

Bezpośrednie testy zapalności wyładowań elektrostatycznych z powierzchni materiałów nieprzewodzących

mgr inż. Marcin Talarek
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Direct ignition tests of electrostatic discharges from non-conductive surfaces

Streszczenie:

W niniejszej pracy zaprezentowano eksperyment bezpośrednich testów zapalności wyładowań elektrostatycznych snopiastych. Badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem sondy zapłonowej opisanej w normie PN-EN 60079-32-2 wzbogaconej o układ pomiaru prądu wyładowania. Przeprowadzono 100 prób zapłonu mieszaniny wybuchowej. Zaobserwowano wpływ przebiegu prądu wyładowania na zdolność wyładowania do spowodowania inicjacji zapłonu. Wyniki eksperymentu zestawione na wykresie $I_{\text{peak}} = f(Q)$ wykazują pewną regularność, która została opisana „krzywą wybuchowości”.

Abstract:

Experiment of direct ignition test with brush discharges was presented in the paper. Tests were carried out with ignition probe according to the EN 60079-32-2 Standard with current measurement set-up. 100 trials of ignition were conducted in the experiment. Influence of the current waveform on the incendivity of discharges was observed. There is some regularity in results, summarized at the chart $I_{\text{peak}} = f(Q)$, which was described with “ignition curve”.

Słowa kluczowe: atmosfera wybuchowa, wyładowanie elektrostatyczne, Minimalna Energia Zapłonu

Keywords: explosive atmosphere, electrostatic discharge, Minimum Ignition Energy

1. Wprowadzenie

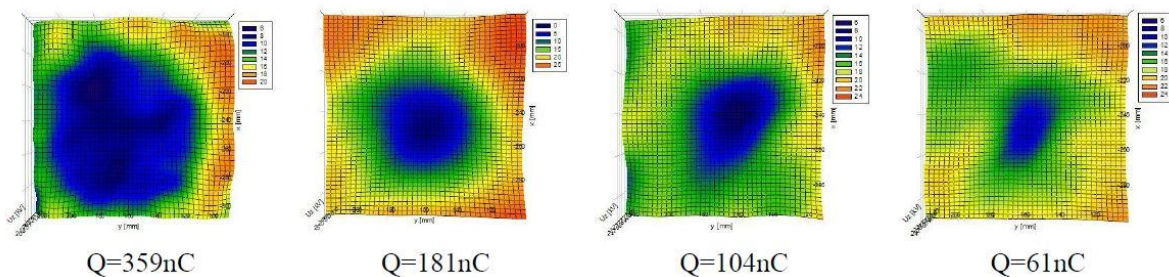
Wyładowanie elektrostatyczne to nagły i gwałtowny przepływ prądu między dwoma obiektami, mającymi różne potencjały elektryczne, występujący wskutek przekroczenia wytrzymałości dielektrycznej ośrodka, w którym zjawisko występuje. Wyładowania elektrostatyczne dzieli się na kilka rodzajów, które różnią się między sobą naturą fizyczną oraz zdolnością do spowodowania zapłonu [8]. Z punktu widzenia zagrożeń elektrostatycznych wyróżnić należy następujące rodzaje wyładowań: iskrowe, snopiaste, snopiaste rozprzestrzeniające się (Lichtenberga), ulotowe (koronowe) oraz stożkowe (Maurera). W niniejszej pracy skupiono uwagę na wyładowaniach snopiastych, które stanowią wyładowania z powierzchni materiałów nieprzewodzących, najczęściej występujące w praktyce. Fotografię wyładowania snopiastego pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Wyładowanie snopiaste [1]

Uwagę zwraca fakt, iż początkowo zwarty kanał prądowy ulega rozproszeniu, co determinuje przestrzenny i czasowy przebieg procesu uwolnienia do otoczenia pewnej ilości energii E , zwanej energią uwolnioną. Energia uwolniona w wyładowaniach elektrostatycznych snopiastych stanowi przedmiot zainteresowań badaczy od dziesięcioleci, jednak jak dotąd nie określono ścisłej formuły, która pozwalałaby obliczyć jej wartość. Na przestrzeni lat pojawiło się kilka interesujących koncepcji, podejmujących problem oszacowania energii uwolnionej [2, 3, 12], niemniej żadna z nich nie stanowi ścisłego rozwiązania problemu.

W związku z faktem, iż elektrony nie mogą poruszać się swobodnie w dielektryku, wyładowanie elektrostatyczne snopiaste nie spowoduje obniżenia potencjału powierzchniowego na całej powierzchni dielektryka do zera a jedynie lokalnie zostaje on obniżony. Owo lokalne obniżenie potencjału zwane jest „kraterem potencjału” [3]. Ładunek zostaje zebrany z pewnej ograniczonej powierzchni, co zostało zaprezentowane na rysunku 2, gdzie przedstawiono typowe rozkłady potencjału powierzchniowego na próbkach materiałów nieprzewodzących po wystąpieniu wyładowania snopiastego dla różnych wartości przeniesionego ładunku. Rozkład potencjału na próbce można wyznaczyć poprzez pozycjonowanie w kolejnych krokach sondy potencjału w wybranych punktach nad próbką. Więcej na ten temat można znaleźć w pracy [14].



Rys. 2. Rozkład potencjału powierzchniowego po wystąpieniu wyładowania elektrostatycznego snopiastego dla różnych wartości przeniesionego ładunku [17]

Przebieg wyładowania elektrostatycznego snopiastego jest bardzo gwałtowny i złożony, zaś rozkład potencjału powierzchniowego na próbce materiału nieprzewodzącego stanowi swego rodzaju ślad pozostawiony przez to zjawisko. Rozumienie zdolności do spowodowania zapłonu mieszaniny gazów oraz metody oceny zagrożenia wybuchem, związanego ze zjawiskiem wyładowania snopiastego, rozwijały się przez dziesięciolecia wraz z prowadzonymi badaniami i coraz lepszym poznaniem natury zjawiska.

Materiały nieprzewodzące, szeroko wykorzystywane w górnictwie, m. in. jako elementy składowe stosowanych urządzeń mechanicznych i elektrycznych, są podatne na gromadzenie się na ich powierzchniach ładunków elektrostatycznych wskutek różnych mechanizmów elektryzacji [6]. W praktyce najczęściej występującym mechanizmem elektryzacji jest tarcie. Naelektryzowany materiał nieprzewodzący stanowi potencjalne źródło zapłonu mieszaniny wybuchowej, występującej w jego otoczeniu. W podziemiach kopalń atmosferę wybuchową stanowią mieszaniny metanu z powietrzem oraz pyłu węglowego z powietrzem. Zdolność danej mieszaniny wybuchowej do spowodowania jej zapłonu charakteryzuje Minimalna Energia Zapłonu (MEZ) [8], która dla mieszaniny 8,3% metanu z powietrzem wynosi 0,28 mJ, zaś dla pyłu węgla kamiennego jest na poziomie kilkudziesięciu mJ. MEZ pyłu węglowego jest zatem praktycznie o dwa rzędy wielkości większa niż mieszaniny metanu z powietrzem, stąd oczywisty wniosek, iż mieszanina metanu z powietrzem jest znacznie bardziej podatna na spowodowanie jej zapłonu przez wyładowanie elektrostatyczne. Eksperymentalnie wykazano, że wyładowania snopiaste nie są zdolne do inicjacji wybuchu mieszanin pyłów [4, 5]. Mieszaniny pyłów mogą zostać zainicjowane przez wyładowania snopiaste rozprzestrzeniające się lub iskrowe.

2. Metody oceny zagrożeń elektrostatycznych

Rozwój i ewolucję metod badań zjawiska elektryczności statycznej w kontekście możliwości spowodowania wybuchu przedstawiono w pracy [11]. Po raz pierwszy zjawisko elektryczności statycznej zostało zidentyfikowane jako przyczyna wystąpienia wybuchu w latach 80-tych i 90-tych XIX-go wieku. Wówczas to wystąpiła seria wybuchów oparów benzyny w pralniach w Niemczech. M.M. Richter wykorzystując elektroskop wskazał, iż *silne wzbudzenie energii elektrycznej miało miejsce na ubraniach podczas ich czyszczenia*, co zostało przez niego wyjaśnione elektryzacją poprzez tarcie i wskazane jako przyczyna wystąpienia wybuchów. Od tego wydarzenia na przestrzeni kolejnych lat pojawiały się inne incydenty, niemniej na pierwsze opracowanie zawierające wskazówki praktyczne dotyczące zapobiegania zagrożeniom mogącym wystąpić wskutek zjawiska elektryczności statycznej przyszło czekać do 1937 roku [19]. Od tego czasu opracowano szereg norm i przewodników, zawierających praktyczne wskazówki zapobiegania zagrożeniom związanym ze zjawiskiem elektryczności statycznej. Obecnie, ocena możliwości bezpiecznego stosowania materiałów w podziemiach kopalń oparta jest o normy [16, 17].

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 80079-36:2016-07 [17], w sytuacji gdy powierzchnia rzutu materiału nieprzewodzącego w dowolnym kierunku przekracza $10\,000\text{ mm}^2$, należy wykonać następujące badania, celem oceny możliwości bezpiecznego stosowania materiału nieprzewodzącego w obecności mieszaniny metanu z powietrzem:

- rezystancji powierzchniowej, która nie powinna przekraczać $10^9\ \Omega$ (zmierzona w temperaturze 23°C i wilgotności względnej 50%) lub $10^{11}\ \Omega$ (zmierzona w temperaturze 23°C i wilgotności względnej 30%),

- przeniesionego ładunku, który nie powinien przekraczać 60 nC.

Należy podkreślić, że pozytywny wynik pomiaru rezystancji powierzchniowej wyklucza wystąpienie niebezpiecznych wyładowań snopiastych oraz snopiastych rozprzestrzeniających się, zaś pozytywny wynik badania przeniesionego ładunku wyklucza jedynie wystąpienie niebezpiecznych wyładowań snopiastych. Wyładowanie snopiaste rozprzestrzeniające się jest wyładowaniem snopiastym, które propaguje się na cienkiej warstwie dielektryka i jest widoczne w postaci jasno świecącego kanału plazmy. Wyładowanie takie może wystąpić w następujących przypadkach [8]:

- na powierzchni uziemionego podłoża metalowego znajduje się warstwa dielektryka o grubości do ok. 8 mm i wytrzymałości elektrycznej powyżej 4 kV lub ścianka urządzenia technologicznego, wykonanego z tworzywa izolacyjnego o określonej grubości i odpowiednio dużej wytrzymałości na przebicie,
- warstwa dielektryka ulega silnemu naelektryzowaniu, przy czym na obydwu jej stronach powstaje ładunek przeciwnego znaku o ekstremalnie dużej gęstości powierzchniowej.

Wykluczenie mechanizmów elektryzacji bardziej dynamicznych niż tarcie manualne, wyklucza możliwość wystąpienia wyładowań snopiastych rozprzestrzeniających się. Wówczas, możliwość bezpiecznego stosowania materiałów o rezystancji przekraczającej wartości dopuszczalne określone powyżej, może zostać zweryfikowana na podstawie badania przeniesionego ładunku.

Istotą badania jest zmierzenie ładunku przeniesionego w wyładowaniu z naelektryzowanej powierzchni próbki materiału badanego. Próbka elektryzowana jest poprzez pocieranie tkaniną bawełnianą, tkaniną z czystego poliamidu oraz elektryzację ulotową. Dla każdej z metod elektryzacji próbę wykonuje się 10-krotnie, zaś wynikiem końcowym jest największa zmierzona wartość przeniesionego ładunku. Norma PN-EN ISO 80079-36:2016-07 [17] przewiduje pomiar przeniesionego ładunku, Q w układzie z kondensatorem o znanej pojemności, C i woltomierzem o wysokiej impedancji wejściowej. Napięcie mierzone na kondensatorze, U_C pozwala wyznaczyć wartość przeniesionego ładunku ze wzoru (1):

$$Q = C \cdot U_C \quad (1)$$

Jak wspomniano wyżej, badany materiał może być bezpiecznie stosowany w przestrzeniach zagrożonych wybuchem mieszaniny metanu z powietrzem (grupa I), wówczas gdy wartość przeniesionego ładunku nie przekracza 60 nC.

Norma PN-EN 60079-32-2:2015-08 [18] dopuszcza również inne elektryczne metody pomiaru. Przeprowadzone badania międzylaboratoryjne wykazały istotne rozbieżności w wynikach uzyskanych z wykorzystaniem różnych metod pomiaru ładunku [13]. Warto w tym miejscu podkreślić, że w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG opracowano akustyczną metodę pomiaru ładunku przeniesionego [10], która pozwala wyznaczyć wartość przeniesionego ładunku z wykluczeniem wszelkich niedogodności związanych z elektrycznym pomiarem ładunku przeniesionego.

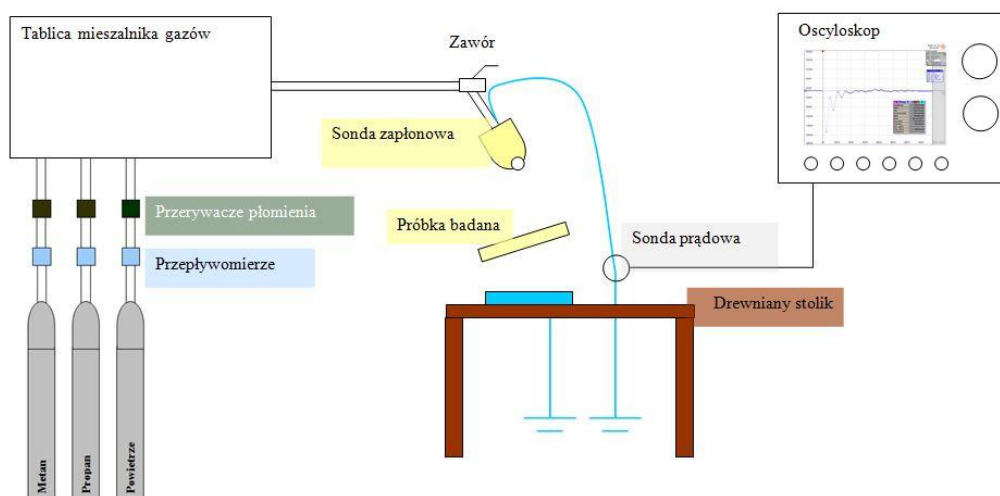
Norma PN-EN 60079-32-2:2015-08 [18] przewiduje również badanie możliwości spowodowania zapłonu przez wyładowanie elektrostatyczne poprzez bezpośrednią obserwację wystąpienia bądź nie inicjacji zapłonu z wykorzystaniem sondy zapłonowej. Metoda ta, zmodyfikowana i wzbogacona o pomiar prądu wyładowania elektrostatycznego,

została w niniejszej pracy wykorzystana do oceny zdolności do spowodowania zapłonu mieszaniny wybuchowej przez wyładowania snopiaste.

3. Badania bezpośrednie zapalności wyładowań snopiastych

3.1. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze składało się z następujących części: sondy zapłonowej (ang. ignition probe), instalacji mieszaniny gazów, zapewniającej doprowadzenie odpowiedniej mieszaniny do sondy zapłonowej, rejestratora wraz z sondą prądową oraz instalacji odprowadzania spalin. Na rysunku 3 w sposób schematyczny zaprezentowano stanowisko badawcze do bezpośrednich testów zapalności wyładowań.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego bezpośrednich testów zapalności wyładowań

Budowa sondy zapłonowej jest opisana w normie [18], widok sondy zastosowanej w eksperymencie zaprezentowano na rysunku 4.

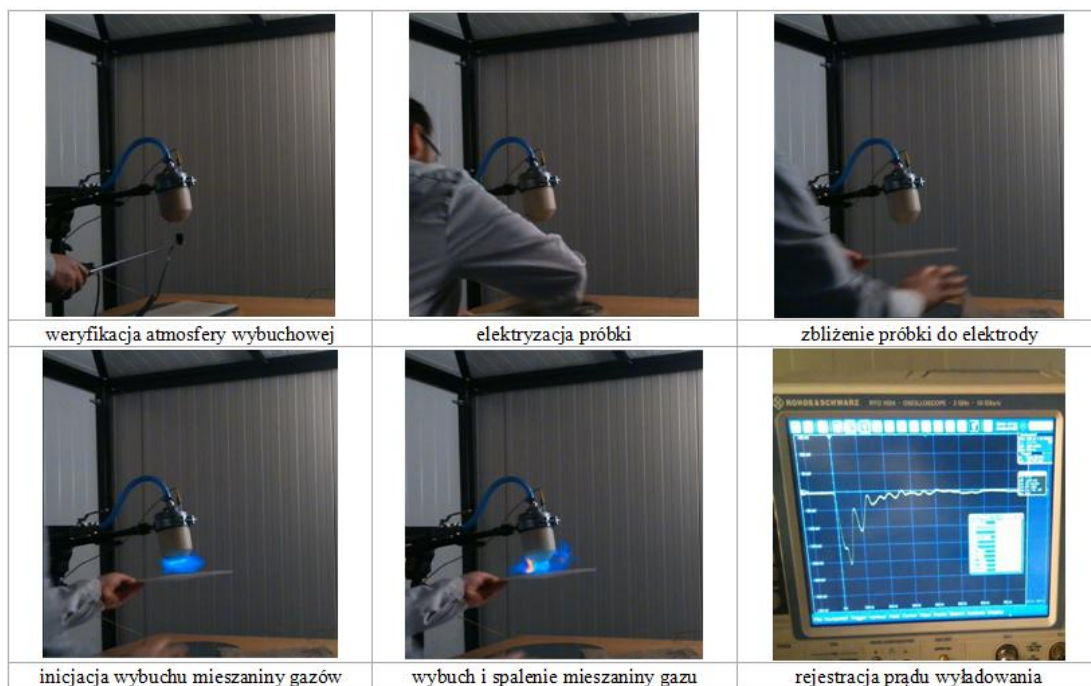


Rys.4. Widok sondy zapłonowej [fotografia własna]

Przedmiotem badań była próbka materiału nieprzewodzącego z polietylenu fluorowanego o wymiarach 300 mm x 200 mm i grubości 2 mm, wytypowana na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań [13].

3.2. Procedura realizacji badań

Procedura badawcza obejmowała następujące działania: weryfikację atmosfery wybuchowej, naelektryzowanie próbki poprzez pocierania szmatką z owczej wełny, zbliżenie naelektryzowanej próbki do elektrody sondy zapłonowej w celu inicjacji (bądź nie) wybuchu mieszaniny gazowej (w przypadku inicjacji zapłonu – zamknięcie zaworu i spalenie mieszaniny gazowej) oraz rejestrację przebiegu prądu wyładowania elektrostatycznego. Realizacja kolejnych etapów procedury badawczej została zaprezentowana na rysunku 5. Do sondy zapłonowej doprowadzono mieszaninę metanu z powietrzem oraz propanu z powietrzem, w proporcjach określonych w normie [18]. MEZ zastosowanych mieszanin wybuchowych wynosi odpowiednio: 0,28 mJ i 0,25 mJ. Przed przystąpieniem do badań próbka została oczyszczona alkoholem izopropylowym. Celem zapewnienia zadowalającej powtarzalności wykonywanych badań, wszystkie próby zostały przeprowadzone przez tę samą osobę w następujących warunkach środowiskowych: temperatura, $T = 20^{\circ}\text{C}$, wilgotność względna powietrza, $\text{RH} \sim 36\%$.

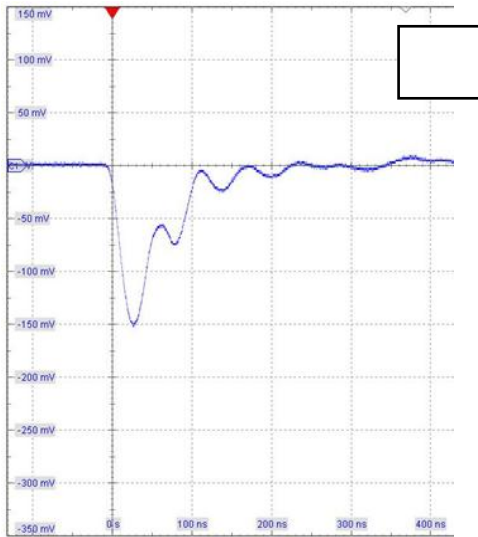


Rys. 5. Procedura realizacji badań [fotografia własna]

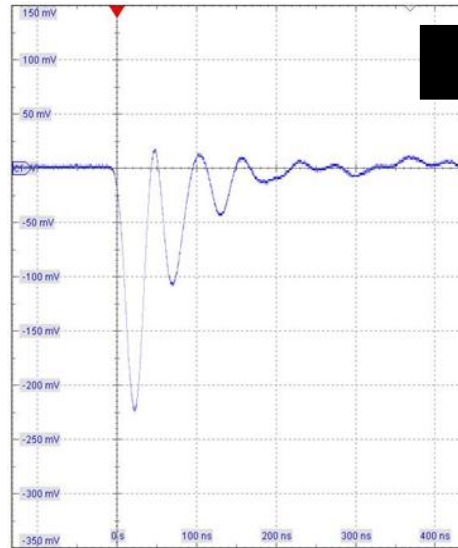
3.3. Wyniki eksperymentu

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano przypadki wyładowań elektrostatycznych, dla których ta sama wartość przeniesionego ładunku raz spowodowała inicjację zapłonu mieszaniny wybuchowej a raz nie. Stanowi to esencję prowadzonych w pracy rozważań. Przykładowe wyniki zestawiono na rysunkach 6 ÷ 8. Zaprezentowane na wykresach przebiegi stanowią zrzuty ekranu z oscyloskopu, pracującego z następującymi podziałkami: pionowa

0,5 A/działkę, pozioma 100 ns/działkę. Inicjację zapłonu oznaczono na rysunkach wypełnionym czarnym kwadratem, zaś brak inicjacji zapłonu kwadratem pustym.

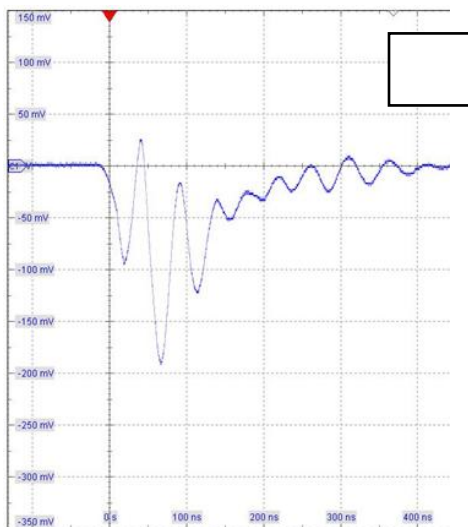


$$I_{\text{peak}} = 1,50\text{A}; Q = 96 \text{ nC}$$

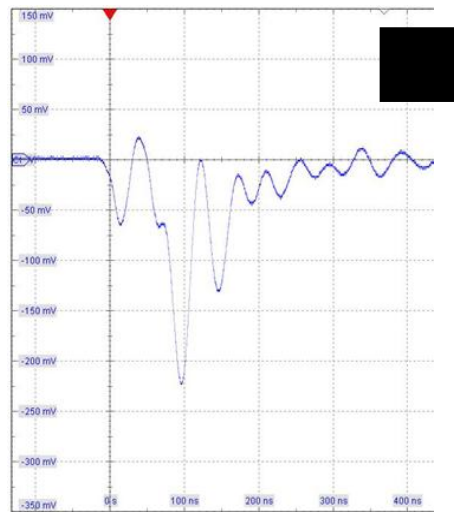


$$I_{\text{peak}} = 2,23\text{A}; Q = 90 \text{ nC}$$

Rys. 6. Zarejestrowany przebieg prądu wyładowania – przypadek 1

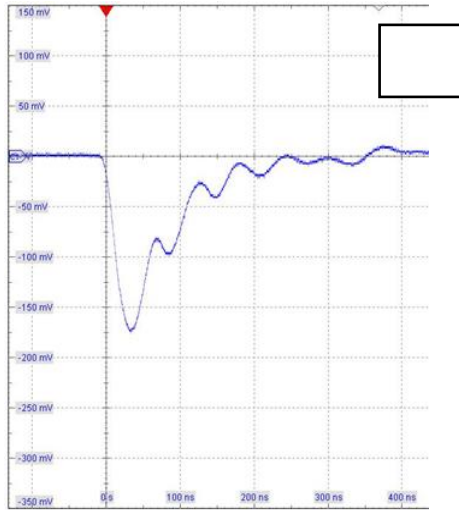


$$I_{\text{peak}} = 1,90\text{A}; Q = 145 \text{ nC}$$

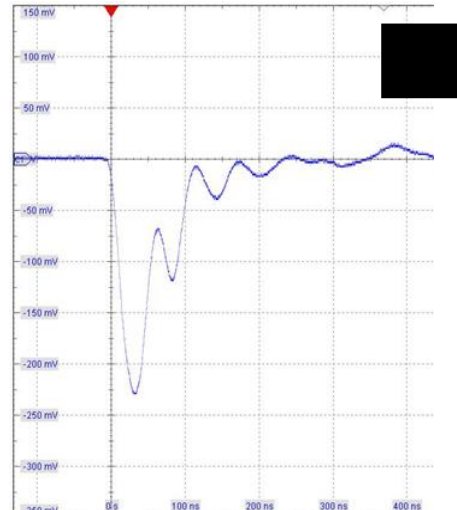


$$I_{\text{peak}} = 2,22\text{A}; Q = 147 \text{ nC}$$

Rys. 7. Zarejestrowany przebieg prądu wyładowania – przypadek 2



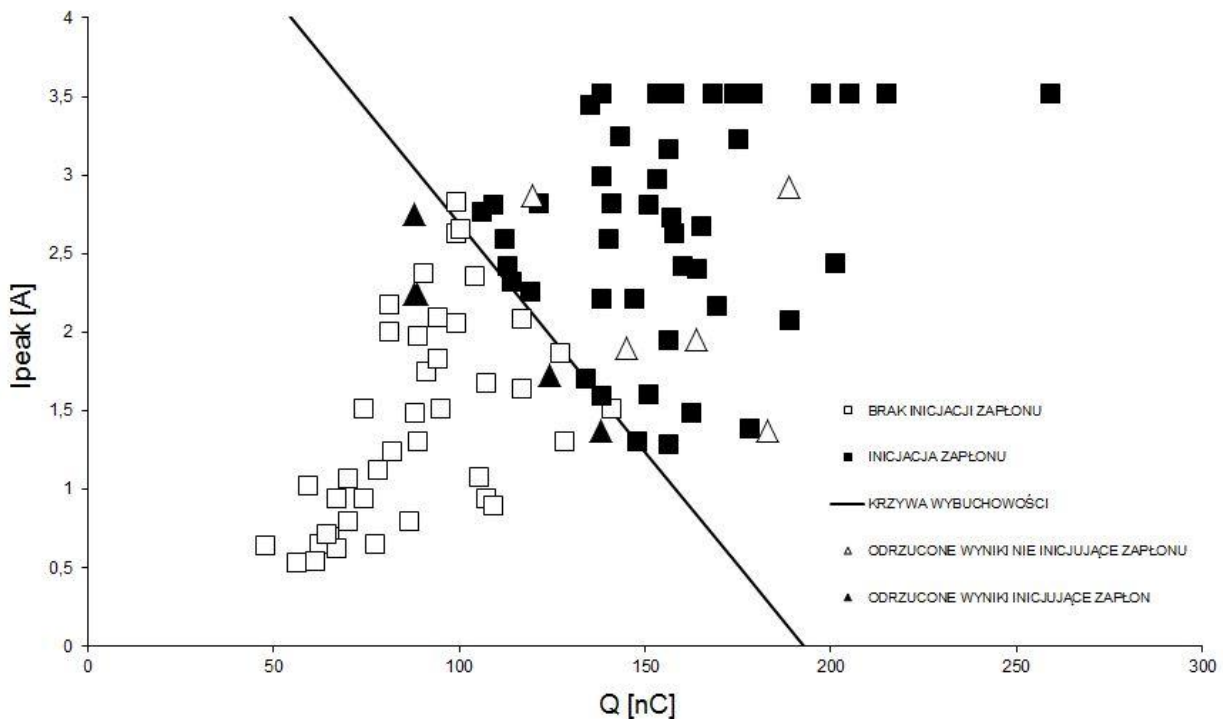
$I_{\text{peak}} = 1,61\text{A}; Q = 151\text{ nC}$



$I_{\text{peak}} = 2,35\text{A}; Q = 150\text{ nC}$

Rys. 8. Zarejestrowany przebieg prądu wyładowania – przypadek 3

Zestawienie wyników wszystkich prób zrealizowanych w eksperymencie na wykresie $I_{\text{peak}}=f(Q)$ pozwala zaobserwować pewną regularność (rys. 9). Regularność ta została opisana „krzywą wybuchowości” [15]. Krzywa wybuchowości dzieli populację wyników na wyniki, które znajdują się powyżej oraz te, które znajdują się poniżej krzywej. Wyniki znajdujące się powyżej krzywej powodują zapłon mieszaniny wybuchowej, zaś te poniżej krzywej wybuchowości nie powodują zapłonu. Stwierdzenie to jest prawdziwe dla populacji 90% wyników uzyskanych w eksperymencie (odrzucone wyniki zaznaczono na wykresie).



Rys. 9. Rezultaty bezpośrednich testów zapalności wyładowań [15]

4. Podsumowanie i wnioski

Wyładowania elektrostatyczne z powierzchni materiałów nieprzewodzących mogą stanowić źródło zapłonu mieszanin gazów oraz ich par. Stosowana powszechnie metoda badania przeniesionego ładunku [17] pozwala ocenić bezpieczeństwo stosowania w przestrzeniach zagrożonych wybuchem materiałów nieprzewodzących, poprzez pomiar wartości przeniesionego ładunku i porównanie go do kryterium dla danej grupy mieszanin wybuchowych. Dla zagrożeń występujących w górnictwie, tj. mieszaniny metanu z powietrzem, wartość dopuszczalna wynosi 60 nC. W pracy zrealizowano eksperyment bezpośrednich testów zapalności wyładowań z wykorzystaniem zmodyfikowanego układu pomiarowego sondy zapłonowej [18], wzbogaconego o pomiar przebiegu prądu wyładowania elektrostatycznego, celem obserwacji wpływu przebiegu prądu wyładowania na zdolność wyładowania do spowodowania zapłonu.

Zaobserwowano, iż ta sama wartość przeniesionego ładunku może raz spowodować zapłon mieszaniny wybuchowej, a raz nie (rys. 6÷8). Podobne obserwacje zostały opisane w pracy [7], w której jednak nie realizowano pomiaru przebiegu prądu wyładowania a jedynie mierzono wartość przeniesionego ładunku. Uzyskane w eksperymencie wyniki wskazują, iż zdolność wyładowania do spowodowania zapłonu jest ściśle związana z przebiegiem prądu w czasie. Dla prób zaprezentowanych na rys. 6÷8 zapłon mieszaniny wystąpił w przypadku, gdy wartość szczytowa prądu wyładowania była większa, co wskazuje na bardziej gwałtowny przebieg zjawiska.

W ramach eksperymentu wykonano 100 prób. Najmniejsza wartość przeniesionego ładunku, która spowodowała zapłon wyniosła 86 nC. Wynik ten jest w satysfakcjonującej zgodności z wynikami eksperymentu przeprowadzonego w Physikalisch-Technische Bundesanstalt z wykorzystaniem kulombomierza do pomiaru przeniesionego ładunku oraz stacjonarnej komory wybuchowej [9], gdzie najmniejsza wartość przeniesionego ładunku powodująca inicjację zapłonu wyniosła 93 nC. Największa wartość przeniesionego ładunku, która nie spowodowała inicjacji zapłonu wyniosła 189 nC.

Zestawienie wyników wszystkich prób, uzyskanych w eksperymencie bezpośrednich testów zapalności wyładowań na wykresie $I_{\text{peak}} = f(Q)$ pozwala zaobserwować pewną regularność: wyniki położone powyżej pewnej krzywej, zwanej „krzywą wybuchowości” z 90-procentowym prawdopodobieństwem spowodują inicjację zapłonu mieszaniny wybuchowej, zaś te położone poniżej nie. Zatem do pełnej oceny zdolności do spowodowania zapłonu mieszaniny wybuchowej przez wyładowanie snopiaste nie wystarczy sama informacja o wartości przeniesionego ładunku ale również o wartości szczytowej prądu wyładowania. W każdym razie uzyskane w eksperymencie wyniki oraz wyniki opisane w pracy [9] pozwalają skonkludować, że stosując dotychczasowe kryterium oceny zagrożeń, bazujące na wartości dopuszczalnej przeniesionego ładunku wynoszącej 60 nC dla mieszaniny metanu z powietrzem, zawsze będziemy po „bezpiecznej stronie”, zaś uzyskany rezultat można wykorzystać do wiarygodnej oceny zagrożeń związanych z wystąpieniem wyładowań elektrostatycznych snopiastych.

Literatura

- [1] Britton L. G.: Avoiding static ignition hazards in chemical operations, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, 1999

- [2] Crager J. C., Horenstein M. N.: Distributed parameter model for computing energy dissipation in brush-type electrostatic discharges, *Journal of Electrostatics* 63 (2005) 239–247
- [3] Davidson J. L., Williams T. J., Bailey A. G., Stevens R. P.: Discharge energy available to grounded spheres approaching charged ground-backed insulators, *Journal of Electrostatics* 59 (2003) 153–172
- [4] Glor M., Schwenzfeuer K.: Ignition tests with brush discharges, *Journal of Electrostatics* 51-52 (2001) 402-408
- [5] Glor M., Schwenzfeuer K.: Direct ignition tests with brush discharges, *Journal of Electrostatics* 63 (2005) 463–468
- [6] Grabarczyk Z., Kurczewska A.: Zagrożenia elektrostatyczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, Centralny Instytut Ochrony Pracy – PIB, Warszawa 2008
- [7] Holdstock P.: Does charge transfer correlate with ignition probability?, *Journal of Physics: Conference Series* 142 (2008) 01. 2009
- [8] Kowalski J. M.: Ochrona przed elektrycznością statyczną. Zasady prognozowania, oceny i likwidacji zagrożeń, Automatic Systems Engineering Sp. z o.o., 2015
- [9] Langer T., Mockel D., Beyer M.: Transferred charge of brush discharges in explosive atmospheres – A verification of the ignition threshold limits, *Journal of Electrostatics* 69 (2011) 200-205
- [10] Orzech Ł.: Akustyczna metoda badania pojedynczych wyładowań elektrostatycznych, praca doktorska, AGH Kraków, 2014
- [11] Pidoll U., Helmut Krämer memorial lecture: Electrostatic assessment of products and processes - A view backwards and forwards, *Journal of Electrostatics* 71 (2013) 586-590
- [12] Tabata Y., Masuda S.: Minimum Potential of Charged Insulator to Cause Incendiary Discharges, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-20, No. 5, September/October 1984
- [13] Talarek M., Orzech Ł.: Results of an interlaboratory comparison on the measuring of transferred charge, *Proceedings of the 12th European Conference on Electrostatics*, Electrostatics 2013
- [14] Talarek M., Kacprzyk R.: Charge transferred in brush discharges, *Journal of Physics: Conference Series* 646 (2015) 012022
- [15] Talarek M., Kacprzyk R.: Direct ignition tests of brush discharges for explosive methane-air and propane-air gas mixtures, *Journal of Electrostatics* 88 (2017) 165-170
- [16] PN-EN 60079-0:2013-03 Atmosfery wybuchowe. Część 0: Urządzenia. Podstawowe wymagania
- [17] PN-EN ISO 80079-36:2016-07 Atmosfery wybuchowe. Część 36: Urządzenia nieelektryczne do atmosfer wybuchowych. Metodyka i wymagania
- [18] PN-EN 60079-32-2:2015-08 Atmosfery wybuchowe. Część 32-2: Zagrożenia elektrostatyczne. Badania
- [19] Static Electricity, National Safety Council Inc., Chicago, 1937, Safe practices pamphlet No. 52. (autor opracowania nieznany)