

Bezpieczeństwo stosowania ogniw litowych w maszynach i urządzeniach górniczych, pracujących w przestrzeniach potencjalnie zagrożonych wybuchem

Bartosz Polnik

1. Wprowadzenie

Stosowane obecnie ogniwa wtórne w górnictwie to kwasowo-ołowiowe, niklowo-kadmowe i niklowo-wodorowo-metalowe. Każde z nich stwarza zagrożenia, które są powszechnie znane. Przykładowo ogniwa kwasowo-ołowiowe w trakcie ładowania wydzielają wodór, gaz wybuchowy, a obecność kwasu siarkowego stwarza potencjalne zagrożenie dla obsługi konsekwencjami oparzeń. Wszystkie obecnie stosowane ogniwa są badane przez producenta zgodnie z normami IEC. Dla akumulatorów litowych brak jest norm w zakresie badań. Zastosowane w maszynach konstrukcji KOMAG-u nowej generacji ogniwa litowe wymagają przeprowadzenia szeregu badań celem uzyskania pozytywnej opinii jednostki notyfikowanej. Ogniwa litowe po raz pierwszy zastosowano w podwieszonym ciągniku akumulatorowym typu GAD-1 oraz w ciągniku akumulatorowym typu PCA-1 (rys. 1). W obydwu rozwiązaniach wykorzystano hamowanie elektryczne ze zwrotem energii do baterii akumulatorów.

Zastosowane w powyższych rozwiązaniach górniczych ogniwa litowe (rys. 2) to: litowo-polimerowe (ciągnik GAD-1) oraz litowo-żelazowo-fosforanowe (ciągnik PCA-1). W tabeli 1 zestawiono ich podstawowe dane techniczne.


2. Program badań

Program prób w związku z brakiem norm w zakresie badań został opracowany przez jednostkę notyfikowaną przy współudziale specjalistów z KOMAG-u. Próby należało przeprowadzić w specjalistycznym laboratorium. Konieczność

Streszczenie: Maszyny pracujące w podziemiach kopalń są zasilane w większości energią elektryczną, dostarczaną z sieci kopalnianej za pośrednictwem przewodów elektroenergetycznych. Maszyny mobilne zasilane energią elektryczną poprzez przewód elektroenergetyczny mają ograniczony zakres stosowania. Stąd w takich przypadkach bazuje się przede wszystkim na napędach spalinowych, trakcyjnych i zasilanych z baterii ogniw. Pogarszające się warunki przewietrzania wyrobisk górniczych oraz przepisy dotyczące stosowania maszyn spalinowych w podziemiach kopalń w aspekcie bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników skłaniają do budowy maszyn i urządzeń zasilanych z baterii ogniw. W większości dotychczasowych rozwiązań jako źródło zasilania stosowane są z reguły ogni-

wa kwasowo-ołowiowe. Obserwuje się również próby wdrażania układów zasilających bazujących na ogniwach litowych. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych ogniw litowych różnego rodzaju, umożliwiające stosowanie ich w przestrzeniach potencjalnie zagrożonych wybuchem metanu i pyłu węglowego. Zwrócono uwagę na aspekt bezpieczeństwa ich stosowania w zakresie m.in.: odporności ogniwa na zwarcie na zaciskach, przeładowanie, nadmierne rozładowanie. W trakcie badań niszczących badano skład gazów wydzielanych z ogniwa. Zaprezentowano możliwości zastosowania ogniw litowych w górnictwie węgla kamiennego.

Słowa kluczowe: górnictwo, napędy maszyn, baterie ogniw, ogniwa litowe, badania.

 **Abstract:** Mine machines, are usually supplied from the external electrical network. Mobile mine machines, supplied from the electrical cable has had a limited range of working. That is why they are usually based on a diesel engine, traction energy or a battery energy. The ventilations conditions are worst in every few meters working deeper, and the law regulations are more strict for the machine producers and mine workers. Lead acid batteries are the energy source, for almost everyone electric mobile machine in mine. In

the last few years, we could observe the attempts of implementation of the mine machine supplied from the li-ion batteries.

This paper presents results of the stand tests of the li-ion cells. Li-poly and the LiFePO4 cells was tested. Short circuit, overcharge and the gas emission tests were presented in the paper. Possibilities of use of the mobile mine machines supplied from the li-ion battery were also presented.

Key words: mining, drives, batteries, li-ion cells, tests.



Rys. 1.
Podwieszony
ciągnik aku-
mulatorowy
GAD-1 oraz
PCA-1 [2, 3]



Rys. 2.
Widok ogniw
typu Li-poly
oraz LiFePO4
[2, 3]

Tabela 1

Dane	Wartość	
	Li-poly	LiFePO4
Pojemność	150 Ah	100 Ah
Napięcie znamionowe	3,7 V	3,2 V
Max. napięcie rozładowania	3 V	2 V
Max. napięcie naładowania	4,15 V	3,65 V
Max. ciągły prąd ładowania	150 A	100 A
Max. ciągły prąd rozładowania	300 A	200 A
Masa	3,3 kg	3,5 kg
Wymiary	327×453×10 mm	220×150×69 mm

przeprowadzenia prób wynika z braku norm zharmonizowanych z dyrektywą ATEX i maszynową. Dotychczas w zakresie badań ogniw litowych opracowano normy dla przemysłu motoryzacyjnego i niewielkich urządzeń przenośnych. Należy zaznaczyć, że szereg prób (głównie związanych z uszkodzeniami mechanicznymi), został przeprowadzony przez producenta ogniw. Poniżej opisano kilka wybranych z przeprowadzonych prób, jakie zostały omówione w niniejszym artykule.

Próba przeładowania ogniwa i zgromadzenia gazu elektrolitycznego

Przypadek przeładowania ogniwa jest teoretycznie możliwy tylko przy niesprawnym układzie zabezpieczeń w systemie nadzoru i zarządzania ogniwami, który jest zdublowanym systemem cyfrowym i analogowym. Permanentne przeładowanie ogniwa spowoduje jego uszkodzenie. Celem próby jest zbadanie składu gazu elektrolitycznego, który może wydzielić się z ogniwa w czasie jego przeładowania. Próbie poddane zostanie ogniwo w pełni naładowane (do wartości znamionowej) o temperaturze stabilnej ok 20°C. Do zacisków pojedynczego ogniwa zostanie podłączone źródło prądu stałego o natężeniu 75 A i 50 A. Rozpocznie się próba przeładowania ogniwa. W momencie rozszczelnienia ogniwa nastąpi stabilizacja napięcia na poziomie ok 5 V i dalsze doładowywanie ogniwa aż prąd ładowania spadnie do wartości bliskiej 0 A. W tym czasie do hermetycznych pojemników będzie zbierany gaz wydostający się z ogniwa.

Próba przeładowania ogniwa aż do fizycznego zniszczenia

Założono przypadek, że bateria została w 100% naładowana, a ciągnik pracuje w trybie hamowania prądem o wartości 0,85 prądu znamionowego, jednocześnie generując moment równy 0,85 momentu znamionowego. Dla takich wartości prądu hamowania ciągnik po krótkim czasie się zatrzyma. Dalsze

przemieszczanie się ciągnika jest możliwe przy niesprawnych zabezpieczeniach. Wówczas bateria może być trwale przeładowywana, gdyż moment hamowania będzie zbyt mały, by spowodować zatrzymanie ciągnika. Próbie poddane zostanie ogniwo w pełni naładowane (do wartości znamionowej) o temperaturze stabilnej ok. 20°C. Do zacisków ogniwa zostanie podłączone źródło prądu stałego o natężeniu 75 A i 50 A. Rozpocznie się próba przeładowania ogniwa. Napięcie na zaciskach ogniwa nie będzie w żaden sposób stabilizowane, a prąd 75 A i 50 A będzie przepływał przez ogniwo aż do jego fizycznego zniszczenia. W czasie trwania próby rejestrowane były parametry elektryczne i termiczne ogniwa.

Próba zewnętrznego zwarcia

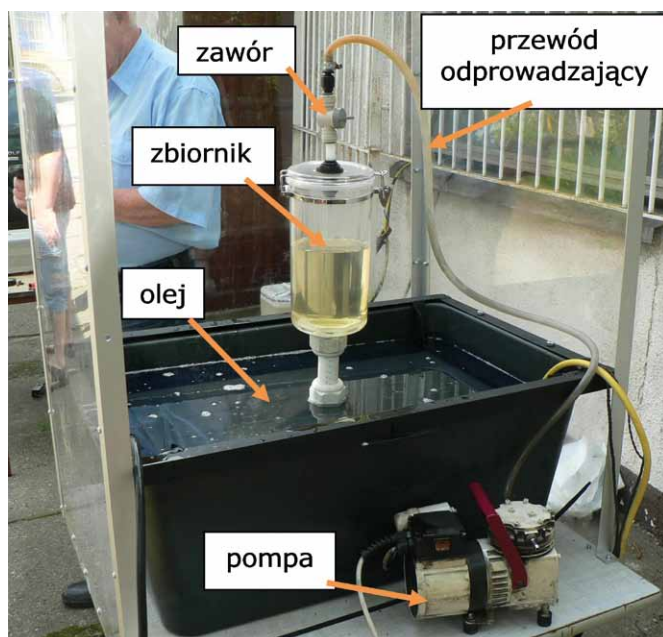
Zewnętrzne zwarcie zacisków ogniwa jest możliwe, a zabezpieczenia zwarciove w postaci bezpieczników chronią ogniwo przed zwarcieniem w układzie napędowym i zasilania (przewody łączące baterię akumulatorów z modułem zasilającym lub przewody w samym module). Próbie poddane zostanie ogniwo w pełni naładowane o temperaturze stabilnej ok. 20°C. Do zacisków ogniwa o napięciu znamionowym 3 za pośrednictwem przewodów dołączony został stycznik, który został zamknięty i spowodował fizyczne zwarcie zacisków ogniwa. W czasie trwania próby rejestrowane były parametry elektryczne i termiczne ogniwa.

3. Przebieg i wyniki badań

3.1. Próba przeładowania ogniwa i zgromadzenia gazu elektrolitycznego

Celem próby było zgromadzenie w specjalnie przeznaczonych do tego celu hermetycznych pojemnikach gazu elektrolitycznego, powstałego w wyniku przeładowania badanego ogniwa. Po naładowaniu do poziomu 100% pojemności ogniwo wprowadzono do metalowej klatki zabezpieczającej, symulującej realne warunki użytkowania. Klatkę z ogniwem umieszczono w zbiorniku z tworzywa sztucznego (rys. 3), unieruchomiono, podłączono kable elektryczne i zamknięto pojemnik pokrywą. Pokrywę połączono przy pomocy węża z pojemnikiem buforowym z zaworem odprowadzającym. Po sprawdzeniu szczelności układu wypełniono go olejem transformatorowym w celu usunięcia z niego innych gazów. Górny zawór odprowadzający pojemnika buforowego połączono wężykiem z pompą perystaltyczną. Następnie rozpoczęto procedurę przeładowywania ogniwa. Przeładowanie prowadzono prądem stałym o natężeniu 0,5 C ograniczenie potencjałowe kończące automatycznie przeładowywanie ustawiono na poziomie 12 V, jednakże jako główne kryterium zakończenia badania przyjęto ustanie procesu wydzielania się mieszaniny gazów z ogniwa po jego rozszczelnieniu. W trakcie badania napięcie ogniwa rosło w miarę równomiernie aż do 85 minut próby, kiedy to przy napięciu ogniwa o wartości 6,27 V nastąpiło rozszczelnienie ogniwa z jednoczesnym wydzielaniem

reklama



Rys. 3. Widok stanowiska prób [2]



Rys. 4. Widok ogniwa po zakończonej próbie [2, 3]

znacznej ilości gazu i spadkiem napięcia do poziomu 4,75 V. W tym momencie rozpoczęto odpompowywanie gazu z bufora do pojemnika hermetycznego. Proces zbierania gazu trwał ok. 40 minut. W tym czasie napięcie ogniwa było stabilizowane na poziomie 4,77 V, a prąd spadał aż do wartości bliskiej zeru. W momencie, kiedy gazowanie ustało, a prąd pobierany przez baterie spadł do wartości bliskiej zeru, próbę uznano za zakończoną. Przybliżona szacunkowa ilość zebranej mieszaniny gazów wyniosła 8 litrów. Widok ogniwa po przeprowadzonej próbie przedstawiono na rys. 4. Jednoznacznie widać miejsce rozszczelnienia ogniwa, w którym następowało wydzielanie się gazów elektrolitycznych. Miejsce to jest blisko punktów pomiaru temperatury, co tym bardziej potwierdziło słuszność zainstalowania właśnie w tych punktach czujników temperatury.

W tabeli 2 oraz w tabeli 3 zestawiono wyniki analiz chromatograficznych, zebranych próbek gazowych z ogniwa Li-poly oraz LiFePO₄.

Jak wynika z tabeli 2, z badanego ogniwa podczas przeładowania, po rozszczelnieniu wydzielą się szereg gazów. Znajdują się wśród nich zarówno gazy toksyczne, jak i obojętne, gazy

palne i niepalne. Najistotniejsze z punktu widzenia próby było, aby ilość toksycznych gazów była jak najmniejsza w stosunku do wolnej objętości powietrza panującej wokół ogniwa, a gazy palne posiadały temperaturę zapłonu zdecydowanie większą od temperatury panującej w otoczeniu pracującego ogniwa. Zarówno pierwszy, jak i drugi warunek został spełniony.

Natomiast dla próby z ogniwem LiFePO₄ (tabela 3) skład chemiczny gazów, jak: wodór od wartości 18% małał do 9,1%; metan z 5,4% do 1,0%; dwutlenek węgla z 12,3% do 5,3%; natomiast tendencją wzrostową zanotowały gazy: tlen z 7% do 8,3% oraz azot z 38,3% do 63,1%. Obecność gazów palnych i wybuchowych jest bardzo istotna z uwagi na bezpieczeństwo, mogą one bowiem być powodem pożaru lub wybuchu. Po analizie składu chemicznego można wykluczyć powstanie wybuchu wewnątrz ogniwa, natomiast zagrożenie pożarem jest realne po zainicjowaniu iskry lub łuku elektrycznego. W obydwu przypadkach temperatura zewnętrzna ogniwa nie przekroczyła 100°C.

3.2. Próba przeładowania ogniwa aż do jego fizycznego zniszczenia

Badanie miało na celu symulację awarii polegającej na niezadziałaniu elektronicznych układów ograniczających końcowe napięcie ładowania. W wyniku tego ogniwo jest w sposób ciągły przeładowywane, co skutkuje wydzielaniem mieszaniny gazów, które są głównie produktem elektrochemicznego rozkładu składników elektrolitu (rozpuszczalniki, sól litu, dodatki funkcjonalne). Celem badania było ustalenie warunków prądowych, w jakich dojdzie do samozapłonu pojedynczego ogniwa litowo-jonowego podczas ciągłego przeładowywania prądem stałym. Ogniwo naładowane do 100% pojemności o napięciu maksymalnym (graniczne napięcie końca ładowania) zostało umieszczone w osłonie bezpieczeństwa. Do jego zacisków podłączone zostało źródło prądu stałego o wydajności prądowej 0,5 C ogniwa z napięciem końca ładowania ustawionym na poziomie 36 V. Jest to napięcie 8-krotnie wyższe niż napięcie końca ładowania podawane przez producenta w specyfikacji ogniwa. Próba przeprowadzona była na wolnym powietrzu bez umieszczania w jakichkolwiek pojemnikach i bez zalewania olejem transformatorowym. Badanie trwało aż do zniszczenia fizycznego ogniwa. Widok ogniwa po zakończonej próbie pokazano na rys. 5.

Analizując wyniki z przeprowadzonych prób przeładowania ogniwa, w przebiegu próby można wskazać trzy charakterystyczne punkty: początek próby, moment rozszczelnienia ogniwa oraz samozapłon badanego ogniwa. Od początku próby przeładowania ogniwa Li-poly do momentu rozszczelnienia ogniwa przyjęło ładunek 115 Ah ponad stan naładowania, podnosząc w tym czasie wartość napięcia na zaciskach z 4,2 V do 6,2 V. Należy zaznaczyć, że temperatura ogniwa zmieniła się zaledwie o 12°C. Jeżeli w tym momencie przeładowanie będzie kontynuowane z zachowaniem prądu źródła ładowania 75 A i bez stabilizacji napięcia źródła, to rozpocznie się proces *thermal runaway* – niekontrolowany wzrost temperatury powodujący wygotowanie związków chemicznych we wnętrzu ogniwa, co w efekcie skutkuje samozapłonem pozostałości gazów elektrolitycznych. Zjawisko *thermal runaway* opisane zostało za

Tabela 2. Zestawienie zgromadzonych gazów elektrolitycznych w ogniwie Li-poly

WYNIKI PRÓB GAZOWYCH													STRONA	1	
													DATA:	28.06.2012	
Minuta pobrania	Numer próby	Miejsce pobrania	ZAWARTOŚĆ GAZÓW - STĘŻENIA												
			O ₂ [%]	CO ₂ [%]	CO [%]	CH ₄ [%]	H ₂ [%]	C ₂ H ₂ [%]	C ₂ H ₄ [%]	C ₃ H ₆ [%]	C ₂ H ₆ [%]	C ₃ H ₈ [%]	i-C ₄ H ₁₀ [%]	n-C ₄ H ₁₀ [%]	N ₂ [%]
			tlen	dwutlenek węgla	Tlenek węgla	metan	wodór	acetylen	etylen	propylen	etan	propan	i-butan	n-butan	azot
0-9	428		17,98	6,83	0,81	0,82	1,79	0,59	0,13	0,00	0,51	0,05	0,00	0,00	70,49
9-19	438		6,20	41,15	4,58	4,38	8,24	3,84	0,79	0,02	3,05	0,35	0,00	0,05	27,35
19-29	217		7,33	37,47	4,01	3,75	6,75	3,51	0,74	0,01	2,68	0,33	0,01	0,07	33,34
29-37	4		14,54	16,44	1,67	1,56	2,90	1,46	0,33	0,00	1,18	0,17	0,01	0,05	59,69
37-43	5		16,67	11,02	1,09	1,02	1,91	0,98	0,22	0,00	0,80	0,12	0,01	0,03	66,13

Tabela 3. Zestawienie zgromadzonych gazów elektrolitycznych w ogniwie LiFePO₄

	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Próbka 4	Próbka 5
Nazwa składnika	Skład [% obj.]	Skład [% obj.]	Skład [% obj.]	Skład [% obj.]	Skład [% obj.]
Wodór	18,0	17,4	10,0	9,2	9,1
Tlen	7,0	7,3	7,9	8,2	8,3
Azot	38,3	39,8	58,4	62,2	63,1
Tlenek węgla	5,3	5,1	3,5	3,0	2,7
Dwutlenek węgla	12,3	12,0	5,9	5,3	5,3
Metan	5,4	5,5	1,3	1,1	1,0
Węglowodory wyższe:					
Etan	1,50	1,48	0,32	0,25	0,22
Etylen	8,0	7,9	5,8	4,8	4,9
Propan	0,13	0,17	0,04	0,03	0,03
Propylen	0,02	0,1	0,04	0,03	0,04
Butany	0,11	0,10	0,16	0,13	0,11
C5+	0,05	0,06	0,02	0,01	0,02
Suma	96,1	96,9	93,4	94,3	94,8

pomocą wykresu przedstawionego na rys. 6. Proces ten jest silnie uzależniony od temperatury panującej w ogniwie. Jak możemy zaobserwować z tabeli 4, ilustrującej wartości zmierzone w charakterystycznych punktach próby, temperatura zmierzona na zewnątrz ogniwa w momencie samozapłonu sięgała 180°C, po czym można stwierdzić, że we wnętrzu miała wartość zdecydowanie ponad 200°C.

W przypadku ogniwa LiFePO₄, w czasie próby trwającej 73 minuty, przez 30 minut w trakcie przeładowania nie ma symptomów zewnętrznych. W tym czasie następuje stopniowy wzrost temperatury obudowy ogniwa do 80°C. Po tym czasie następuje deformacja panelu, a po następnych 15 minutach następuje gwałtowny wzrost temperatury do 190°C (*thermal runaway*) i rozszczelnienie się obudowy, z której wydostają się



Rys. 5. Widok ogniw Li-poly oraz LiFePO4 po zakończonej próbie przeładowania [1, 2, 3]

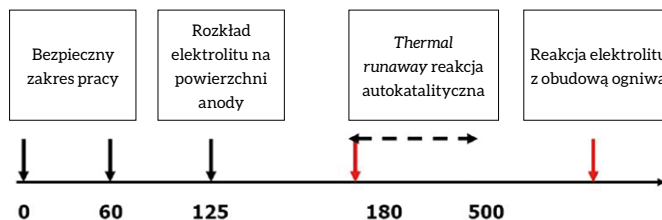
gazy w postaci białego dymu (rys. 5). W czasie badań nie zanotowano wybuchu ani pożaru, a elementy konstrukcyjne ogniwa ulegały destrukcji przez nadtopienie na skutek wysokiej temperatury. Wydzielany gaz nie stanowi zagrożenia wybuchowego ani nie stanowi zagrożenia dla obsługi i serwisu.

3.3. Próba zewnętrznego zwarcia na zaciskach ogniwa

Próba zewnętrznego zwarcia metalicznego to jedyna próba zwarciowa, jaka została wskazana w programie badań ogniwa litowego. Próba ta miała symulować stan zwarcia wywołanego zewnętrznym elementem przewodzącym (np. wpadnięcie metalowego klucza do modułu baterii i przypadkowe zwarcie elektrod). Ponieważ w normalnych warunkach eksploatacyjnych w czasie zwarcia przez ogniwo płynie najwyższy prąd zwarcioowy, gdy jest ono naładowane do granicznej wartości napięcia (ok. 4,2 V), postanowiono, podobnie jak w poprzednich próbach, badania przeprowadzić na maksymalnie naładowanym ogniwie (mimo iż nie jest to wymagane). Do zacisków ogniwa o napięciu znamionowym za pośrednictwem przewodów podłączony został stycznik, który po zamknięciu spowoduje fizyczne zwarcie zacisków ogniwa. Wyniki testu rejestrowane były na komputerze PC oraz na kamerze wideo. Ponadto wykorzystano kamerę termowizyjną, aby zarejestrować miejsca wzrostu temperatury podczas trwania próby zwarciowej. Na rys. 7 pokazano widok ogniw po zakończonej próbie zwarcia na zaciskach.

Tabela 4. Wartości zmierzone w charakterystycznych punktach próby ogniwa Li-poly

	U ogniwa [V]	I źródła [A]	C przyjęty przez ogniwo [Ah]	T ogniwa [°C]	Czas [min]
Początek próby	4,2	75	5,7	25	8
Rozszczelnienie ogniwa	6,23	75	115,3	37	82
Samozapłon ogniwa	17,39	75	152,6	180	122

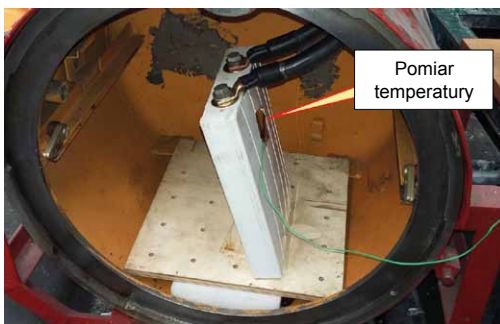
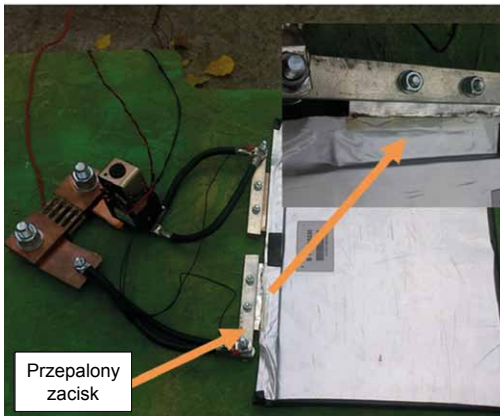


Rys. 6. Opis zjawisk towarzyszących przeładowaniu ogniwa w funkcji temperatury [2]

Zgodnie z impedancją obwodu zwarciowego oraz wartościami napięć poszczególnych ogniw prąd zwarcioowy powinien wynieść ok 3000 A. Jak widać na rys. 7 zacisk dodatni ogniwa (Li-poly) został przepalony wskutek przepływu prądu zwarciowego. Zacisk dodatni jest wykonany z aluminium, zaś zacisk ujemny z niklu. Takie upalenie zacisku stanowi pewnego rodzaju zabezpieczenie, niczym bezpiecznik topikowy, który przepalając się, stwarza przerwę w obwodzie zwarciowym. Ogniwo LiFePO4 w wyniku przeprowadzonej próby nie uległo zniszczeniu, a jedynie wybrzuszeniu obudowy zewnętrznej. Najwyższa temperatura na obudowie ogniwa w toku przeprowadzonej próby wyniosła 88°C. Prąd zwarcioowy w obydwu przypadkach nie przekraczał 3000 A. Przebiegi rejestrowanych wielkości z próby zwarcia ogniwa Li-poly pokazano na rys. 8.

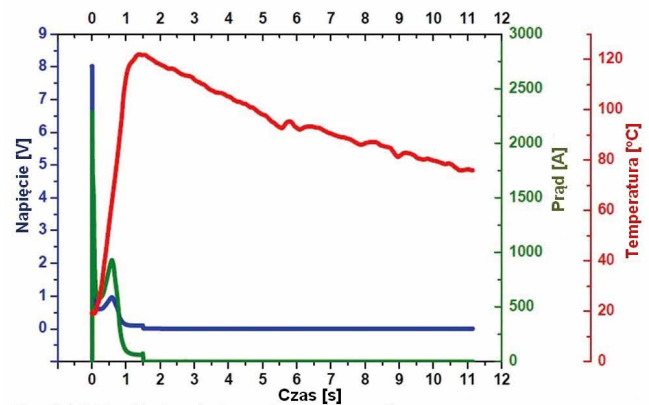
4. Podsumowanie

Przeprowadzone próby stanowiskowe dwóch odmian ogniw litowych pokazały, że bezpiecznym źródłem energii ma styczność użytkownik. Próby, jakim poddane zostało ogniwo, były wyjątkowo rygorystyczne w porównaniu z badaniami jakie przeprowadzane są na ogniwach innego typu. Oczywiście stan taki wynikał z braku norm precyzujących sposób badania tego typu ogniw. Podsumowując przeprowadzone próby, należy stwierdzić, że ogniwa litowe są ogniwami nowoczesnymi o parametrach dalece wykraczających ponad dotychczas stosowane



Rys. 7.
Widok ogniw Li-poly oraz LiFePO₄ po zakończonej próbie zwarcia zewnętrznego na zaciskach [1, 2, 3]

w górnictwie ogniw kwasowo-olowiowe itp. Z punktu widzenia bezpieczeństwa, na podstawie przeprowadzonych prób należy stwierdzić, że są to ogniw bezpieczne, ale jak każdy magazyn energii możliwe do zniszczenia. Należy bardzo duży nacisk położyć na stabilizowanie napięcia podczas ładowania ogniw. Zastosowane odpowiednie systemy nadrzędne bez problemu z tym sobie radzą. Jednakże z punktu widzenia maszyny, w której te ogniw są zastosowane, jej mocy i prędkości jazdy, a także kształtu tras, po których maszyny się poruszają, fizycznie „niemożliwe” staje się osiągnięcie takich wartości, jakie uzyskiwano podczas prób przeładowania. Szereg prób oraz konsultacji, na których analizowano wszystkie możliwe i mało prawdopodobne przypadki wystąpienia awarii, jasno dał obraz ogniw bezpiecznych, dla których jedynym zagrożeniem z punktu warunków rzeczywistego eksploatacji jest skierowanie bezpośredniego otwartego ognia na ogniw. Ponieważ w przewidzianych do zastosowania aplikacjach (ciągnik podwieszony GAD-1 oraz PCA-1) bateria zamknięta jest w skrzyni przeciwwybuchowej ognioszczelnej, nie bierze się pod uwagę możliwości zewnętrznego ognia, a jedynie wystąpienie zapłonu we wnętrzu. Jeżeli wystąpi pożar we wnętrzu obudowy, to gazy wydzielające się z ogniw to głównie gazy o właściwościach gaszących, takie jak azot czy dwutlenek węgla, które wyprą powietrze ze środka skrzyni, eliminując czynnik wspomagający płonący ogień, a sama skrzynia z uwagi na swoją konstrukcję (budowa przeciwwybuchowa) uniemożliwia przeniesienie się wybuchu (ognia) na zewnątrz [4]. Pozostałe w wyniku uszkodzenia ogniw gazy w odniesieniu do wolnej objętości w obudowie baterii nie stanowią zagrożenia wybuchowego i toksycznego, a ich



Rys. 8. Przebiegi napięcia, prądu oraz temperatury podczas próby zwarcia ogniw Li-poly [2]

stężenia są poniżej wartości dopuszczalnych. Pozostałe awarie, jak np. zwarcie zewnętrzne zacisków ogniw czy mechaniczne uszkodzenie powodujące zwarcie wewnętrzne, nie stanowią bezpośredniego zagrożenia zarówno dla ludzi, jak i dla samej maszyny. Badania laboratoryjne ogniw litowych potwierdziły tym samym możliwość ich bezpiecznego stosowania w atmosferach potencjalnie wybuchowych.

Literatura

- [1] BUDZYŃSKI, Z., POLNIK B.: *Badania laboratoryjne ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych w aspekcie możliwości ich stosowania w przestrzeniach potencjalnie zagrożonych wybuchem metanu i pyłu węglowego*. „Maszyny Górnicze” 1/2016.
- [2] BUDZYŃSKI Z., MRÓZ J., POLNIK B., SKUPIEŃ K.: *Badania wybranych ogniw litowych przeznaczonych do zastosowania w maszynach pracujących w przestrzeniach potencjalnie zagrożonych wybuchem*. XXII Sympozjum Naukowo-Techniczne: ELEKTROENERGETYKA I AUTOMATYKA W PRZEMYSŁE WYDOBYWCZYM – „SEMAG 2016”
- [3] POLNIK B.: *Bezpieczeństwo stosowania ogniw litowych w maszynach i urządzeniach górniczych, pracujących w przestrzeniach potencjalnie zagrożonych wybuchem*. XII Konferencja Naukowo-Techniczna: INNOWACYJNE MASZYNY I TECHNOLOGIE – BEZPIECZEŃSTWO I OPTYMALIZACJA KOSZTÓW WYDOBYCIA 2016.
- [4] PN-EN 60079-1:2014-1 Atmosfery wybuchowe. Część 1: Zabezpieczenia urządzeń za pomocą osłon ognioszczelnych „d”.

Bartosz Polnik – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

artykuł recenzowany