

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Rdzawski
Instytut Metali Nieżelaznych
44-100 Gliwice
ul. Sowińskiego 5

OPINIA O PRACY DOKTORSKIEJ

zatytułowanej:

Struktura i własności bimorficznych materiałów kompozytowych
Al/C; Al/TiO/C; Al/TiC/C wzmacnianych karbonizatem węglowym,
wytwarzanych technologią infiltracji ciśnieniowej

Autor: mgr inż. Łukasz Krzemiński

Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska w Gliwicach

1. Krótka charakterystyka pracy

Przedstawiona do zaopiniowania praca doktorska stanowi opracowanie zagadnień sprecyzowanych w tytule pracy. Praca składa się z 6 zasadniczych rozdziałów zawartych na 95 stronach, które obejmują także 12 rysunków, 5 tabel, 22 wzory, streszczenie w języku polskim i angielskim oraz spis literatury zawierający 345 pozycji. Integralną część pracy stanowi Atlas zdjęć, w którym na 45 stronach zawarto 68 złożonych rysunków.

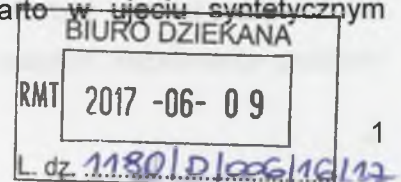
Rozdziały rozprawy ułożone zostały w sposób klasyczny. Rozprawę otwiera **Wstęp**, w którym Autor zawarł zasadniczy cel dysertacji.

W **rozdziale drugim** obejmującym przegląd piśmiennictwa przytoczone zostały zasadnicze informacje dotyczące materiałów kompozytowych oraz ciśnieniowych technologii wytwarzania materiałów kompozytowych, w szczególności infiltracji ciśnieniowej, stanowiąc szerokie wprowadzenie w tematykę pracy doktorskiej. Przedstawiona charakterystyka materiałów bimorficznych oraz procesów karbotermicznej reakcji otrzymywania fazy węglkowej TiC wskazują na zasadniczy kierunek poszukiwań badawczych.

W **rozdziale trzecim** obejmującym badania własne przedstawiono tezę i zakres pracy, scharakteryzowano materiał do badań oraz metodykę badań.

W **rozdziale czwartym** zawarte zostały wyniki badań własnych oraz ich omówienie, natomiast w **rozdziale piątym** podsumowanie.

Rozprawę zamyka **rozdział szósty**, w którym zawarto w ujęciu syntetycznym zasadnicze wnioski wynikające z realizacji podjętych badań.



2. Ocena rozprawy doktorskiej

Cel poznawczy rozprawy ukierunkowany został na zbadanie i poznanie zjawisk zachodzących podczas wytwarzania biomorficznych materiałów kompozytowych, uzyskiwanych w procesie infiltracji ciśnieniowej porowatych karbonizatów stopami aluminium o modyfikowanej oraz niemodyfikowanej powierzchni wewnętrznej, jak również na określenie wpływu stosowanych metod inżynierii powierzchni na strukturę i własności uzyskanego kompozytu.

Aby bardziej przybliżyć genezę podjętej problematyki badawczej Autor rozprawy wspomaga się przeglądem piśmiennictwa, przytaczając zasadnicze informacje dotyczące charakterystyki i budowy kompozytów oraz roli osnowy, faz wzmacniających, ich właściwości, postaci, technologii, i wynikających stąd cech użytkowych.

Do opisu budowy kompozytów przyjęta została powszechnie stosowana klasyfikacja dokonywana według materiału osnowy oraz według postaci geometrycznej materiału wzmacniającego a więc kompozyty o osnowie polimerowej, ceramicznej, metalowej. Zaś podział w oparciu o własności geometryczne faz wzmacniających oraz sposób ich rozmieszczenia dzieli na wzmacniane włóknami krótkimi, długimi, cząstkami, matami, niedoprzędem, porowatymi strukturami. Dokonany przegląd prowadzi Autora do konkluzji, że używając określonej kombinacji osnowy i wzmocnienia można silnie wpływać także na izotropię, względnie anizotropię własności kompozytów.

Na tym tle Autor dysertacji zwraca uwagę na możliwość wykorzystania naturalnych materiałów kompozytowych, takich jak drzewo, czy tkanka kostna i w tym spojrzeniu dopatrzeć się można genezy podjętej problematyki badawczej stanowiącej trzon rozprawy doktorskiej.

Godne podkreślenia jest stwierdzenie, że adaptacja materiałów naturalnych, wykorzystanie zjawisk kapilarnych oraz nasączenia może przyczynić się do powstania struktur porowatych o niespotykanych właściwościach, gdyż struktury umożliwiające transport cieczy na znaczne odległości mogą być wykorzystane, jako „rusztowanie” dla kompozytowych materiałów biomorficznych.

Podążając w tym kierunku Autor dysertacji omawia wybrane technologie ciśnieniowego wytwarzania materiałów kompozytowych z porowatym wzmocnieniem metodą odlewniczą. Definiuje pojęcie materiału porowatego (preforma/szkielet) oraz określa podstawowe cechy charakteryzujące materiał porowaty takie jak: porowatość, powierzchnia właściwa porów, przepuszczalność, krętość, itp.

Biorąc pod uwagę, że kształt i rozmieszczenie porów mogą istotnie wpływać na przepływ cieczy przez materiał porowaty, a tym samym na stopień wypełnienia pustych

przestrzeni przez infiltrującą ciecz prowadzi pogłębioną analizę zjawisk kapilarnych w oparciu o:

- różnice między wartościami potencjału kapilarnego i grawitacyjnego,
- wartości napięcia powierzchniowego infiltrującej cieczy,
- rolę powierzchni międzyfazowej,
- kąt zwilżalności,
- ciśnienie etc.

Przytoczone wstępne informacje i pojęcia stanowią podstawę dla przybliżenia metod infiltracji przy wytwarzaniu materiałów kompozytowych o osnowie metalowej MMC (Metal Matrix Composites). Metoda infiltracji polega na nasączeniu ciekłym metalem gotowej konstrukcji z elementów wzmocnienia kompozytu bądź materiału porowatego oraz schłodzeniem umożliwiającym krzepnięcie materiału osnowy.

Podkreśla, że zaletą nasączenia ciśnieniowego jest możliwość dokładnego odwzorowania kształtu formy odlewniczej przez ciekły metal, niski koszt wytworzenia oraz krótki czas procesu, a przy tym prawidłowo dobrana temperatura i własności powierzchniowe materiału zbrojenia pozwalają otrzymać kompozyt bez udziału porów i niekorzystnych faz wtórnych.

Dobierając zaś warunki infiltracji bierze się między innymi pod uwagę postać geometryczną zbrojenia, własności powierzchniowe materiału preformy, zwilżalność materiału preformy względem ciekłego metalu osnowy, ciśnienie progowe na froncie ciekłego metalu, wartość napięcia powierzchniowego na granicy międzyfazowej gaz-ciecz, krzywiznę powierzchni rozdziału gaz-ciecz, kąt zwilżenia, napięcie powierzchniowe na granicy międzyfazowej zbrojenie-ciecz, powierzchnię styku faz gaz-ciecz, etc.

Dokonany przegląd literatury dotyczący zastosowań infiltracji ciśnieniowej do wytwarzania materiałów kompozytowych skierował uwagę Autora na biomorficzne materiały pozwalające na uzyskanie materiału inżynierskiego o unikalnej strukturze, trudnej lub niemożliwej do osiągnięcia na drodze tradycyjnych technologii, a przy tym pozwalające na osiągnięcie ponadprzeciętnej funkcjonalności.

Zagłębiając się w tę problematykę omawia podstawową charakterystyką i budowę materiałów biomorficznych oraz drewna. Szczególną uwagę zwraca na odpowiednie dobranie i przygotowanie prekursora drewnianego, który w odniesieniu do klasycznych preform (wytwarzanych metalurgią proszkową) powinien się cechować:

- odpowiednią porowatością otwartą,
- porowatością osiową ułatwiającą infiltrację kierunkową zolami oraz ciekłymi metalami,
- jednorodnością porów,

- porowatością wewnątrzkomórkowa intensyfikujących nasączenie cieczą,
- porowatością kierunkową umożliwiającą uzyskanie własności anizotropowych kompozytu,
- brakiem lub ograniczoną ilością naczyń żywicznych oraz promieni łyko rdzeniowych itp.

Wskazuje, że drewno jako surowiec otrzymywany ze ściętych drzew, jest naturalnym materiałem kompozytowym składającym się z celulozy (48%), hemicelulozy (19%), ligniny (30%) oraz olei roślinnych, wosku, żywicy, cukru oraz minerałów. Skład chemiczny drewna obejmuje około 50% C, 44% O, 6% H, 0,2% N oraz pozostałe składniki. Drewno jest materiałem higroskopijnym i anizotropowym.

W celu przygotowania drewna do dalszej obróbki, poddaje się je wstępnym zabiegom suszenia, gdzie w pierwszej kolejności usuwana jest woda wolna, a następnie związana rozmieszczona pomiędzy micelami. Wysuszone drewno poddaje się procesowi karbonizacji, którego celem jest przemiana składników organicznych drewna (celuloza, hemiceluloza, lignina) w czysty węgiel, łącznie z udziałem innych związków węgla.

Karbonizacja jest częścią procesu pyrolizy przebiegającego endotermicznie w warunkach beztlenowych. W wyniku rozkładu termicznego materiału roślinnego udział masowy węgla zwiększa się z poziomu 45% do 80%. Proces karbonizacji prowadzi do uporządkowania w pewnym zakresie struktury do grafitopodobnej (węgla turbostratycznego). **Produktem procesu pirolizy materiału roślinnego jest karbonizat w postaci węglowego materiału porowatego. Materiał uzyskany w wyniku karbonizacji stanowi aktywną adsorpcyjnie (i odwzorowującą strukturę materiału roślinnego), preformę węglową.**

Kolejną sposobem, znajdującym zastosowanie w wytwarzaniu kompozytów, na który Autor dysertacji zwrócił uwagę jest metodą zol-żel, podkreślając jej uniwersalność, efektywność i prostotę w wytwarzaniu materiałów ceramicznych z fazy ciekłej do postaci cząstek, włókien oraz powłok. Zol (roztwór koloidalny zdyspergowanej fazy stałej) po odpowiedniej obróbce cieplej ulega żelowaniu (zagęszczeniu), a przy dalszym podgrzewaniu poddawany jest kalcynacji i przemianie w fazę szklistą lub krystaliczną. Utworzenie TiO_2 (podobnie jak innych tlenków) może posłużyć, jako jeden z przykładów przemiany amorficznego żelu w ceramiczny materiał krystaliczny (dewitryfikacja), który dzięki biokompatybilności bywa wykorzystany do pokrywania implantów chirurgicznych lub szkieł biomedycznych.

Podkreśla, że metodą zol-żel wytwarza się SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 wraz z ZnO oraz MgO w postaci cząstek lub powłok wykorzystywanych często z nanocząsteczkami srebra, jako powłoki antybakteryjne. Dzięki łączeniu materiałów tlenkowych wytworzonych metodą zol-żel możliwe jest otrzymanie materiałów kompozytowych o polepszonych własnościach elektrycznych, optycznych jak też foto katalitycznych.

Kruchość ceramiki inżynierskiej jest niekorzystną cechą gdyż ogranicza jej udział w grupie materiałów konstrukcyjnych. Zwiększenie zakresu zastosowania osiąga się przez utworzenie materiału kompozytowego o osnowie metalowej lub polimerowej wzmocnionej fazą ceramiczną.

Do materiałów ceramicznych, szczególnie ceramiki inżynierskiej zaliczane są tlenki, węgliki, azotki oraz diament. Mając na uwadze temat dysertacji Autor rozprawy szczególną uwagę zwrócił na grupę faz węglkowych, które ze względu na strukturę oraz grupę pierwiastków łączących się z węglem podzielił na węgliki diamentopodobne, (B_4C), metalopodobne (TiC , NbC , TaC) i węgliki solopodobne (Ca_2C), charakteryzując ich własności, sposoby ich otrzymywania oraz przykłady zastosowań. Szczegółową uwagę poświęcił procesom karbotermicznej reakcji otrzymywania fazy węglkowej TiC .

Przybliżając obszar tematyczny dysertacji zwrócił także uwagę na metodę Atomic Layer Deposition (ALD), którą można wykorzystać do osadzania cienkich warstw i powłok o grubości nanometrycznej umożliwiającą jednoczesne jednorodne pokrycie materiału podłoża wybranymi związkami chemicznymi, zazwyczaj tlenkami pierwiastków. Metoda ta jest odmianą metody CVD, chemicznego osadzania z fazy gazowej. Pozwala ona na niskotemperaturowe (około $300^{\circ}C$) osadzanie warstw między innymi, izolujących, przezroczystych oraz półprzewodnikowych z możliwością kontroli wzrostu i grubości warstwy w skali nanometrycznej. Prekursorami dla tego procesu są związki lotne, ciekłe lub stałe doprowadzane do komory reakcyjnej w fazie gazowej. Metodą tą uzyskać można powłoki TiO_2 , ZrO_2 , SnO_2 , Al_2O_3 oraz inne, w tym powłoki gradientowe i wielowarstwowe o wysokiej czystości. Znaczną niedogodność stanowi wysoki koszt prekursorów, aparatury a także niska prędkość nakładania powłoki.

Dokonany przegląd literatury, jego analiza oraz wyniki badań własnych doprowadziły Autora do sformułowania następującej tezy dysertacji:

„Modyfikacja powierzchni fazy wzmocniającej w postaci karbonizatów drewna sosnowego metodami ALD (Atomic Layer Deposition) oraz zol-żel znacząco wpływa na własności i strukturę biomorficznych materiałów kompozytowych na osnowie stopu $AlSi12$ wytwarzanych metodą infiltracji ciśnieniowej”.

Dla dowiedzenia słuszności przyjętej tezy Autor rozprawy dobrał odpowiednie materiały, zakres prac i metodykę badań.

Zastosowanie odpowiedniego zakresu oraz kolejności prac jak też kombinacji metod badawczych pozwoliło na wytworzenie trzech biomorficznych materiałów kompozytowych wzmocnianych karbonizatem węglowym, które zostały poddane ciśnieniowej infiltracji ciekłym stopem $AlSi12$.

Jako materiał do badań użyto bimorficzne kompozyty o zróżnicowanej strukturze i własnościach, które wytworzone zostały w oparciu o metody pirolizy, funkcjonalizacji, zol-żel, infiltracji próżniowej zolem, ceramizacji (karbotermicznej redukcji), osadzania warstw atomowych oraz infiltracji ciśnieniowej ciekłym metalem.

Wieloetapowy proces pozyskiwania materiału badawczego rozpoczęto od pobrania fragmentu materiału naturalnego (bieli sosnowej) stanowiącego preformę do procesu infiltracji.

Z pnia drzewa sosnowego o średnicy 500 mm wycięto odpowiednią ilość próbek w kształcie walca (pastylki) o wymiarach 10 x 26 mm. Próbki te suszono w temperaturze 120°C przez 6 godzin w celu usunięcia wody w porach materiału drewnianego. Następnie kształtki drewniane poddano procesowi pirolizy w atmosferze azotu o wymuszonym jego przepływie (12l/godz.) od temperatury pokojowej do temperatury 800°C z prędkością 3°C/min oraz wytrzymaniu w tej temperaturze przez 1 godz. i studzeniu do temperatury pokojowej z piecem. Tak uzyskane karbonizaty (symbol C_c) po ich odpowiednim przygotowaniu podzielone zostały na grupy materiałów poddane oddzielnym procesom obróbki chemicznej, cieplnej i osadzania powłok w wyniku czego wytworzono trzy grupy karbonizatów: C_f , C_{TiO} oraz C_{TiC} .

Karbonizaty C_c w celu zmiany charakteru powierzchni węglowych z hydrofobowej na hydrofilową poddano procesowi funkcjonalizacji (symbol C_f) polegającej na nasączeniu porowatej preformy stężonym (65%) kwasem azotowym, wytrzymaniu w temperaturze 50°C przez 50 minut, a następnie dokładnym płukaniu i osuszeniu (temp. 800°C/2 godz.). Zabieg ten wykonano w celu ułatwienia infiltracji preformy zolem.

Z wytworzonych trzech grup karbonizatów, dwie poddano dalszym, odrębnym procesom modyfikacji powierzchni.

Jedną grupę karbonizatów C_f poddano procesowi osadzania cienkich powłok atomowych (ALD) przez nanoszenie na ich powierzchnię nanometrycznej powłoki TiO_2 . Proces osadzania powłoki TiO_2 wykonano 200 krotnie dzięki czemu otrzymano powłokę tlenku tytanu o grubości 20 nm (symbol C_{TiO}).

Dla drugiej grupy karbonizatów C_f zastosowano metodę osadzania powłoki ceramicznej metodą infiltracji swobodnej zolu $Ti-O$, który ulegał przemianie w żel w wyniku suszenia oraz w tlenek tytanu w skutek kolejnego starzenia w warunkach podwyższonej temperatury (120°C), a to z kolei pozwoliło w procesie karbotermicznej redukcji w obecności węgla w temperaturze 1500°C wytworzyć fazę TiC (symbol C_{TiC}).

Tak przygotowane trzy materiały preform karbonizaty C_f , C_{TiO} oraz C_{TiC} poddane zostały ciśnieniowej infiltracji ciekłym stopem $AlSi12$.

Określenie struktury i własności otrzymanych nowoczesnych biomorficznych materiałów kompozytowych wytworzonych metodą ciśnieniowej infiltracji ciekłym stopem

AlSi12 węglowych preform o strukturze komórkowej wymagało wykonania odpowiednich pomiarów i subtelnych badań z wykorzystaniem nowoczesnych metod oraz użycia odpowiedniej aparatury naukowo-badawczej. Wykonany zakres pomiarów i badań obejmował:

- pomiary masy karbonizatów węglowych (symbole C_c , C_f , C_{TiO} , C_{TiC}),
- pomiary gęstości rzeczywistej karbonizatów,
- analizę struktury i topografii powierzchni karbonizatów z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej,
- pomiary porowatości, rozkłady wielkości porów oraz ich powierzchnię właściwą w celu określenia możliwości infiltracji porowatej struktury karbonizatu zarówno zolem Ti-O jak też ciekłym metalem podczas infiltracji ciśnieniowej,
- rentgenowską analizę fazową karbonizatów i materiałów kompozytowych Al/ C_f , Al/ C_{TiO} , Al/ C_{TiC} oraz AlSi12
- badania metalograficzne na zglądach materiałów kompozytowych oraz stopu AlSi12 z wykorzystaniem kontrastu Nomarskiego.
- badania kompozytów przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej SEM oraz detektorów EDS, SE, Inlens,
- badania z wykorzystaniem transmisyjnej mikroskopii elektronowej TEM dla obserwacji cienkich folii w ciemnym i jasnym polu dla różnego pochylenia wiązki STEM - HAADF, mikroanalizatora rentgenowskiego EDX, dyfrakcji elektronowej SAED oraz dla zbadania struktury atomowej fazy krystalicznej TiC w osnowie węgla turbostratycznego karbonizatu C_{TiC} wysokorozdzielczej transmisyjnej mikroskopii elektronowej HRTEM,
- badania spektroskopowe widma Ramana,
- badania termo grawimetryczne (TG), termo grawimetryczną analizę różnicową (DTG) oraz termiczna analizę różnicową (DTA),
- pomiary twardości,
- badania trybologiczne,
- badania wytrzymałości na ściskanie.

Bardzo szeroki zakres badań, wielowątkowe odniesienia interdyscyplinarne, zastosowane metody i materiały badawcze stanowiły znaczne wyzwanie dla Autora dysertacji. Fakt ten stanął u podstawy drobiazgowego opisu osiągniętych rezultatów.

Przedstawiony na 20 stronach opis badań podzielony został na logiczne zespoły

zagadnień, natomiast dokumentacja badań w postaci 68 złożonych rysunków zawarta została na 45 stronach.

Opis otwierają osiągnięte wyniki badań własności i struktury karbonizatów C_C , C_{Zel} i C_{TIC} , następnie wyniki badań powierzchni karbonizatów C_C , C_F , C_{TIC} oraz C_{TiO} , wyniki badań struktury stopu AlSi12, wyniki badań struktury i morfologii biomorficznych materiałów kompozytowych oraz wyniki badań własności mechanicznych i użytkowych biomorficznych materiałów kompozytowych.

Mając świadomość uzyskania dużej obfitości materiału badawczego, dla przybliżenia osiągniętych rezultatów dokonuje Autor podsumowania, posiłkując się w interpretacji wyników także odniesieniami literaturowymi podkreślając, że istotą wytworzenia biomorficznych materiałów kompozytowych było potwierdzenie możliwości infiltracji porowatych karbonizatów o strukturze drewna sosnowego przez ciekły metal. Ponad to określenie wpływu kształtowania własności powierzchni fazy umacniającej na przebieg infiltracji ciekłym stopem aluminium i końcowe struktury oraz własności uzyskanych biomorficznych materiałów kompozytowych. Dobór metod modyfikacji powierzchni i osadzania powłok w tym ALD oraz zol-żel dokonany został w oparciu o uzyskane dane literaturowe.

Za szczególne osiągnięcie Autora uznać można samodzielne opracowanie nowatorskiej metody wytwarzania i kształtowania własności biomorficznych materiałów kompozytowych, wzmacnianych fazą o dziedzicznej strukturze komórkowej bieli drewna sosnowego modyfikowaną powierzchniowo w oparciu o technologię zol-żel i/lub ALD. W szczególności opracowana metoda obejmowała:

- pobranie i suszenie próbek materiału naturalnego,
- karbonizacja i oczyszczanie drewnianych kształtek
- funkcjonalizacja karbonatów,
- nakładanie powłoki TiO_2 na powierzchnię wewnętrzną wybranych karbonizatów, wytworzenie na powierzchni wzmocnienia węglowego cząstek fazy TiC metodą zol-żel z następną karbotermiczną redukcją tlenku,
- infiltrację ciśnieniową, uprzednio wytworzonych i zmodyfikowanych powierzchniowo karbonizatów stopem AlSi12.

Godnym podkreślenia jest w moim przekonaniu umiejętne wykorzystanie danych literaturowych, skuteczne wzbogacenie wiedzy z dyscyplin pokrewnych, racjonalne opracowanie i realizacja niezbędnego zakresu badań jak też odpowiednich metod badawczych. Takie podejście sprzyjało umiejętnemu powiązaniu cząstkowych badań w pewną całość związaną merytorycznie z tematem i tezą dysertacji.

Otrzymane wyniki badań, ich opracowanie oraz interpretacja pozwalają na stwierdzenie, iż cel pracy został osiągnięty, a przyjęta teza rozprawy doktorskiej została

dowiedziona. Poszerzona została wiedza i doświadczenie badawcze w zakresie struktury i własności biomorficznych materiałów kompozytowych wzmacnianych karbonizatem węglowym, wytwarzanych technologią infiltracji ciśnieniowej.

Jak starałem się wykazać omawiając zasadnicze elementy badań, recenzowana praca stanowi twórcze rozwinięcie zagadnień teoretycznych i praktycznych. Osiągnięte przez Autora rezultaty można uważać za istotne, aktualne i liczące się w tej dziedzinie.

Przyjęta przez Doktoranta tematyka badawcza oraz wynikający stąd bardzo szeroki i wielowątkowy zakres badań, był uzasadniony oraz mieścił się w istotnym i aktualnym nurcie prac naukowo-badawczych.

Dokonany przegląd literatury oraz krytyczna ocena otrzymanych rezultatów pozwala sądzić o bardzo dobrym rozeznaniu problematyki badawczej jak też o świadomości Autora o koniecznym do wykonania zakresie prac zmierzających do odpowiedzi na przyjęta tezę rozprawy i jej cel oraz wynikające stąd pytania badawcze.

Godny podkreślenia jest fakt krytycznego podejścia zarówno do doniesień literaturowych jak też do wyników własnych prac. O dojrzałości badawczej świadczyć może świadomość pewnych ograniczeń i utrudnień związanych z osiągnięciem odpowiedzi na pojawiające się pytania badawcze.

Autor wniósł dużo swojej inwencji i własnych pomysłów zmierzających do osiągnięcia zamierzonego celu. Opracowane zagadnienia zawierają w sobie zarówno aspekty poznawcze jak też utylitarne a nawet dydaktyczne.

Osobiste odniesienie do otrzymanych wyników badań zawarł Autor w „Podsumowaniu” stanowiącym merytoryczną interpretację otrzymanych wyników badań eksperymentalnych, cechującą się dużą dozą obiektywizmu i rzetelności naukowej.

Szczególne podkreślenia wymaga sprawne posługiwanie się subtelnym warszatem naukowym oraz umiejętna interpretacja wyników badań, których rzetelność potwierdzana była innymi, adekwatnymi metodami badawczymi a w szczególności badaniami strukturalnymi. Sposób interpretacji wyników i formułowania wniosków uważam za poprawny.

Mimo tych niekwestionowanych zalet niestety, Autor nie uniknął pewnych niedoskonałości, które traktuję dyskusyjnie. Dotyczy to w szczególności pojawiającymi się często niezgrabnościami językowymi (np. w różnych temperaturach, a powinno być w różnej temperaturze, w funkcji... a, powinno być w zależności...., etc) jak też z uchybieniami stylistycznymi wynikającymi prawdopodobnie niewystarczającej korekty końcowej dysertacji.

Kolejna niedoskonałość dysertacji moim zdaniem wynika z bardzo częstych powtórzeń, powracania do wątków już omówionych oraz pewnych trudności w umiejętnym

generalizowaniu osiągniętych, częściowych rezultatów. Odnosi się wrażenie, że Autor bardziej chciał zwrócić uwagę na detale podkreślające Jego wiedzę, które jednak rozpraszały zasadniczy nurt rozprawy.

Zasygnalizowane przeze mnie uwagi nie obniżają mojej wysokiej oceny pracy, szczególnie za odwagę stawiania trudnych pytań i konsekwentnego szukania na nie odpowiedzi, także za ciekawy i nowatorski pomysł badawczy.

3. Wniosek końcowy

Determinacja, z jaką Autor starał się rozwiązać problem naukowy oraz ogromna praca włożona w bardzo szeroki zakres badań oraz przygotowanie dysertacji doktorskiej (forma graficzna, dokumentacja badawcza, a szczególnie metalograficzna) budzą szacunek.

Stwierdzam, że w mojej opinii przedstawiona rozprawa spełnia wymagania stawiane dysertacjom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. Dz. U. z 2003 r. Nr 65, z 2005 r. Nr 164 z 2010 r. Nr 96 oraz z 2011 r. nr 84 i wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr inż. Łukasza Krzemińskiego do publicznej obrony przedstawionej pracy przed Radą Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

