

dr hab. inż. Dariusz Jędrzejczyk  
prof. nadzw. ATH  
Wydział Budowy Maszyn i Informatyki  
Akademia Techniczno - Humanistyczna  
ul. Willowa 2  
43-309 Bielsko-Biała

Recenzja pracy doktorskiej **mgr inż. Marcina Piękosia**, pt. „**Strefa działania ochładzalników zewnętrznych w odlewach ze stopów Al-Si wykonywanych w formach piaskowych**” opracowana na zlecenie Rady Wydziału Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dnia 1.07.2019.

## 1. Charakterystyka pracy

Recenzowana praca dotyczy oceny/analizy wpływu działania ochładzalników zewnętrznych na zmianę struktury i właściwości badanego stopu (AlSi7Cu1Mg0,5, AlSi9Cu1,4Mg0,5), z którego odlewano płyty o różnych wymiarach (160x160x10mm, 240x160x10mm, 240x160x15mm – płyta pozioma, 160x160x13mm, 160x160x30mm – płyta pionowa). Efekt wpływu ochładzalnika oceniano poprzez pomiary szybkości stygnięcia, analizę mikrostruktury (parametry SDAS,  $L_{\text{Si}}$ ), pomiary właściwości mechanicznych (wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ , wydłużenie  $A_5$ , twardość HBW). W pracy badano wpływ ochładzalników wykonanych z miedzi i żeliwa w odniesieniu do płyt usytuowanych w pozycji poziomej i pionowej, a uzyskane wyniki odniesiono do tych, jakie otrzymano bez zastosowania ochładzalnika. Podjęta przez Autora tematyka stanowi bardzo ważne zagadnienie w aspekcie zarówno naukowym, jak i aplikacyjnym. Analiza poruszanej tematyki w recenzowanej pracy jest celowa i zapewnia uzyskanie nowej wiedzy teoretycznej i praktycznej.

Recenzowana praca zawiera 163 strony. Praca składa się z części teoretycznej i badawczej, w których zamieszczono 96 rysunków i 76 tabel. Dodatkowo do pracy został załączony spis rysunków (załącznik 1), gdzie załączono dodatkowo 21 rysunków i 11 tabel. Zamieszczona bibliografia zawiera 80 pozycji, w tym artykuły z czasopism naukowych o zasięgu światowym wydane w latach 2016 i 2017. Taki zestaw literatury sugeruje, że w pracy opisano aktualny stan wiedzy z kraju i zagranicy.

Rozdział pierwszy pt. „Streszczenie” chyba przez pomyłkę otrzymał taki tytuł, gdyż zawiera informacje wstępne nt. stopów aluminium, czynników wpływających na właściwości odlewanych stopów oraz roli ochładzalników w kształtowaniu się mikrostruktury stopów i sposobie oceny strefy działania ochładzalników. W związku z tym w pracy brak jest streszczenia w języku polskim i angielskim.

Cześć I pracy dotyczy analizy literatury, i tak w rozdziale „1.1. *Stopy aluminium i ich ogólna charakterystyka*” przedstawiono podstawowe informacje dotyczące stopów: Al-Cu, Al-Mg, Al-Zn, Al-Sn, Al-Si, Al-Si-Cu. Wydaje się, że charakterystykę tych stopów, za wyjątkiem dwóch ostatnich można by było pominąć, gdyż nie dotyczy ona badanych w pracy stopów.

W rozdziale „1.2. *Podział stopów aluminium-krzem*” przedstawiono informacje literaturowe na temat klasyfikacji stopów aluminium, zróżnicowania ich mikrostruktury i właściwości mechanicznych.

W rozdziale „1.3. *Obróbka cieplna stopów aluminium*” podano dane literaturowe dotyczące utwardzania wydzieleniowego: przesycania i starzenia. Opisano związek mikrostruktury z właściwościami uzyskiwanymi po obróbce cieplnej prowadzonej w różnych warunkach (temperatura, czas).

W rozdziale „1.4. *Krystalizacja stopów aluminium-krzem*” przedstawiono układ równowagi Al-Si wraz z opisem oraz zastosowanie analizy termiczno-derywacyjnej ATD, jako narzędzia do analizy struktury stopów podeutektycznych, eutektycznych, nadeutektycznych, a także wieloskładnikowych.

W rozdziale „1.5. *Sterowanie krzepnięciem odlewów*” opisano rodzaje krzepnięcia: kierunkowe i objętościowe, metody sterowania krzepnięciem odlewów oraz wpływ warunków krzepnięcia na właściwości stopów aluminium-krzem uzależnione od mikrostruktury, charakteryzowanej m.in. parametrem DAS.

Rozdział „1.6. *Ochładzalniki*” zawiera informacje na temat rodzaju stosowanych ochładzalników oraz materiałów, które stosuje się do ich wykonania, przy czym dane literaturowe dotyczą głównie ochładzalników stosowanych w odniesieniu do odlewów staliwnych. Dodatkowo w rozdziale umieszczono model procesu cieplnego w układzie odlew – ochładzalnik zewnętrzny – forma piaskowa. Na końcu pierwszego podrozdziału 1.6.1. umieszczono dwa zdania uzasadniające podjęcie badań w proponowanym zakresie. Rozdział 1.6. jest ostatnim w części teoretycznej i zdecydowanie brak jest podsumowania dokonanej w pracy analizy literatury.

W pierwszym rozdziale części II - „Badania własne” - „2.1. *Cel i tezy pracy*” przedstawiono trzy cele pracy – badawcze i aplikacyjne: wyznaczenie strefy działania ochładzalników zewnętrznych, określenie szybkości stygnięcia i prędkości krystalizacji w funkcji odległości od krawędzi ochładzalnika, wyznaczenie, który okres w procesie krystalizacji stopów aluminium-krzem determinuje uzyskiwanie wysokich właściwości wytrzymałościowych. Dodatkowo rozdział zawiera cztery tezy pracy, które niekiedy są zbyt ogólne.

Rozdział „2.2. *Metodyka badań*” opisuje zastosowane metody badawcze oceny strefy działania ochładzalników w dwóch wariantach: ochładzalnik umieszczony na odlewnie płyty odlewanej poziomo, ochładzalnik umieszczony „od czoła” płyty odlewanej pionowo. Płyty o różnych wymiarach (160x160x10mm, 240x160x10mm, 240x160x15mm, 160x160x13mm, 160x160x30mm) odlewano ze stopu AlSi7Cu1Mg0,5. W pracy wykonano 15 wytopów (6 w układzie poziomym płyty i 8 w układzie pionowym płyty) zarówno z obróbką cieplną T6, jak i bez takiej obróbki. Dodatkowy 15 wytop dotyczył formy kokilowej i innego stopu - AlSi9Cu1,4Mg0,5. Również wymiary odlewanych płyt w pozycji poziomej i pionowej były inne. Do doboru wymiarów ochładzalników (d - grubość, m – szerokość, s – długość) przyjęto pewne założenia. Dla płyty odlewanej w pozycji poziomej stosowano ochładzalnik wykonany z miedzi: d=5g (dla d=10mm) i d=3,3g (dla d=15mm), m=5g (dla d=10mm) i m=3,3g (dla d=15mm), długość „s” każdorazowo wynosiła 50mm. Dla płyty odlewanej w pozycji pionowej stosowano ochładzalnik wykonany z żeliwa szarego: d=1,5g (dla g=13mm) i d=0,7g (dla g=30mm), m= 7,7g (dla g=13mm) i m=3,3g (dla g=30mm). Długość „s” wynosiła każdorazowo 280mm.

W kolejnych podpunktach przedstawiono kryteria oceny oddziaływania ochładzalnika, sposób umieszczenia termoelementów i metodę rejestracji przebiegu krystalizacji. Następne podpunkty dotyczą wyznaczania właściwości mechanicznych (HBW,  $R_m$ ,  $A_5$ ), porowatości odlewu, mikrostruktury – parametry SDAS,  $L_{srSi}$ . Próbki do badań wycinano prostopadłe do wymiaru płyty określającego długość. Właściwości mechaniczne wyznaczano na próbkach o średnicy 5 i 8mm. W ostatnim podpunkcie tego rozdziału krótko scharakteryzowane zostało oprogramowanie „MAGMASOFT”.

W rozdziale 2.3. zatytułowanym „Wyniki badań” umieszczono sekwencyjnie analizę wyznaczonych właściwości płyt odlewanych w poszczególnych wytopach. Pierwszy wytop (Si=7,23%) – płyty oznaczone numerami 1 i 2. Drugi wytop (Si=7,51%) – płyty oznaczone numerami 3 i 4. Trzeci wytop (Si=7,29) – płyty oznaczone numerami 5 i 6. Czwarty wytop (Si=7,32%) – płyty oznaczone numerami 7÷10. Piąty wytop (Si=6,77%) – płyty oznaczone numerami 11÷14. Szósty wytop – (Si=9,37%), przeprowadzony w piecu indukcyjnym średniej częstotliwości - masa wsadu 14,05kg. Kolejno przedstawiono wyniki: analizy termicznej, analizy mikrostruktury, analizy zmiany właściwości mechanicznych oraz pomiarów porowatości odlewu. Dla wytopu nr 4 porównano wyznaczone parametry z tymi, które obliczono za pomocą programu „MAGMASOFT”

Rozdział „2.4. Podsumowanie” zawiera zwięzłe podsumowanie uzyskanych wyników, a w szczególności charakterystykę wpływu ochładzalnika na proces krystalizacji stopu Al-Si, zmianę właściwości mechanicznych oraz zmianę porowatości badanych odlewów. W rozdziale zamieszczono 11 wniosków o charakterze aplikacyjnym oraz wskazania odnośnie możliwości zastosowania uzyskanych wyników.

## 2. Uwagi ogólne

**2.1.** Autor włożył ogromny wkład w wykonanie szerokiego zakresu badań, który został przedstawiony w pracy. Dysertacja stanowi logiczną całość prezentując wpływ ochładzalników na: szybkość stygnięcia, strukturę, tendencję odlewów do porowatości i właściwości mechaniczne siluminu AlSi7Cu1Mg0,5.

**2.2.** Wprawdzie autor nie miał wpływu na temat wykonywanej pracy, ale wydaje się, że powinien się on zaczynać od słów „Analiza/ocena strefy”. W pracy nie znalazłem uzasadnienia wyboru rodzaju stopu - AlSi7Cu1Mg0,5 oraz stopu AlSi9Cu1,4Mg0,5 odlewanych do kokili, a także wymiarów badanych płyt. W części teoretycznej wyróżniono, jako najbardziej interesujące dwa stopy: AlSi8Cu3Mg0,4Zn4 i AlSi8Cu3Mg0,4Zn10.

Dlatego proszę Autora o przedstawienie takiego uzasadnienia.

**2.3.** W rozdziale 2.2. „Metodyka badań” nie znalazłem informacji, czy eksperymenty były oparte na konkretnym planie badań wynikającym z metodyki badań doświadczalnych.

Dlatego proszę Autora o informacje na ten temat.

**2.4.** Praca na etapie redagowania powinna zostać sprawdzona również pod względem pisowni. W recenzowanym egzemplarzu jest sporo błędów (interpunkcja, pisownia przymiotników złożonych, szyk wyrazów w zdaniu w stronie biernej).

### 3. Uwagi szczegółowe

- 3.1. Str. 2. Rozdział zatytułowany „*Streszczenie*” jest typowym wstępem. Dotyczy to także wersji angielskiej. W związku z tym w pracy nie ma streszczenia, które zwykle umieszczane jest na końcu.
- 3.2. Str. 2. W pracy stosowane są pojęcia: „właściwości techniczne” (wstęp), „właściwości mechaniczne” (tezy pracy), „właściwości wytrzymałościowe” (cel pracy). Pytanie: Jakie różnice występują pomiędzy ww. określeniami w odniesieniu do mierzonych w pracy właściwości?
- 3.3. Str. 3. Określenia „przyśpieszenie krystalizacji” i „wytrzymałość na rozciąganie gotowego odlewu” są niepoprawne.
- 3.4. Str. 11. Przedstawiona analiza odnośnie zużycia paliwa w samochodach oraz recyklingu stopów aluminium pozbawiona jest przywołań literaturowych. Nie sądzę, żeby podawane dane pochodziły z badań własnych autora.
- 3.5. Dane przedstawione w punktach 1.1.1.÷1.1.6 są „podręcznikowe”. Praca dotyczy stopów Al-Si, więc charakterystyka stopów Al-Cu, Al-Mg, Al-Zn, Al-Sn, nie jest konieczna.
- 3.6. Str. 13 i 14. W podpunktach 1.1.1.÷1.1.6. brak jest przywołań literatury.
- 3.7. Str. 18., Rys. 1.6. Pytanie: Czy prezentowana na rys. struktura jest właściwa dla stopu surowego, czy modyfikowanego? W opisie rysunku należałoby dodać odpowiednią informację.
- 3.8. Str. 25. Pytanie: Czy prezentowany na rys. 1.10 układ równowagi Al-Si jest najbardziej aktualny? Przywołanie literaturowe dotyczy roku 1989. Zdanie „Obecnie przyjmuje się ...” – wers 5 od dołu wydaje się być niestosowne w aspekcie przywołanej literatury z roku 1966.
- 3.9. Str. 33. Wzór 1.6 – w opisie błędnie podano, że wydzielona część powierzchni formy wyrażona jest w  $m^3$ .
- 3.10. Str. 34. Parametr DAS powinien być zdefiniowany przed jego przywołaniem w teście.
- 3.11. Str. 36. Rys. 1.17. Opisu rysunku nie powinno się zaczynać od wypunktowania „a”.
- 3.12. Str. 36. - 10 wers od dołu. „Wzrost szybkości chłodzenia powoduje dyspersję”. Pojęcie „dyspersja” samo w sobie nie definiuje stopnia rozdrobnienia.
- 3.13. Str. 37 - 14 wers od góry: „Tak gwałtowne zmiany temperatury zarodkowania”. W pracy nie przytoczono wartości zmian temperatury.
- 3.14. Str. 39. W kilku zdaniach podano uzasadnienie podjęcia prezentowanych badań własnych. Prezentowana analiza literatury powinna być trochę szarsza. Przykładowo – nie znalazłem przywołania pozycji: M. Hajkowski, Ł. Bernat, J. Hajkowski: „Mechanical Properties of Al-Si-Mg Alloy Castings as a Function of Structure

Refinement and Porosity Fraction”, z 2012 roku, gdzie m. in. badano odlew płyty odlewanej pionowo, o wymiarach 150x120x22mm, z umieszczonym od dołu ochładzalnikiem wykonanym z miedzi. Prośba o komentarz.

- 3.15. Wydaje się, że podpunkty umieszczone na stronach: 41, 43, 44, powinny mieć numerację.
- 3.16. Str. 45. Piąty wers od góry – sformułowanie „ Napiszemy równanie .....”, brzmi dziwnie.
- 3.17. Na końcu części teoretycznej powinien być umieszczony rozdział „Podsumowanie analizy literatury”, który powinien zawierać uzasadnienie celowości podjętych badań.
- 3.18. Str. 53 – „Tezy pracy”. Sposób sformułowania pierwszej tezy mylnie sugeruje kierunek wpływu grubości ścianki odlewu na strefę wpływu działania ochładzalnika.
- 3.19. Str. 54. Przy wymiarach badanych płyt brak jest jednostek – 7 wers od dołu. Pytania: Na jakiej podstawie dobrano wymiary badanych płyt? Dlaczego zastosowano zróżnicowane wymiary płyt odlewanych w pozycji pionowej i poziomej? Dlaczego porównywany odlew kokilowy został wykonany z innego stopu?
- 3.20. Rys. 55. Na rys. 2.1.a przedstawiony jest ochładzalnik o kształcie cylindrycznym, podczas gdy w pracy stosowano ochładzalniki o kształcie sześcianu.
- 3.21. Str. 56. W rozdziale podano, że w pracy wykonano 15 wytopów. Tymczasem sądząc po składzie chemicznym – skład chemiczny pewnych wytopów jest taki sam (przykładowo wytop 1 i 2 oraz 3 i 4) wydaje się, że wytopów było mniej. Pytanie: Ile faktycznie było wytopów?
- 3.22. Str. 57 – Założenia dotyczące doboru ochładzalników. Pytania: Dlaczego zastosowano takie, a nie inne proporcje wymiarów ochładzalnika w stosunku do grubości ścianki odlewu? Dlaczego dla płyt odlewanych poziomo zastosowano ochładzalniki wykonane z miedzi, a dla płyt odlewanych pionowo ochładzalniki wykonane z żeliwa?
- 3.23. Str. 61. Tytuł podrozdziału 2.2.4.2. „Materiał na odlew” powinien zostać zmieniony – np. „Materiał, z którego wykonywano odlewy”.
- 3.24. Str. 61. W tabeli 2.2. autor przedstawił skład chemiczny stopów Al-Si, które stosowano w badaniach. Dane w tabeli różnią się od rzeczywistych pod względem zawartości Cu i Mg.
- 3.25. Str. 62. Na rys. 2.5 nie podano sposobu oznaczenia punktów kontrolnych, na które autor powołuje się m.in. na rys. 2.6.
- 3.26. Str. 65. Pytanie: Dlaczego właściwości mechaniczne wyznaczano na próbkach o różnej średnicy (5 i 8mm)? Pytanie: Jaki wpływ może mieć średnica próbki na wyznaczone właściwości mechaniczne?
- 3.27. Str. 66. Podpunkt 2.2.5.5. „Symulacje procesu z wykorzystaniem MAGMASOFT” powinien brzmieć raczej: „Symulacja procesu odlewania przy zastosowaniu

oprogramowania MAGMASOFT”. Cały podpunkt, nawet z rozszerzoną charakterystyką oprogramowania powinien być umieszczony raczej w części teoretycznej.

- 3.28.** Str. 67. Wyniki badań. Porównywane wytopy różnią się pod względem składu chemicznego – zawartości krzemu. Pierwszy wytop (Si=7,23%) – płyty oznaczone numerami 1 i 2. Drugi wytop (Si=7,51%) – płyty oznaczone numerami 3 i 4. Trzeci wytop (Si=7,29) – płyty oznaczone numerami 5 i 6. Czwarty wytop (Si=7,32%) – płyty oznaczone numerami 7÷10. Piąty wytop (Si=6,77%) – płyty oznaczone numerami 11÷14. Szósty wytop (Si=9,37%) – odlew kokilowy. Różnica w przypadku stopu AlSi7Cu1Mg0,5 wynosi max. 0,74% (płyty 11÷14 i 3÷4). Pytanie: Czy różnica zawartości krzemu na poziomie 0,74% może istotnie wpływać na mierzone podczas badań właściwości stopu AlSi7Cu1Mg0,5?
- 3.29.** Str. 70. Drugi wers od góry: „ten sam czas jest około 10 razy dłuższy”. Takie sformułowanie jest zdecydowanie niewłaściwe.
- 3.30.** W tabelach: 2.6, 2.7, 2.10, 2.11, 2.15, 2.16, 2.19, 2.20, 2.21, 2.25, 2.26, 2.27, 2.28, 2.29, 2.30, 2.31, sformułowanie „długość płyty” powinno być zastąpione określeniem „odległość od brzegu” lub innym.
- 3.31.** Str. 70÷138. W tekście, tabelach oraz rysunkach nie znalazłem wartości odchylenia standardowego lub przedziału ufności. Pytania: Czy w trakcie badań stosowano powtórzenia eksperymentu? Na ile wyznaczone pomiary są statystycznie istotne?
- 3.32.** Str. 142÷154. Rys. 2.60÷2.70. Prezentowane na rysunkach równania/zależności charakteryzują się bardzo zróżnicowanym dopasowaniem do punktów eksperymentalnych. O ile w przypadku zależności pomiędzy szybkością stygnięcia, a odległością pomiędzy gałęziami drugiego rzędu wartość  $R^2$  zawiera się w przedziale 0,65÷0,96 (wydaje się, że podawanie tych wartości z dokładnością do 4 miejsca po przecinku jest niecelowe), to w przypadku pozostałych zależności wartości  $R^2$  są już znacznie mniejsze. Dla zależności wytrzymałości na rozciąganie i twardości od szybkości stygnięcia – rys. 2.66,  $R^2=0,39$  i  $0,58$ . Dla zależności gęstości właściwej od szybkości stygnięcia – rys. 2.68,  $R^2=0,31$ . Dla zależności wytrzymałości na rozciąganie i twardości od porowatości – rys. 2.69,  $R^2=0,56$  i  $0,50$ . Dla zależności wytrzymałości na rozciąganie i twardości od parametru SDAS – rys. 2.70,  $R^2=0,46$  i  $0,32$ . Pytanie: Z czego wynika tak duży rozrzut otrzymanych punktów eksperymentalnych w stosunku do podawanych zależności i co można zmienić w toku badań, aby wyznaczone zależności były bardziej istotne?
- 3.33.** W trakcie analizy wyników porównywane są efekty uzyskiwane przy zastosowaniu ochładzalników wykonanych z różnych materiałów (żeliwo, miedź), ale każdy z tych materiałów był stosowany wyłącznie, jako ochładzalnik w jednym układzie odlewania. Pytanie: Czy nie należało wykonać eksperymentu gdzie ochładzalnik wykonany z różnych materiałów byłby stosowany w stosunku do płyty odlewanej poziomo lub pionowo?
- 3.34.** Str. 150. Tytuł punktu 2.4.4. zawiera niewłaściwe sformułowanie „w badanych odlewach płyty o zmiennej grubości ścianek”. W trakcie badań nie odlewano płyty „schodkowej”.

3.35. Str. 156. Wnioski końcowe. Pierwszy wniosek jest zbyt oczywisty i można go sformułować bez wykonywania badań. Wnioski 3 i 4 powinny być bardziej jednoznaczne. Sformułowanie „strefa działania ochładzalnika może się zwiększyć”, wcale nie oznacza, że taka zmiana ma miejsce. Wniosek 7 powinien być sformułowany w oparciu o badania przeprowadzone w tym samym układzie odlewania.

#### 4. Ocena końcowa pracy

Podjęty w pracy temat jest aktualny, ponieważ rozwijający się przemysł, zwłaszcza motoryzacyjny wymaga stosowania coraz to większej ilości części wykonywanych ze stopów metali lekkich, które zapewniają relatywnie duże właściwości mechaniczne w stosunku do stopów żelaza.

Przedstawione powyżej liczne uwagi i spostrzeżenia nie zmniejszają wartości merytorycznej pracy i w związku z tym oceniam ją jako bardzo dobrą i wnioskuję o jej wyróżnienie. Badania wykonane przez Doktoranta w ramach pracy są bardzo szerokie (może nawet zbyt obszerne – rozszerzenie badań w jednym układzie odlewania byłoby bardziej właściwe) i stanowią istotny wkład w poznanie wpływu oddziaływania ochładzalników na szybkość stygnięcia, strukturę i właściwości stopów aluminium odlewanych do form piaskowych, a tym samym na obniżenie kosztów użytkowania pojazdów.

Doktorant przedstawił cel pracy i sformułował jej tezy, dla udowodnienia których wykonał badania: technologiczne, metalograficzne, właściwości mechanicznych oraz porównał wyniki eksperymentalne do tych, otrzymanych w wyniku symulacji w programie „Magmasoft”. Postawione tezy zostały udowodnione. Doktorant wykazał się umiejętnością planowania i wykonywania badań naukowych.

Otrzymane wyniki stanowią logiczną całość, a opracowane zależności mogą zostać zastosowane w praktyce, przy projektowaniu form dla stopów Al-Si.

#### 5. Wniosek końcowy

Opiniowana praca doktorska, pt. „**Strefa działania ochładzalników zewnętrznych w odlewach ze stopów Al-Si wykonywanych w formach piaskowych**” mgr inż. Marcina Piękosia spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim (Ustawa z dnia 14.03.2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym) i na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie pana mgr inż. Marcina Piękosia do publicznej obrony rozprawy przed Radą Wydziału Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej.

