Imię i nazwisko recenzenta:
**dr hab. inż. Dawid Myszka, prof. PW**
Dane adresowe:
Politechnika Warszawska
Instytut Technik Wytwarzania
ul. Narbutta 85
02-524 Warszawa

Warszawa, 24.07.2026r.

**Recenzja pracy doktorskiej**

**mgr inż. Piotr Jan Stręk**
(imię i nazwisko doktoranta)

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

przygotowanej pod kierunkiem:

**prof. dr hab. inż. Andrzeja Burbelko**
(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.).

## 2. Charakterystyka i opis rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Jana Stręka pt. „Chłodzenie impulsowe natryskiem wodnym w hartowaniu izotermicznym żeliwa z grafitem kulkowym (ADI)" została wykonana na Wydziale Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Andrzeja Burbelko. Tematyka rozprawy wpisuje się w dyscyplinę inżynieria materiałowa i dotyczy zagadnienia o istotnym znaczeniu zarówno poznawczym, jak i aplikacyjnym, obejmującego probn lematykę obróbki cieplnej żeliwa ausferrytycznego (ADI), modelowania procesów wymiany ciepła oraz opracowania alternatywnej technologii chłodzenia umożliwiającej zastąpienie tradycyjnych kąpieli solnych kontrolowanym impulsowym natryskiem wodnym.

Rozprawa liczy 151 stron i została podzielona na dziesięć zasadniczych rozdziałów, obejmujących kolejno: wprowadzenie, cel i tezę pracy, opis zakresu badań, obszerny przegląd literatury dotyczący technologii produkcji żeliwa ADI oraz zjawisk towarzyszących chłodzeniu natryskowemu, część poświęconą modelowaniu numerycznemu, opis zaprojektowanych stanowisk badawczych, wyniki badań eksperymentalnych oraz wnioski końcowe. Strukturę pracy należy uznać za logiczną i przejrzystą. Autor konsekwentnie prowadzi czytelnika od analizy problemu technologicznego, poprzez opracowanie modelu matematycznego i budowę stanowisk badawczych, aż do eksperymentalnej weryfikacji zaproponowanej technologii.

Celem rozprawy było opracowanie technologii umożliwiającej kontrolowane chłodzenie żeliwa sferoidalnego po austenityzacji z wykorzystaniem impulsowego natrysku mgły wodnej oraz wykazanie możliwości uzyskania struktury ausferrytycznej bez przekroczenia temperatury początku przemiany martenzytycznej na powierzchni obrabianego elementu. Realizacja tego celu wymagała połączenia zagadnień z zakresu fizyki wymiany ciepła, modelowania numerycznego, projektowania układów sterowania oraz klasycznej metalurgii żeliwa ADI. Autor słusznie przyjął, że powodzenie proponowanej technologii uzależnione jest od możliwości precyzyjnego sterowania intensywnością chłodzenia, co stanowi główny problem badawczy rozprawy.

Na szczególne podkreślenie zasługuje kompleksowy charakter przeprowadzonych badań. Autor nie ograniczył się do analiz teoretycznych, lecz zaprojektował i wykonał stanowisko do wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła, opracował własny model numeryczny procesu chłodzenia, a następnie zbudował stanowisko umożliwiające przeprowadzenie procesu obróbki cieplnej z wykorzystaniem impulsowego natrysku wodnego. Tak zaplanowany program badawczy świadczy o dużej samodzielności Doktoranta oraz umiejętności łączenia badań podstawowych z eksperymentem technologicznym.

Jednocześnie należy zauważyć, że rozprawa ma wyraźnie interdyscyplinarny charakter. Znaczna jej część poświęcona została zagadnieniom modelowania matematycznego, numerycznego rozwiązywania równań przewodzenia ciepła oraz projektowaniu układów pomiarowych i sterowania procesem chłodzenia. Chociaż elementy te są niezbędne dla realizacji założonego celu badawczego, powodują one, że miejscami akcent zostaje przesunięty z problematyki stricte materiałowej na zagadnienia z pogranicza mechaniki płynów, automatyki i metod numerycznych. W opinii recenzenta nie wpływa to negatywnie na wartość rozprawy, jednak proporcje pomiędzy analizą materiałową a opisem zagadnień obliczeniowych mogłyby być nieco bardziej zrównoważone.

Pewien niedosyt budzi również relacja pomiędzy rozbudowaną częścią dotyczącą modelowania procesu chłodzenia a eksperymentalną oceną właściwości materiału po przeprowadzonej obróbce cieplnej. Autor skoncentrował się przede wszystkim na wykazaniu możliwości uzyskania struktury ausferrytycznej, natomiast w mniejszym stopniu odniósł się do kompleksowej charakterystyki właściwości mechanicznych otrzymanego materiału, które mogłyby stanowić dodatkowe potwierdzenie skuteczności opracowanej technologii.

Pomimo wskazanych uwag należy stwierdzić, że rozprawa stanowi wartościowe opracowanie naukowe podejmujące oryginalny problem badawczy o wysokim potencjale aplikacyjnym. Autor zgromadził obszerny materiał eksperymentalny oraz wykazał się umiejętnością prowadzenia badań obejmujących zarówno modelowanie numeryczne, jak i eksperyment technologiczny. Praca stanowi spójne opracowanie, którego wyniki mogą znaleźć praktyczne zastosowanie w rozwoju nowoczesnych technologii obróbki cieplnej żeliwa ADI.

**Dobór i wykorzystanie źródeł literaturowych**

Przegląd literatury przedstawiony w rozprawie obejmuje zagadnienia związane z technologią wytwarzania żeliwa ADI, procesami obróbki cieplnej, zjawiskami wymiany ciepła podczas chłodzenia natryskowego oraz modelowaniem procesów cieplnych. Autor wykorzystał liczne krajowe i zagraniczne publikacje naukowe, monografie oraz materiały źródłowe, wykazując dobrą orientację w aktualnym stanie wiedzy dotyczącym podejmowanej problematyki. Dobór literatury należy uznać za właściwy i odpowiadający zakresowi prowadzonych badań.

Na pozytywną ocenę zasługuje umiejętne wykorzystanie literatury do uzasadnienia celu pracy oraz przyjętej metodyki badań. Autor poprawnie przedstawia aktualny stan wiedzy i odnosi go do realizowanego programu badawczego.

Pewien niedosyt budzi natomiast stosunkowo ograniczona krytyczna analiza cytowanych publikacji. W wielu miejscach przegląd literatury ma charakter opisowy, a szersza konfrontacja wyników różnych autorów oraz wskazanie istniejących rozbieżności interpretacyjnych mogłyby lepiej wyeksponować lukę naukową, której rozwiązaniu poświęcona jest rozprawa.

Podsumowując, dobór źródeł literaturowych należy ocenić wysoko. Zgromadzony materiał bibliograficzny jest obszerny, aktualny i właściwie wykorzystany, choć jego krytyczna analiza mogłaby zostać w niektórych fragmentach bardziej pogłębiona.

**Tezy badawcze**

Cel pracy oraz postawiona teza badawcza zostały sformułowane jasno i jednoznacznie. Autor przyjął założenie, że możliwe jest zastąpienie tradycyjnego chłodzenia w kąpielach solnych kontrolowanym impulsowym natryskiem mgły wodnej, zapewniającym odpowiednio szybkie schłodzenie odlewu do temperatury przemiany izotermicznej bez przekroczenia temperatury początku przemiany martenzytycznej na jego powierzchni. Teza ta jest ambitna, dobrze uzasadniona oraz odpowiada aktualnym wyzwaniom związanym z rozwojem bardziej ekologicznych technologii obróbki cieplnej żeliwa ADI.

Na pozytywną ocenę zasługuje fakt, że postawiona teza ma charakter weryfikowalny i została konsekwentnie powiązana z programem badań obejmującym modelowanie numeryczne, wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła oraz eksperymentalną walidację opracowanej technologii. Przedstawione wyniki badań pozwalają uznać, że Autor w sposób przekonujący potwierdził zasadność przyjętych założeń badawczych.

Pewnym niedosytem pozostaje natomiast fakt, że teza koncentruje się przede wszystkim na możliwości realizacji procesu chłodzenia, natomiast w mniejszym stopniu odnosi się do końcowych właściwości użytkowych otrzymanego materiału. Uwzględnienie aspektów związanych z właściwościami mechanicznymi lub trwałością eksploatacyjną mogłoby dodatkowo podkreślić materiałowy charakter rozprawy.

**Zastosowana metodyka badań**

Zastosowaną w rozprawie metodykę badań należy ocenić wysoko. Autor opracował kompleksowy program badawczy obejmujący zarówno analizy teoretyczne i modelowanie numeryczne, jak również badania eksperymentalne prowadzące do weryfikacji zaproponowanej technologii impulsowego chłodzenia natryskiem wodnym. Przyjęta metodyka została podporządkowana realizacji postawionej tezy badawczej i cechuje się logiczną oraz konsekwentną strukturą.

Na szczególne podkreślenie zasługuje zaprojektowanie i wykonanie dwóch autorskich stanowisk badawczych. Pierwsze z nich umożliwiło wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła w funkcji temperatury chłodzonej powierzchni, natomiast drugie posłużyło do realizacji procesu obróbki cieplnej z wykorzystaniem sterowanego impulsowego natrysku wodnego. Uzyskane wyniki pomiarów zostały wykorzystane do budowy modelu numerycznego procesu chłodzenia oraz jego eksperymentalnej walidacji, co świadczy o właściwym połączeniu badań symulacyjnych z eksperymentem.

Pozytywnie należy również ocenić zastosowanie metod metalograficznych do oceny skuteczności przeprowadzonego procesu obróbki cieplnej. Analiza mikrostruktury pozwoliła na potwierdzenie uzyskania osnowy ausferrytycznej zgodnie z przewidywaniami modelu numerycznego, stanowiąc istotny element weryfikacji postawionej tezy.

Pewien niedosyt budzi natomiast stosunkowo ograniczony zakres badań właściwości mechanicznych otrzymanego materiału. Rozszerzenie programu badawczego o kompleksową ocenę właściwości wytrzymałościowych i eksploatacyjnych pozwoliłoby na pełniejszą ocenę

skuteczności opracowanej technologii oraz zwiększyłoby jej potencjał aplikacyjny. Niezależnie od tej uwagi należy stwierdzić, że zastosowana metodyka badań została właściwie dobrana do charakteru rozwiązywanego problemu i umożliwiła osiągnięcie założonych celów rozprawy.

**Dyskusja wyników**

Dyskusję wyników przeprowadzono w sposób logiczny i spójny z przyjętym programem badań. Autor konsekwentnie przedstawia kolejne etapy weryfikacji opracowanej technologii – od wyników modelowania numerycznego, poprzez wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła, aż do eksperymentalnego potwierdzenia możliwości uzyskania struktury ausferrytycznej przy zastosowaniu impulsowego natrysku wodnego. Taki sposób prezentacji pozwala na prześledzenie całego procesu badawczego oraz ocenę poprawności przyjętych założeń.

Na szczególną uwagę zasługuje umiejętne powiązanie wyników obliczeń numerycznych z rezultatami badań eksperymentalnych. Autor wykazał zgodność przewidywanego przebiegu procesu chłodzenia z uzyskaną mikrostrukturą badanych próbek, co stanowi przekonujące potwierdzenie poprawności opracowanego modelu oraz skuteczności proponowanej technologii. Wnioski wyciągane na podstawie uzyskanych wyników są rzeczowe i pozostają w zgodzie z przedstawionymi danymi eksperymentalnymi.

Pewien niedosyt budzi natomiast zakres dyskusji odnoszącej się do praktycznych ograniczeń opracowanej technologii. W pracy stosunkowo niewiele miejsca poświęcono analizie wpływu geometrii odlewów, zmiennej grubości ścianek czy składu chemicznego żeliwa na skuteczność procesu chłodzenia impulsowego. Szersze odniesienie do tych zagadnień oraz bardziej rozbudowana konfrontacja uzyskanych wyników z rezultatami publikowanymi przez innych autorów mogłyby dodatkowo wzmocnić wartość naukową dyskusji.

Pomimo wskazanych uwag dyskusję wyników należy ocenić wysoko. Autor wykazał się umiejętnością krytycznej interpretacji uzyskanych rezultatów oraz poprawnego powiązania zagadnień z zakresu wymiany ciepła, modelowania numerycznego i inżynierii materiałowej, co pozwoliło na wiarygodne potwierdzenie postawionej tezy badawczej.

**Prezentacja wyników – jakość tabel, wykresów i grafiki**

Sposób prezentacji wyników należy ocenić wysoko. Rozprawa została przygotowana starannie pod względem edytorskim, a tabele, wykresy, fotografie oraz schematy są czytelne i dobrze opisane. Poszczególne elementy graficzne zostały właściwie dobrane do prezentowanych zagadnień, co ułatwia analizę uzyskanych rezultatów oraz pozwala na łatwe śledzenie toku prowadzonych badań.

Na pozytywną ocenę zasługuje również logiczne powiązanie części graficznej z opisem wyników. Wykresy i ilustracje stanowią wartościowe uzupełnienie tekstu, a nie jedynie jego powtórzenie. Szczególnie cenne są fotografie stanowisk badawczych oraz obrazy dokumentujące przebieg badań eksperymentalnych, które zwiększają przejrzystość przedstawionej metodyki.

**Uwagi krytyczne do dyskusji**

Przedstawiona rozprawa stanowi wartościowe opracowanie naukowe, jednak podczas jej lektury nasunęło mi się kilka uwag o charakterze dyskusyjnym. Spodziewałbym się zatem odpowiedzi na poniższe kwestie podczas publicznej obrony rozprawy:

1. Autor wykazał możliwość zastąpienia kąpieli solnej impulsowym natryskiem wodnym. W jakim stopniu opracowana technologia zachowa swoją skuteczność w przypadku odlewów o bardziej złożonej geometrii oraz znacznie zróżnicowanej grubości ścianek?

2. Rozprawa koncentruje się przede wszystkim na analizie przebiegu procesu chłodzenia oraz uzyskanej mikrostruktury. Czy Autor rozważał rozszerzenie programu badań o kompleksową ocenę właściwości mechanicznych oraz trwałości eksploatacyjnej materiału po zastosowaniu nowej technologii?
3. W pracy przedstawiono wyniki modelowania numerycznego procesu chłodzenia. Jakie są główne ograniczenia opracowanego modelu i które z przyjętych założeń mogą mieć największy wpływ na dokładność uzyskiwanych wyników?
4. Opracowana technologia ma niewątpliwy potencjał aplikacyjny. Czy Autor przeprowadził lub planuje przeprowadzić analizę ekonomiczną i środowiskową porównującą impulsowe chłodzenie natryskowe z tradycyjnym hartowaniem w kąpielach solnych?

Powyższe uwagi nie obniżają mojej pozytywnej oceny rozprawy, lecz mają na celu rozwinięcie dyskusji naukowej oraz lepsze wyeksponowanie potencjału opracowanej technologii.

## 3. Wniosek końcowy

Na podstawie szczegółowej analizy przedłożonej rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Jana Stręka pt. *„Chłodzenie impulsowe natryskiem wodnym w hartowaniu izotermicznym żeliwa z grafitem kulkowym (ADI)”* stwierdzam, co następuje:

### a) Ocena poziomu wiedzy teoretycznej Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa

Doktorant wykazał się bardzo dobrą wiedzą teoretyczną w dyscyplinie inżynieria materiałowa, obejmującą zagadnienia związane z obróbką cieplną żeliwa sferoidalnego, kształtowaniem mikrostruktury żeliwa ausferrytycznego (ADI), wymianą ciepła oraz modelowaniem procesów cieplnych. Umiejętnie połączył wiedzę z zakresu metalurgii, materiałoznawstwa, termodynamiki i metod numerycznych, wykorzystując ją do rozwiązania postawionego problemu badawczego. Przeprowadzone analizy oraz sposób interpretacji uzyskanych wyników potwierdzają, że posiada przygotowanie teoretyczne w pełni odpowiadające wymaganiom stawianym kandydatom ubiegającym się o stopień doktora w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

### b) Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Rozprawa doktorska jednoznacznie potwierdza, że Doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Świadczy o tym kompleksowe zaplanowanie i realizacja programu badań obejmującego modelowanie numeryczne, opracowanie autorskich stanowisk badawczych, wyznaczenie parametrów procesu chłodzenia oraz eksperymentalną weryfikację zaproponowanej technologii. Na szczególne podkreślenie zasługuje umiejętność integrowania wyników analiz teoretycznych z badaniami eksperymentalnymi oraz ich krytycznej interpretacji, co pozwoliło na osiągnięcie założonych celów pracy i potwierdzenie postawionej tezy badawczej.

### c) Ocena oryginalności rozwiązania problemu naukowego

Przedstawiona rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego polegającego na opracowaniu i zweryfikowaniu technologii impulsowego chłodzenia natryskiem wodnym jako alternatywy dla tradycyjnego hartowania izotermicznego żeliwa ADI w kąpielach solnych. O oryginalności pracy świadczy kompleksowe podejście obejmujące

opracowanie modelu numerycznego procesu chłodzenia, wyznaczenie rzeczywistych współczynników przejmowania ciepła oraz eksperymentalną walidację zaproponowanej technologii. Uzyskane wyniki mają zarówno wartość poznawczą, poszerzając wiedzę dotyczącą sterowania procesami chłodzenia, jak i znaczący potencjał aplikacyjny związany z możliwością wdrożenia bardziej przyjaznej środowisku technologii obróbki cieplnej żeliwa ausferrytycznego.

**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)