

dr inż. Paweł Łukaszczyk¹

Przyjęty/Accepted/Принята: 31.12.2015;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 11.05.2016;

Opublikowany/Published/Опубликована: 30.06.2016;

Zastosowanie nanotechnologii w ochronie przeciwpożarowej

The Application of Nanotechnology in Fire Protection

Применение нанотехнологии в противопожарной защите

ABSTRAKT

Cel: Od czasu oswojenia ognia ludzkość boryka się z szeregiem niebezpieczeństw wynikających z niekontrolowanego procesu spalania. Na przestrzeni lat tworzone nowe zabezpieczenia przeciwpożarowe oraz udoskonalano istniejące rozwiązania. Celem artykułu jest przybliżenie czytelnikom tematyki nanotechnologii oraz korzyści, jakie płyną z zastosowania jej w inżynierii bezpieczeństwa w ochronie przeciwpożarowej.

Wprowadzenie: Nanotechnologia jest młodą dziedziną nauki, która daje ogromne możliwości w modyfikowaniu właściwości fizykochemicznych materiałów oraz pozwala na tworzenie nowych, nieosiągalnych dotąd struktur o niespotykanych wcześniej właściwościach. Dzięki temu istnieją realne perspektywy zastosowania jej w jednym z najistotniejszych aspektów ludzkiego życia, czyli w bezpieczeństwie pożarowym. W artykule omówiono modyfikacje właściwości konwencjonalnych materiałów nanostrukturami w celu zwiększenia ich odporności termicznej. Przedstawiono także potencjał zastosowania osiągnięć nanotechnologii w detekcji wczesnych oznak pożaru, tj. dymu i gazów pożarowych. W ostatniej części artykułu zaprezentowano nowoczesne środki gaśnicze na bazie nanokrystalitów i mikrokapulek oraz omówiono korzyści, jakie płyną z ich zastosowania.

Metodologia: Artykuł został podzielony na sekcje odpowiadające trzem aspektom ochrony przeciwpożarowej. Do głównych wyzwań ochrony przeciwpożarowej należą kolejno:

- modyfikacja szeroko stosowanych polimerów, których właściwości pożarowe nadal nie gwarantują bezpieczeństwa podczas pożaru, w celu uodpornienia ich na działanie ognia oraz zmniejszenia stwarzanego przez nie zagrożenia (np. eliminację opadu kroplistego termoplastów) poprzez zastosowanie nanowypełniaczy,
- skuteczna detekcja wczesnych oznak powstawania pożaru np. dymu, tlenku węgla i innych specyficznych dla spalania cząstek,
- wydajna metoda gaszenia pożaru, która nie zagraża życiu i zdrowiu ludzkiemu i nie niszczy obiektu i jego wyposażenia.
- W artykule skupiono się na każdym z wymienionych powyżej aspektów i przedstawiono, jakie są możliwości zastosowania osiągnięć nanotechnologii w pożarnictwie.

Wnioski: Wykazano, że czujki pożarowe na bazie nanomateriałów pozwalają na zwiększenie ich progę detekcji oraz żywotności. Jednocześnie duża wydajność w stosunku do masy pozwala zredukować koszty produkcji detektorów. Opisana w literaturze modyfikacja polimerów nanocząstkami pozwoliła na zmniejszenie zagrożenia, jakie niesie za sobą stosowanie tworzyw sztucznych. Wytwarzane kompozyty charakteryzują się zredukowaną ilością wydzielanego ciepła podczas spalania oraz lepszymi właściwościami reologicznymi w warunkach pożaru, dzięki czemu ich rozkład termiczny przebiega w kierunku zwęglania, co skutecznie redukuje niebezpieczeństwo tworzenia się palących kropli.

Słowa kluczowe: ochrona przeciwpożarowa, nanotechnologia, uniepalniacze, środki gaśnicze, nanorurki, grafen, detekcja

Typ artykułu: artykuł przeglądowy

ABSTRACT

Aim: Since the time humans learned how to use a fire, people had to cope with a number of dangers resulting from an uncontrolled combustion process. Over the years new fire protection techniques and improvements were developed. The purpose of this article is to familiarize readers with the topic of nanotechnology and highlight the benefits of this technique in relation to fire safety.

Introduction: Nanotechnology is an innovative field of science which offers major opportunities in modifying the physicochemical properties of materials and allows for the creation of new structures with remarkable properties, not encountered previously. Such achievements will allow for the utilisation of new approaches in one of the most important and oldest aspects of human life – fire safety. This article examines the modification potential of conventional material properties with nanostructures in order to increase their resistance to fire. Furthermore, the article illustrates potential application of nanotechnology developments in the early detection of fires through symptoms, such as smoke and presence of fire gases. Finally, the article explores benefits of modern extinguishing agents based on nanocrystallites and microcapsules.

Methodology: The article is divided into sections, which represent the three aspects of protection from fires. The main challenges for fire safety include:

- modification of widely used thermoplastic polymers, where the properties still do not guarantee safety when exposed to high temperature and intense heat flux - use of nanofillers will improve the resistance to fire action and reduce associated risks (e.g. elimination of the melting behaviour of thermoplastics exposed to fire),
- effective detection of early signs of fire, e.g. smoke, carbon monoxide and other combustion-specific molecules,

¹ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie / West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Poland; plukaszczyk@zut.edu.pl;

• efficient method of fire dousing, which is less health and life threatening and non-destructive to property and equipment. The article provides a focus on each of these aspects and demonstrates nanotechnology application potential in firefighting.

Conclusions: The article reveals that the use of nanomaterials in sensors can increase detection parameters and extend the life of detectors. Simultaneously, efficiency increases in respect of volume can reduce production costs. Modification of polymer nanoparticles, described in the literature, allows for the reduction of fire hazards attributed to use of plastics. New generation of polymer composites exhibit a reduced level of heat release during combustion and demonstrate improved rheological properties in fire conditions. Consequently, the thermal decomposition process leading towards carbonization effectively eliminates melting during combustion.

Keywords: fire protection, nanotechnology, flame retardants, extinguishing agents, nanotubes, graphene, detection

Type of article: review article

АНОТАЦИЯ

Цель: С момента, когда человек освоил огонь, ему приходится бороться с целым рядом опасностей, связанных с неконтролируемым процессом сгорания. На протяжении многих лет были созданы новые средства защиты, а также были усовершенствованы уже имеющиеся решения. Цель статьи - приблизить читателям темы нанотехнологии и преимущества ее использования в инжиниринге безопасности в противопожарной защите.

Введение: Нанотехнология является молодой областью науки, которая дает большие возможности для изменения физико-химических свойств материалов, а также позволяет создавать новые, ранее недостижимые структуры, обладающие беспрецедентными свойствами. Это дает реальные перспективы для её использования в одном из самых важных аспектов человеческой жизни, а именно в области пожарной безопасности. В статье рассматриваются модификации качеств обычных материалов с помощью наноструктур, с целью повышения их термической устойчивости. Представлен потенциал возможностей применения нанотехнологических достижений в выявлении ранних признаков пожара, то есть дыма и пожарных газов. В заключении представлены современные огнетушащие средства на основе нанокристаллов и микрокапсул и обговорены преимущества их использования.

Методология: Статья поделена на разделы, соответствующие трем аспектам противопожарной защиты. К основным задачам противопожарной защиты последовательно принадлежат:

- модификация наиболее часто используемых полимеров (свойства которых все еще не гарантируют безопасности во время пожара), чтобы защитить их от действия огня и уменьшить связанную с ними угрозу (например, устранение осадков термопластов) используются нанопополнители,
- эффективное выявление ранних признаков пожара таких как, например, дым, окись углерода и другие специфические продукты сгорания,
- эффективный метод тушения пожара, который не угрожает жизни и здоровью человека, а также не разрушает сам объект и находящееся в нём оборудование.

В статье было уделено внимание каждому из вышеуказанных аспектов и показаны возможности использования достижений нанотехнологий в пожарной охране.

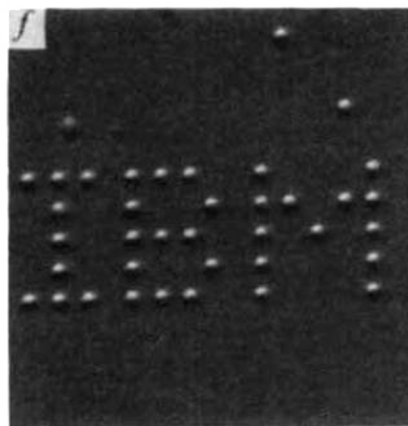
Выводы: Было показано, что пожарные детекторы на основе наноматериалов могут характеризоваться повышенной чувствительностью и долговечностью. В то же время высокая производительность по сравнению с весом может снизить затраты на производство детекторов. Описанная в литературе модификация полимерных наночастиц позволила уменьшить угрозу применения пластмасс. Производимые композиты характеризуются ограниченным количеством выделяемого тепла при горении, а также лучшими реологическими свойствами в условиях пожара. Благодаря этому их термическое разложение переходит в обугливание, что эффективно уменьшает опасность создания жгучих капель.

Ключевые слова: пожарная охрана, нанотехнология, огнезащитные средства, гасящие средства, нанотрубки, графен, обнаружение

Вид статьи: обзорная статья

1. Wprowadzenie

Nanotechnologia jest szybko rozwijającą się dziedziną nauki. Pierwsze wzmianki dotyczące możliwości modyfikacji materii na poziomie molekularnym sięgają 1959 roku, kiedy Richard P. Feynman wygłosił swój referat pod tytułem *Plenty of Room at the Bottom*. W swoim wystąpieniu przewidział, jakie korzyści płyną ze zmniejszenia rozmiarów cząstek. Feynman posłużył się przykładem umieszczenia całej encyklopedii na główce szpilki. W takim przypadku pojedyncza kropka składałaby się z około 1000 atomów [1]. Przedstawiona przez niego koncepcja została zrealizowana w 1989 roku, kiedy zespół Dona Eiglera przy pomocy skaningowego tunelowego mikroskopu elektronowego stworzył napis, którego litery składały się z 35 atomów ksenonu (ryc. 1). Był to przełomowy moment, który pokazał, że jesteśmy w stanie manipulować materią na poziomie atomowym [2].



Ryc. 1. Obraz z mikroskopu STM przedstawiający napis wykonany z pojedynczych atomów [2]

Fig. 1. STM microscope image of atom made letters [2]

Najistotniejszym aspektem nanotechnologii jest zmiana właściwości fizykochemicznych materii przy znaczącym zmniejszeniu wymiarów obiektu. Termin nanotechnologia umownie dotyczy cząstek materii w przedziale 1-100 nm, gdzie silny wpływ na właściwości fizykochemiczne ma mechanika kwantowa. Granice rozmiaru odnoszą się do przynajmniej jednego z wymiarów cząstki. W związku z tym różniamy obiekty 0-, 1- i 2-wymiarowe oznaczane kolejno 0D, 1D i 2D [3]. W przypadku obiektów 0-wymiarowych, wszystkie trzy wymiary zawierają się w tym przedziale. Jedne z pierwszych obiektów 0D, jakie zostały odkryte to fulereny, czyli sferyczne cząsteczki zbudowane z węgla (ryc. 2A) [4]. W uproszczeniu do obiektów 0D należą nanocząstki i nanodyspersje. Największy rozwój nanotechnologii zawdzięczamy materiałom węglowym, takim jak fulereny [6], nanorurki (ryc. 2B) [5] i grafen (ryc. 2C) [7]. Nanometryczne cząstki mogą być jednak zbudowane również z innych materiałów takich jak metale [8], ceramika [9], polimery [10].

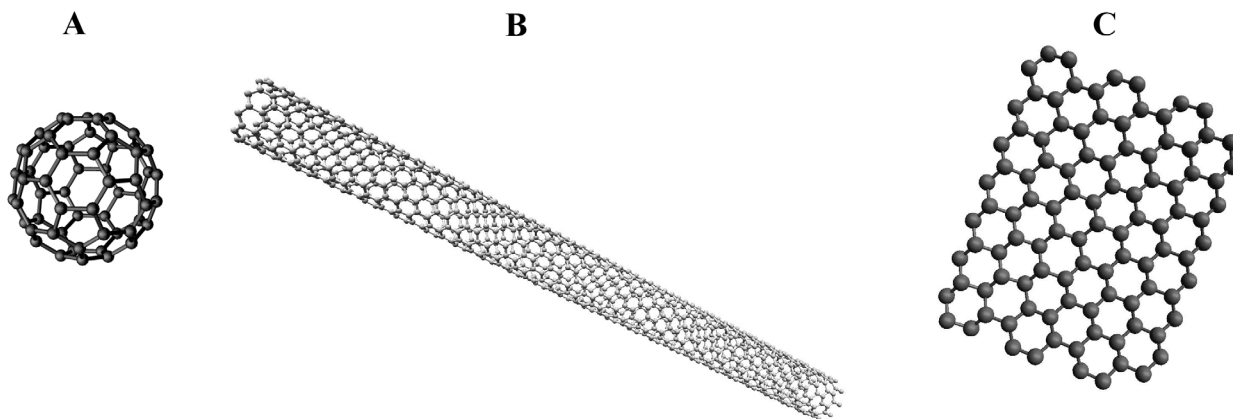
Nanocząstki różnią się właściwościami od swoich pełnowymiarowych odpowiedników, ponieważ atomy będące granicą cząstki stanowią jej znaczącą część. Przykładowo cząstki platyny o średnicy 2 nm w 55% składają się z atomów powierzchniowych, co znacząco wpływa na ich właściwości katalityczne w porównaniu do większych krystalitów [11]. Zwiększenie aktywności chemicznej mniejszych ziaren materii jest stosowane od dawna w produkcji katalizatorów, gdzie rozwinięta powierzchnia aktywna pozwala na zwiększenie wydajności procesu [12]. Po dostatecznym zmniejszeniu rozmiarów, cząstka/krystalit zmienia swoje właściwości chemiczne, fizyczne, optyczne oraz elektryczne. Innym przykładem jest obniżenie temperatury spiekania cząstek srebra wielkości ~20 nm nawet do 150°C, podczas gdy srebro metaliczne topi się w temperaturze 961°C [13]. Kolejnymi nanometrycznymi obiektami są cząstki jednowymiarowe. Takie cząstki posiadają jeden wymiar wykraczający poza przedział 1-100 nm. Przykładem są nanorurki węglowe [14] oraz inne nanowłókna [15] i nanodruty [16]. Dzięki wydłużonej budowie posiadają one właściwości pozwalające na zastosowanie ich jako wypełnienia podczas produkcji kompozytów przy jednoczesnym zwiększeniu ich wytrzymałości i obniżeniu masy tworzywa [17-18]. Niespotykane właściwości elektryczne nanorurek węglowych pozwoliły na budowę ultra szybkich wyświeclaczy o bardzo małym poborze prądu [19-20]. Obiekty 2D to, w dużym uproszczeniu, cienkie warstwy lub powłoki. Takie materiały znajdują zastosowanie szczególnie w optyce i optoelektronice [21- 22].

Sztandarowym materiałem 2D jest grafen, za którego odkrycie Gejm i Nowosiłow w 2010 roku otrzymali nagrodę Nobla [23]. Grafen to płaska struktura węglowa o budowie przypominającej grafit z tą różnicą, że grafen jest jednowarstwowy (za grafen uznaje się też cząstki do 4-5 warstw, ponieważ powyżej atomy wewnętrzne są ustabilizowane kolejnymi warstwami, przez co materiał traci swoje unikalne właściwości) [24]. Przewodność elektryczna, wytrzymałość mechaniczna i nieprzepuszczalność gazów, którymi charakteryzuje się grafen pozwoliły na konstrukcję prototypowych tranzystorów o gigahertzowej częstotliwości [25], wzmocnionych kompozytów [26] oraz superszczelnych uszczelnień [27]. Szczególne właściwości nanomateriałów mogą zostać wykorzystane również w ochronie przeciwpożarowej. Nanocząstki mogą posłużyć do budowy niezwykle czułych detektorów do czujek przeciwpożarowych. Natomiast dodatki nanocząstek mogą polepszyć właściwości termiczne materiałów. Nanotechnologia pozwala również na stworzenie wydajniejszych i trwalszych środków gaśniczych.

2. Modyfikacja materiałów

Cechy pożarowe materiałów wynikają m.in. z ich właściwości chemicznych i fizycznych. Na wartości parametrów związanych w szczególności w szybkością wydzielania ciepła mają wpływ mechanizm transportu ciepła i reaktywność chemiczna [28]. Ciepło może być przekazywane na trzy sposoby: konwekcję, przewodzenie i promieniowanie. Dzięki dynamicznemu rozwojowi inżynierii materiałowej możliwa jest modyfikacja materiału tak, że efektem będzie spowolnienie rozprzestrzeniania się płomieni po powierzchni. Można to osiągnąć poprzez zmianę dyfuzyjności cieplnej materiału [29-31] lub jego właściwości chemicznych [31-32].

Miarą jakości materiałów (wyrobów) budowlanych jest m.in. odporność termiczna. Odgrywa ona szczególnie ważną rolę w materiałach stosowanych na elementy konstrukcyjne, gdyż wysoka odporność termiczna zapewnia przez dłuższy czas odpowiedni poziom wytrzymałości mechanicznej. Zastosowanie grafenu do polepszenia właściwości termicznych polimerów wykazało podwyższenie temperatury rozkładu PVDA [poli(fluorku winylidenu)] o około 20°C. Mechanizm nie jest jeszcze do końca poznany i przypuszcza się, że dodatek grafenu wpływa na szybkość formowania się pęcherzyków produktów rozkładu termicznego [33]. Inne badania z użyciem nanorurek węglowych wskazują na to, że zwiększenie przewodności termicznej po dodaniu nanomateriałów powoduje zwiększenie odporności termicznej, w wyniku



Ryc. 2. Nanomateriały węglowe : A-fulereny (0D), B-nanorurki (1D), C-grafen (2D)
 Fig. 2. Carbon based nanomaterials: A - fullerenes (0D), B - nanotubes (1D), C - graphene (2D)

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

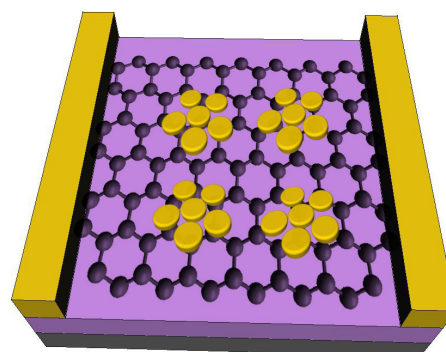
lepszego rozprzewadzenia ciepła w masie [34]. Dodatkowo, inne badania wykazały, że nanorurki węglowe bardzo dobrze „wyłapują” wolne rodniki [35]. Jest to pożądana właściwość tych materiałów, biorąc pod uwagę, że mechanizm spalania jest wolnorodnikowy. Znacząca liczba używanych dzisiaj materiałów to tworzywa sztuczne, w dużej mierze termoplasty – czyli tworzywa, które stają się plastyczne w podwyższonej temperaturze. Jest to pożądana w przetwórstwie cecha pozwalająca wytwarzać gotowe elementy poprzez tłoczenie i wtryskiwanie do form. Niestety, ten rodzaj polimerów podczas pożaru zaczyna się topić, a jego płonące fragmenty odpadają, przenosząc płomień dalej [36]. Zastosowanie kompozytów na bazie termoplastów i zawartości nanowypełniaczy na poziomie 2% (wag.) może znacząco ograniczyć to zagrożenie poprzez katalizę rozkładu termicznego polimeru w kierunku zwęglania. Dzięki temu materiał nie topi się, lecz tworzy stałą zwęgloną masę [37–38]. Wypełniacze z nanogliny zmieniają właściwości reologiczne materiału, przez co tworzywo w podwyższonej temperaturze nie ma tendencji do kapania [39]. Takie tworzywo nadal można tłoczyć pod ciśnieniem do form, a linia technologiczna pozostaje niezmienną. Działanie nanododatków może powodować powstawanie na powierzchni palącego się materiału zwęglonej porowatej warstwy, która będzie stanowiła fizyczną barierę utrudniającą migrację utleniacza i produktów rozkładu termicznego. Dzięki temu proces spalania zostanie skutecznie zahamowany. Już 30 nm grubości warstwy chitozanu i soli kwasu poli(winylo-sulfonowego) na piance poliuretanowej zmniejsza o połowę całkowitą ilość wydzielonego ciepła, jednocześnie nie wpływając na właściwości mechaniczne pianki [40]. Równie obiecujące wyniki dało zastosowanie nanorurek i nanogliny jako wypełniacza [41–42]. Dzięki takim materiałom możliwa jest produkcja materiałów o zwiększonej odporności na wysoką temperaturę bez konieczności stosowania związków halogeno-pochodnych, które znane są ze swojej toksyczności i korozyjności [43].

Podsumowując, główne funkcje, jakie pełnią nanocząstki w procesie modyfikacji ogniochronnej, to tworzenie porowatej warstwy, wpływanie na zwęglanie materiału (montmorylonit), działanie inhibycyjne na procesy rozkładu termicznego i spalania (grafen), poprawa przepływu ciepła w masie (nanorurki węglowe) oraz odbijanie promieniowania cieplnego (TiO_2). Te właściwości pozwalają podwyższyć temperaturę rozkładu oraz zmniejszają ilość wydzielającego się ciepła, co pozytywnie wpływa na ich właściwości pożarowe. Dodatki do tworzyw sztucznych mogą znacząco zmniejszyć zdolność materiału do tworzenia się palących kropli, przy nieznacznej zmianie właściwości reologicznych tworzywa.

3. Detekcja

Współczesne metody stosowane w profilaktyce pożarowej oraz metody działań gaśniczych znacząco różnią się od tych stosowanych kilkaset lat temu. Z punktu widzenia rozwoju pożaru niezwykle ważne jest jego wczesne wykrycie, najlepiej w początkowym stadium. Dawniej pożar można było wykryć poprzez obserwację pojawiającego się dymu lub wyczuć zapachu spalenizny. Dzisiaj dysponujemy instrumentami, które mogą wykryć bardzo małe stężenia cząstek dymu, wzrost temperatury, emitowane światło lub też charakterystyczne produkty spalania [44–45]. W początkowym stadium pożaru mamy do czynienia z emisją dymu oraz gazowych produktów rozkładu termicznego i spalania, podczas gdy temperatura wewnątrz obiektu nie zwiększa się znacząco. Emisja dymu w dużej mierze zależy od właściwości materiału, sposobu jego spalania oraz od fazy rozwoju pożaru. Dym, będący układem koloidalnym, w którym fazą rozproszoną jest ciecz lub ciało stałe, jest wczesną oznaką pożaru [46]. Nanotechnologia

pozwala na otrzymanie fotoelementów, których parametry znacząco przewyższają konwencjonalne materiały. Jednym z podstawowych elementów detektorów dymu jest stabilne źródło światła. W zależności od sposobu wykrywania dymu, rozproszeniowego czy absorpcyjnego, potrzebne jest źródło promieniowania o różnej długości fali i intensywności. Zwiększenie czułości można osiągnąć poprzez zastosowanie elementów fotoluminescencyjnych opartych na kropkach kwantowych QD-LED (Quantum Dot Light Emitting Device). Takie źródła światła charakteryzują się dużą stabilnością, wąskim przedziałem emitowanego światła oraz możliwością dostrojenia długości fali [47]. Drugim elementem czujek dymu jest czujnik światła, gdzie stosuje się różnego rodzaju fotoelementy, takie jak fotodiody. Dzięki użyciu nanodrutów opartych na arsenku galu (GaAs) [48], grafenu [49–50] lub innych materiałów [51–53], można zwiększyć czułość detektorów światła, jak również całych czujników dymu. Przykładowo czułość detektora na bazie nanodrutów GaAs/AlGaAs wynosi $7,2 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ przy długości fali 855 nm. Jest to wartość porównywalna do czujników z arsenku galu o dużej powierzchni [48]. W fazie badań są urządzenia nazywane nantenami, które są nanometryczną wersją normalnej anteny radiowej, z tą różnicą, że ze względu na swój rozmiar są w stanie absorbować fale świetlne [54]. Bardziej rozwinięte wersje urządzenia bazują na interakcji plazmonów cząstek złota z płaszczyzną grafenową (ryc. 3). Takie rozwiązania dają możliwości detekcji światła z niezwykle dużą czułością oraz w przedziale częstotliwości, które dotychczas charakteryzowały się małą wydajnością tj. podczerwieni [55].



Ryc. 3. Uproszczony schemat fotodetektora na bazie grafenu i złotych heptamerów

Fig. 3. Simplified scheme of photodetector based on gold heptamers and graphene

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

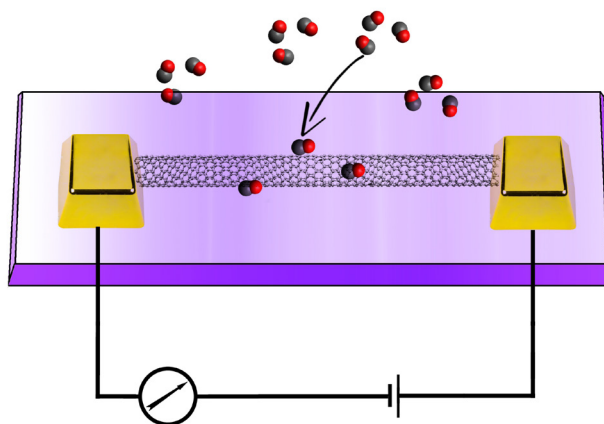
Wykazano, że emisja dymu zmniejsza się podczas spalania płomieniowego dla większości materiałów. W przypadku pojawienia się płomienia, produkty rozkładu termicznego ulegają utlenieniu do postaci gazowej, przez co zmniejsza się ilość emitowanego dymu [56–57], [28]. Najmniej zauważalnym sposobem spalania jest tlenie, w trakcie którego emitowane jest nie światło (w przeciwieństwie do żarzenia) a produkty rozkładu termicznego. Tłący materiał może przez długi czas pozostać niezauważony [58]. Ponieważ także w tym wypadku mamy do czynienia ze spalaniem, podczas tego procesu emitowane są gazowe produkty, takie jak tlenki węgla, które mogą zostać wykryte. Dwa podstawowe gazy wchodzące w skład spalin, które nie występują normalnie w powietrzu w zwiększonym stężeniu to CO_2 i CO. Oba gazy są bezbarwne i nie posiadają zapachu, więc ich wykrycie przez ludzi jest utrudnione. Najgroźniejszym z gazów spalinowych jest tlenek węgla z uwagi na swoją toksyczność [59]. Znaczą-

ca część ofiar pożarów ginie w wyniku zatrucia tym właśnie gazem. Ponieważ CO nie występuje normalnie w powietrzu, jego obecność jest bezpośrednim wskaźnikiem wystąpienia pożaru. W praktyce do alarmowania o niesprawnej wentylacji jako czujników używa się detektorów tlenku węgla np. w kominkach domowych. Bardzo rzadko takie czujniki używane są jako czujki w instalacji systemu alarmu pożarowego z uwagi na ich krótką żywotność (rzędu 5 lat) i dość wysoką awaryjność [60]. Do produkcji czujników gazów stosowane są najczęściej takie materiały jak: polimery, półprzewodnikowe tlenki metali lub porowata krzemionka. Materiały te nie są doskonałe i nadal trzeba zwiększać ich czułość i selektywność [61]. Do tego celu można zastosować nanomateriały, takie jak jednościenne nanorurki węglowe (ryc. 4 A), grafen (ryc. 4 B) oraz silicen (ryc. 4C).

Czujniki na bazie nanomateriałów węglowych pozwalają na wykrywanie różnych gazów (w tym CO) na poziomie pojedynczych molekuł [62]. Budowa takiego czujnika została przedstawiona na ryc. 5. Urządzenie analizuje właściwości elektryczne nanocząstki połączonej z elektrodami. Po zaadsorbowaniu danej cząsteczki (np. CO) zmieniają się właściwości elektryczne urządzenia. Najczęściej do tego celu są stosowane cząsteczki 1 i 2D w postaci nanorurek lub grafenu [63-64].

Niestety, ze względu na słabe oddziaływania struktury węglowej z tlenkiem węgla, zakres ich detekcji jest ograniczony [65]. Rozwiązaniem tego problemu jest zastąpienie grafenu jego krzemowym odpowiednikiem siliceniem, który ze względu na chemisorpcję wykazuje zwiększoną czułość w odniesieniu do tlenku węgla. Oddziaływania te są nieznaczne, dzięki czemu, po podgrzaniu cząsteczki CO desorbują z powierzchni, a czujnik wraca do swojego poprzedniego stanu. Czujnik działa poprawnie w atmosferze azotu, niestety obecność tlenu oraz pary wodnej obniża jego skuteczność [66]. Z tego powodu nadal prowadzone są prace w celu uodpornienia struktury na działanie tych cząsteczek. Innym rozwiązaniem problemu słabej adsorpcji CO jest funkcjonalizacja powierzchni węglowej heteroatomami lub selektywnymi cząsteczkami. Takie podejście pozwoliło już na otrzymanie detektorów takich cząsteczek jak cukry, dopamina, trinitrotoluen, nici DNA. Prawdopodobnie niedługo znajdzie ono zastosowanie również w detekcji tlenku węgla [67-69]. Z uwagi na niezwykle małe rozmiary i działanie na poziomie kwantowym czujniki na bazie nanomateriałów będą charakteryzować się niedużym

kosztem produkcji oraz bardzo niskim zużyciem energii, co pozytywnie wpłynie na czas ich eksploatacji [70]. Dodatkowo czułość na poziomie cząsteczkowym pozwoli wykrywać gazy spalinyowe już w początkowym etapie spalania, co pozwoli istotnie zmniejszyć zagrożenie pożarowe.



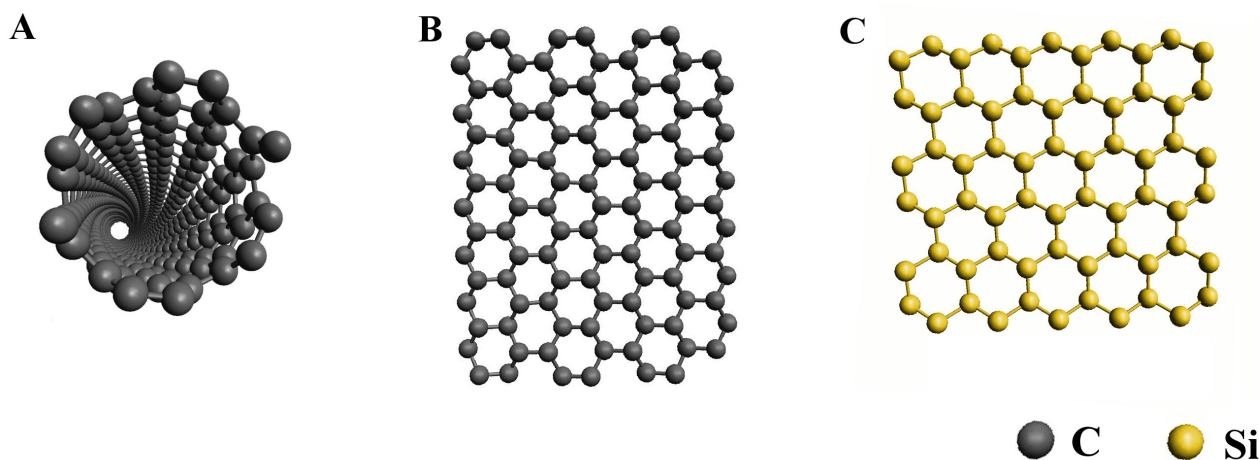
Ryc. 5. Uproszczony schemat detektora tlenku węgla opartego na nanorurkach węglowych

Fig. 5. Simplified scheme of carbon monoxide detector based on carbon nanotubes

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

4. Gaszenie

Mechanizm działania środków gaśniczych może być zróżnicowany. Efekt gaśniczy można uzyskać poprzez odcięcie dostępu tlenu, odebranie ciepła z płonącej powierzchni oraz inhibicję reakcji rodnikowych zachodzących w płomieniu [71]. Z uwagi na stan skupienia można wyróżnić środki gaśnicze: ciekłe, pianowe, proszkowe i gazowe. Nie każda substancja skutecznie ugasi dany pożar. Poza wodą do jednych z najczęściej stosowanych środków gaśniczych należą proszki gaśnicze. Średnica ich ziaren zawiera się w granicach 20-60 μm , a mechanizm działania polega na inhibicji procesów spalania [72]. Rozpylony proszek opada na powierzchnię płonącego materiału i odcina dostęp tlenu poprzez utworzenie szklistej warstwy (proszki fosforanowe). Dodatkowo proszki na bazie węglanów w wyniku rozkładu termicznego



Ryc. 4. Struktura atomowa

A - jednościennej nanorurki węglowej, B - grafenu, C - silicenu

Fig. 4. Atomic structure of

A - singlewalled carbon nanotube, B - graphene, C - silicene

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

emitują CO₂ i parę wodną, które wypierają tlen [73]. Proszki gaśnicze są też stosowane do tłumienia wybuchów, gdzie zaaplikowane w strefę spalania powstrzymują wybuch przed rozwinięciem się do znaczących rozmiarów [74]. Typowe proszki gaśnicze są mało skuteczne w gaszeniu płomienia gazowego, ponieważ ich powierzchnia kontaktu, jak i czas sedimentacji nie są wystarczające. Nanoproszki o średnicy ziarna ~100 nm opadają w powietrzu z prędkością 7,3 cm/dzień, a ich powierzchnia właściwa jest rzędu 25-100 m²/g, przez co ich wydajność gaszenia jest około 30 razy większa w porównaniu do konwencjonalnych proszków. Należy jednak pamiętać, że nie każdy nanomateriał będzie wykazywał działanie gaszące. Niektóre proszki, jak na przykład NiO wykazują działanie katalityczne, przez co przyspieszają spalanie. W celach gaśniczych dobrze sprawdza się ZrO₂, którego działanie inhibujące spalanie metanu zostało udowodnione [75]. Poza wolnym opadaniem i właściwościami inhibicyjnymi nanoproszki, jak każdy nanomateriał charakteryzują się również wysoką wydajnością. Z powodu dużej powierzchni właściwej już nieznaczna ilość proszku może stworzyć chmurę aerozolu skutecznie gaszącą płomień.

Innym rozwiązaniem jest zastosowanie mikrokapsulek zawierających aktywny środek gaśniczy. W warunkach normalnych kapsułki wielkości 10-50 μm zachowują się jak zwykły proszek, przez co nie oddziałują chemicznie na otoczenie. W warunkach podwyższonej temperatury następuje ich rozrwanie i uwolnienie środka gaśniczego bezpośrednio w strefie spalania. Takie rozwiązanie pozwala na zmniejszenie gaśnicy do podręcznych rozmiarów ~20 cm (ryc. 6). Dodatkowo, prosta budowa pozwala na jej użytkowanie bez potrzeby serwisowania przez okres 5 lat [76].



Ryc. 6. Gaśnica JE-100 używająca mikrokapsulek (Westpeace Fire Investment Holdings Ltd) [76]

Fig. 6. Fire extinguisher with microcapsules, model JE-100 (Westpeace Fire Investment Holdings Ltd) [76]

5. Podsumowanie

Nowoczesne rozwiązania materiałowe mogą przyczynić się do rozwoju ochrony przeciwpożarowej. Nanotechnologia może znaleźć zastosowanie w biernej i czynnej ochronie przeciwpożarowej oraz w rozwiązaniach z zakresu technik gaszenia. Największy postęp obserwuje się w zastosowaniu nanotechnologii do modyfikacji istniejących materiałów. Kompozyty wykorzystujące nanocząstki zyskują na odporności termicznej, co wpływa na zmniejszenie ryzyka przenoszenia pożaru poprzez odpadające od materiału palące się krople. Na uwagę zasługuje fakt, że nanowypełniacze są skuteczne już przy stężeniu 2% (wag.). Nowe materiały pozwalają zwiększyć czułość systemów służących do wykrywania pożaru oraz ich niezawodność. Detektory na bazie nanomateriałów pozwalają na wykrywanie produktów rozkładu termicznego i spalania z dokładnością do pojedynczych molekuł. Nowe źródła światła oraz jego czujniki mogą zwiększyć możliwości i niezawodność czujek dymowych. Nanotechnologia ma także istotny wkład w rozwój środków gaśniczych. Nowoczesne proszki gaśnicze, dzięki swoim niezwykle małym rozmiarom, są wydajniejsze

od proszków konwencjonalnych. Badania nad użyciem mikrokapsulek doprowadziły do stworzenia podręcznych gaśnic o bardzo długim okresie przydatności. Nanotechnologia stymuluje rozwój pozostałych dziedzin nauki, dając coraz lepsze rozwiązania technologiczne.

Literatura

- [1] Feynman R.P., *Plenty of Room at the Bottom*, Transkrypt wystąpienia w Pasadenie dla American Physical Society z grudnia 1959 roku.
- [2] Eigler D.M., Schweizer E.K., *Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope*, "Nature", Vol. 344, 1990, pp. 524-526.
- [3] Tiwari J.N., Tiwari R.N., Kim K.S., *Zero-dimensional, one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional nanostructured materials for advanced electrochemical energy devices*, "Progress in Materials Science" Vol. 57 Issue 4, 2012, pp. 724-803.
- [4] Kroto H.W., Heath J.R., O'Brien S.C., Curl R.F., Smalley R.E., *C₆₀: Buckminsterfullerene*, "Nature" Vol. 318, 1985, pp. 162-163.
- [5] Iijima S., *Helical microtubules of graphitic carbon*, "Nature" Vol. 354, 1991, pp. 56-58.
- [6] Byszewski P., Klusek Z., *Some properties of fullerenes and carbon nanotubes*, "Opto-Electronics Review", Vol. 9 Issue 2, 2001, pp. 203-210.
- [7] Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A., *Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films*, Science, Vol. 306 Issue 5696, 2004, pp. 666-669.
- [8] Lee D.W., Jin M.H., Lee C.B., Lee S.W., Park J.W., Oh D., Park J.C., Park J.S. *Straightforward Synthesis of Metal Nanoparticles and Hierarchical Porous Metals Assisted by Partial Film Boiling Phenomena*, "Chemistry of Materials" Vol. 27 Issue 15, 2015, pp. 5151-5160.
- [9] Sajti C.L., Sattari R., Chichkov B.N., Barcikowski S., *Gram Scale Synthesis of Pure Ceramic Nanoparticles by Laser Ablation in Liquid*, "The Journal of Physical Chemistry C", Vol. 114 Issue 6, 2010, pp. 2421-2427.
- [10] Wang X., Hall J. E., Warren S., Krom J., Magistrelli J. M., Rackaitis M., Bohm G. G. A., *Synthesis, Characterization, and Application of Novel Polymeric Nanoparticles*, "Macromolecules" Vol. 40 Issue 3, 2007, pp. 499-508.
- [11] Sonström P., Bäumer M., *Supported colloidal nanoparticles in heterogeneous gas phase catalysis: on the way to tailored catalysts*, "Physical Chemistry Chemical Physics", Vol. 13, 2011, pp. 19270-19284.
- [12] Rioux R.M., Song H., Hoefelmeyer J.D., Yang P., Somorjai G.A., *High-Surface-Area Catalyst Design: Synthesis, Characterization, and Reaction Studies of Platinum Nanoparticles in Mesoporous SBA-15 Silica*, "The Journal of Physical Chemistry B", Vol. 109, 2005, pp. 2192-2202.
- [13] Moon K.S., Dong H., Maric R., Pothukuchi S., Hunt A., Li Y., Wong C.P., *Thermal Behavior of Silver Nanoparticles for Low-Temperature Interconnect Applications*, "Journal of Electronic Materials", Vol. 34 Issue 2, 2005, pp. 168-175.
- [14] Łukaszczuk P., Mijowska E., Kaleńczuk R., *Selective oxidation of metallic single-walled carbon nanotubes*, "Chemical Papers", Vol. 67 Issue 9, 2013, pp. 1250-1254.
- [15] Ding B., Kim C.K., Kim H.Y., Seo M.K., Park S.J., *Titanium Dioxide Nanofibers Prepared by Using Electrospinning Method*, "Fibers and Polymers" Vol. 5 Issue 2, 2004, pp. 105-109.
- [16] Choi S., Park J., Hyun W., Kim J., Kim J., Lee Y. B., Song C., Hwang H.J., Kim J.H., Hyeon T., Kim D.H., *Stretchable Heater Using Ligand-Exchanged Silver Nanowire Nanocomposite for Wearable Articular Thermotherapy*, "ACS Nano", Vol. 9 Issue 6, 2015, pp. 6626-6633.
- [17] Khare R., Bose S., *Carbon Nanotube Based Composites-A Review*, "Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering" Vol. 4 Issue 1, 2005, pp. 31-46.
- [18] Liu Y., Kumar S., *Polymer/Carbon Nanotube Nano Composite Fibers-A Review*, "ACS Applied Materials & Interfaces" Vol. 6 Issue 9, 2014, pp. 6069-6087.

- [19] Kim J., Jinj Y., Han I., Choe D., *Flat Panel Display Using Carbon Nanotube*, Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2006, IEEE, pp. 888-889, [dok. elektr.] <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4195029>, [dostęp: 13.11.2015].
- [20] Wang Q.H., Setlur A.A., Lauerhaas J.M., Dai J.Y., Seelig E.W., Chang R.P.H., *A nanotube-based field-emission flat panel display*, "Applied Physics Letters" Vol. 72 Issue 22, 1998, pp. 2912-2913.
- [21] Borah J.P., Sarma K.C., *Optical and Optoelectronic Properties of ZnS Nanostructured Thin Film*, "Acta Physica Polonica A" Vol. 114 Issue 4, 2008, pp. 713-719.
- [22] Parreira P., Lavareda G., Valente J., Nunes F.T., Amaral A., Nunes de Carvalho C., *Optoelectronic properties of transparent p-type semiconductor CuxS thin films*, "Physica Status Solidi A" Vol. 207 Issue 7, 2010, pp. 1652-1654.
- [23] Novoselov K.S., *Nobel Lecture: Graphene: Materials In The Flatland*, "Reviews Of Modern Physics", Vol. 83, 2011, pp. 837-849.
- [24] Bianco A., Cheng H.M., Enoki T., Gogotsi Y., Hurt R.H., Koratkar N., Kyotani T., Monthieux M., Park C.R., Tascon J. M.D., Zhang J., *All in the graphene family – A recommended nomenclature for two-dimensional carbon materials*, "CARBON" Vol. 65, 2013, pp. 1-6.
- [25] Lin Y.M., Jenkins K.A., Valdes-Garcia A., Small J.P., Farmer D.B., Avouris P., *Operation of Graphene Transistors at Gigahertz Frequencies*, "Nano Letters" Vol. 9 Issue 1, 2009, pp. 422-426.
- [26] Stankovich S., Dikin D.A., Dommett G. H.B., Kohlhaas K.M., Zimney E.J., Stach E.A., Piner R.D., Nguyen S.T., Ruoff R.S., *Graphene-based composite materials*, "Nature" Vol. 442, 2006, pp. 282-286.
- [27] Su Y., Kravets V.G., Wong S.L., Waters J., Geim A.K., Nair R.R., *Impermeable barrier films and protective coatings based on reduced graphene oxide*, "Nature Communications" Vol. 5 Issue 4843, 2014, [dok. elektr.] <http://www.nature.com/ncomms/2014/140911/ncomms5843/full/ncomms5843.html> [dostęp 13.11. 2015].
- [28] Drysdale D., *An introduction to fire dynamics*, John Wiley & Sons Ltd., New York 1985.
- [29] Mazur J., Pustelny B., *Termofalowa metoda pomiaru dyfuzyjności cieplnej*, „Problemy Eksploatacji” Issue 3, 2008, pp. 177-188.
- [30] Devendra K., Rangaswamy T., *Evaluation of Thermal Properties of E-Glass/ Epoxy Composites Filled By Different Filler Materials*, "International Journal Of Computational Engineering Research" Vol. 2 Issue 5, 2012, pp. 1708-1714.
- [31] Iwko J., *Zachowanie się tworzyw sztucznych w warunkach pożarowych. Część II – pomiary palności oraz metody uniepalniania, tworzyw sztucznych*, „Tworzywa Sztuczne i Chemia” Vol. 6, 2009, pp. 24-29.
- [32] Von Gentzkow W., Huber J., Kapitza H., Rogler W., *Halogen-Free Flame-Retardant Plastics for Electronic Applications*, "Journal of Vinyl and Additive Technology" Vol. 3 Issue 2, 2004, pp. 175-178.
- [33] Yu J., Huang X., Wu C., Jiang P., *Permittivity, Thermal Conductivity and Thermal Stability of Poly(vinylidene fluoride)/ Graphene Nanocomposites*, "IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation" Vol. 18 Issue 2, 2011, pp. 478-484.
- [34] Moniruzzaman M., Winey K.I., *Polymer Nanocomposites Containing Carbon Nanotubes*, "Macromolecules" Vol. 39, 2006, pp. 5194-5205.
- [35] Galano A., *Carbon nanotubes: promising agents against free radicals*, "Nanoscale" Vol. 2, 2010, pp. 373-380.
- [36] Jurkowski B., Jurkowska B., Rydarowski H., *Niektóre aspekty badań palności kompozytów polimerowych*, „Czasopismo Techniczne. Mechanika R” Vol. 106, 2009, pp. 145-152.
- [37] Wu Z., Xue M., Wang H., Tian X., Ding X., Zheng K., Cui P., *Electrical and flame-retardant properties of carbon nanotube/poly(ethylene terephthalate) composites containing bisphenol A bis(diphenyl phosphate)*, "Polymer" Vol. 54, 2013, pp. 3334-3340.
- [38] Gilman J.W., Kashiwagi T., Lichtenhan J. D., *Nanocomposites: A Revolutionary New Flame Retardant Approach*, "SAMPE Journal", Vol. 33 Issue 4, 1997, pp. 40-46.
- [39] Si M., Zaitsev V., Goldman M., Frenkel A., Peiffer D. G., Weil E., Sokolov J.C., Rafailovich M.H., *Self-extinguishing polymer/organoclay nanocomposites*, "Polymer Degradation and Stability" Vol. 92, 2007, pp. 86-93.
- [40] Laufer G., Kirkland C., Morgan A.B., Grunlan J.C., *Exceptionally Flame Retardant Sulfur-Based Multilayer Nanocoating for Polyurethane Prepared from Aqueous Polyelectrolyte Solutions*, "ACS Macro Letters" Vol. 2, 2013, pp. 361-365.
- [41] Kim Y.S., Davis R., *Multi-walled carbon nanotube layer-by-layer coatings with a trilayer structure to reduce foam flammability*, "Thin Solid Films" Vol. 550, 2014, pp. 184-189.
- [42] Kim Y.S., Harris R., Davis R., *Innovative Approach to Rapid Growth of Highly Clay-Filled Coatings on Porous Polyurethane Foam*, "ACS Macro Letters" Vol. 1, 2012, pp. 820-824.
- [43] Wojtala A., *Właściwości kompozytów polietylenowych z udziałem modyfikowanego związkami silanowymi wodorotlenku magnezu i dodatkiem acetyloacetianu żelaza III*, „Polimery” Vol. 56 Issue 2, 2011, pp. 114-120.
- [44] Markowski W., *Czułość czujek pożarowych Cz. I*, „Systemy alarmowe” Issue 2, 2008, pp. 54-58.
- [45] Markowski W., *Czułość czujek pożarowych Cz. II*, „Systemy alarmowe” Issue 3, 2008, pp. 58-61.
- [46] Samborski, T., Koziół, S., Zbrowski, A., Stępień P., *Koncepcja modelowego systemu do badań osłon przeciwwietrznych z czujkami dymu*, „Problemy Eksploatacji” Issue 1, 2012, pp. 87-97.
- [47] Wood V., Bulović V., *Colloidal quantum dot light-emitting devices*, "Nano Reviews" Vol. 1, 2010, [dok. elektr.] <http://www.nano-reviews.net/index.php/nano/article/view/5202> [dostęp 13.11.2015].
- [48] Dai X., Zhang S., Wang Z., Adamo G., Liu H., Huang Y., Christophe Coueteau, Cesare Soci, *GaAs/AlGaAs Nanowire Photodetector*, "Nano Letters" Vol. 14, 2014, pp. 2688-2693.
- [49] Klekachev A.V., Nourbakhsh A., Asselberghs I., Stesmans A. L., Heyns M. M., De Gendt S., *Graphene Transistors and Photodetectors*, "The Electrochemical Society Interface" Vol. 22 Issue 1, 2013, pp. 63-68.
- [50] Li J., Niu L., Zheng Z., Yan F., *Photosensitive Graphene Transistors*, "Advanced Materials" Vol. 26, 2014, pp. 5239-5273.
- [51] Jiang C., Song J., *Significant Photoelectric Property Change Caused by Additional Nano-confinement: A Study of Half-Dimensional Nanomaterials*, "Small" Vol. 10 Issue 24, 2014, pp. 5042–5046.
- [52] Pradhan B., Setyowati K., Liu H., Waldeck D. H., Chen J., *Carbon Nanotube-Polymer Nanocomposite Infrared Sensor*, "Nano Letters" Vol. 8 Issue 4, 2008, pp. 1142-1146.
- [53] Zheng W., Li X., Dong C., Yana X., He G., *Fabrication of a visible light detector based on a coaxial polypyrrole/TiO2 nanorod heterojunction*, "RSC Advances" Vol. 4, 2014, pp. 44868-44871.
- [54] Kotter D.K., Slafer W.D., Novack S.D., Pinhero P., *Solar nantenna electromagnetic collectors*, ASME 2008 2nd International Conference on Energy Sustainability, Volume 2, Solar Thermal and Photovoltaic Power, American Society of Mechanical Engineers, U.S. 2008, 409-415.
- [55] Fang Z., Liu Z., Wang Y., Ajayan P.M., Nordlander P., Halas N.J., *Graphene-Antenna Sandwich Photodetector*, "Nano Letters" Vol. 12, 2012, pp. 3808-3813.
- [56] Kolbrecki A., *O dymotwórczości wyrobów budowlanych w czasie pożaru*, „Prace instytutu techniki budowlanej” 4(116), 2000, 47-56.
- [57] Konecki M., *Szacowanie zasięgu widzialności w dymie powstałym w czasie spalania wybranych gatunków drewna i materiałów drewnopochodnych*, „Prace instytutu techniki budowlanej” 2(134), 2005, 39-48.
- [58] Papis B., *Proces tlenia w materiałach budowlanych*, „Prace instytutu techniki budowlanej” 3(159), 2011, 29-39.
- [59] Omaye S.T., *Metabolic modulation of carbon monoxide toxicity*, "Toxicology" Vol. 180 Issue 2, 2002, pp. 139-150.
- [60] Ryan T. J., Arnold K. J., *Residential Carbon Monoxide Detector Failure Rates in the United States*, "American Journal of Public Health" Vol. 101 Issue 10, 2011, pp. e15–e17.

- [61] Liu X., Cheng S., Liu H., Hu S., Zhang D., Ning H., *A Survey on Gas Sensing Technology*, "Sensors" Vol. 12, 2012, pp. 9635-9665.
- [62] Schedin F., Geim A.K., Morozov S.V., Hill E.W., Blake P., Katsnelson M.I., Novoselov K.S., *Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene*, "Nature Materials" Vol. 6, 2007, pp. 652-655.
- [63] Wang Y., Yeow J.T.W., *A Review of Carbon Nanotubes-Based Gas Sensors*, "Journal of Sensors" Vol. 2009, 2009, [dok. elektr.] <http://www.hindawi.com/journals/js/2009/493904/> [dostęp: 13.11.2015].
- [64] Akbari E., Buntat Z., Ahmad M.H., Enzevae A., Yousof R., Iqbal S.M.Z., Ahmadi M. T., Sidik M.A.B., Karimi H., *Analytical Calculation of Sensing Parameters on Carbon Nanotube Based Gas Sensors*, "Sensors" Vol. 14, 2014, pp. 5502-5515.
- [65] Paula K.K., Farajian A.A., *Concentration Effects of Carbon Oxides on Sensing by Graphene Nanoribbons: Ab Initio Modeling*, "The Journal of Physical Chemistry C", Vol. 117 Issue 24, 2013, pp. 12815-12825.
- [66] Osborn T.H., Farajian A.A., *Silicene nanoribbons as carbon monoxide nanosensors with molecular resolution*, "Nano Research" Vol. 7 Issue 7, 2014, pp. 945-952.
- [67] Yang Y. J., Li W., *CTAB functionalized grapheneoxide/multiwalled carbonnanotube composite modified electrode for the simultaneous determination of ascorbic acid, dopamine, uric acid and nitrite*, "Biosensors and Bioelectronics" Vol. 56, 2014, pp. 300-306.
- [68] Sablok K., Bhalla V., Sharma P., Kaushal R., Chaudhary S., Suri C.R., *Amine functionalized graphene oxide/CNT nanocomposite for ultrasensitive electrochemical detection of trinitrotoluene*, "Journal of Hazardous Materials" Vols 248-249, 2013, pp. 322-328.
- [69] Zhang C.Y., Yeh H.C., Kuroki M.T., Wang T.H., *Single-quantum-dot-based DNA nanosensor*, "Nature Materials" Vol. 4, 2005, pp. 826-831.
- [70] Gilbertson L.M., Busnaina A.A., Isaacs J.A., Zimmerman J.B., Eckelman M J., *Life Cycle Impacts and Benefits of a Carbon Nanotube-Enabled Chemical Gas Sensor*, "Environmental Science & Technology" Vol. 48, 2014, pp. 11360-11368.
- [71] Wilczkowski S., *Działania inhibicyjne wybranych związków chemicznych stosowanych w środkach gaśniczych*, BiTP Issue 3, 2010, pp. 99-106.
- [72] Wilczkowski S., *Środki gaśnicze*, Szkoła Aspirantów Państwowej Straży Pożarnej, Kraków 1999.
- [73] Grynczel Z., Wilczkowski S., *Nowoczesne środki gaśnicze*, Instytut wydawniczy CRZZ, Warszawa 1976.
- [74] Szkudlarek Z., Klemens R., Gieras M., *Tłumienie wybuchu metanu z wykorzystaniem wysokociśnieniowej gaśnicy*, „Przegląd Górniczy” Vol. 70 Issue 4, 2014, pp. 74-80.
- [75] Huang Ch., Yang X., Lu L., Wang X., *Flame Retardant Property of Nanopowder Aerosols toward Methane*, "Chemical Papers" Vol. 60 Issue 2, 2006, pp. 102-110.
- [76] Specyfikacja techniczna gaśnic JE-100 Nano Particle Portables Fire Extinguisher firmy Westpeace Fire Investment Holdings Ltd.

* * *

dr inż. Paweł Łukaszczyk – tytuł magistra inżyniera zdobył na Politechnice Szczecińskiej na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej w dziedzinie technologii nowych materiałów. Pracę naukową rozpoczął od syntezy węglowych nanostruktur z wypełnieniem ferromagnetycznym do zastosowań medycznych. Stopień doktora uzyskał na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej w dziedzinie technologii chemicznej nieorganicznej. W swojej pracy naukowej zajmował się separacją nanostruktur węglowych z podziałem na ich właściwości elektryczne. Obecnie zajmuje stanowisko adiunkta na wydziale Techniki Morskiej i Transportu w Zespole Inżynierii Bezpieczeństwa. W swojej pracy naukowej autor bada właściwości pożarowe materiałów oraz prowadzi syntezę nowych uniepalniaczy.