

Dr inż. Przemysław Fima
Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej
Polskiej Akademii Nauk
ul. Reymonta 25, 30-059 Kraków

Załącznik 2a - Autoreferat

1. Imię i Nazwisko.

Przemysław Fima

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

Magister inżynier
Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Metali Nieżelaznych, 2002
Tytuł pracy: Modelowanie pieca szybowego do wytopu kamienia miedziowego

Doktor nauk technicznych w dyscyplinie metalurgia
Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Metali Nieżelaznych, 2006
Tytuł rozprawy: Napięcie powierzchniowe i gęstość stopów Ag-Bi, Ag-Sn, Bi-Sn oraz Ag-Bi-Sn

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.

Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Polskiej Akademii Nauk
stanowisko: starszy specjalista
od 2007 do 2008

Instytut Odlewnictwa
stanowisko: adiunkt
od 2007 do 2010

Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Polskiej Akademii Nauk
stanowisko: adiunkt
od 2008

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego,

Cykl publikacji pt: „Napięcie powierzchniowe i zwilżalność ciekłych stopów”

b) (autor/autorzy, tytuł publikacji, rok wydania, nazwa czasopisma, tom, strony, Impact Factor za rok wydania, cytowania),

- A1 P. Fima (80 %), R. Nowak, N. Sobczak, *Effect of metal purity and testing procedure on surface tension measurements of liquid tin*. (2010) *Journal of Materials Science*, 45, 2009-2014, (2010 IF 1,859, cytowań: 7)
- A2 P. Fima (90 %), N. Sobczak, *Thermophysical Properties of Ag and Ag–Cu Liquid Alloys at 1098K to 1573K*. (2010) *International Journal of Thermophysics*, 31, 1165-1174, (2010 IF 0,750, cytowań: 8)
- A3 P. Fima, *Surface tension and density of liquid Sn-Cu alloys*. (2010) *Applied Surface Science*, 257, 468-471, (2010 IF 1,795, cytowań: 5)
- A4 P. Fima, *Surface tension and density of liquid Sn-Ag-Cu alloys*. (2012) *International Journal of Materials Research*, 103, 1455-1461, (2012 IF 0.691, cytowań: 2)
- A5 P. Fima (50 %), T. Gancarz, J. Pstruś, K. Bukat, J. Sitek, *Thermophysical properties and wetting behavior on Cu of selected SAC alloys*. (2012) *Soldering and Surface Mount Technology*, 24, 71-76, (2012 IF 0,816, cytowań: 4)
- A6 P. Fima (70 %), W. Gąsior, A. Sypień, Z. Moser, (2010) *Wetting of Cu by Bi-Ag based alloys with Sn and Zn additions*. *Journal of Materials Science*, 45, 4339-4344, (2010 IF 1,859, cytowań: 11)
- A7 P. Fima (70 %), T. Gancarz, J. Pstruś, A. Sypień, *Wetting of Sn-Zn-xIn (x = 0.5, 1.0, 1.5 wt%) alloys on Cu and Ni substrates*, (2012) *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21, 595-598, (2012 IF 0,915, cytowań: 2)
- A8 P. Fima (70 %), K. Berent, J. Pstruś, T. Gancarz, *Wetting of Al pads by Sn-8.8Zn and Sn-8.7Zn-1.5(Ag,In) alloys*. (2012) *Journal of Materials Science*, 24, 8472-8476, (2012 IF 2,163, cytowań: 1)
- A9 P. Fima (80 %), J. Pstruś, T. Gancarz, *Wetting and interfacial chemistry of SnZnCu alloys with Cu and Al substrates*, (2014) *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 1530-1535, (2013 IF 0.981, cytowań: 1)

c) omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora zajmowałem się badaniami napięcia powierzchniowego i zwilżalności stopów stosowanych jako zamienniki tradycyjnych stopów lutowniczych zawierających ołów. Motywacją prowadzonych na świecie badań nad *nowymi ekologicznymi stopami lutowniczymi* były zmiany w legislacji dotyczące stosowania substancji groźnych dla zdrowia człowieka i środowiska w produktach użytkowych. Między innymi Dyrektywa Komisji Europejskiej i Rady *Restriction of Hazardous Substances* (2002/95/EC) wprowadziła zakaz stosowania ołowiu w stopach lutowniczych stosowanych w elektronice użytkowej.

Od 2007 roku zatrudniony jestem w Instytucie Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN, gdzie m.in. uczestniczyłem jako wykonawca w realizacji powiązanych z tą tematyką projektów *Rozwijanie bazy SURDAT o pomiary lepkości i ocenę zwilżalności Cu lutami bezołowiowymi* [P5], *COST Action MP0602 – HISOLD – Advanced solder materials for high temperature applications*

[P3], *Zaawansowane materiały i technologie ich wytwarzania – ZAMAT* [P12]. Równolegle w latach 2007-2010 odbyłem w Centrum Badań Wysokotemperaturowych, kierowanym przez profesor Natalię Sobczak, w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie, staż podoktorski w ramach III edycji programu *Pol-Postdoc*. W trakcie stażu realizowałem projekt *Wpływ tlenu i dodatków stopowych na termofizyczne i fizykochemiczne właściwości stopów cyny* [P4].

Celem prowadzonych przeze mnie prac było:

- określenie wpływu składników stopowych (w tym o małych stężeniach) na napięcie powierzchniowe stopów z układu Sn-Ag-Cu oraz weryfikacja dostępnych danych literaturowych na drodze eksperymentalnej oraz obliczeń modelowych;
- określenie wpływu niewielkich stężeń dodatków stopowych na zwilżalność miedzi i innych metali przez ciekłe około eutektyczne stopy Sn-Ag-Cu oraz eutektyczne stopy Sn-Zn i Bi-Ag z dodatkami stopowymi.

Badania z realizacji projektu [P4], przedstawione w pracach [A1-A4] wykonane zostały przy użyciu kompleksu aparaturowego do wysokotemperaturowych badań właściwości powierzchniowych metali i stopów [N. Sobczak et al. (2008) *Mater. Sci. Eng. A* 459:43], który był w tym okresie unikalnym urządzeniem, jedynym, które w praktyce umożliwiało wykonywanie badań zgodnie z rekomendacjami założycieli komitetu *High Temperature Capillarity* [N. Eustathopoulos et al. (2005) *J. Mater. Sci.* 40:2271]. W początkowym etapie prac wykonano badania porównawcze dla 3 gatunków cyny (99,85; 99,96; 99,999%) różniących się nominalną zawartością zanieczyszczeń [A1]. Wykazały one, że zanieczyszczenia obniżają napięcie powierzchniowe cyny, przy tym nie zaobserwowano korelacji pomiędzy stężeniem zanieczyszczeń a wartością napięcia powierzchniowego tj. różnica pomiędzy cyną o zawartości zanieczyszczeń 0,04 % i 0,15 % jest mniejsza niż pomiędzy tą pierwszą a cyną o wysokiej czystości (suma zanieczyszczeń nie przekracza 0,001 %). W dalszych badaniach prowadzonych na cynie o najwyższej czystości zaobserwowano wpływ zaadsorbowanego na powierzchni tlenu na wartość napięcia powierzchniowego, który uwidacznia się w postaci krzywoliniowej zależności temperaturowej w trakcie wykonywania pomiaru przy stopniowo rosnącej temperaturze, a jest niewidoczny przy rozpoczynaniu pomiaru od temperatur wysokich i stopniowym jej obniżaniu. Było to możliwe dzięki prowadzeniu pomiaru w wysokiej próżni (do 10^{-8} mbar). W tych warunkach możliwe było prowadzenie analizy składu gazów reszkowych (produktów rozkładu wody i tlenków węgla), która wykazała, że ich ciśnienie jest w niskich temperaturach wyższe gdy pomiar rozpoczynany jest od niskiej temperatury, niż gdy pomiar rozpoczynany jest od temperatury wysokiej.

Istotną cechą metody kropli leżącej jest to, że jest to metoda oparta na analizie obrazu tj. zarejestrowanych w trakcie eksperymentu zdjęć kropli badanej cieczy, które są materiałem wyjściowym do dalszej obróbki i obliczeń. Począwszy od lat 60-tych, kiedy Maze i Burnet [C. Maze, G. Burnet (1969) *Surf. Sci.* 13:451] opublikowali algorytm i upublicznili pierwszy kod źródłowy programu umożliwiającego obliczanie napięcia powierzchniowego z wykorzystaniem komputera technika ta zyskuje na popularności. Danymi wejściowymi do programu Maze i Burnet był zestaw współrzędnych opisujących profil południkowy kropli. Równocześnie następował systematyczny

postęp w zakresie rozwoju oprogramowania. Już w latach 80-tych Rotenberg i współpracownicy [Y. Rotenberg et al. (1983) J. Colloid Interface Sci. 93:169] upublicznili algorytm pozwalający na szybsze obliczenia napięcia powierzchniowego przy większej dokładności, jednak nadal potrzebne było zastosowanie osobnego oprogramowania do obróbki obrazów tj. przetwarzania ich na zbiory współrzędnych. AstraView [L. Liggeri, A. Passerone (1989) High Temp. Techn. 7:82; M. Vivani (1999) ICFAM-CNR technical report] opracowana w Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per l'Energetica e le Interfasi (CNR-IENI) w Genui, udostępniona Instytutowi Odlewnictwa w ramach umowy o współpracy badawczej między tymi jednostkami, jest jednym z przykładów oprogramowania łączącego te dwie funkcjonalności w jednym. Analiza danych literaturowych napięcia powierzchniowego czystych metali zebranych przez Keene [B.J. Keene (1993) Int. Mater. Rev. 38:157] wskazuje na rozbieżności pomiędzy danymi różnych autorów. Źródłem tych rozbieżności jest m.in. stosowanie różnych metod pomiaru, różny stopień czystości metali. Jednocześnie można zauważyć, że różnice występują nawet w przypadku danych otrzymanych taką samą metodą dla metali o takiej samej czystości. W znacznym stopniu wytłumaczeniem tego jest różna zawartość tlenu w atmosferze, w której wykonywane są pomiary, jednak dane o zawartości tlenu są rzadko podawane przez autorów. Ponieważ metoda kropli leżącej jest współcześnie metodą opartą na komputerowej analizie obrazu można przypuszczać, że różnice w stosowanym oprogramowaniu również mogą odpowiadać za różnice w danych napięcia powierzchniowego. Żeby sprawdzić czy stosowanie różnego oprogramowania wpływa na wynik pomiaru, w oparciu o ten sam zestaw obrazów zarejestrowanych w trakcie jednego eksperymentu dla cyny o wysokiej czystości wykonano obliczenia napięcia powierzchniowego przy użyciu dwóch algorytmów, które wykorzystują różne oprogramowanie [A1]. Wykazały one, że różnica w wartości napięcia powierzchniowego wynikająca z innej obróbki obrazu jest rzędu kilku procent, jest jednak mniejsza niż różnica wynikająca ze stopnia czystości badanego metalu.

Porównanie danych własnych dla cyny o wysokiej czystości [A1] z nowszymi danymi innych autorów i z wartościami rekomendowanymi przez Keene [B.J. Keene (1993) Int. Mater. Rev. 38:157] wykazało dobrą zgodność wyników. Podobnie pomiary wykonane dla czystego srebra [A2] potwierdziły zgodność wyników własnych z danymi literaturowymi. Ze względu na wysoką temperaturę topnienia srebra pomiary prowadzono w znacznie wyższych temperaturach niż w przypadku cyny. Pomimo relatywnie niskiej prężności par srebra istniało ryzyko jego intensywnego parowania. Podstawowym warunkiem w pomiarach napięcia powierzchniowego jest to, żeby pomiar (rejestracja obrazów) odbywał się w warunkach równowagi termicznej i termodynamicznej. Zjawisko parowania jest w pomiarach napięcia powierzchniowego niepożądane gdyż może prowadzić do ubytku masy próbki, a w przypadku stopów do zmiany jej składu, a także do zmiany kontrastu obrazu w przypadku naporowywania na zimne powierzchnie wzierników od strony kamery i źródła światła. Ograniczenie zakresu badań do 300 °C powyżej temperatury topnienia srebra pozwoliło na wyeliminowanie tego zjawiska. Wykonane w tej samej pracy [A2] pomiary dla około eutektycznych stopów Cu-Ag wykazały ich zgodność z danymi innych autorów.

Przed wykonaniem badań dla stopów trójskładnikowych badano napięcie powierzchniowe stopów Sn-Cu [A3]. Należy podkreślić, że przedstawione [A3] wyniki pomiarów dla stopów o zawartości Cu poniżej 10 at.% były pierwszymi notowanymi w literaturze. Stwierdzono, że niewielki dodatek Cu do cyny nie wpływa w istotny sposób na wartość napięcia powierzchniowego, dopiero dla stopów o zawartości cyny poniżej 90 at.% obserwuje się wzrost napięcia powierzchniowego wraz z obniżaniem zawartości cyny. Spowodowane jest to silnym wzbogaceniem warstwy powierzchniowej stopów w składnik o niższym napięciu powierzchniowym (w tym wypadku cynę), co wynika z dążenia stopu do osiągnięcia minimum energii. Zależność temperaturowa napięcia powierzchniowego większości stopów [A3] ma charakter malejący liniowy za wyjątkiem stopu o zawartości 50 at.% cyny, dla których napięcie powierzchniowe w badanym zakresie temperatur rośnie wraz ze wzrostem temperatury. Zjawisko to, mimo rozbieżnych danych eksperymentalnych w literaturze [J. Lee (2004) Mater. Trans. 45:2864] wynika z istnienia dwóch przeciwstawnych tendencji. Pierwsza to opisane wyżej wzbogacenie warstwy powierzchniowej stopu w składnik o niższym napięciu powierzchniowym. Druga to następujące ze wzrostem temperatury zmniejszanie się różnicy pomiędzy składem warstwy powierzchniowej a składem roztworu. Z tego powodu napięcie powierzchniowe stopu w niskich temperaturach jest znacząco niższe niż wynikałoby to z nominalnej zawartości cyny. W wyższych temperaturach różnica pomiędzy składem warstwy powierzchniowej a składem wnętrza roztworu jest mniejsza, co przekłada się na wyższe napięcie powierzchniowe. Powyżej pewnej temperatury ponownie obserwuje się obniżanie napięcia powierzchniowego stopu wraz ze wzrostem temperatury.

Do badań stopów trójskładnikowych Sn-Ag-Cu [A4] wytypowano stopy z dwóch serii charakteryzujących się stałym stosunkiem zawartości Ag do Cu wynoszącym odpowiednio 1:1 i 7:3 (w ułamkach molowych) i różną zawartością cyny. Wyniki badań własnych dla stopów o zawartości Ag do Cu wynoszącej 1:1 są pierwszymi notowanymi w literaturze. Pomiary dla stopów o stałym stosunku Ag do Cu wynoszącym 7:3 wykonane zostały nieco wcześniej przez innych autorów metodą tensometryczną [Kaban et al. (2007) J. Non-cryst. Solids 353:3717]. Jednak wobec faktu, że zastosowana przez nich metoda w badaniach metali wykorzystywana jest bardzo rzadko istniała wątpliwość, czy otrzymane przez nich wyniki są wiarygodne biorąc pod uwagę zakres temperatur w jakich wykonywali pomiary. Wyniki badań własnych wykazały dobrą zgodność z danymi literaturowymi. Dla niektórych stopów obserwowano krzywoliniową zależność napięcia powierzchniowego od temperatury (np. Ag:Cu = 1:1 60 at.% Sn). Podobnie, jak ma to miejsce w przypadku stopów dwuskładnikowych zjawisko to spowodowane jest wzbogaceniem warstwy powierzchniowej w składnik o niższym napięciu powierzchniowym.

Istotnym elementem przedstawionych prac jest wykorzystanie modelowania do opisu zależności temperaturowych napięcia powierzchniowego i jego zmian ze składem stopów. W pracach poświęconym stopom dwuskładnikowym wykorzystano powszechnie stosowany model Butlera [J.A.V. Butler (1932) Proc. Roy. Soc. A 135:348]. Model ten wiąże napięcie powierzchniowe stopu z jego właściwościami termodynamicznymi umożliwiając przewidywanie napięcia powierzchniowego

w oparciu o dane gęstości i napięcia powierzchniowego czystych składników. W obliczeniach stosowano dane własne (otrzymane w trakcie realizacji projektu) dla czystego srebra i cyny, a dane dla miedzi zaczerpnięto z literatury. Dane termodynamiczne, niezbędne w obliczeniach, zaczerpnięto z bazy danych termodynamicznych SOLDERS powstałej jako efekt projektu COST 531. Obliczenia modelowe przeprowadzone dla stopów dwuskładnikowych wykazały bardzo dobrą zgodność modelu z eksperymentem. W przypadku stopów trójskładnikowych modelowanie napięcia powierzchniowego wykonano przy użyciu 2 różnych modeli. Pierwszy z zastosowanych modeli General Solution Model [K.C. Chou (1995) Calphad 19:315] to przykład tzw. modeli geometrycznych tj. takich, które umożliwiają modelowanie dowolnych wielkości fizycznych lub termodynamicznych w układach wyższego rzędu poprzez matematyczne złożenie tych wielkości dla układów dwuskładnikowych. Drugi z modeli wykorzystuje model Butlera i model do opisu właściwości termodynamicznych roztworów wieloskładnikowych [M. Kucharski, C. Acuna (1996) Arch. Metall. 41:271]. Porównanie wyników obliczeń modelowych z danymi eksperymentalnymi wykazało, że w przypadku stopów Sn-Ag-Cu oba modele dobrze opisują wyniki eksperymentów.

W literaturze, zarówno w pracach eksperymentalnych [Z. Moser et al. (2006) J. Phase Equilib. Diff. 27:133] jak i teoretycznych [P. Terzief (2005) J. Mater. Sci. 40:3759] spotkać można opinie, że stopy o niższym napięciu powierzchniowym lepiej zwilżają metaliczne podłoża (mają niższy kąt zwilżania) lub też, że obniżenie napięcia powierzchniowego stopu (poprzez zwiększenie stężenia składnika o niższym napięciu powierzchniowym) prowadzi do poprawy zwilżalności. Przez analogię zwiększenie stężenia składnika o wyższym napięciu powierzchniowym powinno prowadzić do pogorszenia zwilżalności – próbę weryfikacji tego problemu z wykorzystaniem kilku technik eksperymentalnych podjęto w pracy [A5] (projekt P5). Wykonano [A5] badania napięcia powierzchniowego stopów Sn-Ag-Cu o zawartości srebra i miedzi zbliżonej do stopów stosowanych komercyjnie tj. zawierających odpowiednio 3 i 3,5 wag.% srebra i 0,4; 1 i 1,6 wag.% miedzi. Badania te wykonane w szerokim zakresie temperatur metodami maksymalnego ciśnienia w pęcherzyku gazowym i metodą swobodnego wypływu z tygła wykazały, że wzrost zawartości srebra i miedzi w stopie powoduje podwyższenie napięcia powierzchniowego. Z kolei badania zwilżalności podłoży miedzianych przez te stopy wykonane w tej samej temperaturze metodami kropli leżącej i zanurzeniową wykazały, że niewielkie zmiany stężenia składników stopowych pozostają praktycznie bez wpływu na wartość kąta zwilżania. Głównym składnikiem badanych stopów Sn-Ag-Cu jest Sn tj. metal o napięciu powierzchniowym znacznie niższym od srebra i miedzi. Ponieważ wyniki pomiarów kąta zwilżania dla tych stopów na miedzi wykazały, że zmiana stężenia składników o wyższym napięciu powierzchniowym nie wpływa na zmianę kąta zwilżania, interesująca była odpowiedź na pytanie czy taki sam efekt obserwowany będzie w przypadku innych stopów, takich jak eutektyczne Bi-Ag (projekt [P3]) oraz Sn-Zn (projekt [P12]) z dodatkiem trzeciego składnika stopowego. Badania zwilżalności miedzi przez stopy Bi-Ag z dodatkami Sn i Zn (3,6,9 at.%) [A6] (napięcie powierzchniowe tych metali jest wyższe od eutektycznego stopu Bi-Ag) wykonane w i bez obecności topnika wykazały, że dodatek Sn i Zn ma niewielki i niejednoznaczny wpływ na wartość kąta

zwilżania. Bez topnika, wzrost stężenia cynku praktycznie nie wpływa na wartość kąta zwilżania, natomiast o ile kąt zwilżania stopów o zawartości 3 i 6 at.% Sn jest niższy, to w przypadku stopu o zawartości 9 % Sn porównywalny z eutektycznym stopem Bi-Ag. W obecności topnika, jedynie w przypadku dodatku cyny można zaobserwować stopniowe zmniejszanie wartości kąta zwilżania wraz ze wzrostem zawartości Sn w stopie. Natomiast stop o zawartości 3% Zn ma niższy kąt zwilżania niż stop eutektyczny Ag-Bi, ale zwiększenie zawartości cynku powoduje wzrost kąta zwilżania. Przeprowadzone w 3 różnych temperaturach, w obecności topnika pomiary kąta zwilżania stopów Sn-Zn z dodatkiem indu odpowiednio 0,5; 1; 1,5 wag.% na jednakowych podłożach z Cu [A7] wykazały, że już dodatek 0,5 wag.% In powoduje obniżenie kąta zwilżania, przy tym zwiększanie do 1,5 wag.% zawartości In w stopie nie powoduje dalszego wyraźnego obniżania kąta zwilżania, z wyjątkiem pomiarów wykonanych w niższej temperaturze tj. 220 °C. Przy tym napięcie powierzchniowe In jest zbliżone do napięcia powierzchniowego Sn. Badania kąta zwilżania wykonane dla stopu Sn-Zn z dodatkiem 1,5 wag.% In na podłożach z Al [A8] nie dały jednoznacznych wyników, tj. dla różnych czasów zwilżania zaobserwowano wzrost lub obniżenie kąta zwilżania w stosunku do stopu Sn-Zn. W przypadku stopów Sn-Zn-Ag o zawartości 1,5 wag.% Ag wykonane w tych samych warunkach (temperatura, topnik) badania zwilżalności aluminium [A8] wykazały, że dodatek srebra powoduje pogorszenie zwilżalności tj. podwyższenie kąta zwilżania. W przypadku stopów Sn-Zn z dodatkiem miedzi w zakresie 0,5 do 1,5 wag.% [A9] wykonano badania zwilżalności na miedzi w 250 °C gdzie czas kontaktu między ciekłym stopem a podłożem był krótki. Zaobserwowano [A9], że o ile kąt zwilżania na miedzi stopów Sn-Zn-Cu jest niższy od eutektycznego stopu Sn-Zn, to różnice pomiędzy stopami o różnej zawartości miedzi są niewielkie, przy tym kąt zwilżania rośnie ze wzrostem zawartości miedzi. Podsumowując nie znaleziono uniwersalnej korelacji pomiędzy zmianą napięcia powierzchniowego stopów (wynikającą z zastosowania dodatków stopowych o różnym napięciu powierzchniowym) a zwilżalnością.

Oprócz aspektu poznawczego wyniki przedstawionych prac mają istotne znaczenie aplikacyjne. W szczególności wysokocynowe stopy Sn-Ag-Cu, Sn-Ag i Sn-Cu są najczęściej stosowanymi stopami lutowniczymi [T. Matsumoto, K. Nogi (2008) *Annu. Rev. Mater. Res.* 38:251], a wieloskładnikowe stopy na bazie eutektyki Ag-Cu mogą być stosowane do łączenia elementów ceramicznych [O. Durov et al. (2008) *Mater. Sci. Eng A495:164*]. Ze względu na niższą cenę i niższą niż stopy Sn-Ag-Cu temperaturę topnienia stopy lutownicze na bazie eutektyki Sn-Zn mają szansę zwiększyć zakres zastosowań [L. Zhang et al. (2010) *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 21:1] zwłaszcza, że mogą być stosowane do lutowania aluminium [M. Huang et al. (2011) *J. Electron. Mater.* 40:315]. Z kolei stopy Bi-Ag znajdują zastosowanie do lutowania w wyższych temperaturach [R. Kolenak, M. Chachula (2013) *Solder. Surf. Mt. Techn.* 25:68] niż stopy Sn-Zn i Sn-Ag-Cu. Wyniki moich prac mogą znaleźć zastosowanie wszędzie tam, gdzie potrzebna jest wiedza o właściwościach powierzchniowych ciekłych stopów metali, w szczególności mogą zostać wykorzystane do modelowania procesu lutowania, do modelowania właściwości powierzchniowych układów wyższego rzędu, a także do modelowania właściwości termodynamicznych stopów z pomiarów napięcia

powierzchniowego (W. Gąsior, *Modelowanie właściwości termodynamicznych z pomiarów napięcia powierzchniowego*, Kraków 2006). Dotychczas wyniki moich badań wykorzystywane były: jako punkt odniesienia w badaniach napięcia powierzchniowego prowadzonych przez innych autorów (m.in. E. Arato et al. (2012) Appl. Surf. Sci. 258:2686; Z. Guo et al. (2012) Monatsch. Chem. 143:1617; V. Sklyarchuk et al. (2012) J. Min. Metall. Sect. B 48:443; F. Aqra (2011) J. Alloy Compnd. 509:5736]; w badaniach korelacji pomiędzy rozszerzalnością cieczy a siłami spójności [A. Gangopadhyay et al. (2012) J. Phys-condens. Mat. 24:375102]; w badaniach zwilżalności [m.in. L. Zang et al. (2012) J. Electron. Mater. 41:2051] i w modelowaniu zjawiska zwilżania [Z. Weltsch et al. (2013) Appl. Surf. Sci. 268:52]; wykorzystane zostały także w obliczeniach diagramów fazowych nanomateriałów [G. Garzel et al. (2012) Calphad 36:52].

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych.

5.1 Osiągnięcia przed uzyskaniem stopnia doktora

Praca doktorska *Napięcie powierzchniowe i gęstość stopów Ag-Bi, Ag-Sn, Bi-Sn oraz Ag-Bi-Sn*, którą pod opieką profesora Mariana Kucharskiego wykonywałem na Wydziale Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo-Hutniczej realizowana była w ramach projektu *COST 531 – Lead-free solder materials* [P2]. Wyniki moich badań opublikowane zostały w 2 publikacjach w czasopismach z listy JCR [A11,A14], i były prezentowane na 2 konferencjach [R1,R2]. W ramach projektu *COST 531* [P2] wykonałem porównywalny do pracy doktorskiej pod względem zakresu program badań dla dwu i trójskładnikowych stopów z układu Ag-In-Cu, które również zostały opublikowane w 2 artykułach w czasopismach z listy JCR [A12,A13]. Ponadto w ramach realizacji projektu *Rola zjawisk powierzchniowych w procesie redukcji miedzi z żużli zawieszinowych* [P1] wykonałem badania napięcia powierzchniowego trójskładnikowych stopów Cu-Pb-Fe [A10] a także napięcia międzyfazowego na granicy stop Cu-Pb-Fe / żużel zawieszinowy [B2]. W trakcie studiów doktoranckich prowadziłem zajęcia laboratoryjne dla studentów Wydziału Metali Nieżelaznych AGH. W 2004 roku odbyłem dwumiesięczny staż w KTH – Royal Institute of Technology w Sztokholmie.

5.2 Osiągnięcia po uzyskaniu stopnia doktora

W okresie po doktoracie uczestniczyłem w realizacji szeregu projektów badawczych (w tym 4 jako kierownik) oraz prac realizowanych w ramach działalności statutowej IMIM PAN. Tematyka prac statutowych i projektów realizowanych w pracowni Teorii Procesów Metalurgicznych IMIM PAN mieści się w dwóch głównych nurtach badań. Pierwszy to *nowe ekologiczne stopy lutownicze* a drugi to *materiały metaliczne do magazynowania wodoru dla ekologicznych źródeł energii*.

W początkowym okresie aktywnie uczestniczyłem w realizacji europejskiego projektu *COST MP0602 - Advanced Solder Materials for High Temperature Applications – HISOLD* [P3]. Celem nadrzędnym projektu było zebranie bazy danych właściwości stopów, które mogą być zastosowane do lutowania w wysokich temperaturach (powyżej 250 °C). Przedmiotem moich badań były stopy na bazie eutektyki Ag-Bi z dodatkiem trzeciego składnika stopowego (m.in. Sn, Zn), badane było zarówno napięcie powierzchniowe [A17] jak i zwilżalność stopów na podłożach miedzianych [A6]. Wyniki projektu prezentowałem na 2 konferencjach międzynarodowych [K5,R6] i konferencji krajowej [R3]. W ramach projektu *Rozwijanie bazy SURDAT o pomiary lepkości i ocenę zwilżalności Cu lutami bezołowiowymi* [P5] oprócz wymienionych wcześniej badań zwilżalności stopów Sn-Ag-Cu [A5], wykonywałem badania, których celem było określenie wpływu dodatku indu na zwilżalność stopów Sn-Ag-Cu na podłożu miedzianym [A16].

Doświadczenia zebrane w trakcie realizacji projektu *COST MP0602* zostały wykorzystane w trakcie realizacji projektu *Zaawansowane materiały i technologie ich wytwarzania – ZAMAT* [P12], zadanie *Proekologiczne, wieloskładnikowe, bezkadmowe i bezołowiowe stopy na bazie układów Zn-Al i Zn-Sn z dodatkami stopowymi*, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Celem tego projektu było zaprojektowanie stopów lutowniczych na bazie eutektycznych stopów Zn-Al oraz Zn-Sn z dodatkami stopowymi. Stopy te mają być tańszą alternatywą dla chronionych patentami stopów lutowniczych. Mój udział w tym projekcie koncentrował się na badaniach zwilżalności stopów na różnych podłożach (Cu, Al, Ni), ze szczególnym naciskiem na stopy na bazie eutektycznego stopu Zn-Sn z dodatkami (Ag, In, Cu). Wyniki moich prac prezentowałem na konferencjach w postaci 3 wygłoszonych referatów [R8,R10,R11] i 3 posterów [K5,K7,K8]. Jestem współautorem 8 publikacji w czasopiśmie z listy JCR [A7,A8, A9, A19, A20, A24, A25, A27] będących dotychczasowym efektem realizacji projektu.

Dla lepszego zrozumienia oddziaływań zachodzących pomiędzy stopem lutowniczym a lutowanym materiałem pomocna jest znajomość właściwości termodynamicznych i diagramów fazowych. Celem projektów *Iuventus Plus: Właściwości termodynamiczne i diagram fazowy stopów Ag-Bi-Cu* [P10] oraz *Właściwości termodynamiczne i równowagi fazowe w stopach Ag-Bi-Ni* [P11] jest uzupełnienie luk w wiedzy dotyczącej właściwości termodynamicznych i diagramów fazowych tych stopów. W ramach zakończonego projektu [P10] zrealizowałem badania właściwości termodynamicznych [A26] jak i równowag fazowych i zwilżalności [A23,A29]. Ponadto, wyniki projektu [P10] prezentowałem na 4 konferencjach międzynarodowych (referat [R9] i 3 postery [K6,K9,K10]).

W ramach tej tematyki zajmuję się badaniami właściwości termodynamicznych stopów litu, które znajdują lub mogą znaleźć zastosowanie do magazynowania wodoru w postaci wodorków. Należy podkreślić, że badania właściwości termodynamicznych stopów litu stawiają przed eksperymentatorem wysokie wymagania ze względu na wysoką reaktywność litu ze składnikami powietrza. Motywacją do prowadzenia badań stopów litu jest częsty brak danych termodynamicznych, lub sprzeczności w podawanych w literaturze danych, które wymagają weryfikacji. Tak, jak w przypadku projektu *Właściwości termodynamiczne i diagramy fazowe stopów Be-B i Be-Li jako materiałów do bezpiecznego magazynowania wodoru* [P9], gdzie od lat 80-tych w literaturze nie pojawiła się żadna nowa praca eksperymentalna dotycząca właściwości termodynamicznych i diagramu fazowego tych stopów [K11]. W swojej pracy wykorzystuję technikę pomiaru sił elektromotorycznych w ogniach galwanicznych z ciekłym elektrolitem. Metoda ta umożliwia wyznaczenie aktywności litu w stopach, a w połączeniu z techniką kulometrycznego miareczkowania umożliwia wyznaczanie punktów na liniach równowag fazowych ze zmianą stężenia składników [W. Gasior et al. (1996) *Metal. Mater. Trans.* 27A:2419]. W ostatnich latach brałem udział w badaniach aktywności litu w ciekłych stopach Al-Li-Zn [A28]. Jako wykonawca projektu *Badania termodynamiczne stopów Li-Si jako materiału do bezpiecznego magazynowania wodoru* [P8] w szerokim zakresie temperatur wykonałem badania aktywności litu w ciekłych stopach, które opublikowane zostały po raz pierwszy w czasopiśmie z listy JCR [A21]. Na podkreślenie zasługuje, że wyniki pracy [A21] zostały wykorzystane w najnowszych opracowaniach diagramu fazowego stopów Li-Si [P. Wang et al. (2013) *Intermetallics* 42:137; M.H. Braga et al. (2014) *J. Alloy Compd.* DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.06.212].

5.3 Rodzaj i ilość publikacji

Jestem autorem i współautorem 38 publikacji, z czego 28 ukazało się po uzyskaniu stopnia naukowego doktora (załącznik 5). Spośród 29 artykułów (26 po doktoracie) opublikowanych w czasopismach z listy *Journal Citation Reports* (JCR), 3 to prace autorskie a w 14 kolejnych jestem pierwszym autorem. Artykuły w czasopismach z listy JCR zindeksowane w bazie *Web of Science* (WoS) uzyskały 109 cytowań (71 bez autocytowań), przy tym 107 z ogólnej liczby cytowań przypada na lata po uzyskaniu stopnia doktora. Indeks-h (indeks Hirsha) moich publikacji wg tej samej bazy wynosi 7. Na podkreślenie zasługuje, że wśród 7 najczęściej cytowanych prac znajdują się trzy prace z cyklu stanowiącego osiągnięcie habilitacyjne. Sumaryczny Impact Factor (IF) czasopism z listy JCR (zgodnie z rokiem wydania, przy tym dla publikacji z roku 2014 podano IF za rok 2013) wynosi 36,836, w tym po uzyskaniu stopnia naukowego doktora 35,385.

5.4 Staże i udział w konferencjach naukowych

W okresie po doktoracie, po zakończeniu stażu podoktorskiego w Instytucie Odlewnictwa odbyłem trzy kilkutygodniowe staże w ośrodkach zagranicznych (załącznik 5). W roku 2013 odbyłem staż w Forschungszentrum Jülich (2 tygodnie) w ramach stypendium Erasmus Staff Mobility Training. Dwukrotnie, w latach 2012 (4 tygodnie, stypendium Erasmus Staff Mobility Training) i 2014 (2,5 tygodnia) przebywałem na Uniwersytecie Wiedeńskim. Efektem tych staży jest, oprócz współautorskiej publikacji [A26], umowa o współpracy pomiędzy Department of Inorganic Chemistry/Material Chemistry Uniwersytetu Wiedeńskiego a IMIM PAN i plany wspólnych projektów badawczych.

Wyniki swoich prac prezentowałem m.in. na wiodących konferencjach dotyczących tematyki badań m.in. International Conference on High Temperature Capillarity HTC, European Congress on Advanced Materials and Processes Euromat, w postaci 10 posterów i 9 referatów (załącznik 5).

5.5 Działalność organizacyjna i dydaktyczna

Pełnię funkcję sekretarza *Associated Phase Diagram and Thermodynamics Committee* (APDTC), który zrzesza naukowców z Polski i 8 innych krajów Europy środkowej i wschodniej zajmujących się badaniem właściwości termodynamicznych stopów metali oraz opracowaniem ich diagramów fazowych. APDTC jest członkiem *Alloy Phase Diagram International Commission* (APDIC), która jest organizacją o zasięgu światowym powołaną w celu m.in. upowszechniania wiedzy o diagramach fazowych, promowania ich w przemyśle i nauce, oraz koordynacji badań naukowych w tym obszarze.

Jestem członkiem zespołu redakcyjnego kwartalnika *Archives of Metallurgy and Materials*. Czasopismo indeksowane jest na liście JCR, a jego Impact Factor za rok 2013 wynosi 0,763.

Jestem promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim mgr Marceli Trybuły, w Instytucie Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Polskiej Akademii Nauk.

5.6 Recenzje na zlecenie redakcji czasopism

Od 2008 roku, na zlecenie edytorów, byłem recenzentem 25 manuskryptów zgłoszonych do czasopism z listy Journal Citation Reports (m.in.: Appl. Surf. Sci. – 2 manuskrypty, Arch. Metall. Mater. – 4, J. Electron. Mater. – 5, J. Mater. Eng. Perform. – 4,), których pełny wykaz znajduje się w załączniku 5. Oprócz wyżej wymienionych zrecenzowałem trzy publikacje zgłoszone do czasopisma o zasięgu krajowym tj. *Prace Instytutu Odlewnictwa*.

5.7 Nagrody i wyróżnienia

W roku 2012 otrzymałem Nagrodę Dyrektora IMIM PAN za zajęcie I miejsca w grupie młodych pracowników w ocenie osiągnięć naukowo-badawczych za lata 2009-2010. W roku 2013 otrzymałem Nagrodę Dyrektora IMIM PAN za zajęcie III miejsca w grupie młodych pracowników w ocenie osiągnięć naukowo-badawczych za lata 2011-2012.

W latach 2012 i 2013 dwukrotnie zostałem laureatem konkursu MNiSW Iuventus Plus (II i III edycja). Na podkreślenie zasługuje, że każdorazowo mój wniosek zdobył maksymalną ilość punktów. Zgodnie z regulaminem tego konkursu obok oceny merytorycznej czynnikiem decydującym o pozycji wniosku w rankingu są publikacje kierownika projektu w czasopiśmie z listy JCR o wysokim Impact Factor.

5.8 Podsumowanie osiągnięć badawczo-naukowych

W tabeli 1 zestawiono liczbowo podsumowanie dorobku naukowego i innych osiągnięć z podziałem na czas przed i po uzyskaniu stopnia doktora.

Tabela 1 Podsumowanie osiągnięć naukowych

Rodzaj osiągnięcia	Przed doktoratem	Po doktoracie	Razem
Publikacje ogółem	10	28	38
- w tym publikacje w czasopiśmie z listy JCR	3	26	29
Cytowania w bazie Web of Science	2	107	109
Udział i kierowanie projektami badawczymi	2	13	15
- w tym kierowanie projektami		4	4
Referaty i postery na konferencjach naukowych	3	19	22
- w tym wygłoszone referaty	2	9	11
Staże naukowe	1	4	5
Recenzje na zlecenie redakcji czasopism z listy JCR		25	25

Kraków, 5 sierpnia 2014.

