

## **KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA**

Wydział Inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA  
STASZICA W KRAKOWIE**

**Dr hab. inż. Łukasz Rauch, prof. AGH**

Kraków, 2021.01.04

### **Recenzja**

pracy doktorskiej mgr inż. Kamila Dychtonia pt. " Modelowanie procesu nawęglania próżniowego – morfologia mikrostruktury i właściwości warstwy wierzchniej kół zębatach ze stali AISI 9310".

Zlecenie na opracowanie recenzji otrzymałem od Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza pismem nr RM-530-02-02/17/2020 z dnia 3 listopada 2020 roku. Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Kamila Dychtonia przedstawiam poniższą opinię.

#### **1. PRZEDMIOT OCENY**

Przedmiotem oceny jest praca doktorska składająca się z wprowadzenia, czterech rozdziałów zasadniczych oraz podsumowania z wnioskami i spisu literatury. Spis literatury obejmuje 138 pozycji. W spisie literatury zawarto ważne publikacje związane z tematyką rozprawy, w przeważającej większości opublikowane w ostatnich dwóch dekadach. Pracę uzupełniają streszczenia w języku polskim i angielskim. Spośród czterech rozdziałów zasadniczych trzy można uznać za merytorycznie kluczowe. Wnoszą one następujące treści:

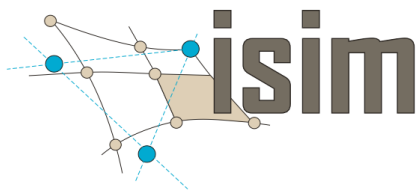
- W rozdziale drugim przedstawione zostało bardzo obszerne studium literatury składające się aż z sześciu podrozdziałów. W pierwszym z nich Doktorant przedstawia charakterystykę procesu nawęglania, by następnie opisać fizyczne i chemiczne podstawy procesu. Ten podrozdział należy do dość obszernych, gdyż obejmuje opis potencjału węglowego atmosfery nawęglającej, oddziaływanie na granicy faza gazowa – podłoże stali oraz rozpuszczalność węgla w austenicie. Następnie Autor skupił się na opisanu procesu nawęglania próżniowego. Główny nacisk położony został na przegląd dostępnych atmosfer nawęglania oraz możliwości ich wykorzystania. Opisana została również możliwość kontrolowania procesu nawęglania próżniowego z zastosowaniem

**Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie | Wydział inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej | Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

tel. +48 12 617 38 75, fax +48 12 617 28 89

e-mail: lrauch@agh.edu.pl, <http://home.agh.edu.pl/lrauch>



## **KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA**

Wydział Inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA  
STASZICA W KRAKOWIE**

wariantów jedno- jak i wielosegmentowego. Po procesie nawęglania próżniowego przedstawiona została obróbka cieplna, która odgrywa kluczowe znaczenie w kształtowaniu finalnych właściwości mechanicznych dla warstwy nawęglanej oraz rdzenia. W rozdziale 2.5 zatytułowanym „Dyfuzja w procesie nawęglania” Doktorant skupił się głównie na modelowaniu matematycznym tego zjawiska. Opisanych zostało wiele wzorów, które w syntetycznej części pracy zostały wykorzystane w modelowaniu numerycznym m.in. kinetyka procesu nawęglania, współczynniki dyfuzji oraz przenoszenia węgla. Rozdział kończy opis cech geometrycznych i właściwości warstwy nawęglonej kół zębatych przekładni lotniczych.

- Rozdział czwarty jest rozpoczęciem części syntetycznej prac autora i zawiera opis wykonanych badań własnych. W rozdziale tym znaleźć można opis materiału wykorzystanego do badań, metodyki badań, a także modelu matematycznego i zastosowanych algorytmów numerycznych. Najobszerniejszym podrozdziałem niniejszego rozdziału jest opis metodyki wykonywanych badań – Doktorant przedstawia urządzenia oraz warunki badań eksperymentalnych w procesach nawęglania próżniowego, obróbce cieplno-chemicznej, badaniach mikrostrukturalnych (mikroskopowych), badaniach własności mechanicznych, a także badaniach składu chemicznego. Łącznie opisowi tych doświadczeń poświęcone zostało 10 stron pracy. Treść podrozdziału 4.3 poświęcona została w całości opisowi modelowania matematycznego i numerycznego. W pierwszej części opisu Autor przedstawił założenia, które zostały przyjęte do opracowania modelu fizycznego Następnie opisał wzory równań na zmianę stężenia składnika dyfuzji w czasie, a także omówił schemat różniczkowania po czasie, który pozwolił na odpowiednią implementację numeryki.
- W rozdziale piątym można zapoznać się z wynikami badań opisanych w poprzednim rozdziale. Został on podzielony na trzy części obejmujące równowagowe stężenie węgla i wyznaczenie współczynnika przenoszenia węgla, wyniki badań mikrostruktury nawęglania w procesach z jednym cyklem nasycania węglem bez wygrzewania dyfuzyjnego oraz wyniki analizy procesu nawęglania próżniowego ze zmienną liczbą cykli oraz zmiennym czasem fazy nasycania węglem i wygrzewania dyfuzyjnego. Ostatniemu z podrozdziałów Autor poświęca najwięcej uwagi przedstawiając wyniki rozkładu stężenia węgla w warstwie nawęglonej, wyniki analizy mikrostruktury oraz twardości materiału warstwy nawęglonej oraz rdzenia. Całość obejmuje 38 stron i prowadzi do ostatniego rozdziałów obejmującego wnioski z wykonanych prac.

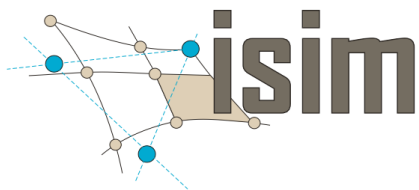
Łączna objętość tekstu pracy wraz ze spisem literatury wynosi 106 stron.

**Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie | Wydział inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej | Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

tel. +48 12 617 38 75, fax +48 12 617 28 89

e-mail: [lrauch@agh.edu.pl](mailto:lrauch@agh.edu.pl), <http://home.agh.edu.pl/lrauch>



## **KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA**

Wydział Inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA  
STASZICA W KRAKOWIE**

### **2. OCENA PRACY**

Praca porusza bardzo trudny temat doboru parametrów procesu nawęglania próżniowego tak, aby zapewnione było osiągnięcie wymaganych normami lotniczymi własności materiałowych wyrobu gotowego. Rozwiązanie tak postawionego problemu wymaga jednocześnie realizacji bardzo wielu zadań takich jak wykonanie podstawowych badań eksperymentalnych, opracowanie modeli matematycznych, identyfikacja parametrów modeli na podstawie badań eksperymentalnych, implementacja algorytmów numerycznych, a następnie wykonanie obliczeń najczęściej zintegrowanych z procedurami optymalizacji. Ogrom tych prac pokazuje, z jak bardzo zaawansowanym problemem mamy do czynienia w niniejszej pracy, nawet jeśli dotyczy ona tylko jednej wybranej stali i jest realizowana dla jednego wybranego koła zębatego.

Tytuł pracy „Modelowanie procesu nawęglania próżniowego – morfologia mikrostruktury i właściwości warstwy wierzchniej kół zębatych ze stali AISI 9310.” jest bardzo ogólny i sugeruje, iż w pracy należy spodziewać się zarówno modelowania fizycznego jak i matematycznego, co rzeczywiście zgadza się z jej zawartością. Jednak tytuł sugeruje również liczbę mnogą kół zębatych, przy czym na stronie 42, gdzie znajduje się opis próbek przygotowanych do badań, widnieje jeden rodzaj próbki z koła zębatego oraz dwa rodzaje próbek okrągłych. Koła zębate często różnią się kształtem, co nawet wg Autora pracy wpływa na właściwości materiału szczególnie w obszarze dna wrębu zęba. Czy zatem na podstawie badań jednego rodzaju koła można generalizować wnioski, czy też można sparametryzować kształt wrębu zęba tak, aby te wnioski były bardziej precyzyjne?

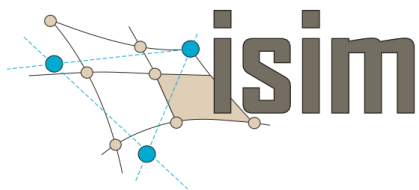
Postawiona w pracy teza „opracowanie modelu matematycznego i prawidłowy dobór parametrów dla symulacji numerycznej procesu nawęglania próżniowego, umożliwi prognozowanie rozkładu stężenia węgla w warstwie nawęglanej oraz kształtowanie mikrostruktury i właściwości mechanicznych dla silnie obciążonych kół zębatych wykonanych ze stali AISI 9310” jest zrozumiała, jednakże można mieć do niej pewne zastrzeżenia. Przede wszystkim, czy przecinek przed słowem „umożliwi” jest poprawny? Zmienia on wydźwięk i poprawność sformułowania. Poza tą drobną uwagą teza jest bardzo mocnym stwierdzeniem, ponieważ wynika z niej, iż opracowanie modelu matematycznego i prawidłowy dobór parametrów symulacji zagwarantują kształtowanie mikrostruktury i właściwości mechanicznych. W pracy ciężko jednak znaleźć bezpośrednie przełożenie symulacji numerycznych na mikrostrukturę lub właściwości – Autor modeluje rozkład stężenia węgla, a ten pośrednio wpływa na wydzielenia, składniki fazowe oraz właściwości. Czy o taki pośredni związek

**Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie | Wydział inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej | Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

tel. +48 12 617 38 75, fax +48 12 617 28 89

e-mail: [Irauch@agh.edu.pl](mailto:Irauch@agh.edu.pl), <http://home.agh.edu.pl/Irauch>



## **KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA**

Wydział Inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA  
STASZICA W KRAKOWIE**

pomiędzy symulacjami numerycznymi a efektem odpowiedniego prowadzenia procesu nawęglania chodziło Doktorantowi w tak postawionej tezie?

Sumarycznie oceniam pracę pozytywnie. Układ rozdziałów utrzymany jest w klasycznej konwencji – najpierw przedstawiony jest stan literaturowy, czyli część analityczna, a następnie część syntetyczna zawierająca badania przeprowadzone przez Doktoranta oraz ich wyniki. Przede wszystkim nie mam zastrzeżeń do sposobu przeprowadzenia badań doświadczalnych oraz do ich interpretacji. W mojej opinii liczba oraz różnorodność wykonanych eksperymentów i ich wariantów jest godna uznania. Szczegółowa analiza poszczególnych badań opisanych w pracy budzi jednak pewne wątpliwości. Moje główne krytyczne lub dyskusyjne uwagi są następujące:

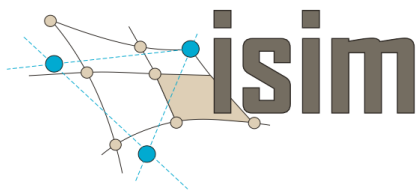
1. Układ oraz zawartość rozdziału drugiego budzi pewne zastrzeżenia – przede wszystkim przegląd literaturowy prowadzony jest dość chaotycznie, wszystko znajduje się w kolejnych podrozdziałach, a np.: rozdział 2.6 nijak nie pasuje do poprzedzających go pięciu podrozdziałów. Dlatego analiza przeglądu literaturowego nastrocza trochę problemów. O wiele lepiej czytałoby się tą część pracy, gdyby została podzielona na część dotyczącą badań związanych z modelowaniem fizycznym oraz część dotyczącą algorytmiki i modelowania matematycznego. Mogłyby to być nawet dwa osobne rozdziały części analitycznej niniejszej pracy. Niestety przez taką kumulację treści w jednym rozdziale wiele prac cytowanych jest zbiorowo, co znacząco utrudnia odnalezienie się w tym przeglądzie – w rozdziale 2.1 nie ma ani jednego cytowania, które byłoby indywidualnym odniesieniem do jakiejś pracy, a przykładowe zdanie „Stąd, zwiększenie właściwości wytrzymałościowych w warunkach statycznych i dynamicznych [24,27,28]” pokazuje bardzo ogólny charakter stwierdzeń w tym przeglądzie.
2. Konsekwencją poprzedniego punktu jest brak w przeglądzie dobrze opisanych prac, które poruszają temat modelowania matematycznego dyfuzji oraz stężenia węgla w procesie nawęglania. Patrząc na tezę pracy i jej główny cel, takie prace powinny być wyjątkowo wnikliwie przeanalizowane ze szczególnym uwzględnieniem ich mocnych i słabych stron, co ułatwiłoby ocenę osiągnięć Autora na tle innych prac opublikowanych w istotnej literaturze naukowej. Tymczasem w rozdziale 2.5.1, gdzie Autor opisuje kinetykę procesu nawęglania znaleźć można odwołania jedynie do dwóch artykułów i czterech książek, co sugerowałoby, że niewiele osób na świecie zajmuje się modelowaniem tego procesu. Czy na pewno tak jest, czy też charakter tego rozdziału w zamierzeniach Autora miał być bardziej ogólny? Wówczas należałoby w osobnym podrozdziale opisać stan literatury dotyczący modelowania stężenia węgla w warstwie

**Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie | Wydział inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej | Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

tel. +48 12 617 38 75, fax +48 12 617 28 89

e-mail: [lrauch@agh.edu.pl](mailto:lrauch@agh.edu.pl), <http://home.agh.edu.pl/lrauch>



## **KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA**

Wydział Inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA  
STASZICA W KRAKOWIE**

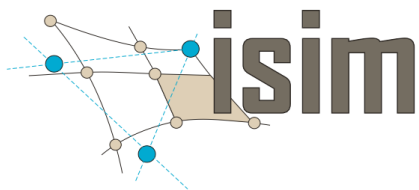
- nawęglanej. Autor powinien uwypuklić swój wkład na tle innych prac.
3. W przeciwieństwie do poprzedniej uwagi, w podrozdziale 2.5.2 znaleźć można ciekawy przegląd dostępnych wzorów na współczynnik dyfuzji węgla w funkcji stężenia i temperatury. Jednakże każdy z zebranych w tabeli 3 wzorów powinien być opatrzony cytowaniami pozycji literaturowej, gdyż nie wiadomo, która z pozycji w cytowaniu zbiorczym odnosi się do którego z wzorów. Co więcej Autor w podpisie tabeli zgubił pozycję [66], która widnieje w akapicie poprzedzającym tabelę 3. Ten błąd pojawia się również w dalszej części pracy na stronie 62 podczas omawiania wyników badań własnych.
  4. W rozdziale 4.2.1 Autor opisuje metodykę badań dla procesu nawęglania próżniowego. Znajdują się tu w tabeli 7 kluczowe dla badań założenia dotyczące przyjętych wariantów procesu. Autor nie wyjaśnia jednak, dlaczego zdecydował się na takie propozycje np.: dlaczego akurat schemat 275-11 a nie 290-13? Ponadto wyjaśnienia wymaga fakt, dlaczego Doktorant zdecydował się na opisanie przyjętych przez siebie schematów funkcją kwadratową. Widać wyraźnie, że schemat 444-16 odbiega od wzoru tej funkcji, co raczej sugeruje, że kolejność powinna być odwrotna – najpierw powinno się założyć odpowiedni wzór funkcji, a następnie dyskretyzować go wg kolejnych numerów cykli. To pozwoliłoby na utrzymanie precyzji doświadczenia zgodnie z funkcją i wykorzystanie wzoru funkcji np.: w procedurach optymalizacji. A to z kolei, w połączeniu z opracowanymi przez Doktoranta modelami matematycznymi i implementacją algorytmiczną, pozwoliłoby na określenie etapów procesu, które w efekcie dałyby optymalne własności warstwy nawęglanej.
  5. Rozdział 4.3, w którym Autor opisuje matematyczny model i symulacje numeryczne również wymaga uzupełnienia. Wyjaśnienia wymaga dobór przez Autora schematu różnicowania – skąd decyzja o takim, a nie innym rozwiązaniu i czy w taki wybór gwarantuje rozwiązanie problemu? Ponadto, należy omówić jak powinien być dobrany krok czasowy, aby osiągnąć zbieżność algorytmu. Czy krok jest adaptacyjny czy stały? Ta kwestia, podobnie jak wpływ doboru kroku czasowego na czas obliczeń, również nie została w pracy przedstawiona.
  6. W tym samym rozdziale Autor wykluczył temperaturę ze wzoru na współczynnik dyfuzji zakładając jej stałą wartość w badaniach. W ten sposób powstała propozycja wzoru na współczynnik dyfuzji o charakterze eksponentialnym. Skąd jednak we wzorze druga potęga stężenia węgla skoro wszystkie wzory wskazane przez Autora w rozdziale 3 mają potęgę 1 lub 1.5? Ostatnie dwa akapity tego podrozdziału zdawkowo opisują proces

**Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie | Wydział inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej | Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

tel. +48 12 617 38 75, fax +48 12 617 28 89

e-mail: [lrauch@agh.edu.pl](mailto:lrauch@agh.edu.pl), <http://home.agh.edu.pl/lrauch>



## **KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA**

Wydział Inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA  
STASZICA W KRAKOWIE**

identyfikacji parametrów zaproponowanego wzoru. Nie wiadomo jednak czy Autor przeprowadził tą optymalizację ręcznie z wykorzystaniem wskazanego narzędzia i jak zdefiniowana była funkcja celu, a w rozdziale z analizą wyników powinna pojawić się informacja jak zmieniała się wartość funkcji celu podczas kolejnych iteracji obliczeń i jaki był ostateczny błąd dopasowania. Natomiast na stronach 61-62 znajduje się tylko wynik identyfikacji.

7. Niektóre wnioski w ostatnim rozdziałów powinny zostać przeformułowane, ponieważ są raczej stwierdzeniami niż wnioskami z przeprowadzonych obliczeń i analiz np.: „ustalono wartości: równowagowe stężenie węgla, współczynnik przenoszenia węgla i współczynnik dyfuzji węgla w funkcji stężenia węgla dla stali AISI 9310 dla temperatury nawęglania 925°C” lub „austenit szczątkowy jest składnikiem fazowym mikrostruktury warstwy nawęglonej dla wszystkich opracowanych warunków procesu nawęglania próżniowego”.

Podsumowując ogólną ocenę pracy stwierdzam, że Doktorant udowodnił bardzo dobre przygotowanie do prowadzenia oryginalnych badań naukowych w zakresie inżynierii materiałowej, a w szczególności w zakresie badań nad dyfuzją i złożonymi procesami nawęglania. Potwierdził On swoją wiedzę i zrozumienie problemów w tym zakresie. Wykazał się biegłością w stosowaniu skomplikowanej aparatury badawczej i nowoczesnych metod modelowania procesów. Z drugiej strony, w pracy jest kilka aspektów wymagających wyjaśnienia, które wymieniłem w niniejszej recenzji. Te niedociągnięcia jednak nie podważają faktu, iż Autor samodzielnie rozwiązał istotne problemy naukowe. Stąd sumaryczna ocena pracy jest pozytywna.

### **3. UWAGI EDYTORSKIE**

Praca napisana jest przejrzysto w aspekcie merytorycznym. Od strony edytorskiej również przygotowana jest bardzo starannie. Ciężko znaleźć potknięcia Autora lub niedomówienia, które uchybiałyby pracy w sposób znaczący. Poniżej lista niedociągnięć natury edytorskiej i raczej drobnych błędów:

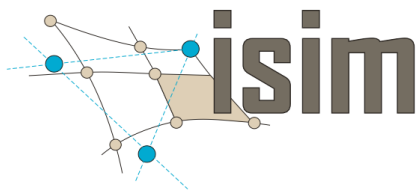
- Strona 31, linijka 3 od dołu – powinno być „ ... oraz że droga, jaką pokonuje, jest ...”, zamiast „ ... oraz że droga jaką pokonuje jest ... ”,
- Strona 34, linijka 4 od góry – powinno być „stężenie” zamiast „stężenia”,
- Strona 38, linijka 4 od dołu – powinno być „uwzględnieniem” zamiast „uwzględnienie”,
- Strona 42, tytuł rozdziału 4.2 – powinno być „Metodyka badań” zamiast „Metodyka Badań”,

**Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie | Wydział inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej | Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

tel. +48 12 617 38 75, fax +48 12 617 28 89

e-mail: [lrauch@agh.edu.pl](mailto:lrauch@agh.edu.pl), <http://home.agh.edu.pl/lrauch>



## **KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA**

Wydział Inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA  
STASZICA W KRAKOWIE**

- Strona 71, linijka 7 – niedokończone zdanie, powinno być „nawęglania”,
- Strona 87, linijka 7 – Autor zwykle podaje w nawiasach wartość twardości w skali HV, której używają również normy lotniczej; tutaj brakuje tych wartości.

#### **4. WNIOSEK KOŃCOWY**

Podsumowując opinię należy stwierdzić, że Doktorant:

- wykazał się umiejętnością prowadzenia badań naukowych obejmujących zaplanowanie i wykonanie eksperymentów umożliwiających modelowanie fizyczne procesów oraz pozyskanie danych do przeprowadzenia analizy numerycznej i modelowania matematycznego,
- bardzo dobrze zna warsztat metod umożliwiających opracowanie wytycznych dla prowadzenia zaawansowanych procesów przemysłowych, w tym przede wszystkim metody analizy laboratoryjnej materiałów, analizy danych oraz syntezy wyników w celu uzyskania poprawnego opisu matematycznego,
- biegle porusza się w obszarze badań eksperymentalnych, co udowodnił poprzez przeprowadzenie szeregu skomplikowanych doświadczeń, prowadzących do uzyskania ciekawych wyników,
- przeprowadził skrupulatną analizę wyników w aspekcie identyfikacji parametrów modeli i określenia przydatności wyników eksperymentalnych w symulacjach numerycznych.

Recenzja pracy zawiera uwagi krytyczne i dyskusyjne komentarze, ale nie umniejszają one sumarycznej merytorycznej ocenie pracy. Praca, co podkreślałem w trakcie recenzji, jest bardzo obszerna, a jej zakres mógłby posłużyć więcej niż jednej rozprawie doktorskiej. Doceniam warsztat badawczy i dobór metod, którymi posłużył się Autor pracy i uważam, że pozytywne aspekty przeprowadzonych przez Autora badań oraz wykazane przez Niego umiejętności w rozwiązywaniu problemów naukowych przeważają nad krytycznymi uwagami do pracy. Sumaryczna ocena pracy jest pozytywna, a rozprawa stanowi samodzielne rozwiązanie problemu naukowego w dyscyplinie inżynierii materiałowej i spełnia wymagania zawarte w odpowiedniej ustawie. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Kamila Dychtonia do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

**Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie | Wydział inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej | Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

tel. +48 12 617 38 75, fax +48 12 617 28 89

e-mail: [lrauch@agh.edu.pl](mailto:lrauch@agh.edu.pl), <http://home.agh.edu.pl/lrauch>