Imię i nazwisko recenzenta:
Dr hab. inż. Ryszard Władysiak
Dane adresowe:
Politechnika Łódzka
Katedra Technologii Materiałowych i Systemów Produkcji
Ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

Łódź 20.07.2026 r.
(data i miejsce)

Recenzja pracy doktorskiej

mgr inż. Piotra Jana Stręka
(imię i nazwisko doktoranta / doktorantki)

pod tytułem: Chłodzenie impulsowe natryskiem wodnym w hartowaniu izotermicznym żeliwa z grafitem kulkowym (ADI)

przygotowanej pod kierunkiem:

dr hab. inż. Andriy Burbelko, prof. AGH
(imię i nazwisko promotora)

1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Podstawa prawna art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" (z późn. zm.)

Opinia dotycząca przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawiera trzy elementy:

1) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska przedstawia ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa;
2) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora;
3) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

2.1. Charakterystyka ogólna pracy

Tematyka recenzowanej pracy wpisuje się w problematykę współczesnych badań nad kontrolowanym chłodzeniem odlewu z żeliwa sferoidalnego w procesie obróbki cieplnej w celu uzyskania struktury ausferrytycznej.

Uzyskanie oczekiwanych właściwości żeliwa ausferrytycznego (ADI) zależy od właściwie przeprowadzonego zabiegów: austenityzacji, schłodzenia odlewu z zadaną szybkością do temperatury izotermicznego hartowania oraz hartowanie izotermiczne w określonym czasie. Każdy z zabiegów obwarowany jest odpowiednim zakresem temperatury i czasem trwania, wynikającymi zarówno z obecności określonych pierwiastków w składzie chemicznym żeliwa jak i dominującej grubości ścianek odlewu. Ich przestrzeganie poprzez efektywną austenityzację żeliwa, sprzyja przebiegowi procesów dyfuzyjnych jak i alotropowych, generujących finalnie określoną mikrostrukturę, zapewniającą wysokie właściwości fizyczne i mechaniczne odlewom z żeliwa ADI. Jedną z metod, która pozwala na uzyskanie struktury ausferrytycznej, a jednocześnie obniżenie udziału stosowanych pierwiastków takich jak nikiel, molibden i miedź jest hartowanie izotermiczne. W tej operacji obróbki cieplnej występują dwa bardzo istotne zabiegi: chłodzenie oraz wytrzymywanie odlewu w odpowiedniej temperaturze. Ich głównym zadaniem z punktu widzenia efektów mikrostruktury i właściwości żeliwa jest uzyskiwanie i utrzymywanie odpowiedniej szybkości chłodzenia. Do często stosowanych w obróbce cieplnej substancji należą stopione kąpiele solne o współczynniku przejmowania ciepła w zakresie od 500-1100W/m^{2}K. W porównaniu z nimi, badane przez Autora chłodzenie za pomocą natrysku wodnego jest metodą znacznie bardziej efektywną. Charakteryzuje się ona dużą maksymalną gęstością strumienia ciepła (10^{7}W/m^2) jak i zdecydowanie większym zakresem jego regulacji niż kąpiele solne czy olejowe. Coraz większego znaczenia nabiera również aspekt ekologiczny obróbki cieplnej, gdyż zastępowanie wysokotemperaturowych kąpieli solnych czy olejowych chłodzącym strumieniem wody lub mgły wodnej zdecydowanie zmniejsza ilość szkodliwych substancji emitowanych do atmosfery przez stosowane chłodziwa.

Autor w swojej pracy przeprowadził badania procesu chłodzenia podczas obróbki cieplnej żeliwa ausferrytycznego po austenityzacji za pomocą impulsowego natrysku wodnego.
W pracy, na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych procesu chłodzenia natryskiem wodnym i opracowanego stanowiska badawczego, przeprowadzono badania współczynnika przejmowania ciepła w zakresie temperatury występującej w czasie zabiegu chłodzenia tą metodą. Otrzymane przez Autora wyniki badań pozwoliły na opracowanie modelu obliczeniowego zabiegu chłodzenia żeliwa po austenityzacji. Przeprowadzona na opracowanym przez Autora stanowisku obróbka cieplna, potwierdziła otrzymanie w żeliwie struktury ausferrytycznej przez zastosowanie kontrolowanego chłodzenia impulsowym natryskiem wodnym.

Przedstawioną problematykę recenzowanej dysertacji należy uznać za bardzo istotną zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i utylitarnego. Wyniki badań Autora dają możliwość wykorzystania do wytwarzania odlewów o określonej mikrostrukturze oraz do sterowania ich właściwościach mechanicznych.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Jana Stręka zatytułowana *„Chłodzenie impulsowe natryskiem wodnym w hartowaniu izotermicznym żeliwa z grafitem kulkowym (ADI)"* liczy 141 stron, włącznie z bibliografią zawierająca 83 pozycje.

Uważam, że przeprowadzony przegląd stanu wiedzy oraz szeroki dobór literatury przez Doktoranta świadczą o Jego dobrym przygotowaniu merytorycznym do podjęcia zagadnień związanych z realizowaną tematyką rozprawy. Wykorzystane prace literaturowe stanowiły zarówno źródła wiedzy aktualnej, jak również publikacje o szerokim horyzoncie czasowym, mającym swój początek w 70-tych latach XX wieku. Język pracy jest poprawny, struktura rozprawy logiczna, a teza oraz cel pracy zostały sformułowane w sposób właściwy.

Również edytorsko rozprawa jest na dobrym poziomie. Tekst przygotowano zgodnie z obowiązującymi zasadami edytorskimi, a rysunki zostały opracowane starannie i charakteryzują się dobrą czytelnością.

2.2. Ocena części literaturowej

Przegląd literaturowy zawarty jest przede wszystkim w rozdziałach 4 i 5 stanowiących część teoretyczną pracy, w których przedstawiono analizę aktualnego stanu wiedzy dotyczącej tematyki podjętej pracy doktorskiej. W rozdziałach tych Autor opisał zagadnienia związane z tematyką pracy przedstawiając kolejno:

- ✓ Technologia produkcji żeliwa ADI,
- ✓ Obróbka cieplna w produkcji żeliwa ADI,
- ✓ Nagrzewanie do temperatury austenityzacji,
- ✓ Austenityzacja,
- ✓ Hartowanie izotermiczne,
- ✓ Wpływ pierwiastków stopowych, na kształt wykresu CTPi, CTPc,
- ✓ Chłodzenie w obróbce cieplnej,
- ✓ Metody chłodzenia,
- ✓ Wytrzymywanie w ustalonej temperaturze,
- ✓ Chłodzenie do temperatury otoczenia,
- ✓ Chłodzenie natryskowe, chłodzenie wielofazowe,
- ✓ Sposoby otrzymywania mgły wodnej,
- ✓ Transfer ciepła i zjawiska związane z chłodzeniem natryskiem wodnym,
- ✓ Mechanizm oddziaływania strugi kropel,
- ✓ Kondensacja pary w kroplach,
- ✓ Odparowanie kropel w strumieniu,
- ✓ Hydrodynamiczne oddziaływanie pomiędzy gazem i kroplami,
- ✓ Hydrodynamiczne i termiczne oddziaływanie kropel na chłodzoną powierzchnię ciała stałego,
- ✓ Efekt Leidenfrosta,
- ✓ Oddziaływanie termiczne strumienia kropel.

Układ tej części pracy jest prawidłowy i stanowi dobre wprowadzenie teoretyczne do tematu rozprawy.

Autor w rozdziale 4 dokonał ogólnej charakterystyki technologii żeliwa ADI, analizując w podrozdziale 4.1, obróbkę cieplną w produkcji żeliwa ADI. Natomiast w kolejnych podrozdziałach 4.1.1, 4.1.2 i 4.1.3 przeprowadził bardziej szczegółową analizę występujących etapów obróbki cieplnej w produkcji żeliwa ADI. Opisując przebieg obróbki Doktorant dopuścił się pewnej zamiany pojęć lub uproszczeń myślowych, m.in. odnosząc się do austenityzacji lub chłodzenia używał sformułowania zabieg jak i operacja. W tej części pracy wątpliwości budzi również podejście Doktoranta do znaczenia czynnika czasu dla zachodzących procesów w żeliwie podgrzewanym czy austenityzowanym, o którym Autor napisał (s. 7): „nagrzewanie nie podlega restrykcjom czasowym" a następnie (s. 9) : „równie istotnym co temperatura jest czas przeprowadzania zabiegu austenityzacji". W rozdziałach 4.1.3 i 4.1.4 Autor przedstawił przebieg procesu hartowania izotermicznego żeliwa niestopowego za pomocą **wykresu CTPi** (rys. 4.3, s. 11) oraz wpływ dodatków stopowych na zmianę kształtu krzywych CTP. Wykresy tego typu dla obróbki cieplnej podstawowe, pojawiają się w pracy po raz pierwszy, zawierają linie i litery, których znaczenia nie wyjaśniono, a wprowadzona dodatkowo nazwa potoczna **„nosek perlitu"**, również

nie sprzyja jasności przekazu, podobnie jak i wprowadzone przez Autora zamiennie z **ausferrytem** pojęcie **bainitu** (s. 11).

W dalszej części tego rozdziału, w podrozdziałach 4.1.5 - 4.1.7, Doktorant w sposób szczegółowy omówił zabieg chłodzenia w obróbce cieplnej, wyróżniając kąpiele solne i złoże fluidalne za ich powszechne stosowanie w obróbce cieplnej oraz wysokie wartości współczynnika przejmowania ciepła. Zwrócił uwagę na wyniki badań (rys. 4.6), na których to zastosowanie wody jako czynnika chłodzącego umożliwia najintensywniejsze chłodzenie. Wśród dalszych metod chłodzenia Autor przedstawia charakterystykę wysokotemperaturową przemysłowo stosowanych mieszanin kąpieli mieszanin solnych, wskazuje na wykorzystywanie do obróbki izotermicznej ciekłych stopów cyny i ołowiu, a także przedstawia patent USA opisujący chłodzenie przy pomocy mgły wodnej.

W kolejnym akapicie (s. 14) utrzymywanie odpowiedniej temperatury i niskiej szybkości chłodzenia, przedstawiono jako główne cechy złoża fluidalnego. W tej części Autor nieprecyzyjnie charakteryzuje metodę chłodzenia używając określenia „utrzymywanie **odpowiedniej temperatury**". Czy chodziło o utrzymywanie temperatury na stałym poziomie, lub w określonym jej zakresie?

W końcowej części rozdziału 4 omawiając właściwości żeliwa ADI jako funkcję temperatury hartowania izotermicznego (rys. 4.7), Autor bardzo nieprecyzyjnie opisuje zamieszczony wykres przywołując pojęcie **bainitu**, powstającego jako **zjawisko niepożądane** z osnowy **przetrzymywanego odlewu**. Po czym stwierdza, że **wyższe temperatury** obróbki izotermicznej prowadzą do uzyskania żeliwa ADI o niższej wytrzymałości.

W rozdziale 5 Autor przedstawia ogólną charakterystykę chłodzenia natryskowego a następnie w rozdziale 5.1 szczegółowo opisuje sposoby otrzymywania mgły wodnej przez zastosowanie dysz jednofazowych i wielofazowych w odmianach konstrukcyjnych: dysz płaskiego strumienia, dysz pełnostożkowych, dysz pustostożkowych i dysz pełnostrumieniowych, które charakteryzują się różnorodnym kształtem i rozkładu rozpylanego strumienia cieczy. Z punktu widzenia na niskie zapotrzebowania energii na rozpylanie strumienia wody interesującym do przeanalizowania mógłby być **rozpylacz wirowy**.

W dalszej części rozdziału 5, omawiając zjawiska związane z chłodzeniem natryskiem wodnym, Autor przedstawił podstawy teoretyczne równań zachowania masy, pędu i energii, zdefiniował występujące w nich wielkości fizyczne, termofizyczne, kinematyczne dla wody i powietrza oraz przedstawił pozostałe jeszcze do opracowania zależności wymagane do kompletnego opisu matematycznego dwufazowego strumienia kropel i powietrza.

W rozdziale 5.3 opisano mechanizmy oddziaływania strugi kropel za pomocą modelu przedstawiającego rozkład temperatury mieszaniny parowo-powietrznej i kropli wody w procesie chłodzenia gorącej powierzchni. Schemat ten wyróżnia kondensację pary na kropli, odparowanie wody z kropli, kontakt kropli z nagrzaną powierzchnią i odbicie kropli od powierzchni. Autor przedstawił, że transfer ciepła na granicy kropli i otoczenia może odbywać się poprzez przewodzenie i konwekcję. Jednakże, czy w przypadku strumienia mgły wodnej nie należy uwzględnić również **składową promieniowania**, której udział w przypadku rozwiniętej geometrii strumienia może zyskiwać na znaczeniu? Tym bardziej, że energia cieplna z kropli do otoczenia oddawana jest przez przewodzenie ale również przez promieniowanie warstwy pary.

Analizując hydrodynamiczne i termiczne oddziaływanie kropel na chłodzoną powierzchnię Autor wskazuje, jak najbardziej słusznie, że jest to proces złożony i niestacjonarny, determinowany przez siły bezwładności, lepkości i napięcia powierzchniowego. Wśród parametrów określających zachowanie kropel wymienia prędkość, średnicę i objętość oraz temperaturę początkową powierzchni kropli. W ostatniej grupie czynników wskazał właściwości termofizyczne natryskiwanego materiału, obróbkę mechaniczną i chropowatość powierzchni chłodzonej, ciśnienie otaczającego gazu i kąt padania kropli na powierzchnię. Do opisu zachowania się kropli po kontakcie z powierzchnią Autor definiuje zastosowanie liczby Webera, której przekroczenie wartości krytycznej spowoduje rozbicie kropli na mniejsze. To zachowanie jest silnie determinowane przez temperaturę powierzchni po kontakcie z kroplą, odzwierciedlonym w szeroko opisywanym zjawisku zwanym zjawiskiem Leidenfrosta, którego możliwość wystąpienia przeanalizował Autor W dalszej części pracy.

Z analiz tych wynika, że podczas schładzania powierzchni od temperatury austenityzacji do hartowania izotermicznego żeliwa ADI układ pozostaje w zakresie temperatury wyższej od temperatury Leidenfrosta. Według Autora oznacza to, że na powierzchni chłodzonej zachodzi proces wrzenia błonkowego (s. 14), ale w innym miejscu pracy (rys. 5.6) jest on definiowany jako **wrzenie warstwowe**. Zjawisko to zostało zilustrowane również wykresem Nukiyamy (rys. 5.7). Jednak jest on opisany w **języku angielskim** oraz zawiera **oznaczenia** na wykresie których Autor **nie opisał** na rysunku. Przy opisie rysunku (rys. 5.8) bilansu ciepła kropli Doktorant wraca do nazwy **wrzenia błonkowego** oraz przedstawia jako dominujące trzy sposoby transferu ciepła chłodzonej powierzchni: przewodzenie przez warstwę pary, promieniowanie powierzchni i odparowanie dolnej części kropli.

Ostatnia część rozważań teoretycznych Autora dotyczy oddziaływania termicznego strumienia kropel. Z dwóch rozważanych przypadków, dla strumienia zagęszczonego przyjęta graniczna koncentracja kropel 2kg/(m^2s) jest tak duża, że krople oddziałują między sobą.

W przypadku strumienia rozrzedzonego, Autor wyszczególnia składowe mechanizmy wymiany ciepła pomiędzy strumieniem kropel i powierzchnią o temperaturze powyżej temperatury Leidenfrosta: wymiana ciepła wskutek uderzania kropli o powierzchnię, mikrokonwekcyjne chłodzenie na skutek przepływu pary pod kroplą, mikrokonwekcyjne chłodzenie na skutek przepływu powietrza pod kroplą oraz promieniowanie ciepła do strumienia kropel i do otoczenia. Aby ocenić intensywność chłodzenia ścianki a tym samym gęstość odbieranego strumienia ciepła Autor definiuje **współczynnik wymiany ciepła** pojedynczej kropli. Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na często spotykaną zmianę nazwy: współczynnik przejmowania ciepła na współczynnik wymiany ciepła. Co oczywiście jest nazwą niepoprawną. Tym bardziej znaczenie współczynnika wprowadzonego przez Autora powinno być wyjaśnione.

Końcowa część teoretycznych rozważań na temat strumienia ciepła odbieranego przez pojedyncze krople oraz strumień kropel Doktorant podsumował, że im mniejsze są krople tym proces wymiany ciepła jest intensywniejszy, istotne jest prostopadłe, pionowe usytuowanie dyszy i powierzchni chłodzącej, a także stwierdził, że ze względu na trudną do przewidzenia krotność wtórnego kontaktu kropel z powierzchnią, proces ten jest trudny do ujęcia matematycznego. Autor kończąc rozdział zamieścił wyniki badań eksperymentalnych współczynnika przejmowania ciepła (rys. 5.10) uzyskane dla różnych wydatków wody. Prezentowane wartości, będąc zestawieniem wyników z różnych prac badawczych, mogą stanowić cenne źródło praktycznej

wiedzy. Wiedzy, która mogłaby znacznie ułatwić opis matematyczny procesu chłodzenia. Niestety, na rysunku brak jest opisanych danych w sposób kompletny.

Ogólnie należy stwierdzić, że zebrane i zaprezentowane informacje stanowią wystarczająco dobry zasób wiedzy, adekwatny do tematyki rozprawy. Pewnym mankamentem jest jednak brak krótkiego podsumowania po analizie przedstawionej wiedzy, korespondującego z tezą oraz celem pracy.

Oceniając tę część pracy stwierdzam, że tak przedstawiona część literaturowa stanowi dobrą podstawę teoretyczną do realizacji podjętego tematu i potwierdza, że Autor spełnia wymagania stawiane kandydatom na doktora w dyscyplinie inżynieria materiałowa pod względem posiadanej wiedzy teoretycznej w zakresie zgodnym z tematyką pracy doktorskiej, jednocześnie spełniając pierwsze kryterium.

3. Teza i cel rozprawy

W rozdziale 2 zatytułowanym „Cel i teza pracy" Autor w oparciu o analizę aktualnego stanu wiedzy sformułował następującą tezę pracy doktorskiej:

„Istnieje możliwość chłodzenia detali wykonanych z żeliwa sferoidalnego w celu uzyskania struktury ausferrytycznej poprzez kontrolowany impulsowy natrysk zapewniający szybkie schłodzenie obrabianego obiektu do temperatury ausferrytyzacji, eliminując niebezpieczeństwo przekroczenia temperatury przemiany martenzytycznej na jego powierzchni."

Nakreślonym przez Autora celem pracy wskazującym kierunek realizowanych badań jest: *„Celem pracy jest opracowanie zarysu technologii pozwalającej na obróbkę cieplna żeliwa przy pomocy impulsowego natrysku mgły wodnej i jednocześnie dającej możliwość kontroli nad procesem chłodzenia".*

Postawiona w tym rozdziale teza jest adekwatna do sformułowanego celu pracy. Zaproponowany w celu zakres badań jest poprawny i pozwala na udowodnienie postawionej tezy rozprawy doktorskiej.

4. Ocena części merytorycznej rozprawy

Część merytoryczną pracy rozpoczyna rozdział 6, w którym Doktorant przedstawił opracowanie modelu matematycznego zabiegu chłodzenia do temperatury wytrzymania izotermicznego. Na pierwszych stronach rozdziału przedstawiono równanie przewodzenia ciepła z uwzględnieniem wewnętrznych źródeł ciepła w postaci różniczkowego, nieustalonego równania Fouriera-Kirchoffa. Na kolejnych stronach Autor zdefiniował warunki początkowe, warunki brzegowe I rodzaju (Dirichleta),warunki brzegowe II rodzaju (warunki von Neumanna), warunki brzegowe III rodzaju (warunki Robina), dla przypadku których zestawił tabelarycznie wartości współczynnika przejmowania ciepła dla wybranych warunków wymiany ciepła (tabela 6.1) oraz warunki brzegowe IV rodzaju. W dalszej części rozdziału, Doktorant przedstawił istotę metody odchyłek ważonych oraz metodę Galerkina, które stanowiły właściwe wprowadzenie do opisania metody elementów skończonych jako szczególnego zastosowanie metody Galerkina.

Dla rozwiązania postawionego zadania nieustalonego przewodzenia ciepła, opracowano dedykowany program i realizujący rozwiązywanie układów równań różniczkowych metodą MES, wykorzystujący biblioteki GNU Scientific Library. Dla metody elementów skończonych i przyjętych charakterystycznych parametrów, przedstawiono wyniki pola temperatury, porównując wykresy rozwiązań otrzymane analitycznie i za pomocą MES.

W podrozdziale 6.4 Doktorant w sposób analityczny oraz numeryczny określił graniczne odległości od powierzchni, dla których można teoretycznie przeprowadzić obróbkę cieplną, zapewniając zadany z góry czas uzyskania temperatury hartowania izotermicznego. Wyniki obliczeń analitycznych i numerycznych przedstawiono na rysunku w połączeniu z liniami wykresu CTPc (rys. 6.9) dla żeliwa niskostopowego.

W końcowej części rozdziału (s. 66-68) określono warunki przepływu ciepła w obrabianym cieplnie materiale dla wybranego sposobu chłodzenia. Geometrię rozpatrywanej przestrzeni przedstawiono schematycznie (rys. 6.10) a wyniki obliczeń MES za pomocą wykresów dla różnych wartości współczynnika przejmowania ciepła i różnych odległości od powierzchni chłodzonej w połączeniu z liniami wykresu CTPc (rys. 6.12). Na podstawie wyników Doktorant sformułował wnioski stwierdzające, że uzyskiwany rozkład przestrzenny temperatury zależy od wartości i dokładności określenia współczynnika przejmowania ciepła a także, że wyeliminowanie wydzielania się perlitu jest możliwe w warstwie odlewu o grubości do 30 mm.

W rozdziale 7 Doktorant przedstawił stanowisko badawcze do pomiaru współczynnika przejmowania ciepła. W kolejnych podrozdziałach opisano założenia projektowe, układ elektryczny i pomiarowy, układ hydrauliczno-powietrzny, wyniki wykonanych pomiarów współczynnika przejmowania ciepła oraz dyskusję otrzymanych wyników. Zasadniczym założeniem projektowych pomiaru współczynnika przejmowania ciepła było ustalenie warunków przepływu ciepła i przyjęto jako stałe - czynniki związane z wydatkiem wody, wielkością kropel czy rodzajem i chropowatością chłodzonego materiału.

Bardzo pozytywnie należy ocenić wykonanie elementu grzewczego, jego usytuowanie z próbką są wykonane w taki sposób, aby ograniczyć transfer ciepła do otoczenia i aby zapewnić wydzielanie ciepła bezpośrednio pod płytką pomiarową. Element grzejny zaizolowano płytkami ceramicznymi. Pomiary dokonywano przez multimetr oraz rejestrator były cyklicznie odczytywane

za pomocą autorskiego oprogramowania oraz komputera PC. Analizując budowę stanowiska i układ natrysku wody, w którym generowanie i transport strumień kropel z rozpylacza odbywa się w polu grawitacji nad chłodzoną próbką powstaje pytanie, czy Autor zabezpieczył stanowisko badawcze przed efektem **kumulacji kropel** wody na powierzchni chłodzonej próbki i jaki to miało wpływ na wyniki badań. Otrzymane przez Autora wyniki badań zostały przedstawione w formie wykresów punktowych (rys. 7.11, rys. 7.12) w funkcji temperatury. Niestety, przedstawione wykresy mają kilka braków. Pierwszym z nich jest niewłaściwy opis osi wykresu. Na rys 7.11 oś rzędnych podpisano „**Ciepło** emitowane przez element grzewczy [**W**]" – z jednostką opisującą strumień cieplny. Oś odciętych opisano „temperatura [^{o}C]" - nie precyzując, w odniesieniu do schematu z rys. 7.10, jakiego punktu dotyczy (np. t_p). Kolejnym brakiem, moim zdaniem wyników bardzo ważnych dla pracy i cennych dla Autora, jest brak opracowania statystycznego otrzymanych wartości współczynnika przejmowania ciepła. Ostatnim występującym tutaj brakiem jest **brak dyskusji wyników** w podrozdziale 7.5 o dumnym tytule „Dyskusja otrzymanych wyników pomiarów współczynnika przejmowania ciepła". Zamiast niej, zamiast oceny jakości wyników, znajdujemy krótki dwuzdaniowy komentarz.

W rozdziale 8 Doktorant przedstawił model obróbki cieplnej z wykorzystaniem chłodzenia impulsowego. Model obróbki cieplnej utworzono za pomocą programu Scilab i przedstawiono na dobrze, przejrzyście zredagowanym schemacie (rys.8.1). Niestety, schemat ten zawiera szereg nazw, oznaczeń nieopisanych w podpisie rysunku, jak i większości nie przytoczonych w tekście rozdziału. Na podstawie wykresu (rys.8.3) wyników obliczeń numerycznych i opracowanego modelu zawierającego m.in. blok symulujący impulsowe chłodzenie strumieniem mgły wodnej oraz wyniki pomiarów współczynnika przejmowania ciepła, Autor stwierdził, że hartowanie izotermiczne przy zastosowaniu mgły wodnej jako chłodziwa jest możliwe. Niestety, trudno zgodzić się ze stosowaną kolejny raz nazwą **„Współczynnik wymiany ciepła W/(m^{2}K)"**, tym razem dla wyników cyfrowych.

Przedstawione analizy pozwalają stwierdzić, że Doktorant podjął się opracowania założeń modelu obróbki cieplnej z wykorzystaniem chłodzenia impulsowego pozwalającego na przewidywanie zmian mikrostruktury odpowiednich dla hartowania izotermicznego.

W rozdziale 9 Doktorant przedyskutował otrzymane w rozdziale 8 wyniki, potwierdzając zastosowanie opracowanego modelu numerycznego do obróbki cieplnej metodą modulacji szerokości impulsu przepływu ciepła a następnie w kolejnych podrozdziałach przedstawił budowę stanowiska do obróbki cieplnej żeliwa ADI, przygotowanie próbek do badań, charakterystykę próbek poddanych procesowi obróbki cieplnej, przebieg eksperymentu i otrzymane wyniki badań.

Na pierwszych stronach rozdziału Autor przedstawił schematy układu elektrycznego i hydrauliczno-powietrznego stanowiska doświadczalnego do chłodzenia impulsowego. Przedstawił również niezbędne wyposażenie stanowiska jakim są piece oporowe do austenityzacji oraz wygrzewania izotermicznego próbek żeliwa. Zasadniczym elementem stanowiska chłodzenia jest dysza - jednofazowa pełnostożkowa o kącie rozpylenia 30^0, pracująca w instalacji wodno-powietrznej w sposób impulsowy – sterowana elektrozaworem.

Wadą zastosowanych przez Autora schematów jest brak opisu oznaczeń i symboli rysunkowych w podpisach rysunków. Może to powodować mylną interpretację wynikająca ze stosowania takich samych oznaczeń dla elementów układów w dwóch różnych schematach

położonych na sąsiadujących stronach. Dobrym przykładami eliminowania tego problemu są przykładowe podpisy rysunków: 9.6, 9.8, 9.9).

Omawiając metodykę prowadzenia badań, podobnie jak przy analizie rozdziału 7, powstaje pytanie czy stanowisko zapewnia realizację zakładanego sposobu prowadzenia badań. Czy jest zabezpieczone przed efektem **kumulacji kropel** wody na powierzchni próbki.

W dalszej części pracy (podrozdział 9.1.3) przedstawiono sposób i kształt przygotowania próbek. Próbki walcowe umieszczano w przygotowanej osłonie (rys. 9.6 - 9.7) – izolacji termicznej, aby zdaniem Autora, ochronić próbkę przed niekontrolowanym chłodzeniem oraz minimalizować wnikanie kropel wody do izolacji. Zastosowanie tej osłony jest uzasadnione zamiarem uzyskania przejmowania jak największej części strumienia ciepła z górnej powierzchni próbki zraszanej strumieniem kropel. Pozostaje pytania, **jak skuteczna** jest ta 4 -milimetrowa **warstwa izolacji** oraz czy pozostałe ściany osłony są chłodzone?

W dalszej części rozdziału Doktorant dla wytypowanych 3 próbek potwierdził, że chłodzenie próbek z żeliwa sferoidalnego w wodzie prowadzi do ich zahartowania. W tym celu szczegółowo scharakteryzował próbki przeznaczone do obróbki cieplnej. Charakterystyka ta zawierała: skład chemiczny, mikrostrukturę z oceną kształtu, udział i typ grafitu oraz rodzaj osnowy metalicznej. Po przeprowadzonym hartowanie w wodzie, badaniami mikrostruktury i mikrotwardości potwierdził ich zahartowany stan a tym samym, że wartość temperatury Ms jest wyższa od temperatury otoczenia.

W podrozdziale 9.3 Doktorant przedstawił wykresy przebiegów obróbki cieplnej dla badanych próbek oraz wykresy przebiegów chłodzenia od temperatury austenityzacji w układzie temperatura/czas. Na przebiegach tych Autor zidentyfikował czasy początku i końca chłodzenia a także pracę elektrozaworu w układzie chłodzenia.

W ostatniej części rozdziału Doktorant przedstawił wyniki badań próbek żeliwa po obróbce cieplnej składającej się z austenityzacji, kontrolowanego impulsowego chłodzenia mgłą wodną do temperatury chłodzenia izotermicznego oraz wytrzymania izotermicznego.

W podrozdziale tym za pomocą wyników badań makroskopowych i mikroskopowych próbek metalograficznych Autor przedstawił analizę mikrostruktury w warstwie poddawanej obróbce cieplnej, a także przedstawił analizę mikrostruktury w przekrojach próbek w odległości: 2mm, 20 mm, 24 mm i 30 mm od powierzchni chłodzonej. Ponadto, próbki żeliwa analizowano za pomocą mikroskopu elektronowego w zakresie mikrostruktury oraz składu chemicznego, zawartości pierwiastków w wybranych punktach próbek i pod względem ich rozkładu powierzchniowego. Badania te potwierdziły uzyskanie struktury ausferrytycznej w próbkach o różnej grubości warstwy chłodzonej.

Merytoryczną część pracy kończy rozdział 10 „Wnioski", w którym Doktorant syntetycznie sformułował szesnaście wniosków wynikających z przeprowadzonych badań. Wśród bardziej rzeczowych można wskazać 3 wnioski sformułowane na podstawie badań symulacyjnych i 3 z badań eksperymentalnych. Wnioski te w mojej ocenie potwierdziły zrealizowanie postawionego celu pracy i udowodnienie głównej tezy.

Przy analizie tej części pracy nasuwają się uwagi opisane poniżej.

1. Proszę o wyjaśnienie głównych założeń projektowych stanowiska badawczego (generowanie strumienia cieplnego i mgły wodnej rozmiar płytki, rodzaj i rozmiar dyszy, pozycja i kierunek natrysku, kwestia kumulacji kropel, izolacja próbki przed niekontrolowanym chłodzeniem – jej skuteczność).
2. Proszę o wyjaśnienie pojęć bainitu i ausferrytu w kontekście właściwości ADI oraz jakie zjawisko niepożądane utrudnia otrzymanie wysokich właściwościach ADI.
3. Proszę o wyjaśnienie pojęć współczynnik przejmowania ciepła oraz zdefiniowany przez Doktoranta „Współczynnik wymiany ciepła W/(m^{2}K)" (s. 35, s. 83).
4. Proszę o wyjaśnienie zjawiska Leidenfrosta i jego znaczenie dla procesu przejmowania ciepła z powierzchni odlewu od temperatury austenityzacji do hartowania izotermicznego żeliwa ADI. Czy układ pozostaje w zakresie temperatury wyższej od temperatury Leidenfrosta? Jaki oznacza to proces na powierzchni chłodzonej: wrzenie pęcherzykowe, błonkowe, czy wrzenie warstwowe?
5. Proszę wyjaśnić na czym polega błędny opis wykresu na rys 7.11. „Ciepło emitowane przez element grzewczy [W]". Oś odciętych opisano „temperatura [^{O}C]" - nie precyzując jakiego punktu dotyczy?

Podsumowując, pragnę podkreślić, że opracowanie *Chłodzenie impulsowe natryskiem wodnym w hartowaniu izotermicznym żeliwa z grafitem kulkowym (ADI)* **potwierdza dojrzałość naukową Autora rozprawy. Doktorant zrealizował przyjęty zakres merytoryczny pracy. Wykazał się rozległą wiedzą, umiejętnością prowadzenia badań eksperymentalnych oraz opracowywania i analizy wyników, a także poprawnym wnioskowaniem. Rozprawa doktorska potwierdza zdolność do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez mgr inż. Piotra Jana Stręka, ubiegającego się o nadanie stopnia doktora, spełniając tym samym drugie kryterium.**

Według mojej opinii, przedłożona rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Jana Stręka stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie chłodzenia impulsowego natryskiem wodnym w hartowaniu izotermicznym żeliwa z grafitem kulkowym (ADI), jednocześnie spełniając trzecie kryterium.

5. Wniosek końcowy

Przedstawione uwagi krytyczne nie umniejszają mojej pozytywnej oceny recenzowanej rozprawy ani pod względem stosowanych metod badawczych, ani jakości uzyskanych wyników i ich interpretacji. Mają one charakter konstruktywnej rekomendacji, którą Doktorant może uwzględnić w dalszej pracy naukowej, rozwijając swoje kompetencje badawcze i naukowe.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

.....
(podpis recenzenta)