

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

Gliwice, 10 sierpień 2019 r.

OPINIA O PRACY DOKTORSKIEJ

zatytułowanej:

Projektowanie i badania własności wieloskładnikowych mosiądzów Cu-Zn-Ni-Si przeznaczonych na cele elektroenergetyczne

Autor: mgr inż. Szymon Kordaszewski

Wydział Metali Nieżelaznych
Katedra Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych
AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
im. Stanisława Staszica
KRAKÓW

1. Krótka charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do zaopiniowania praca doktorska stanowi opracowanie zagadnień sprecyzowanych w tytule pracy. Praca składa się z 10 rozdziałów oraz Aneksu zawartych na 277 stronach. Zawiera 239 pozycji bibliograficznych, 235 złożonych rysunków, 68 tabel, 7 wzorów oraz Aneksu zawierającego 24 rysunki i 3 tabele.

Zasadniczą część pracy poprzedza spis treści. W rozdziale **pierwszym** scharakteryzowany został układ rozprawy oraz krótka charakterystyka rozdziałów.

W rozdziale **drugim** zaprezentowana została analiza stanu zagadnień powiązanych z tematem rozprawy doktorskiej, a dotyczących opracowania nowego materiału na elementy osprzętu trakcyjnego dla linii tramwajowych i kolejowych, korzystniejszego od obecnie stosowanych brązów aluminiowych BA1032 oraz brązów krzemowych BK331 odlewanych grawitacyjnie.

W oparciu o dane literaturowe, badania własne oraz przytoczone rozważania Autor sformułował tezę rozprawy doktorskiej w rozdziale **trzecim**.

Jako kryterium oceny wyników badań Autor przyjął porównanie charakterystyk własności użytkowych nowego, utwardzanego wydzieleniowo mosiądzu z zespołem cech eksploatacyjnych stosowanego obecnie materiału bazowego Cu-Zn (bez dodatków stopowych).

W rozdziale **czwartym** zawarty został cel i ogólny zakres pracy. Koncepcję rozwiązania problemu badawczego polegającą na wprowadzeniu do komercyjnego stopu CuZn37 dodatków stopowych niklu i krzemu zawarta została w **rozdziale piątym**.

W oparciu o temat rozprawy, dokonany przegląd literaturowy, rozpoznane ograniczenia

i występujące pytania badawcze jak też tezę pracy, w **rozdziale szóstym** przedstawiony został program badań.

W **rozdziale siódmym** opisane i zamieszczone zostały procedury i urządzenia badawcze, obejmujące:

- Badania metalurgiczne
- Badania nad doborem parametrów obróbki cieplnej stopów Cu-Zn-Ni-Si
- Badania nad odkształcalnością stopów Cu-Zn-Ni-Si
- Realizację procesu odlewania ciągłego stopów CuZn37 i CuZn37Ni1Si0,5
- Badania nad kształtowaniem cech użytkowych stopu CuZn37Ni1Si0,5 w procesach obróbki cieplnej odlewów ciągłych, przeróbki plastycznej odlewów ciągłych oraz obróbki cieplnej materiałów odkształconych plastycznie
- Badania własności fizykochemicznych stopu CuZn37Ni1Si0,5 w różnych stanach.

Natomiast w **rozdziale ósmym** zawarte zostały wyniki badań i ich analiza, obejmujące:

- Badania wstępne
- Badania parowania cynku
- Badania nad syntezą metalurgiczną stopów Cu-Zn-Ni-Si
- Badania nad doborem parametrów obróbki cieplnej stopów Cu-Zn-Ni-Si
- Badania odkształcalności stopów Cu-Zn-Ni-Si
- Badania nad procesem odlewania ciągłego stopów CuZn37 i CuZn37Ni1Si0,5
- Badania nad kształtowaniem cech użytkowych stopu CuZn37Ni1Si0,5 w procesach przeróbki plastycznej i obróbki cieplnej
- Badania odporności stopów CuZn37 i CuZn37Ni1Si0,5 na korozję naprężeniową
- Badania mikrostruktury stopów CuZn37 i CuZn37Ni1Si0,5

Merytoryczne i krótkie podsumowanie wyników pracy Autor zawarł w **rozdziale dziewiątym**. Osiągnięte rezultaty, w ujęciu syntetycznym zawarte zostały we wnioskach w **rozdziale dziesiątym**.

Krótką charakterystykę opracowanego osprzętu, jego wyniki badań oraz technologię produkcji wraz z dokumentacją dopuszczającą do stosowania nowy osprzęt ze stopu CuZn37Ni1Si0,5 wraz z referencjami Autor rozprawy umieścił w **Aneksie**.

Rozprawę doktorską zamyka **rozdział jedenasty**, zawierający spis literatury.

2. Ocena rozprawy doktorskiej

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej jest ściśle powiązana z nurtem badań rozwojowych obejmującym transport tramwajowy oraz kolejowy, a w szczególności górne sieci trakcyjne. Rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną związane z prowadzoną oraz zamierzoną modernizacją transportu wymusza konieczność poszukiwania nowych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych spełniających wymagania postępujących technologii.

Oceniana rozprawa wpisuje się w ogólne trendy rozwoju nowych materiałów oraz nowych wyrobów o wysokim zespole własności użytkowych. Wykonana praca doktorska ma charakter badawczo-doświadczalny i dotyczy opracowania nowego, utwardzalnego wydzieleniowo stopu na bazie mosiądku, technologii jego wytwarzania i przetwarzania zapewniającej osiągnięcie szerokiej i pożądanej charakterystyki własności użytkowych

wymaganych od elementów osprzętu trakcyjnego dla sieci tramwajowych i kolejowych, korzystniejszych od aktualnie stosowanych.

We wprowadzeniu oraz analizie stanu zagadnienia zebrana została znaczna część aktualnego stanu wiedzy dotycząca podjętej tematyki badawczej. Od nowych materiałów na osprzęt linii tramwajowych i kolejowych, jak stwierdza Autor, oczekuje się wyższych własności użytkowych, a w szczególności wyższych własności mechanicznych oraz konduktywności elektrycznej.

W oparciu o dane literaturowe i katalogowe Autor rozprawy zestawił wybrane zespoły własności mechanicznych i elektrycznych podstawowych materiałów na cele elektryczne.

Omówiona została charakterystyka i budowa sieci trakcyjnych oraz systemów ich zasilania. Szczegółowo przedstawione zostały pojawiające się problemy eksploatacyjne sieci trakcyjnych i wynikające stąd potrzeby ich przeciwdziałania, szczególnie w odniesieniu do osprzętu sieci trakcyjnych obejmujących uchwyty, złączki, zaciski, przewody jezdne oraz liny nośne. W ogólnym ujęciu osprzęt ten Autor podzielił na trzy podstawowe grupy:

- osprzęt przewodzący, przenoszący obciążenia elektryczne,
- osprzęt nośny, przenoszący obciążenia mechaniczne,
- osprzęt nośno-przewodzący, przenoszący obciążenia mechaniczne i elektryczne

Ze względu na podjęty temat rozprawy Autor wyłączył z dalszych prac osprzęt przenoszący obciążenia mechaniczne, gdyż wytwarzany jest głównie z różnych gatunków stali i ceramiki (izolatory). Stąd dokonany został przegląd materiałów mogących przenosić obciążenia elektryczne oraz mechaniczne i elektryczne, gdzie powszechnie stosowane są stopy miedzi. Dokonane rozeznanie warunków pracy sieci i osprzętu prowadzi Autora dysertacji do zestawienia podstawowych cech eksploatacyjnych dla projektowanych materiałów:

- niskiej rezystancji przejścia,
- wysokiej siły wyślizgu,
- wysokich własności wytrzymałościowych,
- wysokiej konduktywności elektrycznej,
- wysokiej odporności cieplnej,
- wysokiej odporności na pełzanie,
- niskiej masy własnej,
- wysokiej odporności korozyjnej,
- efektywności ekonomicznej.

W oparciu o te kryteria, na przewody jezdne i liny nośne mogą być stosowane wysoko przewodzące (o konduktywności elektrycznej od 45 do 56 MS/m) stopy Cu-Ag, Cu-Mg oraz miedź ETP o odpowiednim stopniu umocnienia. Materiały te mogą być również wykorzystane dla kolei wysokich prędkości.

Na osprzęt nośno-przewodzący Autor wyróżnia dwie grupy stopów, jedną o konduktywności elektrycznej od 20 do 30 MS/m, którą stanowią miedzionikle, w szczególności stop CuNi2Si odlewany w sposób ciągły i kuty matrycowo oraz drugą grupę stopów o niższej konduktywności elektrycznej od 5 do 15 MS/m obejmującą brązy aluminiowe, brązy krzemowe i mosiądze odlewane grawitacyjnie. Jednak mosiądze wykazują skłonność do korozji naprężeniowej, co jest cechą niepożądaną.

Dokonany bardzo szeroki przegląd materiałów do zastosowań na elementy

konstrukcyjne górnej trakcji sieci doprowadził Autora do konkluzji, że w transporcie kolejowym istnieją już stopy miedzi grupy CuNiSi stosowane do wytwarzania osprzętu nośno-przewodzącego, które cechują się wysokimi zespołami własności użytkowych i spełniają w pełni funkcje w sieciach o znacznych poborach mocy i wysokich prędkościach. Stopy te nie mają jednak odpowiednika w sieciach o niskiej obciążalności mechaniczno-prądowej jak sieć tramwajowa, czy sieci o prędkości do 160 km/godz.

W fakcie tym tkwi geneza rozprawy doktorskiej prowadząca do opracowania nowego materiału o korzystniejszych własnościach użytkowych od stosowanych obecnie oraz spełniającego warunki przepisów wewnętrznych PKP Polskich Linii Kolejowych S.A. jak również Izby Gospodarczej Komunikacji Miejskiej.

Spełnienie tych wymagań sprowadza się, jak stwierdza Autor, do opracowania materiału, który posiadałby niską cenę, byłby łatwo przetwarzalny oraz możliwy do odzysku w procesach recyklingu, a przy tym odznaczający się odpowiednimi własnościami mechanicznymi, szczególnie wyższą konduktywnością elektryczną od stosowanego brązu aluminiowego BA1032 i brązu krzemowego BK 331. Kolejne wymaganie dotyczące minimalnej 3 mm grubości ścianki elementów wynika z konieczności zachowania bezpieczeństwa podczas eksploatacji sieci. Wymaganie to stanowi trudne wyzwanie dla zakładanej koncepcji zmniejszenia wymiarów elementów konstrukcyjnych obecnie stosowanych, a tym samym zmniejszenia masy sieci przy zachowaniu jej wysokiej sprawności.

W oparciu o dokonane rozeznanie Autor wymienia trzy grupy stopów charakteryzujących się pożądanymi własnościami użytkowymi jak miedź stopowa, miedzionikle, *a szczególnie mosiądze, które są podatne do przeróbki plastycznej na gorąco i na zimno*. Cecha ta sprzyja wytwarzaniu elementów osprzętu także o wysokiej jakości powierzchni oraz geometrii.

Użycie mosiądzów, jak stwierdza Autor, wydaje się być korzystne również ze względu na elektryczny charakter pracy (zapewnianie dobrego styku poszczególnych elementów sieci, odpowiedni poziom rezystancji zestykowej) oraz ze względu na mechaniczny charakter pracy (zapewnienie odpowiedniego poziomu siły wyslizgu oraz nośności). Wymaga to jednak, ze względu na długotrwały okres pracy, umocnienie osnowy mosiężnej dodatkami stopowymi, także ze względu na zjawisko korozji naprężeniowej.

W oparciu o dane literaturowe, badania własne oraz przytoczone, wybrane rozważania, Autor sformułował tezę rozprawy doktorskiej w następującej formie:

Dodatek niklu i krzemu do mosiądzów stwarza podstawę do wytworzenia nowej generacji utwardzanych wydzieleniowo stopów Cu-Zn, których własności można kształtować na drodze klasycznej obróbki cieplno-plastycznej przez odpowiedni dobór temperatury i wielkości odkształcenia.

Do zaproponowania niklu i krzemu jako dodatków stopowych do mosiądzu CuZn37 posłużyły Autorowi dane literaturowe z których wynikało, że stop z tymi dodatkami może podlegać procesowi utwardzania wydzieleniowego, gdyż w odpowiednich warunkach w osnowie mosiądzu może się rozpuszczać zarówno nikiel jak i krzem oraz może powstawać związek międzymetaliczny Ni₂Si

Jako kryterium oceny Autor przyjął porównanie charakterystyk własności użytkowych nowego, utwardzanego wydzieleniowo mosiądzu z zespołem cech eksploatacyjnych materiału bazowego CuZn37 (bez dodatków stopowych).

Celem pracy było opracowanie nowego stopu, technologii jego wytwarzania oraz badania własności technologicznych oraz użytkowych dla różnych stanów umocnienia z myślą o jego zdolności aplikacyjnej głównie na elementy osprzętu tramwajowej oraz kolejowej sieci trakcyjnej.

Zakres pracy w ogólnym zarysie dotyczył opracowania założeń technologicznych, w tym także ekonomicznych. Z tego powodu jako zasadniczego materiału wsadowego do wytwarzania materiału badawczego użyto odpowiednio klasyfikowanych odpadów (złomu) z mosiądzu CuZn37 oraz w odpowiedniej postaci i czystości chemicznej dodatki stopowe (Ni i Si).

Przyjęty zakres pracy obejmował opracowanie założeń technologicznych topienia i odlewania grawitacyjnego oraz wytworzenie 42 stopów CuZn37NiSi o różnych stężeniach dodatków stopowych Ni i Si oraz opracowanie procedur przygotowania próbek, parametrów obróbki cieplej, wykonanie pomiarów własności mechanicznych i elektrycznych, opracowanie wyników badań, dokonanie wyboru najbardziej odpowiedniego stopu.

Po wyborze stopu kolejne prace ukierunkowane zostały na badania prowadzące do opracowania technologii topienia i odlewania ciągłego nowego materiału (stopu) oraz jego przeróbki plastycznej w procesach kucia matrycowego na gorąco i przeróbki plastycznej na zimno w procesie ciągnięcia oraz dobór optymalnych warunków obróbki cieplnej nowego stopu zarówno po topieniu i ciągłym odlewaniu, jak też materiałów poddanych przeróbce plastycznej na gorąco (kucie) oraz na zimno (ciągnięcie).

Ostatni etap polegał na przeprowadzeniu badań własności użytkowych na próbkach po zastosowaniu wielowariantowych schematów technologicznych, ich opracowaniu oraz sformułowaniu wniosków końcowych

Dla właściwego przebiegu programu badań Autor dysertacji opracował określone procedury i odpowiednie metody badawcze oraz wykorzystał dostępną aparaturę i urządzenia badawcze.

Prace badawczo-eksperymentalne Autor rozpoczął od wykonania wstępnych badań dla pilotażowych stopów CuZn37, CuZn37Ni0,5, CuZn37Si0,5 oraz CuZn37Ni0,5Si0,5 topionych w tyglu grafitowym w piecu oporowym, obejmujące zawartość składników stopowych, dodatków stopowych oraz ogólny poziom zanieczyszczeń. Wykonane zostały także pomiary konduktywności elektrycznej i twardości dla tych stopów w stanie po odlewaniu, po przesycaaniu, po starzeniu dla parametrów procesowych opracowanych w programie badań.

Analizując otrzymane wyniki Autor stwierdził, że stop CuZn37 z dodatkiem niklu oraz stop CuZn37 z dodatkiem krzemu nie podlegały procesowi umacniania wydzieleniowego, (co było do przewidzenia). Jedynie stop CuZn37Ni0,5Si0,5 wykazał możliwość kształtowania własności użytkowych na drodze umacniania wydzieleniowego.

Wykonane badania porównawcze parowania cynku oraz potwierdzone osiągnięcie zadawalającego poziomu dodatków stopowych (niklu i krzemu) doprowadziły Autora do konkluzji, że osiągnięty został zadawalający poziom zawartości dodatków stopowych dla temperatury topienia 1150⁰C i czasu topienia 1,5 godziny, zaś wielkość strat cynku dla tych parametrów wyniosła około 3,2%.

Otrzymane wyniki badań pilotażowych nie były wystarczająco zadawalające i skłoniły Autora do usprawnienia procesu wytwarzania stopów przez zastosowanie topienia w piecu indukcyjnym. Dla tego wariantu technologii wystarczająca okazała się temperatura 1130⁰C

i czas topienia 30 minut, które to parametry zapewniły osiągnięcie zamierzonej zawartości składników i dodatków stopowych, niskiego poziomu sumarycznych zanieczyszczeń (0,07%mas) oraz strat cynku na poziomie około 2%.

W oparciu o wyniki tych badań wykonana została seria 42 wytopów stopu CuZn37NiSi o różnych stężeniach dodatków stopowych Ni (0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 i 1,1 % mas) oraz Si (0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 i 0,6 % mas), które stanowiły materiał do wykonania wnikliwych i szerokich badań podstawowych cech użytkowych dla tej serii wytworzonych stopów.

Szczegółowe badania składu chemicznego potwierdziły, że zawartości składników i dodatków stopowych oraz łączna zawartość zanieczyszczeń mieściła się w oczekiwanych zakresach, zgodnych z wymogami odpowiednich norm.

Problem badawczy pojawił się w doborze warunków obróbki cieplej polegającej na przesycaniu i starzeniu wytworzonych stopów, który Autor oparł na wykorzystaniu metody skaningowej kalorymetrii różnicowej (DSC) dla dobrania odpowiedniej temperatury przesycania i starzenia.

Przeprowadzone badania porównawcze krzywych kalorymetrycznych dla stopu odniesienia CuZn37 w stanie po odlewaniu oraz wybranego świadomie stopu CuZn37Ni1Si0,5 pozwoliły Autorowi stwierdzić, że *najbardziej odpowiednią temperaturą przesycania powinna być temperatura 700⁰C i czas 5 godzin*. Dla tej temperatury wystąpił najbardziej wyrazisty pik na krzywej kalorymetrycznej w zakresie temperatury od 380⁰C do 430⁰C. Próbką z mosiądzu CuZn37 w stanie odlanym nie wykazywała żadnych przemian w tym zakresie temperatury (co było także do przewidzenia).

Mając na uwadze otrzymane rezultaty badań oraz fakt, że do badań wybrany został jeden stop (choćby reprezentatywny) z 42 stopów, Autor intuicyjnie poszerzył zakres temperatury starzenia od 350⁰C do 450⁰C. Drugim, istotnym parametrem pozostał czas starzenia.

Aby właściwie opracować warunki starzenia przeprowadzone zostały bardzo szerokie badania zmian twardości i konduktywności elektrycznej dla 42 stopów po starzeniu w temperaturze 350⁰C, 400⁰C i 450⁰C w czasie 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 15 i 20 godzin. Wyniki badań twardości i elektrycznej konduktywności dla przyjętych warunków starzenia opracowane zostały dla lepszej przejrzystości w formie graficznej, ujmujące zmiany twardości i konduktywności elektrycznej w zależności od czasu starzenia dla temperatury 350⁰C, 400⁰C i 450⁰C.

Najwyższy poziom twardości 160 HV10 osiągnięto dla stopów CuZn37Ni0,9Si0,5, CuZn37Ni1Si0,5 i CuZn37Ni1,1Si0,6 po 4 godzinach starzenia w temperaturze 350⁰C i 400⁰C.

Dla stopów CuZn37Ni0,9Si0,5 i CuZn37Ni1Si0,5, dla tych samych warunków starzenia osiągnięto konduktywność elektryczną na poziomie od 12,5 do 12,7 MS/m, podczas gdy aktualnie używane materiały (brązy aluminiowe i brązy krzemowe) osiągają wartości od 3 do 7 MS/m.

*W oparciu o analizę SWOT jako najbardziej odpowiedni materiał wytypowany został stop **CuZn37Ni1Si0,5**.*

Kolejne kryterium przydatności badanych materiałów polegało na ocenie ich odkształcalności w próbie jednoosiowego ściskania oraz kucia matrycowego na gorąco w warunkach przemysłowych.

Najkorzystniejsze rezultaty otrzymano dla stopu **CuZn37Ni1Si0,5**, który w pełni spełniał wymagane zespoły własności mechanicznych i elektrycznych oraz stwarzał zachętę do

zastosowań przemysłowych.

Wykonany zakres badań weryfikujących nowy stop jako materiał docelowy do zastosowań przemysłowych otworzył kolejny etap badań nad opracowaniem technologii wytwarzania nowego, innowacyjnego stopu CuZn37Ni1Si0,5 w oparciu o proces odlewania ciągłego.

Badania te realizowano w warunkach laboratoryjnych na Wydziale Metali Nieżelaznych AGH, gdzie zgodnie z opracowanymi procedurami ustalano parametry technologiczne procesu odlewania ciągłego obejmujące zakres temperatury topienia, wielkość posuwu urządzenia wyciągowego, czas postoju, temperaturę wody chłodzącej na wejściu i wyjściu z krystalizatora, wielkość przepływu wody chłodzącej w układzie chłodzenia krystalizatora oraz w układzie chłodzenia wtórnego.

W oparciu o opracowane parametry odlano w sposób ciągły odpowiednią ilość prętów z nowego stopu o średnicy (14mm) i zadanej długości. Materiał ten posłużył do otrzymania odpowiedniej ilości próbek niezbędnych do wykonania koniecznego, z punktu widzenia technologicznego szerokiego i rzetelnego zakresu badań wybranych własności użytkowych. W szczególności badaniami objęto:

- a) *Próbki otrzymane z odlewanych prętów w stanie surowym i poddanych obróbce cieplnej.*

Jako materiał odniesienia przyjęto mosiądz CuZn37 w stanie odlanym i wyżarzonym w temperaturze 700°C przez 5 godzin. Stop CuZn37Ni1Si0,5 był homogenizowany w temperaturze 700°C przez 5 godzin i ostudzony w wodzie, natomiast temperatura starzenia wynosiła 400°C , a czas starzenia 4 godziny. Dla przykładu, otrzymano następujące rezultaty:

Materiał	Stan	R_m , MPa	$R_{0,2}$, MPa	A_{50} , %	γ , MS/m
CuZn37	odlew	306	110	46	15,2
	wyżarzanie	309	95	61	14,53
CuZn37Ni1Si0,5	odlew	403	206	31	11,27
	przesycanie	432	165	44	11,29
CuZn37Ni1Si0,5	przesycanie i starzenie	462	296	31	12,81

Otrzymano korzystniejsze własności mechaniczne dla stopu CuZn37Ni1Si0,5 zarówno po odlewaniu, jak też przesycaniu oraz przesycaniu i starzeniu w odniesieniu do mosiądzu CuZn37 . Zanotowano natomiast nieznaczny spadek konduktywności elektrycznej w porównaniu do stopu odniesienia CuZn37 .

- b) *Próbki otrzymane z odlewanych prętów poddane kuciu matrycowemu i obróbce cieplnej.*

Badane porównawczo materiały były kute w temperaturze 600°C , 700°C i 800°C . Dla tego wariantu technologicznego na wszystkich próbkach dokonywano pomiarów twardości HV10 i konduktywności elektrycznej. W badaniach tych potwierdzono, że odpowiednią temperaturą kucia jest temperatura 700°C . Dla optymalnego doboru parametrów starzenia odkuty stop CuZn37 wyżarzano, zaś stop

CuZn37Ni1Si0,5 starzono w temperaturze 350⁰C, 400⁰C i 450⁰C w czasie 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4 i 5 godzin po czym dokonano pomiarów twardości oraz konduktywności elektrycznej. Najkorzystniejszy poziom twardości około 200 HV10 wykazywały próbki starzone w temperaturze 400⁰C w czasie od 0,5 do 2,5 godziny. Dla tych warunków konduktywność elektryczna wynosiła około 12,45 MS/m. Otrzymane wyniki pozwoliły Autorowi na przyjęcie jako najbardziej odpowiednich parametrów, temperatury 400⁰C i czasu starzenia 1,5 godziny. Dla dalszych celów technologicznych zestawione zostały charakterystyki rozciągania próbek CuZn37 i CuZn37Ni1Si0,5 w stanie odkutym, a dla stopu CuZn37Ni1Si0,5 w stanie odkutym i starzonym w temperaturze 400⁰C przez 1,5 godziny. Dla tych parametrów obróbki cieplnej, dla odkuwki kutej i starzonej ze stopu CuZn37Ni1Si0,5 otrzymano $R_m = 554$ MPa; $R_{0,2} = 525$ MPa; $A_{50} = 6,7\%$ i konduktywność elektryczną 11,54 MS/m.

c) *Próbki otrzymane z odlewanych prętów poddane procesowi ciągnienia i obróbce cieplnej.*

Materiał wyjściowy do tych badań uzyskano w kilku etapach. W pierwszym etapie odlane pręty ze stopu odniesienia CuZn37 i stopu CuZn37Ni1Si0,5 po przeciąganiu do średnicy 2,6 mm zostały wyżarzone, a następnie ciągnięte ze średnicy 2,6 mm do średnicy 2,4 mm, następnie ze średnicy 2,4 mm do średnicy 2,2 mm, a ze średnicy 2,2 mm do średnicy 2,0 mm.

Wyniki tych badań zestawione zostały w ujęciu tabelarycznym i graficznym oraz poddane analizie, gdzie Autor wykazał wpływ zastosowanego stopnia umocnienia na zmiany wytrzymałości, granicy plastyczności, wydłużenia i konduktywności elektrycznej oraz występujące różnice własności tych stopów.

Kolejny etap badań obejmował opracowanie zależności pomiędzy zmianami twardości a temperaturą (300⁰C, 350⁰C i 400⁰C) i czasem starzenia (15, 30, 45, 60, 90, 120, 180 i 240 minut) dla najbardziej umocnionego stopu CuZn37Ni1Si0,5 przeciąganego ze średnicy 2,6 mm do średnicy 2,0 mm.

Otrzymane wyniki badań doprowadziły Autora do wniosku, że odpowiednim czasem starzenia jest 60 minut, również ze względu na wyniki badań zmian konduktywności elektrycznej w zależności od przyjętej temperatury i czasu starzenia.

Zestawione wyniki badań w ujęciu tabelarycznym i graficznym obejmujące zmiany wytrzymałości, umownej granicy plastyczności, wydłużenia i konduktywności elektrycznej dla przyjętych warunków starzenia oraz ich analiza prowadzą Autora do stwierdzenia, że *nowy innowacyjny stop CuZn37Ni1Si0,5 odlewany w sposób ciągły stwarza bardzo szerokie możliwości sterowania własnościami mechanicznymi na drodze doboru odpowiednich parametrów przesyłania i starzenia, wielkości odkształcenia na gorąco i na zimno przy zapewnieniu odpowiedniego poziomu konduktywności elektrycznej.*

Jak wynika z dokonanej przez Autora analizy, nie występuje na rynku metali materiał na osnowie mosiądzu o tak wysokim zespole własności mechanicznych i elektrycznych.

Ze względu na znaczną podatność mosiądzów do korozji naprężeniowej oraz świadomość Autora, że niekorzystna cecha tej grupy stopów mogłaby wykluczyć, względnie ograniczyć zastosowanie innowacyjnego stopu mosiądzu z dodatkami niklu i krzemu,

wykonane zostały porównawcze badania odporności korozyjnej dla materiałów o znaczeniu technologicznym. Badaniami tymi objęto stop odniesienia CuZn37 i nowy stop CuZn37Ni1Si0,5 otrzymane w odpowiednich stanach (wyżarzony, kuty, umocniony, przesycony i starzony, umocniony i starzony, kuty i starzony). Odpowiednio przygotowane próbki poddawano próbie amoniakalnej bez użycia i z użyciem obciążenia. Do oceny skutków korozji posłużono się badaniami mikrostruktury przy użyciu mikroskopii świetlnej. Spośród zrealizowanych wariantów badań jedynie mosiądz odniesienia CuZn37 w stanie umocnienia wykazał wysoką podatność do pękania korozyjnego, którego przełomy poddano badaniom fraktograficznych przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej oraz detektora EDS. Natomiast stop CuZn37Ni1Si0,5 nie wykazywał tendencji do pękania korozyjnego w żadnym z badanych stanów.

Uzasadnienia na otrzymane zespoły własności Autor poszukiwał także w badaniach mikrostruktury przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) oraz analizy składu chemicznego w mikroobszarach. Stwierdzono zasadnicze różnice pomiędzy obrazami mikrostruktury stopu odniesienia CuZn37 oraz innowacyjnego stopu CuZn37Ni1Si0,5, gdzie na powierzchni zglądu wykonanego na próbce odlewanej w sposób ciągły poziomy zaobserwowano występowanie, bardzo drobnych, jasnych, w miarę równo rozmieszczonych nie zidentyfikowanych „wydzielen”, których nie obserwowano na zglądzie z mosiądzu CuZn37. *Dokonana przez Autora analiza na tym poziomie badań eksperymentalnych jest wystarczająca. Szczegółowe badania zachodzących mechanizmów umacniania w innowacyjnym stopie dla różnych wariantów technologicznych wymagałyby użycia bardziej subtelnych metod badawczych.*

Uzyskane wyniki badań doświadczalnych umożliwiły zastosowanie nowego innowacyjnego stopu CuZn37Ni1Si0,5 na osprzęt nośno-przewodzący sieci tramwajowych i kolejowych, który został opracowany wraz z technologią jego wytwarzania w zespole badawczym pracowników Akademii Górniczo-Hutniczej oraz firmy KUCA sp. z o.o. Innowacyjny materiał został poddany ochronie patentowej (P. 421140 oraz P. 421141), a opracowany **nowy osprzęt** sieci tramwajowej oraz kolejowej został wdrożony do produkcji. Kompleksowo zbadany w warunkach laboratoryjnych i poligonowych w sieciach trakcyjnych osprzęt uzyskał dopuszczenie do stosowania. Odpowiednią charakterystykę opracowanego osprzętu, jego wyniki badań oraz technologię produkcji wraz z dokumentacją dopuszczającą do stosowania nowy osprzęt ze stopu CuZn37Ni1Si0,5 wraz z referencjami Autor rozprawy zawarł w **Aneksie**

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

Podjęta przez Autora dysertacji doktorskiej tematyka badawcza oraz wynikający stąd bardzo szeroki i wielowątkowy interdyscyplinarny zakres badań nad doborem odpowiedniego do przeznaczenia materiału był uzasadniony oraz mieścił się w istotnym, aktualnym i innowacyjnym nurcie prac naukowo-badawczych.

Opracowany przez Autora bogaty przegląd literatury wskazuje na wiedzę i znajomość podjętej tematyki badawczej. Szczególnego podkreślenia wymaga rzetelnie wykonana analiza stanu zagadnienia, która doprowadziła Autora dysertacji do krytycznej konkluzji, iż pomimo

bogatej literatury naukowej i danych katalogowych brakuje wiedzy dotyczącej powiązań własności materiałowych z metodami ich wytwarzania i przetwarzania, szczególnie w odniesieniu do mosiądzów umacnianych wydzieleniowo. Brakuje także badań pozwalających na dokładną charakterystykę określonych zespołów własności użytkowych, możliwych do osiągnięcia w innowacyjnych procesach technologicznych.

Bardzo szeroki zakres pracy oraz jego opracowanie pozwoliło Autorowi na zaprezentowanie swojego bogatego „warsztatu naukowo-badawczego”, wiedzy i doświadczenia w prowadzeniu badań eksperymentalnych. O dojrzałości badawczej świadczyć może świadomość pewnych ograniczeń i utrudnień związanych z osiągnięciem odpowiedzi na pojawiające się pytania badawcze.

Oceniając otrzymane wyniki badań pragnę podkreślić znaczący wysiłek Autora we wnoszeniu swojej inwencji i własnych pomysłów zmierzających do osiągnięcia zamierzonego celu. Stąd opracowane zagadnienia zawierają w sobie zarówno aspekty poznawcze jak też użyteczne, a nawet dydaktyczne.

Szczególnego podkreślenia wymaga sprawne posługiwanie się warsztatem naukowo-badawczym oraz umiejętna interpretacja wyników badań, których rzetelność potwierdzana była innymi, adekwatnymi metodami badawczymi, w tym badaniami własności mechanicznych, konduktywności elektrycznej, badaniami kalorymetrycznymi, badaniami mikrostruktury, badaniami korozji naprężeniowej oraz badaniami cech technologicznych. Metody badawcze Autor dobrał odpowiednie i wystarczające do podjętej tematyki badawczej.

Osobiste odniesienie do otrzymanych wyników badań Autor zawarł w „Podsumowaniu”, stanowiącym merytoryczny przegląd osiągniętych rezultatów cechujących się dużą dozą obiektywizmu i rzetelności naukowej. W przekonującej formie zostały zaprezentowane wnioski dokumentujące podjęty temat i cel pracy, jak też dowiedzioną tezę rozprawy.

Mimo tych niekwestionowanych zalet, niestety, Autor nie uniknął licznych niezgrabności językowych, szczególnie w przypisywaniu zależnościom stochastycznym cech funkcji.

Podobnie, właściwiej byłoby użyć sformułowania „temperatura” zamiast wielokrotnie „temperatury”, „przez”, zamiast „poprzez”, „przeznaczonego” zamiast „dedykowanego”, „mikrostruktura” zamiast „struktura”, „konduktywność elektryczna” zamiast „przewodność elektryczna” etc.

Zasadnicza moja uwaga krytyczna odnosi się do zbyt dużej objętości pracy i wynikającej stąd przesadnej rozwlekłości, występującym powtórzeniom, gubieniem zasadniczego wątku badań. Zamieszczone rezultaty przejściowe, bardzo istotne z punktu widzenia rzetelności badań, rozpraszają główny nurt badań. Korzystniej byłoby większość rezultatów przejściowych, procedury badawcze, karty technologiczne oraz wiele innych, pomocniczych informacji zamieścić w załączniku do rozprawy.

Wkradła się też pewna nieścisłość w opisie zagadnień, dotyczących własności miedzi chromowej, klasycznego stopu umacnianego wydzieleniowo z dobrze opisanymi zjawiskami i procesami zachodzącymi w trakcie przesycania, starzenia, odkształcania na gorąco i na zimno po różnych wariantach obróbki cieplnej.

Brakuje też szerszego przeglądu jako odniesienia do stopów Cu z dodatkami niklu oraz krzemu.

W ramach moich uwag dyskusyjnych oczekuje odpowiedzi od Autora na wykazanie różnic i cech wspólnych zachodzących w procesach umacniania wydzieleniowego i dyspersyjnego oraz określenia zasadniczych parametrów określających dyspersję.

3. Wniosek końcowy

Zasygnalizowane przeze mnie uwagi nie obniżają mojej oceny pracy, którą bardzo wysoko oceniam, szczególnie za odwagę stawiania trudnych pytań i konsekwentnego szukania na nie odpowiedzi, także za ciekawy i nowatorski pomysł badawczy. Szczególnie pragnę podkreślić wyjątkowo efektywny i wdrożeniowy charakter rozprawy doktorskiej

Wielki trud i determinacja z jaką Autor starał się rozwiązać problem naukowo-badawczy oraz ogromna praca włożona w przygotowanie dysertacji doktorskiej muszą budzić szacunek. Teza rozprawy została dowiedziona, również i cel rozprawy został w pełni osiągnięty.

Mając na uwadze powyższe, stwierdzam, że w mojej opinii przedstawiona praca spełnia wymagania stawiane pracom 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. Wniosuję zatem o dopuszczenie Pana mgr inż. Szymona Kordaszewskiego do publicznej obrony przedstawionej pracy przed Radą Wydziału Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo-Hutniczej *im. Stanisława Staszica* w Krakowie

Iljuziewicz Rokowski