

Kraków, 28.12.2020

Dr hab. inż. Beata Dubiel, profesor uczelni
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
Al. A. Mickiewicza 30
30-059 Kraków

Recenzja

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Karoliny Kowalczyk

**pt. Analiza zjawisk strukturalnych i ich wpływ na właściwości stali niskowęglowych
odkształconych w procesie SPD**

Problematyka rozprawy

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Karoliny Kowalczyk została wykonana na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej pod kierunkiem dr hab. inż. Magdaleny Jabłońskiej, prof. uczelni. Promotorem pomocniczym jest dr inż. Tomasz Bulzak.

Tematyka rozprawy dotyczy kształtowania mikrostruktury i właściwości niskowęglowych stali ferrytycznych w procesie intensywnego odkształcenia plastycznego (ang. *Severe Plastic Deformation*, SPD). Zagadnienia te wpisują się w nurt licznych prac badawczych mających na celu wytwarzanie wyrobów ze stopów metali charakteryzujących się optymalną kombinacją właściwości wytrzymałościowych i plastycznych dzięki kontrolowanym procesom formowania, umożliwiającym znaczne rozdrobnienie mikrostruktury. Dotychczas większość badań w tym zakresie dotyczyła stopów metali nieżelaznych. Zainteresowanie wykorzystaniem SPD w celu ulepszenia właściwości stali niskowęglowych stanowi ciekawe wyzwanie badawcze ze względu na potencjalną możliwość uzyskania właściwości zbliżonych do stali niskostopowych bez konieczności stosowania drogich pierwiastków stopowych i obróbki cieplnej. Najczęściej stosowane metody SPD, takie jak przeciskanie przez kanał kątowy (ECAP), skręcanie pod wysokim ciśnieniem (HPT), cykliczne wyciskanie ściskające (CEC), akumulacyjne walcowanie pakietowe (ARB), wyciskanie hydrostatyczne (HE) czy współbieżne wyciskanie (KOBO) zazwyczaj ograniczone się do odkształcania próbek o niewielkich rozmiarach. Według doniesień literaturowych stosowanie metod niekonwencjonalnych lub łączenie różnych metod SPD pozwala na uzyskanie jednorodnej mikrostruktury na całym przekroju próbek

o zwiększonych wymiarach np. w postaci blach i taśm. Ze względu na zapotrzebowania rynku na wyroby o polepszonych właściwościach użytkowych, a szczególnie właściwościach wytrzymałościowych i plastycznych nieosiągalnych innymi sposobami przeróbki plastycznej, takie metody wydają się być atrakcyjnym sposobem formowania blach i taśm ze stali niskowęglowych.

Tą tematyką zajęła się w swojej pracy doktorskiej Pani Karolina Kowalczyk. Do odkształcenia próbek niskowęglowych stali ferrytycznych wybrała niekonwencjonalny hybrydowy proces DRECE (ang. *Dual Rolls Equal Channel Extrusion*). Wykonała wszechstronną analizę zjawisk zachodzących w mikrostrukturze stali niskowęglowych wskutek odkształcenia w procesie DRECE i określiła ich wpływ na właściwości mechaniczne. Ze względu na konieczność poszerzenia wiedzy na temat zmian mikrostruktury towarzyszących dużemu odkształceniu niskowęglowych stali ferrytycznych zaproponowana problematyka pracy jest w pełni zasadna. Materiałem do badań były dwie stale ferrytyczne – komercyjna stal niskowęglowa do przeróbki plastycznej na zimno DC01 oraz modelowa stal wolna od atomów międzywęzłowych (ang. *interstitial free, IF*). Zakres zrealizowanych zadań badawczych obejmował symulacje numeryczne procesu DRECE, dobór parametrów procesu i odkształcenie próbek stali oraz zbadanie ich właściwości mechanicznych i mikrostruktury po odkształceniu.

Podsumowując ocenę tematyki pracy doktorskiej Pani mgr inż. Karoliny Kowalczyk i przyjętego zakresu prac eksperymentalnych stwierdzam, że poruszone przez Nią problemy naukowe wpisują się w nurt aktualnie prowadzonych badań w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa w licznych ośrodkach na całym świecie. Problematyka odkształcenia stali niskowęglowych w procesach SPD jest istotnym kierunkiem zarówno badań podstawowych, jak i stosowanych. Pod tym względem opiniowana praca doktorska jest bardzo wartościowa.

Szczegółowa charakterystyka rozprawy

Praca doktorska Pani Karoliny Kowalczyk ma układ typowy dla rozprawy i składa się z wprowadzenia do tematyki badawczej, opracowania aktualnego stanu zagadnienia w oparciu o doniesienia literaturowe, podsumowania przeglądu literatury, sformułowania tezy i celu badań, prezentacji wyników badań własnych, ich syntetycznego podsumowania i dyskusji oraz wniosków. Praca jest poprzedzona wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów. Rozprawa jest bardzo starannie opracowana pod względem edytorskim, a jej język poprawny stylistycznie.

We *Wprowadzeniu* Doktorantka omówiła metody otrzymywania materiałów o mikrostrukturze ultradrobnoziarnistej i nanometrycznej. Szczególną uwagę poświęciła metodom SPD stosowanym do rozdrobnienia ziarna materiałów metalowych. Przedstawiła także przesłanki wskazujące na celowość badań nad zastosowaniem metod SPD do odkształcenia niskowęglowych stali ferrytycznych. Wprowadzenie do tematyki rozprawy oparte jest na prawidłowo dobranych materiałach źródłowych i stanowi dobry wstęp do pracy.

Rozdział 2 zatytułowany *Aktualny stan wiedzy* Autorka podzieliła na podrozdziały poświęcone zagadnieniom kształtowania mikrostruktury ultradrobnoziarnistej poprzez duże odkształcenie plastyczne, klasycznym i niekonwencjonalnym procesom SPD oraz charakterystyce właściwości mechanicznych i mikrostruktury stali niskowęglowych odkształconych metodami SPD. Zakres tematyczny tej części pracy został prawidłowo dobrany i umożliwił Doktorantce ogólne omówienie problemów odkształcenia stopów metali metodami SPD, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości ich zastosowania dla poprawienia właściwości stali niskowęglowych. Doniesienia literaturowe wykorzystane w analizie stanu zagadnienia obejmują 224 pozycje. Większość z nich stanowią najnowsze publikacje w renomowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym.

W podrozdziale 2.1. *Materiały o silnie rozdrobnionej strukturze* Autorka przedstawiła podstawowe wiadomości na temat zmian w mikrostrukturze stopów metali zachodzących na skutek odkształcenia plastycznego. Są to istotne informacje z punktu widzenia opracowania stanu zagadnienia związanego z tematem pracy. Treść rozdziału nie budzi zastrzeżeń, natomiast jego tytuł nie jest adekwatny do zawartości, gdyż jest nakierowany na materiały, a nie na opis zjawisk towarzyszących kształtowaniu mikrostruktury ultradrobnoziarnistej. Autorka omówiła procesy generowania i przegrupowania dyslokacji oraz tworzenia wąskokątowych i szerokokątowych granic ziarn. Przytoczyła także przykładowe rezultaty prac badaczy zajmujących się zależnościami pomiędzy mikrostrukturą i właściwościami stopów metali odkształconych w procesach SPD, w tym również stali niskowęglowych.

W kolejnym podrozdziale Doktorantka zawarła podręcznikowe informacje dotyczące zależności Halla-Petcha oraz podała przykłady z literatury wskazujące na obserwacje odwróconej zależności Halla-Petcha w nanomateriałach i materiałach ultradrobnoziarnistych. Następnie omówiła trzy główne modele odkształcenia plastycznego wyjaśniające zależność Halla-Petcha, a mianowicie teorię spiętrzania dyslokacji, teorię źródeł na granicy ziarn i teorię umocnieniową Conrada. Stwierdziła, że modele te uwzględniają wyłącznie procesy

zachodzące wewnątrz ziarn i nie traktują granic ziarn jako integralnych składowych mikrostruktury materiałów polikrystalicznych. W zakończeniu podrozdziału Autorka zasygnalizowała, że odkształcenie materiałów ultradrobnoziarnistych może zachodzić na drodze kilku działających jednocześnie mechanizmów, o czym świadczą liczne wyniki badań opublikowane w literaturze. Szkoda, że w tym miejscu nie przytoczyła choćby kilku przykładowych wyników prac poświęconych tym zagadnieniom.

Następny podrozdział poświęcony jest omówieniu metod SPD. Porównanie klasycznych metod SPD Doktorantka przedstawiła w ujęciu tabelarycznym, a następnie scharakteryzowała metody hybrydowe i niekonwencjonalne. Jest to bardzo przejrzyste opracowanie zawierające schematy urządzeń, opis sposobu odkształcenia, zalety i wady poszczególnych metod oraz wyszczególnienie odkształcanych materiałów.

W kolejnym podrozdziale Autorka skoncentrowała się na przeglądzie literatury dotyczącej bezpośrednio odkształcenia stali niskowęglowych w procesach SPD. Omówiła najistotniejsze wyniki badań zmian właściwości mechanicznych stali niskowęglowych po przeciskaniu przez kanał kątowy, odkształceniu poprzez połączenie procesów ARB i ECAP z odkształceniem w konwencjonalnych procesach przeróbki plastycznej, a także po zastosowaniu niekonwencjonalnej metody DRECE. Przedstawiła również przegląd doniesień literaturowych dotyczących wpływu stosowanych procesów intensywnego odkształcenia na zmiany w mikrostrukturze. Wskazała na obserwowane różnice w mechanizmach rozdrobnienia mikrostruktury oraz w udziale wąskokątowych i szerokokątowych granic ziarn w stalach niskowęglowych odkształconych z użyciem hybrydowych metod SPD. Zwróciła także uwagę, że w procesie ECAP rozdrobnienie mikrostruktury następuje wskutek przecinania się mikropasm ścinania wewnątrz ziarn. Cytowane w tej części pracy pozycje literatury obejmują wiele najnowszych publikacji z tej tematyki. Na podstawie dobrze rozpoznanego aktualnego stanu zagadnienia Doktorantka stwierdziła, że do tej pory brakuje systematycznego opisu zmian mikrostruktury stali niskowęglowych zachodzących na skutek odkształcenia przy użyciu niekonwencjonalnych i hybrydowych metod SPD.

W rozdziale poświęconym podsumowaniu przeglądu literatury Autorka słusznie zwróciła uwagę, że ograniczeniem konwencjonalnych metod SPD jest możliwość odkształcenia próbek o niewielkich rozmiarach. Podkreśliła, że obiecujące wyniki wskazujące na możliwość zwiększenia skali odkształcanych próbek uzyskano z zastosowaniem niekonwencjonalnych oraz hybrydowych metod SPD. Koncentrowały się one głównie na badaniach metali

nieżelaznych i ich stopów. Mniejsze zainteresowanie badaczy wzbudziły stale niskowęglowe i mikrostopowe, w których zdaniem Doktorantki można również uzyskać poprawę właściwości poprzez rozdrobnienie mikrostruktury w niekonwencjonalnych procesach SPD.

W oparciu o krytyczną ocenę opublikowanych dotychczas osiągnięć innych badaczy Pani mgr inż. Karolina Kowalczyk sformułowała tezę rozprawy brzmiącą:

„Podczas kształtowania plastycznego taśm ze stali ferrytycznej w procesie DRECE poprzez odpowiedni dobór parametrów odkształcenia tj. kąt odkształcenia i obrót taśmy po każdym przepuszczeniu możliwe jest uzyskanie wysokich właściwości wytrzymałościowych przy jednoczesnym zachowaniu jednorodności właściwości na przekroju, które są następstwem ewolucji mikrostruktury prowadzącej do rozdrobnienia ziarna w oparciu o dominujący mechanizm, jakim jest przecinanie się mikropasm ścinania.”

Teza rozprawy jest w mojej ocenie poprawna, adekwatna do podjętego problemu badawczego i wskazuje na spodziewane rezultaty badań.

Jako cel naukowy pracy Doktorantka wskazała określenie i scharakteryzowanie zmian strukturalnych zachodzących w niskowęglowych stalach typu DC01 oraz IF w trakcie dużego odkształcenia plastycznego z użyciem niekonwencjonalnej metody DRECE, ustalenie dominującego mechanizmu rozdrobnienia ziarna oraz opracowanie modelowego schematu zmian mikrostruktury towarzyszących postępowi procesu odkształcenia plastycznego. Z kolei celem użytkowym pracy było uzyskanie istotnego wzrostu właściwości wytrzymałościowych na całym przekroju taśmy ze stali niskowęglowej odkształcanej metodą DRECE przy minimalnej liczbie przepustów.

Zaproponowane cele są w pełni zasadne ze względu na konieczność poszerzenia wiedzy na temat zjawisk w mikrostrukturze towarzyszących dużemu odkształceniu niskowęglowych stali ferrytycznych. Do ich zrealizowania Doktorantka przyjęła prawidłowo dobrany plan badań doświadczalnych, który przejrzyście zilustrowała w formie schematu na rys. 21.

Kolejną część pracy stanowi rozdział 5. *Badania własne*, w którym Autorka scharakteryzowała materiał do badań i metodykę badań. Jest to zatem dalszy ciąg części metodologicznej. Na jego wstępie zamieściła wyniki badań mikrostruktury stali IF i DC01 w stanie wyjściowym. Obrazy mikrostruktury otrzymane za pomocą mikroskopu świetlnego i skaningowo-transmisyjnego mikroskopu elektronowego wskazują na wyraźne różnice kształtu ziaren ferrytu oraz gęstości dyslokacji w obydwu stalach. W dalszej części Doktorantka opisała szczegółowo metodykę symulacji numerycznej metodą elementów skończonych,

sposób odkształcenia plastycznego przy użyciu metody DRECE oraz warunki wykonania badań właściwości mechanicznych i mikrostruktury. Dla określenia wzajemnych relacji pomiędzy warunkami odkształcenia, mikrostrukturą i właściwościami mechanicznymi wykonała próby rozciągania, pomiary mikrotwardości oraz badania mikrostruktury metodami mikroskopii świetlnej, skaningowej i skaningowo-transmisyjnej mikroskopii elektronowej (LM, SEM, STEM), dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD) i dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego (XRD). Zastosowanie przez Doktorantkę szerokiego wachlarza nowoczesnych technik badawczych zasługuje na uznanie i bezsprzecznie przyczyniło się do realizacji zamierzonych celów pracy.

Część empiryczną pracy stanowią rozdziały 6, 7 i 8. W rozdziale 6. *Wyniki badań* Autorka zaprezentowała uzyskane wyniki oraz ich interpretację. W pierwszym podrozdziale opisała rezultaty modelowania procesu DRECE przy użyciu metody elementów skończonych (MES). Symulację numeryczną wykonała dla stali DC01. Za najistotniejszą informację uzyskaną poprzez modelowanie uważam wyznaczenie wartości odkształcenia zastępczego ε , jakie generowane jest przy przejściu przez kanał kątowy. Dzięki temu możliwe było wyznaczenie prognozowanej wartości odkształcenia zastępczego ε dla każdego z siedmiu wykonanych przepustów. W oparciu o analizę rozkładu odkształcenia zastępczego Doktorantka stwierdziła, że jest to rozkład typowy dla procesów przeciskania przez kanał kątowy, czyli że największe odkształcenie zastępcze występuje na powierzchni taśmy znajdującej się od strony matrycy górnej, natomiast najmniejsze na powierzchni taśmy od strony matrycy dolnej. Na tej podstawie zdecydowała, aby kolejne przepusty materiału przez kanał kątowy realizować z obrotem materiału o 180° . Modelowanie umożliwiło także otrzymanie danych o parametrach siłowych występujących w procesie DRECE oraz wyznaczenie rozkładu znormalizowanego kryterium zniszczenia według Cockcrofta-Lathama. Wyniki modelowania Doktorantka prawidłowo zinterpretowała i umiejętnie wykorzystała w części eksperymentalnej pracy.

W kolejnym podrozdziale Autorka przedstawiła wyniki badań właściwości mechanicznych. Statyczną próbę rozciągania wykonała dla serii próbek stali DC01 i IF w stanie wyjściowym oraz po poszczególnych przepustach w procesie DRECE. Dla obydwu stali wykazała, że największy wzrost wartości parametrów wytrzymałościowych nastąpił po pierwszym przepuście, a plastyczność uległa zmniejszeniu wraz ze wzrostem liczby przepustów od 1 do 7. W tej części pracy na szczególne uznanie zasługuje wykonanie map rozkładu mikrotwardości, które

potwierdziły znaczny wzrost umocnienia wraz ze wzrostem liczby przepustów DRECE oraz ujawniły niewielki rozrzut twardości na przekroju odkształconych próbek.

W dalszej części pracy Doktorantka opisała wyniki badań mikrostruktury po odkształceniu. Ocenę zmian mikrostruktury po kolejnych przepustach w DRECE wykonała w oparciu o analizę map orientacji krystalograficznej ziarn SEM/EBSD, obserwacje podstruktury dyslokacyjnej na cienkich foliach w STEM oraz oszacowanie gęstości dyslokacji metodą XRD. Zastosowanie komplementarnych technik badawczych pozwoliło na kompleksową ocenę zmian mikrostruktury stali towarzyszących procesowi hybrydowego odkształcenia SPD metodą DRECE. Doktorantka przeprowadziła badania wpływu poszczególnych przepustów na średnią średnicę ziarna, udział granic ziarn niskiego i wysokiego kąta, a także na zmiany mikrostruktury charakterystyczne dla procesów SPD, świadczące o działaniu poszczególnych mechanizmów rozdrobnienia ziarna. Pragnę podkreślić, że są to badania wykonane na bardzo dobrym poziomie. Pani Karolina Kowalczyk udowodniła znakomitą znajomość technik badawczych, których dobór został dokonany z pełną świadomością ich możliwości i ograniczeń w ocenie analizowanych cech mikrostruktury odkształconych stali niskowęglowych. Starannie i systematycznie opisała zmiany mikrostruktury zaobserwowane po poszczególnych przepustach w procesie DRECE oraz prawidłowo zinterpretowała zjawiska towarzyszące poszczególnym etapom rozdrobnienia ziarn. Niewątpliwie istotnym rezultatem jest wynik analizy mikrostruktury za pomocą STEM potwierdzający tworzenie się mikropasm ścinania i ich wzajemnego przecinania się wskutek dużego odkształcenia plastycznego. Doktorantka stwierdziła, że jest to dominujący mechanizm podziału ziarn, który w konsekwencji prowadzi do utworzenia się mikrostruktury ultradrobnoziarnistej.

W zakończeniu części eksperymentalnej w rozdziale *Podsumowanie wyników badań* Doktorantka poddała krytycznej analizie uzyskane wyniki i przedyskutowała je w oparciu o opublikowane rezultaty prac innych badaczy. Na podstawie wyników badań mikrostruktury i symulacji MES Autorka wyróżniła cztery etapy kształtowania się zmian mikrostruktury charakterystycznych dla procesów SPD w zależności od zakresu odkształcenia zastępczego ε . Zapewne omyłkowo na str. 112 napisała, że są to zmiany zależne od zastosowanego kąta odkształcenia α . Na uwagę zasługuje szczególnie wzorcowe opracowanie schematów ewolucji mikrostruktury stali DC01 (rys. 79 i 80), a także schemat wiążący wytrzymałość na rozciąganie, gęstość dyslokacji, długość granic HABs i LABs oraz wartość odkształcenia zastępczego (rys. 84). Doktorantka wykazała w pełni umiejętność pogłębionej analizy wyników badań

własnych, która umożliwiła ustalenie zależności pomiędzy odkształceniem, właściwościami mechanicznymi i ewolucją mikrostruktury stali niskowęglowych w procesie DRECE. Dołożyła należytych starań, aby wyjaśnić przyczyny obserwowanych zjawisk w mikrostrukturze i w poglądowy sposób zobrazować ich ewolucję. Tym samym wykazała, że w pełni udowodniła tezę pracy i zrealizowała zamierzone cele.

Ocena rozprawy

W mojej ocenie zagadnienia będące przedmiotem recenzowanej rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Karoliny Kowalczyk są bardzo aktualne i ważne pod względem naukowym oraz mają możliwość praktycznego zastosowania. Doktorantka opracowała wnikliwy a zarazem krytyczny przegląd stanu zagadnienia w oparciu o najnowsze doniesienia literaturowe oraz wykonała szeroko zakrojone badania własne. Realizacja zadań badawczych niewątpliwie wymagała dużego nakładu pracy, wiedzy i umiejętności wykorzystania różnorodnej aparatury badawczej. Za najistotniejsze osiągnięcia pracy uważam:

- Ustalenie parametrów odkształcenia w procesie DRECE korzystnych z punktu widzenia uzyskania rozdrobnienia ziarna, istotnego wzrostu właściwości wytrzymałościowych i użytecznej plastyczności stali niskowęglowych.
- Wyodrębnienie poszczególnych etapów ewolucji mikrostruktury stali DC01 występujących wraz ze wzrostem odkształcenia w procesie DRECE oraz opracowanie modeli obrazujących transformację zmian mikrostruktury w zależności od wybranych parametrów procesu.
- Wykazanie podobieństwa przebiegu zmian mikrostruktury towarzyszących odkształcaniu metodą DRECE obydwu badanych stali DC01 i IF.
- Ustalenie, że dominującym mechanizmem podziału ziarna w niskowęglowych stalach ferrytycznych odkształconych w procesie DRECE jest przecinanie się mikropasm ścinania.

Pomimo bardzo pozytywnej oceny pracy, po jej przeczytaniu nasuwają się pewne uwagi do dyskusji oraz uwagi krytyczne dotyczące zaprezentowanych wyników badań. W szczególności proszę o przedyskutowanie następujących zagadnień:

- W próbkach stali DC01 po 4 przepustach DRECE za pomocą STEM zaobserwowano pętle dyslokacyjne. Jaki może być mechanizm powstawania pętli dyslokacyjnych w niskowęglowym ferrycie?

- Oszacowanie gęstości dyslokacji metodą XRD wskazuje, że jest ona wysoka i utrzymuje się na podobnym poziomie w stanie wyjściowym i po kolejnych przepustach. Jakie czynniki mogą wpływać na dokładność tej metody i jak można oszacować błąd pomiaru?
- Z jaką rozdzielczością przestrzenną zarejestrowano mapy EBSD? Czy możliwe było zaobserwowanie na nich pasm ścinania w stali DC01 po odkształceniu DRECE?

Uwagi krytyczne do pracy są następujące:

- Przykładowe zdjęcia mikrostruktury badanych stali w stanie wyjściowym (rys. 22) zostały wykonane przy różnych powiększeniach, co utrudnia analizę porównawczą.
- W opisie zmian podstruktury dyslokacyjnej w poszczególnych etapach odkształcenia stwierdzono różnice w gęstości dyslokacji na podstawie jakościowych obserwacji zdjęć wykonanych w STEM w jasnym polu. Takie porównanie może być jednak obarczone znacznym błędem. Ze względu na możliwość wygaszania widoczności dyslokacji w zależności od warunków dyfrakcyjnych, porównanie gęstości dyslokacji wymaga wykonania zdjęć w warunkach dwuwiązkowych w TEM.
- W pracy brakuje wyjaśnienia, w jaki sposób na zdjęciach STEM (rys. 62, 68, 74) rozróżniono granice niskiego i wysokiego kąta.
- Na rys. 74 g–h nie zaznaczono dyslokacyjnych ścianek poligonalnych, których występowanie opisano na str. 100, wskazano natomiast cechę opisaną jako „uporządkowana struktura dyslokacyjna”. W pracy brakuje wyjaśnienia jakie układy dyslokacji obserwowane na zdjęciach STEM mogą wskazywać na występowanie opisywanych zjawisk.
- Autorka nie ustrzegła się błędów terminologicznych i edytorskich, takich jak np. zamienne użycie pojęć struktura i mikrostruktura, które nie są synonimami, wyjaśnienie oznaczenia $R_{0,2}$ jako granica plastyczności zamiast umowna granica plastyczności, błędne odwołanie do rys. 85, zamiast 84 w podsumowaniu wyników badań.

Uwagi o charakterze dyskusyjnym i krytycznym nie pomniejszają wartości merytorycznej recenzowanej pracy doktorskiej.

Wniosek końcowy

Mając na uwadze aktualny temat pracy, precyzyjne sformułowanie celów badań, odpowiedni dobór zadań i metod badawczych oraz wykonanie szeroko zakrojonych prac eksperymentalnych, których wyniki zostały prawidłowo zinterpretowane, wysoko oceniam rozprawę doktorską Pani mgr inż. Karoliny Kowalczyk. W oparciu o sporządzoną opinię stwierdzam, że praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pani mgr inż. Karoliny Kowalczyk do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Ponadto ze względu na wysoki poziom uzyskanych osiągnięć naukowych Doktorantki zgłaszam wniosek o wyróżnienie Jej rozprawy doktorskiej.

