



Arkadiusz GARWOL ORCID 0009-0003-0684-4618, arkadiusz.garwol@gmail.com  
Gdańsk University of Technology (Politechnika Gdańska), Poland

## ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA MATERIAŁÓW INTELIGENTNYCH W LOTNICTWIE

### Analysis of the possibility of using smart materials in aviation

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano podstawowe typy materiałów inteligentnych i ich właściwości. Przywołano przykładowe zastosowania tego typu materiałów w przemyśle lotniczym oraz podjęto próbę analizy możliwości ich wykorzystania w przyszłości. Określono możliwe kierunki rozwojowe zastosowań materiałów inteligentnych w lotnictwie.

**Słowa kluczowe:** materiały inteligentne, stopy, właściwości

**Abstract:** The article presents the basic types of intelligent materials and their properties. Examples of applications of this type of materials in the aviation industry were mentioned and an attempt was made to analyze the possibilities of their use in the future. Possible development directions for the use of intelligent materials in aviation were determined.

**Keywords:** smart materials, alloys, properties

Received: April 5, 2024/ Revised: April 18, 2024/ Accepted: April 30, 2024/ Published: June 28, 2024



## 1. Wprowadzenie

Jednym z poważniejszych wyzwań stojących przed projektantami samolotów, od samego początku lotnictwa po dziś dzień, jest dobór materiałów użytych do konstrukcji. Z jednej strony umożliwiają one latanie coraz wyżej i coraz szybciej, ale z drugiej stanowią ograniczenie rozwoju. Z tego względu regularnie pojawia się konieczność zastąpienia używanych materiałów nowoczesnymi, by utrzymać postęp w lotnictwie i w ten sposób dalej wpisywać się w trend trwający już od ponad stu lat.

W typowej konstrukcji lotniczej, stworzonej u schyłku XX w., podstawowym zastosowanym materiałem jest metal, a dokładniej: stal, aluminium, tytan i ich stopy z innymi metalami. W 2000 r. udział masowy stali użytej w konstrukcji lotniczej wynosił ok. 8,1%. Wraz z rozwojem techniki lotniczej, nastąpiło wyraźne wyparcie stali przez metale takie jak tytan oraz aluminium. Nie wyparto jej natomiast z elementów konstrukcyjnych silników lotniczych, gdzie ma swoje zastosowanie do dziś [1].

W ostatnich latach coraz częściej można zetknąć się z zagadnieniem materiałów inteligentnych, stanowiących odpowiedź współczesnej nauki na ciągle zwiększające się zapotrzebowanie na materiały mogące zapewnić realizację coraz dalej idących wymagań stawianych konstrukcjom lotniczym.

Celem artykułu jest przeanalizowanie konstrukcji oraz zasad działania materiałów inteligentnych w kontekście możliwości ich zastosowania w konstrukcji statku powietrznego.

## 2. Pojęcie materiału inteligentnego

Obecnie nie ma ścisłej definicji pojęcia „materiał inteligentny”, jednak w ocenie autora najbardziej akceptowalną jest zaproponowana przez T. Takagi, zdaniem którego „materiał inteligentny to taki materiał, który jest zdolny do reagowania na bodźce zewnętrzne przez istotne zmiany swoich właściwości dla pożądanej i skutecznej odpowiedzi na te bodźce” [1,3]. Ponadto, zdaniem badaczy zajmujących się zagadnieniem materiałów inteligentnych w sensie informatycznym, ważne jest, by materiał inteligentny spełniał rolę czujnika, sensora lub procesora, przy czym niezwykle istotne jest, by jego właściwości wykazywały cechy sprzężenia zwrotnego [4].

Ogólna zasada działania materiałów inteligentnych opiera się na zmianie jednej lub kilku właściwości fizycznych w wyniku czynników zewnętrznych. A. Ćwikła, w pracy [5] jako czynniki zewnętrzne mające wpływ na działanie materiału inteligentnego podaje: temperaturę, ciśnienie, pole elektryczne, pole magnetyczne, wilgotność i światło. Natomiast w wyniku zastosowania materiału inteligentnego zmianie mogą ulec: kształt, kolor, struktura, przewodność, rozmiar i sprężystość.

Tabela 1

**Rodzaje oraz właściwości materiałów inteligentnych**

<b>Rodzaj materiału inteligentnego</b>	<b>Właściwości</b>
Materiały fotochromowe	Odwracalnie zmieniają barwę, w zależności od natężenia padającego na nie światła. Mogą to być substancje organiczne (np. azobenzeny, spiropyreny, diatyloteny) i nieorganiczne (np. dwutlenek tytanu połączony ze srebrem (Ag-TiO <sub>2</sub> ) - otrzymane w określonych warunkach oraz HfO <sub>2</sub> , CaF <sub>2</sub> ).
Materiały elektroluminescencyjne	Stosowane w technologii LED i OLED materiały radioluminescencyjne (emitują światło pod wpływem promieniowania jonizującego) np. ZnS.
Materiały zmieniające swój kształt lub wielkość	Polimery przewodzące, elastomery dielektryczne (odkształcają się pod wpływem przyłożonego napięcia elektrycznego), żełe polimerowe, materiały z pamięcią kształtu.
Materiały zmieniające temperaturę	Wykorzystują zjawisko termoelektryczne (czyli indukowanie napięcia pod wpływem różnicy temperatur w których umieszczone są końce jednego przewodnika. Najpowszechniej używanym materiałem z tej kategorii jest Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> ).
Materiały zmieniające swoją gęstość	Pozwalają na gwałtowną zmianę właściwości lepkosprężystych. Mogą zmieniać konsystencję z gęstego płynu do ciała stałego, w czasie rzędu kilku milisekund. Są to ciecze magnetoreologiczne i elektroreologiczne.
Materiały samogrupujące się	Materiały, których cząsteczki będące w stanie uporządkowanym łączą się ze sobą w wyniku procesu samoorganizacji, czyli łączenia atomów o strukturze nieuporządkowanej w strukturę uporządkowaną [6].
Materiały samonaprawiające się	Reagują na uszkodzenia strukturalne – np. pęknięcia, ubytki, wygięcia. Dzielą się na trzy grupy: materiały kompozytowe, mikrokapsułki, materiały samonaprawiające się katalityczne.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [7]

Na podstawie wielu parametrów materiałów inteligentnych, jakimi możemy manipulować, nasuwa się wniosek, iż są one bardzo wszechstronne i poprzez umiejętne ich zastosowanie, możemy znacząco zwiększyć funkcjonalność oraz efektywność eksploatacji wielu współczesnych statków powietrznych.

Na przestrzeni lat podział materiałów inteligentnych ulegał zmianom z uwagi na pojawianie się nowych grup tych materiałów w wyniku postępu technicznego [3]. Ich podstawowe rodzaje oraz właściwości opisano w tabeli 1.

Różnorodność i wszechstronność materiałów inteligentnych przyczynia się do ich coraz szerszej popularyzacji w różnych dziedzinach, w tym np. medycynie, transporcie, przemyśle samochodowym, mechanice oraz budownictwie. Autorzy pracy [8] zwracają uwagę, że „najważniejszymi materiałami z tej grupy są materiały piezoelektryczne, stopy z pamięcią kształtu, ciecze elektro- i magnetoreologiczne. W motoryzacji, mechanice, elektronice, budownictwie, jak również w zastosowaniach medycznych szczególnie popularne są materiały magnetoreologiczne, elektoreologiczne oraz z pamięcią kształtu” [8,9].

Zasadniczą cechą cieczy elektro- i magnetoreologicznych jest zmiana gęstości. Ciecze elektoreologiczne „są zawiesiną porowatych cząsteczek o średnicy 10 nm, takich jak polimery, w cieczy nieprzewodzącej, takiej jak chlorowane parafiny i oleje węglowodorowe” [10]. Naprężenia styczne w tych cieczach wynoszą 5 kPa, przy 5kV/mm. Nieco inne właściwości mają ciecze magnetoreologiczne. „Zawierają ferromagnetyczne cząsteczki o średnicach 1 do 5  $\mu\text{m}$  w olejach silikonowych (naprężenie styczne 100 kPa przy 250 kA/m)” [10]. Zasadą działania tego typu cieczy jest zmiana struktury cząsteczkowej w wyniku działania pola magnetycznego, które wówczas z chaotycznego ułożenia przechodzą w łańcuchy ułożone zgodnie z liniami sił pola magnetycznego. Zmiana ta dokonuje się w czasie nieprzekraczającym 10 ms. W przypadku wystąpienia silnego pola magnetycznego, ciecz zamienia się w masę przypominającą zamrożone masło. Ciecz tego typu może być wykorzystywana do budowy tłumików liniowych i obrotowych, które mogą być zastosowane do tłumienia drgań lin w konstrukcji mostów, przeciwdziałania skutkom trzęsień ziemi, czy też akumulatorów samochodowych [10].

### **3. Możliwości zastosowania nowych materiałów w silniku odrzutowym**

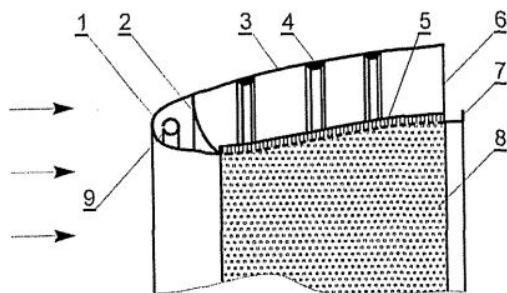
Podstawowym zadaniem silnika odrzutowego jest wytworzenie ciągu o jak największej wartości. Zapewnia to krótki start i dużą prędkość wznoszenia samolotu. Ponadto, ważnym aspektem jest zdolność do szybkiego przejścia z zakresu biegu jałowego na maksymalny (i odwrotnie) [11]. Niezwykle pożądaną są małe wymiary

gabarytowe, zwłaszcza poprzeczne, aby zmniejszyć szkodliwy opór aerodynamiczny. Ważne również, by silnik cechował się jak najmniejszą masą jednostkową, gdyż wpływa ona na zużycie paliwa. Prędkości obrotowe zespołów wirnikowych elementów silnika osiągają wartości rzędu kilku, kilkunastu tysięcy obrotów na minutę (np. dla silnika Rolls-Royce Olympus 535 jest równa 8500 obr/min, a dla silnika śmigłowego Allison 250-C20 już 52 000 obr/min) [12]. Ciśnienie w komorze spalania powinno być jak najwyższe, aby proces przemiany energii chemicznej zawartej w paliwie na energię gazów wylotowych był jak najbardziej efektywny. W silnikach stosowanych obecnie wynosi ona ok. 40 barów, a energia zawarta w strumieniu spalin opuszczających komorę spalania silnika K-15 na zakresie startowym przekracza 30 MW. Przy tym, musi cechować się jak najmniejszą masą jednostkową, gdyż wpływa ona na zużycie paliwa, które jest potrzebne by nadać maszynie prędkość postępową [12].

Aby spełnić powyższe, wysokie wymagania do konstrukcji silnika obecnie stosuje się specjalne, wysokowytrzymałe materiały – takie jak tytan lub stopowe stale żarowytrzymałe [12].

### **3.1. Wlot silnika odrzutowego**

Wlot silnika odrzutowego odpowiada za pobranie powietrza z atmosfery i w dalszej kolejności za przesłanie tego strumienia do dalszych sekcji silnika. Mają one wpływ na jakość strumienia powietrza, a co za tym idzie na pracę całego zespołu napędowego. Ilość pobranego powietrza oscyluje w granicach od 70–150 kg/s dla samolotów bojowych do 100–1200 kg/s dla samolotów transportowych. Prędkość strumienia powietrza we wlocie ma wartość bliską 200 m/s [13]. To wszystko oraz ciśnienie działające na wewnętrzne i zewnętrzne powierzchnie wlotów generuje spore obciążenia, które w dużej mierze są związane z oddziaływaniem sił masowych, promieniowych oraz osiowych. Podczas lotów manewrowych i odrywania się samolotu od drogi startowej powstają siły aerodynamiczne [11]. Budowę typowego wlotu silnika przedstawia rys.1.



**Rys. 1.** Schemat budowy wlotu współczesnego silnika Rolls-Royce do samolotu pasażerskiego: 1 – osłona profilowana, 2 – wręga przednia, 3 – pokrycie zewnętrzne, 4 – wzmocnienie, 5 – izolacja akustyczna, 6 – wręga tylna, 7 – kołnierz do mocowania wlotu do silnika, 8 – wewnętrzne pokrycie perforowane, 9 – przewody rurowe instalacji przeciwbłędzeniowej [11]

Wlot przedstawiony powyżej posiada „osiowosymetryczny chwyt powietrza, którego osłona profilowana została wykonana z duralu lub stali. Wewnątrz osłony znajdują się stalowe przewody rurowe instalacji przeciwbłędzeniowej doprowadzające powietrze ze sprężarki ogrzewające chwyt. Pokrycie zewnętrzne wlotu wykonane jest z kompozytu usztywnionego pasami z kompozytu węglowego lub wręgami metalowymi, natomiast pokrycie wewnętrzne stanowi perforowana blacha stalowa, za którą znajduje się izolacja akustyczna w postaci aluminiowej struktury typu ‘plaster miodu’. Wlot wzmocniony jest dwiema wręgami – przednią wykonaną z tytanu oraz tylną ze stali, i przykręcany jest do kadłuba wentylatora za pośrednictwem stalowego kołnierza” [11].

Materiałem, który warto rozważyć do konstrukcji wlotu silnika, jest materiał opracowany przez naukowców z Uniwersytetu w Connecticut. Zespół pod przewodnictwem dr. Seok-Woo Lee zbudował strukturę opartą na samoorganizującym się DNA, które pokryto bardzo cienką (grubości kilkuset atomów) warstwą materiału podobnego do szkła. Na skutek pokrycia szkłem jedynie nici DNA, duża część objętości stworzonego materiału pozostała pusta, co wydatnie zmniejszyło masę, całej struktury [14]. Gdy mówimy o samoorganizującym się DNA, mamy na myśli powstawanie struktur o uporządkowanej budowie ze struktury o budowie chaotycznej.

### 3.2. Wylot silnika odrzutowego

Specyfika pracy wylotu polega na wyprowadzeniu spalin z silnika oraz redukcji jego temperatury do minimum. Ma to szczególne znaczenie w przypadku wojskowych statków powietrznych, gdzie wysoka wartość temperatury gazów wylotowych z silnika powoduje lepszą wykrywalność samolotu przez rakiety naprowadzane termicznie. Zdaniem

M. Trepczyńskiej-Lent, „Podczas startu samolotu wyrzucony z silników strumień gorącego powietrza powoduje podgrzanie, a następnie odkształcenie 14-calowych trójkątnych płytek osadzonych na dyszy. Powoduje to mieszanie powietrza z otoczenia z powietrzem z dysz silnika. Następnie skutkuje dławieniem przepływu nawet o połowę i spadek prędkości strumienia zaraz za wylotem silnika. Po osiągnięciu przez samolot poziomu, na którym temperatura znacznie spada następuje ochłodzenie końcówek zawierających stopy z pamięcią kształtu. Powoduje to powrót dyszy do poprzedniego kształtu. Metoda ta, pozwala na redukcję masy samolotu (mniejsza grubość izolacji to mniejszy hałas), a co za tym idzie zmniejszenie ilości spalanej paliwa” [4,15].

## **4. Zastosowanie czujników piezoelektrycznych**

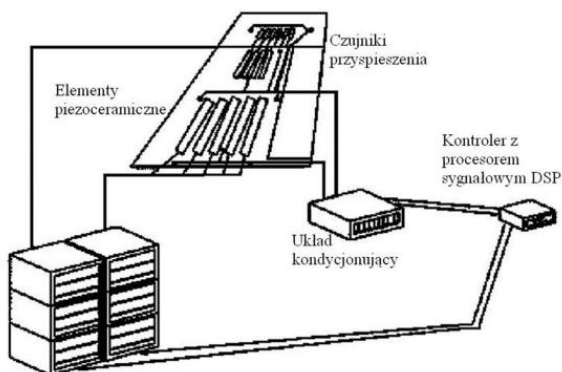
Na uwagę zasługuje zagadnienie efektu piezoelektrycznego, jako generowanie ładunku elektrycznego pod wpływem odkształcenia mechanicznego. Materiały z takim efektem mogą również zmieniać geometrię pod wpływem pola elektrycznego. Zdaniem C. Miller, to zjawisko może zostać wykorzystane w celu zastąpienia konwencjonalnych siłowników hydraulicznych [16]. Takie rozwiązanie mogłoby zostać zastosowane w układach mechanizacji skrzydła, co przyczyniłoby się do rozłożenia obciążeń skrzydła działających u jego nasady, wzdłuż żebra, a nie na główny punkt obrotu skrzydła.

Przetworniki piezoelektryczne cechują się małą masą oraz bardzo przystępną formą. Mogą być one tanio wytwarzane, w postaci cienkich arkuszy lub włókien, które osadzone w konstrukcji samolotu pozwolą na uzyskanie wysoce dopasowującego się, inteligentnego materiału [16].

Najbardziej znane materiały tego typu składają się z ceramiki. Jest to np. tytanian cyrkonu ołowiu ( $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ ) – bardziej znany pod oznaczeniem PZT [16]. Po ściśnięciu materiału wytwarza on napięcie elektryczne i zmienia kształt po przyłożeniu zewnętrznego pola elektrycznego. Względna przenikalność elektryczna tytanianu cyrkonu ołowiu wynosi od 300 do 2000  $F/m$ . Wartością tą możemy manipulować, poprzez zmianę orientacji materiału oraz użycie domieszek w procesie wytwarzania materiału.

PZT ma szerokie zastosowanie – od siłowników, po czujniki drgań [17]. W ciągu ostatnich lat głównym kierunkiem badań jest zastosowanie materiałów piezoelektrycznych w zakresie kontroli wibracji, hałasu, uszkodzeń oraz monitorowania stanu konstrukcji [18]. Przykładem zastosowania tego rodzaju materiałów jest system aktywnej kontroli tłumienia drgań konstrukcji ogona samolotu, opracowany przez firmę ACX na zamówienie U.S. Air Force. System ten pozwala na zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej ogona samolotu poprzez redukcję drgań wywołanych opływem powietrza podczas lotu z dużą prędkością [5].

Układ ten działa w oparciu o piezoelektryczne, odkształcalne elementy wykonawcze. Elementami pomocniczymi są czujniki przyspieszeń i odkształceń, których zadaniem jest dostarczenie informacji do sterownika działającego w oparciu o procesor sygnałowy. Zadaniem sterownika jest przygotowanie sygnałów, które następnie przez wzmacniacz wysokiego napięcia wysyłane są do elementów wykonawczych [5].



Rys. 2. Schemat układu redukcji drgań w ogonie samolotu [5]

## 5. Materiały z pamięcią kształtu

Materiał z pamięcią kształtu może reagować na zmiany wartości temperatury lub ciśnienia poprzez odkształcenie, które w pewnych warunkach zostaje zniwelowane. Dzięki małym wymiarom i masie materiały te są z powodzeniem stosowane w przemyśle kosmicznym [18].

Efekty pamięci kształtu mogą być rozpatrywane dwojako. Ze względu na zjawisko je indukujące wyróżnia się: termosprężne stopy z pamięcią kształtu (stopy Ni-Ti, Cu-Al, Cu-Zn-Al) i materiały pozwalające na zmianę orientacji krystalicznej martenzytu za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego (stop Ni-Mn-Ga) [19]. Jeśli natomiast chodzi o specyfikę efektu pamięci kształtu, należy dokonać klasyfikacji na efekt jedno- i dwukierunkowy. Jednokierunkowy efekt pamięci kształtu zachodzi w niższych temperaturach. Wówczas mamy do czynienia ze strukturą martenzytyczną (która jest stabilna w niskich temperaturach lub pod wpływem dużego naprężenia). Wraz ze wzrostem temperatury, struktura materiału zmienia się na austenityczną, a metal powraca do kształtu sprzed odkształcenia. Dwukierunkowy efekt pamięci kształtu opiera się na powrocie metalu do fazy austenitycznej w wyższej temperaturze, a po ochłodzeniu powraca do stanu martenzytycznego [18].



Materiał nowego typu rozważany do zastosowania w siłownikach używanych w mechanizacji skrzydeł musiałby cechować się dużą elastycznością, tak aby obniżyć do minimum ilość energii potrzebnej do poprawnego działania całego elementu. Z powodu długiego, asymptotycznego czasu, jaki jest potrzebny na zmianę kształtu materiału, obecnie nie ma surowców, które byłyby zdolne do przejęcia roli siłowników. Podstawową wadą tego typu stopów jest wysoki koszt ich produkcji. Podlegają one również zmęczeniu funkcjonalnemu, co może mieć wpływ na efektywność eksploatacyjną wykonanych z nich elementów. Ponadto, temperaturowy próg zmiany kształtu materiału może być trudny do kontrolowania, co może wpływać na zmniejszenie wydajności eksploatacyjnej statku powietrznego [18].

Kolejnym zastosowaniem jest wykorzystanie drutów z pamięcią kształtu do wychylania klap w skrzydle. Takie rozwiązanie zastępuje stosowany system hydrauliczny, który cechuje się dużą złożonością konstrukcji, masą oraz dużymi wymaganiami eksploatacyjnymi. Zastosowanie drutów z pamięcią kształtu znacząco upraszcza konstrukcję skrzydła i ma większą sprawność niż obecnie powszechnie stosowany system hydrauliczny. Zasada działania tego systemu opiera się na dwóch drutach umieszczonych w górnej i dolnej części skrzydła. W przypadku podniesienia kłapy w górę, górny drut zostaje podgrzany i ulega skróceniu. Efekt ten umożliwia działania pola elektrycznego dostarczanego przez instalację elektryczną. Tego typu rozwiązanie zostało zastosowane w amerykańskim samolocie B-2 Spirit [5].

Po przytoczeniu ww. przykładów może nasunąć się pytanie, czy skoro w pojedynczych fragmentach konstrukcji samolotu są stosowane materiały inteligentne, to dlaczego nie możemy ich zastosować w konstrukcji całego płatowca? Odpowiedź na to pytanie znajdziemy w centrum badawczym NASA w Wirginii, gdzie naukowcy budują samoloty, które mogą zmieniać się w czasie lotu. Inspirację do tego rozwiązania (zresztą jak większość rozwiązań w lotnictwie) zaczerpnięto z natury. Tworzone tam samoloty będą mogły jak ptaki zmieniać swój kształt i dostosowywać się do panujących warunków [5].

## **6. Wnioski i podsumowanie**

Po przeprowadzeniu powyższej analizy można stwierdzić, że materiały inteligentne mogą być stosowane w konstrukcjach lotniczych. Zalety ich stosowania przewyższają wady – usprawnienie konstrukcji lotniczych poprzez zmianę obecnie stosowanych materiałów na materiały inteligentne przyniosłoby spore korzyści. Na obecnym etapie prac nie wszystkie elementy mogą z powodzeniem zostać zastąpione wykonanymi z materiałów nowej klasy. Dziedzina ta jednak cały czas ewoluuje i można spodziewać

się, że wraz z upływem czasu dojdzie do opracowania materiałów zdolnych do pracy pod jeszcze większym obciążeniem niż stosowane obecnie.

Typami materiałów inteligentnych, które mogą mieć najszersze zastosowanie w lotnictwie, są materiały z pamięcią kształtu i materiały piezoelektryczne.

Zastosowanie materiałów inteligentnych jest niewątpliwie bardzo szerokie i w ciągu następnych lat możemy spodziewać się wzrostu ich znaczenia w konstrukcjach lotniczych. Jest to zagadnienie innowacyjne i stwarzające spore możliwości w zakresie optymalizacji konstrukcji lotniczych. Znakomitym miejscem do zastosowania materiałów inteligentnych są silniki samolotu, a dokładniej elementy turbiny. Jest to najbardziej newralgiczna część zespołu napędowego, która determinuje osiągi całego silnika. Gdyby doszło do opracowania turbiny, która byłaby w stanie pracować w wyższych temperaturach niż te obecnie stosowane, doszłoby do przełomu.

Ważną kwestią są możliwości materiałów inteligentnych w lotnictwie wojskowym, które charakteryzuje się koniecznością spełnienia bardziej restrykcyjnych wymagań konstrukcyjnych, z uwagi na inną specyfikę pracy podzespołów. Ważne jest, by wraz z postępowaniem w dziedzinie systemów przeciwlotniczych podejmować próby uczynienia samolotów wojskowych jeszcze bardziej niewidocznymi dla przeciwnika. Mogłoby to nastąpić poprzez umiejętne dobranie materiału, który umożliwiłby jeszcze większe ochładzanie spalin silnika, co uniemożliwiłoby przeciwnikowi wykrycie samolotu i jego neutralizację za pomocą pocisków naprowadzanych termicznie.

Wszystkie rodzaje materiałów inteligentnych, które zostały przedstawione w niniejszej pracy, mogą zostać zastosowane w lotnictwie. Należy jednak pamiętać, że materiały te – jak wszystkie, mają swoje ograniczenia.

Po przeanalizowaniu obecnie prowadzonych badań możemy wywnioskować, iż zastosowanie materiałów inteligentnych jest ograniczone. Należy jednak podkreślić, iż materiały te są produktami innowacyjnymi. Dlatego też nie możemy wykluczyć, iż badania przeprowadzone w przyszłości dadzą o wiele większe możliwości zastosowania tego typu materiałów.

Na szczególną uwagę zasługuje cena takich materiałów oraz koszty wprowadzenia zmian materiału na poziomie opracowywania konstrukcji. Jednakże, z uwagi na wysokie wymagania, jakie stawia się przed materiałami wykorzystywanymi w lotnictwie, cena nie jest najistotniejszym zagadnieniem. Opłacalność tego typu inwestycji należy rozpatrywać indywidualnie w każdym przypadku i na podstawie poprawnie przeprowadzonych obliczeń oraz szacunków podjąć decyzję, czy dana zmiana jest opłacalna, czy też nie.

## 7. Literatura

1. R. Bielawski, Wybrane zagadnienia z budowy statków powietrznych – Definicje, pojęcia i klasyfikacje, Warszawa: Akademia Obrony Narodowej, 2015. Available: [https://depot.ceon.pl/bitstream/handle/123456789/15156/WYBRANE\\_ZAGADNIENIA\\_Z%20BUDOWY\\_STATK%C3%93W\\_POWIETRZNYCH.pdf?sequence=1](https://depot.ceon.pl/bitstream/handle/123456789/15156/WYBRANE_ZAGADNIENIA_Z%20BUDOWY_STATK%C3%93W_POWIETRZNYCH.pdf?sequence=1).
2. T. Takagi, „Present state and future of the intelligent materials and systems in Japan”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1999. [Online serial]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1106/33UC-FBCW-342W-P2WW>. [Accessed March 25, 2024].
3. M. Treczyńska-Łent, „Inżynierskie materiały inteligentne w środkach transportu,” Logistyka-Nauka, 3/2011, Available: <https://www.logistyka.net.pl/bank-wiedzy/item/81683-inzynierskie-materialy-inteligentne-w-srodkach-transportu>. [Accessed March 25, 2024].
4. S. Wojciechowski, „Materiały inteligentne stan zagadnienia 2003”. Inżynieria materiałowa, rok XXV 59, no 2, 2004, Available: <https://sigma-not.pl/publikacja-2147-materia%C5%82y-inteligentne.-stan-zagadnienia-2003-inzynieria-materialowa-2004-2.html>. [Accessed March 25, 2024].
5. A. Ćwikła, „Lotnicze zastosowania materiałów inteligentnych”, Prace Instytutu Lotnictwa, Available: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BSW4-0109-0006>. [Accessed March 25, 2024].
6. K. Krauze, T. Świebocki, P. Świder, A. Wcisło and T. Ossowski, „Naukowe aspekty samoorganizacji materii - od wszechświata do atomów”, in: Kwadrans dla chemii: monografia, P. Stasiewicz, T. Świebocki, T. Kostrzewa, Eds., Warszawa: Oficyna Edukacyjna Krzysztof Pazdro, 2020, pp. 87-116.
7. „Materiały inteligentne – teraźniejszość i przyszłość”, prezentacja z zajęć Politechniki Rzeszowskiej, Available: <http://elearning.prz.edu.pl/mod/resource/view.php?id=25130>, [Accessed March 25, 2024].
8. A. Fenyk, M. Zieliński, E. Miękoś and W. Horak, „Funkcjonalne materiały inteligentne oraz ich znaczenie i zastosowanie w obecnym świecie”, Available: <https://promovendi.pl/wp-content/uploads/2021/05/Fenyk-Anna.pdf>, [Accessed March 30, 2024].
9. A. Ćwikła, „Medyczne zastosowania materiałów inteligentnych”, Scientific Bulletin of Chełm Section of Technical Sciences, 2008, No.1:15-28.
10. A. Milecki, „Ciecze elektro- i magnetoerologiczne”, Instytut Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, Available:

- [https://www.zum.put.poznan.pl/AMilecki/lang1/files/ciecze\\_mr.pdf](https://www.zum.put.poznan.pl/AMilecki/lang1/files/ciecze_mr.pdf) [Accessed March 30, 2024].
11. S. Szczeciński, W. Balicki, R. Chachurski, P. Głowacki, K. Kawalec, A. Kozakiewicz, and J. Szczeciński, *Lotnicze Zespoły Napędowe*, cz. 1, Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna, 2009.
  12. W. Balicki, S. Szczeciński, and R. Chachurski, „Problematyka określania liczby przenoszonych cykli zmęzeniowych przez zespoły konstrukcyjne lotniczych silników turbinowych”, *Prace Instytutu Lotnictwa*, Wydawnictwa Naukowe Instytutu Lotnictwa, Available: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BSW4-0089-0009> [Accessed March 25, 2024].
  13. W. Balicki, K. Kawalec, Z. Pągowski, S. Szczeciński, R. Chachurski, A. Kozakiewicz, and P. Głowacki, „Wloty turbinowych silników odrzutowych – zagrożenia wirem wlotowym”, *Prace Instytutu Lotnictwa*, Wydawnictwa Naukowe Instytutu Lotnictwa, Available: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BSW4-0089-0002> [Accessed March 25, 2024].
  14. A. Michelson, T.J. Flanagan, S.W. Lee, and O. Gang, “High strength, lightweight nano-architected silica,” *Cell Reports Physical Science*, July 19, 2023 [Online]. Available: [https://www.cell.com/cell-reports-physical-science/pdf/S2666-3864\(23\)00254-0.pdf](https://www.cell.com/cell-reports-physical-science/pdf/S2666-3864(23)00254-0.pdf) [Accessed April 18, 2024].
  15. Boeing, <https://www.boeing.com/> [Accessed March 25, 2024].
  16. C. Miller, *The Potential Uses of Smart Materials and Structures on Aircraft*, Available: <https://discover.hubpages.com/education/Smart-Materials-and-Structures>, [Accessed March 25, 2024].
  17. S.S. Heganna and J.J. Joglekar, “Active Vibration Control of Smart Structure using PZT Patches”, *Procedia Computer Science*, vol. 89, 2016. [Online] Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187705091631105X> [Accessed April 18, 2024], DOI 10.1016/j.procs.2016.06.040.
  18. W. Wang, X. Yue, J. Yu, and L. Yang, “Development and prospects of Smart Materials and Structures for Aerospace Sensing Systems and Applications,” *Sensors*, 2023, 23(3), Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/3/1545>. [Accessed March 25, 2024], DOI 10.3390/s23031545.
  19. D. Stöckel, “The shape memory effect – Phenomenon, Alloys, Applications”, NDC, Nitinil Devices & Components, Inc., Fremont [Online] Available: <https://www.euroflex.de/fileadmin/content/Dokumente/Literatur/smmemory.pdf> [Accessed March 30, 2024].