

Uniwersytet Warszawski
Wydział Chemii

Rafał Jurczakowski

Załącznik II

Autoreferat

Warszawa, marzec 2016

1. Imię in Nazwisko

Rafał Jurczakowski

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

1998 – magister chemii, Wydział Chemii, Uniwersytet Warszawski.

2003 – doktor nauk chemicznych, Wydział Chemii, Uniwersytet Warszawski, tytuł rozprawy: "Eksperymentalne i teoretyczne badania oscylacji i multistabilności w elektroredukcji wybranych kompleksów niklu(II) na elektrodach rtęciowych".

3. Dotychczasowe zatrudnienie w jednostkach naukowych:

Marzec 2005 – adiunkt, Wydział Chemii Uniwersytetu Warszawskiego.

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:**

"Spektroskopia impedancyjna w badaniach procesów elektrokatalitycznych, kinetycznych i elektrosorpcji wodoru"

b) Prace tworzące cykl publikacji wchodzących w skład rozprawy z bazy *Journal Citation Reports*. Gwiazdką oznacza autorstwo korespondencyjne dr. Jurczakowskiego.**H1. R. Jurczakowski, A. Lasia**

"Limitations of the potential step technique to impedance measurements using Discrete Time Fourier Transform"

Analytical Chemistry, 2004, 76, 5033–5038

MNiSW: 45, IF₂₀₁₂: 5,695

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu i przeprowadzeniu całości modelowań numerycznych, udziale w interpretacji uzyskanych danych, przygotowaniu manuskryptu. Swój udział procentowy szacuję na ok. 70%.

H2. R. Jurczakowski, C. Hitz, A. Lasia

"Impedance of porous Au based electrodes"

Journal of Electroanalytical Chemistry, 2004, 572, 355–366

MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 2,672

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu metod otrzymywania elektrod porowatych oraz na uzyskaniu większości wyników eksperymentalnych z wyjątkiem wyników dla elektrody Au-Al, na analizie i interpretacji danych z uwzględnieniem podziału na część wewnętrzną i zewnętrzną elektrody porowatej oraz na przygotowaniu manuskryptu. Swój udział procentowy szacuję na ok. 50%.

H3. R. Jurczakowski, C. Hitz, A. Lasia

"Impedance of porous gold electrodes in the presence of electroactive species"

Journal of Electroanalytical Chemistry, 2005, 582, 85–96

MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 2,672



Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na uzyskaniu większości wyników eksperymentalnych z wyjątkiem wyników kinetyki dla elektroredukcji kompleksu $[Ru(NH_3)_6]^{3+}$, na analizie i interpretacji danych oraz na przygotowaniu manuskryptu. Swój udział procentowy szacuję na ok. 45%.

- H4. **R. Jurczakowski***, P. Połczyński
"Impedance of mediated electrochemical processes. Novel impedance element for unequal diffusivities"
Journal of Physical Chemistry C, 2014, 118, 7980–7988
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 4,814

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji badań, wyprowadzeniu analitycznego modelu dla reakcji EC', współtworzeniu nowej funkcji transferu oraz na przygotowaniu manuskryptu. Swój udział procentowy szacuję na ok. 80%.

- H5. P. Połczyński, **R. Jurczakowski***
"Impedance as a tool for rapid and complete characterization of electrocatalytic systems involving redox mediators"
Electrochimica Acta, 2016, 188, 882–887
MNiSW: 40, IF₂₀₁₃: 4,504

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji badań, planowaniu i kierowaniu badaniami, udziale w interpretacji wyników oraz na przygotowaniu końcowej wersji manuskryptu. Swój udział procentowy szacuję na ok. 60%.

- H6. B. Łosiewicz, **R. Jurczakowski**, A. Lasia,
"Kinetics of hydrogen underpotential deposition at polycrystalline platinum in acidic solutions"
Electrochimica Acta, 2012, 80, 292-301
MNiSW: 40, IF₂₀₁₂: 3,777

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w wykonywaniu pomiarów chronowoltamperometrycznych, koncepcji i prowadzeniu pomiarów impedancyjnych w układzie wiszącego menisku, analizie uzyskanych danych impedancyjnych i udziale w interpretacji wpływu geometrii układu pomiarowego na obserwowaną dyspersję częstotliwości. Swój udział procentowy szacuję na ok. 25%.

- H7. M. Słojewski, J. Kowalska, **R. Jurczakowski***
"The influence of phosphorous content on hydrogen sorption in Pd–P thin layers obtained by electroless deposition"
Journal of Physical Chemistry C, 2009, 113, 3707–3712
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 4,814

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji badań, nadzorowaniu prac eksperymentalnych, interpretacji wyników badań i przygotowaniu manuskryptu. Swój udział procentowy szacuję na ok. 75%.

- H8. A. Januszewska, G. Dercz, A. Lewera, **R. Jurczakowski***
"Spontaneous chemical ordering in bimetallic nanoparticles"
Journal of Physical Chemistry C, 2015, 119, 19817–19825
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 4,814

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji pracy, planowaniu i kierowaniu badaniami, udziale w interpretacji wyników oraz na przygotowaniu manuskryptu. Swój udział procentowy szacuję na ok. 65%.

- H9. P. Połczyński, **R. Jurczakowski***
"Extremely fast hydrogen absorption/desorption through platinum overlayers"
Journal of Power Sources, 2015, 305, 233–239



MNiSW: 45, IF₂₀₁₃: 6,217

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na kierowaniu badaniami, udziale w interpretacji wyników oraz na przygotowaniu końcowej wersji manuskryptu. Swój udział procentowy szacuję na ok. 60%.

- H10. K. J. Fijalkowski, **R. Jurczakowski**, W. Koźmiński, W. Grochala
"Insights from impedance spectroscopy into the mechanism of thermal decomposition" of
M(NH₂BH₃), M = H, Li, Na, Li_{0.5}Na_{0.5}, hydrogen stores
Physical Chemistry Chemical Physics, 2012, 14, 5778–5784

MNiSW: 40, IF₂₀₁₂: 3,829

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na udziale w konstrukcji układu pomiarowego do badań EIS reaktywnych próbek proszkowych, na przeprowadzeniu pomiarów impedancyjnych, interpretacji danych impedancyjnych, udziale w dyskusji wyników i przygotowaniu części manuskryptu dotyczącej badań impedancyjnych. Swój udział procentowy szacuję na ok. 50%.

Dane bibliograficzne cyklu publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe:

Całkowita ilość publikacji:	10
Współczynnik oddziaływania (IF) 2014:	45,128
Sumaryczny IF w roku opublikowania:	41,996
Suma punktów MNiSW:	380
Liczba cytowań bez autocytowań:	110 (2 lutego 2016 r.)
Liczba wszystkich cytowań:	116 (2 lutego 2016 r.)



c) Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Wstęp

Spektroskopia impedancyjna (IS, ang. *Impedance Spectroscopy*) jest stosunkowo nową, dynamicznie rozwijającą się metodą o wyjątkowo dużym potencjale badawczym. Pomiar impedancyjne wykonywane są obecnie z dużą dokładnością oraz w sposób w pełni zautomatyzowany, jednak szerokie wykorzystanie tej metody jest nadal limitowane ograniczoną liczbą modeli teoretycznych opisujących impedancję badanych układów fizykochemicznych. Modele te są niezbędne do analizy widm impedancyjnych, a etap doboru odpowiedniego modelu, często w postaci tzw. obwodu zastępczego ma kluczowe znaczenie. W tym celu konieczne jest również uzyskanie możliwie pełnej charakterystyki badanych układów i dogłębne zrozumienie zachodzących w nich zjawisk.

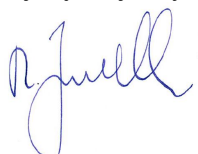
Osiągnięcie naukowe opisane w cyklu prac [H1-H10] związane jest z nowatorskim wykorzystaniem spektroskopii impedancyjnej w badaniach kinetyki i termodynamiki procesów elektrokatalitycznych oraz sorpcji wodoru. Cykl publikacji otwiera praca [H1] poświęcona podstawom pomiaru impedancji, w dalszej części opisano wpływ geometrii elektrod [H2, H3] oraz wpływ mechanizmu reakcji [H4, H5] na charakterystykę impedancyjną układów elektrochemicznych. Jednocześnie zaproponowano teoretyczny model impedancyjny reakcji elektrokatalitycznych z udziałem mediatorów redoks, gdzie wszystkie parametry zostały zdefiniowane za pomocą odpowiednich stałych fizykochemicznych [H4]. Model ten został następnie z sukcesem zweryfikowany eksperymentalnie [H5]. Kolejna część cyklu [H6-H10] poświęcona została procesom sorpcji wodoru ze względu na ważkość tej tematyki we współczesnej nauce. W pracach tych opisano kinetykę procesu podpotencjałowej adsorpcji wodoru na elektrodach platynowych [H6] oraz procesy absorpcji wodoru w metalach na przykładzie układu modelowego pallad-wodór [H7-H9]. Opisano także charakterystykę impedancyjną niemetalicznych magazynów wodoru, po raz pierwszy zaobserwowano przewodnictwo jonowe amidoboranów metali alkalicznych [H10]. Monitorowanie zmian właściwości elektrycznych wywołanych aktywowanym termicznie procesem desorpcji wodoru doprowadziło do uściślenia mechanizmu rozkładu tych związków [H10].

Spektroskopia impedancyjna

Impedancja jest współczynnikiem proporcjonalności pomiędzy sygnałem potencjałowym i prądowym w przestrzeni częstotliwości, dla układu o charakterze dwójnika spełniającego w danych warunkach wymagania stacjonarności, liniowości oraz przyczynowości. Impedancję można zdefiniować jako:

$$Z^*(\omega) = \frac{F[E(t)]}{F[I(t)]} = \frac{E^*(j\omega)}{I^*(j\omega)} \quad (1)$$

gdzie operator F oznacza transformację Fouriera, natomiast $E(t)$ i $I(t)$ oznaczają odpowiednio funkcje opisujące zmiany potencjału i prądu w czasie [1]. W metodzie tej, na elektrodę narzucane jest sinusoidalne zaburzenie potencjałowe o małej amplitudzie i badana jest odpowiedź prądowa. Do najczęściej używanych metod pomiaru należą detekcja fazo-czuła (PSD, ang. *Phase Sensitive*




Detection) oraz analiza odpowiedzi częstotliwościowej (FRA, ang. *Frequency Response Analysis*) [1]. Wadą tych metod jest dość długi czas rejestracji widma impedancyjnego, co uniemożliwia ich wykorzystanie do badań systemów niestacjonarnych. Do tych ostatnich zalicza się jednak szereg procesów elektrokatalitycznych, których charakterystyka jest często zmienna w czasie, np. na skutek adsorpcji produktów przejściowych zatrujących powierzchnię elektrody [2]. W takich przypadkach możliwe jest zastosowanie transformacji Fouriera w tzw. dynamicznej spektroskopii impedancyjnej (DEIS, ang. *Dynamic Electrochemical Impedance Spectroscopy*) [3]. Ze względu na bardzo krótki czas pomiaru, badany układ może być traktowany jako pseudostacjonarny. Technikę tę można wykorzystać również do lokalnych pomiarów impedancyjnych, w których dzięki mapowaniu elektrody można uzyskać informację o strukturze jej powierzchni [4]. W ogólnym przypadku, sygnał wymuszający (zaburzenie potencjałowe) może być dowolny, zwykle jednak stosuje się zaburzenie periodyczne, na które składa się suma sinusoid o nieparzystych składowych harmonicznym. Niskie częstotliwości są dużo bardziej podatne na szum i zakłócenia, dlatego w celu uzyskania większego stosunku sygnału do szumu stosuje się wyższą amplitudę przy częstotliwościach niższych [5]. Możliwe jest również zastosowanie metod pulsowych, ponieważ transformata Fouriera funkcji prostokątnej zawiera nieskończenie wiele częstotliwości o słabnącej amplitudzie. W szczególności transformata Fouriera funkcji δ Diraca zawiera wszystkie częstotliwości o jednakowo dużej amplitudzie. Oczywiście tego typu zaburzenie potencjałowe nie może być bezpośrednio narzucone na elektrodę, ponieważ układy elektrochemiczne mogą być uznane za liniowe tylko w bardzo ograniczonym zakresie napięć. Możliwe jest natomiast narzucenie niewielkiego zaburzenia w postaci funkcji schodkowej. Warunek liniowości jest wówczas spełniony, przez co również transformata Fouriera pierwszej pochodnej takiej funkcji jest równoznaczna transformacji funkcji Diraca [6]. Taka metoda pozwala na bardzo szybki pomiar impedancji, nawet w trakcie klasycznych eksperymentów chronowoltamperometrycznych, i została ona zaimplementowana do urządzeń pomiarowych przez Mochalova i Kolosnitsyna [7].

W ostatnich latach, Yoo i Park zaproponowali nową metodę opartą na dyskretniej, w dziedzinie czasu, transformacji Fouriera (DTFT, ang. *Discrete Time Fourier Transform*) [8-10]. Autorzy zastosowali transformację DTFT do pierwszej pochodnej zaburzenia potencjałowego o kształcie funkcji schodkowej. Ponieważ sygnał wymuszający zawiera w takim przypadku wszystkie częstotliwości, autorzy sugerowali możliwość niemal natychmiastowego uzyskania widma impedancyjnego w pełnym zakresie częstotliwości, a więc również dla częstotliwości bliskich zera, $\omega \rightarrow 0$.¹ Ponieważ pomiar impedancji innymi metodami trwa znacznie dłużej, nowa technika proponowana przez Yoo i Parka byłaby niezwykle cenna, zwłaszcza do badania układów niestacjonarnych. Niemniej jednak, eksperymentalne widma impedancyjne otrzymane przez Yoo i Parka różniły się znacznie od widm uzyskanych metodami klasycznymi, w szczególności nie zawierały one wpływu dyfuzji substancji elektroaktywnej [8, 9]. Problemy wynikające z założeń metody były przedmiotem dyskusji [11, 12].

Celem pracy [H1] było zbadanie ograniczeń metody zaproponowanej przez Yoo i Parka [8-10] oraz ustalenie warunków, w których metoda ta mogłaby być stosowana. Do symulacji krzywych $I(t)$ prądów pojemnościowych dla elektrod idealnie polaryzowalnych oraz prądów faradajowskich dla procesów

¹ DTFT jest formą transformacji Fouriera, w której otrzymuje się ciągłą funkcję w przestrzeni częstotliwości



elektrodowych zastosowano metody numeryczne [H1]. Poprzez porównanie symulowanych widm impedancyjnych otrzymanych z zastosowaniem transformacji DTFT z widmami teoretycznymi, wykazano, że wiarygodne widma impedancyjne uzyskuje się jedynie w zakresie częstotliwości od $1/(N\Delta t)$ do $1/(2\Delta t)$, gdzie Δt oznacza czas próbkowania, a N ilość zarejestrowanych, dyskretnych wartości prądu. Co ciekawe, w pewnych warunkach możliwa jest ekstrapolacja widma poza ten obszar, co przedstawiono na rysunku 10 w [H1]. Jednak w ogólnym przypadku, ekstrapolacja widma impedancyjnego poza wyżej wymieniony zakres częstotliwości prowadzi do generowania artefaktów. Na przykład, w przestrzeni zespolonej obserwuje się dwa półkola na widmie impedancyjnym dla prostego procesu elektrodowego zachodzącego na elektrodzie płaskiej, w miejsce obrazu charakterystycznego dla impedancji obwodu Randlesa, tj. pojedynczego półkola zakończonego linią prostą nachyloną do osi Z' pod kątem 45 stopni (Fig. 8 in H1).

W świetle wyników przedstawionych w pracy [H1] można stwierdzić, że spektroskopia impedancyjna jest dość czułą metodą wymagającą ostrożności już na etapie pozyskiwania danych eksperymentalnych. Dlatego analiza otrzymanych widm impedancyjnych powinna być poprzedzona etapem weryfikacji ich wiarygodności, np. z wykorzystaniem transformaty Kramersa-Kroniga lub/i modyfikacji układu eksperymentalnego, w którym były wyznaczone. Warto również zaznaczyć, że artefakty generowane są zazwyczaj w obszarze bardzo niskich oraz bardzo wysokich częstotliwości.

Wpływ geometrii elektrody na charakterystykę impedancyjną układu – impedancja elektrod porowatych

Elektrody porowate mają kluczowe znaczenie w zastosowaniach elektrokatalitycznych, zwłaszcza w bateriach [13], ogniwach paliwowych [14], superkondensatorach [15] oraz w procesach przemysłowych, np. w przemysłowej elektrolizie [16, 17].

Elektrochemiczna spektroskopia impedancyjna (EIS) może być wykorzystana do charakterystyki granicy faz elektrod porowatych z roztworem elektrolitu oraz procesów elektrodowych na nich zachodzących. Elektrody porowate wyróżnia jednak znaczna głębokość, l , i mały promień porów, r , tj. duży stosunek l/r . Nie ma jednak ściśle określonej granicy pomiędzy elektrodami szorstkimi, a porowatymi [18]. Wyznaczenie rozwinięcia powierzchni elektrody jest jednym z podstawowych problemów w elektrokatalizie, który dotyczy zarówno elektrod szorstkich jak i porowatych [19].

Modele teoretyczne opisujące specyfikę impedancyjną elektrod porowatych były po raz pierwszy wyprowadzone niezależnie przez Frumkina [20] oraz de Leviego [21, 22]. Modele te wyprowadzono dla cylindrycznych porów, są one jednak z powodzeniem wykorzystywane również do opisu rzeczywistych układów o różnej geometrii porów [23, 24]. Dotychczas pomijano jednak wpływ zewnętrznej (tj. nieporowatej) powierzchni elektrody. W pracy [H2] po raz pierwszy wykazano, że powierzchnia znajdująca się na zewnątrz porów ma jednak duży wpływ na impedancję elektrody. Ponadto wykazano, że przy zastosowaniu odpowiedniego modelu można wyznaczyć stosunek powierzchni elektrody znajdującej się wewnątrz i na zewnątrz porów.



W pracy [H3] opisano impedancję procesów elektrodowych badanych na złotych elektrodach porowatych w obecności substancji elektroaktywnych. Jako układy modelowe wybrano szybki proces elektroredukcji jonu $[\text{Ru}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$ oraz wolniejszy, *quasi*-odwracalny proces utleniania $[\text{Co}(\text{phen})_3]^{2+}$, gdzie phen oznacza 1,10-fenantrolinę. Analogiczne badania przeprowadzone zostały na elektrodach płaskich z polikrystalicznego złota. Wyniki zostały również porównane z modelem teoretycznym wyprowadzonym wcześniej przez Lasię [25], opisującym proste procesy elektrodowe zachodzące na elektrodach porowatych. Badania przedstawione w pracy [H3] wykazują, że w przypadku otrzymanych i scharakteryzowanych elektrod porowatych, procesy elektrodowe zachodzą głównie przy ujściu porów oraz na powierzchni zewnętrznej, a penetracja sygnału prądowego jest bardzo niska, i dla większości otrzymanych elektrod mikroporowatych jest rzędu 0.1 mm. Efekt ten można zaobserwować również w pomiarach klasycznych, rysunek 2 w pracy [H3] przedstawia krzywe chronowoltamperometryczne zarejestrowane dla elektroredukcji 10 mM $[\text{Ru}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$. Stosunek prądu faradajowskiego do pojemnościowego wynosi około 2 dla elektrody otrzymanej ze sprasowanych proszków Au-Al (elektroda mikroporowata), około 25 dla elektrody szczotkowej (elektroda makroporowata), natomiast dla płaskiej elektrody stosunek ten wynosi ~300. Dla elektrody mikroporowatej prąd faradajowski jest więc przynajmniej 100 razy mniejszy niż dla płaskiej elektrody, w przeliczeniu na powierzchnię rzeczywistą [H2, H3]. Wynika to z dystrybucji potencjału wewnątrz porów spowodowanej spadkami omowymi.

Wyniki te wskazują, że geometria granicy faz elektroda/roztwór elektrolitu może być głównym czynnikiem limitującym aktywność katalityczną elektrod porowatych. Podobną charakterystykę wykazują układy nanostrukturalne, ponieważ zaglomerowane na powierzchni elektrody nanocząstki, lub nanocząstki osadzone na podkładach porowatych tworzą elektrodę o bardzo wąskich kanałach jonowych. W związku z tym reakcje elektrodowe zachodzą w głównej mierze na najbardziej zewnętrznej części aglomeratów. Aktywność katalityczna takich układów zależna jest od ilości i sposobu dystrybucji nanocząstek na powierzchni elektrody.

Wpływ mechanizmu reakcji elektrodowej na impedancję procesów elektrodowych. Impedancja reakcji elektrokatalitycznych z udziałem mediatorów redoks.

Mechanizm reakcji elektrodowej ma istotny wpływ na charakterystykę impedancyjną procesów elektrochemicznych. Dzięki zastosowaniu metody EIS możliwe jest rozróżnienie nawet bardzo pokrewnych mechanizmów elektrodowych. W literaturze naukowej opisano szereg modeli teoretycznych opisujących impedancję układów fizykochemicznych. Należą do nich np. reakcje z udziałem substancji zaadsorbowanych [26, 27], modele elektrod półprzewodnikowych [28-30], samoorganizujących się monowarstw [31-34] czy biosensorów [35]. Jednak w literaturze naukowej stosunkowo mało prac opisuje procesy elektrodowe sprzężone z reakcjami homogenicznymi. W tej grupie szczególnie interesujące są reakcje elektrokatalityczne, w których nieaktywne elektrodowo substancje mogą być redukowane lub utleniane za pośrednictwem mediatorów redoks. W procesach tych, po reakcji wymiany elektronu w etapie elektrochemicznym (E) zachodzi homogeniczna reakcja chemiczna, w której odtwarzany jest depolaryzator (C'). Reakcje typu EC' odgrywają kluczową rolę w procesach elektrochemicznego spalania trwałych zanieczyszczeń organicznych (POP, ang. *Persistent*



Organic Pollutants) [36], katalitycznego wydzielania wodoru [37], elektroredukcji dwutlenku węgla [38, 39], elektrochemii kwasów nukleinowych [40], aminokwasów [41], enzymów [42], jak również w innych zastosowaniach bioanalitycznych.

W pracy [H4] wyprowadzono teoretyczny model impedancyjny dla układów elektrokatalitycznych z mediatorami redoks. W modelu tym po raz pierwszy opisano w sposób ścisły analityczną postać impedancji układu elektrochemicznego, kontrolowanego jednocześnie przez kinetykę przeniesienia elektronu, dyfuzję i kinetykę reakcji chemicznej. Należy podkreślić, że w pracy [H4] wyprowadzono analityczną postać wszystkich parametrów opisujących impedancję procesów EC' wyrażając je odpowiednimi parametrami fizykochemicznymi. Ponadto, zależności te są ściśle spełnione bez względu na wartości stałych szybkości. W pracy [H4] wykazano także, że kluczowe parametry układów katalitycznych, takie jak stałe szybkości procesów homo- i heterogenicznego oraz stosunek współczynników dyfuzji mogą być łatwo wyznaczone nawet z pojedynczego widma impedancyjnego.

Szczególną charakterystykę impedancyjną otrzymano dla układów o różnych współczynnikach dyfuzji formy utlenionej i zredukowanej mediatora redoks. W zależności od stosunku współczynników dyfuzji, zdefiniowanego parametrem ξ , na płaszczyźnie zespolonej obserwuje się deformację widma lub tworzenie charakterystycznej pętli indukcyjnej. Deformacje te narastają dla wyższych nadpotencjałów, co przedstawione zostało na rysunkach 4 (dla $\xi < 1$) i 5 (dla $\xi > 1$) w pracy [H4]. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku $\xi \neq 1$ impedancji nie można opisać żadną z dotychczas znanych funkcji transferu. Trzy jakościowo różne rodzaje widm, tj. dla $\xi > 1$, $\xi < 1$ oraz $\xi = 0$ (impedancja Gerischera) opisuje nowa funkcja transferu, \hat{Z}_{PJ} , wprowadzona po raz pierwszy w pracy [H4]:

$$\hat{Z}_{PJ} = \frac{\hat{Z}_{\xi}}{\sqrt{j\omega + k}} \quad (2)$$

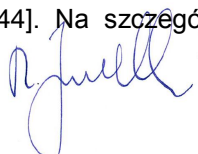
Podobną do impedancji Gerischera, w której jednak parametr \hat{Z}_{ξ} jest funkcją zespoloną

$$\hat{Z}_{\xi} = Z_1 \frac{\xi + a}{1 + \xi a} + Z_{-1} \quad (3)$$

$$a = \frac{\sqrt{j\omega}}{\sqrt{j\omega + k}} \quad (4)$$

Nowy element impedancyjny (funkcja transferu), zdefiniowany równaniami (2) - (4), opisany jest za pomocą 4 parametrów: k , ξ , Z_1 , Z_{-1} . Parametr k jest stałą szybkości homogenicznej reakcji chemicznej, natomiast dokładna postać pozostałych parametrów zależna jest od tego, czy dotyczą one katalitycznego procesu redukcji, czy utleniania. Parametry te są ściśle zdefiniowane równaniami 24 i 25 oraz 38 i 40 w pracy [H4].

Należy podkreślić, że impedancję Gerischera stosuje się nie tylko do opisu reakcji elektrochemicznych sprzężonych z reakcjami chemicznymi, lecz również do opisu procesów relaksacyjnych w jonice ciała stałego, co wynika z analogii matematycznego opisu tych zjawisk. Na przykład impedancja Gerischera stosowana jest do opisu tlenkowych ogniw paliwowych typu (SOFC, ang. *Solid Oxide Fuel Cell*) [43, 44]. Na szczególną uwagę zasługuje fakt występowania w literaturze naukowej funkcji transferu



będących uogólnieniem impedancji Gerischera i będących funkcjami czysto empirycznymi. Przykładem może być impedancja 'double fractal' zaproponowana przez Boukampa [43] i matematycznie równoważna impedancji Havriliaka-Negami.

Rysunek 6 w pracy [H4] przedstawia wyniki dopasowania impedancji Gerischera oraz Havriliaka-Negami do widma impedancyjnego dla $\xi = 1,414$. Funkcja transferu tożsama z impedancją Havriliaka-Negami została zaproponowana przez Boukampa jako uogólnienie impedancji Gerischera polegające na wprowadzeniu dwóch dodatkowych parametrów do wykładniku wyrazu $j\omega$. Jest to więc model fraktalny impedancji Gerischera, który został wprowadzony w celu uzyskania lepszego dopasowania do danych eksperymentalnych, podobnie jak nowy element, opisany również czterema parametrami [H4]. Na rysunku 6 w pracy [H4], dla obu funkcji transferu widać jednak wyraźne odstępstwa przy niskich częstotliwościach od impedancji procesów EC'.

Bezwymiarowa częstotliwość charakterystyczna, u , dla nowej funkcji transferu, Z_{PJ} , jest dość skomplikowaną funkcją parametru ξ , dla $\xi \rightarrow \infty$, $Z_{\xi} \rightarrow \sqrt{j\omega}$, a częstotliwość charakterystyczna, $u \rightarrow 0$. Natomiast dla $\xi \rightarrow 0$ występują dwie charakterystyczne częstotliwości $u \rightarrow 2 + \sqrt{3}$ oraz $u \rightarrow 2 - \sqrt{3}$. Innym punktem charakterystycznym jest $Z_{\xi} (\omega \rightarrow 0) = \xi$. Niemniej jednak stosunkowo mało informacji można otrzymać na podstawie analizy punktów charakterystycznych widma, szczególnie w porównaniu z dopasowaniem obwodu zastępczego metodą CNLS (ang. *Complex Nonlinear Least Squares*). Ostatnio nowy element impedancyjny został dodany do komercyjnego programu ZView®, opracowanego przez firmę *Scribner Associates Inc.*, i opartego na algorytmie Macdonalda [45]. Nowa wersja tego oprogramowania zawierająca impedancję Polczynskiego-Jurczakowskiego, Z_{PJ} , będzie dostępna w 2016 r.

Wprowadzony model teoretyczny został ostatnio przez nas wykorzystany do pełnej charakterystyki fizykochemicznej reakcji Fentona [H5]. Proces ten, ze względu na powstawanie rodników hydroksylowych o wysokim potencjale standardowym [46, 47], znajduje zastosowanie w neutralizacji fenoli, barwników i innych szkodliwych substancji organicznych. Pomimo skomplikowanego mechanizmu, reakcja Fentona jest modelowym układem typu EC'. Dotychczas wiele istotnych parametrów kinetycznych i termodynamicznych tego procesu, takich jak heterogeniczna stała szybkości, k_0 , katodowy i anodowy współczynnik przejścia α i β , oraz współczynniki dyfuzji mediatora redoks, D_{ox} , D_{red} , były wyznaczone jedynie w nieobecności H_2O_2 . Należy jednak podkreślić, że parametry te mogą się znacząco różnić w roztworach zawierających nadtlenek wodoru i inne substancje (np. wyżej wspomniane związki organiczne). Badania tych parametrów w realnych warunkach mogą być szczególnie pomocne w ocenie czynników limitujących procesy elektrokatalityczne. W pracy [H5] opisano szczegółowy sposób wyznaczenia wszystkich parametrów termodynamicznych i kinetycznych opisujących procesy typu EC'. Precyzyjnie wyznaczono stałą szybkości reakcji homo- i heterogenicznej, katodowy i anodowy współczynnik przejścia, współczynniki dyfuzji oraz potencjał formalny układu Fe(III)/Fe(II). W pracy [H5] omawiana jest reakcja Fentona, jednak należy podkreślić, że przedstawiona tam analiza ma zastosowanie dużo bardziej ogólne i może być zastosowana do badań dowolnych



reakcji typu EC', w których mediator redoks jest nośnikiem elektronów pomiędzy elektrodą i molekułą docelową (bezpośrednio nieaktywną elektrodowo).

Adsorpcja wodoru na elektrodzie platynowej

W środowisku kwaśnym, na metalach z grupy platynowców (Ru, Rh, Pd, Os, Ir, i Pt) jon wodorowy redukuje się przy potencjałach dodatnich względem potencjału standardowego, $E_{\text{H}^+/\frac{1}{2}\text{H}_2}^0$, w procesie podpotencjałowej adsorpcji wodoru (UPD). Podobne reakcje, w których tworzona jest zwykle monowarstwą atomowa, obserwuje się w elektroredukcji niektórych pierwiastków, głównie metali na innych metalach. Podpotencjałowa adsorpcja jest w dużej mierze wynikiem silnego oddziaływania osadzanych atomów z podłożem [48]. Podpotencjałowa adsorpcja wodoru może być zapisana następującym równaniem:



Analiza danych dostępnych w literaturze wskazuje na duże rozbieżności pomiędzy danymi kinetycznymi elektrosorpcji wodoru na elektrodzie platynowej [H6]. Wynika to z trudności eksperymentalnych, jak również z różnych sposobów przygotowania powierzchni tych elektrod. W pracy [H6] podpotencjałowa adsorpcja wodoru badana była w roztworach kwasów siarkowego i nadchlorowego. Do pomiaru impedancji zastosowano analizator częstotliwości FRA, który nie był bezpośrednio sprzęgnięty z potencjostatem, co pozwoliło na wyeliminowanie stałej czasowej układów elektronicznych potencjostatu i pomiarów przy wysokich częstotliwościach do 1 MHz. W badaniach wyznaczono parametry termodynamiczne granicy faz (rysunek 9 w pracy [H10]) oraz opór przeniesienia ładunku w reakcji (5), który przedstawiony jest w funkcji potencjału elektrody na rysunku 10 w publikacji [H6].

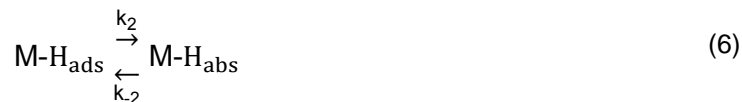
Opisany w pracy [H6] układ eksperymentalny może być zastosowany do badania bardzo szybkich procesów elektrodowych. Dla innych metali z grupy platynowców pomiary impedancyjne prowadzone były w układach klasycznych. Powierzchnia rzeczywista metali określona została na podstawie ładunku adsorpcji UPD wodoru i miedzi. Wyniki wskazują, że szybkość procesów UPD wodoru na metalach z grupy platynowców zmniejsza się w następującym szeregu: Pt > Ir > Pd > Rh ≈ Ru. [H6], [49], [50].

Absorpcja wodoru w metalach – modelowy układ Pd-H

Procesy sorpcji wodoru są zagadnieniem o dużym znaczeniu naukowym i technologicznym. Pełnią one kluczową rolę w problematyce związanej m. in. z wykorzystaniem wodoru jako paliwa oraz w ochronie konstrukcji metalowych narażonych na korozję wodorową. Układ palladowódor jest modelowym układem tego typu procesów, dla którego absorpcja wodoru została zaobserwowana przez Grahama 150 lat temu [51]. Absorpcja wodoru w stopach palladu z innymi pierwiastkami zależy w dużym stopniu od rodzaju domieszki, jednak trudno jest przewidzieć jej wpływ na zdolności absorpcyjne stopu. Należy podkreślić, że do dziś mechanizm absorpcji wodoru w metalach



nie jest znany. W najprostszym ujęciu możemy wyróżnić dwa podstawowe schematy, tj. absorpcję pośrednią i bezpośrednią. W pierwszym z nich, proces absorpcji poprzedzony jest utworzeniem wodoru zaadsorbowanego na powierzchni metalu, reakcja (5), następnie zaadsorbowany wodór dyfunduje w głąb metalu [52]:



W modelu bezpośredniej absorpcji wodór ulega redukcji i zostaje od razu zaadsorbowany do wnętrza fazy bez utworzenia MH_{ads} :



W modelu tym, adsorpcja wodoru na powierzchni metalu jest zjawiskiem zachodzącym niezależnie od procesu absorpcji. Przy bardziej ujemnych potencjałach zachodzi również proces wydzielania gazowego wodoru wg. mechanizmu Tafela lub Heyrovsky'ego. Jest to tylko najbardziej ogólna klasyfikacja mechanizmów elektrosorpcji, nie uwzględnia się w niej rodzaju zaadsorbowanego wodoru, nie tylko pomiędzy $\text{H}_{\text{UPD}(\text{tetr})}$ $\text{H}_{\text{UPD}(\text{otk})}$, ale również pomiędzy H_{UPD} i H_{OPD} . Wielu autorów postuluje istnienie wodoru zaabsorbowanego w metalu podpowierzchniowo, jako odrębnej fazy [53]. Wodór ten różni się właściwościami oraz stężeniem od wodoru zaabsorbowanego w głębi metalu w fazach α -Pd-H i β -Pd-H. Ilość wodoru rozpuszczonego w warstwie podpowierzchniowej zależy od składu roztworu, ale jest większa niż w głębi palladu. Dodatkowo proponuje się, aby w mechanizmie dwuetapowym wodór absorbował się do fazy alfa z pośrednim utworzeniem $\text{MH}_{\text{ads,UPD}}$, natomiast do fazy beta z utworzeniem $\text{MH}_{\text{ads,OPD}}$ [54].

Celem pracy [H7] były systematyczne badania wpływu pierwiastka niemetalicznego do modelowego układu Pd-H na termodynamiczne i kinetyczne parametry procesów elektrosorpcji wodoru. Zwiększenie zawartości fosforu w układzie Pd-P powoduje zmniejszenie stężenia wodoru na plateau izotermy, natomiast w obszarze niskich ciśnień wodoru następuje dziesięciokrotnie większa rozpuszczalność wodoru względem rozpuszczalności w czystym metalu. Dla wszystkich badanych stopów i nanocząstek obserwowano przyspieszenie kinetyki procesów absorpcji wodoru w obecności substancji powierzchniowo czynnej – fioletu krystalicznego. Jednak w większości przypadków kinetyka procesów powierzchniowych w dużym stopniu limitowała szybkość procesów absorpcji.



Nanostrukturalne układy metaliczne zawierające pallad

Nanostrukturalne stopy palladu z platyną wytworzone zostały bez użycia substancji powierzchniowo czynnych, co pozwoliło na badania ab- i adsorpcji wodoru [55]. Synteza nanocząstek bimetalicznych Pd-Pt prowadzona była w glikolu etylenowym w podwyższonej temperaturze. Morfologię nanocząstek zbadano metodą dyfrakcji promieni rentgenowskich (XRD) oraz metodą spektroskopii fotoelektronów XPS. Materiały te wykazywały znacznie zwiększone zdolności sorpcyjne wodoru w stosunku do ich litych odpowiedników opisanych w literaturze [56]. Efekt ten był wcześniej zauważony przez Kobayashiego i współpracowników, autorzy przypisali go bliżej niezdefiniowanym efektom mezoskopowym [57]. Przedstawione w pracy [H8] wyniki wskazują jednak, że przyczyną zwiększenia absorpcji jest znaczna segregacja nanocząstek stopów Pd-Pt i chemiczne samoporzędkowanie stopu, w wyniku którego dochodzi do tworzenia obszarów o większej i mniejszej zawartości platyny. Ponadto, w pracy [H8] wykazano, że platyna preferencyjnie gromadzi się na powierzchni nanocząstek. Należy zaznaczyć, że zwiększenie rozpuszczalności wodoru w stopach Pd-Pt jest tu tylko pozorne, ponieważ obserwowana jest rozpuszczalność w stopie o znacznie mniejszej zawartości platyny, niż wynikałoby to ze średniego, tj. nominalnego składu stopu. Segregacja nanocząstek Pd-Pt wykazana została poprzez zestawienie i porównanie izoterm absorpcji wodoru wyznaczonych dla materiałów nanostrukturalnych Pd-Pt oraz dla izoterm otrzymanych dla litych stopów niehomogenicznych. Te ostatnie otrzymano w grupie Flanagan przez wygrzewanie stopów homogenicznych w wysokiej temperaturze (zwykle ok. 900 K) i pod bardzo wysokim ciśnieniem wodoru rzędu 300 atm. [58-64]. W świetle tych wyników oraz badań spektroskopii fotoelektronów wybijanych promieniowaniem rentgenowskim (XPS) i dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) opisanych w [H8], zaobserwowany efekt zwiększonej rozpuszczalności wodoru przypisany został segregacji stopów. Efektem mezoskopowym jest tutaj zwiększona mobilność atomów w stopie i wynikająca z tego zwiększona tendencja do segregacji.

Należy podkreślić, że zaobserwowana przez nas samoorganizacja nanostrukturalnych stopów Pd-Pt implikuje dwie ważne cechy tego typu układów: (i) możliwość permeacji wodoru przez *quasi* - dwu wymiarowe warstwy Pt oraz (ii) potencjalną stabilność bardzo cienkich warstw metalicznych w układach wodorochłonnych. W celu eksperymentalnego potwierdzenia tych obserwacji wytworzono szereg nanostrukturalnych układów Pd-Pt o skrajnie wysegregowanej dystrybucji pierwiastków tj. składających się z warstw czystego palladu o różnych grubościach (50 – 1000 nm) pokrytych monowarstwami atomowymi platyny (0,2 - 10 ML). Podobne katalizatory palladowe pokryte monowarstwą Pt zostały po raz pierwszy otrzymane w grupie Adzica i były stosowane tylko w reakcjach redukcji tlenu (ORR) [65-69] oraz utleniania paliw ciekłych [70]. Autorzy wielokrotnie wskazywali na wyjątkową trwałość tych układów i ich odporność na wielokrotne cykle utleniania i redukcji powierzchni [71]. Jednak w pracach tych nie opisano wpływu warstwy platyny na procesy elektrosorpcji wodoru. Autorzy nie przedstawili również wyników z zakresu pozwalającego na znaczną absorpcję wodoru w badanych katalizatorach, a limit katodowy na woltamogramach nie przekraczał +0.1V vs. RHE, gdzie absorpcja wodoru jest bardzo niska, zwłaszcza w roztworach natlenionych stosowanych w ORR.

W pracy [H9] po raz pierwszy wykazano zasadniczy wpływ monoatomowej warstwy platyny na kinetykę absorpcji wodoru. Porównanie krzywych chronowoltamperometrycznych dla czystego palladu oraz tej

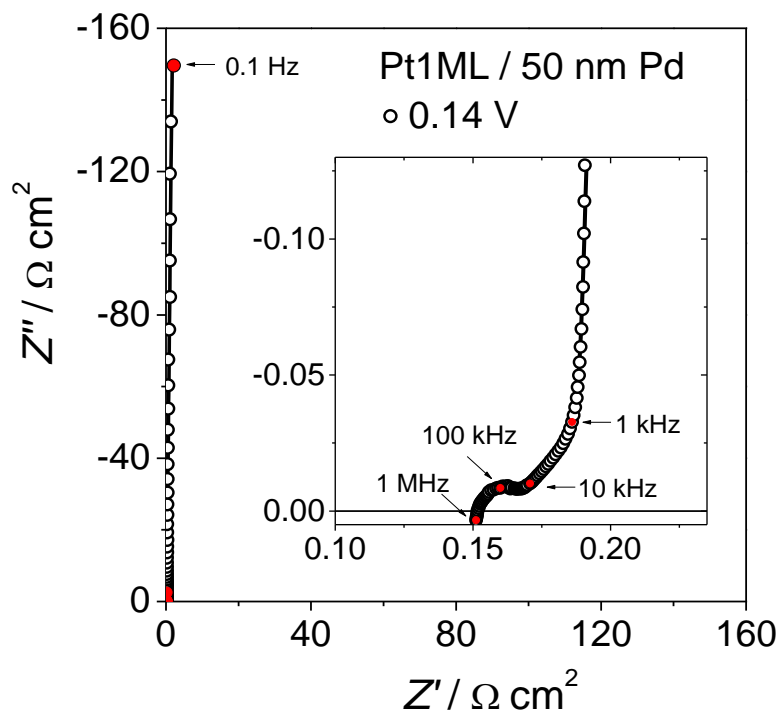


samej elektrody pokrytej monowarstwą Pt przedstawiono na rysunku 1 w pracy [H9]. Przyspieszenie procesów absorpcji wodoru następuje także w fazie alfa i nie może być zatem związane tylko z przyspieszeniem nadpotencjałowej adsorpcji wodoru (H-OPD), ponieważ stopień pokrycia wodorem H-OPD na Pt jest znikomy powyżej potencjału +0.1V vs. RHE [72]. Wyniki przedstawione w pracy [H9] wskazują na zaskakującą stabilność monowarstw platyny pokrywającej pallad w procesach absorpcji i desorpcji wodoru. Dzięki zastosowaniu metody spektroskopii impedancyjnej wykazano, że w roztworze 0.1 M kwasu siarkowego czynnikiem limitującym szybkość absorpcji wodoru jest ograniczone przewodnictwo roztworu. Po zwiększeniu stężenia kwasu procesy absorpcji uległy dalszemu, znacznemu przyspieszeniu dla elektrod platynizowanych (rysunek 3 w [H9]). Na szczególną uwagę zasługuje tu fakt, że w takich warunkach następuje całkowite odseparowanie prądów związanych z procesami absorpcji wodoru oraz wydzielaniem gazowego wodoru. Na rysunku 3 w pracy [H9] widoczne są wyraźne piki absorpcji wodoru, separacja tych pików na skali potencjału wynika z histerezy procesów ab- i desorpcji wodoru, którą obserwuje się także w warunkach równowagowych [73]. Taką histerezę otrzymaną dla badanego układu Pd-Pt przedstawiono na rysunku 5 w pracy [H9].

Dla palladu i stopów palladu modyfikowanych monowarstwą platyny wykonywane były także pomiary rozpuszczalności wodoru. W tym celu elektroda była nasycona wodorem w warunkach potencjostatycznych, a następnie polaryzowana do potencjału z obszaru warstwy podwójnej. Ilość zgromadzonego wodoru wyznaczana była z krzywych desorpcji wodoru. W trakcie pomiarów elektroda była omywana strumieniem argonu w celu wyeliminowania utleniania cząsteczkowego wodoru z roztworu (pochodzącego z reakcji wydzielania wodoru). Takie postępowanie pozwala na wyeliminowanie błędów związanych z utlenianiem cząsteczek H_2 z roztworu [74]. Izotermy absorpcji wodoru dla elektrod czystych i pokrytych warstwą Pt są praktycznie identyczne (rysunek 5 w [H9]), dlatego można stwierdzić, że obecność monowarstwy platynowej nie ma wpływu na ilość zaabsorbowanego wodoru w warunkach równowagowych.

Kinetyka procesów elektrosorpcji wodoru w czystym i platynizowanym palladzie badana była przy użyciu elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej. Opór przeniesienia ładunku, R_{ct} , procesu absorpcji wodoru w czystym palladzie jest rzędu $100 \Omega cm^{-2}$ dla potencjałów elektrody z obszaru absorpcji wodoru. Po naniesieniu monowarstwy platyny, charakter widma zmienia się diametralnie. Opór przeniesienia ładunku staje się na tyle mały, że nie jest możliwe jego wyznaczenie w klasycznych pomiarach impedancyjnych [H9]. Po nałożeniu 1 monowarstwy platyny, opór $R_{ct,HUPD}$ jest niemierzalnie mały, wobec czego w obu obwodach pojemność warstwy podwójnej i pseudopojemność adsorpcji wodoru C_{HUPD} stają się nierozróżnialne, jednak w układzie takim mierzalna staje się impedancja Warburga związana z dyfuzją wodoru z obszaru skończonego, co stwarza możliwości wyznaczenia współczynnika dyfuzji wodoru w bardzo cienkich warstwach palladu [H9]. W naszych najnowszych badaniach przeprowadziliśmy wysokoczęstotliwościowe pomiary impedancyjne dla elektrod bliźniaczych 50 nm Pd pokrytych monowarstwą palladu w układzie podobnym do opisanego w pracy [H6]. Przykładowe widmo impedancyjne przedstawiono na Rysunek 1.





Rysunek 1. Przykładowe widmo impedancyjne w przestrzeni zespolonej otrzymane dla filmu palladowego o grubości 50 nm Pd pokrytego atomową monowarstwą platyny w 0.5 M kwasie siarkowym(VI). Linia ciągłą zaznaczono wynik dopasowania modelu absorpcji pośredniej [52] do punktów eksperymentalnych.

Należy zaznaczyć, że opór przeniesienia ładunku $R_{ct} = 0.018 \pm 0.001 \Omega \text{ cm}^2$ przy potencjale 0.130 V jest blisko 2 razy mniejszy od oporu przeniesienia ładunku w reakcji podpotencjałowej adsorpcji wodoru na elektrodzie Pt [H6] przy tym samym potencjale. Świadczy to, o niezwykle dużej szybkości procesów absorpcji wodoru na opisanych tu katalizatorach Pd-Pt, co może wynikać z efektów elektronowych związanych z niewielką kontrakcją stałej sieciowej pseudomorficznej monowarstwy Pt. Podobny wzrost szybkości procesów absorpcji do tej pory nie został opisany w literaturze, pomimo prób wykorzystania Pt jako katalizatora tej reakcji [75, 76]. Warstwy te były jednak na tyle grube (min. kilka nanometrów, tj. > 20 ML), że blokowały permeację wodoru. Wyznaczony w modelu absorpcji pośredniej współczynnik dyfuzji wodoru w 50 nm Pd jest równy $1,0 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ i ma zbliżoną wartość do D_{H} wodoru w litym palladzie. Należy zwrócić uwagę, że do tej pory wiarygodne wartości współczynników dyfuzji nie były otrzymywane dla tak cienkich warstw Pd.

Impedancja ciała stałego – niemetaliczne magazyny wodoru

Amidoborany metali (MNH_2BH_3) są pochodnymi borazanu (NH_3BH_3) i stanowią ważną grupę stałych magazynów wodoru charakteryzujących się stosunkowo niską temperaturą desorpcji, zaczynającej się już od 70–100°C. Związki te wykazują się bardzo dużą zawartością masową wodoru (7–14 % wag.) [77], dlatego mogą stanowić dogodne źródło wodoru w niskotemperaturowych ogniwach paliwowych.

W literaturze opisano amidoborany niektórych metali alkalicznych, ziem alkalicznych oraz ziem rzadkich. Desorpcję wodoru bez jednoczesnego wydzielania niewielkich ilości innych gazów, np. amoniaku, obserwuje się jednak tylko dla amidoboranu potasu [78]. Ogrzewanie innych pochodnych amidoboranów prowadzi do wydzielania wodoru zanieczyszczonego amoniakiem. Wydzielanie NH_3 następuje w endotermicznym procesie zachodzącym już w temperaturze 40–60°C, który poprzedza desorpcję wodoru (70–100°C).

W pracy [H10] po raz pierwszy zbadano właściwości elektryczne amidoboranów oraz trzech pochodnych tych związków z metalami alkalicznymi. Przeprowadzono również pomiary zmian właściwości elektrycznych tych materiałów *in situ* podczas procesu desorpcji wodoru. Pomiary te były sprzęgnięte z analizą termogravimetryczną, kalorymetrią skaningową, spektrometrią masową, metodami spektroskopii w podczerwieni oraz metodą jądrowego rezonansu magnetycznego. Pomiary impedancyjne przeprowadzone zostały w nowym układzie pomiarowym zaprojektowanym do pomiaru reaktywnych próbek proszkowych (Fig .1 in [H10]).

Znormalizowane wykresy impedancji w przestrzeni zespolonej amidoboranów metali alkalicznych przedstawione są na rysunku 2 w pracy [H10]. Dla wszystkich próbek obserwowano taki sam kształt widm impedancyjnych, tj. jedno półkole zakończone linią prostą, nachyloną pod kątem ok. 45° do osi Z' wynikającą z akumulacji ładunku na elektrodach blokujących przepływ jonów. Jest to typowy obraz dla próbek z dominującym przewodnictwem jonowym [79]. Rozmiar półkola jest ponadto silnie zależny od temperatury, co również wskazuje na zmianę przewodnictwa jonowego. Dla układu liniowego, zespoloną przenikalność elektryczną, $\varepsilon^*(\omega)$, można wyrazić poprzez sumę wkładów pochodzących od niezależnych procesów, tj. (i) natychmiastowej polaryzacji w badanym zakresie częstotliwości zmian pola elektrycznego (10 MHz – 0.1 Hz), ε_∞ , (ii) transportu jonów, ε_σ , oraz (iii) relaksacji dielektrycznej, $\varepsilon_{\text{relax}}$. Przyjmując model relaksacji Cole-Cole'a [77], zespoloną przenikalność elektryczną można wyrazić równaniem (8).

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \varepsilon_\sigma + \varepsilon_{\text{relax}} = \varepsilon_\infty + \frac{\sigma_0}{i\omega\varepsilon_0} + \frac{\Delta\varepsilon}{1 + (i\omega\tau)^{1-n}} \quad (8)$$

Takiemu modelowi relaksacji odpowiada obwód zastępczy przedstawiony na rysunku [H10]. Dodatkowy element CPE, zdefiniowany parametrami A_d , n_d , opisuje tu impedancję elektrod $Z_{\text{el}} = [A_d(j\omega)^{n_d}]^{-1}$ (impedancja Warburga $n_d = 0.5$) [79].

Właściwości elektryczne borazanu i amidoboranów metali alkalicznych przedstawione zostały na rysunku 3 w publikacji [H10]. Część urojona zespolonej przenikalności elektrycznej jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości, co wskazuje na dominację przewodnictwa jonowego (opisanego drugim członem w równaniu (8)). W celu potwierdzenia tej obserwacji zastosowano formalizm zespolonego modułu elektrycznego, zdefiniowanego jako $M^*(\omega) = [\varepsilon^*(\omega)]^{-1}$ [80]. W takiej reprezentacji oraz dodatkowo po zdefiniowaniu czasu relaksacji związanego z ruchem jonów, $\tau_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_s \sigma_0$, zespolony moduł $M^*(\omega)$ w nieobecności innych procesów relaksacyjnych może być opisany równaniem (9):



$$M^*(\omega) = [\varepsilon^*(\omega)]^{-1} = M_s \frac{j\omega\tau_\sigma}{1 + j\omega\tau_\sigma} \quad (9)$$

Wówczas na wykresie części urojonej modułu elektrycznego od częstotliwości, $M''(\omega)$, obserwuje się pojedyncze maksimum przy częstotliwości rezonansowej, $1/\tau_\sigma$, podobnie jak ma to miejsce w przypadku analogicznych zależności współczynnika strat dielektrycznych, ε'' , dla relaksacji dielektrycznej. Stosując notację zespolonego modułu elektrycznego, $M^*(\omega)$, można więc uwydatnić różnicę pomiędzy przewodnictwem lokalnym (relaksacja dielektryczna) i nielokalnym związanym z transportem ładunków. Wyżej opisane maksima M'' vs. $\log(f)$ były obserwowane dla wszystkich próbek amidoboranów metali alkalicznych (rysunek 3 w [H10]). Należy zaznaczyć, że wraz ze wzrostem temperatury położenie maksimum ulega przesunięciu w stronę wyższych częstotliwości (materiały pomocnicze (ESI) do pracy [H10]). W ten sposób wykryto i po raz pierwszy scharakteryzowano przewodnictwo amidoboranów metali. Należy zwrócić uwagę, że przewodnictwa jonowe obserwowane dla większości tych związków są bardzo duże i osiągają wartości charakterystyczne dla przewodników superjonowych ($\sigma = 2.3$ mS/cm, $E_a = 158$ kJ/mol for NaAB) [H10].

Zarówno przewodnictwo jak i właściwości dielektryczne amidoboranów ulegają istotnym zmianom w trakcie termicznego rozkładu i desorpcji wodoru. W trakcie tych procesów pomiary impedancji sprzężone zostały z analizą termogravimetryczną, kalorymetrią skaningową oraz spektrometrią mas (rysunek 7 w [H10]), co pozwoliło na ustalenie mechanizmu termicznego rozkładu połączonego z desorpcją wodoru. Mechanizm ten przedstawiono schematycznie na rysunku 9 w pracy [H10]. W badaniach tych wykazano również, że spektroskopia impedancyjna może być zastosowana do monitorowania procesów desorpcji wodoru ze stałych magazynów wodoru.



Podsumowanie

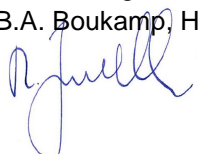
Do najważniejszych osiągnięć naukowych zaliczam:

- (i) Zaproponowanie modelu opisującego impedancję układów elektrokatalitycznych, w którym wszystkie parametry zostały zdefiniowane za pomocą odpowiednich stałych fizykochemicznych.
- (ii) Zaproponowanie nowego elementu impedancyjnego oraz wykazanie jego zastosowań do pełnej charakterystyki elektrochemicznej procesów elektrokatalitycznych na przykładzie reakcji Fentona.
- (iii) Zaobserwowanie dziesięciokrotnie zwiększonej ilości wodoru zaabsorbowanego w fazie alfa w układzie Pd-P-H względem układu Pd-H.
- (iv) Wykazanie segregacji nanostrukturalnych stopów bimetalicznych Pd-Pt i wyjaśnienie wyjątkowo dużej ilości wodoru zaabsorbowanego w nanocząstkach tych stopów.
- (v) Wytworzenie i charakterystyka stabilnego układu katalitycznego, który przyspiesza proces absorpcji wodoru w metalicznym palladzie około 10 000 razy.
- (vi) Wykazanie przewodnictwa jonowego amidoboranów metali alkalicznych i nowatorskie zastosowanie EIS do monitorowania procesów desorpcji wodoru z tych niemetalicznych magazynów wodoru.



Literatura

- [1] A. Lasia, *Electrochemical impedance spectroscopy and its applications*, Springer, 2014.
- [2] C. Desilets, A. Lasia, *Electrochim. Acta*, 78 (2012) 286-293.
- [3] K. Darowicki, P. Slepski, *J. Electroanal. Chem.*, 547 (2003) 1-8.
- [4] J. Ryl, R. Bogdanowicz, P. Slepski, M. Sobaszek, K. Darowicki, *J. Electrochem. Soc.*, 161 (2014) H359-H364.
- [5] G.S. Popkirov, R.N. Schindler, *Rev. Sci. Instrum.*, 64 (1993) 3111-3115.
- [6] C. Gabrielli, M. Keddam, J.F. Lizée, *J. Electroanal. Chem.*, 205 (1986) 59-75.
- [7] S.E. Mochalov, V.S. Kolosnitsyn, *Instrum. Exp. Tech.*, 43 (2000) 53-56.
- [8] J.S. Yoo, S.M. Park, *Anal. Chem.*, 72 (2000) 2035-2041.
- [9] S.M. Park, J.S. Yoo, *Anal. Chem.*, 75 (2003) 455a-461a.
- [10] J.S. Yoo, I. Song, J.H. Lee, S.M. Park, *Anal. Chem.*, 75 (2003) 3294-3300.
- [11] A. Lasia, *Anal. Chem.*, 73 (2001) 4059-4059.
- [12] J.S. Yoo, S.M. Park, *Anal. Chem.*, 73 (2001) 4060-4061.
- [13] J. Newman, W. Tiedemann, *AIChE J.*, 21 (1975) 25-41.
- [14] J.S. Yi, T. Van Nguyen, *J. Electrochem. Soc.*, 146 (1999) 38-45.
- [15] E. Frackowiak, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 9 (2007) 1774-1785.
- [16] C.K. Kjartansdottir, L.P. Nielsen, P. Møller, *Int. J. Hydrogen Energy*, 38 (2013) 8221-8231.
- [17] V. Perez-Herranz, I. Herraiz-Cardona, E. Ortega, J. Garcia-Anton, *Tms 2012 141st Annual Meeting & Exhibition - Supplemental Proceedings, Vol 1: Materials Processing and Interfaces*, (2012) 141-148.
- [18] T. Pajkossy, *J. Electroanal. Chem.*, 364 (1994) 111-125.
- [19] S. Trasatti, O.A. Petrii, *J. Electroanal. Chem.*, 327 (1992) 353-376.
- [20] A.N. Frumkin, *Zh. Fiz. Khim.*, 23 (1949) 1477-1482.
- [21] R. De Levie, *Electrochim. Acta*, 8 (1963) 751-780.
- [22] R. De Levie, *Electrochim. Acta*, 9 (1964) 1231-1245.
- [23] O.E. Barcia, S. Cattarin, E. D'Elia, I. Frateur, O.R. Mattos, M. Musiani, N. Pebere, B. Tribollet, *Electrochim. Acta*, 51 (2006) 2096-2097.
- [24] O.E. Barcia, E. D'Elia, I. Frateur, O.R. Mattos, N. Pebere, B. Tribollet, *Electrochim. Acta*, 47 (2002) 2109-2116.
- [25] A. Lasia, *J. Electroanal. Chem.*, 428 (1997) 155-164.
- [26] D. Harrington, P. Van den Driessche, *J. Electroanal. Chem.*, 501 (2001) 222-234.
- [27] A. Lasia, *Electrochemical impedance spectroscopy and its applications*, in: *Modern aspects of electrochemistry*, Springer, 2002, pp. 143-248.
- [28] J. Bisquert, *Phys. Chem. Chem. Phys. B*, 106 (2002) 325-333.
- [29] J. Bisquert, *Compte. Rend. Acad. Sci. Paris, Ser. B*, 499 (2001) 112-120.
- [30] F. Fabregat-Santiago, G. Garcia-Belmonte, J. Bisquert, A. Zaban, P. Salvador, *J. Phys. Chem. B*, 106 (2002) 334-339.
- [31] R.P. Janek, W.R. Fawcett, A. Ulman, *J. Phys. Chem. B*, 101 (1997) 8550-8558.
- [32] R.P. Janek, W.R. Fawcett, A. Ulman, *Langmuir*, 14 (1998) 3011-3018.
- [33] L.V. Protsailo, W.R. Fawcett, *Electrochim. Acta*, 45 (2000) 3497-3505.
- [34] L.V. Protsailo, W.R. Fawcett, *Langmuir*, 18 (2002) 8933-8941.
- [35] E. Katz, I. Willner, *Electroanalysis*, 15 (2003) 913-947.
- [36] C.A. Martinez-Huitle, E. Brillas, *Applied Catalysis B-Environmental*, 87 (2009) 105-145.
- [37] V. Artero, M. Chavarot-Kerlidou, M. Fontecave, *Angewandte Chemie-International Edition*, 50 (2011) 7238-7266.
- [38] M. Beley, J.P. Collin, R. Ruppert, J.P. Sauvage, *J. Am. Chem. Soc.*, 108 (1986) 7461-7467.
- [39] M. Beley, J.P. Collin, R. Ruppert, J.P. Sauvage, *J. Am. Chem. Soc.-Chem. Commun.*, (1984) 1315-1316.
- [40] P.M. Armistead, H.H. Thorp, *Anal. Chem.*, 73 (2001) 558-564.
- [41] K.R. Ward, N.S. Lawrence, R.S. Hartshorne, R.G. Compton, *J. Phys. Chem. C*, 115 (2011) 11204-11215.
- [42] J.F. Rusling, K. Ito, *Anal. Chim. Acta*, 252 (1991) 23-27.
- [43] B.A. Boukamp, H.J.M. Bouwmeester, *Solid State Ionics*, 157 (2003) 29-33.



- [44] B.A. Boukamp, M. Verbraeken, D.H.A. Blank, P. Holtappels, *Solid State Ionics*, 177 (2006) 2539-2541.
- [45] E. Barsoukov, J.R. Macdonald, *Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications*, John Wiley & Sons, 2005.
- [46] G.P. Anipsitakis, D.D. Dionysiou, *Appl Catal B-Environ*, 54 (2004) 155-163.
- [47] M. Pera-Titus, V. Garcia-Molina, M.A. Banos, J. Gimenez, S. Esplugas, *Appl Catal B-Environ*, 47 (2004) 219-256.
- [48] V. Sudha, M.V. Sangaranarayanan, *J. Phys. Chem. B*, 106 (2002) 2699-2707.
- [49] R. Jurczakowski, B. Łosiewicz, A. Lasia, Kinetics of hydrogen electrosorption on Iridium, in preparation
- [50] B. Losiewicz, R. Jurczakowski, A. Lasia, *Electrochim. Acta*, 56 (2011) 5746-5753.
- [51] Graham, T. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 156 (1866) 283.
- [52] A. Lasia, *J. Electroanal. Chem.*, 593 (2006) 159-166.
- [53] A. Zurowski, M. Lukaszewski, A. Czerwinski, *Electrochim. Acta*, 53 (2008) 7812-7816.
- [54] A. Czerwinski, I. Kiersztyn, M. Grden, J. Czaplą, *J. Electroanal. Chem.*, 471 (1999) 190-195.
- [55] A. Januszewska, G. Dercz, J. Piwowar, R. Jurczakowski, A. Lewera, *Chem.-A Europ. J.*, 19 (2013) 17159-17164.
- [56] M. Grden, A. Piasek, Z. Koczorowski, A. Czerwinski, *J. Electroanal. Chem.*, 532 (2002) 35-42.
- [57] H. Kobayashi, H. Morita, M. Yamauchi, R. Ikeda, H. Kitagawa, Y. Kubota, K. Kato, M. Takata, S. Toh, S. Matsumura, *J. Am. Chem. Soc.*, 134 (2012) 12390-12393.
- [58] T.B. Flanagan, J.D. Clewley, H. Noh, J. Barker, Y. Sakamoto, *Acta Mater.*, 46 (1998) 2173-2183.
- [59] T.B. Flanagan, *Majchrza.S. B. .B, Philos. Mag.*, 25 (1972) 257-262.
- [60] T.B. Flanagan, H. Noh, *J. Alloys Compd.*, 231 (1995) 1-9.
- [61] T.B. Flanagan, C.-N. Park, *J. Alloys Compd.*, 293 (1999) 161-168.
- [62] R. Luke, G. Schmitz, T. Flanagan, R. Kirchheim, *J. Alloys Compd.*, 330 (2002) 219-224.
- [63] H. Noh, J.D. Clewley, T.B. Flanagan, *Scr. Mater.*, 34 (1996) 665-668.
- [64] H. Noh, T.B. Flanagan, Y. Sakamoto, *J. Alloys Compd.*, 231 (1995) 10-14.
- [65] R.R. Adzic, *Electrocatalysis*, 3 (2012) 163-169.
- [66] S.T. Bliznakov, M.B. Vukmirovic, L. Yang, E.A. Sutter, R.R. Adzic, *J. Electrochem. Soc.*, 159 (2012) F501-F506.
- [67] Y. Choi, K.A. Kuttiyiel, J.P. Labis, K. Sasaki, G.G. Park, T.H. Yang, R.R. Adzic, *Topics in Catalysis*, 56 (2013) 1059-1064.
- [68] K. Gong, J. Park, D. Su, R.R. Adzic, *J. Solid State Electrochem.*, 18 (2014) 1171-1179.
- [69] K.A. Kuttiyiel, K. Sasaki, D. Su, M.B. Vukmirovic, N.S. Marinkovic, R.R. Adzic, *Electrochimica Acta*, 110 (2013) 267-272.
- [70] M. Li, P. Liu, R.R. Adzic, *J. Phys. Chem. Lett.*, 3 (2012) 3480-3485.
- [71] J. Zhang, M.B. Vukmirovic, Y. Xu, M. Mavrikakis, R.R. Adzic, *Angewandte Chemie International Edition*, 44 (2005) 2132-2135.
- [72] K. Kunimatsu, T. Senzaki, G. Samjeske, M. Tsushima, M. Osawa, *Electrochim. Acta*, 52 (2007) 5715-5724.
- [73] K. Hubkowska, M. Łukaszewski, A. Czerwiński, *Electrochim. Acta*, 56 (2010) 235-242.
- [74] F. Vigier, R. Jurczakowski, A. Lasia, *J. Electroanal. Chem.*, 588 (2006) 32-43.
- [75] Y. Nishi, H.H. Uchida, T. Honjo, *Materials Transactions*, 45 (2004) 2902-2905.
- [76] N. Strohfeldt, A. Tittel, M. Schaferling, F. Neubrech, U. Kreibig, R. Griessen, H. Giessen, *Nano Letters*, 14 (2014) 1140-1147.
- [77] Z.T. Xiong, G.T. Wu, Y.S. Chua, J.J. Hu, T. He, W.L. Xu, P. Chen, *Energ. Environ. Sci.*, 1 (2008) 360-363.
- [78] H.V.K. Diyabalanage, T. Nakagawa, R.P. Shrestha, T.A. Semelsberger, B.L. Davis, B.L. Scott, A.K. Burrell, W.I.F. David, K.R. Ryan, M.O. Jones, P.P. Edwards, *J. Am. Chem. Soc.*, 132 (2010) 11836-11837.
- [79] J.R. Dygas, *Solid State Ionics*, 176 (2005) 2065-2078.
- [80] R. Gerhardt, *J. Phys. Chem. Solids*, 55 (1994) 1491-1506.



5. Wykaz innych (nie wchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt. I) opublikowanych prac naukowych oraz wskaźniki dokonań naukowych

a) Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports

Przed uzyskaniem stopnia doktora (w sumie 5 prac):

- P1. **R. Jurczakowski**, M. Orlik
"Experimental and theoretical studies of the multistability in the electroreduction of the Ni(II) complexes at a streaming mercury electrode"
Journal of Physical Chemistry B, 2003, 107, 10148–10158
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 3,696
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na propozycji zbadania układu Ni(II)-N₃⁻, przeprowadzeniu badań eksperymentalnych, opracowaniu programu do kontroli potencjostatu w celu zarejestrowania zjawiska trzystabilności, opracowaniu danych i dyskusji wyników.
- P2. M. Orlik, **R. Jurczakowski**
"On the stability of nonequilibrium steady-states for the electrode processes at a streaming mercury electrode"
Journal of Physical Chemistry B, 2002, 106, 7527–7536
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 3,607
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przeprowadzeniu badań eksperymentalnych, opracowaniu i dyskusji wyników.
- P3. **R. Jurczakowski**, M. Orlik
"Bistable/oscillatory system based on the electroreduction of thiocyanate complexes of nickel(II) at a streaming mercury electrode"
Journal of Physical Chemistry B, 2002, 106, 1058–1065
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 3,607
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na propozycji użycia oraz samodzielnej konstrukcji nowego typu strumieniowej elektrody rtęciowej, przeprowadzeniu badań eksperymentalnych, opracowaniu danych i dyskusji wyników.
- P4. **R. Jurczakowski**, M. Orlik
"The oscillatory course of the electroreduction of thiocyanate complexes of nickel(II) at mercury electrodes - experiment and simulation"
Journal of Electroanalytical Chemistry, 2000, 486, 65–74
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 2,672
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przeprowadzeniu eksperymentów, opracowaniu i dyskusji wyników.
- P5. **R. Jurczakowski**, M. Orlik
"On the source of oscillatory instabilities in the electroreduction of thiocyanate complexes of nickel(II) at mercury electrodes"
Journal of Electroanalytical Chemistry, 1999, 478, 118–127
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 2,672
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przeprowadzeniu eksperymentów, oraz na opracowaniu i dyskusji wyników.



Po uzyskaniu stopnia doktora (w sumie 28 prac bez prac będących przedmiotem osiągnięcia naukowego, gwiazdką zaznaczone jest autorstwo korespondencyjne R. Jurczakowskiego):

- P6. W. Adamczyk, P. Połczyński, P. Mika, T. Jaroń, Z. Mazej, K. J. Fijałkowski, **R. Jurczakowski**, W. Grochala,
"New Ag(F_{1-x}Cl_x) phases for energy storage applications"
Journal of Fluorine Chemistry, 2015, 174, 22–29
MNiSW: 25, IF₂₀₁₂: 1,952
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na nadzorowaniu badań impedancyjnych i przygotowaniu części manuskryptu dotyczącego tych badań.
- P7. K. Kłucińska, **R. Jurczakowski**, K. Maksymiuk, A. Michalska
"Ultrasensitive 4-methylumbelliferone fluorimetric determination of water contents in aprotic solvents"
Talanta, 2015, 132, 392–397
MNiSW: 40, IF₂₀₁₂: 3,511
Mój wkład powstanie tej pracy polegał na nadzorowaniu oznaczania wody metodą Karla Fischera, oraz na przygotowaniu części manuskryptu dotyczącego tych badań.
- P8. A. Januszewska, **R. Jurczakowski***, Kulesza P.
"CO₂ electroreduction at bare and Cu-decorated Pd pseudomorphic layers: Catalyst tuning by controlled and indirect supporting onto Au(111)"
Langmuir, 2014, 30(47), 14314–14321
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 4,384
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na udziale w planowaniu i kierowaniu badaniami, interpretacji wyników i przygotowaniu manuskryptu.
- P9. A. Januszewska, G. Dercz, J. Piwowar, **R. Jurczakowski***, A. Lewera
"Outstanding catalytic activity of ultra-pure platinum nanoparticles"
Chemistry – A European Journal, 2013, 19, 17159–17164
MNiSW: 40, IF₂₀₁₂: 6,378
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na nadzorowaniu badań, interpretacji danych i przygotowaniu manuskryptu.
- P10. P. Połczyński, **R. Jurczakowski***, W. Grochala
"Strong and long-lived free-radical oxidizer based on silver(II). Mechanism of Ag(I) electrooxidation in concentrated H₂SO₄"
Journal of Physical Chemistry C, 2013, 117, 20689–20696
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 4,814
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współtworzeniu koncepcji pracy, nadzorowaniu badań, udziale w interpretacji danych i przygotowanie manuskryptu.
- P11. E. Van Wenum, **R. Jurczakowski**, G. Litwinienko
"Media effects on the mechanism of antioxidant action of silybin and 2,3-dehydrosilybin: Role of the enol group"
Journal of Organic Chemistry, 2013, 78, 9102–9112
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 4,564
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na nadzorowaniu badań elektrochemicznych, interpretacji wyników elektrochemicznych i udziale w przygotowaniu części manuskryptu dotyczącej tych badań.
- P12. P. Połczyński, **R. Jurczakowski**, W. Grochala
"Stabilization and strong oxidizing properties of Ag(II) in a fluorine-free solvent"
Chemical Communications, 2013, 49, 7480–7482



MNiSW: 40, IF₂₀₁₂: 6,378

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współtworzeniu koncepcji pracy, nadzorowaniu badań, udziale w interpretacji danych i udziale w przygotowaniu manuskryptu.

- P13. M. Sosnowska, M. Goral-Kurbiel, M. Skunik-Nuckowska, **R. Jurczakowski**, P.J. Kulesza
"Hybrid materials utilizing polyelectrolyte-derivatized carbon nanotubes and vanadium-mixed addenda heteropolytungstate for efficient electrochemical charging and electrocatalysis"
J. Solid State Electrochem., 2013, 17, 1631–1640
MNiSW: 25, IF₂₀₁₂: 2,010

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na udziale w interpretacji danych impedancyjnych.

- P14. R. Solarska, **R. Jurczakowski**, J. Augustynski
"A highly stable, efficient visible-light driven water photoelectrolysis system using a nanocrystalline WO₃ photoanode and a methane sulfonic acid electrolyte"
Nanoscale, 2012, 4, 1553–1556
MNiSW: 40, IF₂₀₁₂: 6,233
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na uzyskaniu wyników impedancyjnych, interpretacji danych impedancyjnych i przygotowanie części manuskryptu dotyczącego tych badań.

- P15. P. Kietlinska, M. Królikowski, A. Dobrzeńska, **R. Jurczakowski***, K. Miecznikowski, I. A. Rutkowska, J. Stroka, P.J. Kulesza, Z. Galus
"The preparation and electrochemical properties of nanostructured nickel hexacyanoruthenate deposited on multiwalled carbon nanotubes"
Electrochimica Acta, 2011, 58, 474–480
MNiSW: 40, IF₂₀₁₂: 3,777
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu zdjęć SEM i przygotowaniu finalnej wersji manuskryptu.

- P16. A. Królikowska, **R. Jurczakowski***, P. Barczuk, J. Augustynski
"The core-shell nature of nanostructured WO₃ photoelectrodes demonstrated in spectroelectrochemical studies"
Journal of Electroanalytical Chemistry, 2011, 662, 229–239
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 2,672
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na udziale w koncepcji badań, uzyskaniu wyników impedancyjnych, interpretacji danych impedancyjnych i przygotowaniu manuskryptu dotyczącego tych badań.

- P17. M. Gorzkowski, A. Wesolowska, **R. Jurczakowski**, P. Ślepski, K. Darowicki, M. Orlik
"Electrochemical oscillations and bistability during anodic dissolution of vanadium electrode in acidic media – Part I. Experiment"
J. Solid State Electrochem., 2011, 15 (11–12), 2311–2320
MNiSW: 25, IF₂₀₁₂: 2,010
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na udziale w badaniach eksperymentalnych.

- P18. B. Łosiewicz, **R. Jurczakowski**, A. Lasia,
"Kinetics of hydrogen underpotential deposition at polycrystalline rhodium in acidic solutions"
Electrochimica Acta, 2011, 56, 5746–5753



MNiSW: 40, IF₂₀₁₂: 3,777

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na udziale w badaniach chronowoltamperometrycznych, oszacowaniu aktywnej powierzchni elektrod Rh oraz na udziale w interpretacji danych.

- P19. Kowalczyk, A. Nowicka, **R. Jurczakowski**, M. Fau, A. Krolikowska, Z. Stojek
"Construction of DNA biosensor at glassy carbon surface modified with
4-aminoethylbenzenediazonium salt"

Biosensors and Bioelectronics, 2011, 26, 2506–2512

MNiSW: 45, IF₂₀₁₂: 5,437

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na interpretacji danych impedancyjnych i przygotowanie manuskryptu dotyczącego tych badań.

- P20. R. Solarska, B. D. Alexander, A. Braun, **R. Jurczakowski**, G. Fortunato, M. Stiefel,
T. Graule, J. Augustynski
"Tailoring the morphology of WO₃ films with substitutional cation doping: effect on the
photoelectrochemical properties"

Electrochimica Acta, 2010, 55, 7780–7787

MNiSW: 40, IF₂₀₁₂: 3,777

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na uzyskaniu wyników impedancyjnych, interpretacji danych impedancyjnych i przygotowaniu manuskryptu dotyczącego tych badań.

- P21. K. Pekala, A. Wiśniewski, **R. Jurczakowski**, T. Wiśniewski, M. Wojdyga, M. Orlik
"Monitoring of spatiotemporal patterns in the oscillatory chemical reactions with the
infrared camera: experiments and model interpretation"

Journal of Physical Chemistry A, 2010, 114, 7903–7911

MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 2,771

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na udziale w prowadzeniu badań eksperymentalnych.

- P22. A. Kowalczyk, A.M. Nowicka, **R. Jurczakowski**, P. Niedzialkowski, T. Ossowski, Z. Stojek
"New anthraquinone derivatives as electrochemical redox indicators for the visualization
of the DNA hybridization process"

Electroanalysis, 2010, 22 49–59

MNiSW: 32, IF₂₀₁₂: 2,817

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na nadzorowaniu badań impedancyjnych, interpretacji danych impedancyjnych i przygotowaniu manuskryptu dotyczącego tych badań.

- P23. K. Pekala, **R. Jurczakowski**, M. Orlik
"On the interpretation of the potentiometric response of the inert solid electrodes in the
monitoring of the oscillatory processes involving hydrogen peroxide"

J. Solid State Electrochem., 2010, 14, 27–34

MNiSW: 25, IF₂₀₁₂: 2,010

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zgłoszeniu pomysłu na wykorzystanie różnych materiałów elektrodowych do potencjometrycznego badania układów oscylacyjnych, nadzorowaniu prac eksperymentalnych, udziale w interpretacji danych.



- P24. M. Gorzkowski, **R. Jurczakowski**, M. Orlik
"Electrochemical oscillations and bistability in the redox processes of mercury ions, coupled with the self-induced convection of Hg surface"
Journal of Electroanalytical Chemistry, 2008, 615, 135–144
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 2,672
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na udziale w badaniach eksperymentalnych.
- P25. M. Orlik, **R. Jurczakowski**
"The kinetic parameters of the electrocatalytic reduction of the coordinated azide anions found from comparison of DC and AC measurements for the tristable Ni(II)-N₃⁻ system"
Journal of Electroanalytical Chemistry, 2008, 614, 139–148
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 2,672
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przeprowadzeniu pomiarów chronoamperometrycznych, chronowoltamperometrycznych, przeprowadzeniu badań impedancyjnych, udziale w interpretacji danych i przygotowaniu rysunków do manuskryptu.
- P26. K. Pekala, **R. Jurczakowski**, A. Lewera, M. Orlik
"Luminescent chemical waves in the Cu(II)-catalyzed oscillatory oxidation of SCN⁻ ions with hydrogen peroxide"
Journal of Physical Chemistry A, 2007, 111, 3439–3442
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 2,771
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na udziale w pomyśle na badania temperatury w trakcie oscylacji i nadzorowaniu prac eksperymentalnych.
- P27. **R. Jurczakowski**, M. Orlik
"Experimental and theoretical impedance studies of oscillations and bistability in the Ni(II)-SCN⁻ electroreduction at the streaming mercury electrode"
Journal of Electroanalytical Chemistry, 2007, 605, 41–52
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 2,672
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przeprowadzeniu pomiarów CV i badań impedancyjnych.
- P28. F. Vigier, **R. Jurczakowski**, A. Lasia
"Reply to the letter of P. Zoltowski »Remarks on determination of hydrogen absorption isotherm and diffusion coefficient in Pd₈₁Pt₁₉ alloy«"
Journal of Electroanalytical Chemistry, 2007, 602 (1) 145–148
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 2,672
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na otrzymaniu izoterm elektrosorpcji wodoru oraz na przygotowaniu manuskryptu.
- P29. **R. Jurczakowski**, G. Litwinienko, M. Orlik
"Studies on the formation and kinetics of self decomposition of Ni(IV)-N₃⁻ complexes in aqueous media"
Zeitschrift für Physikalische Chemie, 2006, 220, 1–17
MNiSW: 20, IF₂₀₁₂: 1,361
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji pracy, przeprowadzeniu eksperymentów spektrofotometrycznych i woltamperometrycznych, analizie danych i udziale w ich interpretacji.



- P30. F. Vigier, **R. Jurczakowski**, A. Lasia
"Determination of hydrogen absorption isotherm and diffusion coefficient in Pd₈₁Pt₁₉ alloy"
Journal of Electroanalytical Chemistry, 2006, 588, 32-43
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 2,672
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na eksperymentalnym wyznaczeniu izoterm elektrosorpcji wodoru.
- P31. M. Orlik, **R. Jurczakowski**
"On the role of specific characteristics of the streaming mercury electrode in the generation of the nonlinear electrochemical dynamical phenomena"
Polish Journal of Chemistry, 2004, 78, 1221–1234
MNiSW: 20, IF₂₀₁₂: 0,440
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przeprowadzeniu badań eksperymentalnych.
- P32. **R. Jurczakowski**, M. Orlik
"The electroreduction of azides bound to nickel(II) ions in weak acidic media"
Journal of Electroanalytical Chemistry, 2005, 574, 311–320
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 2,672
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przeprowadzeniu badań chronoamperometrycznych i udziale w interpretacji danych.
- P33. **R. Jurczakowski**, M. Orlik
"The apparent faradaic response in the impedance characteristics of the capacitive current at a streaming mercury electrode"
Journal of Electroanalytical Chemistry, 2004, 562, 205–215
MNiSW: 35, IF₂₀₁₂: 2,672
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przeprowadzeniu badań impedancyjnych oraz interpretacji danych impedancyjnych.

Dane bibliograficzne wszystkich prac łącznie z pracami będącymi przedmiotem osiągnięcia naukowego:

Całkowita liczba publikacji:	43
Współczynnik oddziaływania (IF) 2014:	158,258
5-cio letni IF ₂₀₁₃ :	165,904
Sumaryczny IF w roku opublikowania:	147,753
Suma punktów MNiSW:	1505
Indeks Hirscha wg. Web of Science:	10
Liczba cytowań bez autocytowań:	322 (15 luty 2016 r.)
Liczba wszystkich cytowań:	390 (15 luty 2016 r.)



b) Wynalazki oraz wzory użytkowe i przemysłoweKrajowe zgłoszenia patentowe (przed Urzędem Patentowym RP):

1. P. Połczyński, **R. Jurczakowski**, P. Leszczyński, Z. Mazej, W. Grochala
"Metoda elektrosyntezy siarczanu(VI) srebra(II) i produkt otrzymany tą metodą"
zgłoszenie PL: **P.416026** (2016)
2. A. Lewera, **R. Jurczakowski**, J. Piwowar, B. Mielcarek
"Sposób wytwarzania czystych nanocząstek metali szlachetnych o ścianach (100),
nanocząstki otrzymane tym sposobem i ich zastosowanie"
zgłoszenie PL: **P.407178** (2014)
3. P. Połczyński, A. Januszewska, K. Strzałkowski, **R. Jurczakowski**
"Materiał elektrodowy, sposób jego wytwarzania oraz zastosowanie, sposób prowadzenia
fotoelektrosorpcji wodoru"
zgłoszenie PL: **P.405483** (2013)
4. A. Lewera, **R. Jurczakowski**, P. Połczyński
"Selektywny katalizator zwłaszcza do elektroredukcji tlenu, zawierający go układ
elektrochemiczny, stop pallad-gaz obojętny oraz jego zastosowanie i zawierające go
ogniwo, w szczególności fotogniwo paliwowe"
zgłoszenie PL: **P.404252** (2013)
5. P. Połczyński, P. Kulesza, A. Lewera, **R. Jurczakowski**
"Stop pallad-azot, stabilny w warunkach normalnych, oraz jego zastosowanie"
zgłoszenie PL: **P.400169** (2012)
6. P. Kulboka, A. Lewera, **R. Jurczakowski**
"Sposób wytwarzania zasadniczo czystych nanocząstek w układzie przepływowym,
nanocząstki otrzymane tym sposobem oraz ich zastosowanie"
zgłoszenie PL: **P.399505** (2012)
7. A. Januszewska, **R. Jurczakowski**, P. Kulesza, A. Lewera
"Sposób wytwarzania nano- i/lub mikrocząstek metalu z grupy platynowców"
zgłoszenie PL: **P.397444** (2011)
8. K. J. Fijałkowski, **R. Jurczakowski**
"Komora do pomiaru elektrycznych właściwości próbek proszkowych albo ciekłych oraz
sposób prowadzenia pomiaru elektrycznych właściwości próbek proszkowych albo
ciekłych"
zgłoszenie PL: **P.396725** (2011)



Zagraniczne zgłoszenia patentowe:

1. P. Połczyński, A. Lewera, **R. Jurczakowski**
"Palladium-platinum system for use as hydrogen storage material and/or electrocatalyst, preferably in fuel-cells"
zgłoszenie PCT: PCT/EP2015/079028 (2015)
2. H. Szabat, A. Januszewska, P. Połczyński, A. Lewera, **R. Jurczakowski**
"Means for carrying out electroless metal deposition with atomic sub-monolayer precision"
zgłoszenie PCT: PCT/IB2015/059969 (2015)
3. A. Lewera, **R. Jurczakowski**, J. Piwowar, B. Mielcarek
"A method of preparing pure precious metal nanoparticles with large fraction of (100) facets, nanoparticles obtained by this method and their use"
zgłoszenie PCT: PCT/IB2014/062831 (2014)
4. P. Połczyński, A. Lewera, **R. Jurczakowski**
"Selective catalyst especially for oxygen electroreduction, electrochemical system comprising thereof, palladium-inert gas alloy and its use and cell comprising the same, especially photo-fuel-cell"
zgłoszenie PCT: PCT/IB2013/056260 (2013)
5. P. Kulboka, A. Lewera, **R. Jurczakowski**
"A flow system method for preparing substantially pure nanoparticles, nanoparticles obtained by this method and use of thereof"
zgłoszenie PCT: PCT/IB2013/054857 (2013)
6. K. J. Fijałkowski, **R. Jurczakowski**
"Cell for electrical measurements of highly reactive powder and liquid samples and method for electrical measurements of highly reactive powder and liquid samples"
zgłoszenie PCT: PCT/IB2012/002111 (2012)
7. M. Stojewski, A. Tymosiak-Zielinska, G. Auge, G. Bigoin, **R. Jurczakowski**
"Porous support covered by multilayers of different transition metals cyanometalates, preparation method and use of thereof"
zgłoszenie FR: FR 1561977 (2015)



Udzielone patenty krajowe (przez Urząd Patentowy RP):

1. K. J. Fijałkowski, **R. Jurczakowski**,
"Komora do pomiaru elektrycznych właściwości próbek proszkowych albo ciekłych oraz sposób prowadzenia pomiaru elektrycznych właściwości próbek proszkowych albo ciekłych"
zgłoszenie PL: **P.397444** (2011)
patent PL: **PAT.221643** (2016)

Udzielone patenty zagraniczne:

1. K. Fijałkowski, **R. Jurczakowski**,
"Cell for electrical measurements of highly reactive powder and liquid samples and method for electrical measurements of highly reactive powder and liquid samples"
zgłoszenie PCT: **PCT/IB2012/002111** (2012)
patent EP: **EP 2788745** (2016)
2. Piotr Połczyński, Adam Lewera, Rafał Jurczakowski
"Selective catalyst especially for oxygen electroreduction, electrochemical system comprising thereof, palladium-inert gas alloy and its use and cell comprising the same, especially photo-fuel-cell"
zgłoszenie PCT: **PCT/IB2013/056260** (2013)
patent EP: **EP 2803101** (2015)
patent US: **US 9221044** (2015)
patent JP: **JP 5807129** (2015)
3. Paweł Kulboka, Adam Lewera, Rafał Jurczakowski
"A flow system method for preparing substantially pure nanoparticles, nanoparticles obtained by this method and use of thereof" PCT/IB2013/054857
zgłoszenie PCT: **PCT/IB2013/054857** (2013)
patent EP: **EP 2785483** (2015)
patent US: **9221044 B2** (2015)
patent JP: **JP 5782579** (2015)

d) Sumaryczny *impact factor* według listy Journal Citation Reports (JCR) zgodnie z rokiem opublikowania Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz, utworów i dzieł artystycznych**IF_{rok opublikowania} = 147,753****e) Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach**Kierownictwo projektów badawczych

1. Grant Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N204 275638,
"Wpływ pierwiastka niemetalicznego na procesy sorpcji wodoru w cienkich warstwach Pd-P i Pd-N"
grant zakończony w 2012 r., budżet 293 000 PLN
2. Grant UDA-POIG.01.03.02-14-081/12, Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego
"Sposób wytwarzania zasadniczo czystych nanocząstek w układzie przepływowym, nanocząstki otrzymane tym sposobem oraz ich zastosowanie",
zakończony w 2015 r., budżet 510 317,78 PLN



3. Grant WND-POIG.01.03.02-14-132/11, Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego "Sposób wytwarzania nowego selektywnego katalizatora do procesu elektrodredukcji tlenu" *grant zakończony w 2015 r., budżet 536 681 PLN*
4. Grant WND-POIG.01.03.02-00-133/11, Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego "Międzynarodowa ochrona patentowa wynalazku objętego krajowym zgłoszeniem patentowym nr P.396725" *grant zakończony w 2015 r., budżet 515 096 PLN*

Granty Uniwersytetu Warszawskiego

1. 501/68-BW-175604
"Badanie wpływu zawartości fosforu na elektrosorpcję wodoru w cienkich warstwach Pd-P otrzymanych metodą bezprądowego osadzania"
kierownik, grant zakończony w 2010 r., *budżet 20 000 PLN*
2. 501/68-BW-179205
"Eksperymentalne i teoretyczne badania oscylacji prądowych w anodowym rozpuszczaniu metalicznego wanadu w obecności jonów fosforanowych(V)"
kierownik, grant zakończony w 2009 r., *budżet 30000 PLN*
3. 501/68-BW-182101
"Tworzenie nanostrukturalnych warstw Pd mające na celu przyspieszenie procesów sorpcji wodoru"
kierownik, grant zakończony w 2008 r., *budżet 20 000 PLN*

f) Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową albo artystyczną

- | | |
|------|--|
| 2012 | Nagroda Dydaktyczna II Stopnia Rady Wydziału Chemii Uniwersytetu Warszawskiego za Niewykladowe Zajęcia Dydaktyczne. |
| 2007 | Nagroda naukowa Rady Wydziału Chemii Uniwersytetu Warszawskiego imienia Antoniego Grabowskiego dla pracownika Wydziału Chemii Uniwersytetu Warszawskiego za wybitne osiągnięcia naukowe, które przyczyniły się do wzrostu prestiżu nauki polskiej w świecie. |
| 2003 | Wyróżnienie rozprawy doktorskiej, Uniwersytet Warszawski, Wydział Chemii. |
| 2009 | Stypendium konferencyjne Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej, Pekin, Chiny. |
| 2003 | Student Travel Grant Awards, Electrochemical Society, Paryż, Francja |

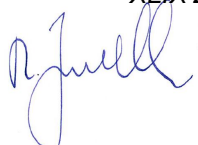


g) Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznychKomunikaty ustne wygłoszone przez habilitanta na konferencjach międzynarodowych

1. P. Połczyński, **R. Jurczakowski**
"Impedance of mediated electrochemical processes: fenton reaction
228th Meeting of The Electrochemical Society, Phoenix, USA, 2015
2. P. Połczyński, **R. Jurczakowski**
"Exceptionally fast hydrogen absorption and desorption through platinum overlayers"
227th Meeting of The Electrochemical Society, Chicago, USA, 2015
3. A. Januszewska, G. Dercz, A. Lewera, **R. Jurczakowski**
"Spontaneous phase segregation in bare palladium-platinum nanoparticles evidenced by superior hydrogen absorption"
225th Meeting of The Electrochemical Society, Orlando, USA, 2014
4. P. Połczyński, **R. Jurczakowski**
"Impedance of the catalytic EC' processes"
10th International Symposium on Electrochemical Impedance Analysis, Borovetz, Bułgaria, 2014
5. A. Januszewska, P. Kulboka, A. Lewera, **R. Jurczakowski**
"Synthesis of ultrapure nanoparticles and its applications to electrocatalysis: ethanol and ethylene glycol oxidation on Pt"
223rd Meeting of The Electrochemical Society, Toronto, Kanada, 2013
6. **R. Jurczakowski**, A. Królikowska, P. Barczuk, J. Augustynsk
"The influence of solution conductivity on the impedance of mesoporous WO₃ layers"
Meeting of The European Material Research Society, Nicea, Francja, 2011
7. A. Januszewska, A. Lewera, **R. Jurczakowski**
"Kinetics of hydrogen sorption in Pt-Pd alloy nanoparticles"
218th Meeting of The Electrochemical Society, Las Vegas, USA, 2010
8. P. Połczyński, G. Dercz, E. Rowinski, M. Słojewski, **R. Jurczakowski**
"Kinetics and thermodynamics of hydrogen sorption in PdP and PdN alloys"
60th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Pekin, Chiny, 2009
9. **R. Jurczakowski**, B. Łosiewicz, A. Lasia
"Kinetics and thermodynamics of hydrogen UPD on iridium in perchloric and sulfuric acids"
59th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Sewilla, Hiszpania, 2008
10. A. Lasia, **R. Jurczakowski**
"Limitations of a new potential step technique of impedance measurements using fourier transform"
203rd Meeting of The Electrochemical Society, Paryż, Francja, 2003
(Student Travel Grant Award from The Electrochemical Society)

Komunikaty ustne wygłoszone przez habilitanta na konferencjach krajowych

1. P. Polczynski, **R. Jurczakowski**
"Charakterystyka impedancyjna procesów elektrokatalitycznych z udziałem mediatorów redoks"
58 Zjazd Polskiego Towarzystwa Chemicznego, Gdańsk, Polska, 2015
2. **R. Jurczakowski**, B. Łosiewicz, H. Duncan, A. Lasia,
"Kinetyka podpotencjałowej adsorpcji wodoru na metalach z grupy platynowców"
57 Zjazd Polskiego Towarzystwa Chemicznego, Częstochowa, Polska, 2014
3. **R. Jurczakowski**, A. Lasia
"Study of hydrogen electrosorption in Pd, Pt and Pd₈₁Pt₁₉ in acidic media"
XLIX Zjazd Polskiego Towarzystwa Chemicznego, Gdańsk, Polska, 2006



4. **R. Jurczakowski**, A. Lasia,
"Study of hydrogen electrosorption in Pd, Pt and Pd₈₁Pt₁₉ in acidic media"
XLIX Zjazd Polskiego Towarzystwa Chemicznego, Gdańsk, Polska, 2006

Komunikaty ustne wygłoszone na konferencjach międzynarodowych przez doktoranta (mgr. Piotr Polczyński), którego promotorem pomocniczym jest habilitant

1. P. Polczynski, **R. Jurczakowski**, W. Grochala
"Novel system based on divalent silver for mediated electrochemical oxidation of persistent organic pollutants"
228th Meeting of The Electrochemical Society, Phoenix, USA, 2015
2. P. Polczynski, **R. Jurczakowski**, W. Grochala
"Impedance insight in catalytic properties of long-lived free-radical oxidizer based on silver(II)"
225th Meeting of The Electrochemical Society, Orlando, USA, 2014
3. P. Polczynski, **R. Jurczakowski**, G. Dercz
"Tailoring of lattice parameter in palladium by alloying with inert-gases and its impact on Pd-H system"
225th Meeting of The Electrochemical Society, Orlando, USA, 2014
4. P. Polczynski, **R. Jurczakowski**, W. Grochala
"Electrochemical properties of Ag(II) in concentrated sulfuric acid solutions"
223rd Meeting of The Electrochemical Society, Toronto, Kanada, 2013



6. Inne informacje

a) Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki i sztuki

Zajęcia dydaktyczne prowadzę w Zakładzie Chemii Nieorganicznej i Analitycznej dla studentów Wydziału Chemii Uniwersytetu Warszawskiego oraz dla studentów makrokierunków Inżynieria Nanostruktur oraz Energetyka Jądrowa.

Pełnię obowiązki promotora pomocniczego pracy doktorskiej mgr. Piotra Połczyńskiego oraz kieruję pracami licencjackimi i magisterskimi na Wydziale Chemii UW.

Zajęcia dydaktyczne ze studentami

2010–obecnie	Autorskie ćwiczenie „Oznaczanie wody metodą Karla-Fischera” w ramach Pracowni z analizy instrumentalnej IV rok, Wydział Chemii UW
2010–obecnie	Kierownictwo prac licencjackich i magisterskich dla studentów makrokierunku Inżynieria Nanostruktur na Wydziale Fizyki UW
2010–obecnie	Laboratorium z chemii nieorganicznej dla studentów III roku Wydziału Chemii UW
2010–obecnie	Laboratorium z chemii ogólnej dla studentów I roku makrokierunków Inżynieria Nanostruktur oraz Energetyka Jądrowa, Wydział Chemii UW
2006–obecnie	Kierownictwo prac licencjackich i magisterskich dla studentów Wydziału Chemii UW oraz studentów makrokierunku Inżynieria Nanostruktur na Wydziale Fizyki UW
2000–obecnie	Ćwiczenia rachunkowe z chemii analitycznej dla studentów I i II roku, Wydział Chemii UW
2005–2009	Proseminarium z chemii ogólnej dla I roku, Wydział Chemii UW
2005	Laboratorium specjalizacyjne Zakładu Chemii Nieorganicznej i Analitycznej dla studentów IV roku wydziału Chemii UW
2004	Okazjonalne wykłady z analizy instrumentalnej dla studentów Uniwersytetu w Sherbrooke, (zastępstwo za prof. A. Lasię), Université de Sherbrooke, Kanada (wykłady w języku francuskim)

Działalność popularyzatorska

1. Zajęcia dla uzdolnionej młodzieży w ramach Krajowego Funduszu na Rzecz Dzieci, (2008, 2009)
2. Zajęcia laboratoryjne dla polskich uczestników Międzynarodowej Olimpiady Chemicznej, (2008)
3. Zajęcia dla uczniów gimnazjów w ramach programu „I ty możesz zostać Olimpijczykiem” (2013)
4. Pokazy doświadczeń chemicznych dla uczniów gimnazjów w ramach popularyzacji Centrum Nauk Biologiczno-Chemicznych (2013 – obecnie)
5. Przygotowanie i prezentacja zagadek chemicznych do cyklicznej audycji Czwarty Wymiar dla Polskiego Radia Euro, 2009-2013
6. Przygotowanie i realizacja „obrazków dźwiękowych” doświadczeń chemicznych dla Polskiego Radia Euro, 2009-2012
7. Odpowiedzi na pytania popularno-naukowe z dziedziny chemii w Pierwszym Programie Polskiego Radia w ramach audycji Lato z Radiem, 2009-2012



8. Organizowanie imprez kulturalnych dla studentów i doktorantów Wydziału Chemii UW. Między innymi zdobycie finansowania i organizacja koncertu w Filharmonii Narodowej dla ponad 200 studentów Wydziału Chemii UW

b) Opieka naukowa nad studentami

Kierownictwo prac licencjackich

1. Krzysztof Strzałkowski
"Elektrosorpcja wodoru w stopach Pd-As"
Wydział Chemii, Uniwersytet Warszawski, 2011
2. Paweł Kulboka
"Absorpcja wodoru w nanocząstkach palladu o kontrolowanym rozmiarze"
Inżynieria Nanostruktur, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, 2012
3. Mikołaj Rdzanek
"Synteza i charakterystyka elektrochemiczna nanocząstek rodu"
Inżynieria Nanostruktur, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, 2014
4. Cuc Nguyen
"The use of electrochemical impedance spectroscopy to study the kinetic of adsorption on the solid electrodes"
Wydział Chemii, Uniwersytet Warszawski, 2015

Kierownictwo prac magisterskich

1. Maciej Słojewski
"Wpływ fosforu na elektrosorpcję wodoru w cienkich warstwach Pd-P"
Wydział Chemii, Uniwersytet Warszawski, 2009
2. Aneta Januszewska
"Wpływ efektów mezoskopowych na procesy sorpcji wodoru w nanostrukturalnych układach Pd-Pt"
Wydział Chemii, Uniwersytet Warszawski, 2011
3. Piotr Połczyński
"Wpływ azotu na procesy elektrosorpcji wodoru w cienkich warstwach Pd-N"
Wydział Chemii, Uniwersytet Warszawski, 2011
4. Krzysztof Strzałkowski
"Zbadanie możliwości wykorzystania stopów palladu z niemetalami jako komponentów katody do ogniwa fotoelektrolitycznego"
Wydział Chemii, Uniwersytet Warszawski, 2013
5. Paweł Kulboka
"Projektowanie granicy faz elektroda-roztwór w celu przyspieszenia sorpcji wodoru w nanostrukturalnym palladzie"
Inżynieria Nanostruktur, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, 2016
w trakcie realizacji



c) Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze promotora pomocniczego

Promotorstwo pomocnicze pracy doktorskiej (w trakcie realizacji)

1. mgr Piotr Połczyński
"Elektrosynteza związków srebra(II), ich charakterystyka fizykochemiczna i wykorzystanie w procesie aktywacji wybranych gazów cieplarnianych"
Promotor: prof. dr hab. Wojciech Grochala
Promotor pomocniczy: dr Rafał Jurczakowski

d) Staże w zagranicznych ośrodkach naukowych lub akademickich

2015	1 tydzień	Josef Stefan Institute, Ljubljana, Słowenia Pomiary elektrochemiczne w ciekłym fluorowodorze (aHF)
2010 2007 2005	3 miesiące 4 miesiące 4 miesiące	Staż podoktorski Laboratory of Advanced Electrochemistry prof. Andrzej Lasia
2004–2005	12 miesięcy	Université de Sherbrooke, Kanada
2000–2001 2000	3 miesiące 4 miesiące	Staż naukowy Laboratory of Advanced Electrochemistry prof. Andrzej Lasia Université de Sherbrooke, Kanada

e) Działalność organizacyjna

- 2009–obecnie członek Rady Wydziału Chemii Uniwersytetu Warszawskiego
2013–obecnie członek Komisji Senackiej ds. Socjalnych Uniwersytetu Warszawskiego

