

Częstochowa, dn.17.10.2023 r.

prof. dr hab. inż. Zbigniew Konopka, emeryt  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów  
Katedra Metalurgii i Technologii Metali  
Politechnika Częstochowska

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Ferdyny**

**pt.: "Wpływ parametrów procesu obróbki cieplnej na wybrane właściwości mechaniczne ciśnieniowych odlewów strukturalnych ze stopów aluminium"**

opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa  
Politechniki Śląskiej

### **1. Ocena przedmiotu rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Ferdyny ma charakter wdrożeniowy i dotyczy badania i opracowania technologii obróbki cieplnej wytypowanych ciśnieniowych odlewów strukturalnych wspornika belki zderzaka tylnego ze stopu AlSi7Mg i wspornika zawieszenia tylnego ze stopu AlSi10MnMg, która ma zapewnić odlewom wymagane właściwości mechaniczne oraz możliwość skrócenia czasu tej obróbki połączonego ze zmniejszeniem liczby wyrobów wadliwych przy zwiększeniu udziału złomu obiegowego z 50 do 70%.

Celowość podjęcia badań w tym zakresie wynika z szybkiego rozwoju wytwarzania szeregu elementów karoserii pojazdów mechanicznych z lekkich stopów aluminium metodą odlewania ciśnieniowego zastępujących tłoczone elementy stalowe. Odlewy, takie zwane strukturalnymi, charakteryzują się dużymi powierzchniami i cienkimi ściankami, co wiąże się z koniecznością modyfikacją klasycznej technologii odlewania i stosowania obróbki cieplnej tych odlewów. Wytworzone „na gotowo” odlewy eliminują stalowe wytłoczki ze względu na

takie korzyści jak: mniejsza masa i brak operacji łączenia (spawanie, klejenie, połączenia śrubowe konieczne w stosowaniu elementów stalowych).

Specyfika odlewania ciśnieniowego odlewów strukturalnych zawiera się w dużych prędkościach wypełniania wnęki formy z zagrożeniem zwiększenia porowatości gazowej odlewu oraz w dużej szybkości krzepnięcia metalu w formie ze skutkiem dużego rozdrobnienia struktury i zwiększeniem właściwości wytrzymałościowych z jednoczesnym pogorszeniem plastyczności. Poprawa właściwości plastycznych odlewów jest zasadniczym celem ocenianej pracy, a reżim technologiczny odlewni zlecającej badania ukierunkował je na opracowanie optymalnych parametrów stosowanej obróbki cieplnej umacniania wydzieleniowego z zastosowaniem procesów przesycania i starzenia. Obróbka przesycania i starzenia odlewów ze stopów aluminium jest znana i stosowana, natomiast ze względu na, powyżej wskazane, właściwości surowych odlewów strukturalnych nie została do tej pory opracowana teoretycznie i praktycznie. Jest to zagadnienie naukowo-badawcze o dużej wartości poznawczej i innowacyjnej z dużym potencjałem wdrożenia wyników do praktyki przemysłowej. Wskazuję także na innowacyjne zagadnienie rozwiązywane w pracy dotyczące zwiększenia udziału złomu obiegowego we wsadzie aż do 70%, co ma także istotny wymiar ekonomiczny i ekologiczny.

Uwzględniając powyższe stwierdzam, że Autor zaproponował innowacyjne rozwiązanie polegające na opracowaniu nowej obróbki cieplnej ciśnieniowych odlewów strukturalnych, a uzyskane wyniki przedstawione w pracy mogą służyć jako algorytm poprawy jakości odlewów ciśnieniowych w tworzonej nowej wiedzy. Wybór tematyki badań uznaję za trafny i celowy, a praca lokuje się w innowacyjnym obszarze badań naukowych. Proponowane w pracy rozwiązanie wynika z rosnącej konkurencji i potrzeby rynkowej, które stawiają coraz większe wymagania jakościowe odlewom ze stopów aluminium, co w pełni uzasadnia podjęcie badań w tym zakresie.

## **2. Charakterystyka i ocena rozprawy**

Tekst rozprawy liczy 126 stron, który uzupełniają: bibliografia zawierająca 103 pozycje literaturowe, spisy rysunków i tabel oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Rozprawa składa się z trzech głównych części. W pierwszej części przedstawiono przegląd literatury dotyczący: charakterystyki odlewniczych stopów Al-Si z kształtowaniem struktury i właściwości odlewu w procesie krystalizacji, ogólnej charakterystyki wysokociśnieniowego odlewania metali z opisem zalet, wad, ograniczeń

i możliwości tej technologii, obróbki cieplnej odlewniczych stopów aluminium z opisem szczegółowym struktury odlewów.

Ten fragment rozprawy został opracowany bardzo dobrze ponieważ Autor dokonał trafnego, pod względem zakresu, doboru materiału źródłowego informacji naukowej, przedstawiony opis jest skoncentrowany na tematyce pracy, bez zbędnych, nieistotnych dla badanej tematyki informacji, opis jest wnikliwy i jasny a ważne treści odpowiednio wzbogacono odpowiednimi wykresami i równaniami. Przełożyło się na wysoką jakość opracowania tej części pracy pod względem merytorycznym, językowym i edytorskim. W podsumowaniu stwierdzam, że przedstawiony w pracy przegląd literatury odpowiada wymogom pracy doktorskiej na poziomie wyróżniającym.

W drugiej części pracy zatytułowanej „Badania wstępne” Autor przedstawia: charakterystykę profilu produkcji odlewni Magna Casting Poland sp. z o.o. (MPC) i wybranych do badań odlewów ciśnieniowych, opis szczegółowy stosowanej technologii i etapy procesu produkcji odlewów strukturalnych w MCP (przygotowanie materiałów wsadowych i ich topienie, odlewanie ciśnieniowe, obróbka cieplna odlewów, prostowanie detali, obróbka wibrościerna, obróbka skrawaniem, montaż, kontrola jakości w procesie produkcji), wyniki symulacji komputerowych procesu odlewania wykorzystywanych do optymalizacji procesu produkcyjnego. Rozdział ten kończy prezentacja wyników własnych badań wstępnych właściwości mechanicznych  $R_m$ ,  $R_{0,2}$ ,  $A$  i oceny porowatości odlewów wspornika belki zderzaka tylnego (detal PP) dla samochodu Porsche Panamera i wspornika zawieszenia tylnego (detal JLR) dla samochodu Jaguar Land Rover oraz analiza wadliwości (liczba braków) w okresie 2020-2022. Na podstawie wyników badań wstępnych Autor postawił trafną diagnozę, według której głównymi przyczynami zwiększonej wadliwości tych odlewów jest niedotrzymanie wymaganej wartości wydłużenia względnego i nadmierna, niedopuszczalna porowatości odlewów strukturalnych. Ze względu na stosowaną technologię odlewania jedynym obszarem możliwych zmian technologicznych procesu został wskazany przez zleceniodawcę proces obróbki cieplnej odlewów.

Wyniki badań przedstawione w rozdziale 2, są moim zdaniem kluczowe, dla dalszych badań ponieważ jednoznacznie dowodzą konieczności opracowania zoptymalizowanej technologii obróbki cieplnej odlewów strukturalnych i formułują precyzyjnie cel dalszych badań.

W rozdziale 3 Autor przedstawił cele zaplanowanych badań zasadniczych ze szczegółowym opisem przyjętej metodyki badawczej, a w rozdziale 4 wyniki tych badań. Na podstawie przyjętych wymagań jakościowych odlewów i wyników badań wstępnych

sformułowano następujące cele badań jakie mają być osiągnięte po opracowaniu nowej obróbki cieplnej:

1. uzyskanie wydłużenia powyżej 8%, przy zachowaniu właściwości mechanicznych, tj.:  $R_m$  min. 240 MPa oraz  $R_{0,2}$  min. 140 MPa, zgodnych ze specyfikacją klienta dla odlewów spornika belki zderzaka tylnego ze stopu AlSi7Mg (detal PP),
2. uzyskanie wydłużenia powyżej 10%, przy zachowaniu właściwości mechanicznych, tj.:  $R_m$  min. 180 MPa oraz  $R_{0,2}$  min. 110 MPa, wymaganej dokładności kształtowo-wymiarowej i dopuszczalnego udziału pęcherzy gazowych dla odlewów wspornika zawieszenia tylnego ze stopu AlSi10MnMg (detal JLR),
3. skrócenie czasu obróbki cieplnej ciśnieniowych odlewów strukturalnych ze stopów Al-Si i zmniejszenie liczby wyrobów wadliwych przy zwiększeniu udziału złomu obiegowego z 50 do 70%.
4. przygotowanie kompletu dokumentacji do ewentualnego wdrożenia nowych parametrów obróbki cieplnej w odlewni Magna Casting Poland i przeniesienie zmian technologii obróbki cieplnej do innych oddziałów korporacji Magna o podobnej strukturze asortymentowej odlewów ciśnieniowych ze stopów aluminium.

Wszystkie postawione cele pracy wynikają z zagadnienia poszukiwania zależności między parametrami obróbki cieplnej i jakością odlewów i stanowią nowe podejście do autorskiego rozwiązania w skali przedsiębiorstwa. Jest to, w mojej ocenie, innowacyjny element pracy.

Dla osiągnięcia celów pracy zrealizowano program badawczy obejmujący:

- wykonanie badań obróbki cieplnej starzenia odlewów detalu PP,
- wykonanie badań przesycania i starzenia odlewów detalu JLR,
- badania właściwości mechanicznych odlewów po obróbce cieplnej,
- badania dokładności wymiarowej i obecności pęcherzy gazowych dla stopu AlSi10MnMg (detal JLR),
- badania metalograficzne mikrostruktury odlewów strukturalnych,
- badania wadliwości odlewów po zaproponowanych zmianach technologii obróbki cieplnej odlewów strukturalnych z uwzględnieniem podwyższenia udziału złomu obiegowego z 50% do 70%.

W szczegółowo opisanej metodyce badań przedstawiono: stosowane materiały, procedury wykonania pomiarów z zastosowanymi parametrami, rysunki i zdjęcia wykonanych odlewów oraz dokumentację zdjęciową procesu odlewania. Zastosowane

metody pomiarowe, zaplanowany zakres badań i metody obliczeniowe i weryfikacji są adekwatne do osiągnięcia oczekiwanego celu pracy.

Poszukiwanie optymalnych parametrów obróbki cieplnej odlewów skoncentrowano w obszarze zmian temperatury i czasu starzenia dla odlewów PP (stan T5) oraz temperatury i czasu przesycania i starzenia dla odlewów JLR (stan T7) stosowanych dotychczas w odlewni MPC. Parametry tej obróbki są następujące:

- dla odlewu (PP): starzenie w temperaturze 215<sup>0</sup>C przez 110 min. z chłodzeniem przy pomocy nadmuchu powietrza wentylatorem,
- dla odlewu (JLR): przesycanie w temperaturze 465<sup>0</sup>C przez 45 min. z szybkim chłodzeniem oraz starzenie w temperaturze 215<sup>0</sup>C przez 90 min. także z chłodzeniem przy pomocy nadmuchu powietrza.

W rozdziale 3.7 przedstawiono plan wykonania eksperymentów starzenia detalu PP w temperaturach 205, 210, 215, 220 i 225<sup>0</sup>C (5 doświadczeń) oraz w czasie 70, 80, 90, 100 i 110 minut (5 doświadczeń) oraz przesycania i starzenia detalu JLR odpowiednio w temperaturach 445, 455, 465, 475<sup>0</sup>C i 205, 210, 215 220<sup>0</sup>C. Czasy przesycania i starzenia utrzymywano na stałym poziomie odpowiednio 45 minut i 90 minut ze względu na ustalony reżim technologiczny odlewni, w której wykonywano badania.

Szkoda, że Autor nie zastosował znanych i efektywnych planów dwupoziomowych do realizacji tych eksperymentów bo możliwe było zmniejszenie liczby wykonanych doświadczeń uzyskując jednocześnie możliwość opisu matematycznego wpływu stosowanych parametrów obróbki cieplnej na badane właściwości odlewów. Dałoby to także możliwość wyznaczenia konkretnych parametrów (optymalnych) gwarantujących uzyskanie wymaganych właściwości odlewu.

W rozdziale 4 przedstawiono wyniki badań zasadniczych i ich analizę. Na podstawie badania składu chemicznego stopów wytworzonych z 70% udziałem złomu obiegowego stwierdzono niewielkie podwyższenie zawartości żelaza w stopach, które nie wpłynęło znacząco na zmianę zawartości pozostałych pierwiastków stopowych. Wyniki mieszczą się w specyfikacji klienta odnośnie odlewów strukturalnych i na tej podstawie stwierdzono, że podwyższenie udziału złomu jest dopuszczalne bez szkodliwego wpływu na jakość stopu.

Badania właściwości mechanicznych odlewów ( $R_m$ ,  $R_{0,2}$  i  $A$ ) wykonano na 100 odlewach detalu PP i 160 detalu JLR, co oznacza, że obróbkę cieplną w danym doświadczeniu wykonano dla 10 odlewów i wyniki są średnią z 10 pomiarów. Dostyć niejasno opisano to w pracy bo np. nie wiadomo jaki był czas starzenia dla serii badań obróbki przy zmiennej temperaturze starzenia, czy on był stały?. Identyczna uwaga dotyczy doświadczeń

ze zmiennym czasem starzenia. Nie wiadomo na jakiej podstawie wytypowano doświadczenie T(PP)4, temperatura starzenia 220<sup>0</sup>C jako najlepsze gdy wszystkie wyniki spełniają wymaganie, podobnie z wyborem czasu starzenia. Według jakiego kryterium wybrano najlepsze parametry obróbki cieplnej detalu JLR (doświadczenie JLR10) gdy 13 innych spełnia wymagania?

Obszerną sekwencję wyników badania mikrostruktury przedstawiono w rozdziale 4.4. Porównanie mikrostruktury odlewów PP ze stopu AlSi7Mg, próba T(PP)4 z próbą C(PP)3 nie wykazuje istotnych zmian w obrazie. W szczegółowych badaniach na mikroskopie skanningowym zidentyfikowano oczekiwane w strukturze fazy roztworu stałego  $\alpha(\text{Al})$ , eutektyki  $\alpha(\text{Al}) + \beta(\text{Si})$ , fazy  $\text{Mg}_2\text{Si}$  i prawdopodobnie fazy  $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ . Porównanie mikrostruktury odlewów JLR ze stopu AlSi10MnMg, próba JLR 7 z próbą JLR 10 nie pokazuje istotnych zmian w ilości i rozmieszczenie poszczególnych faz. Identyfikacja faz na mikroskopie skanningowym daje identyczny wynik jak dla detalu PP. Sugerowana przez Autora sferoidyzacja kryształów krzemu fazy typu  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , moim zdaniem nie ma miejsca.

Na podstawie wyników badań porowatości gazowej (wyników nie zamieszczono) stwierdzono zmniejszenie wadliwych odlewu z powodu porowatości gazowej z 2 na 1% po zastosowaniu nowej obróbki cieplnej.

Podsumowując wyniki badań własnych stwierdzam, że:

- potwierdzono doświadczalnie pozytywny wpływ wyznaczonych parametrów obróbki cieplnej odlewów strukturalnych na spełnienie wymagań wydłużenia i zmniejszenie porowatości gazowej odlewów oraz możliwość optymalizacji parametrów procesu,
- zastosowana obróbka cieplna nie zmienia mikrostruktury odlewów,
- zastosowana zmiana parametrów obróbki cieplnej spowodowała poprawę jakości odlewów mierzoną liczbą odlewów wadliwych w dużej populacji.

Przedstawione wyniki badań dowodzą, że możliwe jest sterowanie mikrostrukturą i właściwościami odlewów tak, że dla określonego poziomu jakości odlewu można dobrać odpowiednie parametry technologiczne odlewania. Wyniki badań pracy mają duże znaczenia praktyczne, a uzyskane wyniki są nowatorskie i wnoszą nową wiedzę w teorię i praktykę odlewania ciśnieniowego stopów Al-Si.

Seqwencję badań własnych kończy podsumowanie i wnioski. Autor przedstawia wnioski poznawcze zgodne ze znaną do tej pory teorią oraz użytkarne. Opracowanie to dowodzi dojrzałości naukowej i dużej wiedzy praktycznej Doktoranta, a także jego zdolności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W moim przekonaniu Autorowi udało się

osiągnąć cel pracy, co potwierdza prawidłowość przyjętych założeń, odpowiednie zastosowanie naukowej metodyki badań i realizację praktyczną wykonanych eksperymentów.

#### 4. Ocena końcowa

W pracy nie dostrzegłem błędów i uchybień w zakresie edycji pracy i prezentacji wyników. Stwierdzam, że rozprawa Pana mgr inż. Macieja Ferdyny spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim ponieważ:

- sformułowano problem badawczy i określono jego cel,
- zaplanowano i zrealizowano badania stosując nowoczesne narzędzia naukowe według przyjętej metodyki badań, co dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta,
- zinterpretowano uzyskane wyniki i sformułowano wnioski na gruncie znanej teorii, co wskazuje na szeroką ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata,
- Doktorant osiągnął cel pracy, a uzyskane wyniki wnoszą oryginalny wkład naukowy i praktyczny w teorię i praktykę odlewania ciśnieniowego stopów aluminium.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Macieja Ferdyny pt.: **”Wpływ parametrów procesu obróbki cieplnej na wybrane właściwości mechaniczne ciśnieniowych odlewów strukturalnych ze stopów aluminium”** spełnia wymogi określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Macieja Ferdyny do publicznej dyskusji nad Jego rozprawą doktorską przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej.



Podpisał: prof. dr hab. inż. Zbigniew Konopka