy wlewka, zmiany właściwości fizycznych i mechanicznych (gęstość, HB) wlewków, a w ślad za tym właściwości mechanicznych elementów wyciskanych (RM,  $R_{p0,2}$ , HB i  $A_5$ )"*.

Tezy rozprawy zostały sformułowane właściwie i dobrze określają zamierzenia Autora wynikające z tytułu rozprawy oraz są zbieżne z określonym w niej celem. Autor nieco niefortunnie użył określenia „rozdrobnienie średniej wielkości ziarna”, poprawniejsze wydaje się określenie „rozdrobnienie ziarna”.

Opracowany przez Autora plan badań jest w pełni uzasadniony, a przyjęta metodyka badawcza jest właściwa. Do analizy składu chemicznego został zastosowany spektrometr emisyjny (OES) firmy ARL 4460. Badania struktury przeprowadzono przy użyciu mikroskopów optycznych Olympus GX71 oraz NIKON ECLIPSE LV150 z cyfrową kamerą rejestracji obrazu i systemem analizy obrazu. Badania metodą mikroskopii elektronowej przeprowadzono przy użyciu mikroskopu skaningowego FEI Inspekt F50 z przystawką EDS oraz mikroskopu elektronowego HITACHI S-3400N, wyposażonego w system EOS Thermo Noran. Do badania wad nieciągłości zastosowano defektoskopię ultradźwiękową z wykorzystaniem defektoskopu ultradźwiękowego USN 60 produkcji GE. Właściwości mechaniczne określano przy użyciu maszyny Intron 5582 oraz twardościomierza Duramin 2500E.

Badania eksperymentalne przeprowadził Doktorant w trzech etapach zaprezentowanych w rozdziałach 6, 7 i 8.

Pierwszy etap badań (rozd. 6) obejmował badania nad kształtowaniem mikrostruktury i właściwości stopu MgAl9Zn poprzez zmianę szybkości krzepnięcia, wynikającej ze zmiany parametrów odlewania. Wlewki odlewano na stanowisku odlewu półciąglego z wykorzystaniem krystalizatora hot-top pośredniczy 102 mm. Badano je z uwzględnieniem zjawiska segregacji pierwiastków stopowych wzdłuż średnicy wlewków, odwzorowania frontu krystalizacji oraz stanu makrostruktury (poprzecznie oraz wzdłuż wlewka). Zmieniano prędkość odlewania w zakresie 2,4 - 4,0 mm/s. Wpływ zmiany prędkości odlewania na rozkład zawartości składników stopowych na średnicy wlewka przedstawiono z dużą starannością w postaci wykresów (rys. 6.4 – 6.21). Badania te wykazały występowanie zjawiska segregacji odwrotnej.

Badając rzeczywisty front krystalizacji wlewków z zastosowaniem tzw. markerów (miedzi i cynku) uzyskał Doktorant bardzo dobry efekt odwzorowania profilu frontu krystalizacji przy dodaniu czystego cynku do strugi metalu na rynnie doprowadzającej metal do krystalizatora. Badania te wykazały, że temperatura ciekłego stopu powinna wynosić 700°C, natomiast szybkość odlewania powinna mieścić się w zakresie od 2,1 mm/s do 4,0 mm/s. Stwierdzono również, że zminimalizowanie niejednorodności składu chemicznego wlewka osiąga się przy możliwie najbardziej płaskim froncie krystalizacji. Jakość powierzchni wlewka i efektywność procesu odlewania wymagają kompromisu pomiędzy głębokością jeziora a pozostałymi czynnikami procesu.

Drugi etap badań (rozdz. 7) miał na celu kształtowanie mikrostruktury i właściwości stopu MgAl9Zn poprzez wprowadzenie zarodków krystalizacji. Jako modyfikatory stanowiące źródło zarodków krystalizacji wykorzystał Doktorant: sześciochloroetan oraz handlowe modyfikatory Nucleant 200 oraz Nucleant 5000 (producent-Firma Foseco). Dodatki modyfikujące w ilości 0,6% masy metalu wprowadzono w dwu porcjach do metalu na rynnie doprowadzającej do krystalizatora. Prędkość odlewania wynosiła 2,5 mm/s natomiast ilość wody chłodzącej 3 m<sup>3</sup>/h przy temperaturze metalu w rozdzielaczu wynoszącej 710°C. Doktorant zbadał rozkład zawartości aluminium, cynku i manganu we wlewkach wzdłuż ich średnicy. Stwierdzono najbardziej równomierny rozkład badanych składników stopowych we wlewkach stopu modyfikowanego sześciochloroetanem. Badania metalograficzne wykazały korzystny wpływ modyfikatorów na wielkość i kształt ziarna, przy czym największy wpływ zaobserwowano po dodaniu preparatów Nucleant 200 i Nucleant

5000. Średnia wielkość ziarna uległa zmniejszeniu z 200-230  $\mu\text{m}$  do 185  $\mu\text{m}$ . Modyfikatory spowodowały wzrost twardości stopu.

Przeprowadzone badania mikrostruktury wlewków przy wykorzystaniu mikroskopii skaningowej z analizą składu chemicznego wykazała występowanie w przestrzeniach międzydendrytycznych faz manganowo-żelazowych oraz faz  $\text{AlMgZn}$  i  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ . W strefie brzegowej wlewków stwierdzono obecność faz  $\text{AlMnSi}$ .

Kierując się tym, że wlewki z odlewania półciągnięgo stanowią materiał wstępny do procesów przeróbki plastycznej, przeprowadził Doktorant wyciskanie wlewków w pręty o średnicy 10 mm na prasie poziomej (500T) z wykorzystaniem matrycy trzyotworowej. Badania właściwości mechanicznych uzyskanych prętów wykazały, że dodatki modyfikujące nie spowodowały wzrostu wskaźników wytrzymałościowych badanego stopu.

Opis przebiegu i wyniki przeprowadzonych badań przedstawił Doktorant bardzo przejrzystie i starannie.

Trzeci etap badań (rozd. 8) miał na celu kształtowanie mikrostruktury i właściwości stopów  $\text{MgZn6}$  i  $\text{MgZn6Zr}$  poprzez zmianę szybkości krzepnięcia oraz wprowadzanie zarodków krystalizacji. Zmiana szybkości krzepnięcia wynikała ze zmiany parametrów odlewania. Badania przeprowadzone w zakresie prędkości odlewania w przedziale 2,0 – 5,0 mm/s wykazały, że przy dużej prędkości odlewania pojawiają się pęknięcia wewnętrzne wlewków. Z tego względu ograniczono prędkość odlewania do zakresu 2,0 – 3,0 mm/s. Ilość wody chłodzącej ustalono na 2,5 – 3,5  $\text{m}^3/\text{h}$ . Udział cyrkonu w składzie chemicznym stopu wynosił 0,78%mas. Rzeczywisty front krystalizacji wlewków (rys. 8.5) ujawniono poprzez dodatek czystego cynku. Zbadano mikro- i makrostrukturę wlewków bez

udziału cyrkonu oraz z jego udziałem. Wykonano również zdjęcia mikrostruktury za pomocą mikroskopii skaningowej oraz przeprowadzono analizę składu chemicznego w mikroobszarach SEM – EDS. W rozprawie zamieszczono liczne wykresy widm EDS dla próbek odlewanych przy poszczególnych parametrach odlewania oraz bez udziału cyrkonu i z jego udziałem. Zbadano wpływ parametrów odlewania na gęstość i porowatość próbek oraz prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej i tłumienie drgań. Określono również wpływ parametrów odlewania oraz cyrkonu na właściwości mechaniczne badanych stopów.

Przeprowadzone tym etapie badania są kompleksowe i racjonalne. Doprowadziły one do ważnych wniosków wynikających ze zmiany parametrów odlewania oraz wpływu cyrkonu na strukturę i właściwości badanych stopów. Wykazano, że cyrkon wywiera silniejszy wpływ na strukturę i właściwości stopu magnezu z cynkiem aniżeli zmiana parametrów odlewania. Dodatek cyrkonu do stopu MgZn6 spowodował zmniejszenie średniej wielkości ziarna ze 150 – 180  $\mu\text{m}$  do 40 – 80  $\mu\text{m}$ . Stwierdzono, że dodatek cyrkonu powoduje niewielki wzrost prędkości propagacji fal ultradźwiękowych i obniżenie tłumienia drgań. Wykazano wyraźny wpływ cyrkonu jako modyfikatora na wzrost właściwości wytrzymałościowych stopu MgZn6 po przeróbce plastycznej.

Dokonane przez Doktoranta podsumowanie (rozd. 9) wymienionych trzech etapów badań stanowi bardzo wnikliwą i rzeczową analizę warunków (w tym parametrów odlewania) badań oraz ich wpływu na osiągnięte wyniki badań. Dotyczy to próbek badanych stopów w stanie po odlewaniu oraz po przeróbce plastycznej. Wyniki zaprezentowanych w rozprawie badań eksperymentalnych stanowią bardzo bogate i wartościowe źródło informacji o możliwości doskonalenia struktury i właściwości



badanych stopów magnezu w procesach odlewania półciąglęgo i przeróbki plastycznej. Niewątpliwie może to istotnie przyczynić się do rozszerzenia zastosowania badanych stopów magnezu w praktyce przemysłowej.

Sformułowane przez mgr inż. Bogusława Augustyna wnioski końcowe (rozdz. 10) są bardzo rzeczowe i obejmują, wynikające z przeprowadzonych badań eksperymentalnych, najważniejsze spostrzeżenia.

W oparciu o szczegółowe wyniki badań Autor sformułował ogólne wnioski, które stwierdzają, że:

- *„zmiana parametrów odlewania półciąglęgo (prędkości odlewania i/lub intensywności chłodzenia) miała istotny wpływ na sterowanie frontem krystalizacji”*,
- *„sterowanie parametrami procesu odlewania jak również zastosowanie zabiegu modyfikacji pozwoliło na rozdrobnienie wielkości ziarna oraz zmniejszenie jego rozrzutu wzdłuż średnicy wlewka, a także zmianę własności fizycznych i mechanicznych wlewków oraz własności mechanicznych elementów wyciskanych z badanych stopów magnezu”*.

Słuszny jest również wniosek stwierdzający, że *„z przeprowadzonych prac teoretycznych i eksperymentalnych wynika ponadto potrzeba dalszych pogłębionych badań w zakresie wpływu składu chemicznego – na kształtowanie jakości wlewków i wyprasek – na co wskazują dotychczasowe wyniki uzyskane w pracy”*.

Oceniana rozprawa cechuje się wysokim poziomem merytorycznym i nie zawiera błędów terminologicznych oraz językowych.

Podsumowując moją opinię stwierdzam, że Doktorant bardzo starannie i poprawnie zrealizował obszerną pracę badawczą o dużej

wartości naukowej i bardzo ważnych aspektach aplikacyjnych. Wykazał się przy tym bardzo dobrym przygotowaniem teoretycznym, zdolnością samodzielnego planowania i realizacji badań naukowych oraz umiejętnością właściwego wykorzystania nowoczesnej aparatury i metodyki badawczej. Sformułowane przez Autora rozprawy tezy oraz określony cel badań zostały potwierdzone bardzo wartościowymi wynikami badań, które bardzo istotnie rozszerzają stan wiedzy w zakresie teoretycznym oraz aplikacyjnym. Uważam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska zasługuje na wyróżnienie.

Dokonana ocena utwierdza mnie w przekonaniu, że rozprawa doktorska mgr inż. Bogusława Augustyna pt. „Kształtowanie struktury i właściwości wybranych stopów magnezu w procesie odlewania półciągnącego”, zarówno pod względem badanej problematyki jak też poziomu naukowego, dobrze spełnią wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki z dnia 14.03.2003 r. z późniejszymi zmianami.

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Bogusława Augustyna do publicznej obrony przedłożonej rozprawy.



prof. dr hab. inż. Ferdynand Romankiewicz