

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Sylwii PRZYBYSZ

pt. „Analiza anizotropii właściwości mechanicznych stopu miedzi CuCrZr oraz stopu aluminium 6060 po procesie wyciskania hydrostatycznego”

(opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej, na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej z dnia 6 marca 2020 r.)

Informacje ogólne

Recenzowana praca realizowana była pod opieką naukową prof. dr hab. inż. Jarosława MIZERY oraz dr inż. Mariusza KULCZYKA w roli promotora pomocniczego, z wykorzystaniem wyników badań procesu technologicznego wyciskania hydrostatycznego realizowanego w laboratorium Plastyczności pod Wysokim Ciśnieniem, Instytutu Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk.

Objętość rozprawy doktorskiej wydawnictwa Politechniki Warszawskiej (Wydział Inżynierii Materiałowej), obejmuje 122 str. maszynopisu C5 z podziałem na dwie części: *Analiza stanu zagadnienia* (cz. I) i *Badania własne* (cz. II), w których zawarto 10 rozdziałów głównych, 21 podrozdziałów, wnioski i bibliografię, gdzie umieszczono 89 rysunków oraz 10 tabel prezentujących dane literaturowe i wyniki badań własnych wraz ze spisem 130 dobrze dobranych i aktualnych pozycji literaturowych (w tym 6 z analizą osiągnięć naukowych Doktorantki). Praca napisana jest poprawnym językiem technicznym z wykorzystaniem właściwej terminologii oraz cechuje się przejrzystym układem zagadnień analizowanych typowo dla rozpraw doktorskich. Analizowane zagadnienia zawarte są w przeglądzie literatury z genezą stanowiącą uzasadnienie przyjętej koncepcji badań eksperymentalnych w oparciu o założony cel pracy, według określonego algorytmu badań własnych z opisem materiału badawczego (stopów *miedzi CuCrZr* i *aluminium AA6060*), zastosowanej technologii wyciskania hydrostatycznego (*HE*) i przy użyciu wysoko zaawansowanych metodyk badawczych, jak m.in. SEM/EBSD, TEM, XRD oraz właściwości mechanicznych statycznych i dynamicznych – odpowiednio w próbie statycznego rozciągania i udarności.

Rozprawa poprzedzona jest syntetycznym streszczeniem stanowiącym uzasadnienie podjętej tematyki badań w aspekcie anizotropii struktury i właściwości mechanicznych dwóch różnych stopów technicznych (AA6060 i CuCrZr), z perspektywą ich użytkowego wykorzystania w zastosowaniach przemysłowych po procesie technologicznym wyciskania hydrostatycznego (*HE*), przy trzech różnych stanach odkształcenia rzeczywistego ε , odpowiednio: 1,23; 1,57 i 2,28 – na tle scharakteryzowanych innych metod dużych odkształceń plastycznych (*SPD*) – dla uzyskania drobnokrystalicznej struktury o istotnie wysokich właściwościach mechanicznych.

W aspekcie edycyjnym rozprawy, należy odnotować nieliczne błędy w składni zdań, gubienie liter i znaków interpunkcji, które przekazałem Doktorantce w opiniowanym przeze mnie egzemplarzu rozprawy; jednak ich udział, generalnie nie wpływa negatywnie na całościowy odbiór pracy o istotnie wysokim poziomie merytorycznym.

Recenzję opracowano z uwzględnieniem kryteriów określonych w: Ustawie z dn. 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595 wraz z późniejszymi zmianami; Dz.U. 2017 poz. 1789) oraz Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668 wraz z późniejszymi zmianami) i Uchwale Senatu PW nr 392/XLIX/2019 z dnia 18/09/2019 w sprawie sposobu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

1. Ocena rozprawy doktorskiej

Tematyka badawcza i charakterystyka treści rozprawy połączona z jej krytyczną oceną

Omawiane w rozprawie zagadnienia stanowią obszar aktualnej i bardzo ważnej dla zastosowań przemysłowych problematyki anizotropii struktury i właściwości mechanicznych stopów technicznych na podstawie aluminium AA6060 i miedzi CuCrZr o nano i ultradroboziarnistej strukturze, uzyskiwanej metodami dużych odkształceń plastycznych (*SPD*), co determinuje poprawę ich właściwości użytkowych i potencjalne zastosowanie w sektorze motoryzacyjnym (automotive). Analizę anizotropii mikrostruktury i jej właściwości mechanicznych, realizowano po procesie wyciskania hydrostatycznego (*HE*), przy trzech różnych stanach odkształcenia rzeczywistego $\varepsilon=1,23$; 1,57 i 2,28, dla pozyskania drobnoziarnistej mikrostruktury i wysokich właściwości mechanicznych kształtowanych w różnej temperaturze wytwarzanej samoistnie in-situ pod wysokim ciśnieniem w procesie *HE*.

W istocie dowiedziono, że relatywnie nieduża zmiana wartości temperatury, ma znaczący wpływ na aktywowane cieplnie procesy rozdrobnienia i morfologię ziaren, tekstury krystalograficznej, umocnienia struktury, jej wytrzymałości mechanicznej i odporności na pękanie w próbie udarności i zrywania dynamicznego.

W przeglądzie literatury Doktorantka podjęła próbę kompleksowej oceny stanu zagadnienia w zakresie zastosowania i rozwoju technologii dużych odkształceń plastycznych (*SPD*) w procesach: przeciskania przez kanał kątowy (*ECAP*), skręcania pod wysokim ciśnieniem (*HTP*), cyklicznego walcownia materiałów wielowarstwowych (*ARB*), cyklicznego wyciskania ściskającego (*CEC*) i wyciskania hydrostatycznego (*HE*) – wraz z analizą transformacji mikrostruktury i anizotropii wybranych właściwości użytkowych materiałów konstrukcyjnych oraz przykładami ich zastosowania po dużym odkształceniu plastycznym (*SPD*).

W analizie zagadnienia scharakteryzowano też znaczenie i istotę kształtowania struktur nanokrystalicznych, zarówno materiałów litych (*bulk materials*) i proszków (wg koncepcji *top-down* z zastosowaniem wspomnianych wyżej technologii *SPD* oraz metod *nanolitografii* i *mechanicznej syntezy* {*MA*}), jak i materiałów w formie powłok ochronnych wytwarzanych metodami *PVD* i *CVD* – wg koncepcji (*bottom-up*), do której zaliczono też metodę *elektrodepozycji* kształtowania warstwy wierzchniej (*WW*) o nanostrukturalnej budowie.

Przedstawione uwarunkowania właściwości technologiczno-materiałowych z przykładami ich utylitarnego wykorzystania, oparto na przeglądzie 101 aktualnych, wysoko punktowanych i cytowanych pozycji literaturowych z bazy JCR.

Dużą uwagę poświęcono symultanicznie: procesom przebudowy mikrostruktury z analizą ruchu dyslokacji, wzrostu ich gęstości oraz zmiany dezorientacji granic ziaren w ściśle określonych warunkach technologicznych *SPD* (po przekroczeniu krytycznej wartości odkształcenia plastycznego, aktywowanego cieplnie wskutek podgrzewania lub in-situ pod wysokim ciśnieniem procesów *SPD*) – z analizą mechanizmów kształtowania nanokrystalicznej i ultra-drobnoziarnistej struktury ziaren poprzez zdrowienie

dynamiczne i/ lub rekrytalizację oraz analizą mechanizmów jej umocnienia – ze szczególnym uwzględnieniem zależności Halla-Petcha.

Szczególną analizą objęto uwarunkowania anizotropii mikrostruktury i właściwości mechanicznych stali austenitycznej 316L oraz innych stopów technicznych na osnowie aluminium, miedzi i tytanu – generowanej w warunkach dużych odkształceń plastycznych, przy ściśle sprecyzowanych złożonych stanach naprężeń dla poszczególnych procesów technologicznych SPD, gdzie uwzględniono przy tym najnowsze dane literaturowe w zakresie analizy tekstury krystalograficznej i morfologicznej (z uprzywilejowanym rozmieszczeniem obcych faz) i jej wpływu na sposób pęknięcia materiałów w statycznych próbach wytrzymałościowych i przy obciążeniach dynamicznych w badaniach udarności.

Opisywane w rozprawie uwarunkowania anizotropii w procesach technologicznych SPD ujawniły wymagającą wyjaśnienia przez Autorkę monografii wątpliwość odnośnie *izotropii materiału*, gdzie przedstawiając problem anizotropii właściwości mechanicznych po procesach SPD, Doktorantka powołując się na literaturę [61] wykazuje bezkrytycznie, że cyt. „... po procesach SPD materiał może wykazywać *izotropowość właściwości mechanicznych, np. mikrotwardości, która może posiadać różne wartości w różnych kierunkach badania, w zależności od mikrostruktury – rozdz. 4 (str. 29)*”. Ponadto, nieuzasadnione jest stosowanie w monografii wydanej w języku polskim, opisu osi wykresów, legend, oznaczeń i wyjaśnień – w języku angielskim (zaniedbując też przy tym w ogóle oznaczenia niektórych osi lub symboli, a zeskanowane wykresy są mało czytelne – dotyczy to rysunków 12, 15, 19-21 i 24 w cz. I monografii pt. „Analiza stanu zagadnienia” oraz rys. 84 str. 104).

Wyjaśnienia wymaga też, odnoszące się do patentu [99] bezkrytyczne stwierdzenie, że „*dla stopów brązu wytwarzanych na sprężyny w stanie walcowanym na zimno lub wyżarzonym, dzięki prawidłowej obróbce moduł sprężystości można zwiększyć o ok. 20% w kierunku poprzecznym do kierunku walcowania arkusza*” – rozdz. 5 (str. 39). Jest to o tyle istotne, że moduł sprężystości wzdłużnej $E = \delta/\epsilon$ (Younga) w zakresie liniowo-sprężystym, charakteryzujący intensywność zwiększenia naprężenia δ w celu zapewnienia wzrostu odkształcenia względnego ϵ – jest wartością stałą dla danego rodzaju materiału i zależy bezpośrednio od oddziaływań międzyatomowych (tj. charakteru wiązań międzyatomowych oraz typu struktury krystalicznej), natomiast praktycznie nie zależy (lub bardzo słabo) od struktury, czyli także zabiegów technologicznych.

W części II monografii dotyczącej „*Badań własnych*”, Doktorantka koncentruje się na obszernej analizie wyników badań własnych dwóch stopów niezłączalnych na osnowie: aluminium AA 6060 i miedzi CuCrZr – zarówno w stanie wyjściowym i po procesie wyciskania hydrostatycznego HE pod wysokim ciśnieniem w temperaturze pokojowej, ze smarowaniem matrycy i intensywnym chłodzeniem wodą otrzymanego produktu na wyjściu z matrycy, celem zminimalizowania efektu grzania adiabatycznego występującego in-situ w procesie HE podczas dużych deformacji plastycznych, z kontrolowanym odkształceniem rzeczywistym, odpowiednio $\epsilon = (1,23; 1,57 \text{ oraz } 2,28)$ – jednakowo dla obydwu badanych materiałów, stosownie do zadanego ciśnienia medium roboczego.

Charakteryzując dwa różne materiały badawcze, z ukierunkowaniem poprawy ich właściwości strukturalnych i mechanicznych po przeprowadzonym procesie obróbki plastycznej wyciskania hydrostatycznego, Autorka wskazuje na potencjalne obszary ich zastosowania przemysłowego, podkreślając – zgodnie z założonym celem pracy – bardzo istotną rolę anizotropii właściwości strukturalnych i mechanicznych po procesie HE, analizowanej w badaniach strukturalnych, tekstury krystalograficznej i morfologicznej ziaren oraz badaniach wytrzymałości mechanicznej, udarności i mikrotwardości – co bez wątpienia stanowi istotne osiągnięcie naukowe opiniowanej pracy.

W następstwie przeprowadzonego procesu wyciskania hydrostatycznego (HE) stopów na osnowie aluminium AA6060 i miedzi CuCrZr oraz przeprowadzonej analizy wyników badań strukturalnych i

wytrzymałościowych – z zastosowaniem zaawansowanych metodyk badawczych (SEM/EBSD, TEM, XRD) – określono mechanizmy formowania struktury badanych stopów w warunkach procesu (*HE*), przy określonym stanie rzeczywistego odkształcenia plastycznego, odpowiednio $\varepsilon = (1,23; 1,57 \text{ i } 2,28)$.

W aspekcie rozpatrywanych zagadnień materiałowo-technologicznych i właściwości mechanicznych odkształcanych plastycznie stopów AA 6060 i CuCrZr, **istotne osiągnięcie stanowi** określenie właściwości termodynamicznych zachodzących in-situ w procesie wyciskania hydrostatycznego (*HE*) i towarzyszących mu mechanizmów kształtowania struktury i formowania tekstury, potwierdzonych w badaniach strukturalnych SEM / EBSD, TEM, XRD oraz statycznego rozciągania i udarności – z uwzględnieniem właściwości termofizycznych badanego materiału i stanu jego obciążenia przy wyznaczonej temperaturze homologicznej.

W ten sposób, sterując parametrami procesu (*HE*) określono warunki temperatury dla stopów aluminium AA 6060 i miedzi CuCrZr, wytworzonej samoistnie in-situ w procesie wyciskania hydrostatycznego (*HE*), wskazując na możliwość zmian umocnienia struktury i jej właściwości mechanicznych – szczególnie dla stopu AA6060 przy wysokim ciśnieniu procesu *HE*, nawet przy intensywnym chłodzeniu wodą odkształcanego plastycznie elementu na wyjściu z matrycy.

W połączeniu z zaprezentowanymi przez Doktorantkę wynikami badań przemian strukturalnych i właściwości mechanicznych stopów AA 6060 i CuCrZr, zachodzących w określonych warunkach procesu *HE* i analizą towarzyszących im mechanizmów zdrowienia dynamicznego i rekrytalizacji oraz formowania tekstury krystalograficznej i morfologicznej rozdrobnionych ziaren oraz tekstury właściwości mechanicznych – w zależności od kierunku odkształcenia plastycznego, stanowi to bardzo cenne informacje w aspekcie wysokociśnieniowego procesu wyciskania hydrostatycznego i utylitarne wykorzystania badanych stopów aluminium AA6060 i miedzi CuCrZr po procesie *HE*, czego Doktorantka nie wyeksponowała należycie we wnioskach swojej pracy doktorskiej.

Pomimo braku takiego wniosku w opiniowanej pracy, w konsekwencji **Doktorantka udowodniła**, że anizotropia właściwości mechanicznych – istotna z punktu widzenia bazowych właściwości użytkowych badanych stopów technicznych AA6060 i CuCrZr, może być po części sterowana odpowiednim doбором stopnia odkształcenia rzeczywistego ε w procesie *HE*, z efektem określonych zmian strukturalnych wg mechanizmu zdrowienia dynamicznego i/ lub rekrytalizacji (potwierdzonych w dobrze udokumentowanych i niepodważalnych wynikach badań strukturalnych SEM/EBSD, TEM, XRD oraz właściwości mechanicznych).

W następstwie, mechanizmy te skutkują tworzeniem się zróżnicowanej struktury o różnej wielkości zdefektowanych i silnie rozdrobnionych ziaren z udziałem dyslokacji zidentyfikowanych w badaniach TEM, oraz przy różnym kącie dezorientacji granic ziaren analizowanych w badaniach SEM/ EBSD, jak również tekstury krystalograficznej zobrazowanej za pomocą figur biegunowych w badaniach XRD.

Przewidywalnie, właściwości te determinowały z kolei stopień umocnienia struktury badanych stopów AA6060 oraz CuCrZr, ich wytrzymałość mechaniczną i odporność na pękanie (analizowane w badaniach statycznego rozciągania oraz udarności i zrywania dynamicznego) – zależnie od zastosowanego stopnia odkształcenia ε w procesie *HE*.

W rezultacie przeprowadzonych analiz wykazano m.in., że:

- w zastosowanych warunkach procesu *HE* przy zmiennym stopniu odkształcenia stopów AA6060 oraz CuCrZr można uzyskać ultradrobnoziarnistą strukturę o wielkości ziaren, odpowiednio: ok. 290 nm przy najwyższym stopniu odkształcenia $\varepsilon = 2,28$ (dla stopu AA6060) i ok. 140 nm przy najniższym $\varepsilon = 1,28$ (dla stopu CuCrZr);

- proces *HE* generuje silną anizotropię struktury geometrycznej ziaren o zróżnicowanej morfologii względem kierunku odkształcenia plastycznego, wpływającą istotnie na właściwości mechaniczne

badanych stopów AA6060 i CuCrZr w warunkach obciążeń statycznych jak i dynamicznych – z efektem znacznej poprawy wytrzymałości materiałów i wzrostu udarności w kierunku równoległym do kierunku wyciskania. Wymiernie wzrost ten wynosi ok. 50% i 165%, odpowiednio dla parametrów R_m i $R_{0,2}$ przy $\varepsilon = 1,57$ (dla stopu AA 6060) i o 90% dla R_m i 370% dla $R_{0,2}$ przy $\varepsilon = 2,28$ (dla stopu CuCrZr) – w stosunku do materiałów w stanie wyjściowym (przed procesem *HE*);

- dynamiczne obciążenia udarowe w kierunku prostopadłym do kierunku *HE*, powodują istotny spadek udarności obu badanych stopów w stosunku do materiału w stanie wyjściowym, przy czym przy największym stopniu odkształcenia $\varepsilon = 2,28$ z najwyższą temperaturą homologiczną materiału, w której stwierdzono mechanizmy zarówno zdrowienia dynamicznego jak i rekrytalizacji, spadek udarności w stopie aluminium AA 6060 był najmniejszy;

- potwierdzona w badaniach XRD i EBSD tekstura krystalograficzna badanych stopów AA6060 i CuCrZr po procesie *HE*, nie ma istotnego wpływu na anizotropię właściwości mechanicznych;

- przy znacznie wyższym ciśnieniu wyciskania stopu CuCrZr w całym zakresie zastosowanych odkształceń ε (w stosunku do stopu AA 6060), uzyskał on 50% wzrost twardości w porównaniu do materiału CuCrZr przed procesem *HE* w stanie przesyconym, a dominującą rolę w stopniu umocnienia materiału odgrywa stopień odkształcenia postaciowego ultradrobnociarnistej struktury aktywowanej cieplnie in-situ w procesie hydroekstruzji z analizowaną w pracy temperaturą homologiczną T_h , gdzie przy wzroście do ok. $0,6T_h$ następuje spadek efektu umocnienia wywołanego pracą odkształcenia plastycznego. W efekcie przeprowadzonych badań twardości struktury badanych stopów AA 6060 i CuCrZr po procesie *HE* w dwóch różnych kierunkach w stosunku do kierunku odkształcenia plastycznego, stwierdzono, że niezależnie od stopnia odkształcenia tekstura twardości nie występuje lub jest na tyle znikoma w przypadku stopu CuCrZr przy jego 50% umocnieniu, że nie ma ona istotnego znaczenia w aspekcie użytkowego wykorzystania tego stopu na elektrody do zgrzewania punktowego stosowane w branży automotive;

Przedstawione powyżej najważniejsze uwarunkowania anizotropii właściwości mechanicznych stopu miedzi CuCrZr oraz stopu aluminium AA6060 po procesie wyciskania hydrostatycznego przy określonym stopniu odkształcenia rzeczywistego $\varepsilon = 1,23; 1,57$ i $2,28$ – w korelacji z analizą wyników badań strukturalnych SEM/EBSD, TEM oraz XRD, stanowią merytoryczny trzon osiągnięć naukowych opiniowanej rozprawy, z pełnym potwierdzeniem określonego celu badań własnych.

Jakkolwiek, systematyka i kwestie interpretacyjne opisywanych w rozprawie uwarunkowań metodologicznych oraz analiza wyników badań materiałowych stopu AA6060, ujawniają też stosunkowo liczne i wymagające wyjaśnień wątpliwości, przedstawione poniżej. Dotyczy to głównie:

- opisu wyznaczenia współczynnika kształtu (α) określonego w pracy jako wydłużenie ziaren (str. 47) lub wydłużenie kształtu ziaren (str. 55 i str. 88 – rys. 68), z mało precyzyjną interpretacją graficzną przedstawioną na rys. 29 (str. 48);

- wymiaru $d=M12$ mm w próbkach dla statycznych badań rozciągania (rys. 30 na str. 49);

- doprecyzowania informacji odnośnie użytego promieniowania Cr $K\alpha$ o długości fali $\lambda=0,229$ nm, przy zastosowaniu w badaniach XRD katody Cu $K\alpha_1$, $\lambda=1,54$ Å [108] z wiązką punktową o średnicy 1,5 mm (podrozdział 8.8, str. 53);

- nieprecyzyjnej interpretacji analizy wyników badań EBSD stopów AA 6060 i CuCrZr w stanie wyjściowym przed procesem *HE*, gdzie w opisie rys. 33c na str. 54 (powtórzonym na str. 75 – rys. 55) oraz rys. 59 na str. 78 (powtórzonym na str. 98 – rys. 79) – pominięto, że są to mapy odwrotnych figur biegunowych (IPF) odzwierciedlające orientację krystalograficzną ziaren (bez obrazu FSE i trójkąta podstawowego projekcji stereologicznej kryształu oraz bez map granic ziaren o określonym kącie dezorientacji i braku ich analizy ilościowej – interpretowanych błędnie w opisie wyników kolorami orientacji krystalograficznej ziaren w przypadku stopu AA 6060). Brak map rozkładu granic ziaren i

wyników analizy ilościowej granic ziaren o określonym kącie dezorientacji, występuje również przy analizie wyników EBSD dla stopu AA 6060 w stanie po procesie *HE* przy trzech różnych stopniach odkształcenia rzeczywistego ε . Należy przy tym jednocześnie wyraźnie podkreślić, iż jak najbardziej poprawnie udokumentowano zmiany kształtowania się tekstury krystalograficznej przy różnych stanach rzeczywistego odkształcenia plastycznego ε – z pełną dokumentacją figur biegunowych i trójkątów podstawowych projekcji stereologicznej (zarówno w przypadku stopu AA 6060 jak i CuCrZr);

- błędnej analizy rysunku 36 (str. 56) z wynikami badań widma dyfrakcyjnego XRD stopu AA6060 w stanie wyjściowym, gdzie na podstawie zidentyfikowanych faz strukturalnych Doktorantka wykazuje udział ilościowy pierwiastków stopowych Al, Fe, Si i Mg (bez prezentacji uzyskanych wyników badań) – zapewne dlatego, iż można je uzyskać w badaniach SEM/ EDS;

- stosowania różnych jednostek w (K i °C) dla tych samych wartości temperatury analizowanej przy procesie zdrowienia dynamicznego stopu AA 6060, aktywowanym cieplnie in-situ w warunkach wyciskania hydrostatycznego (tekst i tabela 5 na str. 58), gdzie dodatkowo wartość temperatury określono w stopniach Kelwina;

- interpretacji pojęcia „nieuporządkowanych dyslokacji” użytego, przy analizie silnie zdefektowanej mikrostruktury stopu AA 6060 po procesie *HE* (str. 60);

- opisanie mechanizmu powodującego, że efekt cieplny grzania adiabaticznego niwelujący skutki umocnienia w procesie *HE*, przeciwdziała rozdrobnieniu struktury, wskutek czego stwierdzono brak występowania znaczących różnic w wielkości ziaren stopu AA 6060 – niezależnie od stopnia odkształcenia ε (str. 56);

- błędnej terminologii „zrywania statycznego”, użytej przy analizie wyników badań właściwości mechanicznych stopu AA 6060 po statycznej próbie rozciągania (str. 65), gdzie na rys. 45 (str. 66) błędnie oznaczono też symbolem ε_f wydłużenie względne, które zgodnie z obowiązującymi normatywami stanowi wyrażony w procentach stosunek trwałego wydłużenia bezwzględnego $\Delta L = L_u - L_o$ do początkowej długości pomiarowej próbki L_o i oznaczane jest symbolem $A = \Delta L / L_o = (L_u - L_o) / L_o \cdot 100\%$. W analizie tego samego zagadnienia dla stopu CuCrZr, symbol ε_f stanowi już odkształcenie rzeczywiste (rys. 70, str. 90);

- błędnej notacji na str. 94 (dla metalograficznych obrazów makroskopowych przełomów próbek stopu CuCrZr po badaniach udarności metodą Charpy’ego i zrywaniu dynamicznym – odpowiednio rys. 74 i 75), że uzyskane wyniki wykonano w badaniach SEM.

Należy jednak przy tym wyraźnie zaznaczyć, iż zaprezentowane wyniki badań strukturalnych SEM/EBSD, TEM oraz XRD stopów CuCrZr i AA6060 w stanie wyjściowym i po procesie *HE*, stanowią bez wątpienia bardzo dużą wartość poznawczą i warunkują możliwość wyciągnięcia konstruktywnych wniosków w zakresie anizotropii właściwości mechanicznych stopu miedzi CuCrZr oraz stopu aluminium AA6060 po procesie wyciskania hydrostatycznego przy określonym stopniu odkształcenia $\varepsilon = 1,23; 1,57$ i $2,28$.

Analiza opiniowanej rozprawy pozwala stwierdzić, że przedstawione w niej obszernie wyniki badań własnych Pani mgr inż. Sylwii PRZYBYSZ stanowią podstawę do wyciągnięcia konstruktywnych wniosków w zakresie nauk podstawowych, jak i utylitarne wykorzystania stopów nieżelaznych CuCrZr i AA6060 po procesie technologicznym hydroekstruzji.

Jednocześnie, omawiane mechanizmy przemian strukturalnych aktywowanych cieplnie in-situ pod wysokim ciśnieniem i towarzyszące im kształtowanie tekstury strukturalnej i anizotropii właściwości mechanicznych, są trudne do rozpoznania i poprawnej interpretacji w zakresie ich oddziaływania na budowę i właściwości odkształconych plastycznie materiałów.

Stąd też, w podsumowaniu oceny merytorycznej rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Sylwii PRZYBYSZ można stwierdzić, że realizując założony cel pracy z użyciem zaawansowanych metodyk badawczych, w zupełności dowiodła Ona określone właściwości użytkowe badanych stopów technicznych, a przeprowadzona analiza wyników badań stanowi oryginalne i bardzo wartościowe opracowanie z istotnie dużym potencjałem wiedzy materiałowo-technologicznej w zakresie anizotropii właściwości mechanicznych stopu miedzi CuCrZr oraz stopu aluminium 6060 po procesie wyciskania hydrostatycznego.

Pomimo z reguły zawsze nieuniknionych uwag o charakterze merytorycznym oraz redakcyjnym w pracach doktorskich, należy mieć na uwadze, że stanowią one jedynie sugestie dla dalszego kształtowania warsztatu naukowo-badawczego Doktorantki, która w mojej opinii wykazała bardzo dobrą umiejętność planowania eksperymentu w oparciu o dobrą znajomość zaawansowanych metodyk badawczych, których wyniki poddane zostały dojrzałej, krytycznej analizie z poprawnym wyciągnięciem wniosków końcowych.

Wysoko oceniam też dorobek naukowo-badawczy Pani mgr inż. Sylwii PRZYBYSZ, z dużą aktywnością prezentowania swoich wyników badań w 19 publikacjach w czasopiśmie krajowych i zagranicznych .

Poza publikacjami, Doktorantka jest też współautorką złożonego w 2018 roku patentu, "Sposób obróbki powierzchni oraz implant wytworzony z wykorzystaniem obróbki powierzchni".

Podsumowując całokształt dorobku naukowego stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone ustawą o stopniach i tytułach naukowych, wnioskując tym samym o dopuszczenie Pani mgr inż. Sylwii PRZYBYSZ do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej.

Dr hab. inż. Cezary Senderowski, prof. UWM