Imię i nazwisko recenzenta:
Dr hab. inż. Jan Jezierski, prof. PŚ
Dane adresowe:
[redacted]

Gliwice, 12.07.2026
(data i miejsce)

Recenzja pracy doktorskiej

Piotr Jan Stręk
(imię i nazwisko doktoranta / doktorantki)

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

przygotowanej pod kierunkiem:

Prof. dr. hab. inż. Andriy Burbelko
(imię i nazwisko promotora)

.....
(imię i nazwisko promotora / promotora pomocniczego)

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 prezentuje 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. Wprowadzenie i krótka charakterystyka ważności tematu rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Jana Stręka dotyczy opracowania i zweryfikowania koncepcji sterowanego chłodzenia odlewów z żeliwa sferoidalnego po austenityzacji za pomocą impulsowego natrysku wodnego, tak aby możliwe było uzyskanie struktury ausferrytycznej bez niepożądanego przechłodzenia warstwy przypowierzchniowej poniżej temperatury początku przemiany martenzytycznej. Tematyka pracy mieści się w obszarze

inżynierii materiałowej, a równocześnie łączy zagadnienia metalurgii żeliwa, obróbki cieplnej, wymiany ciepła, automatyki oraz modelowania numerycznego.

Wybór problemu badawczego jest uzasadniony poznawczo i technologicznie. Klasyczna produkcja żeliwa ADI wymaga szybkiego chłodzenia z temperatury austenityzacji do temperatury przemiany izotermicznej, najczęściej w kąpieli z roztopionych soli. Rozwiązanie to jest skuteczne, lecz wiąże się z istotnymi ograniczeniami technologicznymi, środowiskowymi i organizacyjnymi. Zastąpienie kąpieli solnej sterowanym natryskiem wodnym byłoby korzystne, pod warunkiem zachowania odpowiedniej intensywności chłodzenia oraz kontroli temperatury powierzchni odlewu.

Za szczególnie wartościowe uznaję kompleksowe potraktowanie zagadnienia. Doktorant nie ograniczył się do koncepcji stanowiska lub pojedynczej próby technologicznej, lecz kolejno: określił teoretyczne granice procesu, opracował własny solver MES, zaprojektował stanowisko do wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła, wprowadził uzyskane dane do modelu obliczeniowego, zbudował stanowisko do chłodzenia impulsowego ze sprzężeniem zwrotnym i sterowaniem PID, a następnie zweryfikował wyniki na próbkach żeliwa o trzech różnych składach chemicznych. Taki układ pracy jest logiczny i odpowiada zasadom prowadzenia badań inżynierskich.

2.2. Dobór i wykorzystanie źródeł literaturowych

Część literaturowa obejmuje zagadnienia technologii wytwarzania żeliwa ADI, przemian zachodzących podczas austenityzacji i hartowania izotermicznego, wpływu pierwiastków stopowych na wykresy CTP, metod chłodzenia oraz zjawisk towarzyszących natryskowi wodnemu. Doktorant przedstawił również podstawy matematycznego opisu przewodzenia ciepła i metody elementów skończonych. Zakres przeglądu odpowiada interdyscyplinarnemu charakterowi pracy i tworzy podstawę do zaprojektowania badań.

Bibliografia liczy 83 pozycje i zawiera wiele klasycznych, nadal istotnych opracowań. Jej słabszą stroną jest jednak niewielki udział publikacji najnowszych. Od 2020 r. zacytowano jedynie kilka pozycji, podczas gdy zarówno w obszarze żeliwa ADI, jak i chłodzenia natryskowego oraz sterowania procesami cieplnymi ukazało się w ostatnich latach wiele prac mogących poszerzyć kontekst rozprawy. Układ cytowań i opisów bibliograficznych jest ponadto niekonsekwentny, a część rekordów jest niepełna. Cytowania nie powinny być także włączane do tytułów rozdziałów.

Pomimo tych zastrzeżeń Doktorant wykazał dobrą znajomość podstawowej literatury przedmiotu i potrafił wykorzystać ją do uzasadnienia przyjętych modeli, parametrów i rozwiązań konstrukcyjnych. Przegląd literatury potwierdza odpowiednią wiedzę teoretyczną, choć powinien być bardziej aktualny i krytyczny, szczególnie w części dotyczącej rzeczywistego stopnia rozpowszechnienia żeliwa ADI oraz ekonomicznych uwarunkowań jego produkcji.

2.3. Cel i teza pracy

Celem pracy było opracowanie rozwiązania umożliwiającego kontrolowane chłodzenie żeliwa sferoidalnego po austenityzacji za pomocą impulsowego natrysku wodnego, jako potencjalnej alternatywy dla chłodzenia w kąpielach solnych. Tezę sformułowano jako

możliwość uzyskania struktury ausferrytycznej dzięki sterowanemu natryskowi zapewniającemu szybkie schłodzenie do temperatury przemiany izotermicznej bez przekroczenia temperatury początku przemiany martenzytycznej na powierzchni.

Cel i teza są zrozumiałe, możliwe do zweryfikowania i odpowiadają zakresowi przeprowadzonych badań. Określenie „zarys technologii", użyte w pracy, jest jednak nieprecyzyjne. W rzeczywistości rozprawa przedstawia laboratoryjną demonstrację i walidację koncepcji procesu, a nie kompletną technologię gotową do wdrożenia. Doktorant właściwie zachowuje ostrożność w końcowej ocenie, określając wykonane prace jako pilotażowe i wskazując potrzebę dalszych badań.

2.4. Plan badań i zastosowana metodyka

Plan badań obejmował cztery główne etapy: analizę numeryczną granicznych możliwości chłodzenia, eksperymentalne wyznaczenie zależności współczynnika przejmowania ciepła od temperatury powierzchni, opracowanie modelu chłodzenia impulsowego oraz jego walidację w próbach obróbki cieplnej. Zastosowano warunki brzegowe I i III rodzaju, zmienne właściwości termofizyczne materiału, autorski solver MES oraz model w środowisku Scilab/Xcos. Walidację solvera przeprowadzono przez porównanie wyników numerycznych z rozwiązaniem analitycznym.

Istotnym osiągnięciem metodycznym jest zaprojektowanie i wykonanie dwóch stanowisk badawczych. Pierwsze służyło do pomiaru współczynnika przejmowania ciepła w szerokim zakresie temperatury, drugie do realizacji impulsowego chłodzenia z regulacją PID i rejestracją temperatury przypowierzchniowej. W badaniach materiałowych zastosowano mikroskopię optyczną i elektronową, analizę EDS, ocenę grafitu zgodnie z normą oraz pomiary mikrotwardości.

Metody są zasadniczo adekwatne do celu pracy i wzajemnie się uzupełniają. Pewnym ograniczeniem jest niewielka liczba wariantów materiałowych i brak szerszej analizy statystycznej powtarzalności procesu. Trzy próbki o różnych składach chemicznych pozwalają wykazać wykonalność koncepcji, lecz nie pozwalają jeszcze na pełne określenie pola zastosowań technologii. Brakuje również ilościowej analizy udziału składników osnowy i austenitu szczątkowego, która w badaniach żeliwa ADI byłaby szczególnie cenna.

Mimo wskazanych ograniczeń zakres wykonanych prac jest duży, a ich sekwencja świadczy o umiejętności samodzielnego planowania badań, konstruowania stanowisk, prowadzenia pomiarów i łączenia wyników eksperymentalnych z modelowaniem numerycznym.

2.5. Dyskusja wyników

Wyniki obliczeń wykazały, że możliwość ominięcia obszaru przemiany perlitycznej silnie zależy od intensywności wymiany ciepła, właściwości termofizycznych żeliwa oraz odległości od chłodzonej powierzchni. Dla przyjętego składu chemicznego model wskazał granicę rzędu 30 mm warstwy, w której możliwe jest uzyskanie odpowiednio szybkiego chłodzenia. Eksperymentalnie wyznaczona zależność współczynnika przejmowania ciepła od temperatury została następnie wprowadzona do modelu sterowanego chłodzenia.

Walidacja technologiczna wykazała, że niekontrolowane chłodzenie w wodzie prowadzi do powstania martenzytu, natomiast chłodzenie impulsowe pozwala uzyskać strukturę

ausferrytyczną lub ausferrytyczno-perlityczną. Dla próbki 2Mn głębokość strefy o oczekiwanej strukturze odpowiadała prognozie modelu. W próbce 30 przemiana nie przebiegła w pełni, co Doktorant wiąże z brakiem dodatków stopowych przesuwających „nosek perlitu". W próbce WIP, zawierającej Ni i Mo, strukturę ausferrytyczną uzyskano w całym badanym przekroju.

Pozytywnie oceniam fakt, że Doktorant nie ukrywa rozbieżności między obliczeniami i eksperymentem. Dla próbki WIP rzeczywista szybkość chłodzenia była niemal dwukrotnie mniejsza od przewidywanej, a jako możliwą przyczynę wskazano niewłaściwe przyjęcie współczynnika przewodzenia ciepła. Wskazuje to na świadomość ograniczeń modelu i właściwy kierunek dalszych badań.

Dyskusja wyników jest jednak miejscami zbyt opisowa. Szczególnie część mikrostrukturalna ma charakter raportowy i nie zawsze prowadzi do pogłębionej interpretacji relacji pomiędzy składem chemicznym, przebiegiem chłodzenia, odległością od powierzchni i uzyskaną mikrostrukturą. Brak ilościowego określenia udziału faz ogranicza precyzję porównań. Warto byłoby również szerzej przeanalizować zmienność przebiegów temperatury pomiędzy próbkami i stabilność działania układu regulacji.

Całościowo wyniki potwierdzają zasadniczą tezę pracy: kontrolowany impulsowy natrysk wodny może zostać wykorzystany do chłodzenia po austenityzacji w procesie wytwarzania żeliwa ADI, a zastosowanie sprzężenia zwrotnego pozwala ograniczyć ryzyko powstania martenzytu na powierzchni. Jest to wynik oryginalny i technologicznie interesujący, choć wymagający dalszej optymalizacji i walidacji na większej liczbie odlewów oraz w bardziej zróżnicowanych warunkach.

2.6. Poprawność językowa oraz jakość tabel, wykresów i grafiki

Rozprawa ma przejrzysty ogólny układ i zawiera dużą liczbę rysunków, schematów, wykresów i fotografii dokumentujących kolejne etapy badań. Szczególnie przydatne są schematy stanowisk i zestawienia przebiegów temperatury z wynikami modelowania. Praca wymaga jednak wyraźnej korekty językowej i redakcyjnej.

W pliku roboczym zamieściłem ponad sto komentarzy, z których znaczna część dotyczy literówek, błędów fleksyjnych, interpunkcji, niekonsekwentnej terminologii i czasu gramatycznego. W tekście naprzemiennie używano czasu przyszłego i przeszłego, choć opis zakończonych badań powinien być prowadzony konsekwentnie w czasie przeszłym. Należy ujednolicić m.in. określenia „element grzejny" i „element grzewczy", stosować „liczba" zamiast „ilość" dla wielkości policzalnych oraz poprawić terminologię dotyczącą żeliwa ADI i procesu ausferrytyzacji.

Do ważniejszych niedociągnięć pracy należą ponadto:

- nazwa Wydziału Odlewnictwa w języku angielskim to Faculty of Foundry Engineering a nie Foundry Department jak zapisano na str. 3;
- na str. 11 znajduje się stwierdzenie o ciągłym i dynamicznym wzroście produkcji odlewów z żeliwa ADI w Polsce i świecie, z którym się nie zgadzam;
- na str. 11 jest także informacja o najniższych kosztach wytwarzania żeliwa ADI i z tym także nie mogę się zgodzić;

- w kilku miejscach np. na str. 12 Autor niewłaściwie zapisuje „ausferytyczne", „ausferytyzacja" zamiast słów z podwójnym „r". W pracy poświęconej dokładnie temu zagadnieniu są to pomyłki dość istotne;
- na str. 81 jest informacja o zasilaczu „o wydajności 300 A". Nie jest to poprawne określenie;
- na str. 75 i 86 znajdują się obszerne identyczne fragmenty i w drugim przypadku należało ten tekst pominąć, odnosząc się do wcześniejszego opisu;
- w tabeli 9.1 znajdują się składy chemiczne trzech próbek. Z czego wynikają tak różne oznaczenia każdej z próbek? Warto byłoby to wyjaśnić, ponieważ nie są one raczej przypadkowe;
- na str. 99 podano informację, że „próbki intensywnie schłodzono w wodzie". Co to znaczy? Należało podać parametry obróbki np. szybkość chłodzenia;
- na str. 101 jest informacja o „analizowanych gatunkach żeliwa". W pracy nigdzie nie ma mowy o konkretnych gatunkach żeliwa, Doktorant operuje jedynie składem chemicznym próbek;
- tytuł rozdziału 9.3 jest mylący, ponieważ wcześniej opisano już wiele eksperymentów;
- na str. 102 jest informacja, że „czas austenityzacji został ustalony na ok. 60 minut". Dlaczego około tylu minut? Przecież nie jest problemem prowadzić zabieg w dokładnie zadanym czasie, oczywiście z tolerancją typową dla takich działań. "Około" może znaczyć coś innego dla różnych czytelników.
- na str. 106 jest mowa o „warstwie jasnej". Szkoda, że na zdjęciach nie zaznaczono wyraźnie obszaru strefy jasnej, ponieważ można mieć wątpliwości, czy patrzymy na pewno na granicę stref, czy może to wpływ refleksów świetlnych itp.
- w pozycji 5 w bibliografii popełniony został błąd w nazwisku autora – profesora WO AGH. Taka pomyłka w pracy realizowanej na tym wydziale jest bardzo niefortunna;

Niektóre rysunki i ich opisy nie są w pełni spójne. Dotyczy to zwłaszcza orientacji dyszy względem próbki na schematach i fotografiach, oznaczeń elementów stanowiska oraz późnego przedstawienia sposobu wycinania próbek do badań. Część tabel wymaga staranniejszej edycji, a w jednej z nich suma udziałów form grafitu wynosi 100,1%, co wymaga korekty lub wyjaśnienia zasad zaokrąglania. Uwagi te nie podważają wartości merytorycznej rozprawy, ale ich usunięcie poprawiłoby jednoznaczność i profesjonalny poziom dokumentu.

2.7. Uwagi krytyczne i zagadnienia do dyskusji

Rozprawę oceniam jednoznacznie pozytywnie, jednak zawiera ona niedopowiedzenia i ograniczenia, które powinny zostać wyjaśnione podczas publicznej obrony. Poniżej przedstawiam najważniejsze pytania i uwagi; na które oczekuję pisemnej odpowiedzi Doktoranta.

1. Proszę wyjaśnić, w jakim zakresie wyprowadzenie równań i opracowanie solvera MES przedstawione w rozdziale 6 są samodzielnym osiągnięciem Doktoranta. Proszę również krótko scharakteryzować strukturę, sposób działania i walidację autorskiego oprogramowania oraz wskazać, dlaczego nie można było zastosować gotowego środowiska obliczeniowego.

2. Z jakiego powodu do obliczeń granicznych przyjęto bardzo precyzyjnie określony skład chemiczny żeliwa z tabeli 6.2? Czy wynikał on z wcześniejszych badań, dostępnego wykresu CTP czy z założeń projektowych? Jak zmieniłyby się wyniki dla składów odpowiadających próbkom 2Mn, 30 i WIP?

3. Proszę podać i uzasadnić najważniejsze parametry natrysku: temperaturę wody, odległość dyszy od powierzchni, orientację dyszy, ciśnienie, wydatek i charakterystykę rozpylenia. W rozprawie schematy i fotografie nie zawsze jednoznacznie pokazują, czy natrysk był prowadzony pionowo czy poziomo względem chłodzonej powierzchni.

4. Jak oceniono niepewność wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła, zwłaszcza wobec strat ciepła inną drogą niż przez płytkę testową? Jaki wpływ ma ta niepewność na prognozowaną głębokość warstwy, w której można uniknąć przemiany perlitycznej?

5. Proszę wyjaśnić, czy miedziany element mocujący termoelement mógł lokalnie zmieniać przepływ ciepła oraz wskazanie temperatury. Jak oszacowano wpływ sposobu mocowania i dokładność pomiaru temperatury przypowierzchniowej?

6. Dlaczego w próbie hartowania w wodzie zastosowano austenityzację w temperaturze 860°C, podczas gdy zasadnicze eksperymenty prowadzono przy około 920°C? Czy różnica temperatury nie ogranicza porównywalności mikrostruktur uzyskanych po obu wariantach chłodzenia?

7. Dlaczego przebiegi temperatury dla próbek poddanych nominalnie tej samej procedurze różnią się tak istotnie, szczególnie w fazie sterowania impulsowego? Na ile wynika to ze składu i właściwości termofizycznych materiału, a na ile z niestabilności układu chłodzenia i nastaw regulatora PID?

8. Dlaczego nie wykonano ilościowej analizy mikrostruktury po obróbce cieplnej, w szczególności udziału ausferrytu, perlitu, martenzytu i austenitu szczątkowego? Jakie metody byłyby najwłaściwsze do pełniejszej walidacji uzyskania struktury ADI?

9. Proszę dokładnie opisać sposób i miejsca pobierania próbek metalograficznych oraz wykonywania pomiarów mikrotwardości. Dlaczego wykonywano po sześć pomiarów i jak zapewniono ich reprezentatywność w strukturze zawierającej grafit sferoidalny?

10. Dla próbki WIP model wyraźnie przeszacował szybkość chłodzenia. Proszę przedyskutować, które parametry modelu są najbardziej wrażliwe i jakie dodatkowe pomiary należałoby przeprowadzić, aby rozstrzygnąć, czy główną przyczyną jest przewodność cieplna materiału, współczynnik przejmowania ciepła, kontakt termoelementu, czy działanie układu regulacji.

11. Na str. 70 jest informacja o powierzchni chłodzonej płytki. Jak ją należy rozumieć? Czy ta płytka była odlana? Jeśli tak, to w jakiej technologii? Jaka jest jej chropowatość / jakość powierzchni? Jakiej powierzchni odlewu po wybiciu z formy odpowiada?

Ponadto wskazuję na potrzebę uporządkowania nazewnictwa. ADI oznacza Austempered Ductile Iron, a nie „austenitic cast iron”. Obróbce cieplnej poddawane są odlewy z żeliwa sferoidalnego w celu uzyskania struktury ausferrytycznej, a nie „żeliwo ADI” przed przeprowadzeniem tej obróbki. Rozdział końcowy powinien był zostać zatytułowany „Podsumowanie i wnioski”, a część wniosków należało sformułować bardziej syntetycznie i problemowo, zamiast powtarzać oczywiste stwierdzenia o wpływie współczynnika przejmowania ciepła.

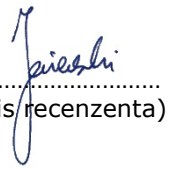
3. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Jana Stręka stanowi spójne opracowanie naukowo-inżynierskie poświęcone oryginalnej koncepcji zastosowania sterowanego impulsowego natrysku wodnego w chłodzeniu po austenityzacji żeliwa sferoidalnego. Do najważniejszych osiągnięć pracy zaliczam opracowanie i walidację modelu numerycznego, eksperymentalne wyznaczenie zależności współczynnika przejmowania ciepła od temperatury, zaprojektowanie dwóch stanowisk badawczych oraz wykazanie możliwości uzyskania struktury ausferrytycznej bez powstania warstwy martenzytycznej na chłodzonej powierzchni.

Praca potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa. Wykazuje również jego umiejętność samodzielnego planowania i prowadzenia badań, budowy aparatury, tworzenia narzędzi obliczeniowych, analizy wyników oraz krytycznej oceny ograniczeń modelu. Oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego jest połączenie pomiarów wymiany ciepła, modelowania MES i sterowania impulsowego ze sprzężeniem zwrotnym w celu realizacji kontrolowanego chłodzenia prowadzącego do struktury ausferrytycznej.

Wskazane w recenzji uwagi krytyczne dotyczą przede wszystkim aktualności przeglądu literatury, stopnia udokumentowania metodyki, braku ilościowej analizy mikrostruktury, niepełnej oceny niepewności oraz poziomu opracowania redakcyjnego. Nie podważają one zasadniczych wyników i nie zmieniają pozytywnej oceny rozprawy. Pracę oceniam jako dobrą i spełniającą wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

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)