

Prof. dr hab. Roman Kuziak
Sieć Badawcza Łukasiewicz Instytut Metalurgii Żelaza
ul. K. Miarki 12-14
44-100 Gliwice
e-mail: rkuziak@imz.pl
Tel.: 32 2345 241

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Karoliny Kowalczyk

pt.

„Analiza zjawisk strukturalnych i ich wpływ na właściwości stali niskowęglowych odkształcanych w procesie SPD”

Recenzję wykonano na zlecenie Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej, zgodnie z rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 oraz ustawy z dnia 20 lipca 2018 w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o stopień doktora.

Recenzja składa się z trzech części, w których przedstawiono:

- Odniesienie się do podjętej tematyki badań.
- Analizę i ocenę poszczególnych fragmentów pracy.
- Uwagi dyskusyjne.
- Ocenę końcową pracy.

1. Odniesienie się do podjętej tematyki badań

Tematyka podjęta przez doktorantkę związana jest z dążeniem różnych ośrodków naukowych w świecie do opracowania technologii otrzymywania materiałów ultra-drobnoziarnistych i nanokrystalicznych metodą skumulowanego - dużego odkształcenia plastycznego (z ang. SPD). Podwaliny pod szersze stosowanie tej metody dały badania Bridgmana prowadzone w latach 30-tych w Uniwersytecie Harvardzkim, zaś stała się ona przedmiotem intensywnych badań od wczesnych lat 80-tych. Analiza publikacji naukowych pokazuje, że metoda ta wywarła bardzo duży wpływ na rozwój dyscypliny Inżynieria Materiałowa. Wskazuje na to liczba najczęściej cytowanych publikacji w najbardziej renomowanych czasopismach naukowych.

Obszar badań podjętych w rozprawie doktorskiej zawężony został do metody DRECE (Dual Rolls Equal Channel). Doktorantka analizuje w trakcie prowadzonych badań wpływ kumulacji odkształcenia plastycznego na zmiany mikrostruktury i właściwości mechaniczne stali DC01 i stali IF i w związku z tym tematyka omawiana w rozprawie doktorskiej mieści się w obszarze badawczym Inżynieria Materiałowa.

2. Analiza i ocena poszczególnych fragmentów pracy

Po krótkim wprowadzeniu oraz spisie zastosowanych oznaczeń, Doktorantka w kolejnym rozdziale przedstawia aktualny stan wiedzy dotyczący obszaru badań będącego przedmiotem rozprawy doktorskiej. Charakteryzuje podstawowe mechanizmy strukturalne towarzyszące skumulowanemu odkształceniu plastycznemu oraz dokonuje przeglądu metod wykorzystujących ten efekt w celu rozdrobnienia struktury metali i stopów. Rozdział ten jest bardzo dobrze napisany i stanowi dobre odniesienie do dalszych badań i analiz Doktorantki. Należy jednak podkreślić, że Doktorantka pominęła w przeglądzie literatury szereg ważnych metod, które podobnie jak metoda DRECE stanowią połączenie procesu walcowania z metodą ECAP. Do metod tych należą: C2S2, DCAP i ECAR (*R.Z. Valiev, T.G. Langdon; Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, Progress in Materials Science 51 (2006) 881-981*). W przeglądzie literatury nie wspomniano również o metodzie RCS (Repeated Corrugation and Straightening) i metodzie wieloosiowego odkształcenia za pomocą jednostki MaxStrain. Ta ostatnia metoda z powodzeniem została zastosowana w Łukasiewicz Instytucie Metalurgii Żelaza do uzyskania ultra-drobnziarnistej struktury stali IF:

H. Petryk, S. Stupkiewicz, R. Kuziak; Grain refinement and strain hardening in IF steel during multi-axis compression: Experiment and modelling, J. Mat. Proc. Techn. Vol. 204, Issues 1-3, 2008, 255-263.

W przeprowadzonej analizie, jak również dalszych badaniach, Doktorantka odniosła się przede wszystkim do kształtowania wysokiej wytrzymałości badanych stali poprzez rozdrobnienie struktury. W mniejszym stopniu skupiła się na analizie wpływu uzyskanej mikrostruktury na ich ciągliwość, a przede wszystkim na ich plastyczność technologiczną w odniesieniu do możliwości wytwarzania końcowych wyrobów metodą obróbki plastycznej na zimno. Należy podkreślić, że stal IF zalicza się do stali ultra-głębokotłocznych. Bardzo wysoka podatność do tłoczenia tej stali (współczynnik Lankforda osiąga wartość 3) jest rezultatem ukształtowania w jej strukturze w procesie technologicznym (ciągłego wyżarzania) uprzywilejowanej tekstury włóknistej typu γ (kierunek $\langle 111 \rangle$ prostopadły do płaszczyzny blachy). W przeglądzie literatury, brakuje tej informacji.

Na podstawie analizy literatury, Doktorantka sformułowała następującą tezę pracy: „podczas kształtowania plastycznego blach ze stali ferrytycznej w procesie DRECE poprzez odpowiedni dobór parametrów odkształcenia, tj. kąta odkształcenia i poprzez obrót blachy 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”.

W związku z tak sformułowaną tezą pracy, Doktorantka zdefiniowała cel pracy, którym było scharakteryzowanie zmian strukturalnych zachodzących w niskowęglowych stalach typu DC01 oraz stali IF w trakcie dużego odkształcenia plastycznego z użyciem niekonwencjonalnej metody DRECE, wskazanie dominującego mechanizmu rozdrobnienia ziarna oraz opracowanie modelowego schematu zmian mikrostruktury towarzyszących postępowi odkształcenia plastycznego.

Doktorantka sformułowała też cel użyteczny, którym było osiągnięcie istotnego wzrostu właściwości wytrzymałościowych na całym przekroju taśmy ze stali niskowęglowej odkształcanej metodą DRECE. W odniesieniu do tezy pracy można sformułować bardzo ważne pyta-

nie w kontekście uzyskanych wyników, mianowicie, co Doktorantka rozumie pod pojęciem istotnego wzrostu wytrzymałości oraz jednorodnego rozkładu właściwości na przekroju blachy. Moim zdaniem tezę i cel pracy sformułowano w sposób bardzo ogólnikowy. Analiza wpływu niekonwencjonalnej metody SPD na strukturę i właściwości ferrytycznej stali niskowęglowych nie precyzuje dokładnie, jaki problem naukowy będzie rozwiązany. Czy Doktorantka, formułując tezę i cel pracy założyła, że zmiany mikrostruktury spowodowane zastosowaniem metody DRECE będą się różnić od opisanych w literaturze technicznej dla innych metod SPD?

W kolejnym rozdziale Doktorantka opisała skrótowo materiał do badań. Stal DC01, jak podaje jest stalą komercyjną w stanie dostawy. Niejasny jest natomiast stan stali IF. Doktorantka podaje, że badana była ona w stanie po walcowaniu na gorąco i wyżarzaniu. Odnosząc się jednak do wyników badań tekstury tego materiału, które przedstawiono w rozdziale 6.4, niemożliwe jest, by była ona poddana procesowi przemysłowemu obejmującemu walcowanie na gorąco blachy cienkiej, walcowanie na zimno z sumarycznym gniotem 70-80% i ciągłe wyżarzanie rekrytalizujące. Parametry procesu przemysłowego są tak dobrane, by w efekcie końcowym, blacha cienka charakteryzowała się bardzo silną teksturą typu γ ($\langle 111 \rangle //$ do kierunku prostopadłego do powierzchni blachy), a słabą teksturą typu α ($\langle 110 \rangle //$ do kierunku walcowania). Dzięki temu, charakteryzuje się ona niezwykle wysoką wartością współczynnika anizotropii normalnej, a małą, zbliżoną do zera, wartością współczynnika anizotropii płaskiej. Jest to bardzo ważne zagadnienie, bowiem stan wyjściowy struktury determinuje jej zachowanie się w procesach obróbki plastycznej.

Zgadając się ze stwierdzeniem, że struktura materiału badań jest, zasadniczo, jednofazowa, należy jednak podkreślić, że bardzo duży wpływ na kształtowanie właściwości mechanicznych stali DC01 i IF mają cząstki drugiej fazy. W przypadku stali DC01 są to cząstki cementytu Fe_3C . Z kolei w stalach IF są to: węgliko-siarczek $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$, węgliki i azotki typu MX, a także fosforek żelaza Fe_2P .

W rozdziale dotyczącym metodyki badań Doktorantka opisała metody badawcze, które zastosowała w celu potwierdzenia postawionej tezy pracy. Obejmowały one:

- symulację numeryczną metodą elementów skończonych;
- metodę DRECE odkształcenia plastycznego;
- badania właściwości mechanicznych;
- badania strukturalne.

Do zastosowanych metod odniosę się szczegółowo w dalszej części recenzji, w odniesieniu do uzyskanych wyników, jednak w tym miejscu, chciałbym się ustosunkować do zastosowanej metodyki obliczeń numerycznych. W tekście pracy nie wytłumaczono, dlaczego obliczenia ograniczono tylko do kąta α w strefie odkształcenia plastycznego wynoszącego 108° i dla porównania kąta 113° oraz do stali DC01 i do jednego przepustu. Badania przeprowadzone z wykorzystaniem podobnych rozwiązań, jak zastosowane w metodzie DRECE, prowadzono z dobrym rezultatem z zastosowaniem mniejszych wartości tego kąta (*H. Utsunomiya, K. Hattusuda, T. Sakai, Y. Saito, Mat. Sci. Eng. A372 (2004), 199*). Wątpliwości budzi też zastosowany model reologii materiału, który opracowano w oparciu o jedną krzywą naprężenie – odkształcenie otrzymaną w statycznej próbie rozciągania. W opisie metodyki nie podano, czy badania wykonano stosując stałą prędkość narzędzia, czy też stałą prędkość odkształcenia, nie podano też choćby średniej wartości prędkości odkształcenia. Zgodnie z metodyką prowadzenia statycznej próby rozciągania, prędkość odkształcenia mieści się w przedziale $10^{-4} \div 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, co nie pokrywa się z prędkościami odkształcenia występującymi w metodzie DRECE. Istot-

nym ograniczeniem zastosowanej do obliczeń numerycznych krzywej naprężenie – odkształcenie jest też zakres odkształcenia zastępczego, który kończy się na wartości odkształcenia wynoszącej 1. Moim zdaniem, zważywszy na dużą wrażliwość badanych materiałów na prędkość odkształcenia, badania należało przeprowadzić z różnymi prędkościami odkształcenia i uwzględnić zależność naprężenia uplastyczniającego od tego parametru. Dodatkowo, mając na uwadze wzrost temperatury materiału spowodowanego odkształceniem plastycznym, w modelu reologicznym należało również uwzględnić wpływ temperatury. Stosowanie dużych odkształceń plastycznych „na zimno” powodować może wzrost temperatury materiału nawet o 50-150°C (a w metodzie KOBO nawet więcej), co ma bardzo duży wpływ na kształtowanie substruktury dyslokacyjnej, i generalnie, na rozkład parametrów odkształcenia w odkształcanym materiale. Bardzo istotną cechą eksperymentu prowadzonego przez Doktorantkę z wykorzystaniem procesu DRECE jest również zmiana drogi odkształcenia plastycznego (obrót o 180°), co wpływa na wartość naprężenia uplastyczniającego w kolejnych przepustach.

Wyniki symulacji numerycznych procesu DRECE stanowią wstęp do prezentacji wyników badań własnych Doktorantki. W pierwszej kolejności analizowane są parametry siłowe i zachowanie się pasma w pierwszym przepuście procesu DRECE. Z analizy tej wynikają istotne ograniczenia metody, jakim jest na przykład fałdowanie blachy. Wynikiem obliczeń są również parametry siłowe procesu, jednak trudno się odnieść do uzyskanych wartości, bowiem nie zostały one zweryfikowane pomiarami. Do tej części badań mam szereg uwag. Po pierwsze, moim zdaniem uwzględnienie trzech elementów na grubości blachy to za mało, by uzyskać dużą dokładność obliczeń. Nie podano przy tym, którego stopnia są to elementy. Dalej, pominięcie generowania ciepła w trakcie odkształcenia plastycznego, to duże uproszczenie. Doktorantka powinna przynajmniej ocenić, o ile nagrzewa się taśma i jaki to ma wpływ na uzyskane wyniki. Wyniki dla etapów procesu, które przedstawiono na rysunku 33, nie są jasne. Moim zdaniem w momencie, gdy początek taśmy wyjdzie z kanału kątownego (etap III), proces powinien się ustabilizować. Dlaczego zatem w etapie IV następuje wzrost momentu obrotowego? Kolejna moja wątpliwość dotyczy stwierdzenia (4-ty wiersz na str. 56): „W początkowej strefie taśmy, która przechodzi przez matryce, wartości odkształceń są mniejsze niż w strefie bezpośrednio położonej przy kanale kątownym. Na taki rozkład odkształceń plastycznych może mieć wpływ spęczanie materiału, które powoduje wzrost grubości taśmy w strefie przed matrycami.” W tym kontekście, przedstawione wyniki symulacji numerycznych są dla mnie niezrozumiałe, gdyż odkształcenie plastyczne musi cały czas rosnąć. Tymczasem z rysunku 37 wynika, że odkształcenie plastyczne zmniejsza się w miarę przesuwania się taśmy, na wejściu do matrycy. Doktorantka szczegółowo analizuje rozkład odkształcenia postaciowego w taśmie. Jego koncentrację w strefie środkowej tłumaczy wpływem tarcia. Nie mam jednak pewności, że po zastosowaniu smarowania, przyjęta w symulacjach wartość współczynnika tarcia na poziomie 0.3 jest poprawna. Na Rys.36 Doktorantka przedstawia obraz siatki koordynacyjnej uzyskany w wyniku symulacji numerycznej procesu DRECE, który pokazuje, że maksymalne odkształcenie postaciowe w tym procesie występuje w środku blachy, zaś najmniejsze przy jego powierzchni. Jednak odnosząc się do wyników obliczeń rozkładu odkształcenia zastępczego, przedstawionych na Rys.34, z którego wynika, że maksymalne wartości odkształcenia zastępczego występują przy powierzchniach blachy, nasuwa się pytanie, jak zinterpretować ten wynik. Prezentację wyników obliczeń numerycznych podsumowuje akapit przedstawiający wyniki obliczeń kryterium pęknięcia według Lathama-Cockcrofta. Niejasne jest jednak, jaki jest cel tych obliczeń, skoro nie analizowano procesu pęknięcia w trakcie realizacji procesu DRECE. Ponadto, opracowanie tego kryterium dla badanego procesu na podstawie wyników próby rozciągania może budzić wątpliwości.

W podsumowaniu badań numerycznych chciałem ponownie podkreślić, że proces doświadczalny realizowano w 7 przepustach, a symulacje MES dotyczą tylko jednego przepustu. W kontekście dalszych badań zabrakło również elementów modelowania zmian struktury. W pracy czytamy, że opracowano modelowe schematy ewolucji struktury (rys. 79 i 80). O takim modelu mówi również wniosek 3. Ale to jest model w sensie pewnej ilustracji zjawisk, a nie model matematyczny pozwalający obliczać parametry mikrostruktury. I na koniec mojej analizy wyników symulacji numerycznych, ogólna uwaga techniczna, mianowicie, na niektórych rysunkach nie są podawane jednostki. Można się domyślać, że naprężenia są w MPa, ale dla naukowej ścisłości jednostki powinny być podane.

W mojej ocenie, najciekawszy obszar badań Doktorantki obejmował badania właściwości mechanicznych i rozwoju struktury w procesie DRECE. Badania właściwości mechanicznych obejmowały statyczną próbę rozciągania oraz pomiar twardości po kolejnych etapach procesu. W statycznej próbie rozciągania wyznaczono granicę plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie całkowite i równomierne. Niestety, nie wyznaczono wskaźników charakteryzujących podatność stali do tłoczenia, takich jak np. współczynnik anizotropii normalnej i płaskiej, czy też wykładnik umocnienia. Generalnie, jak we wszystkich procesach odkształcenia plastycznego na zimno, wzrostowi odkształcenia skumulowanego w strukturze blach towarzyszy wzrost ich wytrzymałości i obniżenie ciągliwości. Przy czym, przede wszystkim, drastycznie maleje wartość odkształcenia równomiernego i to już po pierwszym przepuszczeniu. Pomiarzy wykonane przez Doktorantkę pokazały dużą niejednorodność rozkładu twardości zarówno na przekroju, jak również na długości pasma. Jest to pochodną zróżnicowania rozkładu odkształcenia w taśmie. Trudno jest jednak odnieść się do tych wyników, bo symulację numeryczną procesu DRECE przeprowadzono dla jednego przepustu. Z tego powodu niejasne są również dla mnie przyczyny systematycznego spadku twardości na długości próbki. Nasuwa się pytanie, czy nie należało blachę obracać o 180° , ale względem dwóch prostopadłych osi? Uważam, że wyniki pomiaru twardości powinny być szerzej skomentowane z uwagi na przyjętą tezę pracy, w której podkreślono możliwość uzyskania jednorodnej struktury, a zatem również właściwości blachy, w procesie DRECE.

W rozprawie doktorskiej Doktorantka przedstawiła bardzo obszerne badania struktury blach odkształczanych w procesie DRECE. Na wstępie opisano wyniki badań przeprowadzonych za pomocą mikroskopu świetlnego. Przedstawione obrazy struktury po wybranych przepustach pokazują brak wyraźnego wpływu odkształcenia plastycznego na kształt ziaren ferrytu. Uważam jednak, że badany obszar, tj. płaszczyzna równoległa do powierzchni blachy (Rys.29) został wybrany niefortunnie. Badania powinny być prowadzone w dwu płaszczyznach prostopadłych do siebie. W blachach ze stali DC01 i IF, walcowanych konwencjonalnie na zimno z gniosem 70-80%, ziarna ferrytu są silnie wydłużone, z widocznymi pasmami zlokalizowanego odkształcenia plastycznego.

Należy również podkreślić, że stal DC01, z uwagi na zawartość węgla, zawiera w strukturze cząstki cementytu lub nawet wyspy perlitu, co na pewno wpływa na zmiany zachodzące w jej strukturze w procesie odkształcenia plastycznego na zimno.

Bardzo interesującym i zarazem efektywnym obszarem badań Doktorantki były badania zmian zachodzących w strukturze odkształczanych blach z wykorzystaniem metody EBSD. Wstępne wyniki przedstawione na rys.58 – rys.61 dla stali DC01 odkształcanej z zastosowaniem kąta α w strefie odkształcenia plastycznego wynoszącego 108° , wskazują na typowy dla metod SPD przebieg ewolucji mikrostruktury w tej stali, w zależności od wartości skumulowanego odkształcenia plastycznego. Mianowicie, ze wzrostem odkształcenia rośnie w strukturze udział granic dyslokacyjnych małego kąta, a maleje udział granic wysokiego kąta. Z po-

miarów wynika również, że maleje średnia średnica równoważna ziarna, jednak nie jest wiadomo czy uwzględniono w nich tylko ziarna o granicy wysokokątowej czy też wszystkie ziarna. W ocenie wyników badań metodą EBSD bardzo ważnym zagadnieniem jest zdefiniowanie pojęcia ziarna w oparciu o wartość kąta dezorientacji, a ponadto podanie dwóch parametrów, mianowicie, „Grain Tolerance Angle” i „Minimum Grain Size”.

Doktorantka, metodą transmisyjnej mikroskopii elektronowej, bardzo dokładnie scharakteryzowała ewolucję struktury dyslokacyjnej w kolejnych przepustach. Pokazała, że kumulacja odkształcenia plastycznego, w efekcie końcowym, prowadzi do powstania tzw. „gęstych ścianek dyslokacyjnych” o charakterze niskokątowym oraz wysokokątowym. Formowanie tych ścianek stanowi początkowy etap tworzenia się nowych ziaren – wolnych od dyslokacji. Podobnie jak w pozostałych metodach SPB, bardzo duże znaczenie w formowaniu się końcowej mikrostruktury ma stosowanie zmian drogi odkształcenia plastycznego, co powoduje przecinanie się pasm ścinania i w efekcie przyczynia się do powstawania nowych ziaren. Wspomniane procesy w metodzie DRECE są bardziej efektywne dla kąta α wynoszącego 108° w porównaniu z eksperymentem, w którym kąt α wynosił 113° . Doktorantka wykazała, że jakościowy charakter zmian struktury stali IF po kolejnych przepustach w procesie DRECE jest zbliżony do opisanego dla stali DC01.

W mojej opinii, bardzo ważnym i niedocenionym przez Doktorantkę obszarem badań były badania zmian tekstury blach w kolejnych etapach procesu DRECE. Blacha ze stali DC01 charakteryzowała się występowaniem silnej tekstury włóknistej typu γ . Kolejne przepusty zastosowane w procesie DRECE spowodowały osłabienie składowych tej tekstury. Zarówno zmiany charakteru tekstury, jak i struktury dyslokacyjnej zależą od wartości kąta α . Jak już podkreślono, w przypadku blachy ze stali IF w stanie wyjściowym, nie zaobserwowano silnej tekstury włóknistej typu γ . Dzięki tej teksturze, blachy IF charakteryzują się bardzo wysoką wartością współczynnika anizotropii płaskiej, co zapewnia im bardzo dużą podatność do tłoczenia. Istnieje ścisła zależność między teksturą typu γ a współczynnikiem anizotropii normalnej, którą wyraża następujący wzór:

$$r = 1.5 + 0.27 \frac{(I/I_0)_{\{111\}}}{(I/I_0)_{\{001\}}}$$

gdzie $(I/I_0)_{\{111\}}$ i $(I/I_0)_{\{001\}}$ są względnymi natężeniami linii dyfrakcyjnych od płaszczyzn $\{111\}$ i $\{001\}$.

W podsumowaniu badań własnych Doktorantka na początku przypomniała cele prowadzonych badań. Pierwszym celem było zbadanie wpływu kąta α w strefie odkształcenia na ewolucję struktury i właściwości mechaniczne blach w procesie DRECE. Jednak badania ograniczono do dwóch wartości tego kąta (108 i 113°). Podstawowym materiałem badań była blacha ze stali DC01. W pracy przedstawiono symulacje komputerowe tylko jednego przepustu dla tego materiału z zastosowaniem obu wartości kątów α . Doktorantka, odnosząc się do Rys.34, stwierdza, że wartość odkształcenia zastępczego w pierwszym przepuszczeniu mieści się w przedziale $0.5-1.05$, jednak w opisie tego rysunku podano wartości z przedziału $0.55 \div 0.87$. Uzyskany w obliczeniach numerycznych rozkład odkształcenia na długości i grubości pasma po pierwszym przepuszczeniu jest niejednorodny. Doktorantka założyła, że w celu wyeliminowania tej niekorzystnej cechy analizowanego procesu, blachę w kolejnych przepustach należy obracać o kąt 180° . Nie przedstawiła jednak wyników symulacji dla całego procesu. Mając na uwadze uzyskane wyniki, wydaje się, że korzystniej byłoby obracać taśmę dwukrotnie wokół prostopadłych osi. Doktorantka przyznaje, że w porównaniu do innych metod oddziaływania na strukturę materiału z wykorzystaniem dużego-skumulowanego odkształcenia plastycznego, możliwości metody DRECE są ograniczone. Stosowanie tej metody uza-

sadnia w kontekście możliwości uzyskiwania korzystnej proporcji między wytrzymałością a ciągliwością stali. Jednak to spostrzeżenie odnosi się do wszystkich metod wykorzystujących wpływ dużych skumulowanych odkształceń plastycznych na rozwój struktury. Co prawda, Doktorantka podkreśla, że po końcowych przepustach otrzymywała małe zróżnicowanie twardości na przekroju i długości blachy, jednak jak stwierdza, dla uzyskania korzystnej relacji między wytrzymałością a ciągliwością blachy, liczba przepustów musi być ograniczona, a wtedy rozkład twardości na przekroju i długości blachy jest niejednorodny. W dalszej części podsumowania Doktorantka analizuje zmiany zachodzące w strukturze blachy w procesie DRECE. Szczególną uwagę zwraca na proces rozdrobnienia struktury. Trzeba jednak podkreślić, że z przeprowadzonych badań wynika, że stopień rozdrobnienia struktury (mając na myśli jej średni stan – wyznaczony w badaniach EBSD), oceniany na podstawie wielkości ziarna, nie jest duży dla tej metody. Nasuwa się zatem pytanie, jaki jest wkład rozdrobnienia struktury, a jaki wzrostu gęstości dyslokacji, w umocnienie badanych stali w procesie DRECE.

3. Uwagi dyskusyjne

Niezależnie od moich wątpliwości i uwag dotyczących różnych fragmentów pracy, proszę Doktorantkę o ustosunkowanie się do następujących ogólnych zagadnień związanych z tematyką pracy doktorskiej:

1. Jak już wspomniałem stale IF były przedmiotem badań z wykorzystaniem metod SPD, przede wszystkim metody ARB. Proszę o porównanie uzyskanych wyników z zastosowaniem tej metody oraz konwencjonalnego walcowania stali IF z metodą DRECE, którą zastosowała Doktorantka w swoich badaniach. Która z tych metod, zdaniem Doktorantki, daje lepsze wyniki w kontekście przyjętego celu pracy?
2. W pracy nie analizowano wpływu początkowej struktury blach (np. wielkości ziarna), na ewolucję mikrostruktury blach w procesie DRECE. Czy zdaniem Doktorantki wpływ ten jest duży?
3. Proszę o interpretację wyników badań struktury blach z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej, które nie pokazały zauważalnych zmian kształtu początkowo niemal równoosiowych ziaren w kolejnych etapach procesu DRECE. Czy taka sytuacja jest możliwa? Czy mając na uwadze rolę generowania pasm ścinania, przyjęty wariant procesu z obrotem o 180° jest optymalny.
4. Blachy ze stali HSLA, walcowane termomechanicznie, osiągają wyższą wytrzymałość i ciągliwość od blach odkształcanych w procesie DRECE. Jakie potencjalne zastosowania widzi zatem Doktorantka dla blach obrabianych z wykorzystaniem tego procesu. Czy będą wykazywały one wystarczającą plastyczność, by mogły być kształtowane w procesach obróbki plastycznej na zimno?

5. Ocena końcowa pracy

Oceniana praca, mimo uwag krytycznych i dyskusyjnych, ma duże walory naukowe i poznawcze oraz świadczy o bogatym warsztacie badawczym, a także o dużym potencjale Doktorantki do samodzielnego prowadzenia badań. Na szczególne podkreślenie zasługuje wysoki poziom badań, które Doktorantka przeprowadziła za pomocą transmisyjnej i skaningowej mikroskopii elektronowej z udziałem metody EBSD. W podsumowaniu uważam, że spełnia ona kryteria Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym z dn. 14 marca 2003 r. i dlatego wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

