

Imię i nazwisko recenzenta:
Dr hab. inż. Tomasz Tokarski, prof. AGH
Dane adresowe:

Kraków, 22.03.2024
(data i miejsce)

Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Al. Mickiewicza 30, 30-059, Kraków

Recenzja pracy doktorskiej

Mgr inż. Piotr Garbień
(imię i nazwisko doktoranta / doktorantki)

pod tytułem: Wysokowytrzymałe staliwa do odlewania cienkościennych wyrobów o dużej dokładności powierzchni. Modelowanie, wytwarzanie, mikrostruktura i właściwości.

przygotowanej pod kierunkiem:

Dr hab. Inż. Wojciech Maziarz, prof. PAN
(imię i nazwisko promotora)

Dr inż. Adam Kokosza, AGH
(imię i nazwisko promotora / promotora pomocniczego)

Niniejsza recenzja wykonana została na podstawie uchwały Rady Naukowej Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej im. A. Krukowskiego PAN w Krakowie z dnia 16 listopada 2023 roku. w myśl zapisów ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2020r. poz. 85 z późn. zm.)

Recenzowana dysertacja mgra inż. Piotra Garbień zawiera opis wdrożenia nowej technologii materiałowej w odlewni stopów na bazie żelaza wraz z naukowym opisem etapu projektowania materiału, obróbki cieplnej oraz otrzymanych rezultatów. Efektem końcowym pracy było znaczące poprawienie właściwości użytkowych odlewanych komponentów, i związane z tym obniżenie kosztów eksploatacji maszyn pracujących na odlewni. W tym kontekście doktorat wdrożeniowy stanowi oryginalne i ciekawe opracowanie zwiększające innowacyjność i rozszerzające "know-how" polskich przedsiębiorstw.

W pracy podjęto trudny temat zaprojektowania nowej mikrostruktury stopu wraz dedykowaną obróbką cieplną prowadzącą potencjalnie do wytworzenia materiału nano-bainitycznego w przemysłowych odlewach staliwnych. Dysertacja podzielona jest na cztery rozdziały, z których najważniejszymi są drugi i trzeci zawierające odpowiednio wprowadzenie teoretyczne i badania

wraz z dyskusją wyników. Praca zawiera 81 rysunków, 16 tabel i uzupełniona jest 126 dobrze dobranymi pozycjami literatury z których niemalże wszystkie są angielskojęzyczne.

We wstępie Autor definiuje potrzebę prowadzenia doktoratu wdrożeniowego w odlewni staliwa/żeliwa oraz przedstawia obecny stan techniki wykorzystywany przy produkcji komponentów pracujących w ciężkich warunkach o dużym narażeniu na zużycie ściernie. Wybrane zostają trzy komponenty pracujące w mieszarko-nasypywarce masy formierskiej oraz oczyszczarce odlewanych elementów. O problemie związanym z szybkim zużyciem abrazyjnym komponentów świadczą krótkie cykle inspekcji, prowadzące do wzrostu czasochłonności związanej z utrzymaniem ruchu urządzeń. Dotychczasowo wykonane one były z trzech różnych gatunków materiałów: staliwa 1.2080 oraz żeliw specjalnego II i sferoidalnego ADI. Ideą pracy jest zastosowanie nowego materiału podnoszącego żywotność komponentów poprzez zastosowanie relatywnie taniego stopu i modyfikacji jego mikrostruktury na drodze obróbki cieplnej. Docelowo podniesione mają parametry mechaniczne, odporność na zużycie abrazyjne ww. urządzeń prowadząc tym samym do obniżenia kosztów ich eksploatacji.

Część teoretyczna zawiera podstawy opis układu fazowego żelazo-węgiel (żelazo-cementyt) prowadzący do różnych wariantów końcowej mikro-struktury materiału. Całość podporządkowana jest zaznajomieniu z projektowaną mikrostrukturą zbliżoną do nano-bainitu. Projektowany stop oraz obróbka cieplna opiera się na koncepcji połączenia wielofazowej mikrostruktury o wymiarach geometrycznych poszczególnych elementów na poziomie kilkudziesięciu nanometrów. Mikrostruktura płytkowego ferrytu połączeniu z płytkami austenitu posiadającego również zdolność transformacji podczas odkształcenia (efekt TRIP) ma docelowo podnieść parametry mechaniczne stopu z jednoczesną poprawą plastyczności. Autor w oparciu o wykres równowagowy opisuje wpływ szybkości chłodzenia na końcową mikrostrukturę stopów żelazo-węgiel. Przedstawiony został krótki opis termodynamiczny jak również i strukturalny przemian podczas chłodzenia z zakresu austenitu w warunkach aktywnej dyfuzji (przemiana eutektoidalna) jak i w warunkach bezdyfuzyjnych (przemiana martenzytyczna). Stanowi on podstawę do pogłębionego opisu mikrostruktury bainitycznej, zarówno w kontekście jej formowania jak również parametrów mechanicznych. Na koniec wstępu Doktorant odnosi się do prób wytworzenia mikrostruktury nano-bainitu w materiałach odlewanych. Słusznie konkluduje, że heterogeniczny w składzie chemicznym i nie przerobiony plastycznie materiał stanowi aktualne i duże wyzwanie w kontekście wytworzenia płytkowej mikrostruktury nano-bainitu.

Opis teoretyczny jest spójny z widocznym zamierzeniem Autora polegającym na przedstawieniu podstawowych zależności w układzie żelazo-węgiel a następnie zbudowaniu na tej podstawie opisu przemiany bainitycznej. Niemniej jednak nie uniknięto błędów z których część wyraża się przez niewłaściwe zastosowanie słownictwa specjalistycznego a część tworzy kompletnie nie zrozumiałe sekcje tekstu. Szczegółowe uwagi zawarłem w dalszej części recenzji.

Opis eksperymentu, wyniki i dyskusja są najbardziej rozbudowaną częścią pracy. Na ponad 70 stronach Doktorant przedstawia wyniki różnych analiz, symulacji oraz badań eksperymentalnych przeprowadzonych zarówno w skali laboratoryjnej jak również przemysłowej. Dobór systemów modelowania, symulacji oraz narzędzi badawczych jest prawidłowy, co świadczy o systematycznym i przemyślanym podejściu do rozwiązania postawionego problemu. Rozdział rozpoczyna się krótką charakterystyką materiału, opisem procesu produkcji komponentów oraz metod badawczych użytych w pracy. W szczególności wykorzystano metody symulacji wykresów CTP użyte do projektowania obróbki cieplnej, symulacje zalewania i krzepnięcia odlewów służące optymalizacji procesu odlewania i przygotowania geometrii formy, badania mikrostruktury prowadzone z użyciem mikroskopii świetlnej oraz transmisyjnej mikroskopii elektronowej, badań fazowych z użyciem promieniowania synchrotronowego, testów dylatometrycznych oraz badania właściwości mechanicznych w próbie rozciągania, twardości oraz udarność. Dodatkowo ważnym uzupełnieniem są badania technologiczne przedstawiające realne użycie komponentów pracujących w docelowych urządzeniach przemysłowych.

Część rozdziału związanego z obliczeniami termodynamicznymi stanowi podstawę do analizy kinetyki przemian fazowych. Jest to o tyle ważne, że w warunkach przemysłowych z powodu określonych gabarytów odlewów oraz cyklem pracy urządzeń technologicznych, istnieje ograniczenie na szybkość wymiany ciepła. Wyznaczonym krzywym brakuje korelacji z oczekiwanymi krzywymi chłodzenia komponentów, uzyskanymi z symulacji czy też eksperymentu. Nie znalazłem w pracy jakikolwiek informacji na temat wymiarów geometrycznych odlanych komponentów (żadne ze zdjęć gotowych komponentów nie zawiera skali), tak więc trudno jest ocenić jak duży będzie problem z wymianą ciepła.

Analiza termodynamiczna uzupełniona została wyznaczeniem temperatury austenizacji z wykorzystaniem szeregu hartowniczego. Zadziwiający jest wniosek stwierdzający o zależności liniowej pomiędzy twardością a temperaturą austenizowania gdzie w następnym zdaniu Doktorant dzieli krzywą na etapy analizując przyczyny nieliniowej zależności $HV=f(T)$. Badania twardości zostały uzupełnione analizą mikrostruktury po procesie hartowania. Widoczna jest segregacja dendrytyczna i zmienna morfologia austenitu, w szczególności w zakresie niższych temperatur austenizowania. Brak jest jednakże jakiegokolwiek analizy statystycznej mikrostruktury uprawniającej do wysunięcia wniosków na temat ilości i grubości płytek martenzytu, w szczególności w obecności wyraźnych segregacji dendrytycznych.

Część symulacji związanych z procesem zalewania jest (lub powinien być) standardowym elementem wdrażania nowych komponentów do produkcji. Autor określa szczegółowe cele dla prowadzonych symulacji, np. dobranie geometrii układu zalewowego oraz umieszczenia detali czy też określanie warunków temperaturowa czasowych procesu zalewania, jednakże brak jest jakiegokolwiek dyskusji na ten temat. Cały podrozdział sprowadza się do pokazania kolorowych zrzutów z oprogramowania dla jednego wariantu symulacji bez jakiegokolwiek interpretacji. Stwierdzenia, że oprogramowanie jest przydatne w kontekście wskazania potencjalnych problemów przy odlaniu jest trywializmem i nic nie wnosi do pracy. Podobnie jest w przypadku

stwierdzenia, że symulacje zostały zweryfikowane pozytywnie w warunkach eksperymentalnych. Od razu rodzi się pytanie w jaki sposób? Ile prób przeprowadzono, jakie problemy wystąpiły podczas optymalizacji technologii, czy projektowy stop miał inne parametry zalewania od wcześniej stosowanych? Oczywiście wiedzę tą można określić jako zastrzeżony "know-how" firmy a w pracy zamieścić krótką informację, że odlewy zostały zaprojektowane i wykonane zgodnie ze sztuką odlewniczą i nie wykazywały dyskwalifikujących wad odlewniczych.

W kolejnej części badań eksperymentalnych Doktorant przeprowadza badania dylatometryczne które potwierdzają niejednorodność mikrostruktury oraz wprowadza trzy wstępne warianty obróbki cieplnej mającej na celu poprawę mikrostruktury odlanego materiału: wyżarzanie homogenizujące, wyżarzanie zmiękczone oraz "nano-bainityzację". Z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej, pomiaru twardości oraz analizy z użyciem promieniowania synchrotronowego Autor dyskutuje skutki prowadzonych obróbek cieplnych. Analiza mikrostruktury z użyciem mikroskopii świetlnej sprawdza się jedynie w przypadku pierwszego wariantu obróbki. W pozostałych przypadkach, a w szczególności w wariantcie 3 trudno jest wyciągać sensowne wnioski na podstawie użytych powiększeń oraz dużej niejednorodności materiału. W tym przypadku bardzo wartościowa jest analiza fazowa przy użyciu promieniowania synchrotronowego wskazującego na udział poszczególnych faz w materiale. Zaletą tej metody jest możliwość prześwietlenia relatywnie grubych próbek dając statystyczną ocenę udziału poszczególnych faz w całej objętości. Uzyskane wyniki są uzupełnione o badania twardości przedstawiając makroskopową odpowiedź materiału na dany wariant obróbki cieplnej.

Osobnego komentarza wymaga sprawa odwęglenia. Brakuje tu informacji o rozmiarze próbek użytych do analizy obróbki cieplnej. Jak się domyślam były to małe walce (o średnicy 3mm) z testów dylatometrycznych. W takich warunkach odwęglenie może objąć znaczną objętość próbki, natomiast jak jest głębokość warstwy odwęglonej? Odwęglanie to standardowy "problem" w przemyśle który dawno już został rozwiązany przez zastosowanie odpowiednich atmosfer w piecu. Zastosowanie takowej wstrzymałoby proces odwęglania i być może przygotowało mikrostrukturę w kontekście jednorodności do procesu "nano-bainityzacji". W rezultacie Autor zdecydował się na tzw. "Wariant 2" obróbki z czasem homogenizacji ograniczonym do 6h, co skutkowało niepełną homogenizacją mikrostruktury. Rysunek 53 wskazuje, że materiał posiadał niejednorodną mikrostrukturę nawet po 12h wyżarzania. Natomiast zaproponowany "wariant 2" obróbki 1100C/6h + 950C/2h + 200C/2 godzin posiada wg opisu strukturę "jednorodną". Powstaje pytanie dlaczego zastosowany krótszy czas sumaryczny obróbki "wariantu 2" doprowadził strukturę do stanu "jednorodnego" podczas gdy wyżarzanie w 1100C w czasie 12h dalej wskazuje cechy mikrostruktury dendrytycznej?

Na podstawie badań składu fazowego i pomiarów twardości Doktorant wybiera do dalszych badań dwa warianty obróbki cieplnej dla których została przeprowadzona pogłębiona analiza

mikrostruktury z użyciem promieniowania synchrotronowego oraz transmisyjnej mikroskopii elektronowej TEM.

TEM jest w tym przypadku jedyną sensowną techniką do bezpośredniej oceny mikrostruktury na poziomie oczekiwanego "nano-bainitu". Przeprowadzona charakterystyka jest w zgodności z pomiarami synchrotronowymi pozwalającymi dodatkowo ocenić udział objętościowy poszczególnych faz składowych w stopie. Z wykorzystaniem wysoko-rozdzielczej mikroskopii elektronowej udało się potwierdzić istnienie manometrycznych form węgla przejściowego. Należy podkreślić, że jest to trudna do przeprowadzenia analiza, w szczególności ze względu na obecność złożonej i silnie zdefektowanej mikrostruktury.

Kolejnym etapem były testy właściwości mechanicznych przeprowadzone dla dwóch wariantów obróbki cieplnej. Wykonano testy rozciągania, twardości oraz udarności. Brakuje tu opisu uwzględniającego ilość wykonanych pomiarów. Pozwoliłoby to na dokonanie statystycznej oceny stabilności procesu odlewania i obróbki cieplnej czy też lokalnych niejednorodności mikrostruktury (choćby poprzez podanie odchylenia standardowego pomiarów twardości).

Osobnego komentarza wymaga tu przeprowadzona próba rozciągania.

Jednym z parametrów użytkowych zaproponowanych materiałów była plastyczność stopu wyrażona poprzez odkształcenie całkowite. Rysunki 70 i 71 przedstawiają wykresy rozciągania przedstawione we współrzędnych siła-wydłużenie. Są to dane rejestrowane z maszyny, niemniej jednak w badaniach znormalizowanych (ustandaryzowane próbki o jednorodnym przekroju) należałoby je przedstawić w układzie naprężenie-odkształcenie. Wartości wyznaczonych parametrów są przeliczone i podane w tabeli oraz opisie rysunków. Dane dotyczące parametrów wytrzymałościowych można przeliczyć korzystając z podanej średnicy 6mm, jednakże brak jest informacji o długości bazy pomiarowej. Bazując na prostych wzorach można ocenić, że próbki były 5-krotne czyli z bazą pomiarową 30mm. Błędnie w tym przypadku obliczono odkształcenie całkowite, przyjmując jako wartość końcową pionowy rzut punktu zerwania próbki na oś odciętych. Efektem jest zawyżanie parametru odkształcenia całkowitego o wartość wynikającą ze sprężystego zakresu. Z uwagi na brak zastosowania ekstensometru (pomimo iż opis eksperymentu wskazuje, że maszyna wytrzymałościowa takowy posiadała) część sprężysta wnosila niemalże 50% całkowitego zakresu przedstawionego na wykresach (efekt ten wynika ze sprężystości maszyny). W takim przypadku powinno się rzutować punkt zerwania na oś odciętych równoległe do części sprężystej krzywej rozciągania. Dokonując korekcji obliczeń wyniki odkształcenia całkowitego wynoszą odpowiednio: ~4,5% i 5% odpowiednio dla Rys. 70 i 71. Jest to wartość około dwukrotnie niższa niż wyliczona przez Doktoranta.

Ostatnią częścią badań były próby technologiczne odlanych komponentów. Z punktu widzenia wdrożenia jest to najbardziej znacząca część pracy wskazująca na wartość rozwijanej technologii. Zastosowanie nowego materiału pozwoliło na znaczące wydłużenie czasu eksploatacji elementów od 25% do 140% w zależności od komponentu. Jest to doskonały

wynik, jako że w przemyśle poprawa wydajności lub obniżenie kosztów danego procesu o zaledwie kilka procent jest postrzegana jako innowacja warta wdrożenia. Można oczekiwać, że poprawa właściwości użytkowych nastąpiła na skutek synergii efektów pochodzących od rozdrobnienia mikrostruktury oraz wydzielania nano-metrycznych węglików. Żaden z testowanych elementów nie uległ przedwczesnemu zniszczeniu przez pękanie, co wskazuje na małe znaczenie plastyczności materiału w wybranych aplikacjach. Innymi słowy brak jest przesłanek świadczących o negatywnym wpływie niższej niż zakładaną plastyczność, a krytycznym parametrem odpowiedzialnym za przedłużenie żywotności na ścieranie jest odporność materiału na zużycie ściernie. W tym kontekście brakuje w pracy opisu mechanizmów zużycia abrazyjnego, oraz przynajmniej odniesienia się do standardowej mikrostruktury materiałów referencyjnych.

Należy pamiętać jednakże, że niska plastyczność może mieć negatywne skutki w każdym innym zastosowaniu obciążającym komponenty znacznymi naprężeniami rozciągającymi.

Szczegółowe uwagi.

Praca napisana jest niełatwym do czytania językiem co obniża generalny odbiór pracy, aczkolwiek nie jest przeszkodą w jej zrozumieniu. Część graficzna powinna być bardziej dopracowana. To co uchodzi za dopuszczalne w raportach przemysłowych w opracowaniu naukowym jest niewskazane. Chodzi głównie o utrzymanie spójnego języka prezentacji w tym przypadku polskiego, bez używania języka angielskiego. Część rysunków przedstawia skany i zrzuty ekranu bez żadnego tłumaczenia z języka publikacji, oprogramowania. Przykładem może być Rys. 28 który jest częściowo spolszczony - opisy osi w języku polskim natomiast wstawki na wykresie w języku angielskim. Jeżeli dało się zamienić opis osi to dlaczego pominął resztę rysunku?

W pracy można również znaleźć szereg nieprawidłowo użytych zwrotów bądź też niezrozumiałych całych zdań, przykładowo:

Strona 19: Ferryt krystalizuje w w układzie RPC - należy zastanowić się co krystalizacja oznacza. Podobny "problem" występuje w innych miejscach.

Strona 21: "Kształt tego ferrytu nie ma związku z ze strukturą krystaliczną fazy wzrostu" - senetsecjna dla mnie kompletnie niezrozumiała

Strona 26: "odkształcenie Bagna sugeruje, że kierunki <001> austenitu i ferrytu są równoległe, podobnie jak kierunki <110>" - taka definicja dwóch niekomplanarnych wektorów w dwóch różnych sieciach krystalicznych powoduje, że są one zorientowane dokładnie w taki sam sposób w przestrzeni trójwymiarowej. Jest to nieprawda dla relacji Baina i niezgodne z rysunkiem 10.

Strona 38: Rys.23 został w tekście opisany jako wykres fazowy. Czy jest nim rzeczywiście?

Strona 43: "Występowanie austenitu powoduje, że węgiel oddziela się od ferrytu i zajmuje regularne oktaedryczne szczeliny" - niewłaściwe użycie nazw (przykładowo powinno być luka oktaedryczna)

Strona 45: "... opracowali komercyjną technologię opartą na grubości stali nanokrystalicznej" - trudno zrozumieć o co Autorowi chodziło

Strona 47: ponownie słowo "krystalizacja" użyte jest nieprawidłowo

Strona 55: "pośpieszna analiza chemiczna" - zupełnie nieprzemyślany zwrot

Strona 68: "Dla skonstruowania diagramu użyto złożonego modelu umożliwiającego wykorzystanie dwóch zakodowanych w programie transformacji..." - kolejny przykład kompletnie niezrozumiałego opisu

Strona 73: "Jak widać, wzrost ten ma charakter liniowy. Najintensywniej twardość rośnie..." - można się pogubić czy interpolujemy dane linią czy inną nieliniową funkcją.

W mojej opinii niepotrzebne są rysunki 32, 33, 34. W szczególności rysunek 34 jest jakimś nieporozumieniem. Zdjęcie fragmentu aparatu do analizy składu chemicznego nie można nazwać "Pomiarem składu chemicznego". Wszystkie rysunki od 32 do 34 powinny być zastąpione diagramem (schematem blokowym) przedstawiającym poszczególne etapy wytwarzania komponentów z zaznaczonymi krytycznymi parametrami procesu. Obecnie przypominają bardziej instrukcję stanowiskową w odlewni niż część naukowego opisu.

Zdjęcia mikroskopowe (Rys. 36) - jakim celu zostały one przedstawione? Po co wykonywać i przedstawiać poszczególne powiększenia które ukazują ten sam fragment materiału i nie wnoszą nic do analizy (zobacz pary zdjęć w pierwszym i trzecim wierszu rysunku 36). Sugeruję w przyszłości ograniczenie liczby powiększeń i skupienie się na tych obszarach które są istotne z punktu charakterystyki mikrostruktury, przykładowo ocen ilości i morfologii defektów materiału.

Zastanawiające jest jak wycięto okrągłe próbki do rozciągania na drutowej EDM i jak wytoczono prostokątne próbki z karbem na tokarce numerycznej.

Brak jest znaczników na zdjęciach przedstawiających detale poddane testom. Rozumiem, że dla autora jest to oczywiste, natomiast dla potencjalnego czytelnika może być to problemem. Podobnie w przypadku zdjęć TEM brak skali na zdjęciach dyfrakcyjnych pozwalających na weryfikację rozwiązanych dyfrakcji.

Pytania dotyczące pracy:

1) Podczas modelowania składu chemicznego skupiono się na roli C, Si, Mn wskazując że krytycznym aspektem w kontekście plastyczności stopu jest zapewnienie stabilności austenitu szcążkowego z zaznaczeniem, że osiąga się ją poprzez obniżenie temperatury Ms. W kontekście projektu składu chemicznego eksperymentalnego stopu należy zadać pytanie, jaki wpływ mają pozostałe pierwiastki na mikrostrukturę oraz właściwości użytkowe stopu? Na jakiej podstawie wybrano końcowy skład chemiczny?

2) Dlaczego nie zastosowano skaningowej mikroskopii elektronowej z mikroanalizą (EDS bądź WDS) do oceny niejednorodności mikrostruktury?

- 3) Żadna łopatką z nowego materiału nie uległa uszkodzeniu. Jak w takim przypadku oceniano okres żywotności łopatek?
- 4) Łopatką zużywają się głównie na krawędziach natarcia, czy rozważano ich przeprojektowanie, tak aby skompensować szybsze zużycie?
- 5) W przemyśle spotykałem łopatką wirników kulownic wykonane ze staliw Hadfielda. Czy ten materiał był kiedyś rozważany w aplikacji? Czy można ocenić jak wyglądałby koszt takiego rozwiązania w porównaniu ze stosowanym obecnie zoptymalizowanym materiałem?
- 6) Jakie były parametry zalewania formy? Jak wpływają na uzyskiwane parametry użytkowe odlewu. Jak się różnią od innych poprzednio stosowanych materiałów?

Podsumowanie.

Praca przedstawia rzadko spotykane w polskich firmach przemysłu ciężkiego podejście, łączące ze sobą badania przemysłowe z naukową analizą problemu oraz wyników. Poruszony jest aktualny temat poprawy właściwości użytkowych materiałów metalicznych w aspekcie projektowania nowych materiałów i ich przetwórstwa.

Pomimo że praca zawiera szereg błędów i nieścisłości w metodologii i opisie wyników, jednakże osiągnięto założoną poprawę parametrów użytkowych w odniesieniu do zużycia abrazyjnego. Przeprowadzone badania rozszerzają również stan wiedzy na temat możliwości wytwarzania staliw ze strukturą zbliżoną do bainitycznej i mam nadzieję przyczyniają się do wzrostu "know-how" odlewni. Nie bez znaczenia jest również transfer wiedzy ze środowiska naukowego do przemysłu oraz w stronę odwrotną przyczyniający się do poprawy wzajemnego zrozumienia w aspektach działalności przemysłowej i naukowej.

Należy mieć świadomość, że czym innym są testy na próbkach laboratoryjnych o masie rzędu pojedynczych gramów a czym innym na komponentach produkcyjnych o relatywnie dużych gabarytach. W przypadku przemysłowym ograniczenia stawiane przez fizyczne prawa wymiany ciepła oraz dynamikę procesów przemysłowych znacząco ograniczają możliwości projektowe w obszarze obróbki cieplnej. Dodatkowo badania utrudnia fakt występowania niejednorodności materiału występujących w całej objętości produktu, zmienne warunki wytwarzania (związane z dużą skalą testów) czy chociażby czynnik ludzki w postaci operatorów linii technologicznej. W tym celu kluczowe znaczenie ma fakt wykonania badań przemysłowych na realnych komponentach w warunkach eksploatacyjnych bądź najbardziej do nich zbliżonej formie.

Problemy z uzyskaniem struktury bainitycznej nie jest w tym przypadku czynnikiem decydującym o wartości pracy, jako że nie każda teza, nawet zweryfikowana pozytywnie w warunkach laboratoryjnych czy też budowy prototypu, może być obroniona w produkcyjnych warunkach przemysłowych.

Doktorant podjął się opracowania oryginalnej technologii która w efekcie znacząco poprawiła parametry eksploatacyjne wyrobów. Scharakteryzowana została również mikrostruktura uzyskanych materiałów z identyfikacją składowych dających synergiczne znaczną poprawę właściwości użytkowych komponentów. Zdobyta wiedza daje też podstawę do dalszej

optymalizacji technologii w ramach której świadomie będzie można modyfikować udział poszczególnych elementów składowych mikrostruktury, uzyskując możliwość zmiany końcowych parametrów wyrobu.

Rozprawa doktorskiej prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa, wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora jak również stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego w tytule problemu.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określonej w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Tomasz Polunski

