

**Sebastian MOLIN, Piotr JASIŃSKI**

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI, KATEDRA INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

**Elektryczne pomiary tlenkowych ogniw paliwowych****Mgr inż. Sebastian MOLIN**

Absolwent Wydziału Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej (2007). Aktualnie doktorant na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Zainteresowania naukowe obejmują technologie wytwarzania przyrządów elektroceramicznych, w szczególności tlenkowych ogniw paliwowych oraz metody ich pomiaru.



e-mail: molin@biomed.eti.pg.gda.pl

**Dr inż. Piotr JASIŃSKI**

Adiunkt na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Prowadzi badania naukowe w zakresie monitoringu powietrza oraz urządzeń do konwersji energii. Prace obejmują konstrukcję i badania czujników gazów toksycznych, czujników wilgotności oraz tlenkowych ogniw paliwowych.



e-mail: pijas@eti.pg.gda.pl

**Streszczenie**

W pracy opisano metody pomiarowe elektrochemii ciała stałego używane do badania właściwości tlenkowych ogniw paliwowych. W oparciu o prace własne oraz doniesienia literaturowe przedstawiono przykładowe wyniki badań wybranych metod elektrycznych. Wyniki prac własnych osiągnięte zostały w ramach badań dotyczących budowy jak i charakterystyki tlenkowych ogniw paliwowych i innych urządzeń elektroceramicznych.

**Słowa kluczowe:** tlenkowe ogniwa paliwowe, elektrochemia, pomiary elektryczne.

**Electrical measurements of solid oxide fuel cells****Abstract**

Methods of solid state electrochemistry used for investigation of solid oxide fuel cells are presented. Appropriate examples of fuel cell characterization results based on own experience and literature data are included. The presented results were obtained in the course of research related to fabrication and evaluation of solid oxide fuel cells and other electroceramic devices. Some remarks on quality assurance of performing measurements are emphasized.

**Keywords:** solid oxide fuel cell, hydrogen, polarization, electrochemistry.

**1. Wstęp**

Ogniwa paliwowe są elektrochemicznymi źródłami energii. W celu generacji prądu wykorzystują reakcję chemiczną utleniania paliwa i redukcji tlenu. Nie występuje tutaj proces spalania paliwa, co pozwala na osiągnięcie wysokich sprawności energetycznych. Jako paliwo wykorzystane mogą być wodór oraz węglowodory takie jak metan, gaz ziemny a nawet ropa naftowa czy biogaz. Przy wykorzystaniu wodoru jako paliwa ogniwa paliwowe nie generuje zanieczyszczeń, a jedynym produktem ubocznym jest woda. Dlatego rozpowszechniając ogniwa paliwowe przyczyniamy się do poprawy stanu środowiska naturalnego. Docelowo ogniwa paliwowe mają być wykorzystywane powszechnie w pojazdach, zasilaniu domów, osiedli i instytucji publicznych. Optymistyczne prognozy mówią, iż koło 2020 roku gospodarka będzie już oparta na wodrze [1].

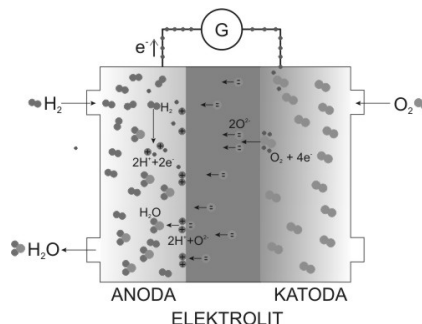
Proces wdrażania ogniw paliwowych jest bardzo długotrwały. Wymaga wielu zabiegów, począwszy od badań laboratoryjnych poprzez opracowanie prototypów aż do wdrożenia do produkcji. W niniejszej pracy opisano podstawowe pomiary elektryczne wykorzystywane przy określaniu parametrów ogniw paliwowych.

Polskojęzyczna literatura tematu jest bardzo uboga. Dopiero w ostatnich latach pojawiły się monografie dotyczące ogniw paliwowych [2, 3]. Zagadnienia związane z pomiarami elektrycznymi ogniw paliwowych są tam jednak potraktowane pobieżnie. Niniejsza publikacja ma na celu dokonanie przeglądu elektrycznych metod stosowanych do charakterystyki tlenkowych ogniw paliwowych.

Autorzy niniejszego tekstu zajmują się ogniwami od kilku lat. Prowadzone prace są związane z opracowaniem technologii wytwarzania ogniw lub ich elementów. Prace obejmują elementy nośne ogniwa, warstwy kompozytowe elektrod oraz gęste warstwy elektrolitowe na bazie perspektywicznych materiałów stosowanych w tlenkowych ogniwach paliwowych. Nieodzownym aspektem tych prac jest elektryczna charakterystyka wytworzonych struktur oraz powiązanie otrzymanych wyników z ich właściwościami fizykochemicznymi. Autorzy ściśle współpracują z Wydziałem Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej oraz Wydziałem Chemicznym Politechniki Gdańskiej, gdzie prowadzone są badania nad nowymi materiałami dla tlenkowych i polimerowych ogniw paliwowych. Współpraca ta pozwala na bardziej efektywne wykorzystanie specjalistycznej aparatury badawczej zespołów naukowych oraz na wymianę doświadczeń.

**2. Konstrukcja tlenkowego ogniwa paliwowego**

Każde ogniwo paliwowe (rys. 1) składa się z dwóch elektrod: anody i katody oraz elektrolitu. Anoda – elektroda paliwowa oraz katoda – elektroda powietrzna powinny być porowate w celu swobodnego dopływu gazów do miejsca zachodzenia reakcji elektrochemicznej. Elektrolit natomiast musi być gęsty i całkowicie szczelny, aby zapobiec bezpośredniemu spalaniu paliwa w powietrzu. Elektrolit w idealnym przypadku jest czystym przewodnikiem jonowym, natomiast elektrody powinny być przewodnikami jonowo-elektronowymi (przewodnictwo mieszane). Taki dobór materiałów zapewnia, że podczas reakcji elektrochemicznej powstające na elektrodach jony przemieszczają się przez elektrolit, natomiast elektrony mogą jedynie płynąć obwodem zewnętrznym, w którym wykonują pracę elektryczną w dołączonym odbiorniku prądu.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie budowy pojedynczego tlenkowego ogniwa paliwowego zasilanego wodorem

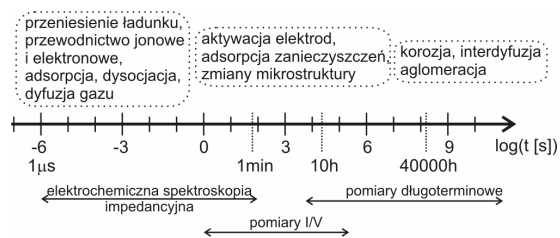
Fig. 1. Model of single solid oxide fuel cell with hydrogen as fuel

Ogniwa paliwowe dzieli się na kilka grup, zależnie od zastosowanego elektrolitu. Typ zastosowanego elektrolitu warunkuje parametry pracy ogniwa, w tym jego temperaturę. Tlenkowe

ogniwa paliwowe obok polimerowych są uważane za najbardziej perspektywiczne z punktu widzenia szerokiej komercjalizacji. Jako materiałów w tlenkowych ogniach paliwowych używa się najczęściej elektrolitu w postaci tlenku cyrkonu domieszkowanego tlenkiem itru (YSZ – yttria stabilized zirconia), anodą jest zwykle cermet niklu i YSZ (Ni-YSZ), zaś katodą są związki o strukturze perowskitu: manganian lantanowo strontowy (LSM) oraz inne domieszkowane niklem, kobaltem, etc. Aby osiągnąć wystarczające przewodnictwo jonowe, elektrolit YSZ musi pracować w wysokich temperaturach. Zalecana temperatura pracy nowoczesnych ogniów tlenkowych z cienkim elektrolitem (~10 μm grubości) jest z zakresu 800-600°C.

### 3. Charakteryzacja ogniów paliwowych

Zjawiska zachodzące w pracującym ogniwie są bardzo zróżnicowane pod względem szybkości zachodzenia i czasu trwania. Charakterystyczne czasy występujących procesów wahają się od ~1μs dla procesów przeniesienia ładunku do ~20000h dla powolnych procesów dyfuzyjnych [4]. Na logarytmicznej skali czasu reprezentuje to zmiany aż o 15 rzędów wartości (rys. 2). Obszar ten podzielić można umownie na trzy części, w których ze względu na istotę zjawisk stosujemy odmienne metody pomiarowe opisane poniżej.



Rys. 2. Skala czasowa zjawisk zachodzących w ogniwie paliwowym [4]  
Fig. 2. Timescale of phenomena in fuel cells [4]

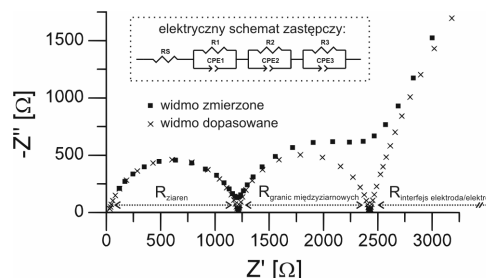
#### 3.1. Elektrochemiczna spektroskopia impedancyjna

Procesy elektrochemiczne zachodzące w ogniach paliwowych, cechują się różnymi charakterystycznymi stałymi czasowymi. Różnice w szybkości zachodzenia procesów, widoczne w zmierzonym widmie impedancyjnym zostają przypisane poszczególnym cechom/zjawiskom. Do procesów należeć mogą: proces przeniesienia ładunku, adsorpcja, dysocjacja czy dyfuzja. Oczywiście w rzeczywistych mierzonych układach stałe czasowe mogą być zbliżone dla różnych procesów i rozróżnienie pochodzenia zjawiska może być znacznie utrudnione lub niemożliwe.

Procesom elektrochemicznym zachodzącym w skali mikroskopowej można przypisać pewne mierzalne makroskopowe wartości elektryczne związane z przepływem ładunków. Układom elektrochemicznym można przypisać tzw. elektryczny model zastępczy, który powiązany z podstawową wiedzą na temat zachodzących procesów fizykochemicznych pozwala wyznaczyć parametry rozpatrywanych zjawisk [5, 6].

Metody spektroskopii impedancyjnej pozwalają na wyznaczenie części rzeczywistej i urojonej impedancji procesu fizycznego (np. przewodnictwa jonowego, rezystancji elektrodowej) w funkcji częstotliwości. Najczęściej stosowane częstotliwości sygnału pobudzającego to 1MHz do 0,01Hz, co pokrywa zakres czasu pokazany na rys. 2. Autorzy do pełnej charakteryzacji ogniów elektrochemicznych wykorzystują zestaw urządzeń firmy Solartron, składający się z miernika impedancji SI1260 oraz interfejsu elektrochemicznego SI1287, pełniącego funkcję potencjostatu i galwanostatu. Zestaw ten jest sterowany komputerowo i umożliwia szybką akwizycję i pełną obróbkę danych.

Przykład widma impedancyjnego, dla którego stałe czasowe znacznie się różnią, jest widmo impedancyjne przedstawione na rys. 3. Przedstawiono na nim widmo impedancyjne struktury elektrolitu YSZ z elektrodami platynowymi w 300°C.

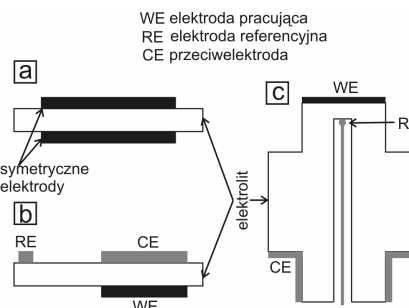


Rys. 3. Przykładowe widmo impedancyjne elektrolitu YSZ o grubości 80μm z elektrodami platynowymi w 300°C oraz jego elektryczny schemat zastępczy

Fig. 3. Typical impedance spectra of 80μm thick YSZ electrolyte with platinum electrodes at 300°C and their electrical equivalent circuit

Uzyskane widma w postaci trzech półokręgów odpowiadają elementom zastępczym RC. Z każdego zmierzonego półokręgu wyznaczyć możemy wkład do całkowitej rezystancji pochodzący od ziaren ( $R_{\text{ziaren}}$ ), granic międzyziarnowych ( $R_{\text{granic międzyziarnowych}}$ ) i zjawisk elektrodowych ( $R_{\text{interfejs elektroda/elektrolit}}$ ). W pokazanym przypadku jako elektrody posłużyła porowata platyna naniesiona symetrycznie po obu stronach elektrolitu. Zmiana rodzaju materiału elektrody lub jej mikrostruktury spowoduje zmianę kształtu półokręgu związanego z zjawiskami elektrodowymi. O ile powierzchnia elektrod nie zmienia się, np. w wyniku innej adhezji materiału elektrodowego z elektrolitem, kształt pozostałych dwóch półokręgów nie powinien ulec zmianie. Analizę wpływu rezystancji ziaren i obszarów międzyziarnowych na całkowitą rezystancję materiału stosuje się głównie dla materiałów jonowych. Umożliwia ona, między innymi, na określenie optymalnej temperatury wypalania materiału w celu uzyskania jak najmniejszej rezystancji elektrolitu.

Spektroskopia impedancyjna może być również stosowana do wyznaczenia polaryzacji (rezystancji) elektrodowych (katody i anody). Stosuje się dwie konfiguracje pomiarowe: pomiary w celkach symetrycznych oraz pomiary z elektrodą referencyjną [6].



Rys. 4. Konfiguracje pomiarowe do wyznaczania właściwości elektrochemicznych elektrod, układ symetryczny (a) oraz układy trójelektrodowe (b,c)  
Fig. 4. Measurement cells for characterization of electrochemical properties of electrodes, symmetrical cell (a) and three electrode cells (b,c) are shown

Pomiary w celkach symetrycznych, w których identyczne elektrody są umieszczone z obu stron elektrolitu i całość umieszczona najczęściej w tej samej atmosferze (rys. 4a). Układ taki jest pobudzany małym napięciem, wokół napięcia otwartego obwodu (OCV – open circuit voltage), przy zerowej polaryzacji DC. Zapobiega to pracy elektrod przy nieodpowiedniej, przeciwnej polaryzacji. Do pomiaru potrzeba zastosować analizator impedancji (FRA – frequency response analyzer). Zmierzone w ten sposób widmo impedancyjne zawiera wkład od elektrolitu oraz od dwu identycznych elektrod. W tym przypadku mierzona polaryza-

cja/rezystancja musi zostać podzielona przez czynnik 2 w celu otrzymania własności pojedynczej elektrody. Przykładem jest widmo przedstawione na rys. 3. W tym przypadku można wyznaczyć polaryzację elektrodową platyny w kontakcie z elektrolitem YSZ jako  $R_{\text{interfejs elektroda/elektrolit}}/2$ . W ogólnym przypadku polaryzacja elektrodowa może się składać z kilku półokręgów, co jest związane z występowaniem różnych zjawisk elektrodowych (np. adsorpcja, dysocjacja, przeniesienie ładunku). Analiza i prawidłowe powiązanie uzyskanych półokręgów z odpowiednimi zjawiskami fizycznymi jest bardzo złożone. Dlatego zwykle zadowalającym jest określenie całkowitej rezystancji elektrodowej jako sumy rezystancji obliczonych z wybranych półokręgów.

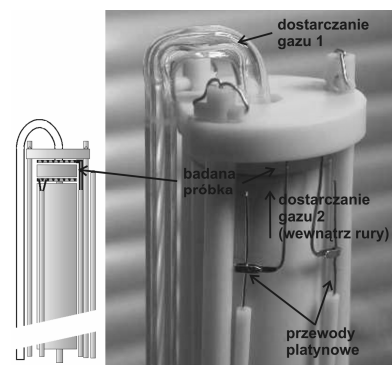
Trudniejsze technicznie do zrealizowania są pomiary w układach trójelektrodowych (rysunek 4b, c). W tym przypadku próbka jest wyposażona w elektrody: pracującą (WE – working electrode), przeciwelektrodę (CE – counter electrode) oraz referencyjną (RE – reference electrode). Układy trójelektrodowe są powszechnie wykorzystywane w „ciekłej” elektrochemii [7]. W tym przypadku elektroda badana jest elektrodą pracującą (WE), prąd przepływa między elektrodą pracującą i przeciwelektrodą (WE i CE) natomiast spadek napięcia mierzony jest między elektrodą pracującą i referencyjną (WE-RE). Przeciwelektroda oraz elektroda referencyjna mogą być wykonane z dowolnego materiału, najczęściej platyny lub srebra. Właściwości elektrochemiczne tych elektrod nie wpływają na wynik mierzony elektrodą, o ile podczas pomiaru nie ulegają one dekompozycji lub zmianom fizykochemicznym. Praca elektrod odbywać się może w trybie utrzymania przepływu stałego prądu (tryb galwanostatu) lub napięcia (tryb potencjostatu). Wymagane jest więc zastosowanie potencjostatu/galwanostatu odpowiednio połączonych z analizatorem impedancji. Wykorzystanie układu z trzema elektrodami pozwala na określenie właściwości elektrochemicznych tylko elektrody pracującej. Rozmieszczenie geometryczne elektrod jest bardzo istotne, gdyż może wpływać na uzyskane wyniki. Przykładowe wzajemne położenie geometryczne elektrod pokazane jest na Rys. 4. Elektroda pracująca i przeciwelektroda powinny być tej samej wielkości oraz powinny być umiejscowione dokładnie na przeciw siebie. Wszelkie niedokładności w względnym położeniu elektrod bardzo negatywnie wpływają na błąd popełniany podczas pomiaru [8]. Elektroda referencyjna powinna znajdować się w miejscu, w którym prąd płynący między WE i CE nie będzie powodował zmiany potencjału elektrody referencyjnej podczas pomiaru.

Istnieje kilka powszechnie stosowanych konstrukcji pozwalających zminimalizować występujące negatywne efekty pomiarowe. W Riso National Laboratory, w Danii do pomiaru pojedynczych elektrod przygotowują się elektrolit o specjalnej geometrii (rys. 4c), która umożliwia pomiary z dużymi dokładnościami właściwości elektrod. Zostało to potwierdzone najpierw symulacjami komputerowymi oraz później bezpośrednimi pomiarami [8]. Inną powszechnie używaną i sprawdzoną metodą jest umieszczenie elektrody referencyjnej w postaci okręgu na brzegu pastylki, po stronie przeciwelektrody. Odstęp pomiędzy elektrodą referencyjną a przeciwelektrodą powinien być co najmniej kilkukrotnie większy od grubości zastosowanego elektrolitu. Przeciwelektroda znajduje się w środku namalowanego okręgu. Pomiary trójelektrodowe przeprowadzać można zarówno w jednej, wspólnej atmosferze jak i w konfiguracji ogniwa z zastosowaniem różnych atmosfer dla każdej z elektrod.

Do tej pory pokazano, że spektroskopia impedancyjna może być wykorzystana do określenia rezystancji elektrolitu i polaryzacji elektrodowych. Jednak wartości te nie zawsze pozwalają na określenie rezystancji całego ogniwa podczas jego pracy. Powoduje to potrzebę pomiaru impedancji całych ogniw. Pracujące ogniwo potrafi mieć mniejszą rezystancję jako całość niżby to wynikało z prostego zsumowania wkładów od wszystkich składowych zmierzonych osobno [9]. Dlatego prowadzi się pomiary impedancyjne ogniw paliwowych najczęściej pod obciążeniem.

Pomiary impedancyjne ogniw paliwowych przeprowadza się w specjalnie zbudowanej celce pomiarowej, umożliwiającej pracę

ogniwa w różnych atmosferach dla każdej z elektrod. Poprzez zmianę parametrów pomiaru, np. ilości dostarczonego paliwa, jego wilgotności lub ilości powietrza można próbować rozróżnić poszczególne elementy układu zastępczego i określić proces ograniczający [9, 10]. Pomiary takie, ze względu na występowanie zjawisk pochodzących od obu elektrod i elektrolitu jednocześnie są jednak bardzo trudne do interpretacji.



Rys. 5. Przykładowa komercyjna celka do pomiarów wysokotemperaturowych. Budowa celki pozwala na pracę w różnych atmosferach gazowych po obu stronach próbki [11]

Fig. 5. Single cell measurement rig for high temperature characterization [11]

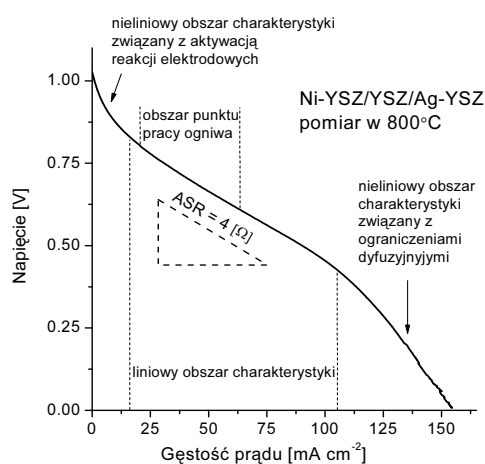
Przykładowa, komercyjna celka pokazana jest na rys. 5 [11]. Układ taki umieszcza się wewnątrz pieca rurowego, gdzie można zmieniać temperaturę pracy ogniwa w zakresie 400-900°C. Większość elementów celki pomiarowej wykonana jest z ceramiki  $Al_2O_3$ . Materiał ten wykazuje się bardzo dużą odpornością na wysokie temperatury, jest bardzo trwały i nie reaguje z innymi materiałami. Próbka badana zamocowana zostaje do rury za pomocą specjalnego kleju ceramicznego, który jednocześnie pełni funkcję uszczelnienia. Wewnątrz rury za pomocą sprężynowego docisku dołączane są kontakty. Najczęściej dociska się najpierw siatkę platynową, zapewniającą dobry kontakt na dużej powierzchni elektrody, co ma znaczenie dla materiałów słabo przewodzących, gdzie dołączenie kontaktu punktowo ograniczy obszar zbierania prądu z elektrody i wpłynie negatywnie na otrzymane wyniki. Do każdej siatki platynowej doprowadzone są po dwa oddzielne platynowe przewody, aby móc prowadzić pomiary metodą czteroprzewodową. Do drugiej elektrody, po otwartej stronie komory, również doczepione i dociskane (ściągane) są kontakty poprzez siatkę platynową. Blisko całej konstrukcji umieszcza się termoparę kontrolującą temperaturę pracy ogniwa. Paliwo i powietrze płyną w dwóch niezależnych kanałach celki pomiarowej zapewniając bezpośrednie omywanie elektrod. Na rys. 5 jeden kanał znajduje się wewnątrz alundowej rury, zaś drugim jest widoczna rurka kwarcowa. Kontakty elektryczne oraz złączki do podłączenia gazów są wyprowadzone po przeciwnej niż próbka stronie celki pomiarowej tak, aby znalazły się one poza obszarem pieca rurowego. W celu pełnej parametryzacji warunków pracy ogniwa szybkość przepływu gazów powinna być również kontrolowana za pomocą przepływomierzy masowych.

### 3.2. Charakterystyki I-V

Najważniejszym pomiarem opisującym działanie całego ogniwa paliwowego jest badanie charakterystyki prądowo napięciowej. Do wykonania tego pomiaru potrzebne jest obciążenie sterowane cyfrowo. Rolę takiego obciążenia może pełnić potencjostat/galwanostat. Wykonany pomiar pozwala na określenie mocy i zakresu napięć, w których ogniwo pracuje najlepiej. Przykładowa charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa w 800°C została przedstawiona na rys. 6. W układzie tym anodą był cermet Ni-YSZ, elektrolitem był YSZ o grubości 80µm, zaś katodą cermet Ag-YSZ. W warunkach otwartego obwodu (brak przepływu prądu) napięcie pojedynczego ogniwa wynosi ok. 1 V, natomiast

punkt pracy ogniwa znajduje się zwykle między 0,6 - 0,8 V. W tym zakresie napięcie uzyskuje się maksymalną moc ogniwa. W celu bezpośrednich porównań ogniw wyznacza się rezystancję właściwą (z ang. ASR – Area Specific Resistance) oddającą właściwości elektryczne układu. Rezystancja ta jest nachyleniem charakterystyki prądowo napięciowej. Na rys. 6 rezystancja obliczona pomiędzy 0,75 - 0,55 V wynosi 4  $\Omega$ . Z charakterystyki prądowo napięciowej można także uzyskać informację o ograniczeniach w budowie wpływających na pogorszenie osiągnięć ogniwa. Niedostateczna porowatość elektrod objawi się gwałtownym spadkiem mocy dla dużych prądów w związku z niedostatecznie szybkim procesem dostarczania gazów (ograniczenie dyfuzyjne). Nieliniowość charakterystyki w obszarze napięć 1 V świadczy o zjawisku aktywacji reakcji elektrodowej i jest związane z nieoptymalnym rodzajem materiału elektrodowego.

Pomiar przedstawiony na rys. 6 został przeprowadzony w zakresie napięć od 1 V do 0 V. Jednak pomiary laboratoryjne dla badanych ogniw powinno się przeprowadzać jedynie w zakresie od 1 V do 0,4 V. Poniżej progu 0,4 V ogniwo paliwowe może ulegać nieodwracalnej degradacji w związku z pracą przy dużym obciążeniu prądowym. Również szybkość dokonywania pomiaru (szybkość skanowania) oraz czas zbierania danych w danym punkcie charakterystyki powinny być właściwie dobrane, gdyż również wpływają na mierzone wartości [12].



Rys. 6. Przykładowa charakterystyka prądowo napięciowa dla ogniwa z anodą Ni-YSZ, elektrolitem YSZ o grubości 80  $\mu\text{m}$  oraz katodą Ag-YSZ  
Fig. 6. Typical current voltage plot of fuel cell made of a Ni-YSZ anode, 80  $\mu\text{m}$  thick YSZ electrolyte and Ag-YSZ cathode

Charakterystyki prądowo napięciowe używa się również do określania gęstości prądów wymiany reakcji elektrochemicznych [13]. Są one charakterystyczne dla danej reakcji elektrochemicznej, mówiąc o bezwzględnej szybkości reakcji. Wielkość ta jest używana w literaturze do porównywania parametrów elektrod ogniwa. W celu określenia tej wielkości, w układzie trójelektrodowym, wykreśla się krzywe zależności logarytmu gęstości prądu płynącego w układzie w funkcji nadpotencjału ogniwa, zmierzonego względem elektrody referencyjnej. Pomimo, że pomiary te niosą podobną informację o właściwościach elektrod ogniwa jak pomiary impedancyjne, to jednak są one znacznie mniej popularne.

### 3.3. Pomiary długoterminowe

Najbardziej czasochłonne są pomiary stosów ogniw w celu sprawdzenia szybkości ich degradacji w czasie. Parametrem badanym jest głównie moc ogniwa, tj. badanie napięcia stosu ogniwa przy stałym obciążeniu ogniwa. Czas życia dla ogniw tlenkowych jest zakładany na około 40000 godzin (~6 lat), więc pomiary powinny być wykonywane w takiej skali czasowej. Jednakże utrudniłoby to badania nad nowymi rozwiązaniami. Rzeczywiste

pomiary są krótsze i zwykle nie przekraczają 5000 godzin. Uzupełnia się je natomiast o symulacje pracy ogniwa oraz ekstrapoluje się uzyskane parametry. Podczas długotrwałej pracy zachodzą mogą procesy korozji, związane z powolną dyfuzją atomów, oddziaływania elektrolitu z elektrodami, tworzenia się nowych związków, odkładania siarki z zanieczyszczonego paliwa, etc. W pomiarach krótkoterminowych te procesy są nie do wykrycia. Jednak dopiero udane pomiary długoterminowe pozwalają na prace związane z wprowadzeniem produktu na rynek.

## 4. Wnioski

W rozwijaniu każdej nowej technologii dużą wagę należy przyłożyć do pomiarów elektrycznych. Każdy pomiar dla różnych próbek powinien być przeprowadzany w ustandaryzowanych warunkach i przy zastosowaniu takich samych parametrów metrologicznych w celu uzyskania spójnych i porównywalnych wyników. Ważne jest ujednoczenie podstawowych procesów obróbki, np. uszczelniania czy dołączania kontaktów, szybkości grzania, przepływu gazów. W późniejszym etapie pozwala to na zminimalizowanie czynników mogących wpływać na wyniki i tym samym prowadzi do obniżenia kosztów badań.

Pomiary właściwości zarówno pojedynczych elektrod jak i całych ogniw są aktualnie na etapie standaryzowania. Pojawiają się prace [12] zwracające uwagę na istotę zastosowanych technik pomiarowych. Bywa, że pomimo zastosowania pozornie tych samych metod eksperymentalnych wyniki badań uzyskane w innych zespołach naukowych są znacząco różne.

## 5. Literatura

- [1] S.C. Singhal, K. Kendall, High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications, Elsevier 2003.
- [2] Nowe kierunki wytwarzania i wykorzystania energii. Zrównoważone systemy energetyczne. (Red. W. Wójcik). Lublin: Lubelskie Towarzystwo Naukowe 2005, 285 s.
- [3] Ogniwa paliwowe. Nowe kierunki rozwoju. (Red. H. Drulis, J. Hanuza, D. Hreniak, M. Miller, G. Paściak, W. Stręć). Wrocław: Biblioteka Wiadomości Chemicznych 2005, 235 s.
- [4] A. Weber, A.C. Muller, D. Herbstritt, E. Ivers-Tiffee, Solid Oxide Fuel Cells VII eds. H. Yokokawa, S.C. Singhal, The Electrochemical Society Proceedings, Pennington, NJ 2001.
- [5] T. Zajt, Metody voltamperometryczne i elektrochemiczna spektroskopia impedancyjna, Wydawnictwo Gdańskie 2001.
- [6] E. Barsoukov, J.R. MacDonald, Impedance Spectroscopy, Theory, Experiment and Applications, Second Ed., Wiley 2005.
- [7] A.J. Bard, L.R. Faulkner, Electrochemical methods. Fundamentals and applications, second edition, Wiley 2001.
- [8] J. Winkler, P.V. Hendriksen, N. Bonanos, M. Mogensen, Geometric Requirements of Solid Electrolyte Cells with a Reference Electrode, Journal of The Electrochemical Society, vol. 145, no. 4, 1998.
- [9] R. Barfod, M. Mogensen, T. Klemenso, A. Hagen, Y-L. Liu, P.V. Hendriksen, Detailed Characterization of Anode Supported SOFCs by Impedance Spectroscopy, Journal of The Electrochemical Society, 154 (4) 2007.
- [10] S.H. Jensen, A. Hauch, P.V. Hendriksen, M. Mogensen, N. Bonanos, T. Jacobsen, A Method to Separate Process Contributions in Impedance Spectra by Variation of Test Conditions, Journal of The Electrochemical Society 154 (12) 2007.
- [11] Norecs – Norwegian Electroceramics, www.norecs.com
- [12] V.A.C. Haanappel, M.J. Smith, A review of standardising SOFC measurement and quality assurance at FZJ, Journal of Power Sources 171 2007.
- [13] P. Holtappels, G.J. de Haart, U. Stimming, Reaction of Hydrogen/Water Mixtures on Nickel-Zirconia Cermet Anodes, Journal of The Electrochemical Society 146 (5) 1999.