

Wpływ dodatku odpadowego materiałów elektrodowych na właściwości elektrod dodatnich akumulatora kwasowo ołowiowego

Ewa JANKOWSKA*, Włodzimierz MAJCHRZYCKI, Agnieszka MARTYŁA – Instytut Metali Nieżelaznych Oddział w Poznaniu, Centralne Laboratorium Akumulatorów i Ogniw; Łukasz MAJCHRZYCKI – Centrum Zaawansowanych Technologii UAM, Instytut Fizyki, Politechnika Poznańska

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2016, 70, 11–12, 691–702

Wstęp

Jednym z ważniejszych obecnie aspektów rozwoju cywilizacyjnego są coraz wyższe wymagania związane z ochroną środowiska. Wymusza to m.in. tworzenie coraz efektywniejszych pod względem materiałowym i energetycznym technologii produkcji oraz wprowadzanie rozwiązań ułatwiających recykling zużytych materiałów i urządzeń. Również w obszarach chemicznych źródeł prądu, problemy te mają coraz większe znaczenie [1 ÷ 4]. Akumulator kwasowo ołowiowy, pomimo ponad 150 – letniej historii jest nadal najczęściej stosowanym wtórnym chemicznym źródłem energii elektrycznej (drugiego rodzaju), a w kierunkach jego ewolucji daje się również zauważyć wspomniane czynniki proekologiczne [5 ÷ 8]. Akumulator kwasowo ołowiowy jest chemicznym źródłem prądu o działaniu wielokrotnym, które po rozładowaniu może być ponownie ładowany prądem elektrycznym z zewnętrznego źródła prądu, który bierze udział w reakcjach ładowania i wyładowania [8, 9].

Dziedziny zastosowania akumulatorów kwasowo ołowiowych, to przede wszystkim przemysł motoryzacyjny, wykorzystujący tzw. akumulatory rozruchowe. Stosowane są one również jako podstawowe źródło zasilania w wielu systemach wrażliwych na zaniki napięć, np. w sieciach elektroenergetycznych (tzw. akumulatory stacjonarne), oraz jako źródło energii do zasilania niektórych typów pojazdów elektrycznych, np. wózki widłowe, pojazdy golfowe itp. (tzw. akumulatory trakcyjne) [8, 10, 11]. Dążąc do spełnienia przez akumulatory kwasowo ołowiowe coraz wyższych wymagań, zarówno eksploatacyjnych jak i ekologicznych, ważniejsze elementy składowe układów tego typu (nośniki mas aktywnych, masy elektroaktywne, elektrolity itp.), podlegają nieustannym modyfikacjom. W przypadku mas elektroaktywnych prowadzone są prace badawczo-rozwojowe obejmujące min.:

- zwiększenie trwałości mechanicznej masy
- zwiększenie jej odporności na zaszarczenie
- poprawę dostępności masy aktywnej dla procesów elektrodowych.

W sposób szczególnie aktywny badane są materiały węglowe jako dodatki do mas ujemnych w celu zwiększenia zdolności przyjmowania ładunku (ma to znaczenie w akumulatorach dla samochodów z systemem start-stop) oraz dodatki poprawiające trwałość masy (np. włókna sztuczne umieszczone powierzchniowo pod postacią specjalnego typu papieru wykorzystywanego podczas pastowania elektrod) [12 ÷ 20]. Jednym z istotnych kierunków badań jest również wykorzystanie elementów z użytych akumulatorów do produkcji nowych.

Celem niniejszej pracy było zbadanie wpływu dodatku do aktywnej masy dodatniej materiałów elektrodowych powstałych w procesie technologicznym. Wytypowano metodę przygotowania materiału

odpadowego, wytworzono płyty dodatnie w warunkach laboratoryjnych oraz zmontowano ogniwa badawcze, które poddano badaniom elektrycznym. Na każdym etapie prowadzono analizę fizykochemiczną i strukturalną wytworzonych materiałów.

Część doświadczalna

Materiały

Do badań wykorzystano komercyjny proszek ołowiu otrzymany z reaktora rozpyleniowego typu Bartona, oraz materiał odpadowy po procesie sezonowania pochodzący z dodatniej masy aktywnej (Autopart S.A Mielec – producent akumulatorów). W badaniach zastosowano produkcyjne płyty ujemne (Autopart) jako elektrody przeciwne oraz kolektory prądowe (tzw. kratki) typu PbCaSn o wymiarach 142x113 mm (szerokość x długość), wykonane w technologii cięto-ciągniętej.

Metodyka badań

Wyznaczono ciężar nasypowy proszku ołowiu i materiału odpadowego po obróbce mechanicznej za pomocą volumetru elektromagnetycznego typu WE-5, CLAI0. Skład fazowy proszku ołowiu i materiału odpadowego określono metodą analizy rentgenograficznej przy zastosowaniu dyfraktometru rentgenowskiego PW1050 Philips z lampą Cu α z filtrem niklowym w zakresie długości kątowej 5–50, 0,04, 2s. Wyznaczono również powierzchnię właściwą obu materiałów z wykorzystaniem porozymetru firmy Micromeritics ASAP 2000. Masę aktywną odgazowano w temperaturze otoczenia przez okres 24 godzin. Podczas pomiaru próbka znajdowała się w atmosferze azotu w temperaturze ciekłego azotu.

Po wstępnej charakterystyce wykonano serie mas aktywnych dodatnich z różną zawartością materiału odpadowego oraz w celach porównawczych masę bez dodatku materiału odpadowego (układ referencyjny). W celu wytworzenia masy aktywnej dodatniej proszek ołowiu, wstępnie zmielony materiał odpadowy oraz włóknina polipropylenowa (Hammond) zostały wprowadzone i wymieszane w mieszalce laboratoryjnej z płaszczem chłodzącym. Do tak przygotowanego półproduktu systematycznie dozowano H₂SO₄ o gęstości 1,40g/cm³ oraz wodę destylowaną. Proces mieszania prowadzono do uzyskania plastyczności na poziomie 34–36 (w skali penetrometru stożkowego). Wytworzono 4 rodzaje masy bez dodatku materiału odpadowego oraz z dodatkiem 5%, 10% i 15% tego materiału. Uzyskaną masę naniesiono ręcznie na kolektory prądowe. Wytworzone płyty poddano dwufazowemu procesowi sezonowania w warunkach podwyższonej wilgotności i w drugim etapie wilgotności < 10%.

W trakcie i po procesie sezonowania wykonano badania składu fazowego (dyfraktometr rentgenowski PW1050 Philips), analizę powierzchni właściwej metodą BET (ASAP 2000) oraz analizę mikrostruktury (skaningowy mikroskop elektronowy Quanta FEG 250 FEI).

*Autor do korespondencji:

Dr inż. Ewa JANKOWSKA, e-mail: ewa.jankowska@clai0.poznan.pl

Następnie zmontowano dwuelektrodowe ogniwa badawcze składające się z płyty dodatniej umieszczonej w kopertowym separatorze polietylenowym oraz dwóch produkcyjnych płyt ujemnych (produkcja Autopart). Ogniwa te poddano procesowi elektrochemicznej konwersji materiału elektrodowego, tzw. formacji, oraz badaniom elektrycznym. Proces formacji zmiennoprądowej oraz badania elektryczne ogni w prowadzono stosując wieloobwodowe urządzenie do testowania baterii i ogni w firmy Bitrode (model SCN) o zakresie prądowym 0 – 5A oraz napięciowym 0 – 5V. Proces formacji zmiennoprądowej ogni w prowadzono prądem 0,30A, 1,40A i 0,70A bez ograniczenia napięciowego. Ładunek wprowadzony podczas formacji wynosił 49,1Ah. Na każdym etapie badań prowadzono analizę składu fazowego oraz mikrostruktury.

Omówienie wyników badań

W pierwszym etapie prac przeprowadzono analizę przydatności metod wstępnego przygotowania materiału odpadowego. Na podstawie analizy granulometrycznej oraz ciężaru nasypowego stwierdzono, że zaproponowana metoda obróbki mechanicznej pozwala na uzyskanie materiału odpadowego w postaci proszku o odpowiedniej granulacji, co umożliwiło zastosowanie go jako składnika do otrzymywania pasty o zakładanej plastyczności. Dla proszku ołowiu oraz materiału odpadowego potwierdzono znaczne różnice w ich składzie chemicznym. Analiza składu materiału odpadowego wykazała obecność:

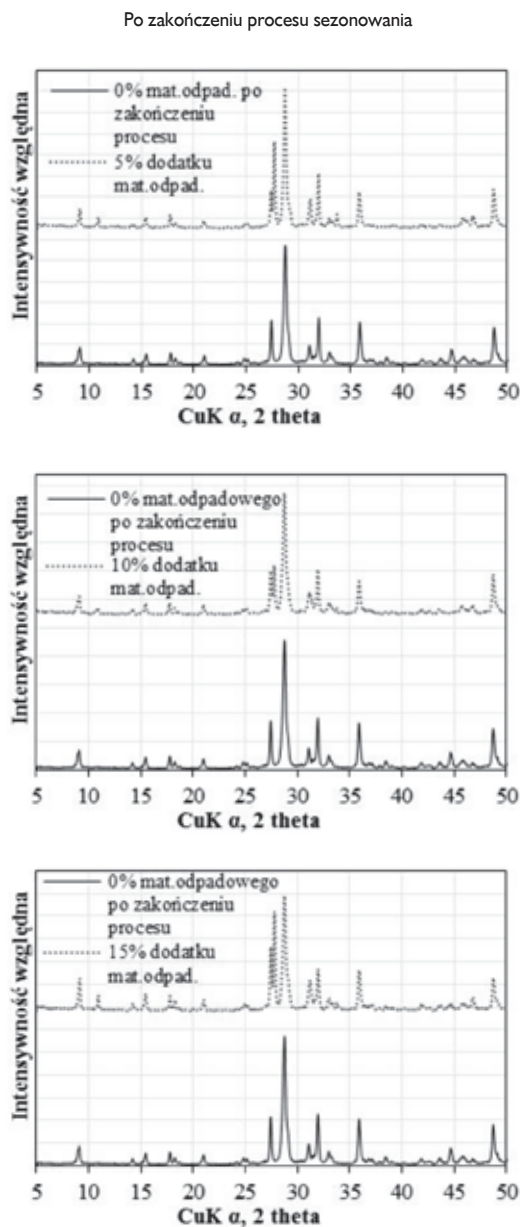
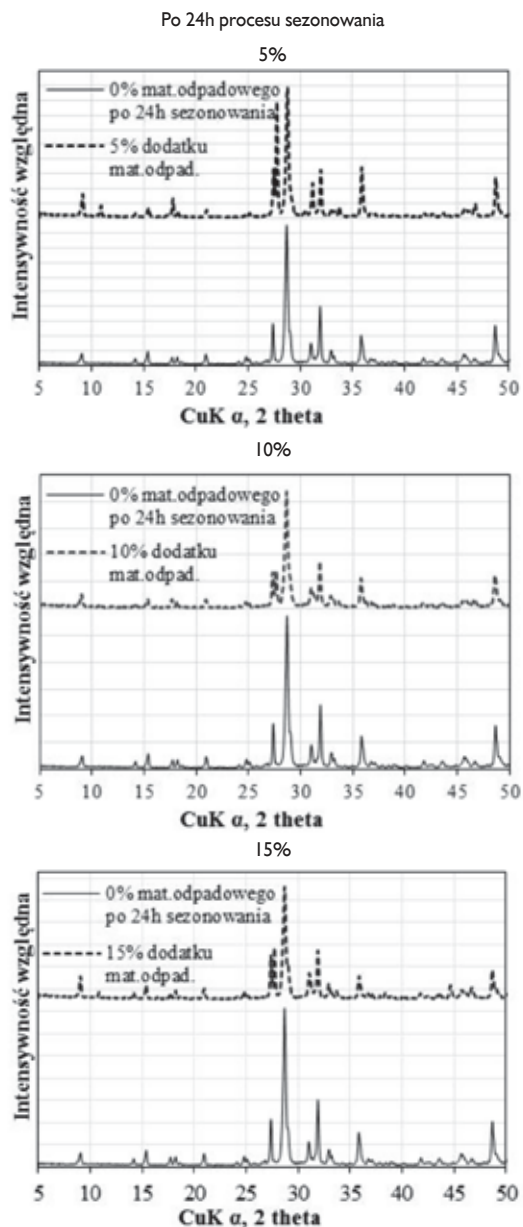
dwóch odmian krystalograficznych tlenku ołowiu (II), a mianowicie tlenku ołowiu (II) odmiana tetragonalna, zwany czerwonym, oznaczonym jako PbO_{tetr} i tlenku ołowiu (II) odmiana rombową, zwany żółtym, oznaczonym jako PbO_{romb} . Ponadto, wskazała na występowanie siarczanów $3PbO \cdot PbSO_4 \cdot H_2O$ oraz $4PbO \cdot PbSO_4$. Natomiast w proszku ołowiu stwierdzono obecność tlenku ołowiu (II) odmiana tetragonalna (PbO_{tetr}) i ołowiu metalicznego, oznaczonego jako Pb_{met} (Tab. I).

Tablica I

Względna zawartość faz proszku ołowiu i masy odpadowej po mieleniu

Próbka	$3PbO \cdot PbSO_4 \cdot H_2O$ %wzgl.	$4PbO \cdot PbSO_4$ %wzgl.	PbO_{tetr} %wzgl.	PbO_{romb} %wzgl.	Pb_{met} %wzgl.
Proszek ołowiu	-	-	90,05	-	9,95
Masa odpadowa po wstępnej obróbce	12,39	13,64	68,25	5,72	-

Stwierdzono różnice ciężaru nasypowego (po procesie mielenia) materiału odpadowego w stosunku do proszku ołowiu (odpowiednio 1,59 i 1,90 g/cm³). Różnica ta wynika prawdopodobnie głównie z kształtu cząstek.



Rys. 1. Widma XRD masy dodatniej bez i z dodatkiem 5, 10 i 15% materiału odpadowego podczas i po procesie sezonowania

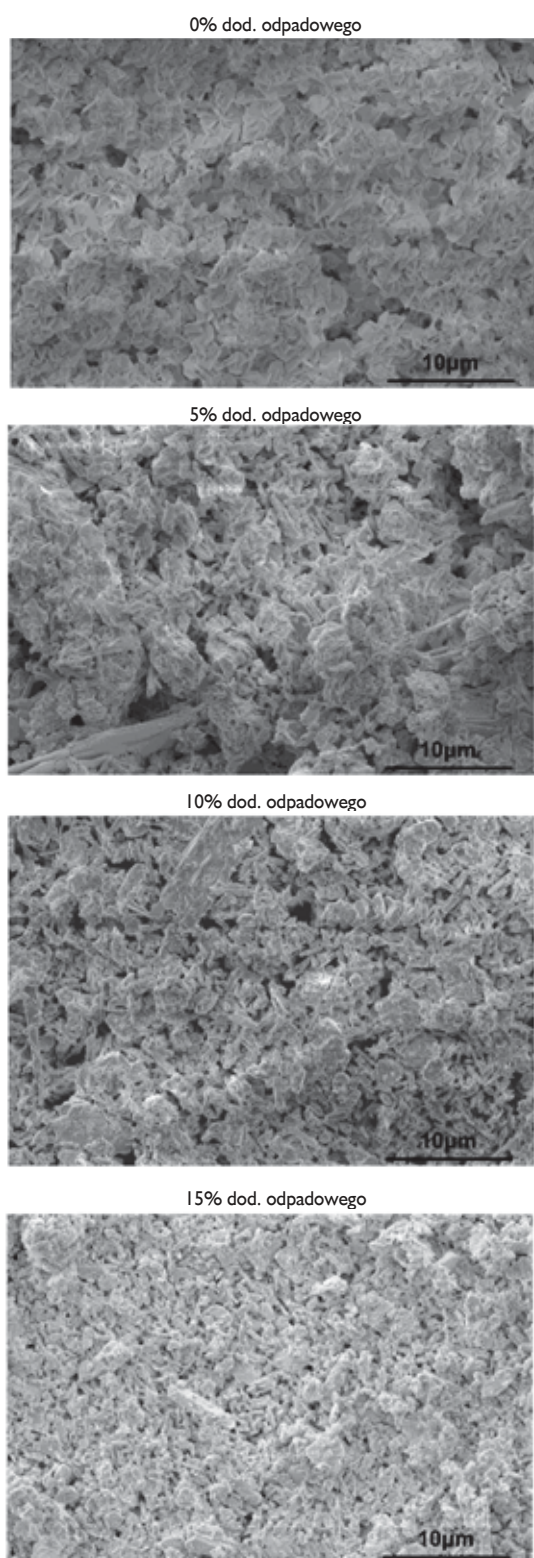
Po wytworzeniu z materiałów wyjściowych dodatniej masy aktywnej wykonano elektrody, które poddano procesowi sezonowania. Przebieg zmian składu fazowego w trakcie i po procesie sezonowania przedstawiono na widmach XRD (Rys. 1).

Można zauważyć, że pomimo pewnych różnic w morfologii badanych płyt dodatnich, skład fazowy po procesie sezonowania płyt dodatnich z dodatkiem materiału odpadowego jest zbliżony względem grupy referencyjnej. W przypadku płyt zawierających odpadowy materiał elektrodowy stwierdzono obecność $4\text{PbO}\cdot\text{PbSO}_4$ niewystępujących w grupie referencyjnej, oraz mniejszą zawartość fazy tetragonalnej PbO_2 . W celu oceny zmian morfologii ma-

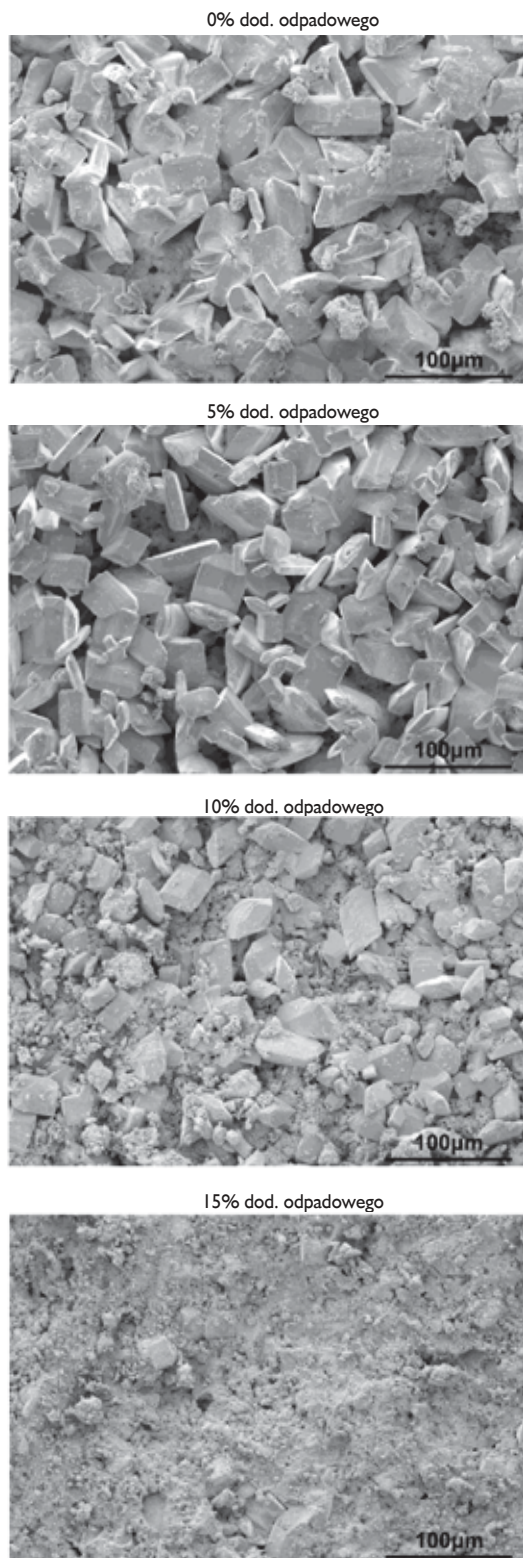
teriałów po procesie sezonowania wykonano zdjęcia SEM płyt dodatnich z różną zawartością materiału odpadowego (Rys. 2).

Morfologia materiałów wskazuje natomiast na zwiększającą się w masach z dodatkiem materiału odpadowego, obecność drobnokryształicznych struktur o wydłużonym, słabo określonym kształcie oraz zanik obserwowanych w grupie referencyjnej płatkowych krystalitów.

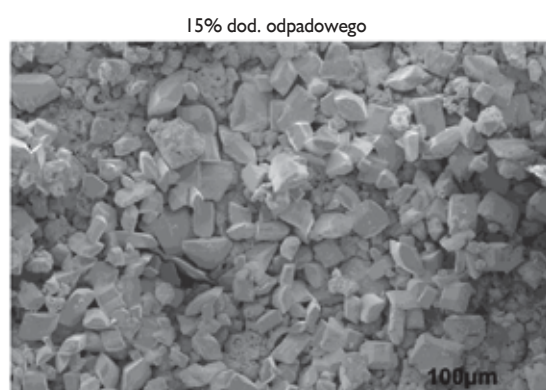
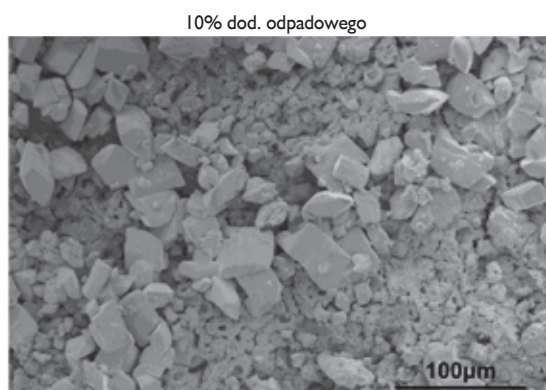
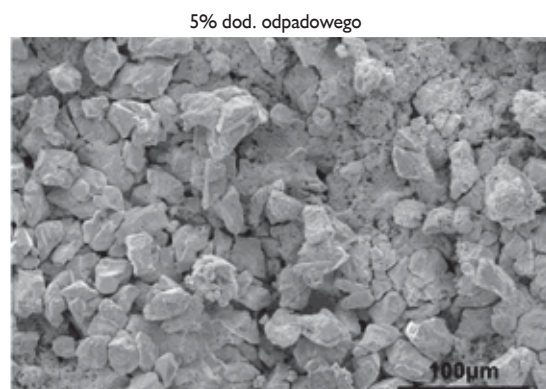
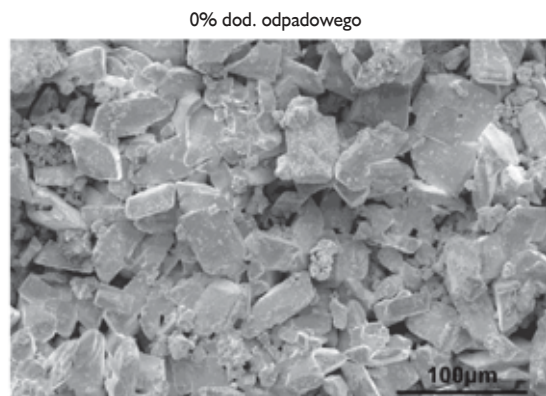
W kolejnym etapie prac poddano badaniom ogniwa zawierające otrzymane po procesie sezonowania elektrody dodatnie oraz standardowe elektrody ujemne. Na Rysunku 3 i 4 przedstawiono mikrografy SEM płyt dodatnich z różną zawartością materiału odpadowego, odpowiednio w stanie naładowanym (po procesie formacji) oraz wyładowanym.



Rys. 2. Zmiany struktury masy dodatniej bez i z dodatkiem 5, 10 i 15% materiału odpadowego po zakończeniu procesu sezonowania



Rys. 3. Zmiany struktury masy dodatniej bez i z dodatkiem 5, 10 i 15% materiału odpadowego po zakończeniu procesu formacji



Rys. 4. Zmiany struktury masy dodatniej bez i z dodatkiem 5, 10 i 15% materiału opadowego po procesie wyładowania

Wraz z rosnącym udziałem materiału opadowego w masie, wyraźnie uwidacznia się zwiększony udział w masie struktur nieuporządkowanych, które dla 15% dodatku materiału opadowego znacznie dominują nad typowymi krystalitami o rozmiarach kilkudziesięciu mikrometrów, wyraźnie widocznymi w próbce bez dodatku masy

opadowej. Po procesie wyładowania zauważyć można porównywalną zawartość struktur nieuporządkowanych we wszystkich masach, niezależnie od zawartości materiału opadowego w masie.

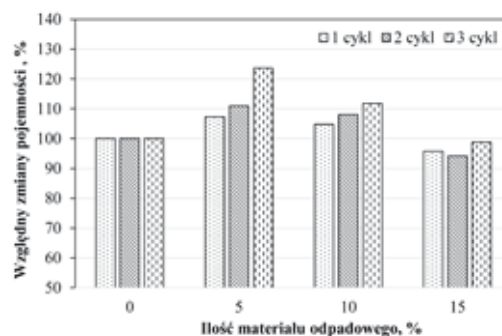
Rysunek 5 (na następnej stronie) przedstawia wykresy widm XRD płyt w stanie naładowanym (po formacji) i wyładowanym. Zestawienie składów fazowych poszczególnych grup płyt przedstawiono w Tabelcy 2.

Tabelca 2
Względna zawartość faz masy dodatniej bez i z dodatkiem 5, 10 i 15% materiału opadowego po naładowaniu i wyładowaniu

Próbka	βPbO_2 %wzgl.	αPbO_2 %wzgl.	Pb_{met} %wzgl.	PbSO_4 %wzgl.
Masa 0% po naładowaniu	93,07	6,93	-	-
Masa 0% po wyładowaniu	-	-	-	100
Masa 5% po naładowaniu	89,70	8,02	2,28	-
Masa 5% po wyładowaniu	-	-	-	100
Masa 10% po naładowaniu	97,83	2,17	-	-
Masa 10% po wyładowaniu	-	-	-	100
Masa 15% po naładowaniu	96,04	4,87	-	-
Masa 15% po wyładowaniu	-	-	-	100

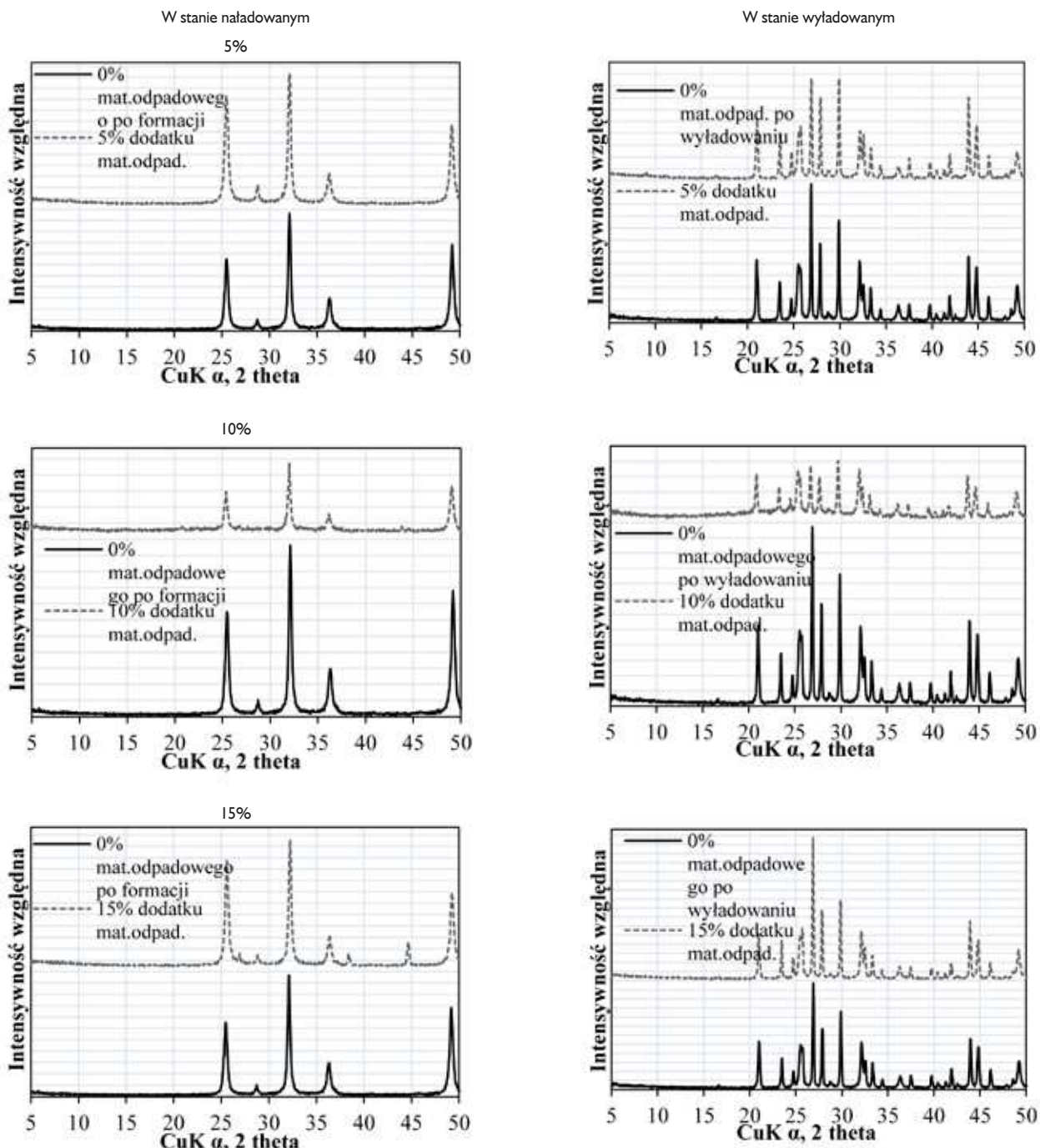
Stwierdzono różnice w morfologii badanych materiałów po formacji oraz wyładowaniu. We wszystkich badanych masach dodatnich po wyładowaniu, stwierdzonym składnikiem był tylko siarczan ołowiu. Jednak różnice składu fazowego w stanie naładowanym pomiędzy poszczególnymi grupami płyt były nieznaczne (różnice w względnych zawartościach βPbO_2 i αPbO_2).

W celu oceny wpływu różnic składu fazowego i mikrostruktury płyt na właściwości elektryczne przedstawiono (na Rys. 6) względne zmiany pojemności właściwej poszczególnych dodatnich mas aktywnych (100% – masa bez dodatku materiału opadowego) w 3. pierwszych cyklach ładowania/wyładowania.



Rys. 6. Pojemność właściwa dodatnich mas aktywnych bez i z dodatkiem 5, 10 i 15% materiału opadowego w 3. pierwszych cyklach ładowania/wyładowania

Badania pojemności wyładowania w pierwszych trzech cyklach ładowania i wyładowania wykazały różnice. Ogniwa z dodatkiem 5% masy opadowej wykazały najwyższe wartości pojemności w całej grupie badawczej. W przypadku ogniw z dodatkiem 15% masy opadowej, ich pojemności były niższe w stosunku do układów referencyjnych, jak również do ogniw z dodatkiem 5 i 10% materiału opadowego. Wynika z to faktu, że zwiększony dodatek masy opadowej może obniżyć wewnętrzną spójność masy w elektrodzie i utrudniać kontakt elektryczny pomiędzy poszczególnymi jej częściami.



Rys 5. Widma XRD masy dodatniej bez i z dodatkiem 5, 10 i 15% materiału odpadowego po naładowaniu i wyladowaniu

Podsumowanie

W ramach prowadzonych prac badawczych wykazano, że dodatek odpadowego materiału aktywnego o zawartości 5 – 15% powoduje zmiany morfologii, mikrostruktury oraz składu fazowego płyt. W płytach po procesie sezonowania zauważono znaczne ilości $4\text{PbO}\cdot\text{PbSO}_4$. Najczęściej ich obecność w płytach produkowanych w procesie wielkoseryjnym wiąże się z przegrzaniem elektrod w trakcie tego procesu. W omawianych badaniach, wobec jednakowego programu zmian środowiskowych podczas tego procesu oraz zbliżonej ilości płyt poddawanych procesowi sezonowania, pojawienie się tego składnika powiązano z dodatkiem mas odpadowych. Co prawda $4\text{PbO}\cdot\text{PbSO}_4$ wykryto w masie odpadowej, ale ich ilość w płytach po sezonowaniu wskazuje, że częściowo musiały one powstać w trakcie wspomnianego procesu.

Według danych literaturowych, $4\text{PbO}\cdot\text{PbSO}_4$ tworzą duże kryształy, a ich elektrokonwersja do PbO_2 jest trudniejsza niż $3\text{PbO}\cdot\text{PbSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$. Należy podkreślić, że skład fazowy elektrod dodatnich po procesie formacji nie wykazywał znaczących różnic pomiędzy poszczególnymi grupami. Również analiza mikrografów SEM płyt po sezonowaniu nie wykazała obecności dużych kryształów, które mogłyby zostać przypisane do tego związku. Można przypuszczać, że udało się uzyskać w płytach $4\text{PbO}\cdot\text{PbSO}_4$ o małych rozmiarach kryształów. Dodatkowo wykazano, że płyty zawierające 5–10% dodatku odpadowej masy aktywnej, wykazują pojemności właściwe wyższe niż płyty o standardowym składzie. Pojemności właściwe płyt z zawartością 15% dodatku masy aktywnej były niższe od pojemności płyt o standardowym składzie. Domniemywać można, że w tym przypadku większy doda-

tek masy odpadowej prowadzi do obniżenia wewnętrznej spójności masy w elektrodzie i utrudnia kontakt elektryczny pomiędzy poszczególnymi jej częściami, co przekłada się na pogorszenie parametrów elektrycznych. Wykonana po badaniach elektrycznych analiza stanu wnętrza akumulatorów potwierdziła te domniemania. Stwierdzono, że dodatek 15% odpadowej masy aktywnej powoduje osłabienie kontaktu masy z kolektorem prądowym, co prowadzi do obniżenia pojemności właściwej płyt. Zauważyć należy, że procesy zachodzące podczas tworzenia się pasty, sezonowania i formacji prowadzące do uformowania się właściwej masy elektroaktywnej mają znaczący wpływ na późniejsze parametry użytkowe. Zaburzenie każdego etapu może skutkować mniejszą pojemnością elektryczną, trwałością mechaniczną itp. Zważywszy, że właściwości fizykochemiczne zużytego materiału elektrodowego są odmienne od właściwości świeżej pasty, jej dodatek może wpływać różnorodnie na przebieg wyżej wymienionych procesów. Zmienność składu masy odpadowej, wiele możliwych powiązań pomiędzy strukturą krystaliczną i morfologiczną, właściwościami chemicznymi oraz fizykochemicznymi pasty i wspomnianego dodatku utrudnia analizę wpływu poszczególnych składników na finalną jakość materiału elektrodowego.

Literatura:

- Karden E.: *Automotive batteries: new developments*. w Garche J., Dyer Ch., Moseley P., Ogumi Z., Rand D., Scrosati B.: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, Elsevier B.V. 2009, 851–858.
- Kotaich K., Sloop S.E.: *Recycling: lithium and nickel-metal hydride batteries*. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* 2009, 188–198.
- Stevenson M.: *Recycling lead – acid batteries*. w Garche J., Dyer C. K., Moseley P.T., Ogumi Z., Rand D.A.J., Scrosati B.: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* 2009, 165–178.
- Krivik P., Baca P.: *Electrochemical Energy Storage*. in *Energy Storage – Technologies and Applications* 2013, <http://dx.doi.org/10.5772/52222>.
- Dahodwalla H., Heart S.: *Cleaner production options for lead-acid battery manufacturing industry*. *J Clean Prod* 2000, 8, 133–142.
- Espinosa D.C.R., Bernardes A.M., Tenorio J.A.S.: *An overview on the current processes for the recycling of batteries*. *J Power Sources* 2004, 135, 311–319.
- Keri J., Precsko J.: *Development and use of a new system for environmentally clean recycling of lead battery scrap*. *J Power Sources* 1995, 53, 297–302.
- Pavlov D.: *Lead-Acid Batteries, Science and Technology*. Elsevier, 2011, ISBN: 978-0-444-52882-7.
- A. Czerwiński.: *Akumulatory, baterie, ogniwa*. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 2005.
- Kiehne H.A.: *Battery Technology Handbook*. Second Edition, New York, 2003.
- Wagner R.: *Valve-Regulated Lead-Acid Batteries for Telecommunications and UPS applications*. w praca zbiorowa Moseley P.T., Garche J., Parker C.D., Rand D.A.J., *Valve-Regulated Lead-Acid Batteries*, Elsevier, 2004, 435–465.
- Morales J., Petkova G., Cruz M., Caballero A.: *Synthesis and characterization of lead dioxide active material for lead-acid batteries*. *J. Power Sources* 2006, 158831–836.
- Aidman G.I.: *A view on chemically synthesized expanders for lead/acid battery negative plates*. *J Power Sources* 1996, 59, 25.
- Clement N., Zguris G., Wertz J., Ashirgade A.: *Materials for evolving lead-acid battery performance requirements as the world moves towards a greener planet*. Materiały konferencyjne 8th International Conference on Lead Acid Batteries, Labat 2011, Albena (Bułgaria), p. 87.
- Fusillo G., Scura F., La Sala G., Guerriero R.: *Pb/PbO mixture production: new STC process for direct lead battery paste recycling*. Materiały konferencyjne 9th International Conference on Lead Acid Batteries, Labat 2014, Albena (Bułgaria), 239.
- Zerroual L., Matrakova M.: *Correlation between the electrochemical activity and the crystallite of PbO₂: a comparative between the chemical and the electrochemical routes*. Materiały konferencyjne 9th International Conference on Lead Acid Batteries, Labat 2014, Albena (Bułgaria), 157.

- Shiomi M., Funato T., Nakamura K., Takahashi K., Tsubota M.: *Effects of carbon in negative plates on cycle-life performance of valve-regulated lead/acid batteries*. *J. Power Sources* 1997, 64, 147–152.
- Mithin Kumar S., Ambalavanan S., Mayavan S.: *Effect of graphene and carbon nanotubes in the negative active materials of lead acid batteries operating under high-rate partial-state-of-charge operation*. <http://www.rsc.org/suppdata/ra/c4/c4ra06920j/c4ra06920j1.pdf>
- Rekha L., Venkateswarlu M., Murthy K.S.N., Jagadish M.: *The effect of additives (Carbon & TiO₂) on the performance of the Lead acid batteries*. Materiały konferencyjne 9th International Conference on Lead Acid Batteries, Labat 2014, Albena (Bułgaria), 55.
- Foudia M., Matrakova M., Zerroual L.: *Effect of mineral additive on the electrical performance of lead acid battery positive plate*. Materiały konferencyjne 9th International Conference on Lead Acid Batteries, Labat 2014, Albena (Bułgaria), 93.

Praca finansowana w ramach działalności statutowej Instytutu Metali Nieżelaznych, Oddział w Poznaniu (Decyzja MNISW nr 3787/E-138/S/2014).

Dr inż. Ewa JANKOWSKA absolwentka Politechniki Śląskiej Wydziału Chemicznego. Stopień doktora nauk technicznych uzyskała w 2003 r. na Wydziale Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej. Jest adiunktem w Instytucie Metali Nieżelaznych Oddział w Poznaniu Centralne Laboratorium Akumulatorów i Ogniwi. Zainteresowania naukowe: materiały elektrodowe do akumulatorów kwasowo ołowiniowych, chemiczne źródła prądu.
e-mail: ewa.jankowska@clai.poznan.pl; tel.: 61 2797 845

Dr inż. Włodzimierz MAJCHRZYCKI ukończył studia na Wydziale Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej (1982). W 2002 r. uzyskał stopień doktora nauk chemicznych w zakresie technologii chemicznej. Obecnie pracuje na stanowisku kierownika Zakładu Elektrochemii Przemysłowej Instytucie Metali Nieżelaznych oddział w Poznaniu Centralne Laboratorium Akumulatorów i Ogniwi. Zainteresowania naukowe: elektrochemia.
e-mail: wlodzimierz.majchrzycki@clai.poznan.pl; tel.: 61 2797 872

Dr Agnieszka MARTYŁA – magisterium i doktorat obroniony na Wydziale Chemii UAM w Poznaniu. Obecnie pracuje w Instytucie Metali Nieżelaznych oddział w Poznaniu Centralne Laboratorium Akumulatorów i Ogniwi, Samodzielna Pracownia Cienkich Warstw i Analityki. Zainteresowania naukowe: cienkie warstwy, fotowoltaika, ogniwa paliwowe, nanomateriały, kataliza.
e-mail: agnieszka.martyla@clai.poznan.pl, tel.: 61 2797 815

Mgr inż. Łukasz MAJCHRZYCKI ukończył studia na Wydziale Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej (2010). Obecnie jest pracownikiem naukowo-technicznym w Centrum Zaawansowanych Materiałów UAM. Zainteresowania naukowe – nanotechnologia, mikroskopia.
e-mail: lukasz.majchrzycki@gmail.com

www.miesiecznikchemik.pl
www.chemikinternational.com