

Krzysztof Cybulski\*, Bronisław M. Wiechula\*

## ELEKTRYZACJA JAKO ŹRÓDŁO ZAGROŻENIA

### Streszczenie

W artykule przedstawiono problemy związane z elektryzacją i jej skutkami. Pomiar ładunku na naelektryzowanym materiale umożliwia określenie początku wystąpienia wyładowania oraz ocenę prawdopodobieństwa zapłonu otaczającej atmosfery wybuchowej. Naelektryzowany nieprzewodzący materiał niemetalowy na swojej powierzchni wytwarza nadmiarowy ładunek, który może stać się efektywnym źródłem iskrowych wyładowań elektrostatycznych.

### Electrification as source of risk

### Abstract

The article presents problems connected with electrification and its effects. Measurement of charge on electrified material enables to more or less accurately assess and predict the beginning of discharge process and to assess the probability of inflammation of the surrounding explosive atmosphere. Electrified non-conductive and non-metallic material produces on its surface excess charge, which may become an effective source of spark electrostatic discharge.

## 1. WPROWADZENIE

Zasady bezpieczeństwa w atmosferze zagrożonej wybuchem w odniesieniu do elektryzacji materiałów sformułowano w ostatnich trzydziestu latach, opierając się na kryterium rezystancyjnym, które jest zawarte w kilkunastu Normach Europejskich. Kryterium to Główny Instytut Górnictwa stosuje jako podstawę do oceny bezpieczeństwa od elektryczności statycznej. Elektryczność statyczna często jest określana jako „niewidzialny wróg” procesu technologicznego. Obecnie w procesach technologicznych o dużej szybkości, są stosowane elementy wykonywane z nieprzewodzących materiałów niemetalowych, które są bardziej podatne na elektryzację, np. opakowania foliowe. Powoduje to wzrost elektryczności statycznej, skutkujący wyładowaniami zapalającymi, stratami produkcyjnymi, marnotrawstwem materiałów i ostatecznie utratą zysków. Nieprzewodzące materiały niemetalowe (np. zbiorniki paliwa, rurociągi paliwowe, kontenery elastyczne, kompozyty powłokowe na podłożu metalowym i opakowania foliowe) są coraz częściej stosowane w przemyśle w obecności substancji palnych, takich jak gazy, pary i pyły.

Lepsze zrozumienie procesu elektryzacji może prowadzić do minimalizacji ryzyka związanego z elektrostatycznymi wyładowaniami zwanymi dalej ESD:

- W obecności atmosfery zagrożonej wybuchem należy określić prawdopodobieństwo wystąpienia wyładowania zapalającego i ryzyka z tym związanego. Materiał niemetalowy nie będzie stwarzał zagrożenia wybuchem, jeżeli badanie laboratoryj-

\* Główny Instytut Górnictwa – Kopalnia Doświadczalna „Barbara”

ne potwierdzi jego właściwości antyelektrostatyczne. Właściwości elektrostatyczne tworzyw sztucznych bez modyfikacji strukturalnej uniemożliwiają ich bezpieczne użytkowanie w atmosferze potencjalnie wybuchowej. Modyfikacja taka polega na „ingerencji” w wewnętrzną strukturę materiału. Gromadzenie się nadmiarowego ładunku elektrostatycznego na nieprzewodzących wyrobach niemetalowych może zakłócić produkcję przemysłową i stać się efektywnym źródłem zapalenia (Glor 2009), nie tylko w normalnych warunkach, ale w najmniej prawdopodobnych sytuacjach awaryjnych.

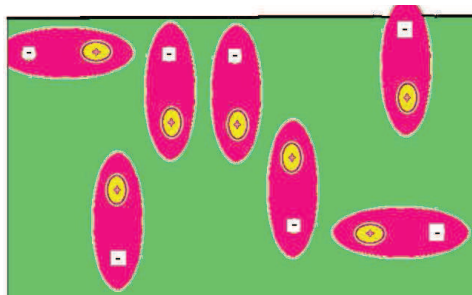
- Urządzenia wrażliwe na wyładowania elektrostatyczne ESD mogą zostać trwale uszkodzone w wyniku działania nadmiernego prądu. W tym przypadku właściwości materiału i jego budowa atomowa są nierozdzielnie połączone. Początek wyładowania jest związany z wytrzymałością elektryczną otaczającej atmosfery gazowej i z właściwościami dielektrycznymi materiału. Charakter procesu ESD zależy przede wszystkim od rozkładu pola elektrostatycznego wymaganego do rozpoczęcia samodzielnego wyładowania. Jest to jednak tylko wytrzymałość na przebicie w obecności jednorodnego pola.

**Jaki jest związek między nadmiarowym ładunkiem przekazany przez ESD z naelektryzowanego nieprzewodzącego materiału niemetalowego i elektrostatycznym polem w warunkach wymaganych do rozpoczęcia wyładowania?**

Należy sobie uświadomić, że przyczyną elektryzacji są elektrony i protony, tworzące pojedyncze atomy i pojedyncze cząsteczki. Budowa materiału nie jest wyłączona spod działania czynników wywołujących elektryzację, choć oczywiście pełne naelektryzowanie materiału objawia się po zakończeniu oddziaływania czynnika ją wywołującego. Jednak już w trakcie elektryzacji, właściwe odczytanie przyczyn jej powstania, umożliwia zrozumienie fizycznego oddziaływania materiału na materiał.

Elektryzacja charakteryzuje się:

- pojawieniem się w materiale ładunku, który powstał wskutek przemieszczenia się elektronów,
- przemieszczeniem się elektronów w momencie wykonania pracy  $W$ , która wywołuje polaryzację  $P$  cząstek (rys. 1),
- ilością ładunku ujemnego równą co do wartości bezwzględnej ładunkowi dodatniemu.



**Rys. 1.** Ustawienie spolaryzowanych cząstek materiału

**Fig. 1.** Setting the polarized particles of the material

Częściową odpowiedź na pytanie: jakie są przyczyny elektryzacji, może przynieść badanie krytycznych parametrów określających początek wyładowania z naelektryzowanej powierzchni materiału.

## 2. PODSTAWOWE POJĘCIA I DEFINICJE

**Adhezja** (łac. *adhesio* – przyleganie) – łączenie się ze sobą powierzchniowych warstw stykających się materiałów.

**Antystatyczny materiał niemetalowy** – materiał przewodzący lub rozpraszający, na którym nie odkłada się nadmiarowy ładunek elektrostatyczny, gdy znajduje się on w kontakcie z ziemią.

UWAGA: Słowo to jest powszechnie używane do opisu rodzaju obuwia lub kompozycji antystatycznego ciekłego.

**Dekohezja** – zerwanie warstw stykających się materiałów.

**Dielektryk – izolator** – materiał, w którym wskutek niskiej ruchliwości ładunku jest słabo przewodzący prąd elektryczny.

**Ekwipotencjalizacja** – elektryczne połączenie eksponowanych części metalowych (także używanych do kontroli ESD) tak, że mają one to samo napięcie w warunkach normalnych i awaryjnych.

**Elektryzacja przez wpływ** – zjawisko przemieszczania się ładunku elektrycznego (elektronów, które mają większą swobodę w strukturze nieprzewodzących materiałów niemetalowych) w obrębie materiału pod wpływem innego naelektryzowanego materiału.

**Energia zapłonu** – najmniejsza energia elektryczna wyładowania iskrowego wymagana do zapalenia gazowej atmosfery wybuchowej.

**ESD** (ang. *electrostatic discharge*) – **wyładowanie elektrostatyczne** – nagły przepływ prądu elektrycznego przepływającego między dwoma elementami o różnych potencjałach elektrycznych (IEC 61340-1-2).

**Iskiernik** – podzespół zbudowany z dwóch elektrod iskrowych przedzielonych izolatorem gazowym. Po włączeniu napięcia z generatora i przekroczeniu wartości zapłonu, rezystancja między elektrodami gwałtownie maleje i zaczyna się przewodzenie prądu, np. w postaci wyładowania iskrowego.

**Kohezja** – zjawisko stawiania oporu przez stykające się materiały podczas rozrywania, skręcania lub zgniatania.

**Ładunek elektryczny  $Q$  (nC)** – jedna z pierwotnych wielkości fizycznych. Jeżeli wartość ładunku  $Q$  przenoszonego z naelektryzowanego nieprzewodzącego materiału niemetalowego nie przekracza 10 nC, to nie stwarza on zagrożenia w atmosferze wybuchowej.

**Materiał hydrofilowy** – materiał wodolubny skłonny do łączenia się z wodą.

**Materiał higroskopijny** – materiał podatny na wchłanianie wilgoci.

**Materiał niemetalowy** – materiał polimerowy pochodzenia sztucznego (tworzywa polimerowe syntetyczne lub zmodyfikowane) czy naturalnego (ceramiczne, drewno).

**Mieszanina hybrydowa** – mieszanina substancji palnych z powietrzem w różnych stanach skupienia.

**Nanowarstwa** (adhezyjna) – wierzchnia warstwa materiału o grubości od 1 do 10 nm (1 nm [nanometr] =  $10^{-9}$  m).

**Nieprzewodzący materiał niemetalowy** – materiał, na którym akumuluje się nadmiarowy ładunek elektrostatyczny, o rezystancji powierzchniowej i skrośnej przekraczającej  $10^9 \Omega$ , który łatwo nie ulega rozproszeniu nawet wtedy, kiedy ma zapewniony kontakt z ziemią (np. tworzywa sztuczne).

**Polaryzacja dielektryka** (również: polaryzacja dielektryczna) – zjawisko polegające na utworzeniu dipoli elektrycznych, będących źródłem wewnętrznego pola elektrycznego.

**Prawo Gaussa** – prawo wiążące pole elektryczne z ładunkiem elektrycznym.

**Przenikalność elektryczna** (oznaczana grecką literą  $\epsilon$ ) – wielkość fizyczna charakteryzująca właściwości elektryczne materiału.

**Przewodzący materiał niemetalowy** – materiał niezdolny do odkładania nadmiarowego ładunku elektrostatycznego w przypadku jego kontaktu z ziemią, a mający rezystancję powierzchniową  $R_S$  i skrośną  $R_V$  równą  $10^6 \Omega$  lub niższą (rezystancja poniżej zakresu pozwalającego rozpraszać prądy i unikać szoku elektrycznego).

**Rezystancja powierzchniowa  $R_S$  ( $\Omega$ )** – rezystancja między dwoma elektrodami kontaktującymi się z powierzchnią materiału.

**Rezystancja skrośna  $R_V$  ( $\Omega$ )** – rezystancja między dwoma elektrodami kontaktującymi się przez materiał na wskroś.

**Rozpraszające wyładowanie snopiaste** – wyładowanie na naelektryzowanej powierzchni nieprzewodzącego materiału niemetalowego z wysoką gęstością ładunku o przeciwnej polaryzacji na dwu powierzchniach.

**Rozpraszający materiał niemetalowy (elektrostatycznie rozpraszający)** – materiał niezdolny do odkładania nadmiarowego ładunku elektrostatycznego w przypadku jego kontaktu z ziemią, a mający rezystancję powierzchniową  $R_S$  i skrośną  $R_V$  wyższą niż  $10^6 \Omega$  i równą  $10^9 \Omega$  lub niższą, mierzone w temperaturze otoczenia i 50% wilgotności względnej.

**Szereg tryboelektryczny** – zestawienie materiałów pod względem biegunowości i wielkości ładunku wytwarzanego w trakcie elektryzacji kontaktowo-tarciowej materiałów.

**Tryboelektryzacja** – generowanie ładunku elektrostatycznego na dwu materiałach pocieranych wzajemnie.

**Wyładowanie iskrowe** – przenoszenie ładunku między ciałami o różnych potencjałach, wywołane w kierunku kontaktu lub indukowane przez pole elektrostatyczne.

**Wyładowanie koronowe** – wyładowanie, którego lokalne pole elektryczne przy ostrej powierzchni jest bardzo wysokie i powyżej wytrzymałości na przebicie (3 MV/m).

**Wyładowanie snopiaste** – wyładowanie z naelektryzowanego nieprzewodzącego materiału niemetalowego do zbliżającego się uziemionego materiału przewodzącego.

**Wytrzymałość elektryczna  $E$  (V/m)** – największa wartość natężenia pola elektrycznego, jaka może wystąpić w dielektryku (izolatorze) bez wywołania wyładowania iskrowego.

### 3. ELEKTRYZACJA MATERIAŁÓW

#### 3.1. Zjawiska adhezyjno-dekohezyjne

W wyniku wzajemnego kontaktu dwóch różnych nanowarstw materiałów niemetalowych tworzy się styk powierzchniowy. Na powierzchni nanowarstw materiału niemetalowego występuje pole sił, które powoduje przyciąganie, czyli adhezję. Adhezja jest tym silniejsza, im silniejsze jest oddziaływanie elektrostatyczne i elektrodynamiczne między powierzchniami stykających się ze sobą materiałów. Wiąże się to ściśle z budową materiału niemetalowego, w tym jego powierzchni. Rozróżnia się kontakt materiałów statyczny i/lub dynamiczny (przemieszczanie względem siebie).

Jeżeli powierzchnie materiałów kontaktujących byłyby idealnie gładkie, to występowałby jedynie opór sił adhezji. Przy kontakcie idealnie gładkich powierzchni, rzeczywista powierzchnia styku byłaby równa nominalnej powierzchni styku. Siły adhezji, czyli siły działające na powierzchni ciała, są to te same siły, które działają we wnętrzu materiału. We wnętrzu materiału spełniają one funkcję spajającą elementy struktury atomowej w jedną całość, czyli są to siły spójności, zwane również siłami kohezji. Te same siły na powierzchni materiału pełnią funkcję sił adhezji.

Rzeczywista powierzchnia styku ma wiele nierówności i dlatego linia styku między powierzchniami jest niewielka. Dynamiczny kontakt rzeczywistych powierzchni dwu materiałów mających mnóstwo nierówności, napotyka na opór sił adhezji oraz opór wskutek przemieszczania się względem siebie nierówności obu kontaktujących powierzchni. Może wywoływać odkształcenia sprężyste lub plastyczne, bruzdowanie, ścinanie nierówności, powstanie rys itp. Addytywność sił adhezji powoduje zwiększanie się powierzchni styku oraz szepienia adhezyjnego.

Stacyjny kontakt w trakcie odrywania w postaci sił dekohezji napotyka na opór sił kohezji. Jednoczesny kontakt statyczny i dynamiczny materiałów w trakcie elektryzacji napotyka na opór sił adhezji.

#### 3.2. Tryboelektryzacja

Tryboelektryzacja, czyli elektryzacja materiałów w wyniku tarcia i/lub kontaktu, obejmuje grupę złożonych zagadnień nie do końca wyjaśnionych, związanych z występowaniem zjawisk między dwoma materiałami, które są trudne do kontroli nawet w warunkach eksperymentalnych.

Tryboelektryzacja występuje w warunkach zetknięcia się czy zbliżenia i następującego po nim rozdzielenia dwóch nienaelektryzowanych materiałów, przy czym mogą to być: dwa ciała stałe, ciało stałe i ciecz, ciało stałe i gaz, ciecz i gaz bądź ciecze. Złączone nienaelektryzowane materiały po rozdzieleniu się są naelektryzowane

i w konsekwencji między nimi powstaje pole elektryczne. Jest to efekt tworzenia się podwójnej warstwy ładunku na granicy kontaktu dwóch materiałów o różnej pracy wyjścia elektronów. Wykonywana praca ma na celu pokonanie przyciągania między przeciwnymi ładunkami i w konsekwencji wytworzenie różnicy potencjałów między materiałami, która wzrasta liniowo z odległością zgodnie ze wzorem

$$U_{AB} = \frac{W_{A \rightarrow B}}{q} = \int_A^B \vec{E} d\vec{l} \quad (1)$$

Napięcie elektryczne  $U_{AB}$  jest to stosunek pracy  $W$  wykonanej podczas przeniesienia ładunku elektrycznego między punktami A i B, dla których określa się napięcie, do wartości ładunku  $q$ . Czynniki wywołujące elektryzację są nośnikami ładunku transportowanego w czasie i przestrzeni. Nośnikami takimi mogą być zarówno jony (dziury), jak i elektrony. Wynika stąd, że napięcie między punktami A i B może być dodatnie, ujemne, a w szczególnych przypadkach – równe zero.

Ładunek generowany po tryboelektryzacji i związane z nim pole elektryczne wywołują w wielu przypadkach efekt elektretowy na nieprzewodzących materiałach niemetalowych. Realne powierzchnie są zwykle szorstkie i taka elektryzacja jest wzmacniana, jeżeli kontakt i rozdzielanie wywoływane tarciem i/lub naciskiem, od obszaru prawdziwego kontaktu, jest powiększany przez te działania. Ścisły obszar kontaktu może być całkiem różny od obszaru wydającego się być obszarem kontaktu.

Duża liczba czynników wpływających na proces tryboelektryzacji, jest często trudna do zidentyfikowania, znacznie ogranicza możliwość praktycznego wykorzystania tzw. szeregów tryboelektrycznych. W tych szeregach zestawia się materiały w kolejności określonej znakiem i wartością ładunku uzyskiwanego po tryboelektryzacji materiałów. W przypadku nieprzewodzących materiałów niemetalowych występuje zależność ich położenia w szeregu od przenikalności elektrycznej. W trakcie tryboelektryzacji materiał o większej przenikalności elektrycznej nabywa ładunek dodatni, a o mniejszej – ujemny. Chociaż wymieniona wyżej zależność, sformułowana przez Coehna (za: Simorod, Starob 1970), pozwala na prawidłowe umiejscowienie w szeregu niektórych nieprzewodzących materiałów niemetalowych, to jednak ze względu na wymienione wcześniej inne czynniki, nie może być uważana za ścisłą regułę, ze względu na to, że:

- przepływ ładunku z materiału elektryzującego na materiał elektryzowany nie jest powtarzalny,
- ładunek nie jest rozłożony równomiernie na powierzchniach trących; w dowolnych częściach powierzchni mogą być zgromadzone ładunki o różnej wartości i różnej biegunowości,
- niejednorodność powierzchni kontaktujących i trących, nawet jeżeli są to dwie próbki tego samego nieprzewodzącego materiału niemetalowego, ułatwia przejście ładunku z jednej powierzchni na drugą o dowolnej wartości,
- stan powierzchni ma duży wpływ na wartość ładunku; ten sam materiał może zajmować w szeregu tryboelektrycznym różne miejsca w zależności od stanu powierzchni.

### 3.3. Elektryzacja przez wpływ

Elektryzacja przez wpływ nieprzewodzącego materiału niemetalowego polega na jego czasowym umiejscowieniu w polu elektrostatycznym i wytwarzaniu nadmiarowego ładunku elektrycznego wskutek polaryzacji. Pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego, w cząstkach nieprzewodzącego materiału niemetalowego, następuje przesunięcie powłoki elektronowej względem dodatniego jądra atomu. Na jednej powierzchni nieprzewodzącego materiału niemetalowego gromadzi się ładunek dodatni, a na drugiej ujemny.

Jeżeli w obszar pola elektrycznego wprowadzi się izolowany, elektrycznie obojętny przewodzący materiał, to po zaniku pola, materiał wykazuje cechy materiału naelektryzowanego, w którym jedna część ma nadmiar ładunku dodatniego, a druga ładunku ujemnego. Oddziaływanie pola elektrycznego na ładunek elektryczny znajdujący się w przewodzącym materiale, prowadzi do przesunięcia ładunku w jego objętości. Izolowany przewodzący materiał umieszczony w polu elektrycznym jest dipolem elektrycznym i wykazuje stan naelektryzowania dopóty, dopóki znajduje się w polu elektrycznym (Buhler i in. 2009). Jeżeli przewodzący materiał jest izolowany od ziemi i naelektryzowany, to dostępny ładunek może wywołać wyładowanie elektrostatyczne. Wyładowanie do uziemionego ciała człowieka poruszającego się blisko odizolowanego naelektryzowanego przewodzącego materiału może być niebezpieczne. Jeżeli przewodzący materiał jest uziemiony, to nadmiarowy ładunek jest skutecznie odprowadzany do ziemi.

## 4. ELIMINOWANIE ZAGROŻEŃ OD ELEKTRYCZNOŚCI STATYCZNEJ

Powszechnie wiadomo, że elektryzacja ciała człowieka może m.in. wywoływać zagrożenia wybuchem lub błędy w funkcjonowaniu czułych urządzeń elektronicznych lub w trakcie prowadzenia robót strzałowych. W celu zapewnienia skutecznej ochrony przed elektrycznością statyczną należy zastosować takie rozwiązania technologiczne, które skutecznie minimalizują prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożeń. Podstawowe sposoby eliminowania zagrożeń od elektryczności statycznej opisano poniżej.

### 4.1. „Nieelektryzujący się” nieprzewodzący element niemetalowy

Test wyładowania zapalającego umożliwia ocenę zagrożenia wybuchem wywołanego naelektryzowaniem nieprzewodzącego materiału niemetalowego z prawdopodobieństwem większym od zera. Test wyładowań zapalających jest wykonywany we wnętrzu komory wybuchowej wypełnionej gazową atmosferą wybuchową, w której źródłem zapłonu jest para elektrod iskrowych zasilanych ładunkiem zbieranym elektrodą kulową z naelektryzowanego nieprzewodzącego materiału niemetalowego. Naelektryzowany nieprzewodzący materiał niemetalowy może gromadzić niebezpieczny nadmiarowy ładunek elektrostatyczny.

## 4.2. Uziemienie

Pierwszą i podstawową linią obrony przed zagrożeniem zapłonem elektrostatycznym, jest zapewnienie niezawodnego uziemienia elektrostatycznego przez rezystancję równą  $10^6 \Omega$  lub mniejszą. Uziemienie i ekwipotencjalizacja są stosowane jako wspólna metoda świadomego eliminowania ewentualnego wyładowania elektrostatycznego. Skuteczność uziemienia jako elementu ochrony przed elektrycznością statyczną omówiono na przykładzie użytkowania rur elektrostatycznie przewodzących, przeznaczonych do transportu metanu w podziemnych wyrobiskach górniczych. Przepływ mieszaniny metan-powietrze-pył przez rury może generować nadmiarowy ładunek elektrostatyczny. W celu zmniejszenia prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożeń w trakcie eksploatacji rurociągu należy zapewnić:

- Przejściowe gromadzenie i odprowadzanie ładunku z każdego odcinka rury. Kumulacja ładunku może powodować wystąpienie wyładowania elektrostatycznego między poszczególnymi odcinkami rur, we wnętrzu których może być ciągle obecna metanowa atmosfera wybuchowa. W celu zapobieżenia niebezpieczeństwu zapłonu elektrostatycznego metanowej atmosfery wybuchowej, wszystkie odcinki rur wchodzące w skład wyposażenia rurociągu muszą mieć zapewnione indywidualne skuteczne uziemienie w celu wyeliminowania zagrożenia zapłonem elektrostatycznym (Fast i in. 2009).
- Ograniczenie niebezpieczeństwa zapłonu wskutek wyładowania elektrostatycznego w rurociągu transportującym mieszaninę hybrydową substancji palnych. Pył zwykle o wysokiej przewodności jest podatny na gromadzenie się ładunku, który jest równocześnie generowany na powłoce wewnętrznej rury. Naelektryzowany pył stwarza ryzyko zapłonu w wyniku wyładowania elektrostatycznego w trakcie transportu. Ekwipotencjalizacja wszystkich odcinków rur powoduje, że odcinki są na tym samym potencjale z ziemią, wskutek czego nie może dojść do wyładowań iskrowych.

## 4.3. Podłoga

Elektryzacji ciała człowieka zapobiega antystatyczna podłoga, która wraz z odpowiednią odzieżą i obuwiem skutecznie eliminuje gromadzenie się nadmiarowego ładunku. Obecnie kontrola właściwości elektrostatycznych podłogi lub wykładziny podłogowej jest wykorzystywana w wielu dziedzinach przemysłu w celu zapobieżenia gromadzeniu się nadmiarowego ładunku na ciele człowieka. Metody oceny właściwości elektrostatycznych wykładzin podłogowych i posadzek polegają głównie na pomiarze rezystancji względem instalacji uziemienia, rezystancji powierzchniowej oraz rezystancji pionowej (Hidenori, Ohsawa, Tabata 2003). Pomiar tych trzech parametrów rezystancyjnych jest bardzo prosty, ale dotyczy jedynie podłogi o jednorodnej strukturze. W przypadku podłóg o niejednorodnej strukturze może wystąpić miejscowa przypadkowa elektryzacja bez możliwości natychmiastowego odprowadzenia nadmiarowego ładunku elektrostatycznego.

Podłogi w biurach nie wymagają elektryzacji tak niskiej, jak w przemyśle, ale często wymaga się, aby czas półzaniku ładunku był mniejszy niż sekunda, co zmniej-



sza elektryzację ciała człowieka podczas chodzenia. Wykładzina antystatyczna to taka wykładzina, której właściwości elektrostatyczne zostały przetestowane przy wilgotności względnej powietrza wynoszącej 12%. Przymiotnik antystatyczny określa każdy środek i efekt ochrony elektrostatycznej materiału: przewodzący, rozpraszający i nieelektryzujący się w określonych warunkach. Większość ludzi nie odczuwa elektryzacji poniżej 3500 woltów, np. wyładowanie z palca przy wysiadaniu z samochodu, chodzenie po wykładzinie, dotknięcie uziemionego elementu metalowego, np. zaworu wodociągowego. Takie wyładowanie może także nastąpić na obszarze ucha, w miejscu, w którym czułość jest znacznie większa.

Tymczasowym rozwiązaniem może być zwilżanie powierzchni podłogi płynem antystatyzującym; to zabezpieczenie nie jest jednak trwałe i musi być powtarzane co kilka miesięcy. Najlepszą podłogą jest taka, która ma trwałe właściwości elektrostatyczne rozpraszające. Oznacza to, że podłoga jest wykonana z antyelektrostatycznych materiałów niemetalowych i sprzyja natychmiastowemu odprowadzaniu ładunku z ciała człowieka przez obuwie.

#### 4.4. Środki ochrony indywidualnej

##### OBUWIE

Podeszwa obuwia powinna ograniczać elektryzację ciała człowieka. Obuwie z podeszwą wykonaną ze skóry stwarza mniejsze zagrożenie od elektryczności statycznej niż buty z podeszwami niemetalowymi (np. gumowymi). Test chodzenia po przewodzącej wykładzinie przewodzącym obuwiem, powoduje, że na ciele człowieka utrzymuje się ładunek poniżej 10 nC. Większość obuwia używanego w podziemnych wyrobiskach górniczych ma elektrostatyczne właściwości rozpraszające, które sprzyjają odprowadzaniu nadmiarowego ładunku elektrostatycznego pod warunkiem wyposażenia górnika w środki ochrony indywidualnej o właściwościach antyelektrostatycznych.

##### ODZIEŻ

**Czy naelektryzowane ciało górnika może spowodować zapalenie metanowej atmosfery wybuchowej i wpłynąć na bezpieczeństwo w podziemnych wyrobiskach górniczych?** Prawdopodobieństwo takiego zagrożenia jest bardzo wysokie. Odzież górnika nie powinna generować ładunku elektrostatycznego na jego ciele w trakcie użytkowania w podziemnych wyrobiskach górniczych. Odzież „bawełniana” używana przez górników, która jest wykonana z tkanin nieprzewodzących, może powodować gromadzenie się nadmiarowego ładunku na ciele górnika. Dotyczy to także obuwia, którego podeszwa ma elektrostatyczne właściwości nieprzewodzące (Wu i in. 2003). Jednym ze sposobów ograniczania elektryzacji odzieży jest wyposażenie górnika w obuwie o właściwościach antyelektrostatycznych.

## 5. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA WŁAŚCIWOŚCI ELEKTROSTATYCZNE MATERIAŁÓW

Wpływ na właściwości elektrostatyczne materiału niemetalowego mają następujące czynniki:

- rodzaj materiału,
- efekt baterii,
- wilgotność względna powietrza.

### Rodzaj materiału

Niektóre materiały łatwiej ulegają naelektryzowaniu niż inne. Na przykład polipropylen gromadzi ładunek znacznie szybciej niż szkło. W nieprzewodzącym materiale niemetalowym niepoddanym oddziaływaniu zewnętrznego pola elektrycznego rozkład elektronów wokół jądra izolowanego atomu jest symetryczny. Środek ciężkości ładunków ujemnych pokrywa się ze środkiem ciężkości jądra, w którym są skupione ładunki dodatnie. Atom taki jest elektrycznie obojętny, gdyż na zewnątrz atomu pole elektryczne wytwarzane przez ładunki dodatnie i ujemne wchodzące w skład jądra znoszą się. Nieprzewodzący materiał niemetalowy nie ma ładunku swobodnego.

### Efekt baterii

Połączenie wielu naelektryzowanych elementów może prowadzić do generowania skrajnie wysokiego ładunku. Na przykład pojedyncze arkusze tworzywa sztucznego o względnie niskim ładunku powierzchniowym mogą wytwarzać ekstremalnie wysokie napięcie w przypadku, gdy są składowane razem.

### Wilgotność względna powietrza

Im bardziej suche środowisko, tym wyższy poziom nadmiarowego ładunku elektrostatycznego i odwrotnie, im wyższa wilgotność, tym mniejszy ładunek elektrostatyczny. Materiały higroskopijne muszą być hydrofilowe, ale oprócz tego mają zdolność wchłaniania dużych ilości wilgoci. Woda może pochodzić z pary wodnej znajdującej się w powietrzu, z rosy osadzającej się na powierzchni substancji itp. Pochłanianie występuje wtedy, gdy woda przenika z miejsca kontaktu z materiałem higroskopijnym do jego wnętrza.

### Zmiana temperatury

Materiał w miarę chłodzenia wykazuje tendencję do wytwarzania ładunku elektrycznego. Proces chłodzenia ma na celu rozproszanie ładunku w całej objętości materiału.

## PARAMETRY REZYSTANCYJNE

Najważniejszymi parametrami charakteryzującymi właściwości elektrostatyczne są parametry rezystancyjne, tj. rezystancja powierzchniowa i skrośna. Parametry rezystancyjne są podstawowymi parametrami nieprzewodzących materiałów niemetalowych, niezbędnymi do oceny ich przydatności do użytkowania w miejscach narażonych na elektryzację. Wartości rezystancji powierzchniowej i skrośnej wyznacza się na podstawie pomiarów wykonywanych z wykorzystaniem miernika rezystancji.

Pomiary prądu przepływającego przez badaną próbkę są obarczone błędami. Na dokładność pomiarów parametrów rezystancyjnych nieprzewodzących materiałów niemetalowych wpływają:

- Struktura powierzchniowo-objętościowa materiału. Mechanizm transportu ładunku elektrycznego w nieprzewodzących materiałach niemetalowych jest złożony i zależy od rodzaju materiału, ładunku przestrzennego, wielkości oddziałującego pola elektrycznego (Pandey, Kieres, Noras 2009). Prąd upływowy  $I_U$  w wyniku wysokiej rezystancji nieprzewodzącego materiału niemetalowego, wytwarza w nim straty, które w całości zmieniają się w ciepło.
- Rodzaj elektrod i ich położenie. W trakcie włączania napięcia zasilania między elektrodami badany materiał ulega naelektryzowaniu i może zgromadzić się na nim ładunek, co powoduje błędy w pomiarach. Ewolucja ładunku w obszarze między elektrodą a powierzchnią nieprzewodzącego materiału niemetalowego jest bardzo niejednorodna. Oddziaływanie pola elektrycznego w elementach składowych elektrod wywołuje miejscową elektryzację nieprzewodzącego materiału niemetalowego. Wyłączenie źródła pola, czyli zakończenie elektryzacji przez wpływ, powoduje miejscową elektryzację nieprzewodzącego materiału niemetalowego.
- Warunki temperaturowo-wilgotnościowe. Wpływają na transport nośników ładunku przez interfazę między elektrodą i nieprzewodzącym materiałem niemetalowym. Zewnętrzne nanowarstwy powierzchniowe nieprzewodzącego materiału niemetalowego, wskutek kontaktu z otaczającym powietrzem, mogą nieznacznie różnić się właściwościami elektrostatycznymi od kolejnych nanowarstw. Jest to spowodowane oddziaływaniem warunków temperaturowo-wilgotnościowych na zewnętrzne nanowarstwy. Warunki te mogą mieć wpływ na pomiar wartości rezystancji powierzchniowej nieprzewodzącego materiału niemetalowego.

## 6. ZAGROŻENIA WYWOŁANE ELEKTRYZACJĄ

Zagrożenia elektrycznością statyczną wynikają z bezpośredniego oddziaływania zewnętrznego pola elektrycznego wytwarzanego wskutek elektryzacji obiektów lub pośredniego oddziaływania własnego pola elektrycznego będącego źródłem wyładowań elektrostatycznych.

### 6.1. Zakłócenia procesów technologicznych

Silne pola elektrostatyczne mogą powodować zakłócenia w działaniu aparatury kontrolno-pomiarowej, komputerów oraz wszelkich urządzeń elektronicznych zawierających elementy półprzewodnikowe. Wyładowania elektrostatyczne mogą wywoływać uszkodzenia elementów półprzewodnikowych.

### 6.2. Zagrożenia pożarowo-wybuchowe

Požary i wybuchy mogą być wywoływane przez wyładowania elektrostatyczne powstałe wskutek gromadzenia się nadmiarowego ładunku elektrostatycznego towarzyszącego różnym operacjom technologicznym w różnych miejscach podziemnych wyro-

bisk górniczych. Mimo że często trudno jest znaleźć prawdziwe źródło zapłonu lub wybuchu, bardzo ważne jest przeprowadzenie wnikliwej analizy, w celu określenia najbardziej prawdopodobnego źródła zapłonu i zastosowanie odpowiednich środków prewencyjnych. W wielu przypadkach źródła zapłonu często są przypisywane elektryczności statycznej, jedynie z powodu braku symptomów jakiegokolwiek innego wiarygodnego źródła. Nieprzewodzące materiały niemetalowe mają zdolność do gromadzenia nadmiarowego ładunku elektrostatycznego i jego akumulacji przez dłuższy czas, mimo zaniku czynnika wywołującego elektryzację. Elektryzacja nieprzewodzącego materiału niemetalowego może być przypadkowa, np. w czasie przygotowywania próbek, wskutek czyszczenia, jak również podczas wykonywania pomiarów parametrów rezystancyjnych z jego użyciem lub może wystąpić w trakcie procesu technologicznego.

Nieprzewodzące materiały niemetalowe stanowią grupę materiałów wykorzystywanych do wytwarzania wyrobów przeznaczonych do użytkowania w różnych gałęziach przemysłu. Są one używane w procesach technologicznych, jednak w trakcie użytkowania w różny sposób mogą być narażone na elektryzację. Nieprzewodzące elementy niemetalowe powinny gwarantować odpowiednią odporność na zmienne oddziaływanie środowiska w zakresie ochrony przed elektrycznością statyczną.

Elektryczność statyczna może stać się potencjalnym źródłem zapłonu metanu i/lub pyłu węglowego, który występuje w podziemnych wyrobiskach górniczych.

### 6.3. Wyładowania elektrostatyczne

Naelektryzowane nieprzewodzące materiały niemetalowe mogą być efektywnym źródłem zapłonu substancji palnych (gazy, pary lub pyły). Takimi wyrobami są np. niemetalowe zbiorniki paliwa, rurociągi do transportu metanu, elastyczne kontenery, kompozyty powłokowe naniesione na odizolowane podłoże metalowe, opakowania foliowe. Mogą one powodować zapłon przez wyładowanie elektrostatyczne (ESD). Elektryzacja może również powodować uszkodzenia w obwodach urządzeń elektronicznych. Wyładowania elektrostatyczne mogą trwale uszkodzić urządzenia. Lepsze ich poznanie daje możliwość minimalizacji ryzyka ESD i optymalizacji warunków użytkowania w wielu środowiskach przemysłowych.

#### **Jaki jest związek między ładunkiem przekazany przez ESD z naelektryzowanego nieprzewodzącego materiału niemetalowego i warunkiem wytrzymałości dielektrycznej wymaganym do rozpoczęcia wyładowania?**

Częściowej odpowiedzi na to pytanie można szukać w krytycznych parametrach określających początek wyładowania z naelektryzowanej powierzchni wskutek nagłego i chwilowego przepływu prądu elektrycznego między dwoma elementami o różnych potencjałach elektrycznych, spowodowanego przez pole elektrostatyczne lub bezpośredni kontakt. Do dalszych rozważań przyjęto, że pole elektryczne nad naelektryzowanym nieprzewodzącym materiałem niemetalowym jest przestrzennie jednorodne. Takie założenie umożliwia przestrzenne przedstawienie rozkładu pola elektrostatycznego i determinacji wyładowań elektrostatycznych ESD. Przeniesienie ładunku ocenia się przez pomiar ładunku  $Q$  zgromadzonego na naelektryzowanym nieprzewodzącym materiale niemetalowym.

Zależnie od środowiska, ESD stwarzają różne zagrożenia. Tylko niektóre jednak mogą powodować zapalenia pyłowej atmosfery wybuchowej, nawet w optymalnych warunkach. Istnieje sześć rodzajów ESD:

- koronowe,
- iskrowe,
- snopiaste,
- rozpraszające snopiaste,
- jako błyskawica,
- wyładowania z warstw pyłu.

Powszechnie uważa się, że wyładowania koronowe i snopiaste nie mogą zapalić pyłu. Wyładowania z/lub do izolatorów, rury lub chmury pyłu, są to wyładowania snopiaste; w sprzyjających warunkach na izolatorach może dojść do rozprzestrzeniających wyładowań snopiastych, które mogą zapalić pył (Buhler i in. 2006).

Spośród sześciu rodzajów elektrostatycznych wyładowań, rozprzestrzeniające wyładowanie snopiaste jest najbardziej niebezpieczne i jest w stanie spowodować zapłon. Rozprzestrzeniające wyładowanie snopiaste powstaje wtedy, kiedy gęstość ładunku na nieprzewodzącym materiale niemetalowym przekracza  $2,7 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$ .

Przeniesienie ładunku  $Q$  między nieprzewodzącym materiałem niemetalowym a elektrodą metalową może wywoływać następujące rodzaje wyładowań:

- 1) wyładowanie koronowe między elektrodą pod napięciem i elektryzowaną próbką nieprzewodzącego materiału niemetalowego,
- 2) wyładowanie snopiaste między elektrodą pod napięciem i elektryzowaną próbką nieprzewodzącego materiału niemetalowego,
- 3) wyładowanie snopiaste między uziemioną elektrodą metalową i naelektryzowaną próbką nieprzewodzącego materiału niemetalowego,
- 4) rozprzestrzeniające wyładowanie snopiaste między uziemioną elektrodą metalową i naelektryzowaną próbką nieprzewodzącego materiału niemetalowego,
- 5) wyładowanie iskrowe między naelektryzowaną elektrodą metalową i uziemioną elektrodą metalową.

### **Symulacja wyładowań z naelektryzowanego nieprzewodzącego materiału niemetalowego**

W przypadku, gdy nieprzewodzący materiał niemetalowy jest naelektryzowany, w rozkładzie pola na jego powierzchni można wyróżnić trzy odrębne obszary (Buhler i in. 2009):

- pierwszy, w którym niejednorodny rozkład jest funkcją odległości zbliżającej się uziemionej elektrody metalowej,
- drugi, w którym niejednorodny rozkład jest funkcją wymiarów geometrycznych uziemionej elektrody metalowej; wzrost w tym obszarze zależy od rozmiaru metalowej elektrody i szczeliny powietrznej; ogólnie rzecz biorąc, większy zakres zaburza rozkład pola mniej niż mniejszej elektrody i powoduje powstanie prawie jednorodnego pola,
- trzeci, w którym jednorodny rozkład jest w szczelinie powietrznej tworzącej tzw. region zerowy opisany prawem Gaussa.

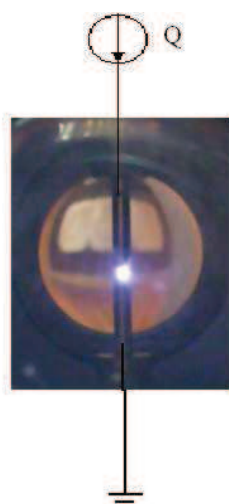
### Zanik ładunku

Zanikowi ładunku towarzyszy energia  $W$  wyładowań elektrostatycznych. Energia wyładowań elektrostatycznych z odizolowanego od ziemi naelektryzowanego przewodzącego materiału niemetalowego jest praktycznie równa energii naelektryzowania, a z powierzchni naelektryzowanego nieprzewodzącego materiału niemetalowego – stanowi tylko część energii naelektryzowania. Przy dużych wartościach ładunku elektrostatycznego, jeżeli uziemiony przedmiot metalowy znajdzie się w pobliżu naelektryzowanego nieprzewodzącego materiału niemetalowego, może dojść do niezupełnego wyładowania elektrostatycznego – snopiastego lub rozprzestrzeniającego snopiastego, oraz zupełnego – iskrowego. Wyładowania snopiaste i rozprzestrzeniające wyładowania snopiaste są to wyładowania występujące między naelektryzowanym nieprzewodzącym materiałem niemetalowym i uziemioną elektrodą metalową, które powstają w warunkach silnie niejednorodnego pola elektrycznego (Davidson, Williams, Bailey 2002). Dalsze zwiększanie przestrzeni, w której występuje natężenie pola o wartości krytycznej, prowadzi do powstania międzyelektrodowego wyładowania iskrowego.

Między dwoma obiektami z nieprzewodzących materiałów niemetalowych przy ich rozdzielaniu, rozdrobnieniu itp. występują wyładowania bezelektrodowe. Wyładowania tego rodzaju powstają na przykład podczas: odwijania folii z bębna, ślizgania się taśm przenośników po wałkach z materiałów dielektrycznych czy strzepywanie filtrów workowych.

Nieprzewodzące materiały niemetalowe o parametrach rezystancyjnych powyżej  $10^9 \Omega$  (przy wilgotności poniżej 30%, w temperaturze otoczenia około  $23^\circ\text{C}$ ) mogą gromadzić nadmiarowy ładunek elektrostatyczny (Walmsley 2011). Czas zaniku ładunku z naelektryzowanej powierzchni zależy od parametrów rezystancyjnych materiału. Zbliżenie nieprzewodzącego materiału niemetalowego do naelektryzowanej niezawodnie uziemionej elektrody kulowej wywołuje jego rozładowanie wskutek uwolnienia maksymalnego ładunku. Jego wielkość jest zróżnicowana i wynosi od kilku nanokulombów do wartości przekraczających znacznie milikulomby. Nadmiarowy ładunek może prowadzić do różnego rodzaju wyładowań – iskrowych, snopiastych i rozprzestrzeniających snopiastych. Wszystkie one mogą być efektywnym źródłem zapłonu atmosfery potencjalnie wybuchowej.

**Wyładowanie iskrowe** (fot. 1) ma postać jaskrawo świecącego kanału plazmowego (lub wielu małych kanalików) przenoszącego wysokiej gęstości prąd, przy małym spadku napięcia elektrycznego. Wyładowanie jest bardzo szybkie i może być słyszane jako trzask. Wyładowania iskrowe mogą wystąpić w wyniku naelektryzowania elektrycznie izolowanych przewodzących elementów urządzenia lub naelektryzowania personelu, albo nagromadzenia naelektryzowanego proszku o niskiej rezystywności. Warunkiem koniecznym do wytworzenia pola jest wystąpienie różnicy potencjałów między przewodnikami. Wytrzymałość elektryczna otaczającej atmosfery zależy od kształtu obydwu przewodników i odległości między nimi. Prąd przepływający w wyładowaniu iskrowym jest ograniczony tylko przez impedancję w zewnętrznym obwodzie. W większości przypadków, właściwie cała zgromadzona energia elektrostatyczna, jest rozpraszana w wyładowaniu iskrowym.



Fot. 1. Międzyelektrodowe wyładowanie iskrowe  
Phot. 1. Intererectrodeal spark discharge

Używanie nieprzewodzących materiałów niemetalowych może powodować brak uziemienia elementów metalowych instalacji przemysłowej lub innych obiektów przewodzących. Przewodniki znajdujące się blisko naelektryzowanych materiałów mogą ulegać naelektryzowaniu przez wpływ, rozdzielanie ładunku lub przez zbieranie rozpylonego ładunku albo naelektryzowanych cząstek. Zgromadzona przez nie duża ilość energii może być magazynowana przez długi czas. Większość tej energii ostatecznie uwalnia się jako wyładowanie zapalające. Zapalające wyładowania iskrowe mogą być szacowane przez porównywanie energii  $W$ , zgromadzonej na naelektryzowanym elemencie z energią zapłonu  $E_z$  atmosfery potencjalnie wybuchowej. Z tego powodu – co jest ważne – powinno unikać się występowania izolowanych przewodników. Przewodzące elementy niemetalowe powinny być ekwipotencjalizowane i elektrostatycznie uziemione (Udoetok, Nguyena 2011).

**Wyładowanie snopiaste** to rodzaj wyładowania elektrycznego zachodzącego w powietrzu, które powstaje wskutek jonizacji udarowej w pobliżu elektrody ulotowej. Wyładowanie to przyjmuje postać pęczka świetlistych smug sprawiających wrażenie swobodnie spływających z ostrza. Zjawisko to jest pośrednim efektem między wyładowaniem koronowym a iskrowym wyładowaniem elektrostatycznym. Wyładowania snopiaste występują, gdy naelektryzowaną przewodzącą elektrodę wprowadza się w pobliże nieprzewodzącego materiału niemetalowego. Elektroda wytwarza niejednorodne pole elektryczne i miejscowo podnosi je do wartości powyżej wytrzymałości dielektrycznej powietrza, a tym samym umożliwia powstanie wyładowania snopiastego. Nazwa wyładowania snopiastego pochodzi od jego kształtu, jak to widać na fotografii 2.



**Fot. 2.** Wyładowanie snopiaste z naelektryzowanej metalowej elektrody ostrzowej do nieprzewodzącego materiału niemetalowego

**Photo. 2.** Brush discharge from electrified metal blade electrode to non-conducting non-metallic material

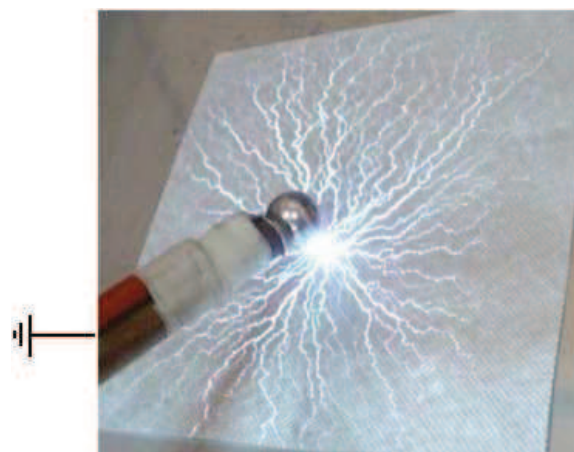
Wyładowania snopiaste nie przebiegają po całej powierzchni między elektrodą, lecz urywają się w powietrzu. Wokół elektrody powietrze staje się silnie zjonizowane i w jej pobliżu natężenie pola elektromagnetycznego jest bardzo duże. Powstanie tego rodzaju wyładowań zależy m.in. od napięcia, biegunowości oraz kształtu i długości ostrza. Elektronów zagęszczonych na ostrzu elektrody wzajemnie wypychają się na zewnątrz.

#### **Rozprzestrzeniające wyładowania snopiaste**

Rozprzestrzeniające wyładowanie snopiaste jest wysokoenergetycznym typem wyładowania elektrostatycznego. Może ono wystąpić na naelektryzowanej nieprzewodzącej folii niemetalowej, jeżeli jest w bliskim kontakcie z uziemioną metalową elektrodą. Wizualnie takie wyładowania mają często wiele kanałów wylotowych pełzających po powierzchni naelektryzowanego materiału. Rozprzestrzeniające wyładowanie snopiaste z naelektryzowanej próbki wielowarstwowego materiału o wymiarach (250 × 200) mm przedstawiono na fotografii 3. Elektryzowanym wielowarstwowym materiałem był wkład filtracyjny, którego jedna z powłok zewnętrznych była metalizowana i osadzona na warstwie nieprzewodzącego materiału niemetalowego. Badany materiał miał być stosowany jako układ filtracyjny w pyłowej atmosferze wybuchowej, w miejscu, gdzie powietrze ma być oczyszczane z pyłów palnych.

Przykładem występowania rozprzestrzeniających wyładowań snopiastych może być wnętrze rur na wykładzinie izolacyjnej w trakcie pneumatycznego transportu proszku (Pandey, Kieres, Noras 2009). Rury z tworzyw sztucznych z wbudowanymi spiralami metalowymi są często używane do transportu pneumatycznego. W celu zagwarantowania bezpieczeństwa rury z wbudowanymi spiralami nie powinny być stosowane do transportu pneumatycznego palnych proszków, chyba że materiał niemetalowy jest elektrostatycznie rozpraszający lub przewodzący.





**Fot. 3.** Rozprzestrzeniające wyładowanie snopiaste na naelektryzowanym materiale wskutek zbliżenia uziemionej metalowej elektrody

**Photo. 3.** Propagating brush discharge on electrified material induced by the approximation of earthed metal electrode

Jeśli przyjąć, że tylko niewielka część ładunku na powierzchni jest zaangażowana w rozprzestrzeniającym wyładowaniu snopiastym, to ładunek na naelektryzowanej powierzchni pozostaje praktycznie bez zmian po wyładowaniu. Rozproszona energia może być łatwo obliczona jako iloczyn przeniesionego ładunku i potencjału powierzchni.

#### 6.4. Elektryzacja ciała człowieka

W miejscach, w których występuje elektryzacja, wytwarza się pole elektrostatyczne o natężeniu rzędu 10–100 kV/m, które niekorzystnie oddziałuje na ciało człowieka. Izolowane przewodzące elementy niemetalowe znajdujące się w tym polu oraz układy technologiczne mogą być źródłem porażenia elektrycznego człowieka, gdy dotknie on naelektryzowanych przedmiotów. Skutki tych porażań są takie same jak przy rażeniach krótkotrwałymi jednokierunkowymi impulsami prądu stałego. Ładunek elektrostatyczny może powstawać na ciele człowieka w czasie chodzenia, zdejmowania odzieży, albo wykonywania czynności domowych lub zawodowych. Wyładowania elektrostatyczne z naelektryzowanego ciała człowieka mogą wystąpić w trakcie przypadkowego dotknięcia uziemionego elementu metalowego. Ciało człowieka może gromadzić ładunki elektryczne, jeśli jest odpowiednio odizolowane od ziemi, np. przez nieprzewodzące obuwie lub podłogę (Greason 2003). Elektryzacja ciała człowieka może również nastąpić przez wpływ.

Pojemność elektryczna  $C_C$  ciała człowieka zależy od odległości między ciałem a uziemionymi przedmiotami i podłożem. Przy grubości podeszwy buta 5–10 mm pojemność  $C_C$  wynosi zwykle od około 70 do 250 pF. Do oceny przyjmuje się średnią wartość pojemności człowieka  $C_{Csr} = 200$  pF. Maksymalny ładunek występujący na ciele ludzkim może osiągać wartość co najmniej kilkuset nanokulombów.

Prawdopodobieństwo wystąpienia elektrostatycznych wyładowań w wyniku zbliżenia naelektryzowanego ciała człowieka do uziemionego przewodzącego materiału niemetalowego jest prawie zawsze większe od zera. Prawdopodobieństwo wystąpienia ESD z różnych konfiguracji materiałowych może mieć duży wpływ na obecność zagrożeń od elektryczności statycznej w przypadku zbliżania naelektryzowanego ciała człowieka do systemu elektronicznego.

Ogólnie rzecz biorąc, wielkość energii  $W$  rozładowania jest większa w przypadku, gdy przewodzący materiał niemetalowy jest uziemiony. Dla danej konfiguracji naelektryzowane ciało człowieka – uziemiony przewodzący materiał niemetalowy, energia  $W$  wyładowania jest proporcjonalna do wartości ładunku zgromadzonego na naelektryzowanym ciele człowieka.

Wyładowanie występuje, gdy dwa ciała zbliżają się do siebie i pole elektryczne między nimi przekracza wartość krytyczną wytrzymałości dielektrycznej powietrza, tzn. około  $30 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ .

Obuwie używane przez górników jest ważnym środkiem ochrony indywidualnej służącym zapewnieniu bezpieczeństwa w atmosferach potencjalnie wybuchowych. Dla zapewnienia ochrony przed elektrycznością statyczną górnik powinien być wyposażony w obuwie, którego podeszwa jest wykonana z materiału niemetalowego o rezystancji skrośnej, której wartość nie przekracza  $10^9 \Omega$ . Ten warunek zapewnia podczas chodzenia po posadzce, o właściwościach co najmniej rozpraszających, odprowadzanie nadmiarowego ładunku elektrostatycznego z ciała górnika.

## 7. WNIOSKI

W niniejszym artykule opisano typowe odmiany elektryzacji oraz zjawiska, które mogą je wywoływać.

Naelektryzowany nieprzewodzący materiał niemetalowy jest źródłem emisji pola elektrostatycznego, które może stać się źródłem elektrostatycznych wyładowań wskutek przypadkowego zetknięcia z uziemionym przewodnikiem.

Analizie poddano także skutki zbliżania uziemionego elementu metalowego do naelektryzowanego nieprzewodzącego materiału niemetalowego. Sytuacja taka jest często spotykana w warunkach przemysłowych i jest ważna przy ocenie potencjalnych zagrożeń związanych z wyładowaniami elektrostatycznymi.

Dalsze prace w zakresie ochrony przed elektrycznością statyczną powinny być poświęcone m.in. monitorowaniu fali wyładowań, aby wyeliminować możliwość wystąpienia wyładowań wielokrotnych.

### Literatura

1. Buhler C., Calle C., Clements J.S., Ritz M., Starnes J. (2006): Test methodology to evaluate the safety of materials using spark incendivity. 2005 EOS/ESD Symposium, 27th Annual International Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium. Journal of Electrostatics Vol. 64, Issue 11, s. 744–751.
2. Buhler C., Calle C., Clements J.S., Trigwell S., Ritz M. (2009): New techniques to evaluate the incendivity of insulators. 11th International Conference on Electrostatics. Journal of Electrostatics Vol. 67, Issues 2–3, s. 285–290.

3. Davidson J.L., Williams T.J., Bailey A.G. (2002): Electrostatic discharges between charged insulators and grounded spheres. *Journal of Electrostatics* Vol. 56, Issue 1, s. 29–42.
4. Fast L., Paasi J., Smallwood J., Karlson I. (2009): Induction charging risk assessment: Charged board alike discharges to metal and human body. 11th International Conference on Electrostatics. *Journal of Electrostatics* Vol. 67, Issues 2–3, s. 263–266.
5. Glor M. (2009): Ignition source static electricity: Incident investigation. 11th International Conference on Electrostatics. *Journal of Electrostatics* Vol. 67, Issues 2–3, s. 242–246.
6. Greason W.D. (2003): Electrostatic discharge characteristics for the human body and circuit packs. 2002 EOS/ESD Symposium. *Journal of Electrostatics* Vol. 59, Issues 3–4, s. 285–300.
7. Hidenori O., Ohsawa A., Tabata Y. (2003): New method for evaluating antistatic effect in floor coverings. *Journal of Electrostatics* Vol. 57, Issues 3–4, s. 355–362.
8. IEC 61340-1-2 Ed 1: Electrostatics – Part 1-2: Definitions of all parts of the electrostatics-2series 61340-x-y.
9. Pandey A., Kieres J., Noras M.A. (2009): Verification of non-contacting surface electric potential measurement model using contacting electrostatic voltmeter. 11th International Conference on Electrostatics. *Journal of Electrostatics* Vol. 67, Issues 2–3, s. 453–456.
10. Park Ch.H., Park J.K., Jeon H.S., Chun B.Ch. (2008): Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger. *Journal of Electrostatics* Vol. 66, Issues 11–12, s. 578–583.
11. Pavey I.D. (2009): Propagating brush discharges in flexible hoses. 11th International Conference on Electrostatics. *Journal of Electrostatics* Vol. 67, Issues 2–3, s. 251–255.
12. Simorod J., Starob J. (1970): Elektryczność statyczna w przemyśle. Warszawa, WNT.
13. Udoetok E.S., Nguyena A.N. (2011): Grounding resistance for control of static electricity ignition hazards. *Journal of Electrostatics* Vol. 69, Issue 1, s. 23–29.
14. Walmsley H.L. (2011): Induced-charge errors in charge-transfer measurement: Calculations for sparks and additional brush-discharge geometrie. *Journal of Electrostatics* Vol. 69, Issue 2, s. 79–86.
15. Wu Z., Chen Y., Hu X., Liu S. (2003): Research on ESD ignition hazards of textiles. *Journal of Electrostatics* Vol. 57, Issues 3–4, s. 203–207.

**Recenzent:** prof. dr hab. inż. Paweł Krzystolik