

Anita Linka, Agnieszka Wróblewska

Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu

MOŻLIWOŚĆ WYKORZYSTANIA NANORUREK WĘGLOWYCH W OBSZARZE GENERAL AVIATION

Rękopis dostarczono, wrzesień 2018

Streszczenie: Nanotechnologia to stosunkowo młoda dziedzina nauki, która skupia się na poznawaniu oraz szerokim wykorzystywaniu technologii w skali nano. Materia w takim wymiarze wykazuje niejednokrotnie znacząco różne właściwości, które znajdują swoje zastosowanie w zupełnie nowych obszarach technicznych. General Aviation, tak jak każda inna dziedzina lotnictwa, nieustannie dąży do obniżania kosztów produkcji i eksploatacji statków powietrznych przy zachowaniu niezmiennych parametrów bezpieczeństwa oraz niezawodności. Systemy stosowane w lotnictwie np. komunikacyjnym zazwyczaj nie znajdują zastosowania w obszarze General Aviation ze względu właśnie na ich kosztowność. Przykładem może być system przeciwołodzienny stosowany w samolotach pasażerskich, który nie może być stosowany w przypadku samolotów obszaru GA ze względu na koszty oraz dodatkowe obciążenie konstrukcji. Nanorurki węglowe wykazują bardzo dobre właściwości hydrofobowe, dzięki czemu mogą okazać się doskonałym substytutem dla systemów z obszaru lotnictwa komunikacyjnego. Artykuł przedstawia rozważania na temat możliwości zastosowania poszczególnych właściwości nanorurek węglowych w obszarze lotnictwa ogólnego.

Słowa kluczowe: nanotechnologia, nanorurki węglowe, general aviation

1. WSTĘP

Nanotechnologia to stosunkowo nowa dziedzina nauki. Encyklopedia PWN definiuje ten obszar jako dziedzinę nauki i inżynierii materiałowej zajmującą się kontrolowanym wytwarzaniem nanostruktur i nanomateriałów oraz metodami służącymi do ich badania i modelowania [1]. Terminu ‘nanotechnologia’ jako pierwszy użył japoński naukowiec z Tokyo University of Science, Norio Taniguchi, który w 1974 roku podczas konferencji podał następującą, aktualną po dziś dzień definicję: Nanotechnologia jest produkcją z wykorzystaniem technologii w celu osiągnięcia bardzo wysokiej dokładności i wyjątkowo małych wymiarów, tzn. precyzji rzędu 1 nm [2]. Dziedzina ta zajmuje się więc projektowaniem oraz wytwarzaniem struktur, których przynajmniej jeden wymiar nie przekracza 100 nm, a cechy wynikające z wykorzystania skali nano wyróżniają się nowymi, nie znanymi dotąd właściwościami [3]. Olbrzymi potencjał nanotechnologii doceniony został w wielu dziedzinach

nauki i życia. Między innymi swoje zastosowanie nanomateriały znalazły w przemyśle zbrojeniowych, w medycynie, lotnictwie, budownictwie, ekologii i wielu innych, co pozwala na stwierdzenie, że nanotechnologia stanowić będzie ważny element w przyszłym rozwoju gospodarek światowych, a także wpłynie na zwiększenie tempa tego progressu [4].

2. OBSZAR ZASTOSOWAŃ NANOTECHNOLOGII

W literaturze przedmiotu można znaleźć określenia nanonauki jako „horyzontalna”, „kluczowa” lub „umożliwiająca”. Te przymiotniki odnoszą się do charakteru tej dziedziny, która może przenikać wszystkie obszary współczesnej techniki i inżynierii. Nanonauka cechuje się interdyscyplinarnością, umożliwia syntezę oraz współdziałanie różnych dziedzin naukowych, a także proponuje rozwiązania dotąd niespotykane dla powszechnych problemów. Nanotechnologię szeroko wykorzystuje między innymi medycyna. Jednym z przykładów zastosowania skali Nano mogą być rozważania nad wprowadzaniem leku bezpośrednio do chorych komórek (np. docieranie do komórek nowotworowych na drodze endocytozy [6]), ulepszanie właściwości bioaktywnych i biokompatybilnych implantów, czy konstruowanie miniaturowanych sond diagnostycznych. Kolejnymi obszarami zastosowań są również informatyka (nowe nośniki danych) czy technologia komputerowa (urządzenia kwantowe), gdzie wykorzystanie nanotechnologicznych rozwiązań może umożliwić błyskawiczny rozwój przy jednoczesnym zwiększaniu efektywności oraz energooszczędności. Nanonauka wywarła także ogromny wpływ na kształt współczesnego materiałoznawstwa. Nanocząstki stosuje się do wzmacniania lub zmiany właściwości materiałów oraz do poprawiania funkcjonalności kosmetyków. Dzięki nanostrukturom można modyfikować powierzchnie tak, aby były, np. suche albo sterylne, zmieniać ich wytrzymałość czy odporność na temperaturę lub wysokie ciśnienia, co umożliwia postęp w astronautyce i przemysłach kosmicznych [5]. Coraz częściej tworzy się również farby i lakiery z domieszką nanomateriałów, które wykazują znacznie lepsze właściwości.

W literaturze przedmiotu znaleźć można wiele przykładów wykorzystania nanotechnologii na różnych polach. Rysunek nr 1 przedstawia zestawienie obszarów najchętniej korzystających z osiągnięć inżynierii w skali nano, a także przykładowe zastosowania. Branża nanonauki rozwija się w tak błyskawicznym tempie, że niemożliwym jest wymienienie wszystkich płaszczyzn, na które oddziałuje [4].

Pamiętać jednak należy, że pomimo wielu niekwestionowanych zalet, nanocząsteczki ze względu na swoje bardzo małe rozmiary, mogą zachowywać się w sposób niespodziewany i niekontrolowany. Z tego powodu tak ważne jest, aby szczegółowo zaplanować i przeanalizować każdy etap ich produkcji, przechowywania, transportu, złomowania, a także możliwie najdokładniej przewidzieć skutki ich wykorzystania na każdym etapie cyklu życia. Jest to szczególnie trudne wyzwanie, ponieważ przewidywanie właściwości produktów nanotechnologii oraz potencjalnych zagrożeń płynących z ich wykorzystania wymaga jednoczesnego brania pod uwagę efektów zarówno fizyki klasycznej, jak i mechaniki kwantowej.



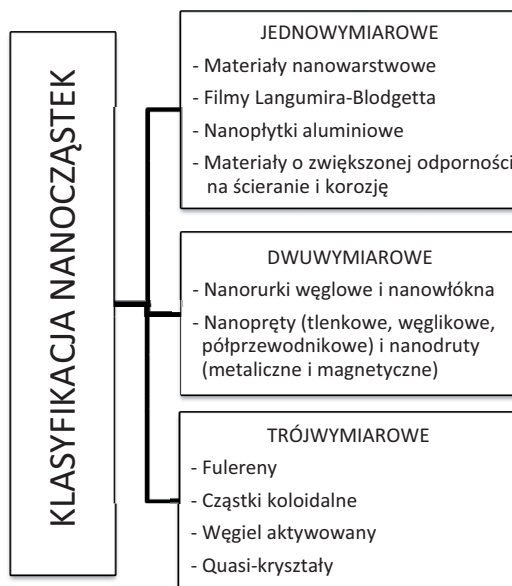
Rys. 1. Obszary i przykłady zastosowań nanotechnologii

Źródło: opracowanie własne na podstawie [4].

Sprawą nadrzędną jest więc zebranie możliwie jak najwięcej danych dotyczących zagrożeń dla życia i zdrowia człowieka obcującego z nanotechnologią, a także nie-korzystnego wpływu na środowisko (aspekt ekologiczny). Zbiór potencjalnych zagrożeń utworzony powinien zostać zarówno dla samych nanomateriałów, jak i dla tworzyw wykorzystujących omawianą technologię. Rozważyć należy narażenia występujące w całym cyklu życia produktu, czyli nanomateriału. Aktualnie wiedza na temat wpływu nanostruktur na zdrowie i życie człowieka jest niewielka. Dodatkowo w większości przypadków nie jest możliwe wykorzystanie znanych metod badania: toksykologicznych, ekotoksykologicznych oraz scenariuszy narażenia [5].

Uwzględniając pochodzenie i skład chemiczny możemy dokonać podziału nanocząstek na naturalne oraz te, które powstają w skutek działalności człowieka, czyli celowo projektowane (inżynierijnie) jak również niezamierzone, określane jako produkty uboczne, związane z procesami nanotechnologicznymi. Ze względu na pochodzenie, na: organiczne (wirusy, fulereny, nanorurki węglowe, dendrymery) oraz nieorganiczne [4].

Nanostruktury i nanocząstki klasyfikować można również zgodnie z kategoryzacją przedstawioną na rysunku nr 2.

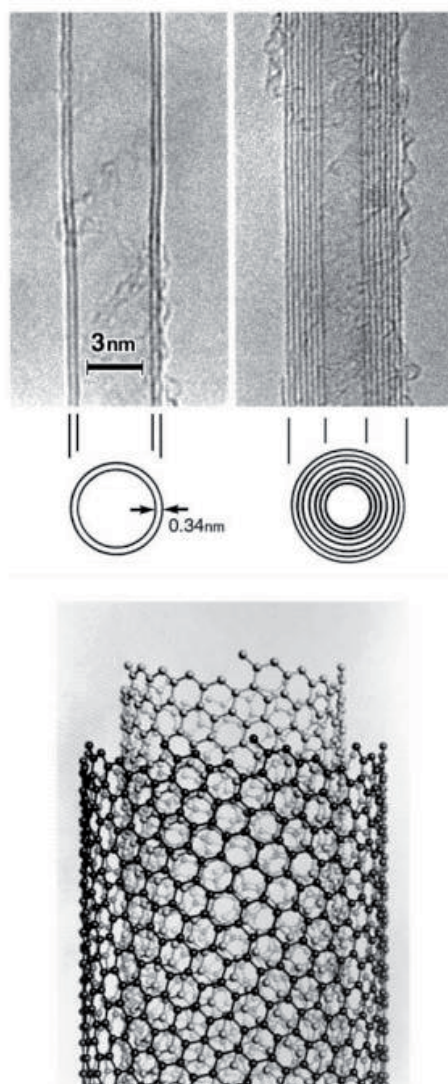


Rys. 2. Klasyfikacja nanocząstek
 Źródło: opracowanie własne na podstawie [10].

Ze względu na tematykę artykułu, omówione zostaną tylko cechy charakterystyczne dla nanorurek węglowych. Materiał ten znalazł zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu oraz nauki. Perspektywicznie nanorurki węglowe doskonale sprawdzą się w obszarze lotnictwa, np. dla wzmacniania oraz polepszania właściwości niektórych elementów konstrukcyjnych samolotu. Charakterystyka tej nanostruktury zawarta została w rozdziale nr 3 niniejszego artykułu.

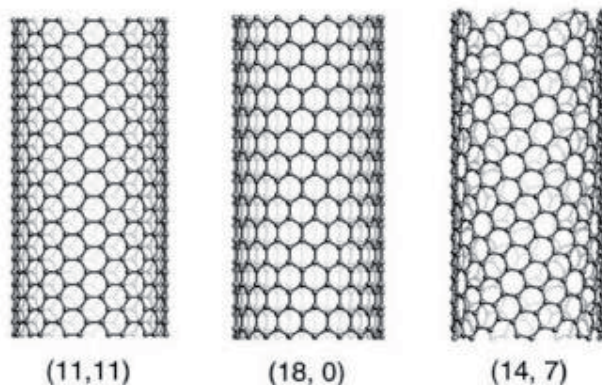
3. NANORURKI WĘGLOWE – CHARAKTERYSTYKA

Nanorurki węglowe (*carbon nanotubes* – CNT) odkryte zostały przez japońskiego fizyka Sumio Jijimie, który w opublikowanym w 1991 roku przez siebie dziele naukowym (*Helical microtubules of graphitic carbon*) opisał swoje obserwacje poczynione na próbce sadzy umieszczonej pod mikroskopem elektronowym. Zauważył on mianowicie włókna o średnicy zewnętrznej 4-30 nanometrów (nm) i długości sięgającej 1 mikrometra (μm), zbudowane z atomów węgla, które ze względu na swoją budowę nazwał nanorurkami węglowymi wielościenneymi (*multi-wall carbon nanotubes* - MWNT) (rys. 3) [12]. Tego typu struktury mogą przybierać różne kształty oraz właściwości. Każda z warstw może charakteryzować się innymi własnościami.



Rys. 3. Wielościenne nanorurki węglowe odkryte w 1991 r. [12]

Jednościenne nanorurki węglowe (*single-wall carbon nanotube* - SWNT) po raz pierwszy opisane zostały natomiast w 1993 roku. Złożone z jednego arkusza grafenu (rys. 4), o średnicach oscylujących między 04-2/3 nm najczęściej łączą się tworząc sześciokątne wiązki [12]. Rysunek 4 przedstawia SWNT różnych struktur, które jednocześnie charakteryzują się odmiennymi właściwościami. Nanorurka (11,11) jest doskonałym przewodnikiem, natomiast struktura typu zygzak to półprzewodnik [13].



Rys. 4. Jednościenne nanorurki węglowe: (11,11) struktura typu fotel, (18,0) struktura typu zygzak, (14,7) struktura typu skrętnego [12]

W przypadku MWNT występuje dodatkowo zjawisko defektów ściennych, które poprzez samonaprawienie tworzą połączenia mostkowe między sąsiednimi warstwami. Łączenia takie wypełniają miejsce brakujących atomów węgla i nazywane są bliznami [13]. Ze względu na defekty w heksagonalnej strukturze atomów węgla najczęściej spotyka się postać splątana, która przybiera formę penta-, hepta-, a nawet oktagonálną [11].

Te unikalne struktury prowadzą do unikalnych właściwości - wytrzymałość mechaniczna większa niż żelaza (Fe), gęstość mniejsza niż aluminium (Al.), odporność chemiczna porównywalna do grafitu [9] i termiczna stabilność w 14001 ° C w próżni. CNT wykazują także doskonałą wytrzymałość na rozciąganie oraz charakteryzują się dużą elastycznością [9]. SWNT dodatkowo emitują elektrony z ich końcówek, gdy są wystawione na działanie niewielkiego pola elektrycznego, co umożliwia ich zastosowanie w płaskich wyświetlaczach. Ich cienka przypominająca igłę struktura pozwala używać ich jako końcówek próbnych w skaningowym mikroskopie tunelowym oraz mikroskopie atomowym. Nanometryczne odstępy wewnątrz i wzdłuż SWNT powinny zapewnić dużą absorpcję gazu. Cienkie nanorurki mogą również służyć jako nadprzewodniki elektryczne czy dodane jako domieszka do paliw stanowiąc jego katalizator [11]. Ze względu na właściwości magnetyczne nanorurki węglowe należą do grupy diamagnetyków, co oznacza, że osadzone w zewnętrznym polu magnetycznym wytwarzają pole przeciwne, osłabiając właściwości pola zewnętrznego [9]. CNT wykazują też właściwości hydrofobowe, co pozwala na ich szerokie wykorzystanie w przemyśle.

Nanorurki węglowe, dzięki swoim niewielkim rozmiarom oraz niezwykłym właściwościom swoje zastosowanie znalazły w wielu dziedzinach życia oraz nauki. CNT są już szeroko stosowane w medycynie czy elektronice, a także zaczynają być doceniane w przemyśle zbrojeniowym oraz lotniczym, o czym traktuje kolejny rozdział niniejszego artykułu.

4. NANORURKI WĘGLOWE A WYKORZYSTANIE W PRZEMYSŁE LOTNICZYM

Korzyści nanotechnologii wykorzystywane są szeroko w wielu dziedzinach przemysłu oraz nauki, co opisane zostało we wcześniejszej części niniejszego artykułu. Oprócz szerokiego zastosowania w medycynie, budownictwie czy przemyśle żywnościowym, nanorurki węglowe doskonale sprawdzają się również w lotnictwie. Opisane w poprzednim rozdziale właściwości CNT pozwalają na tworzenie nowych technologii, które wspomóc mogą między innymi proces dążący do minimalizowania wagi statków powietrznych. Zmniejszanie ciężaru maszyny wiąże się ściśle z jej zasięgiem (odległość, którą samolot może pokonać bez uzupełniania paliwa [14]). Stosowanie nowych kompozytów z dodatkiem nanorurek węglowych do budowy statków powietrznych poprawia nie tylko ich właściwości mechaniczne oraz wytrzymałościowe, ale również pozwala na ograniczenie ciężaru. Przykładem takiego dokonania może być opracowanie zespołu naukowców z North Carolina State University (NCSU), którzy pod kierownictwem prof. Yuntian Zhu stworzyli nowy materiał kompozytowy, 10-krotnie lżejszy i o znacznie większej wytrzymałości niż ówczesnie wykorzystywane materiały [15].

Zarówno w lotnictwie cywilnym jak i wojskowym bardzo problematycznym okazuje się być zjawisko obładzania. Polega ono na tworzeniu się powłoki lodowej zarówno na powierzchni płatowca jak i elementach zespołu napędowego oraz jego instalacjach. Zjawisko to występuje nie tylko w locie, ale także na ziemi co może krytycznie wpłynąć na bezpieczeństwo pasażerów oraz powodzenie operacji lotniczej [16]. Obładzanie może skutkować kilkoma konsekwencjami, a mianowicie zmniejszeniem siły nośnej i wystąpieniem znacznych przyrostów oporu, przyrostem masy samolotu i zmianą położenia jego środka ciężkości, obłodzeniem ciśnieniowych urządzeń pilotażowych, co w efekcie daje błędne odczyty przyrządów ciśnieniowych (wysokościomierza barometrycznego, prędkościomierza, wariometru, wskaźnika liczby Macha) [16].



Rys. 5. Obładzenie krawędzi natarcia skrzydła samolotu Beechcraft King Air [21]

Rysunek 5 przedstawia oblodzoną krawędź natarcia samolotu Beechcraft King Air. Doktor Dawid Janas z Politechniki Śląskiej twierdzi, że wszystkie te problemy mogą zostać rozwiązane poprzez zastosowanie elastycznych arkuszy zbudowanych z nanorurek węglowych. Taki materiał wykorzystywałby doskonałe zdolności nanorurek do przewodzenia prądu elektrycznego wzdłuż nich. Doprowadzenie do folii nanorurkowej niewielkiego zasilania zapewniłoby podniesienie temperatury panującej na powierzchni, a tym samym zapobiegłoby efektowi powstawania powłoki lodowej [18]. Folia nanorurkowa może być bezpośrednio nanoszona na powierzchnię, znosi bardzo wysokie i bardzo niskie temperatury, a nawet silne środki chemiczne. Propozycja polskiego naukowca jest już testowana przez jednego z producentów branży lotniczej [20].

Kolejną odpowiedzią świata nauki na problem obladzania jest wykorzystanie powłok z nanotaśmami grafenu. Badacze postanowili zastąpić drogi grafen nanorurkami, które rozciągnęli tworząc z nich płaskie nanowarstwy. Kolejnym krokiem było, jak przy poprzedniej metodzie, doprowadzenie do materiału prądu elektrycznego, a tym samym ogrzanie powierzchni. Płachty pod postacią farby epoksydowej są przezroczyste, co umożliwiła ich szersze wykorzystanie np. na powierzchniach radarów czy szkła. Badacze są zdania, że oprócz ochrony antyoblodzeniowej skrzydeł samolotów, łopatek turbin wiatrowych, linii przesyłowych i innych powierzchni narażonych na niskie temperatury, powłoka może też pełnić funkcję dodatkowej ochrony przed uderzeniami piorunów [19].

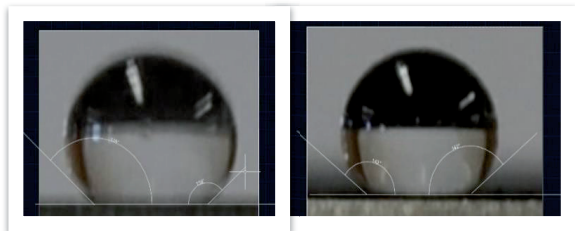
Badania w omawianym obszarze przeprowadzono również w 2016 roku w Boston Nano Lab przez międzynarodowy zespół naukowców, w tym przedstawicieli Politechniki Poznańskiej. Badania obejmowały tworzenie superhydrofobowych nanorurek i znalezienie najlepszego rozpuszczalnika, aby uzyskać duży kąt kontaktu z powierzchnią. Tabela nr 1 przedstawia wyniki uzyskane w badaniu.

Tab. 1

Kąty zwilżania badanych rozpuszczalników [materiały własne]

Lp.	SOLVENT	CONTACT ANGLE [°]	CONTACT ANGLE [°]	AVERAGE
1.	Hexane	130	127,5	128,75
2.	Toluene	130,5	122	126,5
3.	Tetrahydrofuran	141,5	142	141,75
4.	Cyclohexane	132,5	135,5	134
5.	Chloroform	130	126,5	128,25
6.	Dichloromethane	142,5	137,5	140

Im większy kąt, tym lepsze właściwości hydrofobowe. Przetestowano osiem rozpuszczalników, z których najlepiej sprawdziły się tetrahydrofuran i dichlorometan. Rysunek 6 pokazuje nanorurki we wspomnianych rozpuszczalnikach.



Rys. 6. Bamboo CNT w rozpuszczalnikach: Tetrahydrofuran i Dichlorometan [materiały własne].

W wyniku przeprowadzonych badań zespół zdołał stworzyć superhydrofobowe Nano rurki Bambusa CNT i nanorurki z SiO₂. Opracowano również sposób wytwarzania farby z dodatkiem hydrofobowych nanorurek w różnych rozpuszczalnikach. Teoretycznie zastosowanie takich farb na krawędziach natarcia samolotów powinno wyeliminować zjawisko oblodzenia. Rysunek 7 pokazuje wizualizację skrzydła z krawędziami pokrytymi warstwami CNT.



Rys. 7. Wizualizacja szybowca z CNT na krawędziach natarcia
[materiały własne]

Umożliwiając zmianę energii elektrycznej na ciepłą, CNT mogą również posłużyć przy odwrotnym procesie. D. Janas twierdzi, że możliwe jest, aby poprzez płachty nanorurkowe gromadzić oraz zamieniać odpadowe ciepło na energię elektryczną. Taki rodzaj ciepła, to energia, która produkowana jest np. w trakcie jazdy samochodem, ładowania telefonu czy pracy komputera. Montaż takich arkuszy np. w pojazdach mógłby znacznie zwiększyć ich wydajność. Dr Janas wskazuje na przykładowe wykorzystanie takich płacht w zegarkach, gdzie naturalne ciepło odzyskane z ciała człowieka zasilaloby mechanizm [22].

Nanorurki węglowe charakteryzują się doskonałym przewodnictwem cieplnym tylko wzdłuż swojej struktury, w poprzek materiału przewodzi ciepło w bardzo niewielkim stopniu [17]. Taką cechą wykorzystać można w celu precyzyjnego odprowadzania energii z miejsc szczególnie narażonych na nagrzewanie. W połączeniu z zaobserwowanymi przez amerykańskich naukowców właściwościami opóźniającymi palenie, CNT mogą idealnie sprawdzać się jako wierzchnie warstwy wlotów do silników statków powietrznych każdej konstrukcji oraz klasy. W aspekcie opóźniaczy palenia nanorurki węglowe mogą być wykorzystane także do produkcji siedzeń dla pasażerów oraz wszystkich elementów materiałowych, znajdujących się wewnątrz maszyny. Naukowcy z National Institute of Standards and Technology (NIST) udowodnili, że zastosowanie dodatkowej powłoki z nanorurek węglowych zmniejszyło palność materiału o 35% [23].

„W nanorurkach wielowarstwowych wewnętrzne warstwy są w stanie ślizgać się niemal bez tarcia wewnątrz zewnętrznych warstw, tworząc idealne atomowe łożyska. Właściwości w tym zakresie zostały zastosowane na etapie konstruowania pierwszych prostych molekularnych mechanizmów nanorotorów i nanopotencjometrów [17].”

W literaturze przedmiotu znaleźć można niezliczone przykłady zastosowań CNT. Poczynając od takich, które już znajdują swoje zastosowanie w życiu codziennym, a kończąc na propozycjach wydających się abstrakcją. Profesor inżynierii elektrycznej i informatyki z Uniwersytetu Michigan, Jay Guy twierdzi, że pokrycie całej powierzchni samolotu powłoką zbudowaną z CNT uczyni go niewidocznym dla radarów. Nanorurki węglowe pochłaniają znaczną część widma promieniowania, od mikrofal poprzez światło widzialne aż do ultrafioletu. Taka charakterystyka pozwala na wykorzystanie ich do budowy urządzeń o wysokiej czułości, takich jak sensory obrazowe [24]. Profesor Guy przeprowadził eksperyment, w którym na trójwymiarowych powierzchniach wyhodował pionowo CNT. Efektem było uzyskanie płaskiego, czarnego obrazu. Taki wynik jest konsekwencją współczynnika załamania światła nanorurek, który jest bardzo zbliżony do współczynnika załamania światła jaki posiada powietrze, a ich wielkości powodują natychmiastowe pochłanianie niemal całego światła. To z kolei świadczy o braku odbicia i rozproszenia wiązki światła. Na tej podstawie J. Guy stwierdził, że gdyby radar próbował namierzyć samolot pokryty farbą z tak wychodowanymi, pionowymi strukturami, nie doszłoby do odbicia i w konsekwencji nie uzyskano by żadnego obrazu [24].

5. PODSUMOWANIE

Dzięki swoim wyjątkowym właściwościom nanotechnologia wykorzystywana jest w różnych gałęziach przemysłu oraz dziedzinach nauki coraz częściej i szerzej. Technologia ta jest aktualnie jedną z najszybciej rozwijających się, a perspektywy jej dalszego rozwoju tworzą szanse dla rozwiązywania problemów dotąd niemożliwych do rozwiązania. Poprzez interdyscyplinarny charakter dziedziny jaką jest nanotechnologia, możliwe jest łączenie różnych technik oraz materiałów celem jeszcze lepszego wypełnienia luk współczesnej inżynierii. Nanotechnologia wykorzystywana jest aktualnie w wielu dziedzinach życia, między innymi w lotnictwie. W tym obszarze unikatowe właściwości skali nano swoje zastosowanie znajdują przede wszystkim w aspekcie wzmacniania oraz polepszania właściwości materiałów konstrukcyjnych służących do budowy maszyn [7][8].

Nanorurki węglowe są grupą nanoobiektów zróżnicowaną pod względem budowy, rozmiaru (długości i średnicy), kształtu oraz własności. Dzięki wielu interesującym właściwościom znajdują szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach [9]. CNT wykazują bardzo dobre cechy wytrzymałościowe oraz przewodzące, przez co docenione zostały również w lotnictwie. Przykładem może być wykorzystywanie nanomateriałów w formie systemów antyoblodzeniowych. Dzięki zastosowaniu nanopowłok możliwe jest nie tylko ograniczenie masy statku powietrznego, co przekłada się na jego zasięg. Poprzez szerokie właściwości CNT farby z ich domieszką coraz częściej i chętniej są testowane i wykorzystywane w przemyśle lotniczym.

Bibliografia

1. <http://sjp.pwn.pl/slowniki/nanotechnologia.html>, dostęp 12.12.2017.
2. http://cutob-poznan.pl/files/19710/2.t_blaszczynski_nanotechnologie_w_budownictwie.pdf, dostęp 24.11.2017.
3. <http://www.chemia.uni.lodz.pl/acch/nanotechnologia.pdf>, dostęp 24.11.2017.
4. Kachel-Jakubowska M., Szymanek M., Dziwulska-Hunek A.: Nano-technologie – możliwości rozwoju i zastosowań, Materiały Konferencyjne Innowacje W Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, Tom 1, Zakopane, 2015
5. Maliszewska-Mazur M.: Nanotechnologia – nowe wyzwania, nowe możliwości i nowe problem, Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych nr 45, 2010 r.
6. <http://www.chemia.uni.lodz.pl/acch/nanotechnologia.pdf>, dostęp 14.12.2017.
7. http://miesiecznikchemik.pl/wp-content/uploads/2015/01/chemik_2014_06-3.pdf, dostęp 14.12.2017.
8. http://www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk_pdf_2015/T1/t1_0092.pdf, dostęp 14.12.2017.
9. Świdwińska-Gajewska A.M., Czerczak S.: Nanorurki węglowe – charakterystyka substancji, działanie biologiczne i dopuszczalne poziomy narażenia zawodowego, Medycyna Pracy 2017;68(2): 259–276.
10. <http://laboratoria.net/artukul/15958.html>, dostęp 15.12.2017.
11. http://pkaero.prz.edu.pl/sprawozdania/KONF-12-13-12-2011/plakaty/ZB-06_2_PRZ.pdf, dostęp 15.12.2017.
12. Iijima S.: Carbon nanotubes: past, present, and future, Physica B 323 (2002) 1–5 (<https://research.physics.unc.edu/lcqm/group/qin/refs/2002-Iijima-PhysicaB.pdf>), dostęp 14.12.2017.
13. <http://chemia.waw.pl/nanorurki.htm>, dostęp 14.12.2017.
14. <https://sjp.pwn.pl/slowniki/zasi%C4%99g%20samolotu.html>, dostęp 14.12.2017.
15. <http://naukawpolsce.pap.pl/aktualnosci/news%2C392412%2Culepszony-kompozyt-z-nanorurek-weglowych.html>, dostęp 14.12.2017.
16. <http://blog.katowice-airport.com/2014-01-24/>, dostęp 14.12.2017.
17. <https://www.magazynprzemyslowy.pl/produkcja/Nowoczesne-materialy-w-lotnictwie,5361,1>
18. <http://naukawpolsce.pap.pl/aktualnosci/news%2C413289%2Cnowe-szanse-dla-nanorurek-polski-przepis-na-plachty-z-nanomaterialu.html>
19. <http://www.rynekfarb.pl/powloka-antyoblodzeniowa-z-nanotasmami-grafenu/>
20. <http://www.rynekfarb.pl/nanomaterialy-weglowe-i-projekty-polskiego-badacza/>
21. http://www.altair.com.pl/news/view?news_id=5384
22. <http://wmeritum.pl/polski-naukowiec-odkryl-zastosowanie-grafenu-przyszlosci-pomoc-usuwac-lod-samolotow/207284>
23. <http://www.rynekfarb.pl/nanorurki-weglowe-jako-opozniacze-palenia/>
24. <http://www.rynekfarb.pl/nanorurki-weglowe-i-niewidzialne-samoloty/>

POSSIBILITIES OF USING CARBON NANOTUBES IN GENERAL AVIATION

Summary: Nanotechnology is a relatively new field of science that focuses on technology at the nanoscale. Matter in this dimension often shows significantly different properties that find their application in completely new technical areas [1]. General Aviation, like every other area of aviation, constantly strives to reduce the costs of production and operation of aircraft while maintaining unchanged safety and reliability parameters. Systems used in aviation, for example communication, usually do not apply in the area of General Aviation because of their cost. An example of this is the anti-icing system used in passenger airliners, which cannot be used in GA aircraft due to the costs and additional construction load. Carbon nanotubes exhibit very good hydrophobic properties, thanks to that, they can turn out to be an excellent substitute for systems in the area of aviation transport.

Keywords: nanotechnologies, carbon nanotubes, general aviation