

Katedra Zastosowań Matematyki i Metod  
Sztucznej Inteligencji

Wydział Matematyki Stosowanej

Politechnika Śląska

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Marii Zych  
pt. „Wyznaczanie współczynnika wymiany ciepła pomiędzy odlewem a formą odlewniczą  
z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji”  
napisanej pod kierunkiem dr hab. Elżbiety Gawrońskiej, prof. PC**

## **1. Opinia ogólna**

Przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska, przygotowana przez Panią magister inżynier Marię Zych, jest opracowaniem, które oceniam zdecydowanie pozytywnie. Opisuje ona wykorzystanie wybranych algorytmów sztucznej inteligencji w rozwiązywaniu zagadnienia z zakresu termomechaniki, polegającego na odtworzeniu współczynnika przenikania ciepła pomiędzy formą odlewniczą a odlewem na podstawie symulowanych danych pomiarowych. Oceniana praca stanowi dowód biegłej orientacji Autorki na obu polach - zarówno w zakresie heurystycznych metod optymalizacyjnych, jak i modelowania zagadnień przewodzenia ciepła, umiejętnym przeprowadzaniu symulacji komputerowych zjawisk technicznych, analizy danych i wyciąganiu na ich podstawie konstruktywnych wniosków. Co więcej, podjęty temat jest aktualny i istotny z punktu widzenia szeroko pojętej interdyscyplinarności i możliwości połączenia dwóch różnych dziedzin: informatycznej i technicznej. W związku z powyższym, podjęcie przez Doktorantkę badań w zakresie praktycznego wykorzystania algorytmów sztucznej inteligencji w modelowaniu zjawiska związanego z przewodzeniem ciepła uważam za uzasadnione, przyczynia się ono bowiem do rozwoju nauk technicznych w praktyce i usprawniania procesów produkcyjnych.

## **2. Ocena merytoryczna**

### **2.1 Znaczenie problematyki podjętej w recenzowanej rozprawie**

W wielu procesach wytwórczych istotne znaczenie ma możliwość sterowania procesami cieplnymi. Jednym z najważniejszych narzędzi, wykorzystywanych do nowoczesnego przygotowania produkcji, są programy komputerowe symulujące przebieg procesów cieplnych. Aby jednak takie programy móc stworzyć, ważna jest umiejętność sprawnego modelowania tych procesów oraz rozwiązywania zadań przewodnictwa ciepła. Celem niniejszej rozprawy było przedstawienie procedur wykorzystujących algorytmy sztucznej inteligencji, które mogą znaleźć ewentualne zastosowania przemysłowe, np. przy projektowaniu instalacji ciągłego odlewania. Rozwiązując zadania odwrotne można bowiem tak dobrać warunki brzegowe, aby krzepnięcie przebiegało w zadany sposób, co pozwala kontrolować jakość

i własności gotowych odlewów. Sprawne rozwiązywanie zadań odwrotnych ma znaczenie przy modelowaniu różnych zjawisk i procesów fizycznych, gdyż rozwiązania odpowiednio sformułowanych zadań odwrotnych pozwalają tak dobrać np. warunki brzegowe lub parametry materiału, aby dane procesy zachodziły w ściśle określony sposób oraz aby produkty tych procesów posiadały odpowiednie właściwości. W prezentowanym opracowaniu Autorka skupia się na wykorzystaniu algorytmów mrówkowych i pszczelich do odtworzenia wartości współczynnika przenikania ciepła przez warstwę rozdzielającą odlew i formę odlewniczą. Szybkie i precyzyjne wskazanie wartości tego współczynnika spowoduje usprawnienie numerycznej symulacji procesu odlewniczego, w efekcie czego będzie można usprawnić proces produkcyjny dzięki możliwości szybkiego wytworzenia odlewu o ustalonych właściwościach. W literaturze nie są obecne przypadki rekonstrukcji tego parametru przy pomocy algorytmów sztucznej inteligencji, uważam zatem, że Doktorantka umiejętnie dostrzegła lukę badawczą i podjęła próbę jej uzupełnienia. Podjęta przez mgr inż. Zych tematyka jest ważna, tak dla teorii, jak i dla praktyki, a także w kontekście interdyscyplinarności badań naukowych.

## **2.2 Ocena metodyki badawczej (założenia, cele, metody)**

Celem przeprowadzonych badań było wykazanie możliwości doboru współczynnika przewodzenia ciepła warstwy rozdzielającej formę odlewniczą i odlew przy pomocy wybranych algorytmów sztucznej inteligencji i uzasadnienie poprawności tego doboru.

Zagadnienie proste przewodzenia ciepła rozwiązywane było przy pomocy metody elementów skończonych. Modele i siatki były tworzone w programie GMSH, zaś obliczenia numeryczne były przeprowadzane przy pomocy programu TalyFEM. Algorytmy sztucznej inteligencji zostały zaimplementowane w języku Python. Algorytmy te - klasyczne wersje algorytmów mrówkowego i pszczelego - służyły do minimalizacji funkcjonu wyrażającego różnicę między temperaturami wzorcowymi a temperaturami odtworzonymi w wybranych węzłach siatki. Temperatury wzorcowe zostały wyznaczone dla ustalonych wartości odtwarzanego współczynnika.

Badania przeprowadzone zostały w dwóch wariantach. W pierwszym wariacie odtwarzano jedną wartość współczynnika przewodzenia ciepła warstwy rozdzielającej formę i odlew, zatem szukaną wartość współczynnika dobierano z jednego zakresu. W drugim wariacie założono możliwość zmiany wartości rekonstruowanego współczynnika w trakcie trwania procesu odlewania, co może nastąpić, na przykład, w wyniku powstania szczeliny powietrznej, zatem dobierano dwie wartości współczynnika z dwóch zakresów. Wadą takiego podejścia jest założenie znajomości możliwej wartości poszukiwanego współczynnika, aby móc dobrać właściwy zakres lub zakresy, z których dobierane są szukane wartości. Jest to jednak wada niemożliwa do usunięcia, używane algorytmy heurystyczne wymagają bowiem znajomości dziedziny poszukiwań. W każdym wariacie symulacje zostały przeprowadzone dla dwóch różnych geometrii układu odlew - forma odlewnicza. W pierwszej rozważane były dwa kwadratowe

obszary stykające się jedną ścianą symulującą warstwę przenikania ciepła, na której obowiązywał warunek brzegowy IV rodzaju z odtwarzanym współczynnikiem. Druga geometria zakładała kwadratowy obszar, reprezentujący odlew, zamknięty w większym kwadratowym obszarze - formie. Warunek brzegowy IV rodzaju występował na czterech ścianach styku odlewu i formy, przy czym w obliczeniach brana była pod uwagę jedna czwarta takiego układu. Wszystkie symulacje przeprowadzono dla danych materiałowych charakteryzujących stop Al-2%Cu.

Do prezentacji wyników symulacji komputerowych dla obu geometrii i dla obu wariantów doboru wartości współczynnika wykorzystano trzy pary węzłów – jeden przynależny do formy, drugi do odlewu – dla różnych gęstości siatek elementów skończonych. Dla każdej siatki przeprowadzone zostały obliczenia dla dwóch algorytmów: pszczelego ABC i mrówkowego ACO, dla różnych liczebności populacji oraz różnych liczb iteracji. W każdym przypadku uwzględniano również 0%, 1%, 2% i 5% zaburzenia wartości wzorcowych temperatury. Cechą charakterystyczną algorytmów heurystycznych jest to, że każde ich uruchomienie daje wyniki nieco różniące się między sobą. Dlatego wiarygodne stosowanie tego rodzaju algorytmów wymaga ich wielokrotnego uruchomienia, aby móc wybrać najlepszy uzyskany wynik oraz aby sprawdzić stabilność ich działania. Doktorantka przeprowadzała swoje obliczenia trzykrotnie dla każdego rozważanego przypadku. Wydaje mi się to dość małą liczbą – za wystarczające uznałabym uruchamianie procedury około dziesięć razy, jednak jeśli trzykrotne przeprowadzenie obliczeń dawało zbliżone rezultaty, jestem w stanie zaakceptować takie wyniki.

Obliczenia numeryczne i obliczenia z wykorzystaniem rojowych algorytmów optymalizacyjnych były wykonywane naprzemiennie, to znaczy uruchamiany był algorytm sztucznej inteligencji, którego zadaniem był dobór najlepszej wartości poszukiwanego współczynnika, jednak minimalizacja funkcjonału wymagała w każdym kroku obliczenia wartości tego funkcjonału, co z kolei wymagało przeprowadzenia obliczeń numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Cały proces obliczeniowy wymagał zatem ścisłego współdziałania obu technik obliczeniowych.

Wyniki obliczeń, otrzymane z wykorzystaniem każdego z dwóch używanych algorytmów, zaprezentowane zostały w formie tabel zestawiających odtworzone wartości współczynnika przenikania ciepła, wyrażone w procentach wartości odchyleń standardowych otrzymanych odtworzeń oraz wartości minimalizowanego funkcjonału uzyskane na poszczególnych wariantach gęstości siatki, dla różnych zaburzeń danych wejściowych, różnych liczb osobników oraz różnych liczb iteracji, pozwalające porównać błędy odtworzonych wartości współczynnika z błędami danych wyjściowych oraz ocenić wpływ liczby osobników i iteracji na jakość odtworzeń. Następnie, na kolejnych rysunkach pokazane są przebiegi temperatury w czasie dla wybranych trzech par węzłów, odtworzone na poszczególnych wariantach gęstości siatki, dla różnych zaburzeń danych wejściowych, różnych liczb osobników oraz różnych liczb

iteracji, pozwalające prześledzić wahania temperatury w odlewie i formie odlewniczej w trakcie trwania symulacji procesu krzepnięcia.

Przedstawione wyniki wskazują, że zaburzenia danych wejściowych przekładają się na błędy odtworzenia współczynnika przewodzenia ciepła warstwy rozdzielającej formę odlewniczą i odlew, jednak we wszystkich rozważanych przypadkach błąd rekonstrukcji tego współczynnika nie przekraczał błędów zaburzeń danych wzorcowych, a w wielu przypadkach był od niego znacząco niższy. Wyrażone w procentach wartości odchylenia standardowego są bardzo małe, a odtworzone przebiegi temperatury w węzłach reprezentujących odlew i formę wyrównują się po pewnym czasie, co jest zgodne z fizyką zjawiska. Porównując zaś oba algorytmy rojowe, uzyskane błędy odtworzeń poszukiwanego współczynnika oraz wartości odchylenia standardowych są bardzo podobne do siebie, zatem oba algorytmy heurystyczne zostały uznane za użyteczne w rozwiązywaniu tego rodzaju zagadnień.

Uważam zatem, że postawiony przez Autorkę cel został osiągnięty – w przedstawionej pracy wykazała i uzasadniła możliwość praktycznego wykorzystania algorytmów sztucznej inteligencji do rekonstrukcji wartości współczynnika przewodzenia ciepła warstwy rozdzielającej formę odlewniczą i odlew, występującego w warunku brzegowym IV rodzaju modelu przewodzenia ciepła w procesie stygnięcia stopów dwuskładnikowych. Moim zdaniem Doktorantka wykazała się bardzo dobrą znajomością metodyki przeprowadzania eksperymentu numerycznego. Dobrze przygotowane procedury komputerowe i sprawnie przeprowadzone obliczenia zapewniły realizację zakładanego celu. Zarówno teoretyczny opis metodyki badawczej, jak i prezentację wyników symulacji komputerowych oraz wnioski wysnute na ich podstawie uważam za poprawne i uzasadnione.

### **2.3 Ocena struktury rozprawy doktorskiej**

Recenzowana rozprawa wraz z załącznikami liczy 200 stron, przy czym właściwe opracowanie tematu obejmuje 158 stron i podzielone jest na 8 rozdziałów, resztę zajmuje streszczenie w języku polskim i angielskim, bibliografia, spis tablic i spis rysunków.

Rozdział 1 przedstawia opis aktualnego stanu wiedzy w zakresie podejmowanej tematyki. Rozdział rozpoczyna się od krótkiego wstępu, po czym w trzech kolejnych podrozdziałach zaprezentowany został przegląd stanu wiedzy z zakresu rozwiązywania bezpośrednich i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła oraz możliwości zastosowania algorytmów sztucznej inteligencji inspirowanych naturą w rozwiązywaniu różnorodnych problemów informatycznych, ekonomicznych oraz technicznych i inżynierskich, w szczególności zagadnień termomechanicznych, polegających między innymi na rekonstrukcji współczynników regulujących przebieg procesów cieplnych, charakteryzujących się przemianami fazowymi, w tym krzepnięcia czystych metali i stopów dwuskładnikowych. Rozdział kończy się podsumowaniem, w którym Autorka podkreśla znaczenie algorytmów sztucznej inteligencji, usprawniających rozwiązywanie zagadnień symulujących zachodzenie procesów przemysłowych,

w szczególności procesów odlewniczych oraz przedstawieniem motywacji do badań podjętych w niniejszej rozprawie. Doktorantka dostrzegła bowiem, że podejście wykorzystujące heurystyczne algorytmy optymalizacyjne nie było stosowane do wyznaczania wartości współczynnika przenikania ciepła pomiędzy formą odlewniczą a odlewem. Ten brak Doktorantka postanowiła uzupełnić swoimi badaniami, co uważam za uzasadniony powód powstania ocenianej rozprawy.

Rozdział 2 zawiera konkretne i syntetyczne sformułowanie głównego celu pracy oraz wyszczególnienie jej celów szczegółowych.

Rozdział 3 przedstawia teoretyczny opis modelu matematycznego zjawiska przewodzenia ciepła. Autorka przedstawia w nim wyprowadzenie równania przewodzenia ciepła oraz opisuje możliwe warunki początkowe i brzegowe, uzupełniające wspomniane równanie. Zaprezentowany opis jest dość krótki, ale wystarczający dla potrzeb recenzowanej pracy.

Rozdział 4 poświęcony jest algorytmom sztucznej inteligencji. Autorka rozpoczyna rozdział od ogólnego nakreślenia idei inteligencji obliczeniowej oraz koncepcji algorytmów rojowych, po czym przechodzi do szczegółowej charakterystyki algorytmów pszczelego i mrówkowego, które będą wykorzystywane w dalszej części pracy. Oba algorytmy zostały omówione pod względem inspiracji zaczerpniętych z naturalnego zachowania pszczół i mrówek poszukujących pożywienia oraz sposobów przełożenia działań owadów w przyrodzie na język algorytmów, wzorów matematycznych i procedur komputerowych. Szczegółowo zostały opisane parametry regulujące działanie algorytmów oraz kolejne kroki postępowania, dla każdego algorytmu przedstawiony został pseudokod. Oczywiście wersji algorytmów pszczelich i mrówkowych jest już obecnych wiele w literaturze, Autorka skupia się na opisie procedur inspirowanych zachowaniem rojów mrówek i pszczół wykorzystywanych w niniejszej pracy, robi to jednak sprawnie i z pełnym zrozumieniem, dlatego oceniam ten rozdział również bardzo dobrze.

W rozdziale 5 Doktorantka opisuje założenia, jakie poczyniła w związku z przeprowadzonymi badaniami. W rozdziale tym przedstawione zostały wykorzystane programy komputerowe oraz parametry maszyny, na której prowadzone były obliczenia. Następnie omówione zostały szczegóły przedstawionej symulacji procesu odlewania ciągłego, to znaczy zastosowane geometrie dziedziny zagadnienia, założone warunki początkowe i brzegowe, parametry materiałowe, postać minimalizowanego funkcjonału oraz zastosowana metoda numeryczna, służąca do rozwiązania zagadnienia bezpośredniego, związanego z rozważanym zadaniem odwrotnym.

Rozdziały 6 i 7 stanowią zasadniczą część pracy, zawierają bowiem analizę wyników symulacji dla zadania testowego, polegającego na porównaniu wartości temperatur obliczonych dla odtworzonego współczynnika przewodzenia ciepła warstwy rozdzielającej formę odlewniczą i odlew z wartościami wzorcowymi w trzech parach węzłów położonych na styku odlewu i formy, zilustrowanych rysunkami poglądowymi. Analiza wyników została przeprowadzona dla dwóch wariantów badawczych

zrealizowanych na dwóch geometriach procesu. Dla każdej z tych czterech wersji zadania wykonana została seria obliczeń z wykorzystaniem każdego z dwóch algorytmów rojowych: mrówkowego i pszczelego, dla różnych zakłóceń danych wejściowych, różnych liczebności populacji owadów i różnych liczb iteracji. Wyniki zostały przedstawione w postaci serii tabel i rysunków, pozwalających porównać błędy odtworzonych wartości współczynnika z błędami danych wyjściowych oraz ocenić wpływ parametrów algorytmów na jakość rekonstruowanych wartości oraz prześledzić przebiegi odtworzonej temperatury w odlewie i formie odlewniczej w trakcie trwania procesu odlewania. Uważam, że Autorka bardzo dobrze opracowała wyniki i przeanalizowała je w sposób jasny i nie budzący wątpliwości. Uzyskane wyniki świadczą o tym, że Doktorantka przygotowała poprawnie zaimplementowane procedury, oparte na wybranych algorytmach optymalizacyjnych, odpowiednio połączyła je z istniejącymi programami, służącymi do wykonywania obliczeń numerycznych dla zbudowanego modelu badanego procesu, profesjonalnie przeprowadziła testy oraz wyciągnęła poprawne wnioski. W swojej pracy wykazała się dużą wiedzą, zaangażowaniem i samodzielnością.

#### **2.4 Ocena wykorzystanej literatury**

Doktorantka wykorzystowała 71 naukowych pozycji bibliograficznych, w tym około 80% (57 pozycji) to publikacje w języku angielskim, co świadczy o umiejętności wykorzystania przez Autorkę rozprawy bogatej literatury anglojęzycznej, podejmującej prezentowaną tematykę. Publikacje najnowsze, wydane od 2010 roku, stanowią około 75% (41 pozycji) całości literatury, co w obecnie występującej wysokiej dynamice obiegu wiedzy w nauce jest w pełni zadowalającym wskaźnikiem. Pod względem jakościowym literatura jest dobrana prawidłowo, jest odpowiednio zróżnicowana, dotyczy bowiem zarówno termomechaniki, jak i metod sztucznej inteligencji, a także prac łączących obie dziedziny wiedzy. Na podkreślenie zasługuje umiejętność wykorzystywania najnowszej literatury przedmiotu i liczne odwołania do najnowszych badań światowych w podjętej tematyce.

#### **2.5 Język i formalna strona rozprawy**

Od strony formalnej praca nie budzi zastrzeżeń. Napisana jest poprawnym, jasnym językiem, zawiera klarowny system odnośników do równań, tabel, ilustracji oraz pozycji literaturowych. Czyta się ją bardzo dobrze, jest schludna i rzetelnie przygotowana oraz przejrzysta, wszystkie elementy wyводу naukowego są właściwie zaakcentowane i wypunktowane. W pracy można oczywiście spotkać usterki, drobne błędy językowe, interpunkcyjne czy stylistyczne, zdarzają się jednak one w każdej pracy i nie należy przywiązywać do nich zbyt dużej wagi.

### **3. Pytania do pracy**

Po zapoznaniu się z rozprawą miałabym następujące pytania do Doktorantki:

- 1) Zagadnienia odwrotne należą do zagadnień źle uwarunkowanych, czyli rozwiązanie ich, jeśli w ogóle istnieje, jest niestabilne ze względu na błędy danych wejściowych. Oznacza to, że małe błędy na

wejściu mogą powodować duże błędy na wyjściu. W celu uniknięcia takiego zachowania stosuje się odpowiednie procedury stabilizacyjne. Jakie podejście zostało zastosowane w pracy, aby wyregulować rozwiązywany problem odwrotny, z definicji "źle uwarunkowany"?

- 2) Czy w celu zabezpieczenia się przed tzw. "inverse crime" do wyznaczenia temperatur wzorcowych przy pomocy metody elementów skończonych została zastosowana inna dyskretyzacja niż przy rozwiązywaniu zagadnienia odwrotnego, polegającego na odtworzeniu współczynnika przewodzenia ciepła warstwy rozdzielającej formę i odlew?
- 3) Jaki wpływ na jakość uzyskanych wyników oraz na czas ich uzyskania miała gęstość siatki w metodzie elementów skończonych?
- 4) Czy poza liczbą osobników i liczbą iteracji na działanie zastosowanych procedur oraz uzyskane przy ich pomocy wyniki mogły mieć wpływ inne parametry i właściwości algorytmów rojowych?
- 5) W pracy odtwarzany jest współczynnik przewodzenia ciepła warstwy rozdzielającej formę i odlew w postaci jednej lub dwóch wartości liczbowych? Czy Pani rozważała możliwość uzyskania ciągłej zmienności wartości tego współczynnika?

#### **4. Podsumowanie i wniosek końcowy**

Podsumowując stwierdzam, że cel prac doktorskiej Pani mgr inż. Marii Zych, polegający na wykazaniu prawidłowości tezy o możliwości zastosowania algorytmów rojowych w rekonstrukcji wartości współczynnika przenikania ciepła występującego w warunkach brzegowych czwartego rodzaju podczas modelowania przewodzenia ciepła, został osiągnięty. Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska niewątpliwie świadczy o ugruntowanej wiedzy Doktorantki z zakresu modelowania zagadnień przewodzenia ciepła i umiejętności zaadaptowania do ich rozwiązywania algorytmów sztucznej inteligencji. Przeprowadzony wywód dowodzi dociekliwości Doktorantki i praktycznej umiejętności samodzielnego przygotowania narzędzi obliczeniowych, przeprowadzenia zaawansowanych obliczeń naukowych, właściwej analizy i interpretacji uzyskanych wyników, a także umiejętności systematycznej pracy na kolejnych etapach rozwijanego podejścia.

Uważam, że opiniowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez przepisy stosownej Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2003 r., nr 65, poz. 595 z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Marii Zych do publicznej obrony przedłożonej pracy.

*Edyta Kletmanick*