

mgr inż. MARCIN GRABARCZYK
 Politechnika Warszawska
 Kontakt: marcin.grabarczyk@itc.pw.edu.pl

Minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu jako parametr biernej ochrony przeciwwybuchowej

W artykule zawarto przegląd literatury z zakresu badań eksperymentalnych i obliczeniowych (numerycznych), dotyczących zapłonu warstwy pyłu od rozgrzanej powierzchni. Wykonano pomiary minimalnej temperatury zapłonu (MTZ) warstwy pyłu dla skrawków płyty MDF, będącej podstawowym materiałem do produkcji mebli i wyrobów stolarskich oraz analizę otrzymanych wyników. Badania przeprowadzono zgodnie z metodą A europejskiej normy EN 50281-2-1, która odnosi się szczególnie do urządzeń przemysłowych o gorących powierzchniach, na których pył tworzy cienkie warstwy i jest wystawiony na działanie powietrza atmosferycznego.

Publikacja zawiera także spostrzeżenia autora dotyczące prowadzenia badań mających na celu oznaczenie MTZ warstwy pyłu. Uzyskane wyniki mogą zostać wykorzystane dla celów ochrony przeciwwybuchowej w tartakach oraz warsztatach stolarskich i stanowią przyczynek do wiedzy z zakresu materiałoznawstwa przemysłu drzewnego.

Słowa kluczowe: pyły palne, minimalna temperatura zapłonu (MTZ)

Minimum ignition temperature of dust layers as an parameter of the passive explosion protection systems

Article contains literature overview of experimental and computational (numerical) studies in the field of dust layer ignition from hot surface. Measurements of the minimum ignition temperature (MIT) of dust layer for medium-density fibreboard (MDF) scraps were performed with an results analysis. MDF is a basic material used for the furniture production and in carpentry. Research was conducted in accordance with method A of European Standard EN 50281-2-1, which specifically refers to industrial equipment with hot surfaces where dusts can form thin layers that are exposed to open air.

Paper also contains some of author's insights on measurements aimed at determination of MIT of dust layers. Obtained results can be used for explosion protection in sawmills and carpentry workshops and are contribution to the knowledge of material science of wood industry.

Keywords: combustible dusts, dust layers, minimum ignition temperature of dust layers

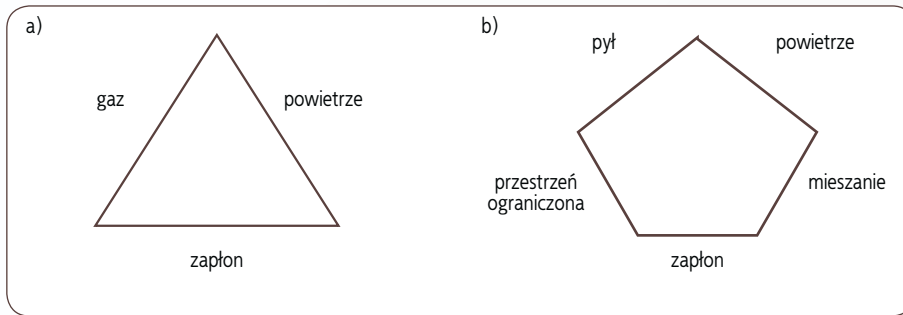
Wstęp

Pierwsze doniesienia o problemie wybuchowości pyłów palnych pochodzą z XVIII w., kiedy to doszło do eksplozji pyłu mąki w magazynie w centrum Turynu [1]. Choć wybuch ten nie należał do szczególnie silnych, zwłaszcza w porównaniu ze współczesnymi nam zdarzeniami z początku XXI w., doprowadził do zniszczenia elementów konstrukcyjnych budynku magazynu. Przez kolejne 100 lat podobne przypadki [2]. Pomimo zaawansowanego stanu wiedzy dotyczącego wybuchowości pyłów w dalszym ciągu mają miejsce liczne zdarzenia związane z zapłonem mieszanin pyłowo-powietrznych. Przykładowo, w ciągu ostatnich 20 lat można wymienić wybuch pyłu zbożowego (20 sierpnia 1997 r.) w Blaye we Francji (12 osób poniosło śmierć, 1 została ranna) oraz wybuch w fabryce leków 28 stycznia 2003 r. w Kinston w Stanach Zjednoczonych (6 osób zginęło, 38 zostało rannych), [3]. W świetle przywołanych zdarzeń można uzmysłowić sobie skalę zagrożenia wynikającą z obecności pyłów palnych w zakładach przemysłowych [2].

Intencją autora artykułu jest szczegółowe omówienie minimalnej temperatury zapłonu (MTZ) warstwy pyłu wraz z historycznym tłem tego parametru i obecnie prowadzonymi w tym zakresie badaniami, a także przybliżenie czytelnikom mechanizmów zapłonu mieszanin pyłowo-powietrznych. Publikacja zawiera ponadto wyniki badań doświadczalnych z oznaczania minimalnej temperatury zapłonu w odniesieniu do warstwy pyłu występującego w przemyśle drzewnym (tartaki, stolarnie i ciesielnie) wraz z komentarzami. Pomiary oraz ich analiza pozwoliły podjąć próbę zgrubnego określenia zależności między MTZ a średnicą ziaren oraz grubością warstwy.

Warunki i mechanizmy powstawania oraz zapłonu atmosfer pyłowo-powietrznych

Mimo że stworzenie atmosfery wybuchowej przez pyły (spełnienie tzw. pięciokąta wybuchowości – rys. 1.b) wymaga zaistnienia większej niż w przypadku gazów i par cieczy (tzw. trójkąt palności – rys. 1.a) liczby niełatwych warunków, to w ostatnich latach zaobserwować można wzrost liczby zdarzeń niepożądanych, spowodowanych obecnością pyłów palnych w kolejnych gałęziach gospodarki [4].



Rys. 1. Graficzna metoda prezentacji warunków, które muszą zostać spełnione jednocześnie, aby powstała swobodnie propagująca i samopodtrzymująca się reakcja spalania w: a) gazach i parach („trójkąt palności”) oraz b) pyłach („pięciokąt wybuchowości”), [4]

Fig. 1 Graphic method of presenting conditions that have to be simultaneously met to create free propagating and self-sustaining combustion in: a) gases and vapor (so-called combustion triangle and in b) dusts (so called combustion pentagon), [4]

Rosnąca liczba zdarzeń związanych z zapłonem mieszanin pyłowo-powietrznych zwiększyła zainteresowanie jednostek badawczych tematyką palności i wybuchowości pyłów. Standardowe parametry wybuchowe oznaczane zgodnie z europejskimi normami to dolna granica wybuchowości (LFL – *lower explosive limit* lub MEC – *minimum explosible concentration*), minimalna energia zapłonu (MIE – *minimal ignition energy*), maksymalne ciśnienie wybuchu (P_{max} – *maximum explosion pressure*) i maksymalna szybkość narostu ciśnienia ($(dp/dt)_{max}$ – *maximum rate of pressure rise*) [5]. Dwa pierwsze parametry opisują warunki niezbędne do zapoczątkowania niekontrolowanego spalania mieszaniny pyłowo-powietrznej. Kolejne dwa dotyczą przebiegu procesu, który został już zainicjowany. Niestety, takie parametry, tj. minimalna temperatura zapłonu warstwy czy obłoku pyłu zdają się być poza obszarem zainteresowań badaczy, pomimo że mogą służyć ocenie prawdopodobieństwa wystąpienia wybuchu wtórnego.

Do zagrożenia wybuchem ze strony pyłów dochodzi w wyniku spełnienia warunków wspomnianego pięciokąta wybuchowości [6]. Pierwsze dwa warunki to obecność pyłu i powietrza; są one tożsame z warunkami trójkąta palności, tj. paliwo (gaz) i utleniacz (powietrze). Taka mieszanina wytworzyć się może w wyniku uwolnienia pyłu w ograniczonej przestrzeni, będącej trzecim wierzchołkiem pięciokąta wybuchowości. Inną możliwością jest powstanie osiadłej warstwy pyłu, która w obrębie ograniczonej przestrzeni uniesie się pod wpływem dodatkowego czynnika zewnętrznego (np. innego wybuchu, podmuchu powietrza, zrzucenia pyłu z wysokości czy też nieostrożnego gaszenia tłących się ziaren silnym strumieniem wody).

Czwartym wierzchołkiem pięciokąta jest źródło zapłonu, które może być dostarczone do mieszaniny pyłowo-powietrznej na wiele sposobów. Szczególnie niebezpiecznym i mocno lekceważonym wariantem jest zapłon osiadłej warstwy pyłu w wyniku nagrzewania się w kontakcie ze źródłem ciepła, np. od urządzenia elektrycznego w przestrzeni zagrożonej wybuchem. Obecność dodatkowego czynnika zewnętrznego, o którym wspomniano wcześniej, może skutkować spełnieniem warunków pięciokąta wybuchowości. Inną możliwością, bez obecności dodatkowego czynnika zewnętrznego, jest powstanie ciągu od konwekcyjnych ruchów spalin. Ciąg ten może podnieść pył z zalegającej

warstwy, także ten już tłący się. Jest to mało prawdopodobne, jednak fizycznie możliwe. Ostatni, tj. piąty wierzchołek to homogeniczność mieszaniny, czyli równomierny rozkład stężenia pyłu w objętości zagrożonego wybuchem. Zapłon może także nastąpić w przypadku wystąpienia lokalnych stężeń pyłu mieszczących się w zakresie wybuchowości, tj. powyżej dolnej granicy wybuchowości.

Samopodtrzymująca się reakcja gwałtownego spalania zajdzie, gdy spełnione zostaną wszystkie warunki z opisanego pięciokąta wybuchowości. Istotnym aspektem spalania mieszanin pyłowo-powietrznych jest szybkość propagacji procesu, która jest dużo niższa niż w przypadku mieszanin gazowo-powietrznych czy mieszanin par cieczy palnych z powietrzem. Uzasadnienia takiego stanu rzeczy należy upatrywać w ograniczonym dostępie tlenu do materiału palnego (pyłu), a także w możliwości rozpraszania się ciepła po całym materiale oraz w tym, że ciało stałe w czasie reakcji spalania zmienia stan skupienia na fazę gazową, co pochłania duże ilości energii. Wolniejsza propagacja procesu spalania jest więc wynikiem niższej temperatury w strefie reakcji [5].

Uniesienie tłącego się pyłu z warstwy wraz ze spełnieniem warunków przestrzennego ograniczenia oraz równomiernego rozkładu ziaren pyłu spowoduje (z wysokim stopniem prawdopodobieństwa) zainicjowanie wybuchu. Niestety, opisane mechanizmy powstawania atmosfer pyłowo-powietrznych są często lekceważone. Z punktu widzenia biernej ochrony przeciwwybuchowej parametr minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu (w skrócie MTZ) jest niezwykle ważny. Zgodnie z definicją, minimalną temperaturą zapłonu warstwy pyłu określa się najniższą temperaturę gorącej powierzchni, w której dochodzi do zapłonu znajdującej się na niej warstwy pyłu o określonej grubości. Parametr ten jest głównym przedmiotem dyskusji w niniejszej publikacji.

Minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu

Rys historyczny

Minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu jest najmłodszym ze znanych parametrów, za pomocą którego opisuje się zjawisko wybuchowości pyłów palnych. Pierwsze pomiary dotyczące zapłonu

warstw pyłów zostały dokonane przez Palmera w 1973 r. [7]. Dotyczyły one zjawiska żarzenia się i tlenia poziomych warstw pyłu bukowego. Poziome ruchy powietrza nad warstwą, rozmiar cząstek w pyłe tworzącym warstwę oraz materiał powierzchni, na której spoczywa warstwa pyłu to parametry, których wpływ na MTZ próbował zbadać Palmer w swoich pracach. Otrzymane rezultaty pozwoliły mu wykazać, że badane zjawisko jest zależne od wszystkich wymienionych parametrów, a tym samym wyniki oznaczenia MTZ warstwy również będą silnie od nich zależały.

W 1988 r. stowarzyszenie niemieckich inżynierów (Verein Deutscher Ingenieure) podjęło próbę wprowadzenia ujednoliconej metody oznaczania parametru MTZ tak, aby oddawała ona warunki panujące w zakładach przemysłowych. Jej pomysłodawcą był Lütolf, który już na początku lat 80. XX w. zaproponował metodę oceny zdolności warstwy pyłów do rozprzestrzeniania zjawiska spalania. W 2003 r. metodę tę zmodyfikował Eckhoff, który dodatkowo zaproponował podział pyłów na 6 następujących kategorii: brak samopodtrzymującego się spalania; lokalne spalanie o krótkim czasie; lokalne spalanie podtrzymane, ale bez propagacji; propagujące tlenie; propagujący płomień otwarty; spalanie wybuchowe [1].

Obecnie badania zostały zunifikowane i ustandaryzowane. W europejskim i polskim prawie wiążącym dokumentem jest PN-EN 50281-2-1 [8], z kolei w amerykańskim ASTM E2021 [9]. Pierwszy ze wspomnianych standardów wyróżnia dwie metody badawcze: A oraz B, odpowiednio – metodę badania warstwy pyłu na płycie grzejnej o stałej temperaturze oraz metodę obłoku pyłu w piecu o stałej temperaturze. Pozwalają one oznaczyć MTZ warstwy pyłu oraz MTZ obłoku pyłu. Choć artykuł traktuje głównie o parametrze oznaczanym według metody A, jednak można w nim również znaleźć wzmianki o parametrze oznaczanym według metody B. Ma to bezpośredni związek z podobieństwem obu parametrów.

Samopodtrzymujący się proces spalania w rozdrobionym pyłe stałym do dziś stanowi obiekt szczegółowych badań. Jak zauważają Lebecki i in. [10], do zapłonu warstwy pyłu może dojść nawet wtedy, jeżeli temperatura powierzchni pokrytego nim urządzenia jest niższa od określonej zgodnie z metodą A PN-EN 50281-2-1 [8]. Tłumacząc to w następujący sposób: temperatura powierzchni obudowy urządzenia elektrycznego nie jest stałą wartością, ponieważ zależy od możliwości wymiany ciepła z otoczeniem. Zdaniem autorów, urządzenie powinno się traktować jak generatory ciepła, a nie jak elementy stałotemperaturowe. Warstwa pyłu pokrywająca obudowę urządzenia może działać jak izolacja termiczna, a jeśli tak, to jej temperatura będzie wzrastać.

W swojej pracy z 2003 r. Lebecki i inni przedstawili wyniki badań eksperymentalnych dwóch pyłów węgla w odniesieniu do dwóch różnych grubości warstw (5 oraz 50 mm), [10]. Pomiary wykonano dwoma metodami: pierwszą z nich była standardowa CTHP (*constant temperature of the heated plate*), opisana w PN-EN 50281-2-1 [8]. Zakłada ona określenie minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu, który znajduje się na płycie grzejnej o stałej temperaturze. Druga metoda to CRHG (*constant rate of heat generation*). Otrzymane

przez uczonych rezultaty są bardzo interesujące. CTHP dała wyższe wartości MTZ niż CRHG (nawet rzędu 100 K) dla obu grubości warstwy, ale różnice te maleją wraz ze wzrostem grubości warstwy. Wyniki wskazują, że stosowanie zalecanej w normie procedury w wielu praktycznych przypadkach obciążone jest dużym błędem statystycznym. Wydaje się więc, że konieczne są dalsze prace w celu opracowania bardziej uniwersalnej metody badania MTZ, która będzie dobrze odwzorowywała warunki rzeczywiste, przy jednoczesnym narzuceniu surowego kryterium bezpieczeństwa.

Oprócz badań eksperymentalnych prowadzone są także prace modelowe. Kim i Hwang, bazując na obserwacjach poczynionych w trakcie badań eksperymentalnych, stworzyli model matematyczny [11]. Odwzorowuje on zjawisko nagrzewania się i zapłonu warstwy pyłu, a także bierze pod uwagę kurczenie się materiału palnego w czasie jego grzania na płycie, co jest spowodowane zmianą rozmiarów oraz ułożenia cząstek. Model zawiera równanie nieustalonego przewodnictwa ciepła wraz z członem opisującym rozproszone i zależne od temperatury źródło ciepła. Na model ten składają się również opracowane przez innych badaczy równania, opisujące przewodzenie ciepła w materiałach sypkich. Wszystkie te równania rozwiązywane są za pomocą metod numerycznych. Kim i Hwang zbadali wpływ kurczenia się warstwy pyłu na rozkład temperatury w warstwie oraz na minimalną temperaturę zapłonu i stwierdzili, że grubość warstwy to najważniejszy parametr, od którego zależy minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu.

Dyduch i Majcher opublikowali w 2006 r. wyniki pracy, w której użyli prostego, jednowymiarowego modelu zapłonu warstwy pyłu, ułożonego na rozgrzanej płycie w celu obliczenia pola temperatury [12]. Wyniki obliczeń zostały skonfrontowane z rezultatami badań eksperymentalnych. Uzyskano je za pomocą metody CRHG zaproponowanej przez Lebeckiego [10]. Porównanie okazało się zadowalające w odniesieniu do cienkich warstw pyłów (<10 mm), ale w przypadku tych o większej grubości (≥ 10 mm) model przewiduje zaniżoną minimalną temperaturę zapłonu. Źródła tej rozbieżności autorzy doszukują się w naturze samego procesu, który w stosunku do grubych warstw rzetelnie opisuje się tylko stosując więcej niż jeden wymiar. Gdy grubości warstw badanego pyłu stają się porównywalne ze średnicą promienia, nie można zaniedbać dwuwymiarowości przepływu ciepła w pyłe i należy wtedy uwzględnić przepływ ciepła przez pierścień. Taka sytuacja nie odzwierciedla jednak rzeczywistych warunków przemysłowych, w których warstwy pyłu osiadłego nie tworzą wysokich cylindrów ograniczonych metalowymi pierścieniami.

Querol i in. opublikowali wyniki badań minimalnej temperatury zapłonu warstwy w zależności od wysokości pierścienia użytego do jej uformowania – należy więc utożsamiać wysokość pierścienia formującego warstwę z jej grubością [13]. Autorzy zbadali w tym celu przypadki do 75 mm włącznie, przy użyciu procedury nie standardowej, lecz jej zmodyfikowanej wersji, podanej w PN-EN 50281-2-1. Norma ta, oprócz opisu metody i kryteriów zapłonu, zawiera rozdział dotyczący zakresu stosowalności wyników oraz metody liniowej interpolacji i ekstrapolacji MTZ na inne niż zmierzona grubość



Fot. 1. Stanowisko pomiarowe [21]

Photo 1. Photo of measuring equipment [21]

warstwy pyłu. Używa się w tym celu logarytmu grubości warstwy w funkcji odwrotności MTZ wyrażonej w kelwinach. Zmierzone przez Querola i in. wartości wykazują dużą zgodność z metodą przewidywania, którą sugeruje norma.

Dodatkowo zbadali oni również MTZ warstwy pyłu o rozkładzie stożkowym za pomocą stanowiska zbudowanego z dwóch płyt grzewczych, nachylnych do siebie pod odpowiednim kątem. W takim układzie próbki były ogrzewane nie tylko od dołu, lecz również z boków. Wyniki te nie różniły się znacząco od wartości oznaczonych w odniesieniu do warstw płaskich o dużej grubości. Na podstawie tego spostrzeżenia autorzy stwierdzili, że przewidywanie MTZ warstw o rozkładzie stożkowym według wymienionej metody jest rozwiązaniem niepraktycznym. Wszystkie przedstawione przez Querola wyniki były walidowane laboratoryjnie, a w trakcie badań osiągnięto ich dużą powtarzalność. Wychwycone przez badaczy podobieństwa w badaniach MTZ warstw pyłów o różnej geometrii (ułożenie i grubość) wykazały, że (pomimo swojej prostoty) metoda opisana w PN-EN 50281-2-1 może mieć szerokie zastosowanie, ponieważ dość dobrze oddaje różne warunki zapylenia w zakładzie przemysłowym.

Z kolei Janes i in. próbowali znaleźć korelację pomiędzy wartościami MTZ uzyskanymi z metod A i B [14]. Zaproponowana przez nich zależność pozwala wyliczyć MTZ warstwy na podstawie MTZ obłoku pyłu, jeżeli znana jest liczba Biota. Jest to bezwymiarowa liczba wyrażająca stosunek oporu przewodzenia ciepła przez ciało do oporu przyjmowania ciepła z jego powierzchni (współczynnik z prawa Newtona), [15]. Zastosowanie jej jako kryterium podobieństwa wydaje się rozsądnym rozwiązaniem. Błąd średniokwadratowy zaproponowanej przez Janesa i in. metody wynosi 30 K, a podobną rozbieżność otrzymuje się pomiędzy oznaczeniem MTZ dla pyłu o grubości 5 do 15 mm.

Półka i in. wykonali dużą liczbę badań z wykorzystaniem obu metod (A i B) w stosunku do bardzo różnych substancji organicznych [16]. Testowali pyły chmielu, melisy, pokrzywy, waleriany, gryki, jęczmienia, kaszy manny, płatków kukurydzianych i owsianych, płatków ryżowych, mąki, słodu, buku, suszonej marchwi, skrobi kukurydzianej oraz łusek słonecznika. Badania były prowadzone w odniesieniu do warstw o grubości 5 i 12,5 mm.

Autorzy stwierdzili, że metoda B powinna być traktowana jedynie jako uzupełnienie metody A, a nie jako samodzielny parametr. Analiza wyników badań dowiodła, że największe zagrożenie wybu-

chem i pożarem powodują pyły łusek słonecznika i ziół leczniczych (melisa i pokrzywa). Wynika to z małej gęstości nasypowej przy jednocześnie wysokim cieple spalania tych materiałów. Łuski słonecznika są często wykorzystywane do produkcji peletów (granulatów), czyli wysoko wydajnych odnawialnych paliw produkowanych z biomasy, która jest szeroko stosowana w przemyśle energetycznym (produkcja energii elektrycznej oraz ciepła). Ryzyko wybuchu w bloku energetycznym opalanym wspomnianymi materiałami jest wysokie ze względu na niską MTZ zarówno warstwy, jak i obłoku pyłu. Ziola z kolei to popularny substrat produktów farmakologicznych i kosmologicznych.

Dodatkowo Półka i in. zauważyli brak zależności wartości samego TZ od wilgotności powietrza, a jedynie fakt, że wpływa ona na czas występowania zapłonu od początku badania. Prawdopodobnie jest to związane z ciepłem potrzebnym do odparowania wilgoci z warstwy badanego pyłu.

Park i in. [17] przedstawili metodę oszacowania właściwości termicznych oraz kinetycznych pyłu węglowego za pomocą płyty grzewczej o stałej temperaturze, zgodnej ze standardem ASTM E2021 [9]. Szacowanymi parametrami były przewodność cieplna, energia aktywacji, ciepło spalania i współczynnik przedwykładniczy równania Arrheniusa. Żaden z nich nie jest parametrem wybuchowości i nie wspiera procesów projektowania systemów ochrony przeciwybuchowej. Są to jednak parametry fizykochemiczne, które zdaniem autorów mogą być pomocne w przewidywaniu możliwości samozapłonu pyłów palnych.

W innej publikacji Park i in. zbadali cztery różne grubości warstwy pyłu: 6,4, 12,7, 19,1 oraz 25,4 mm [18]. Na podstawie badania z pierścieniem o wysokości 12,7 mm oszacowano przewodność cieplną, energię aktywacji oraz ciepło spalania pyłu węgla. Pierwszy z parametrów oblicza się w oparciu o strumień ciepła przekazywany przez płytę grzewczą oraz strumień ciepła tracony na granicy warstwy przy założeniu, że nie nastąpił jej zapłon. Zdaniem autorów, metoda ta obciążona jest błędem rzędu 0,1 W/m/K (wat na metr na kelwin). Pozostałe parametry oblicza się przy pomocy optymalizacji współczynników rozwiązywanego numerycznie równania. Opisuje ono ustalony stan termiczny warstwy pyłu, które porównuje się z wynikami eksperymentalnymi w odniesieniu do warstwy o grubości 12,7 mm. Oszacowana energia aktywacji i ciepło spalania są zgodne z wartościami z badań eksperymentalnych przedstawionych przez autorów w ich poprzedniej publikacji [17].



Fot. 2. Przykład widocznego wystąpienia zjawiska żarzenia będącego warunkiem wystarczającym do stwierdzenia zapłonu
 Photo 2. Example of optically visible incandescent points – sufficient conditions for determination the ignition at test temperature

Zachowanie się warstwy pyłu węgla bitumicznego, uformowanej pomiędzy dwoma rozgrzanymi płytami było przedmiotem badań Joshiego i in. [19]. Płyty te swoim ułożeniem przypominały klin. Zbadano dwa przypadki, jeden o kącie 60° pomiędzy płytami, a drugi o kącie 90° . Na stanowisko badawcze dodatkowo składały się trzy termopary umieszczone na przekroju wzdłuż osi symetrii klina na różnych wysokościach, począwszy od wierzchołka. Pozwoliły one na rejestrację zmiennego w czasie pola temperatury. Najważniejszym wnioskiem wyciągniętym z powyższych badań było stwierdzenie, że zapłon w przypadku klina 60° następował w obszarze górnej termopary, podczas gdy przy klinie 90° – w obszarze pomiędzy górną a środkową termoparą. Oznacza to, że zaostrenie klina (zmniejszenie kąta rozwarcia) powoduje przesunięcie miejsca zapłonu warstwy ku górze. Joshi i in. wypunktowują trzy ważne mechanizmy, którymi można tłumaczyć taką naturę procesu: wymianę ciepła pomiędzy warstwą a rozgrzanymi płytami (wraz z oporem kontaktowym), generowanie ciepła przez proces spalania (w wyniku reakcji chemicznej) oraz wymianę ciepła pomiędzy obszarami wewnątrz warstwy. Autorzy użyli ponadto wymienionej aparatury oraz procedury do oznaczania MTZ warstw pyłu węgla o różnych grubościach [16]. Zmierzone przez nich parametry, takie jak MTZ, czas zapłonu, ciepło spalania oraz strumień ciepła wymienianego pomiędzy obszarami wewnątrz warstwy pozwoliły na przeprowadzenie dokładnej analizy wspomnianych mechanizmów.

Metoda oznaczania

Jak już wspomniano, w polskim prawodawstwie standardem opisującym metodę oznaczania minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu jest PN-EN 50281-2-1 [8]. Ogólnie ujmując, oznaczania parametrów wybuchowości powinno dokonywać się w warunkach odwzorowujących takie, które mogą panować w zakładzie produkcyjnym. W dalszej części publikacji zamieszczono wyniki

przeprowadzonych przez autora badań doświadczalnych z oznaczania minimalnej temperatury zapłonu warstwy dla pyłu występującego w przemyśle drzewnym (tartaki, stolarnie i ciesielnie).

Zgodnie z PN-EN 50281-2-1 w skład aparatury badawczej metody A wchodzi metalowa płyta podgrzewana elektrycznie, jednostka kontrolująca temperaturę, trzy termopary, dwukanałowe urządzenie rejestrujące dane oraz pierścień formujący warstwę pyłu o wysokości 5 mm i średnicy wewnętrznej 100 mm [8]. Termopary służą do odczytu rzeczywistej temperatury płyty grzejnej, do regulacji nastawy płyty grzejnej oraz do pomiaru temperatury pyłu w warstwie pyłu (fot. 1.).

Oznaczenie minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu to uporządkowany cykl pomiarów. Procedury cyklu badawczego oraz pojedynczego pomiaru zostały określone w PN-EN 50281-2-1 [8]. Unormowane zostały również procedury przygotowania i wzorcowania stanowiska, a także jego czyszczenia po zakończeniu każdego pomiaru.

Pojedynczy pomiar polega na obserwacji zjawisk zachodzących w badanym pyłe. Wynik badania dla zadanej nastawy płyty grzejnej jest zerojedynkowy: zapłon lub jego brak. W normie wyróżnione są wizualne i temperaturowe kryteria wystąpienia zapłonu. Widoczne wystąpienie zjawiska żarzenia (fot. 2.) lub spalania płomieniowego kończy pomiar z wynikiem wystąpienia zapłonu. Brak zapłonu próbki uznaje się tylko przypadku, gdy w ciągu 30 minut od rozpoczęcia badania nie zostanie spełniony żaden z warunków pozwalający uznać wystąpienie zapłonu.

Oznaczenie minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu to cykl pojedynczych pomiarów. Jeżeli badanie zakończy się po 30 minutach z wynikiem braku zapłonu, to kolejny pomiar należy przepro-

wadzić przy wyższej od poprzedniej temperaturze płyty grzejnej. Jeżeli zapłon wystąpił, nastawę należy obniżyć. Cykl badań powinno się przerwać, jeżeli zapłon warstwy pyłu nie nastąpił przy temperaturze płyty grzejnej równej 400°C i przyjąć, że MTZ warstwy pyłu jest większa niż 400°C .

Uzasadnione wydaje się więc zaczynanie cyklu badań dla nastawy płyty grzejnej równej 400°C . Jeżeli zapłon nie wystąpi, należy badanie powtórzyć dwukrotnie i uznać, że MTZ warstwy pyłu jest większa niż 400°C , a tym samym zakończyć szukanie badanego parametru w trzech pomiarach. Z kolei jeżeli zapłon wystąpi w 400°C , należy wykonać pomiar przy dużo niższej temperaturze płyty grzejnej i w przypadku niewystąpienia zapłonu kolejne wartości nastawy dobierać przy użyciu metody bisekcji, zwanej też metodą połowienia przedziału. Jeżeli przy dużo niższych wartościach temperatury płyty grzejnej zapłon dalej występuje, trzeba sukcesywnie obniżać temperaturę. Pomiary i metodę bisekcji należy stosować do chwili znalezienia MTZ z dokładnością do 10 K.

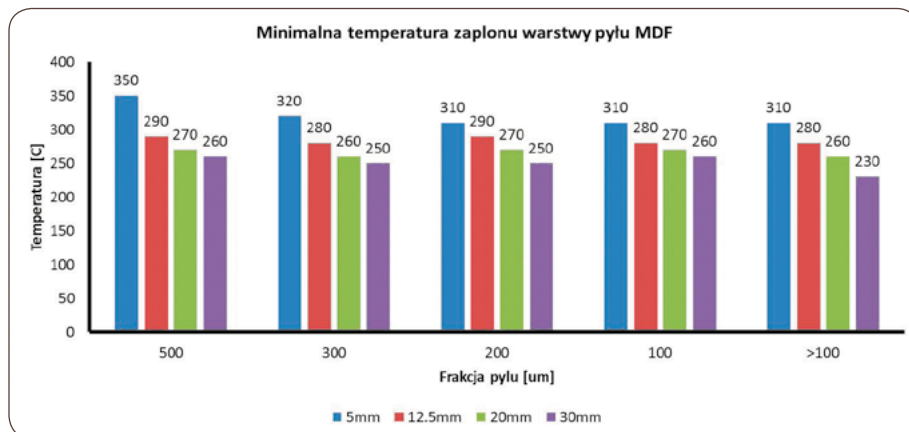
Wpływ grubości warstwy oraz rozkładu granulometrycznego pyłu na wartość minimalnej temperatury zapłonu

Na potrzeby publikacji wykonano serię badań doświadczalnych, których analiza ma na celu określenie wpływu grubości warstwy oraz rozkładu granulometrycznego pyłu na wartość minimalnej temperatury zapłonu. Minimalna temperatura zapłonu to parametr, który stanowi wskaźnik dla określenia maksymalnej temperatury powierzchni urządzenia, na którym podczas jego eksploatacji występuje kumulacja warstwy pyłu palnego. Innymi słowy, temperatura niższa od MTZ o 75 K to maksymalna dopuszczalna temperatura powierzchni urządzenia, na którym może zalegać warstwa badanego pyłu o grubości nie większej niż 5 mm, przy jednoczesnym zachowaniu odpowiednio wysokiego marginesu bezpieczeństwa.

W warunkach przemysłowych mogą utworzyć się warstwy grubsze niż ta, w odniesieniu do której prowadzi się oznaczanie parametru MTZ, tj. większe niż 5 mm. Norma PN-EN 60079-14 zawiera sugestię, jak należy obniżyć dopuszczalną temperaturę powierzchni urządzenia wraz ze wzrostem grubości warstwy od 5 mm do 50 mm, tak aby zachować odpowiednio wysoki margines bezpieczeństwa [20].

Badany pył powstał z obróbki płyty MDF. Jest to średniej gęstości płyta pilśniowa, która stanowi podstawowy materiał do produkcji mebli. Pył został wybrany ze względu na równomierny rozkład ziaren pomiędzy frakcjami oraz z uwagi na nasilające się problemy w przemyśle drewnianym związane z bezpieczeństwem i higieną pracy. W wybranym do badań pyłe udało się wyróżnić 5 dużych frakcji o średnicach ziaren kolejno: do 500, 300, 200 i 100 μm oraz poniżej 100 μm . Oznaczono MTZ warstwy pyłu w stosunku do pierścieni o wysokościach 5, 12,5, 20 oraz 30 mm.

Rys. 2. zawiera porównanie wyników, które pozwala wysnuć przynajmniej dwa wnioski. Po pierwsze, wzrost grubości warstwy powoduje obniżenie minimalnej temperatury jej zapłonu. Innymi słowy: bardziej prawdopodobne jest zapalenie się grubszej warstwy tego samego pyłu.



Rys. 2. Wykres słupkowy prezentujący otrzymane wyniki minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu MDF. Oś X – średnice ziaren pyłu [µm]. Oś Y – temperatura zapłonu [°C]. Kolor słupka – grubość warstwy [mm]

Fig. 2. Bar graph of obtained results for minimum ignition temperature of MDF dust layer. X-axis – grain diameters of dusts [µm]. Y-axis – minimum ignition temperature [°C]. Bar color – layer thickness [mm]

Dzieje się tak prawdopodobnie dlatego, że grubsza warstwa pyłu ma większą pojemność i wolniej traci ciepło, ponieważ jej górne warstwy działają jak izolacja. Potwierdzają to inne doniesienia naukowe wymienione wcześniej, a także wytyczne zawarte w przywołanych normach. W sensie praktycznym oznacza to, że nawet jeżeli spełniony jest wspomniany już warunek różnicy 75 K pomiędzy MTZ warstwy 5 mm a temperaturą powierzchni urządzenia pracującego w atmosferze niebezpiecznej, to może dojść do wybuchu w wyniku dalszej akumulacji osiadłego pyłu. W świetle tych faktów okazuje się, że bierne metody ochrony przeciwwybuchowej, takie jak dbanie o czystość i higienę w zakładzie pracy pozostają najlepszym sposobem uniknięcia wystąpienia zdarzenia niepożądanego.

Po drugie, ziarna o mniejszej średnicy charakteryzują niższą temperaturę zapłonu warstwy niezależnie od jej grubości. Tłumaczyć to można wyższą gęstością nasypaną takiej warstwy. Mniejsze ziarna łatwiej się układają i można ich zmieścić więcej w danej objętości. Jeżeli w procesie technologicznym mamy do czynienia z przesiewaniem lub z jakichkolwiek innych przyczyn w pewnym obszarze zakładu przemysłowego występuje pył o innym rozkładzie granulometrycznym niż ten, dla którego MTZ określono, należy wziąć to pod uwagę. Poza tym mniejsze ziarno ulega zapłonowi od proporcjonalnie mniejszej ilości dostarczonej energii niż ziarno większe.

Optymalnym rozwiązaniem byłoby zbadanie MTZ dla reprezentatywnej próbki pyłu, a następnie podzielenie go na frakcje i oznaczenie MTZ dla każdej z nich osobno. Zlecając akredytowanemu laboratorium badawczemu oznaczenie parametru minimalnej temperatury zapłonu pyłu można zapytać o możliwość oznaczenia rozkładu granulometrycznego. Jest to informacja o tym, jaką część pyłu stanowią ziarna o określonych średnicach. Mając wiedzę o tym, której frakcji w pyłe jest najwięcej i jaka jest „wypadkowa” MTZ warstwy takiego pyłu, można skuteczniej zapobiegać zdarzeniom niepożądanym wynikającym z osadzania się pyłu na powierzchniach urządzeń generujących ciepło. Nie jest to jednak działanie obligatoryjne, ponieważ zależność minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu od stopnia rozdrobnienia, choć raczej słaba, niezaprzeczalnie istnieje, a w odniesieniu do opisanego w artykule pyłu MDF tendencja ta zdaje

się działać tylko do pewnych grubości warstwy, co widać na rys. 2. – pomiędzy grubością warstwy 5 a 12,5 mm obserwuje się dużo większą różnicę niż między jakimikolwiek innymi dla wszystkich frakcji pyłu. Oznacza to, że istnieje pewna graniczna grubość warstwy, powyżej której jej przyrost przestaje mieć duże znaczenie.

Podsumowanie

Podjętą badania mające na celu oznaczenie parametrów wybuchowości pyłów należy starać się, aby warunki ich prowadzenia możliwie jak najbardziej oddawały warunki panujące w zakładzie przemysłowym, w którym występuje dany materiał niebezpieczny. Chociaż warunki prowadzenia badania są ściśle określone przez normę, możliwe jest wykonywanie oznaczania MTZ dla wybranych frakcji pyłu lub pyłu o określonej wilgotności otrzymanego w wyniku sezonowania próbek w szafie klimatycznej.

Przyjęcie bardziej rygorystycznego kryterium badanego pyłu w przypadku parametru MTZ mogłoby się odbyć przez prowadzenie badań dla grubszych warstw pyłu. Oczywiście jest, że daje to większy zapas bezpieczeństwa. W aplikacjach przemysłowych dużą rolę odgrywają jednak aspekty ekonomiczne, stąd też metoda A standardu europejskiego PN-EN 50281-2-1 zakłada użycie pierścienia jedynie o grubości 5 mm. Stosowanie grubszego pierścienia spowodowałoby, że oznaczane wartości MTZ byłyby niższe, a w rezultacie niższe byłyby dopuszczalne temperatury powierzchni urządzeń generujących ciepło i pracujących w sąsiedztwie atmosfer wybuchowych. Wymusiłoby to na zakładach przemysłowych większą dbałość o higienę w miejscu pracy, generując tym samym dodatkowe i (być może) niepotrzebne koszty.

Minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu z punktu widzenia biernej ochrony przeciwwybuchowej jest bardzo ważnym, jednak ciągle lekceważonym parametrem [22]. Nadzieję na przyszłość dają prowadzone w tym zakresie badania oraz idące za nimi wnioski – takie jak zaprezentowane w artykule. Zdaniem autora, mogą się one znacznie przyczynić do poprawy bezpieczeństwa w zakładach produkcyjnych, w których występują pyły palne, zwłaszcza w formie osiadłej (warstwy).

[1] Eckhoff R.K. *Dust explosions in the process industries*. Elsevier 2003

[2] Porowski R., Małozieć D. *Zagrożenie wybuchem pyłów palnych oraz metody zapobiegania*, „Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza” 2012, 4

[3] Bartknecht W. *Explosions – Course, Prevention, Protection*. Springer Verlag 1981

[4] Kordylewski W. *Spalanie i paliwa*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, wyd. V, 2008

[5] Teodorczyk A. *Podstawy modelowania matematycznego wybuchu mieszaniny pyłowo-gazowej*. III Międzynarodowa Szkoła Wybuchowości Pyłłów Przemysłowych 1987

[6] Law C.K. *Combustion physics*. Cambridge University 2006

[7] Palmer K.N., Butlin R.N. *Dust explosibility tests and their application*. „Powder Technology” 1972,6,3

[8] PN-EN 50281-2-1, *Urządzenia elektryczne do stosowania w obecności pyłów palnych – Część 2-1: Metody badania – Metody oznaczania minimalnej temperatury zapłonu pyłu*, 2002

[9] ASTM E2021, *Standard Test Method for Hot-Surface Ignition Temperature of Dust Layers*, 2013

[10] Lebecki K., Dyduch Z., Fibich A., Śliż J. *Ignition of a dust layer by a constant heat flux*. „Journal of Loss Prevention in the Process Industries” 2003,16

[11] Kim H.M., Hwang C.C. *Heating and ignition of combustible dust layers on a hot surface: Influence of layer shrinkage*. „Combustion and Flame” 1996,105

[12] Dyduch Z., Majcher B. *Ignition of a dust layer by a constant heat flux-heat transport in the layer*. „Journal of Loss Prevention in the Process Industries” 2006,19

[13] Querol E., Torrent J. G., Bennett D., Gummer J., Fritze J.-P. *Ignition tests for electrical and mechanical equipment subjected to hot surface*. „Journal of Loss Prevention in the Process Industries” 2006,19

[14] Janes A., Carson D., Accorsi A., Chaineaux J., Tribouilloy B., Morainvillers D. *Correlation between self-ignition of a dust layer on a hot surface and in baskets in an oven*. „Journal of Hazardous Materials” 2008,159

[15] Wiśniewski S., Wiśniewski T.S. *Wymiana ciepła*, WNT 2009

[16] Półka M., Salomonowicz Z., Woliński M., Kukfisz B. *Experimental analysis of minimal ignition temperatures of a dust layer and clouds on a heated surface of selected flammable dusts*. International Symposium on Safety Science and Technology, 2012

[17] Park H., Rangwala A.S., Dembsey N.A. *A means to estimate thermal kinetic parameters of coal dust layer from hot surface ignition test*. „Journal of Hazardous Materials” 2009, 168

[18] Park H., Zalosh R. *Air flow and oxygen concentration effects in dust layer hot surface ignition temperature tests*. 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, 2007

[19] Joshi K. A., Raghavan V., Rangwala A. S. *An experimental study of coal dust ignition in wedge shaped hot plate configurations*. „Combustion and Flame” 2012,159

[20] PN-EN 60079-14, *Atmosfera wybuchowa – Część 14: Projektowanie, dobór i montaż instalacji elektrycznych*, 2013

[21] <http://www.anko-lab.pl/>

[22] Amyotte P. R. *Some myths and realities about dust explosions*. „Process Safety and Environmental Protection” 2014, 92

Podziękowania

Za pomoc w powstaniu publikacji autor pragnie serdecznie podziękować Panu Andrzejowi Kotackowskiemu z firmy P.P.U. ANKO z Warszawy, projektantowi i dostawcy aparatury do badań eksplozywometrycznych i określania parametrów wybuchowości oraz kolegom z Zespołu Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości (BW) Centrum Naukowo-Badawczego Ochrony Przeciwpożarowej im. Józefa Tuliszkowskiego w Józefowie.