
Gliwice, dn. 27.08.2024 r.

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Bartosza Iżowskiego pt.

**“Modelowanie i symulacja numeryczna procesu hartowania gazowego kół zębatych
wykonanych ze stali Pyrowear 53”**

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej, Pana dr hab. inż. Macieja Motyki, prof. Pol. Rz. z dnia 19 czerwca 2024 r. informującego, że Rada Dyscypliny powołała mnie na recenzenta pracy doktorskiej mgr inż. Bartosza Iżowskiego, w przewodzie prowadzonym w dyscyplinie „Inżynieria Materiałowa”. Dokumentację otrzymałem w dniu 3.07.2024 r.

2. Charakterystyka i układ pracy

Praca doktorska mgr inż. Bartosza Iżowskiego została zrealizowana w ramach II edycji programu „Doktorat wdrożeniowy” i dotyczy wybranych aspektów modelowania i symulacji numerycznej procesu hartowania kół zębatych, wykonanych z niskowęglowej konstrukcyjnej stali średniostopowej o nazwie handlowej Pyrowear 53. Praca jest dobrym przykładem opracowania łączącego analizy numeryczne poparte badaniami eksperymentalnymi niezbędnymi do poprawnego opracowania modelu i jego walidacji. Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Maciej Motyka, prof. Pol. Rz., a promotorem pomocniczym dr inż. Kamil Dychtoń. Praca mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria materiałowa, a jej część interdyscyplinarnie wpisuje się także do dyscypliny inżynieria mechaniczna, np. w zakresie metrologii. Interdyscyplinarność rozprawy postrzegam jako jej atut. Technologiczna część pracy została opracowana na potrzeby Pratt & Whitney, przy czym rozprawa prawidłowo rozkłada akcenty na część naukową oraz technologiczną, tworząc ciekawą lekturę zarówno dla naukowców jak i personelu technologicznego, zajmujących się obróbką cieplną i cieplno-chemiczną kół zębatych. Rozprawa jest napisana jasno i przejrzysto oraz poprawnym językiem polskim, bez zbędnych powtórzeń czy pobocznych wątków. Autor rzeczowo zmierza do postawionego celu rozprawy, realizując po kolei zdefiniowane wcześniej podetapy, które zostały logicznie zaplanowane.

Rozprawa liczy 164 strony, przy czym ok. 130 stron efektywnej zawartości merytorycznej, tzn. bez stron wstępnych, dodatku i referencji. Praca zawiera wstęp, 6 głównych rozdziałów, bibliografię, streszczenie, abstract, spisy rysunków i tabel oraz dwustronicowy dodatek obejmujący Wyniki pomiarów charakterystyk wymiarowych. Praca zawiera liczne opracowania tabelaryczne oraz rysunki, a jej wartość graficzna jest na bardzo dobrym poziomie. Praca zawiera relatywnie niewielką ilość potknięć i usterek językowych.

3. Ocena doboru tematyki oraz celu i zakresu pracy

Dobór tematyki pracy wynika z potrzeb Pratt & Whitney i jest efektem długofalowych działań nad opracowaniem i wprowadzeniem na rynek turbowentylowanego silnika lotniczego, którego głównym elementem jest przekładnia epicykliczna, składająca się z szeregu kół zębatach. Autor w pracy zajął się symulacjami obróbki cieplnej krytycznego elementu przekładni, którymi są silnie obciążone koła satelitarne wykonywane z wysokowytrzymałej stali o powszechnie znanej nazwie handlowej Pyrowear 53. Na podstawie dokonanego przeglądu literatury zidentyfikował lukę badawczą dotyczącą braku w literaturze światowej wystarczających badań dotyczących modelowania numerycznego procesu hartowania wybranej stali. Biorąc pod uwagę konieczność minimalizacji naprężeń hartowniczych, będących przyczyną odkształceń elementów, w badaniach zastosowano nowoczesną technologię wysokociśnieniowego hartowania gazowego, rozwijaną w Pratt & Whitney. Technologia ta, ze względu na zmniejszenie gradientu temperatury w obrabianych cieplnie kołach zębatach, jest obiecującą technologią mogącą zastąpić konwencjonalne metody hartowania w oleju. Poza aspektami czysto technicznymi, zastosowanie tej technologii zamiast olejów hartowniczych ma znaczenie ekologiczne oraz ekonomiczne. To drugie wynika przede wszystkim z minimalizacji naddatków na finalną obróbkę mechaniczną kół zębatach oraz liczby wybraków niespełniających reżimów tolerancji wymiarowych. Uważam więc, że cel rozprawy w zakresie numerycznej analizy porównawczej, nowoczesnej technologii hartowania gazowego nawęglonych kół zębatach ze stali Pyrowear 53 z klasycznym hartowaniem w oleju, jest jak najbardziej uzasadniony i dobrze umotywowany w ocenianej rozprawie doktorskiej. Celem wdrożeniowym jest opracowanie narzędzia technologicznego pozwalającego optymalizować parametry procesu hartowania gazowego w celu spełnienia ciągle zwiększających się wymagań jakościowych, a także wydajności, ekonomiki i ekologiczności procesu.

Teza pracy w brzemieniu *Opracowanie modelu matematycznego i prawidłowy dobór parametrów symulacji numerycznej procesu hartowania gazowego poprzedzonego nawęglaniem próżniowym, umożliwi prognozowanie rozkładu stężenia węgla w warstwie nawęglanej (1), kształtowanie składu fazowego (2), ewolucji naprężeń (3) oraz pozwoli na ich optymalizację w celu minimalizacji odkształceń (4) po procesie hartowania nawęglonych próżniowo, silnie obciążonych kół satelitarnych przekładni FDGS wykonanych ze stali Pyrowear 53, została poparta rzeczową analizą stanu zagadnienia w przeglądzie piśmiennictwa, a w szczególności w podrozdziale 2.1, będącego przykładem dobrego opanowania warsztatu pracy naukowej przez Autora rozprawy.*

W rozdziale 2 zdefiniowano szczegółowo także zakres pracy obejmujący charakterystykę badanego materiału, budowę modelu materiału w systemie DEFORM, modelowanie procesu nawęglania niskociśnieniowego, modelowanie wymiany ciepła podczas hartowania, budowę modelu

numerycznego dwóch wariantów procesu obróbki cieplnej kół zębatach oraz walidację modelu procesu poprzez porównanie wyników symulacji z rzeczywistymi wynikami pomiarów z procesu produkcyjnego i procesów eksperymentalnych.

Podsumowując uważam, że zarówno cel, tezę jak i zakres pracy dobrano właściwie i poprzedzono je rzetelną analizą stanu zagadnienia, przejrzystym zdefiniowaniem luki badawczej oraz umotywowaniem podjęcia tematu rozprawy. Co istotne, poprawnie zbilansowano podejście technologiczne oraz naukowe, dlatego oceniana rozprawa jest spójna i czyta się ją komfortowo.

4. Ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej

4.1. Ocena aktualnego stanu wiedzy

Główne studium literatury zawarto w rozdziale 1, w którym skoncentrowano się na źródłach deformacji w procesach nawęglania i hartowania stali, zintegrowanym podejściu do wirtualnej analizy procesów wytwarzania, wykorzystaniu symulacji komputerowych w analizie procesów obróbki cieplnej, porównaniu warunków hartowania gazowego i olejowego, a także modelowaniu zjawisk zachodzących w kolejnych etapach nawęglania i hartowania stali. Analizę przeprowadzono na podstawie 137 pozycji literaturowych (całość pracy zawiera 188 pozycji). Są to zróżnicowane pozycje, w tym podręczniki akademickie anglo- i polskojęzyczne, artykuły źródłowe, artykuły z ostatnich lat, rozporządzenia, normy oraz odwołania do stron internetowych. W przytoczonej literaturze są 2 odwołania do współautorskich prac Autora rozprawy (odwołania w części badań własnych). Dobrany zakres tematyczny jest zwięzły i ściśle odpowiada tytułowi rozprawy.

Przegląd piśmiennictwa jest sporządzony na dobrym poziomie merytorycznym, w którym dobrze zbalansowano zagadnienia modelowania i symulacji numerycznych oraz zagadnienia obróbki cieplnej kół zębatach, koncentrując się słusznie na stanie naprężeń i odkształceń towarzyszących procesowi hartowania oraz głównych przyczynach tych odkształceń. Wiele informacji dotyczy współczynnika przewodności cieplnej HTC na granicy ośrodka chłodzącego i powierzchni materiału. W tej analizie trochę jest brak informacji o współczynniku intensywności chłodzenia H, dobrze znanego z podstaw obróbki cieplnej i charakteryzującego zdolność odprowadzania ciepła danego ośrodka chłodzącego. Zasadne byłoby pokazanie różnic dla hartowania gazowego, a także olejowego.

W części przeglądu piśmiennictwa można znaleźć drobne potknięcia językowe i niedopowiedzenia, które wykażę w kolejnych częściach recenzji. Ogólnie uważam, że przegląd piśmiennictwa jest napisany na dobrym poziomie naukowym, stanowiącym dobrą bazę do podjęcia tematyki rozprawy.

4.2. Ocena zastosowanej metodyki badawczej

Dobranie metodyki badawczej oraz podejście modelowe zostały poprzedzone analizą wymagań technologicznych (rozdział 3) w zakresie kinematycznym, a także obróbki cieplnej kół zębatach w Pratt & Whitney Rzeszów. Zasadnicze dla wdrożenia hartowania gazowego było zastosowanie zintegrowanej austenitacji połączonej z poprzedzającym nawęglaniem niskociśnieniowym w temperaturze 921°C. W porównaniu z klasycznym hartowaniem w oleju, integracja ta pozwala na znaczne skrócenie całego cyklu obróbki cieplnej oraz zmniejszenie wydatku

energetycznego wynikającego z wyeliminowania nagrzewania kół zębatach do temperatury austenitizacji przed hartowaniem. Zasadniczo upraszcza to proces technologiczny, także poprzez ograniczenie miedziowania, stosowanego do selektywnego zabezpieczania warstw nawęglanych i powierzchni hartowanych.

Do badań użyto stali Pyrowear 53 stosowanej na wysokoobciążone koła zębata, przy czym badania prowadzono na próbkach, segmentach a także całych kołach zębatach. Zasadnicze dla pracy było opracowanie modelu numerycznego będącego wirtualnym bliźniakiem stosowanego w firmie procesu obróbki cieplnej dwuwieńcowych kół zębatach. Komputerowy model procesu wykorzystano do analizy porównawczej stosowanego obecnie hartowania w oleju z badaną w celu wdrożenia technologią hartowania gazowego. W pierwszym etapie wykonano badania eksperymentalne właściwości badanej stali w zakresie składu chemicznego, właściwości cieplnych i mechanicznych, a także przemian fazowych poprzez wyznaczenie wykresu CTP badanej stali. Charakterystykę materiału częściowo przedstawiono we współautorskim 17-stronicowym artykule opublikowanym w roku 2023 w czasopiśmie *Metals*, gdzie pierwszym autorem jest mgr inż. Bartosz Iżowski. W kolejnym etapie wyznaczono najważniejsze parametry materiałowe po procesie nawęglania, dobrano krytyczną szybkość chłodzenia na podstawie wykresu CTP_c oraz przeprowadzono eksperymentalne procesy hartowania gazowego próbek typu „C”. Wyniki w postaci krzywych chłodzenia posłużyły jako funkcje celu w zadaniu optymalizacyjnym współczynnika przewodności cieplnej. Następnie prowadzono analizę odwrotną wymiany ciepła oraz zasadnicze symulacje hartowania kół zębatach w oleju i gazie z wykorzystaniem programu DEFORM. Finalnie przeprowadzono porównanie wyników symulacji numerycznej z eksperymentalnymi wynikami kontroli wymiarowej kół zębatach. Zasadnicze dla wyników symulacji było zdefiniowanie kluczowych danych wejściowych i kluczowych danych wyjściowych, do których zaliczono: profil stężenia węgla, średnica podstaw dna wrębu oraz grubość zęba.

Oceniam, że zastosowana metodyka badawcza została właściwie dobrana do realizacji celu rozprawy i udowodnienia wieloaspektowej tezy rozprawy.

4.3. Ocena zastosowanego podejścia modelowego

Zasadnicze modelowanie i symulację procesu obróbki cieplnej kół zębatach obejmowało kilka etapów zdefiniowanych w zakresie pracy, tj. opracowanie modelu materiału, modelowanie nawęglania, modelowanie wymiany ciepła podczas hartowania, modelowanie przemian fazowych oraz wynikowego modelu naprężeniowo-odkształceniowego, będącego bazą do badań porównawczych z wynikami rzeczywistymi geometrii zębów. Pomyślna realizacja powyższych kroków ma za zadanie przewidywać wpływ parametrów procesu na stan naprężeń resztkowych oraz odkształcenia hartowanych gazowo kół zębatach. Autor w możliwie precyzyjny sposób zdefiniował kolejne modele cząstkowe w systemie DEFORM. Biorąc pod uwagę ogólną zasadę, że finalny wynik symulacji w zdecydowany sposób zależy od zdefiniowanych danych wejściowych, charakterystyczne dla pracy jest, że mgr inż. Bartosz Iżowski modele obliczeniowe bardzo dobrze skorelował z danymi z pomiarów rzeczywistych. W większości przypadków dane modelowe pozyskane z programu JMatPro były kalibrowane / optymalizowane / walidowane np. z wykresem CTP_c, temperaturami

krytycznymi A_{c1} , A_{c3} , M_s wyznaczonymi dylatometrycznie, rzeczywistymi krzywymi pływnięcia, krzywymi chłodzenia wyznaczonymi z użyciem termopar, naprężeniami szczątkowymi wyznaczonymi metodą rentgenowską, itd. Finalnie zbudował 2 wirtualne bliźniaki wariantów obróbki cieplnej: W1 (klasyczne podejście z hartowaniem w oleju) oraz W3 (hartowanie gazowe) na podstawie detalicznie opracowanych modeli geometrycznych oraz MES.

Ogólnie bardzo wysoko oceniam zastosowane podejście modelowe, w mojej ocenie na dobrym poziomie szczegółowości. Jest to dobry przykład nowoczesnego, inżynierskiego podejścia do rozwiązywania zaawansowanego problemu technologicznego z wykorzystaniem bieżącego stanu wiedzy naukowej.

4.4. Ocena wyników badań i ich dyskusji

Końcowym wynikiem badań były finalne symulacje numeryczne nawęglania, hartowania i analiza porównawcza odkształceń. Stwierdzono, że różnica stężenia węgla po nawęglaniu w obu rodzajach hartowania a wynikami eksperymentalnymi wynosi ok. 9%, różnice pomiędzy wartościami współczynnika przewodności cieplnej wynoszą ok. 4%, a temperatury M_s do 6%, co spełnia wymagania projektowe (poniżej 20%). Za największą wartość pracy, oprócz opracowania całościowego modelu obróbki cieplnej, uważam numeryczne wykazanie, że po hartowaniu olejowym największe przemieszczenia występują w obszarze przejścia promienia wrębu do tworzącej zęba, lecz nie na samej średnicy dna wrębu. W przypadku hartowania gazowego, model przewiduje niewielkie przemieszczenia w obszarze dna wrębu i średnicy podziałowej, natomiast największe odkształcenie obliczone zostało dla średnicy wewnętrznej koła zębatego. Przewidywana wielkość owalizacji jest w zgodzie z danymi rzeczywistymi dla hartowania olejowego, natomiast przekracza założone 20% dla nowej metody hartowania gazowego, co wynika ze złożonej specyfiki przepływu strumienia gazowego. Wykazane znaczące różnice w naprężeniach resztkowych są wynikiem porównywania profili numerycznych bezpośrednio po hartowaniu gazowym oraz profili rzeczywistych po pełnej obróbce cieplnej, tzn. hartowaniu gazowym, wymrażaniu i podwójnym odpuszczaniu, gdzie należy spodziewać się relaksacji naprężeń ściskających.

Ciekawym wynikiem jest dowiedzenie odwrotnej tendencji deformacji w eksperymentalnych procesach hartowania, gdzie zarejestrowano przyrost charakterystycznych wymiarów dla hartowania olejowego oraz odwrotną tendencję podczas hartowania gazowego. Opracowany model numeryczny przewiduje prawidłowo kierunek i wielkość deformacji dla hartowania w oleju, podczas gdy symulacja hartowania gazowego wymaga dalszej kalibracji w połączeniu z dalszymi badaniami materiałowymi. Szkoda, że w tym zakresie Autor nie pokusił się o bardziej dogłębną analizę z odniesieniem do danych literaturowych.

Podsumowując tą część pracy uważam, że teza została udowodniona, chociaż można mieć pewien niedosyt w odniesieniu do jej drugiej części, w której postulowano, że prawidłowy dobór parametrów symulacji umożliwi optymalizację stężenia węgla, składu fazowego oraz ewolucji naprężeń w celu minimalizacji odkształceń, co zostało dowiedzione tylko w podstawowym zakresie.

4.5. Uwagi krytyczne i szczegółowe

Poniższe uwagi mają głównie charakter polemiczny i porządkowy.

Uwagi krytyczne / polemiczne:

1/ Autor bardzo dużą uwagę poświęca analizie współczynnika przewodności cieplnej HTC na granicy ośrodka chłodzącego i powierzchni materiału. W pracy nie ma informacji natomiast o współczynniku intensywności chłodzenia H, dobrze znanego z podstaw obróbki cieplnej i charakteryzującego zdolność odprowadzania ciepła danego ośrodka chłodzącego. Czy pomiędzy HIC a H można znaleźć jakieś korelacje i czy ewentualnie może on być przydatny podczas zastosowanych symulacji ?

Dodatkowo Autor pisze, że współczynnik HIC może mieć zmienną wartość, chociaż w literaturze przyjmuje się zazwyczaj wartość stałą (s. 42). Czy rozumiejąc współczynnik przewodności cieplnej jako samą w sobie wartość materiałową (abstrahując od geometrii analizowanego ciała) może on przyjmować różne wartości ?

2/ Cykl obróbki cieplnej klasycznego hartowania w oleju (rys. 3.7) różni się znacząco od skróconego cyklu hartowania gazowego (rys. 3.8). Można sobie łatwo wyobrazić zróżnicowany skład chemiczny stali po nawęglaniu i hartowaniu, nieco różną mikrostrukturę austenitu zdefiniowaną np. przez różną wielkość ziarna, zróżnicowany stan naprężeń, itd. Czy różnice te mogły mieć wpływ na zidentyfikowaną, różną tendencję deformacji w procesach hartowania gazowego i olejowego ?

3/ Czy w przypadku badań modelowych uwzględniano obecność austenitu szczątkowego lub zidentyfikowano go w badaniach eksperymentalnych ? Czy obecność i stabilność / metastabilność tej fazy może mieć wpływ na zidentyfikowaną, różną tendencję deformacji w procesach hartowania gazowego i olejowego oraz wykazaną ponad 20-% wą różnicę odchyłki owalizacji, w przypadku hartowania gazowego ?

4/ Jak wyjaśnić brak różnicy podczas analizy naprężeń resztkowych pomiędzy eksperymentem a wynikami symulacji w zerowej odległości od dna wrębu oraz średnicy podziałowej, podczas gdy różnica ta skokowo rośnie wraz ze zwiększeniem odległości na osi x (rys. 5.15) ?

5/ Czy w modelowaniu temperatury M_s uwzględniono wielkość ziarn austenitu pierwotnego ? Ze względu na dłuższy o 72 min. czas wytrzymania w temperaturze 921°C oraz brak przemian fazowych podczas chłodzenia po nawęglaniu i ponownego nagrzewania do austenitowania (jak dla warunków chłodzenia w oleju W1), wielkość ziarn może się różnić.

6/ Wiele danych materiałowych zostało obliczonych z wykorzystaniem programu JMatPro. Jaka wersja programu oraz baza materiałowa zastosował Autor ?

Inne, drobne uwagi:

- „ ... wartość temperatury M_s nie zależy od szybkości chłodzenia, a jedynie od składu chemicznego hartowanej stali ...” s. 34. Czy zawsze jest to prawdziwe ?
- „Martensyt ma objętość właściwą większą o około 1,5% od austenitu, z którego powstał.” s. 35. Czy zawsze jest to prawdziwe, od czego to zależy ?
- Rysunek 1.16 jest w zasadzie zdublowaniem rys. 1.16.

- Dla przejrzystości warto stosować inne pochylenie linii dla wolnego studzenia i hartowania w oleju (rys. 3.7)
- Warto znać stężenie azotu w stali (nie podano w tabeli 3.5), co umożliwiłoby obliczenie ewentualnego wkładu cząstek AlN w hamowanie rozrostu ziarn austenitu.
- Co oznacza pomiary CMM próbek ? (s. 69)
- Czy możliwe jest podawanie wartości modułu Younga dla austenitu poniżej temperatury A_1 oraz dla martenzytu powyżej temperatury M_s , jak na rys. 4.4 ?
- Na rys. 4.7 i 4.9 powinno się podać odpowiednio: szybkość nagrzewania i szybkość chłodzenia, które determinują temperatury krytyczne przemian fazowych.
- Czy możliwe jest uzyskanie wartości odkształceń dla stali martenzytycznej, jak podano na osi poziomej na rys. 4.11 ?
- Brak jednostek w tabeli 4.4.

Uwagi literowe i edycyjne:

- Powinno być: dwuwieńcowych kół, zamiast ... dwywieńcowych kół (s. 12)
- Powinno być: o charakterze bezdyfuzyjnym, zamiast ... o charakterze bezdydfuzyjnym (s. 26)
- Powinno być: wynika przede wszystkim, zamiast ... wynika przed wszystkim (s. 29)
- Powinno być: m.in., zamiast ... n.in. (s. 49)
- Powinno być: że w przypadku, zamiast ... że przypadku (s. 51)
- Niedokończone zdanie: ... pełni gaz zamiast. (s. 59)
- Powinno być: wraz z operacjami, zamiast ... wraz operacjami (s. 63)
- Na osi pionowej powinno być MPa zamiast Mpa (rys. 5.15).

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Praca autorstwa mgr inż. Bartosza Iżowskiego stanowi dobry przykład pracy z zakresu obliczeniowej inżynierii materiałowej o dobrze zbalansowanym podejściu eksperymentalnym i modelowym. Do najważniejszych osiągnięć Autora zaliczam Jego wkład do dyscypliny inżynieria materiałowa w zakresie opracowania kompleksowego modelu nawęglania niskociśnieniowego i hartowania gazowego kół zębatych z wysokowytrzymałej stali niskowęglowej. Autor trafnie zidentyfikował lukę badawczą oraz w bardzo metodyczny sposób zaprojektował badania modelowe i przeprowadził symulacje numeryczne procesu hartowania kół zębatych i osiągnął postulowany cel pracy. Wykorzystane do modelu dane materiałowe były wielokierunkowo kalibrowane a uzyskane wyniki analiz numerycznych zostały odpowiednio skonfrontowane z wynikami pomiarów rzeczywistych. Oprócz przewidywania wpływu zmian parametrów obróbki cieplnej na charakterystyki wymiarowe kół zębatych oraz właściwości mechaniczne stali, opracował cenne narzędzie symulacyjne, o dużym potencjale wykorzystania w praktyce przemysłowej do optymalizacji procesów obróbki cieplnej. Wskazane w pracy uwagi mają głównie znaczenie polemiczne i nie rzutują na ogólną, bardzo wysoką ocenę recenzowanej rozprawy.

Pomyślna realizacja pracy wymagała opanowania wiedzy teoretycznej z zakresu metaloznawstwa stopów żelaza i obróbki cieplnej stali wraz z modelowaniem tych procesów, metodycznego zaplanowania modelu i jego walidacji z wynikami eksperymentalnymi oraz umiejętności prowadzenia pracy naukowo-technologicznej i wyciągnięcia właściwych wniosków. Stwierdzam, że opiniowana praca doktorska spełnia wymagania określone w obowiązującej ustawie, wobec czego wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej o dopuszczenie mgr inż. Bartosza Iżowskiego do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę wypełnienie istotnej luki badawczej poprzez opracowanie kompleksowego modelu nawęglania niskociśnieniowego i hartowania gazowego oraz hartowania w oleju, co wymagało umiejętnego połączenia bieżącej wiedzy naukowej o światowym obiegu wraz z praktyką przemysłową obróbki cieplnej kół zębatach, wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej o wyróżnienie rozprawy.

