

Małgorzata TREPCZYŃSKA-ŁENT¹

INŻYNIERSKIE MATERIAŁY INTELIGENTNE W ŚRODKACH TRANSPORTU

Materiały inteligentne znajdują obecnie zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu, jednak największy ich rozwój i najwięcej zastosowań można zaobserwować w przemyśle lotniczym i samochodowym. Inżynierskie materiały inteligentne stosuje się w systemach bezpieczeństwa, w wymagających elementach konstrukcyjnych takich jak zawieszenie, silniki i urządzenia elektroniczne. Można je także wykorzystać jako dodatek zmieniający wygląd. Mogą być to stopy z pamięcią kształtu, materiały piezoelektryczne, elektrochromowe, elektroluminescencyjne, elektroeologiczne bądź magnetoeologiczne. Stosowane są w środkach transportu począwszy od prostych urządzeń, aż po skomplikowane konstrukcje. W pracy przedstawione zostaną możliwości wykorzystania tych materiałów z uwzględnieniem ich zalet oraz dynamiki rozwoju.

THE ENGINEERING INTELLIGENT MATERIALS IN TRANSPORT

The intelligent materials are used in many industrial branches, however the greatest development and amount of uses is observed in aviation and motorization. Engineering intelligent materials are used in security systems, in demanding constructional elements like suspension, engine and electronic devices. They can also be supplements which for example change colour. Intelligent materials are shape memory alloys and piezoelectric, electrochromic, electrorheological, magnetorheological materials. In transport means they are not only the simple devices, but also complicated constructions. The article will show possibilities of using these materials with all their advantages and dynamic development.

1. WPROWADZENIE

Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat pojawiła się nowa klasa materiałów, do której należą przedstawiciele wszystkich podstawowych rodzajów materiałów – metali, ceramiki, polimerów, kompozytów. Materiały te, oparte są na wiedzy zarówno z obszaru inżynierii materiałowej oraz takich nauk jak chemia, fizyka i matematyka. Rozwój materiałów inteligentnych podporządkowany jest tworzeniu możliwości określonych celów praktycznych w takich dziedzinach jak lotnictwo, motoryzacja, robotyka, medycyna oraz wyposażenie sportowe.

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Zakład Inżynierii Materiałowej, Polska;
85-789 Bydgoszcz; ul. Kaliskiego 7. Telefon: + 48 52 340-87-19, Fax: + 48 52 340-82-71
e-mail: malgorzata.trepczynska-lent@utp.edu.pl

Zastosowanie urządzeń oraz rozwiązań konstrukcyjnych zawierających materiały inteligentne umożliwia zwiększenie bezpieczeństwa, komfortu, niezawodności, redukcje zanieczyszczeń, wibracji oraz hałasu.

Obecnie, nie istnieje powszechnie akceptowalna definicja materiałów inteligentnych. Najbardziej znane jest określenie japońskiego naukowca T.Takagi stwierdzające, że materiał inteligentny to taki materiał, który jest zdolny do reagowania na bodźce zewnętrzne przez istotne zmiany swoich właściwości dla pożądanego i skutecznej odpowiedzi na te bodźce [1]. Stosując natomiast terminologię informatyki, stwierdzono że materiał inteligentny powinien spełniać rolę czujnika, sensora, procesora i urządzenia uruchamiającego aktuatora, przy czym jego właściwości powinny wykazywać cechy sprzężenia zwrotnego [2]. Podobne stwierdzenie traktuje materiały inteligentne jako projektowane w taki sposób, aby reagowały na zewnętrzną symulację i adaptując się do warunków środowiskowych polepszały swoje właściwości, zwiększając trwałość, oszczędzając energię oraz dostosowując warunki dla poprawy komfortu ludzi, a także samoistnie się powielając, naprawiając lub uszkadzając w miarę potrzeby, zmniejszając odpady i zwiększając efektywność [3].

Należy zauważyć, że w praktycznym zastosowaniu materiały inteligentne często występują jako komponent struktury konstrukcyjnej lub funkcjonalnej zwaną inteligentną strukturą [4].

Podział materiałów inteligentnych zmieniał się na przestrzeni lat. Wraz z rozwojem tej dziedziny dochodziły kolejne grupy, dlatego też w literaturze można znaleźć wiele klasyfikacji. Jedną z nich dzieli te materiały na siedem grup, jako zmieniające kolor, emitujące światło, zmieniające swój kształt lub wielkość, zmieniające temperaturę, zmieniające swoją gęstość, samogrupujące się i samonaprawiające się [5].

Materiały inteligentne znajdują obecnie zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu, jednak największy ich rozwój i najwięcej zastosowań można zaobserwować w przemyśle lotniczym i samochodowym. Stosuje się je w zaawansowanych systemach bezpieczeństwa, w elementach konstrukcyjnych takich jak zawieszanie, silniki, urządzenia elektroniczne, skrzydła, łopatki wirnika. Można także zastosować dodatek zmieniający wygląd np. lakier samochodowy zmieniający kolor pod wpływem zmian temperatury [3,4,5].

Celem pracy było przedstawienie możliwości wykorzystania materiałów inteligentnych w środkach transportu z uwzględnieniem ich zalet oraz dynamiki rozwoju.

2. MATERIAŁY Z PAMIĘCIĄ KSZTAŁTU W MOTORYZACJI

Materiały z pamięcią kształtu to stopy, które mają zdolność do zapamiętywania pierwotnie nadanego kształtu oraz jego odtwarzania pod wpływem odpowiednich warunków zewnętrznych np. zmiany pola magnetycznego lub temperatury [6]. Szczególne właściwości tych stopów związane są z zachodzącą w nich odwracalną przemianą martenzytyczną. Przemiana ta dotyczy głównie stali oraz stopów Al-Cu. Ma także charakter bardziej powszechny i występuje w wielu stopach metali, niektórych materiałach ceramicznych, a nawet w komórkach żywych organizmów [3].

Wyjątkowe właściwości fizyczne sprawiają, że stopy z pamięcią kształtu mogą być z powodzeniem integrowane z innymi materiałami w celu osiągnięcia właściwości nieosiągalnych w żaden inny sposób. Powstałe tak nowe materiały stanowią odrębną klasę materiałów kompozytowych - materiałów o sterowalnych właściwościach. Stopy z

pamięcią kształtu posiadają niespotykane wśród innych materiałów właściwości związane ze zmianą ich modułu sprężystości czy też tłumienia. Przede wszystkim jednak posiadają możliwość generowania znaczących sił w procesie aktywacji, które są związane z efektem pamięci kształtu. Z uwagi na te właściwości, stopy te pozwalają na aktywne i w pełni kontrolowane takimi cechami jak np. kształt, ugięcie statyczne, postaci i częstość drgań własnych, amplitudy drgań rezonansowych i tłumienie. Inteligentne elementy wykonawcze w postaci drutów, taśm, prętów lub belek wykonanych ze stopów z pamięcią kształtu muszą być we właściwy sposób zintegrowane i połączone z elementem konstrukcyjnym, zapewniając w ten sposób właściwą jego pracę i trwałość [7].

W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój systemów bezpieczeństwa, które wykorzystują zaawansowane materiały takie jak stopy z pamięcią kształtu. Przykładem takiego rozwiązania jest system podnoszenia maski samochodu. Tego typu rozwiązania stosowane są od ponad dekady w takich modelach samochodów jak Honda Legend, Jaguar SX oraz Citroen C6. Jednak dopiero zastosowanie materiałów inteligentnych pozwoliło zredukować koszt, rozmiar, wagę oraz zwiększyć niezawodność tego systemu. Zasada działania systemu bezpieczeństwa pieszych jest prosta: podczas zderzenia maska samochodu jest podnoszona, co umożliwia absorpcję energii zderzenia z pieszym [8]. Zastosowanie stopu NiTi umożliwiło wielokrotne działanie tego systemu, podczas gdy poprzednie po jednokrotnym użytku musiały być wymieniane. Skróciło to reakcje na mniej niż 35 ms i zwiększyło zakres działania w temperaturach od -40 do +125°C.

Firma General Motors prowadzi zaawansowane prace badawcze nad zastosowaniem stopów z pamięcią kształtu (SMA) do wytwarzania energii elektrycznej z wykorzystaniem gorących gazów wydechowych samochodu. Zasada działania tego rozwiązania jest prosta. Kiedy podgrzewa się drut z SMA, materiał kurczy się i staje się bardziej sztywny. Kiedy zostaje schłodzony wraca do pierwotnego kształtu. Pętla takiego drutu napędza generator elektryczny, który służy do ładowania akumulatorów napędu hybrydowego samochodu. W systemie hybrydowym energia elektryczna jest używana do ładowania akumulatorów, natomiast przy napędzie klasycznym tego typu system może zastąpić alternator [9]. Na razie, system tworzony przez General Motors jest w fazie prototypu, ale planuje się zbudowanie działającego samochodu z silnikiem termicznym SMA w ciągu 3 lat.

Lampy przeciwmgielne montowane nisko z przodu samochodów narażone są na zniszczenie przy dużych prędkościach np. przez kamienie. Zniszczenia mogą być zminimalizowane, jeżeli lampa jest chroniona poprzez specjalną obudowę. Jest ona otwierana i zamykana poprzez mechanizm wyposażony w aktuator ze stopów z pamięcią kształtu. Kiedy lampa jest włączona, mechanizm otwiera przesłony obudowy, natomiast kiedy jest wyłączona zamyka przesłonę [10,11].

Silniki samochodowe wykorzystywane w samochodach muszą działać w wymagających warunkach, takich jak duże różnice temperatur (niskie temperatury podczas postoju i wysokie w czasie jazdy), które powodują np. zmianę lepkości oleju w układzie hydraulicznym. Dlatego do ich kontroli stosuje się stopy z pamięcią kształtu. Naturalna zdolność do odkształcania na skutek zmiany temperatury powoduje, że z tych materiałów mogą powstawać elementy zaworów kontrolujących przepływ. Tego typu rozwiązania zastosowała jako pierwsza firma Mercedes-Benz w silniku diesla samochodu osobowego. Podczas wzrostu temperatury wzrasta ciśnienie panujące w układzie hydraulicznym, aby zachować takie same parametry pracy rozgrzanego silnika jak i zimnego stosuje się sprężynę z NiTi, która wraz ze wzrostem temperatury odkształca się i zmienia przepływ

oleju. Zastosowanie zaworu kontrolującego przepływ pozwala na zmniejszenie ilości emitowanych spalin oraz poprawę komfortu pracy silnika w początkowej fazie jego działania [12].

Zastosowanie aktuatora w kształcie sprężyny ze stopów z pamięcią kształtu to czujniki w gaźnikach. Zawór zamknięty przy niskiej temperaturze zatrzymuje parujące paliwo w gaźniku, natomiast otwarty przy wysokiej temperaturze zapobiega zalaniu. Takie rozwiązanie wspomaga osiągi silnika i zmniejsza zużycie paliwa [12].

Stopy z pamięcią kształtu stosowane są nie tylko w skomplikowanych rozwiązaniach konstrukcyjnych, ale też w prostych elementach jak złączki kabli czy przewodów. Zdolność odkształcania materiału na skutek zmiany temperatury powoduje możliwość zastosowania elementów w kształcie pierścienia z SMA, które pod wpływem ciepła zmniejszają średnicę powodując tym samym nacisk na przewód czyli uszczelnianie połączenia. Tego typu rozwiązania mogą być wykorzystywane w przemyśle motoryzacyjnym jako: zaciski tarcz elektromagnetycznych, zaciski osłony czujnika wykrywania tlenu, mocowanie kół zębatach na wale, grupowanie i ściskanie elementów poprzez nacisk [12].

3. MATERIAŁY Z PAMIĘCIĄ KSZTAŁTU W LOTNICTWIE

Lotnictwo, jest gałęzią przemysłu gdzie stosowane są najnowsze i najbardziej zaawansowane materiały i technologie. Skrzydło samolotu jest jednym z najważniejszych elementów konstrukcyjnych. Działają na niego podczas lotu duże siły i dlatego jego poprawne działanie umożliwia zwiększenie komfortu, prędkości, bezpieczeństwa i niezawodności. Przewody wykonane ze stopów z pamięcią kształtu powodują zmianę kształtu ruchomej końcówki skrzydła, która dostosowuje się do warunków panujących podczas lotu. Maksymalne odkształcenie tych przewodów wynosi 11 mm, co pozwala na odkształcenie kątowe końca skrzydła nawet do 45°. Odkształcenie tych przewodów powoduje napięcie od 2 do 5V, natomiast powrót do poprzedniego stanu jest możliwy przez oziębienie zimnym powietrzem. Przewody wykonane ze stopu NiTi mogą działać nawet w temperaturze do -55°C na wysokości 2000 metrów nad poziomem morza, czyli w warunkach typowych dla małych samolotów pasażerskich [13].

Usieciowanie wewnętrzne skrzydła, przewodami ze stopów z pamięcią kształtu umożliwia odkształcenie całego skrzydła a nie tylko jego ruchomej części. Tego typu konstrukcje zostały zastosowane w lotnictwie wojskowym, chociaż prowadzone są także badania nad wdrożeniami w lotnictwie cywilnym [14].

Stopy z pamięcią kształtu znajdują także zastosowanie w śmigłowcach. Montowane są tam w łopatkach wirników. Mają za zadanie zmniejszyć niewyważanie wirników poprzez zmianę ich kształtu. Śmigłowce są wyposażone w ruchome kłapy na końcach wirników, jednak zmiana ich położenia jest pasywna. Zastosowanie stopów z pamięcią kształtu ma spowodować, aktywną zmianę, a przez to zwiększenie komfortu i bezpieczeństwa lotu [15].

Przewody z SMA połączone są z instalacją elektryczną, która umożliwia ich podgrzewanie a następnie aktywację, także z jednostką sterującą i kontrolującą, która steruje zmianą położenia kłapy na końcach wirników w zależności czy śmigłowiec się wznosi czy opada [15].

Od zawsze dużym problemem w lotnictwie jest hałas. Aby zmniejszyć jego poziom stosuje się najnowsze materiały w tym także materiały z pamięcią kształtu. System redukcji

drgań wykorzystujący te materiały został zastosowany w Boeingu 747-8, jako pierwszym dużym samolocie cywilnym [16].

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 [16].

4. MATERIAŁY Z PAMIĘCIĄ KSZTAŁTU W TRANSPORCIE SZYNOWYM

Stopy z pamięcią kształtu zastosowano w systemach ogrzewających wagony w nowoczesnych pociągach. Zawór zawierający sprężynę ze stopu NiTi kontroluje przepływ pary wytwarzanej przez generator. Zawór używany jest w okresie zimowym, kiedy niskie temperatury mogą doprowadzić do zamarznięcia skondensowanej pary wodnej i ostatecznie spowodować zniszczenie rur [10].

Materiały inteligentne znajdują także zastosowanie w infrastrukturze umożliwiającej bezpieczny i bardziej komfortowy transport. Przykładem takiego zastosowania są przejazdy kolejowe z elementami elastomerowymi, wewnątrz których umieszczone są druty ze stopów z pamięcią kształtu. Ciężna wykonana z NiTi są umieszczone wewnątrz betonowych płyt w specjalnie wydrążonych kanałach. Zamocowane są na końcach do płyt betonowych budujących przejazd. Płyty te osadzone są na gumowej powierzchni, która pełni rolę wibroizolującą. Dlatego też wspomaga działanie aktuatorów z pamięcią kształtu. Podczas przejazdu pojazdu przez przejazd kolejowy następuje aktywacja systemu czyli zmiany kształtu ciężna z SMA. Powoduje to znaczne jego usztywnienie a w wyniku tego następuje znaczne zmniejszenie amplitudy wibracji [17].

5. MATERIAŁY PIEZOELEKTRYCZNE W LOTNICTWIE

Materiały piezoelektryczne przetwarzają energię elektryczną w mechaniczną i odwrotnie. Odkształcenie sprężyste piezoelektryka powoduje powstanie w nim wewnętrznego pola elektrycznego (efekt piezoelektryczny prosty). Umieszczenie materiału w polu elektrycznym prowadzi do zmiany jego wymiarów (efekt piezoelektryczny odwrotny). Zjawisko piezoelektryczne posiada inny mechanizm niż zjawisko elektrostrykcji, które charakteryzują znacznie mniejsze odkształcenia i występuje ono we wszystkich materiałach [18].

Jako ceramika piezoelektryczna stosowane są zarówno materiały ferroelektryczne jak i nieferroelektryczne. Wykorzystując te materiały skonstruowano tzw. inteligentną sprężynę. Jej mechanizm wykorzystuje dużą sztywność, wysoką przepustowość i niskie przemieszczenie objętościowe aktuatora piezoelektrycznego. W rzeczywistości duża zmianę współczynnika sprężystości powoduje bardzo mała zmiana kształtu aktuatora. Mała wielkość oraz prosta budowa powoduje, że inteligentną sprężynę stosuje się w wymagających konstrukcjach np. lotniczych do tłumienia drgań [19].

Sprężyna ta znalazła także zastosowanie jako tłumik siedzenia pilota w śmigłowcach. Montuje ją się na wspierciu siedzenia tak, aby siły powodujące drgania przechodziły przez sprężynę i były przez nią w znacznym stopniu niwelowane. Sprężyna połączona jest z systemem monitorującym takie czynniki jak waga członka załogi i warunki lotu. System ten poprzez zmianę napięcia aktuatora powoduje optymalne tłumienie drgań [29].

Także wirnik śmigłowca jest montowany na czterech inteligentnych sprężynach. Drgania wywołane przez obracające się łopatki wirnika są niwelowane przez sprężyny, co powoduje znaczny spadek drgań i hałasu w kabinie oraz umożliwia spadek ciężaru całej maszyny, co w konsekwencji zmniejsza ilość spalanego paliwa [19].

Materiały piezoelektryczne znajdują zastosowanie do redukcji drgań wywołanych przez łopatkę wirnika śmigłowca poprzez zmianę jej kształtu. Takie rozwiązanie powoduje redukcję wibracji konstrukcji kabiny nawet o 80% oraz zmniejszenie hałasu 10dB [20].

W innym rozwiązaniu konstrukcyjnym, aktuator wykonany z elastycznych włókien piezoelektrycznych usztywnia się pod wpływem przyłożonego napięcia. Powoduje to odkształcenie całej łopatki, czyli zmianę kąta natarcia krawędzi łopatki. Włókna piezoelektryczne zalaminowane są wewnątrz łopatki co powoduje, że takie rozwiązanie w odróżnieniu od poprzednich jest bardziej niezawodne [21].

Materiały piezoelektryczne znajdują zastosowanie w monitorowaniu powierzchni stalowych oraz wykonanych z kompozytów. Aktuatory piezoelektryczne monitorujące kadłuby wykonane z kompozytów jako pierwsza użyła NASA w promach kosmicznych. Obecnie firma Accelent oferuje kompleksowe struktury monitorujące kadłuby samolotów oraz konstrukcje pojazdów. Monitorowanie powierzchni polega na zamontowaniu sensorów wykorzystujących materiały piezoelektryczne wewnątrz kadłuba. Pod wpływem napięcia ulegają one odkształceniu i powoduje powstanie mikrofali, której ewentualne zakłócenia informują o powstaniu mikropęknięć. System SMART Layers firmy Accelent składa się z czujników zalaminowanych w żywicy epoksydowej, która jest izolatorem materiału piezoelektrycznego PZT [22].

6. MATERIAŁY MAGNETOREOLOGICZNE W ŚROKACH TRANSPORTU

Materiały magnetoreologiczne (MR) są cieczami, które mogą gwałtownie zmieniać swoje właściwości lepko sprężyste. Ciecze te mogą zmieniać swoją konsystencję z gęstego płynu do prawie ciała stałego. Osiągnięty końcowy stan materiału zależy od tego, jak silne pole magnetyczne zostanie zastosowane. Efekt ten może zostać odwrócony równie szybko jak został wywołany (1-10ms). Ciecze MR wykazują pewną przewagę w stosunku do cieczy elektromagnetycznych. Między innymi są one mniej czułe na obecność zanieczyszczeń, dlatego mogą być stosowane w urządzeniach pracujących w bardziej zanieczyszczonym środowisku [5,23].

Najbardziej zaawansowanym technicznie przykładem takich urządzeń są amortyzatory firmy Delphi Automotive. Są one wykorzystywane w takich samochodach jak Audi R8, Audi TT, Audi A8, Cadillac's 2003. Stosuje się je do osiągnięcia szybkiej i kontrolowanej amortyzacji drgań w szerokim zakresie sił. Amortyzatory wykorzystują ciecz magnetoreologiczną o nazwie MagneRide™. Jest to syntetyczny płyn zawierający miękkie cząstki, zawieszone w nim sił oddziaływań magnetycznych. Zachowuje on swoje właściwości w zakresie temperatur od -40 do +70°C oraz może pracować nawet przy naprężeniach do 80 kPa. Dzięki zastosowaniu takich amortyzatorów następuje

minimalizacja ruchu pojazdu, co powoduje łagodniejszą jazdę i umożliwia wykonywanie bardziej precyzyjnych manewrów. Zmniejsza się także pochylanie samochodu do przodu podczas hamowania oraz osiadanie tyłu w trakcie przyspieszania. Poprawa charakterystyki przenoszenia obciążeń daje lepsze panowanie nad pojazdem podczas wykonywania nagłych manewrów przy dużej prędkości [24].

Innym zastosowaniem cieczy magnetoreologicznych są tłumiki do foteli samochodowych szczególnie ciężarówek. System redukcji drgań takiego fotela kontrolowany przez sterownik komputerowy, analizuje takie dane jak ciężar kierowcy, prędkość pojazdu, rodzaj nawierzchni a następnie przetwarza je i poprzez zmianę pola magnetycznego kontroluje tłumienie drgań dobierając optymalną sztywność tłumika [25].

7. PODSUMOWANIE

Nowe rodzaje materiałów inteligentnych czy nowe sposoby ich użycia są zazwyczaj opracowywane przez wielkie ośrodki naukowe takie jak NASA czy instytucje wojskowe. Z biegiem lat są wdrażane w przemyśle cywilnym. W badania i rozwój materiałów inteligentnych zaangażowane są najbardziej rozwinięte kraje, takie jak Stany Zjednoczone, Japonia, Niemcy czy Wielka Brytania. Najbardziej dynamicznie rozwijającą się gałęzią przemysłu, w której szeroko stosuje się materiały inteligentne są środki transportu takie jak samochody i samoloty. Powodem tego są duże nakłady finansowe inwestowane przez koncerny motoryzacyjne takie jak Toyota, Volkswagen, General Motors czy firmy produkujące samoloty - Boeing czy Airbus. Spowodowane to jest osiągnięciem przewagi technologicznej, a co za tym idzie zwiększeniem konkurencyjności oferowanych produktów.

Zastosowanie materiałów inteligentnych umożliwia szybkie zwrócenie dużych kosztów ich wdrożenia. Materiały te umożliwiają bowiem zmniejszenie ciężaru pojazdu lub samolotu, a więc redukcję paliwa. Zwiększają komfortu transportu poprzez redukcję hałasu oraz wibracji. Sprawą kluczową jest także zwiększanie bezpieczeństwa np. poprzez monitoring kadłuba, system ABS czy system ochrony pieszego podczas zderzenia z pojazdem. Materiały inteligentne są często stosowane w celach estetycznych, aby uatrakcyjnić wygląd produktu tak ważny we współczesnym komercyjnym świecie.

Rozwój materiałów inteligentnych pomimo coraz bardziej powszechnego użycia, wymaga interdyscyplinarnej wiedzy z takich dziedzin nauki jak matematyka, chemia, fizyka, materiałoznawstwo oraz specjalistycznej wiedzy z dziedzin techniki, w których będą one wdrażane. Niezbędne jest zatem tworzenie interdyscyplinarnych zespołów i instytucji naukowych.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Takagi T.: *Present state and future of the intelligent materials and systems in Japan*. J. Intelligent Material. Syst. Struct, 10, pp. 575-581, 1999.
- [2] Wojciechowski S.: *Materiały inteligentne stan zagadnienia 2003*. Inżynieria Materiałowa, rok XXV 59, no 2, 2004.
- [3] Dobrzański L.A.: *Podstawy nauki o materiałach i materiałoznawstwo*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 2002.
- [4] Akhras G.: *Smart materials and smart systems for the future*. Canadian Military Journal, Autumn 2000.

- [5] www.martin.pl
- [6] Sapińska-Wcisło A.: *Mechatroniczne człony wykonawcze z zastosowaniem materiałów inteligentnych*. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, 2006.
- [7] Surowska B.: *Functional and hybrid materials in air transport*, Eksploatacja i niezawodność, no, 3, 2008.
- [8] Stritmatter J., Gumpel P., Zhinghang H.: *Long-time stability of shape memory actuators for pedestrian safety system*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol.34, issue 1, 2009.
- [9] www.gm.com – materiały firmy General Motors
- [10] Otsuka K., Wayman C.: *Shape memory materials*. Cambridge University Press, 1998.
- [11] Stoeckel: *Shape memory alloys for automotive industry*. Materials and Design, vol.11, No 6, December 1991.
- [12] Stoeckel, Borden: *Actuation and fastening with shape memory alloys in the automotive industry*. Metall Wissenschaft+Technik, 46 Jahrgang, Heft 7, pp.668-67, 1998.
- [13] Raport Zespołu Badawczego Benoit BERTON Dassault Aviation: *Shape Memory Alloys Application, Trailing Edge Shape Control*, 2006.
- [14] Frautschi J.: *Finite element simulation of shape memory alloy actuator in adaptive structures*. Mechanical and Aerospace Engineering, 2003.
- [15] Giurgiutiu V., Rogers C., Zuidevaart J.: *Incrementally adjustable rotor-blade tracking tab using SMA composite*. Proceeding of the 38th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference and Adaptive Structures Forum 7-10, pp. 97-1387, 2000.
- [16] www.boeing.com - materiały firmy Boeing.
- [17] Długosz J.: *Vibroisolation railway crossings with the application of shape memory elements*. Transport Problem, vol.4, issue 2, 2009.
- [18] Gautschi G.: *Piezoelectric sensor force strain pressure acceleration and acoustic emission sensor materials and amplifiers*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2002.
- [19] Nitzhe F., Wickramasinghe V., Zimcik D.: *Control laws for an active tunable vibration absorber blade dampen augmentation*. The aeronautical Journal, vol. 108 (1), pp. 35-42, 2004.
- [20] Straub F.: *Development and whirl-tower test of the smart materials actuated rotator technology active flap rotor*. SPIE's 11th Conference on Smart Structures Materials, San Diego, Ca, 2004.
- [21] Wickramasinghe V., Hagood N.: *Durability characterization of active fiber composite actuators for helicopter rotor blade applications*. 44th AIAA Structures, Structural Dynamics and Material Conference, Norfolk VA, 2003.
- [22] www.accelent.com – materiały firmy Accelent.
- [23] www.fordvehicles.com – materiały firmy Ford.
- [24] Gehm R.: *Delphi improves Cadillac's ride*, Automotive Engineering Online International, 2004.
- [25] www.lord.com – materiały firmy LORD.