

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

Zielona Góra, 3.09.2019 r.

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

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Piękosia pt. " Strefa działania ochładzalników zewnętrznych w odlewach ze stopów Al-Si wykonywanych w formach piaskowych", opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Odlewnictwa AGH w Krakowie dr hab. inż. Rafała Dańki, prof. AGH; pismo z dnia 2.07.2019 r. (WO-sd. 510-27-1/2019).**

Intensywny rozwój technik cyfrowych, w tym licznych nowoczesnych programów komputerowych, stwarza szerokie możliwości analizowania różnych procesów (m.in. technologicznych) z wykorzystaniem symulacji komputerowej. Rozszerza to możliwości nauki w zakresie optymalizacji badań i prognozowania wyników analizowanych procesów, m.in. zmian struktury i właściwości odlewów. Efekty symulacyjnych badań są jednak w dużym stopniu uzależnione od istniejącej bazy fizycznych parametrów wykorzystywanych w tego rodzaju badaniach.

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Piękosia jest bardzo dobrym przykładem gromadzenia ważnych informacji dotyczących wpływu warunków krystalizacji na strukturę i właściwości siluminów odlewanych w formach piaskowych przy zastosowaniu zewnętrznych ochładzalników.

Z przedstawionych względów uważam, że Autor rozprawy dokonał właściwego wyboru problematyki badawczej i tematu rozprawy doktorskiej.

Recenzowana rozprawa obejmuje 163 strony, składa się z dwu części zawierających łącznie 9 rozdziałów oraz bibliografii obejmującej 80 pozycji źródłowych, w tym dwie współautorskie publikacje Doktoranta. Zawiera również streszczenie w języku polskim i angielskim oraz załącznik (32 strony) z rysunkami i tabelami. Rozprawa zawiera łącznie 197 rysunków (w tym 21 w załączniku) oraz 87 tabel (w tym 11 w załączniku).

Streszczenie stanowi dobre wprowadzenie w problematykę rozprawy, jednak Autor mógł zawrzeć w nim więcej informacji o zrealizowanych badaniach.

Pierwsza część rozprawy, stanowiąca teoretyczne rozważania, zatytułowana „Stopy aluminium – charakterystyka; proces krystalizacji” zawiera 6 rozdziałów. W pierwszym rozdziale (1.1) zatytułowanym „Stopy aluminium i ich ogólna charakterystyka” przedstawił Autor podział oraz charakterystykę stopów Al-Cu, Al-Mg, Al-Zn, Al-Si oraz Al-Si-Cu.

W drugim rozdziale (1.2) zatytułowanym „Podział stopów aluminium-krzem” przedstawił Autor charakterystykę stopów Al-Si z indywidualnym udziałem takich metali jak magnez, miedź, mangan oraz krzem oraz łącznym udziałem miedzi, niklu i manganu. Autor słusznie dokonał charakterystyki stopów z podziałem na: podeutektyczne, okołoeutektyczne i nadeutektyczne, akcentując struktury i właściwości tych grup stopów. Dodatkowo wyróżnił stopy tłokowe oraz stopy wieloskładnikowe, co jest w pełni uzasadnione ich odmiennym składem chemicznym i zastosowaniem. Uwzględnił nowe trendy zastosowania w tych stopach

takich metali jak: chrom, kobalt, molibden i wolfram. Słusznie też zwrócił uwagę na celowość kontynuacji badań nad zastosowaniem stopów Al-Si z podwyższoną zawartością cynku.

Na uznanie zasługuje fakt, iż Autor rozprawy w swych rozważaniach uwzględnił wpływ mikrodotyków powodujących istotny wpływ na strukturę i właściwości analizowanych grup stopów poprzez oddziaływanie modyfikujące wywołujące zmianę morfologii eutektycznego krzemu, rozdrobnienie ziarn eutektycznych lub też kryształów krzemu pierwotnego w stopach nadeutektycznych.

W trzecim rozdziale (1.3) zatytułowanym „Obróbka cieplna stopów aluminium krzem” Autor opisuje możliwość poprawy właściwości mechanicznych stopów Al-Si poprzez obróbkę cieplną. Słusznie stwierdza, że obróbka cieplna obejmująca przesycanie stopu powoduje ujednorodnienie struktury i podwyższa właściwości mechaniczne. Szkoda natomiast, że opisując proces utwardzania wydzieleniowego pomija rolę miedzi oraz magnezu i krzemu w mechanizmie tego procesu ograniczając się do wpływu zawartości miedzi na właściwości mechaniczne stopu AlSi16Cu po obróbce cieplnej T6.

W zawartym rozdziale (1.4) zatytułowanym „Krystalizacja stopów aluminium-krzem” Autor dokonał analizy procesu krystalizacji stopów Al-Si, słusznie zwracając uwagę na zróżnicowanie przebiegu krystalizacji stopów podeutektycznych, eutektycznych i nadeutektycznych. Zwrócił również uwagę na przebieg krystalizacji wieloskładnikowych stopów aluminium krzem, których krystalizacja jest bardziej złożona ze względu na tworzenie się faz międzymetalicznych. Analiza ta została przeprowadzona bardzo wnikliwie i dobrze charakteryzuje przebieg krystalizacji analizowanych stopów. Ważne jest również zwrócenie przez

Autora uwagi na metody analizy ATD i ATND, które umożliwiają miarodajne śledzenie przebiegu krzepnięcia z uwzględnieniem przemian fazowych oraz tworzeniem i wydzielaniem się różnych faz międzymetalicznych.

W piątym rozdziale (1.5) zatytułowanym „Sterowanie krzepnięciem odlewów” Autor przybliżył istotę krzepnięcia kierunkowego oraz równoczesnego słusznie akcentując ich zróżnicowanie. Zwrócił uwagę na celowość stosowania skorygowanego modułu krzepnięcia, który umożliwia analizowanie węzłów cieplnych odlewów o złożonym kształcie. Słusznie stwierdził, że przy wartości współczynnika zasilania  $K\tau < 1$  dla uzyskania wymaganych właściwości odlewu konieczne jest kierowanie procesem krzepnięcia. Właściwie określił czynniki, które mogą być wykorzystane do kierowania przebiegiem procesu krzepnięcia. Zwrócił uwagę na istotną rolę jaką w tym procesie mogą spełniać ochładzalniki, które w przypadku stopów Al-Si najczęściej stosowane są jako ochładzalniki zewnętrzne.

Zakończenie tego rozdziału dotyczy wpływu warunków krzepnięcia na właściwości stopów aluminium-krzem. Autor właściwie określa czynniki wpływające na strukturę siluminów, słusznie akcentując również nieciągłości struktury takie jak: porowatość skurczowa i porowatość gazowa oraz wydzielenia wtrąceń i zanieczyszczeń.

Zaprezentowana przez Autora charakterystyka odmian struktury eutektyki w stopach Al-Si wydaje się nieco lakoniczna. Według E. Frasia eutektyka w stopach Al-Si jest eutektyką nieregularną zaliczoną do grupy eutektyk anormalnych. Cechuje się tym, że podczas wzrostu eutektyki występuje zjawisko rozgałęziania się fazy ścianowej (krzemu)

spowodowane nietrwałością frontu krystalizacji. Nasuwa się więc pytanie jak interpretować ujęte przez Autora określenie „eutektyka normalna”.

Następnie Autor bardzo wnikliwie i kompetentnie scharakteryzował wpływ szybkości chłodzenia w trakcie procesu krystalizacji stopów Al-Si na ich strukturę. Słusznie zwrócił uwagę na możliwość oceny struktury tej grupy stopów z uwzględnieniem parametru strukturalnego DAS (Dendrit Arms Spacing) dotyczącego charakterystyki dendrytów stałego roztworu  $\alpha$  oraz zmniejszenia odległości międzyfazowej wydzieleni krzemu eutektycznego. W pełni słuszne jest stwierdzenie Autora, że *„ukształtowanie struktury wywołanej poprzez zmianę warunków krystalizacji odlewu w znaczący sposób oddziałują na własności odlewów ze stopów aluminium z krzemem”*. Wynika z tego celowość badań nad wykorzystaniem ochładzalników do sterowania procesem krzepnięcia stopów Al-Si, zwłaszcza w formach piaskowych.

W szóstym rozdziale (1.6) zatytułowanym „Ochładzalniki” przeprowadził Autor rozważania dotyczące rodzaju materiałów stosowanych na ochładzalniki oraz procesów wymiany ciepła pomiędzy odlewem i ochładzalnikiem zewnętrznym. Przeanalizował warunki, w jakich można osiągnąć wysoki gradient temperatury umożliwiający skuteczne usunięcie jam skurczowych i porowatości w odlewie przy ograniczeniu liczby nadlewów. Zwrócił uwagę na konieczność zachowania przerw dylatacyjnych oraz celowość ich wymijania się w przypadkach ochładzalników stosowanych dwustronnie względem ścianki odlewu. Autor słusznie zwrócił uwagę na możliwość zróżnicowania usytuowania ochładzalników względem węzła cieplnego przy zróżnicowaniu jego geometrycznego kształtu. Na podstawie analizowanej literatury sformułował wniosek stwierdzający, że istnieje *„możliwość sterowania*

*zarówno skalą rozdrobnienia struktury stopów Al-Si jak również zasięgiem oddziaływania ochładzalników, a w strefie oddziaływania ochładzalnika nastąpi zmiana właściwości odlewu takich jak twardość i gęstość”.*

Przeprowadzone w literaturowo-teoretycznej części (cz. I) rozprawy rozważania Autora dobrze uświadamiają czytelnikowi różne stany struktury stopów Al-Si oraz możliwość ich zmiany poprzez racjonalne zastosowanie zewnętrznych ochładzalników.

Badania własne Autora stanowiące II część rozprawy zawierają łącznie z wnioskami 5 rozdziałów, w tym obszerne i precyzyjne opisy metodyki badań oraz wyników badań. Na wstępie tej części zaprezentował Autor cel i tezy pracy (2.1).

Autor wyróżnił trzy podstawowe cele rozprawy:

- *„Wyznaczenie strefy działania ochładzalników zewnętrznych stosowanych w technologii form piaskowych w odlewach wykonywanych ze stopów aluminium-krzem”.*
- *„Określenie szybkości stygnięcia i prędkości krystalizacji w funkcji odległości od krawędzi ochładzalnika dla wybranych gabarytów ochładzalników oraz rodzaju materiału użytego do ich wykonania”.*
- *„Wyznaczenia, który okres w procesie krystalizacji stopów aluminium-krzem determinuje uzyskiwanie wysokich właściwości wytrzymałościowych”.*

Określone przez Autora cele rozprawy uznaję za uzasadnione i dobrze precyzujące badawcze zamierzenia Autora.

Opierając się na dokonanej analizie literatury oraz badaniach wstępnych sformułował Autor cztery tezy dotyczące oddziaływania składników w stopach aluminium-krzem:

1. „Strefa zasięgu działania ochładzalnika ( $S_{OCH}$ ) zależy od grubości ścianki odlewu (g) i w ujęciu ogólnym ma ona charakter:  $S_{OCH} \geq 2g$ ”.
2. „Zwiększając grubość (masę) ochładzalnika, można zwiększyć strefę oddziaływania ochładzalnika nawet do 5g, szczególnie w układzie jego usytuowania na bocznej ścianie - od czoła odlewu”.
3. „Szybkość stygnięcia w okresie wzrostu roztworu stałego  $\alpha$  ( $P_{K-C}$ ) powyżej  $1,0^{\circ}C/s$  umożliwia uzyskanie wysokich wartości właściwości wytrzymałościowych”.
4. „Większa zdolność odprowadzania ciepła przez ochładzalnik, osiągnięta na drodze doboru materiału na ochładzalnik, ma wpływ poszczególnych etapach krystalizacji stopów Al-Si na mikrostrukturę stopu oraz jego właściwości fizyczne i mechaniczne”.

Tezy 3 i 4 mają charakter ogólny i dotyczą istoty rozprawy. Tezy 1 i 2 są uszczegółowione lecz również wymagały potwierdzenia. Wszystkie tezy są sformułowane właściwie i dobrze określają zamierzenia Autora wynikające z tytułu rozprawy.

W drugim rozdziale (2.2) badań własnych Autor zaprezentował bardzo precyzyjnie i przejrzysto przyjętą metodykę badań. Określił geometryczne kształty i rozmiary próbników odlewów w postaci płyt oraz miejsca usytuowania ochładzalników. Bardzo przejrzysto przedstawił zestawienie warunków i parametrów wykonywanych badań (tab. 2.1). Zdefiniował przyjęty wskaźnik ochładzania powierzchni odlewu przez ochładzalnik. Dokonał doboru podeutektycznych stopów AlSi7Mg i AlSi9Mg zwiększając w nich zawartość magnezu do 0,55% oraz miedzi do 1%. Określił materiał form, warunki topienia i obróbki cieplnej oraz warunki analizy ATD i miejsca pobierania próbek z odlewów próbników.

Dokonał wyboru metody badania składu chemicznego stopów (spektrometr emisyjny SPECTROMAX z wzbudzeniem iskrowym) oraz określania porowatości próbek. Jako wskaźniki do oceny zmian w strukturze badanych próbek słusznie przyjął parametry strukturalne SDAS (odległości pomiędzy gałęziami drugiego rzędu dendrytów fazy  $\alpha$ ) oraz  $L_{\text{sr Si}}$  (średnia długość eutektycznych wydzieleń krzemu).

W celu porównania rzeczywistych warunków krystalizacji i uzyskanych właściwości badanych odlewów uznał Autor za celowe wykorzystanie programu symulacyjnego procesów odlewania MAGMASOFT®.

W trzecim rozdziale badań własnych (2.3) przedstawił Autor opis i wyniki bardzo obszernych badań eksperymentalnych. Główny cykl badań został przeprowadzony z użyciem stopu AlSi7Cu1Mg0,5 odlewane do form piaskowych. Badania nad oddziaływaniem ochładzalników zewnętrznych przeprowadzono dla odlewów płyt o różnych wymiarach: 160x160x10mm, 240x160x10mm, 240x160x15mm w poziomym układzie odlewu płyty; oraz 160x160x13mm i 160x160x30mm w pionowym układzie odlewu z czołowym umieszczeniem ochładzalnika. W celu uwzględnienia wpływu na strukturę i właściwości stopów Al-Si zmiennych szybkości krystalizacji przeprowadzono badania przy odlewaniu próbek w formach metalowych o zmiennej temperaturze (140, 210, 260, 360, 370, i 400°C) z użyciem stopu AlSi9Cu1Mg0,5. Efekty oddziaływania ochładzalników przy odlewaniu płyt w formie piaskowej oraz zastosowania formy metalowej o zmiennej temperaturze, oceniano poprzez pomiary:

- rozdrobnienia mikrostruktury - parametry SDAS i  $L_{\text{sr Si}}$ ,
- wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ ,



- wydłużenie  $A_5$ ,
- twardość HBW,
- gęstość stopu.

Autor analizował wyniki badań z uwzględnieniem zróżnicowania szybkości stygnięcia odlewów próbnych, a także z zastosowaniem obróbki cieplnej.

Wyniki badań zaprezentował Autor w licznych tabelach oraz graficznie w postaci bardzo przejrzyste wykonanych wykresów współzależności badanych parametrów, a także wysokiej jakości zdjęć mikrostruktury. Zakres zrealizowanych badań, oraz bardzo staranne i przejrzyste zaprezentowanie ich wyników są imponujące.

W czwartym rozdziale badań własnych (2.4) dokonał Autor bardzo wnikliwego i zarazem obszernego podsumowania wyników badań. Przedstawił wyniki badań w postaci rysunków i tabel uogólniających współzależności badanych parametrów ( $SDAS$ ,  $L_{\text{SrSi}}$ ,  $RM$ ,  $A_5$ ,  $HBW$ ,  $\rho$ ,  $P$ ) w aspekcie wpływu ochładzalników z uwzględnieniem, spowodowanej przez ich oddziaływanie, szybkości stygnięcia odlewu.

Prezentując w ostatnim rozdziale badań własnych wnioski końcowe Autor dobrze określił wynikające z przeprowadzonych badań efekty. Spośród sformułowanych przez Autora wniosków można wyróżnić wnioski uogólnione oraz szczegółowe.

Do pierwszej grupy można zaliczyć następujące ważne stwierdzenia:

- *„Strefa (zasięg) działania ochładzalników zewnętrznych stosowanych przy odlewaniu stopów Al-Si zależy od grubości ścianki odlewu, jej położenia (poziomo lub pionowo) oraz umiejscowienia*

*ochładzalnika – na powierzchni ścianki czy na czole ścianki odlewu”.*

- *„Zwiększając szybkość stygnięcia na drodze doboru wielkości i materiału ochładzalnika można sterować procesem krystalizacji w strefie działania ochładzalnika wpływając na mikrostrukturę stopu oraz właściwości fizyczne i mechaniczne”.*
- *„Szybkość stygnięcia w okresie wzrostu roztworu stałego  $\alpha$  ( $P_K - C$ ) powyżej  $1,0^\circ\text{C/s}$  osiągnięta w strefie działania ochładzalników zewnętrznych umożliwia uzyskanie wysokich właściwości wytrzymałościowych oraz korzystnej drobnoziarnistej struktury bez porowatości skurczowych”.*
- *„Pośpieszną, nieniszczącą metodę wyznaczania strefy działania ochładzalników odlewów ze stopów  $\text{AlSi7Mg}$  wykonanych w formach piaskowych można by oprzeć na pomiarach twardości, szczególnie wtedy gdy odlewy są po obróbce cieplnej-ulepszeniu cieplnym”.*

Użycie przez Autora sformułowania „ulepszanie cieplne” w odniesieniu do stopu  $\text{AlSi7Cu1Mg}$  jest nieprecyzyjne.

Inne szczegółowe stwierdzenia Autora są również ważne oraz właściwe i określają precyzyjnie zbadane w rozprawie współzależności geometrycznych i fizycznych cech ochładzalników względem grubości ścianki odlewu próbnego (płyty), strefę zasilania oraz ilościowe zmiany wskaźników właściwości mechanicznych.

Za bardzo ważne uznaję stwierdzenie Autora: *„Zależności te mogą mieć charakter zaleceń technologicznych i być przydatne na etapie projektowania technologii formy i wykonania wysokojakościowych odlewów ze stopów aluminium-krzem”.*

Opiniowana rozprawa cechuje się wysokim poziomem merytorycznym i nie zawiera błędów terminologicznych oraz językowych, a jedynie nieliczne błędy literowe.

Zrealizowana rozprawa doktorska cechuje się wysokim poziomem naukowym i zawiera bardzo ważne aspekty aplikacyjne, które mogą być szeroko wykorzystane przy symulacji procesów krystalizacji odlewów ze stopów Al-Si.

Ocena przedstawionej do zaopiniowania rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Piękosia upoważnia mnie do stwierdzenia, że Autor dokonał trafnego wyboru problematyki badawczej i tematu rozprawy, a realizując go przy wykorzystaniu właściwie dobranej i nowoczesnej metodyki badawczej, zyskał bardzo wartościowe wyniki badań stanowiące bardzo rozległą i bogatą bazę danych o kształtowaniu struktury i właściwości stopów Al-Si krzepnących w formach piaskowych przy oddziaływaniu zewnętrznych ochładzalników. Stworzył tym szerokie możliwości sterowania procesem krzepnięcia i skutecznego wpływania na strukturę i jakość odlewów ze stopów Al-Si.

Podsumowując moją opinię stwierdzam, że Doktorant bardzo starannie i poprawnie zrealizował obszerną pracę badawczą o dużej wartości naukowej i aplikacyjnej. 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 ważnymi wynikami badań, które bardzo istotnie rozszerzają stan wiedzy w zakresie teoretycznym oraz

aplikacyjnym. Uważam, że rozprawa mgr inż. Marcina Piękosia zasługuje na wyróżnienie.

Dokonana ocena utwierdza mnie w przekonaniu, że rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Piękosia pt. „Strefa działania ochładzalników zewnętrznych w odlewach ze topów Al-Si wykonywanych w formach piaskowych”, zarówno pod względem problematyki jak też poziomu naukowego, dobrze spełnia 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. Marcina Piękosia do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.

prof. dr hab. inż. Ferdynand Romankiewicz