

Wrocław, 15. grudnia 2021 r.

prof. dr hab. inż. Jerzy Kaleta
Katedra Mechaniki,
Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej
Wydział Mechaniczny
Politechniki Wrocławskiej
ul. Smoluchowskiego 25
50-370 Wrocław

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Mgr. inż. MAŁGORZATY ŁAZARSKIEJ pod tytułem „Badanie przemian fazowych w stalach w czasie hartowania przy zastosowaniu emisji akustycznej wspomagane metodą sieci neuronowych”, wykonanej pod kierunkiem Prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego jako promotora i Dr Ziemowita Klimondy jako promotora pomocniczego, z Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie

Opis identyfikacyjny: maszynopis sygnowany przez Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie (2021).

Podstawa formalno-prawna:

- pismo (z 6. października 2021 r., wysłane 10. października br.; wpłynęło do recenzenta 15. października br.) Prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego, Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie,
- Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym, zgodnie z art. 179 ust.1 ustawy z dnia 3. lipca 2018 r. (przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. z 2018 r., poz. 1669).

OCENA PRACY DOKTORSKIEJ

A. Wprowadzenie

Głównym zamierzeniem Autorki (wywodzącej się z Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Doktorantki w IPPT PAN) było opracowanie metody identyfikacji składowych sygnału emisji akustycznej (dalej jako EA), generowanego w trakcie przemian fazowych zachodzących w procesie hartowania z przemianą izotermiczną wybranych stali stopowych. W pracy dodatkowo założono przydatność sztucznej sieci neuronowej do filtracji sygnałów EA, co ułatwi analizę zjawisk zachodzących w procesie hartowania. Przyjęto, iż łącznie pozwoli to skutecznie śledzić kinetykę przemian fazowych w omawianym procesie obróbki cieplnej. Obiektem badań były dwie stale, a mianowicie: stal łożyskowa 100CrMnSi6-4 oraz narzędziowa C105U dla kilku wybranych temperatur przemian w pobliżu Ms.

Znany od kilkuset lat proces hartowania, jako kluczowy element obróbki cieplnej jest nadal w pełni aktualnym zagadnieniem naukowym i inżynierskim, wymagającym lepszego poznania i umiejętnego stosowania. Przeprowadzenie tej operacji technologicznej, mimo czynionych systematycznie postępów, narażone jest nadal na wystąpienie różnych uszkodzeń takich jak pęknięcia, rozwarstwienia i odkształcenia. Rozpatrywane w pracy hartowanie izotermiczne wybranych stali stopowych umożliwia skuteczną poprawę właściwości plastycznych wytwarzanych elementów bez pogorszenia wytrzymałości mechanicznej i twardości, w tym umożliwia redukcję naprężeń cieplnych i strukturalnych.

Należy zwrócić uwagę, iż zagadnieniu izotermicznego hartowania stali poświęcona jest bogata literatura przedmiotu. Przeglądarki internetowe rejestrują obecnie kilkadziesiąt tysięcy prac z tego zakresu, z tego ponad 10 tysięcy tylko od 2017 roku.

Część rezultatów prezentowanych w rozprawie uzyskano w ramach współpracy pomiędzy Uniwersytetem Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy a firmą Frauenthal Automotive w Toruniu (obecnie: Hendrickson Poland Sp. z o.o.), której celem była optymalizacja procesu obróbki cieplnej detali w wymienionym przedsiębiorstwie.

Należy stwierdzić, iż tematyka podjętego zagadnienia ma charakter interdyscyplinarny i lokuje się w obszarze głównie Inżynierii Materiałowej oraz częściowo Inżynierii Mechanicznej.

Autorka przedstawiła zwięźle aktualny stan wiedzy z zakresu hartowania z przemianą izotermiczną, emisji akustycznej w zastosowaniu do badania przemian fazowych oraz sztucznej inteligencji neuronowej. Na tej podstawie Doktorantka sformułowała tezę, cele i główne zadania do podjęcia w rozprawie. Następnie opisała metodykę badań własnych, a także uzyskane rezultaty. Rozprawę zakończono podsumowaniem oraz wnioskami z przeprowadzonych badań.

Podsumowując na wstępie zamierzenia Autorki pracy i mając na uwadze stan wiedzy należy przyjąć, iż zagadnienie badania przemian fazowych zachodzących w hartowanych stalach z wykorzystaniem emisji akustycznej i sztucznych sieci neuronowych jest aktualnym i ważkim zagadnieniem w zakresie badań podstawowych i stosowanych. Wynika to ze złożoności zjawisk występujących w trakcie obróbki cieplnej oraz konieczności interdyscyplinarnego warsztatu badawczego, by procesy te poznać i zinterpretować. Pozwala to łącznie stwierdzić, że wybór tematyki badawczej zawartej w przedłożonej rozprawie jest w pełni aktualny naukowo i aplikacyjnie.

B. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa podzielona została na 5 rozdziałów oraz 15 podrozdziałów, w tym zawarto też podsumowanie oraz dyskusję wraz z wnioskami końcowymi. Dodatkowo praca zawiera streszczenie (w dwóch wersjach językowych) oraz spis cytowanej literatury przedmiotu. Monografia obejmuje 108 stron, 51 rysunków bądź zdjęć oraz 2 tabele. Zestawienie cytowanej literatury zawiera 146 pozycji, w tym w trzech przypadkach współautorstwa Doktorantki.

Poniżej scharakteryzowano skrótowo przedłożoną rozprawę.

W **pierwszym rozdziale (Wprowadzenie)** przedstawiono na wstępie rys historyczny obróbki cieplnej, w tym głównie hartowania izotermicznego. Przegląd literatury obejmuje prace zarówno pionierskie (S.E. Davenport i E.C. Bain, 1930; G.V. Kurdjumov i O.P. Maksimow, 1948) aż do publikacji z pierwszej dekady obecnego wieku (np. H.K.D.H. Bhadeshia, 2001, czy Zhi-Gang Yang i Hong-Sheng Fang, 2005). Wyeksponowano rolę stali bainitycznych. Następnie zwrócono uwagę na rolę emisji akustycznej (EA) jako szeroko stosowanego narzędzia pomiarowego w różnych obszarach nauki i gospodarki. Podkreślono znaczenie metody w badaniach stali, w której deformacja mikrostruktury krystalicznej w przemianach typu austenit-martenzyt oraz austenit-bainit jest źródłem powstania sygnału EA. Zwrócono uwagę na możliwość wykorzystania sygnału EA do śledzenia kinetyki przemian fazowych w trakcie hartowania, co daje szansę na „projektowanie” nowych sposobów obróbki cieplnej. Do przetwarzania danych pomiarowych EA zaproponowano użycie sztucznej sieci neuronowej, której efektywność sprawdzono w odniesieniu do analizy i identyfikacji zjawisk występujących w trakcie hartowania izotermicznego wybranych stali stopowych i węglowych.

W **rozdziale drugim (Teza pracy i zakres badań)** przyjęto kolejno:

1. Tezę pracy w sformułowaniu, cyt: „Zastosowanie metody EA i analiza zarejestrowanego sygnału akustycznego przy pomocy sztucznej sieci neuronowej umożliwia identyfikację faz przemiany bezdyfuzyjnej w wybranych stalach stopowych i węglowych oraz prześledzenie zmian ich intensywności w funkcji czasu”,
2. Zakres badań. W tym przypadku przyjęto, kolejno:
 - obiekt badań, którym były dwie stale (stal łożyskowa 100CrMnSi6-4 oraz narzędziowa C105U) i temperatury przemian w pobliżu Ms,
 - hartowanie izotermiczne jako operację obróbki cieplnej,
 - pomiar EA z użyciem dedykowanego stanowiska badawczego,
 - wyznaczenie przedziałów energii rejestrowanych zdarzeń EA oraz ich separację, a pochodzących od różnych przemian fazowych,
 - identyfikację składowych sygnału EA przy użyciu metody sztucznej sieci neuronowej,
 - analizę mikrostrukturalną próbek obu stali.

W części końcowej Doktorantka wyraziła pogląd, iż zaproponowana w rozprawie metoda badania kinetyki przemian fazowych zachodzących w trakcie izotermicznego hartowania stali, do których użyto emisję akustyczną i sztuczną sieć neuronową - jest rezultatem w pełni oryginalnym i nie stosowanym w innych laboratoriach.

W obszernym (36 stron) **rozdziale trzecim (Przegląd literatury)** opisano stan wiedzy z zakresu odpowiednio hartowania bainitycznego z przemianą izotermiczną, mechanizmu tej przemiany oraz morfologii bainitu. W dalszej kolejności omówiono prace z zakresu przemiany fazowej w zakresie temperatury Ms oraz przemiany martenzytycznej. W kolejnym kroku dokonano przeglądu literatury z zakresu podstaw i aplikacji emisji akustycznej, w tym źródeł tej emisji w przypadku przemian fazowych w stalach poddawanych obróbce cieplnej. Zwrócono uwagę na zróżnicowany charakter EA, czyli ciągły lub skokowy w zależności od procesu zachodzącego w badanym materiale i jego rodzaju (kruchy, plastyczny). Kończącym etapem było zwięzłe omówienie prac dotyczących sztucznych sieci neuronowych. Przytoczono prace zarówno prekursorów metody (W. S. McCulloch oraz W. H. Pitts) jak i współczesne, w tym te, których współautorem był Promotor i Doktorantka, a dotyczących zastosowania sieci neuronowych w badaniach własności materiałów, a dokładniej jako narzędzia do analizy sygnału EA pochodzącego od przemian fazowych.

Obszerny **rozdział czwarty (Metodyka badań)** opisuje kluczowy etap prac eksperymentalnych rozprawy w zakresie przemian fazowych zachodzących w trakcie rozpadu przechłodzonego austenitu w stalach 100CrMnSi6-4 oraz C105U. Obie stale dokładnie scharakteryzowano (skład, właściwości, zastosowania). Identyfikację przemian po hartowaniu z przemianą izotermiczną przeprowadzono analizując parametry sygnału EA poddanego filtracji przy użyciu sieci neuronowej. W pierwszej fazie przeprowadzono hartowanie izotermiczne. Obróbkę cieplną przeprowadzono w zakresie różnych temperatur, blisko temperatur Ms, którą wyznaczono z kolei metodą dylatometryczną. W badaniach wykorzystano oryginalne, dedykowane stanowisko badawcze, zaopatrzone w aparaturę do pomiarów EA. Opisano schemat procesu obróbki cieplnej z zaznaczonym przedziałem czasu t, w którym rejestrowano sygnał emisji akustycznej. Sygnały emisji akustycznej poddano obróbce i analizie z zastosowaniem oprogramowania wytworzonego w IPPT PAN. Zestaw zawierał program do graficznej prezentacji sygnału EA w postaci spektrogramu oraz zestaw programów do filtracji zarejestrowanego sygnału z zastosowaniem sieci neuronowej. Program umożliwiał ponadto graficzną prezentację wyników. Do przeprowadzenia uczenia sztucznej sieci neuronowej zastosowano algorytm tzw. wstecznej propagacji błędów.

Rozdział piąty (Wyniki badań) zawiera opis głównych rezultatów uzyskanych przez Doktorantkę w trakcie testów, których metodykę opisano w rozdziale poprzednim. Na

wstępie zaprezentowano wyniki badań sygnału emisji akustycznej przed filtracją metodą sieci neuronowej. Dla przeprowadzonego procesu hartowania izotermicznego obu stali otrzymano zapisy sygnału EA dla wszystkich przyjętych temperatur procesu. Na podstawie spektrogramów stwierdzono, że maksymalna energia sygnału EA zachodzi podczas przemiany w temperaturze zbliżonej do M_s . Uznano, iż w temperaturze zbliżonej do M_s występuje stan równowagowy pomiędzy wzbogaceniem nieprzemiennego austenitu w węgiel, a wydzielaniem się węgla ϵ w płytkach bainitu. Przeanalizowano różnice w charakterze sygnałów EA dla obu stali. Wykazano, np., że energia sygnału emisji akustycznej dla stali węglowej narzędziowej jest niższa w porównaniu z poziomem i intensywnością sygnału dla stali łożyskowej. Ponadto stwierdzono, iż w przypadku stali węglowej przemiana zachodzi w krótszym czasie. Z kolei w przypadku stali stopowej, zmniejszenie się energii sygnału EA w trakcie przemiany w wyższym przedziale temperatur tłumaczono zmniejszeniem się szybkości zarodkowania na tworzonych midribach. Filtracja sygnału emisji akustycznej metodą sieci neuronowej umożliwiła z kolei separację zdarzeń pochodzących od różnych procesów przemian fazowych podczas hartowania izotermicznego. Przykładowo na podstawie wykonanych badań dla stali 100CrMnSi6-4, analizując sygnały EA o różnej energii, stwierdzono tworzenie się bainitu zainicjowanego przez utwory martenzytu oraz tworzenie się bainitu dolnego z midribem. Z kolei w stali C105U zidentyfikowano tworzenie się midribu. W części końcowej zaprezentowano wyniki badań mikrostruktury wykonane z użyciem mikroskopu metalograficznego świetlnego oraz skaningowego mikroskopu elektronowego. Badania umożliwiły porównanie obrazów mikrostruktury po hartowaniu z przemianą izotermiczną, po trawieniu struktury bainitycznej i martenzytycznej oraz analizowanie stanu powierzchni i ocenę jej morfologii.

Rozdział szósty (Podsumowanie i wnioski) posłużył Autorce do podkreślenia znaczenia podjętej tematyki, wyeksponowania elementów oryginalnych oraz głównych rezultatów, które posłużyły do udowodnienia tezy i wykazania osiągnięcia celu pracy. Za szczególnie wartościowe Autorka uznała wyniki badań EA i zaproponowanej metody obróbki sygnałów akustycznych z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych, co umożliwiło efektywne śledzenie i identyfikację przemian fazowych zachodzących w czasie hartowania stali. Dodatkowo zaproponowana metodyka może być wykorzystana do projektowania metod obróbki cieplnej w celu uzyskania pożądanych właściwości i mikrostruktury. Analiza pozwoliła też na sformułowanie wniosków szczegółowych. Wykazano np., że w temperaturach bliskich M_s w obu stalach obserwuje się maksymalną aktywność akustyczną procesu, co łączy się z dominującym przedziałem przemiany przeschłodzonego austenitu na bainit dolny z midribem. Wykazano też, że przemiana fazowa zachodzi dwustopniowo, czyli najpierw następuje zarodkowanie martenzytu cienkopłytkowego pod postacią midribów, a następnie ma miejsce zarodkowanie bainitu na midribach, wzbogacenie austenitu w węgiel i w konsekwencji utworzenie bainitu dolnego. Podkreślono ponadto zalety użytego oprogramowania, które umożliwiło rozseparowanie zdarzeń EA pochodzących od przemian fazowych oraz śledzenie kinetyki przemian występujących w czasie hartowania stali.

C. Uwagi krytyczne i sugestie

Podzielając generalnie opinię, że przyjęta w rozprawie doktorskiej teza została udowodniona, a założony cel osiągnięty, poniżej zestawiono następujące uwagi krytyczne i sugestie:

1. Na stronie 14 rozprawy Doktorantka pisze, cyt.:

„Według wiedzy autorki, przedstawiona w rozprawie metoda identyfikacji składowych sygnału EA generowanego w trakcie przemian fazowych zachodzących w trakcie hartowania z przemianą izotermiczną oraz przeprowadzone przez autorkę badania kinetyki (t j. czasu trwania i zmian intensywności) przedstawionych przemian fazowych z zastosowaniem metody emisji akustycznej i sztucznej sieci neuronowej mają cha-

rakter oryginalny i nie były wykonywane w innych laboratoriach poza laboratorium macierzystym autorki rozprawy.”

Nie kwestionując tego stwierdzenia uważam jednak, że należałoby w większym stopniu przytoczyć przykłady prac, które co najmniej w dużym stopniu dotyczą zastosowania EA w badaniach przemian fazowych. Mam tu na myśli zarówno pracę starszą, gdzie o takiej procedurze też się mówi, czyli:

– Wadley, H. N. G., & Mehrabian, R. (1984). Acoustic emission for materials processing: a review. *Materials Science and Engineering*, 65(2), 245-263, jak i wiele współczesnych prac opublikowanych w indeksowanych czasopismach, np.:

– Mojskerc, B., Kek, T., & Grum, J. (2018). Feasibility study of monitoring the steel quenching process using acoustic emission technology. *Applied Acoustics*, 129, 335-345.

– Mojskerc, B., Grum, J., & Kek, T. (2019). Acoustic emission characterisation of specimen surface-area-to-volume ratio during immersion quenching. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 61(5), 257-263.

– Bolgár, M. K., Nagy, E., Daróczy, L., Benke, M., Mertinger, V., & Beke, D. L. (2019). Acoustic emission during austenite \rightarrow ϵ martensitic phase transformation in TWIP/TRIP steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50(8), 3495-3501.

– Beneš, P., & Vítovec, V. (2021). Selected NDT techniques in heat treatment control. *Manufacturing Technology*, 21(1), 20-28.

Tych prac jest więcej.

2. Szusznie w pracy wyeksponowane rolę sztucznej sieci neuronowej do analizy sygnałów EA. W rozprawie doktorskiej należałoby jednak wskazać również inne szybko rozwijające się narzędzia z tego zakresu. Posłużę się tylko przykładem falek (wavelets), które omówione są w wielu znaczących pozycjach. Poniżej wskazuję tylko kilka z licznych przykładów, np.:

– Terchi, A., & Au, Y. H. J. (2001). Acoustic emission signal processing. *Measurement and Control*, 34(8), 240-244.

– Zhao, L., Kang, L., & Yao, S. (2018). Research and application of acoustic emission signal processing technology. *IEEE Access*, 7, 984-993.

– Yang, L., Kang, H. S., Zhou, Y. C., He, L. M., & Lu, C. (2015). Intelligent discrimination of failure modes in thermal barrier coatings: wavelet transform and neural network analysis of acoustic emission signals. *Experimental Mechanics*, 55(2), 321-330.

– Grosse, C. U., Reinhardt, H. W., Motz, M., & Kroplin, B. (2002). Signal conditioning in acoustic emission analysis using wavelets. *NDT. net*, 7(9), 1-9.

3. Cytowane źródła.

– W wielu miejscach przegląd literatury obejmuje prace pionierskie i późniejsze, ale pominięty lub słabo reprezentowany jest okres ostatnich lat. Przykładowo w pierwszym rozdziale (Wprowadzenie) przedstawiono na wstępie rys historyczny obróbki cieplnej, w tym głównie hartowania izotermicznego. Przegląd literatury obejmuje prace, poczynając od roku 1930, a kończy się na pierwszej dekadzie obecnego wieku (np. prace [9], [10]). Brak jest prac z ostatniego piętnastolecia.

– Podobne zastrzeżenia można sformułować do podrozdziałów 3.1, 3.2 oraz 3.3. W tych przypadkach prace z renomowanych źródeł kończą się w połowie pierwszego dziesięciolecia bieżącego wieku. Czasami są cytowane późniejsze prace polskich autorów, ale pochodzące z materiałów o ograniczonym obiegu (np. lokalne zeszyty naukowe).

– Praca [18], której współautorką jest Doktorantka, czyli:

Łazarska, M., Woźniak, T. Z., Ranachowski, Z., Ranachowski, P., & Trafarski, A. (2017). The Application of Acoustic Emission and Artificial Neural Networks in an

Analysis of Kinetics in the Phase Transformation of Tool Steel During Austempering. Archives of Metallurgy and Materials, 62. ISI: 0.625 (2017), występuje też w innym czasopiśmie z tego samego roku pod identycznym tytułem jako:

Łazarska, M., Woźniak, T. Z., Ranachowski, Z., Ranachowski, P., & Trafarski, A. (2017). The Application of Acoustic Emission and Artificial Neural Networks in an Analysis of Kinetics in the Phase Transformation of Tool Steel during Austempering. Journal of Manufacturing Technologies, 42(1), 37-40.

Podobieństwo obu prac jest bardzo daleko idące (tytuł, ilustracje, wnioski, duże fragmenty tekstu). Mam wątpliwości, co do zasadności takiego postępowania, które powiększa na tej drodze dorobek naukowy Doktorantki.

4. Rozprawa nie zawiera informacji o kierunkach dalszych badań, a jest to obecnie standard w pracach doktorskich.
5. Redakcja i edycja pracy jest w wielu miejscach niestaranna.
 - Przykładowo na stronie 50 (rozdział 4) mówi się, cyt.: „W ostatnim etapie przeprowadzono przegląd mikrostruktury odpowiednio przygotowanych próbek stalowych po hartowaniu z przemianą bainityczną”. W rzeczywistości opis taki zamieszczono dopiero w podrozdziale 5.3.
 - Wiele szczegółowych uwag dotyczy zestawienia cytowanej literatury:
 - praca [113] występuje w zestawieniu literatury, ale nie jest przytoczona w tekście,
 - praca [62] nie ma podanego roku publikacji,
 - praca [107] nie ma podanego czasopisma,
 - praca [124] nie zawiera roku publikacji.
 - Edycja wzorów jest niejednorodna, np. wzór 3 (str. 47) oraz wzór 6 (str. 61) różnią się stylem istotnie od pozostałych. Ponadto część wzorów jest wytłuszczona, pozostałe nie. Przykładów potknięć w tym zakresie można pokazać więcej. Generalnie jakość edycji odbiega od aktualnych standardów przyjętych w pracach doktorskich.

OCENA ŁĄCZNEGO DOROBKU NAUKOWEGO DOKTORANTA

Na tle innych recenzowanych rozpraw doktorskich przez niżej podpisanego, w tym prac wywodzących się z IPPT PAN, dorobek publikacyjny Mgr. inż. Małgorzaty Łazarskiej nie jest znaczny. Do analizy posłużono się danymi Kandydatki umieszczonymi w Bazie Dorobku Naukowego Pracowników UKW:

http://bibliografia.ukw.edu.pl/cgi-bin/expertus.exe?KAT=%2Fexpertus%2Fpar%2F&FST=data.fst&FDT=data01.fdt&ekran=ISO&lnkmsk=2&cond=AND&mask=2&F_00=02&V_00=%A3azarska+Ma%B3gorzata

Z zestawienia wynika, że Doktorantka legitymuje się sześcioma pracami, z których tylko trzy zamieszczone są w Journal Citation Reports (JCR). Te trzy prace przygotowane wspólnie z Promotorem i współpracownikami opublikowano odpowiednio w:

- Materials - 2021, Vol. 14, iss. 3, art. no 551
- Metals and Materials International - 2017, Vol. 23, iss. 3, pp. 426-433
- Archives of Metallurgy and Materials - 2017, Vol. 62, iss. 2, pp. 603-609

Analiza baz danych przeprowadzona przez recenzenta wskazuje jeszcze na jedną pracę współautorstwa Doktorantki z tego roku, a mianowicie:

- Trafarski, A., Łazarska, M., & Ranachowski, Z. (2021). Application of Acoustic Emission to the analysis of phase transformations in 27MnCrB5-2 steel tests during continuous cooling. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, e139389-e139389 (praca z adnotacją: THIS IS AN EARLY ACCESS ARTICLE).

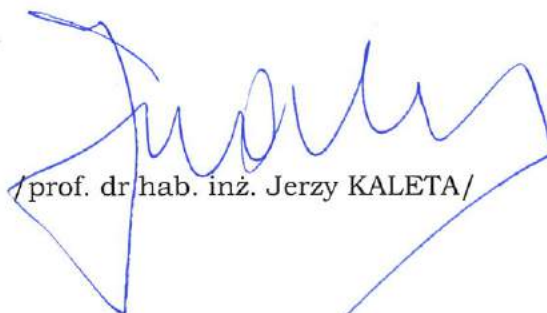
Z informacji przygotowanej przez Doktorantkę wynika ponadto, że legitymuje się również - jako współautorka - pracami konferencyjnymi i rozdziałem w książce.

Pozwala to jednoznacznie stwierdzić, iż łączny dorobek, w porównaniu z osiągnięciami innych, znanych recenzentowi doktorantów nie jest znaczny, ale możliwy do uznania za wystarczający w odniesieniu do kandydatów do stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

PODSUMOWANIE

Przedstawioną pracę o tytule „*Badanie przemian fazowych w stalach w czasie hartowania przy zastosowaniu emisji akustycznej wspomaganą metodą sieci neuronowych*”, przy uwzględnieniu zgłoszonych uprzednio uwag, oceniam całościowo pozytywnie. Postawiona w rozprawie teza została udowodniona, a cel generalnie osiągnięty. Tematyka rozprawy jest aktualna naukowo i aplikacyjnie. Z kolei dorobek naukowy Doktorantki spełnia w stopniu dostatecznym wymagania stawiane pracom doktorskim w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

Mając na uwadze wszystkie wymienione powyżej aspekty stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca spełnia w stopniu wystarczającym wymagania stawiane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym, zgodnie z art. 179 ust.1 ustawy z dnia 3. lipca 2018 r. (przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. z 2018 r., poz. 1669) i **może być podstawą do nadania stopnia doktora nauk technicznych** w dyscyplinie **Inżynieria Materiałowa**. Wnoszę jednocześnie o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.



/prof. dr hab. inż. Jerzy KALETA/

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
KATEDRA MECHANIKI,
INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ I BIOMEDYCZNEJ
(K58W10D07)
50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27
tel. 71 320 27 65, fax 71 321 12 35
NIP 8960005851 (1)