

# ZESZYTY STUDENCKICH KÓŁ NAUKOWYCH

## Przegląd aplikacji materiałów inteligentnych w lotnictwie

D. Pencakowska<sup>a</sup>, F. Trojanowski<sup>a</sup>, T. Tański<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Studenci Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny  
email: trojanowski.filip@gmail.com

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład  
email: tomasz.tanski@polsl.pl

**Streszczenie:** W pracy dokonano analizy aplikacji materiałów inteligentnych wykorzystywanych w lotnictwie. Skupiono się na wykorzystaniu materiałów piezoelektrycznych oraz materiałów z pamięcią kształtu.

**Abstract:** The main goal of this paper was the analysis of the application of the “smart” materials used in the aircraft industry. Main focus was put on piezoelectric and shape-memory alloys.

**Słowa kluczowe:** materiały inteligentne, materiały smart, piezoelektryki, materiały z pamięcią kształtu, lotnictwo

## 1. WPROWADZENIE

Inteligentne rozwiązania są coraz częściej obecne we współczesnych technologiach, a jeden z głównych obszarów ich rozwoju stanowią materiały inteligentne. Materiały inteligentne, nazywane też materiałami „smart”, zdefiniować można jako materiały zdolne do adaptacji do otoczenia i reagujące na zewnętrzne bodźce, co w efekcie pozwala na poprawę własności lub komfortu użytkowania takiego materiału. W tego typu materiałach pod wpływem zewnętrznych czynników może dojść do zmiany jednej lub kilku własności fizycznych.

W zależności od rodzaju materiału i wywieranego oddziaływania zmiana może dotyczyć kształtu, struktury, rozmiaru, koloru, sprężystości, a także przewodności. Wśród materiałów inteligentnych można więc wyróżnić m. in. stopy z pamięcią kształtu, materiały piezoelektryczne, elektrochromowe, magnetostrykcyjne i inteligentne żele [3, 6].

Materiały inteligentne znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu, takich jak przemysł sportowy (np. narty dostosowujące sztywność do warunków panujących na stoku) tekstylny (np. buty zmieniające sztywność podeszwy), w medycynie i robotyce, jednak najczęściej rodzajów ich aplikacji można zaobserwować w przemyśle samochodowym i lotniczym. Ze względu na wyjątkowe własności, materiały inteligentne w lotnictwie wykorzystywane są przy konstruowaniu układów napędowych, elementów sterujących, sensorów i zaawansowanych układów bezpieczeństwa. Zastosowanie tych elementów pozwala

na zmianę własności dynamicznych konstrukcji, dopasowanie kształtu i struktury do określonych potrzeb oraz zbieranie informacji o konstrukcji, co często gwarantuje zwiększenie bezpieczeństwa, niezawodności, redukcje zanieczyszczeń, wibracji czy też hałasu [3, 4, 6].

## 2. CHARAKTERYSTYKA I PODZIAŁ MATERIAŁÓW INTELIGENTNYCH

Do materiałów inteligentnych należą materiały z wszystkich podstawowych grup tj. metali, polimerów, ceramiki i kompozytów. Modyfikację ich własności wywołują czynniki zewnętrzne, takie jak wilgotność, temperatura, ciśnienie, pole elektryczne lub magnetyczne, natomiast zmienić może się rozmiar i kształt, kolor, struktura, sprężystość, a także przewodność cieplna, elektryczna lub magnetyczna. Ze względu na charakter tych zmian i rodzaj oddziaływania wśród materiałów inteligentnych można wyróżnić materiały [5]:

- **zmieniające kolor:**
  - fotochromowe – materiały odwracalnie zmieniające barwę, w zależności od natężenia padającego na nie światła;
  - termochromowe – materiały zdolne do odwracalnej zmiany kolorów, pod wpływem zmiany temperatury;
  - elektrochromowe – materiały zdolne do widzialnej zmiany koloru pod wpływem działania prądu elektrycznego;
- **emitujące światło**
  - elektroluminescencyjne – materiały emitujące światło pod wpływem przepływu prądu, przy emisji nie wydziela się ciepło;
  - fotoluminescencyjne - emitujące światło pod wpływem działania światła o odpowiedniej długości fali;
  - fluorescencyjne – materiały wykorzystujące zjawisko fotoluminescencji, czyli zdolne do pochłaniania energii świetlnej i następnie emitowania jej, w wyniku stopniowego "uwalniania" zmagazynowanej energii;
  - katodoluminescencyjne – materiały emitujące światło wskutek padającego na nie strumienia elektronów;
  - termoluminescencyjne – materiały posiadające zdolność emitowania zmagazynowanej energii wewnętrznej w postaci światła widzialnego, pod wpływem dostarczenia energii cieplnej;
  - radioluminescencyjne – materiały emitujące światło pod wpływem promieniowania jądrowego;
- **zmieniające kształt lub wielkość**
  - polimery przewodzące – polimery zdolne do przewodzenia prądu elektrycznego;
  - piezoelektryczne – wykorzystujące efekt piezoelektryczny, przetwarzające energię elektryczną w mechaniczną i odwrotnie;
  - elastomery dielektryczne (materiały elektrostrykcyjne) - wykazujące mechaniczne odkształcenie pod wpływem przyłożonego napięcia elektrycznego, jednak zjawisko charakteryzują znacznie mniejsze odkształcenia niż w piezoelektrykach i występuje ono we wszystkich materiałach.
  - magnetostrykcyjne – wykorzystujące efekt magnetostrykcyjny, czyli odkształcenie sprężyste pod wpływem pola magnetycznego.

- żele polimerowe - substancje, które przy wzroście temperatury kurczą się, podczas gdy przy ochłodzeniu rozszerzają się; posiadają cechy zarówno ciał stałych jak i cieczy;
- materiały z pamięcią kształtu – stopy zdolne do zapamiętywania pierwotnie nadanego kształtu oraz jego odtwarzania pod wpływem zmiany temperatury;
- **zmieniające temperaturę**
  - termoelektryczne – wykorzystujące zjawisko termoelektryczne, zachodzące kiedy pomiędzy dwoma materiałami, między którymi występuje gradient temperatury, następuje przepływ elektronów, co generuje niewielki przepływ prądu;
- **ciecze o zmiennej lepkości**
  - magnetoreologiczne – ciecze, które mogą gwałtownie zmienić swoją konsystencję z gęstego płynu do prawie ciała stałego pod wpływem przyłożonego pola magnetycznego;
  - elektoreologiczne – ciecze, które zmieniają swoją konsystencję pod wpływem pola elektrycznego;
- **samogrupujące się** – materiały potrafiące łączyć się z pojedynczych elementów w uporządkowaną strukturę, bez ingerencji człowieka;
- **samonaprawiające się** – materiały posiadające zdolność do regeneracji uszkodzeń strukturalnych, bez ingerencji człowieka;
- materiały łączące wyżej wymienione cechy, np. magneto-elektrostrykcyjne, piezotermoelastyczne.

### 3. ZASTOSOWANIA MATERIAŁÓW INTELIGENTNYCH W LOTNICTWIE

#### 3.1 PIEZOELEKTRYKI

Do najstarszych, a zarazem najbardziej popularnych materiałów inteligentnych zaliczane są piezoelektryczne polimery i ceramiki. Odkształcenie sprężyste piezoelektryka powoduje powstanie w nim wewnętrznego pola elektrycznego (efekt piezoelektryczny prosty), a umieszczenie materiału w polu elektrycznym prowadzi do zmiany jego wymiarów (efekt piezoelektryczny odwrotny) [3, 6].

Do ceramiki piezoelektrycznej zaliczają się zarówno materiały ferroelektryczne, a także nieferroelektryczne. Przy użyciu tych materiałów, została skonstruowana tzw. inteligentna sprężyna. Mechanizm sprężyny wykorzystuje dużą sztywność, wysoką przepustowość i niskie przemieszczenie objętościowe aktuatora piezoelektrycznego. Bardzo niewielka zmiana kształtu aktuatora powoduje dużą zmianę współczynnika sprężystości. Niewielki rozmiar oraz prosta konstrukcja, pozwala na zastosowanie inteligentnych sprężyn jako element do tłumienia drgań, między innymi jako tłumik siedzeń pilotów w śmigłowcach [3, 4, 6].

Inteligentną sprężynę montuje się na wspierciu fotela pilota, w taki sposób, aby siły powodujące drgania przechodziły przez nią i były przy jej pomocy niwelowane. Dodatkowo sprężynę łączy się z systemem monitorującym warunki lotu czy wagę pilota. Tak stworzony system, poprzez zmianę napięcia aktuatora, pozwala na dobranie optymalnych ustawień i ograniczenie drgań do minimum [3].

Innym zastosowaniem sprężyny inteligentnej, jest osadzenie wirnika śmigłowca na czterech sprężynach tego typu. Pozwala to zniwelować drgania wywołane przez obracające się łopatki wirnika, co powoduje spadek drgań i hałasu w kabinie, oraz zmniejsza ciężar maszyny, zmniejszając w konsekwencji zużycie paliwa [3, 4].

Materiały piezoelektryczne znajdują również zastosowanie w monitorowaniu powierzchni stalowych oraz kompozytowych. Jako pierwsza czujników piezoelektrycznych, monitorujących kadłuby wykonane z kompozytów użyła Amerykańska Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA) w swoich promach kosmicznych. Proces ten polegał na zamontowaniu sensorów wykorzystujących materiały piezoelektryczne w kadłubie, które pod wpływem napięcia ulegają odkształceniu, powodując powstanie mikrofali, której ewentualne zakłócenia informują o powstaniu mikropęknięć. System Smart Layer składa się z czujników zalaminowanych w żywicy epoksydowej, która jest izolatorem materiału piezoelektrycznego [4].

Najnowsze rozwiązania to czujniki z włókien piezoelektrycznych PZT. Są to włókna ceramiczne  $Pb(Zr_{1-x}Ti_x)_2O_3$ , w których najlepsze właściwości piezoelektryczne uzyskuje się dla składu  $Pb:Zr:Ti = 1:0,52:0,48$ , a więc związku  $Pb(Zr_{0,52}Ti_{0,48})_2O_3$ . Włókna PZT wytwarza się różnymi technologiami, zastrzeżonymi patentami [4].

W Instytucie Fraunhofera w Niemczech opracowana została technologia bezpośredniego spiekania. Drobny proszek z ceramiki piezoelektrycznej (rozmiar ziaren 2-4  $\mu m$ ) razem z elastycznym spoiwem tworzy żel, z którego wyciskane są długie włókna o średnicy od 15 do 30  $\mu m$ . Następnie włókna te spiekane są w piecu o kontrolowanej atmosferze, by po ostygnięciu stworzyć cienkie i elastyczne nitki ze zwartych ziarenek ceramiki piezoelektrycznej. Kolejnym krokiem jest ułożenie nitki w jednej płaszczyźnie, równoległe do siebie, w odległości około 0,2 mm. Z obu stron, nanoszone są na warstwę elektrody grzebieniowe, umożliwiające polaryzację włókien (nadanie im własności piezoelektrycznych), a następnie później, w czasie pracy gotowych już czujników, na zbieranie z włókien ładunków, powstających podczas ich odkształcenia [3, 4].

Obecnie elementy PZT produkowane są przez firmy komercyjne i są powszechnie dostępne na rynku w Europie Zachodniej, USA, Japonii. Technologia wytwarzania prostych elementów jest opanowana, aczkolwiek wkomponowanie ich w większą strukturę kompozytową jest ciągle tematem badań wielu firm lotniczych realizowanych we własnych zakładach badawczych lub też wspólnych ramowych programach europejskich [3, 4].

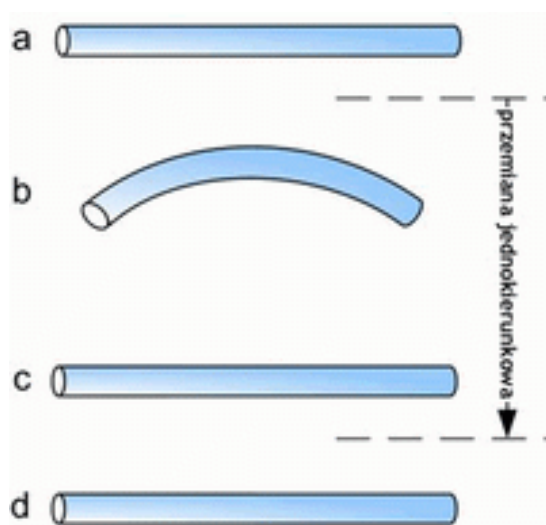
### 3.2 STOPY Z PAMIĘCIĄ KSZTAŁTU

Stopy z pamięcią kształtu wyróżniają się spośród innych materiałów zdolnością do zmiany kształtu, a następnie powrotu do kształtu pierwotnego, najczęściej pod wpływem temperatury. Zjawiskiem fizycznym odpowiadającym za proces jest odwracalna przemiana martenzytyczna indukowana cieplnie. Materiały tego rodzaju posiadają dwie stabilne fazy: austenityczną i martenzytyczną, przy czym ta ostatnia występuje w formie zbliźniaczonej i zbliźniaczonej zniekształconej [1, 5].

W stopach z pamięcią kształtu może występować jedno- lub dwukierunkowy efekt pamięci kształtu oraz zjawisko pseudosprężystości (rys. 1, 2). Pierwszy z nich występuje, gdy materiał odkształcony w stanie martenzytycznym powraca po osiągnięciu odpowiedniej temperatury do kształtu nadanego przy istnieniu fazy wysokotemperaturowej. Standardowe wartości odkształceń w tym wypadku wynoszą od 4% do nawet 10%. Dwukierunkowy efekt pamięci kształtu ma miejsce gdy materiał mający pewien kształt w wysokiej temperaturze, przyjmuje inny kształt w po obniżeniu temperatury poniżej pewnej wartości, natomiast po ponownym podgrzaniu materiał wraca do kształtu wysokotemperaturowego. Odkształcenie podczas występowania tego rodzaju efektu to przeważnie 3-4%. Zjawisko pseudosprężystości polega na odkształceniu materiału (do kilkunastu procent) w wyniku przemiany martenzytycznej

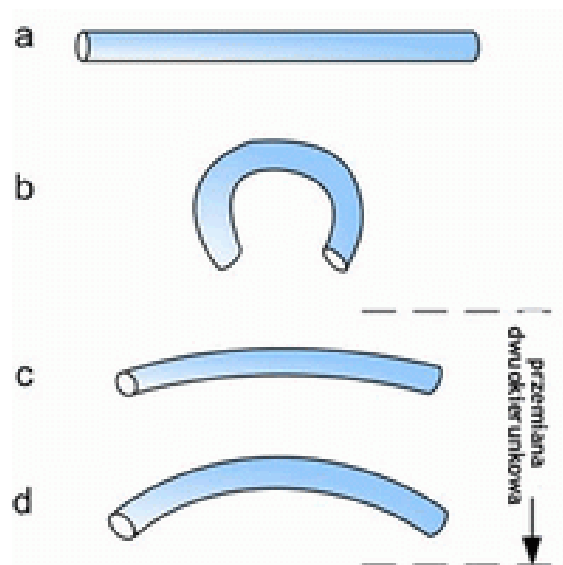
indukowanej naprężeniami powyżej pewnej wartości krytycznej, z następnym powrotem do kształtu pierwotnego po usunięciu obciążenia [1, 5].

Spośród stopóW z pamięcią kształtu ponad 90% zastosowań znajdują stopy na osnowie NiTi, które wykazują najsilniejszy efekt pamięci kształtu oraz najlepsze właściwości mechaniczne, jak np. zdolność tłumienia drgań. Najczęściej są stosowane stopy NiTi o zawartości niklu 53-57%, a oprócz nich oraz stopy na bazie miedzi, szczególnie Cu-Al-Zn oraz Cu-Al-Ni. Właściwości pamięci kształtu wykazują także niektóre materiały niemetalowe, takie jak ceramika (nanometryczny dwutlenek cyrkonu,  $ZnO_2$ ,  $CaTiO_3$ ) i polimery (PET, PEO, poliuretany) [1].



Rys. 1. Jednokierunkowy efekt pamięci kształtu [5]

Fig. 1. One direction shape-memory effect [5]



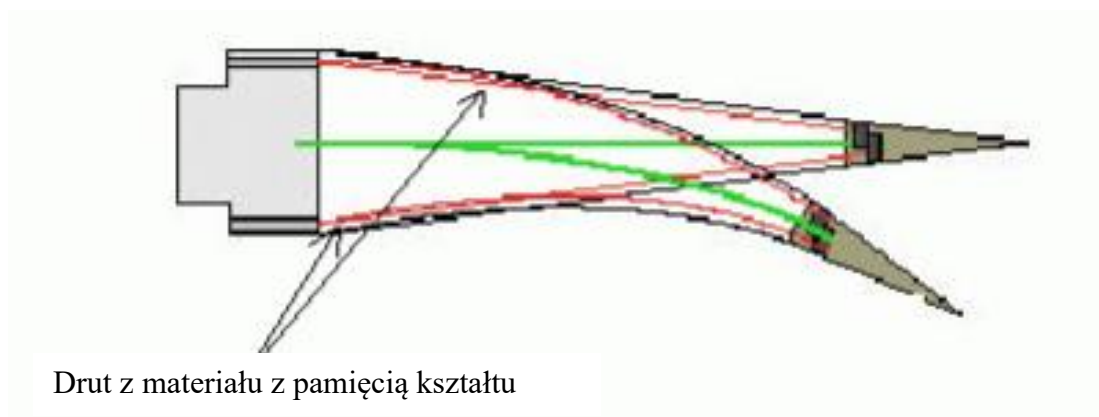
Rys. 2. Dwukierunkowy efekt pamięci kształtu [5]

Fig. 2. Two directions shape-memory effect [5]

Materiały z pamięcią kształtu umożliwiają sterowanie kształtem elementów konstrukcyjnych, zarówno w przypadku części pracujących pod obciążeniem statycznym jak i nieobciążonych. Jeżeli chodzi o przemysł lotniczy to materiały z pamięcią kształtu od kilku lat są powszechnie wykorzystywane na złącza. W stanie martenzytycznym w złączce w kształcie tulei zostaje powiększona średnica otworu, w który wsuwane są końce łączonych rur. Następnie elementy zostają nagrzane do odpowiedniej temperatury, co powoduje przemianę fazową i skurcz złączki. Metoda eliminuje konieczność łączenia elementów przez spawanie czy lutowanie i pozwala na uzyskanie szczelnego połączenia [2, 3, 5].

Zwrotność i zdolność do manewrowania w samolocie zależy w znacznym stopniu od kłap znajdujących się na tyle skrzydeł. Niezawodność i wydajność podczas ich eksploatacji ma kluczowe znaczenie dla sterownia. Dotychczas w tym celu używano ciężkich powierzchni sterowych i rozbudowanych systemów hydraulicznych. Korzystanie z tak złożonego układu jest często względnie trudne w obsłudze i kosztowne. Dobrą alternatywę dla takich systemów stanowią właśnie stopy z pamięcią kształtu, które mogą zmieniać kształt w zależności od temperatury. Jednym z rozwiązań jest drut wykonany ze stopu z pamięcią kształtu, który

umieszcza się pod elastyczną powierzchnią skrzydła, w górnej i dolnej części (rys. 3). W celu zgięcia skrzydła drut w dolnej części zostaje skrócony poprzez efekt pamięci kształtu, a drut z części górnej wyprostowany. Odwrotnie prezentuje się sytuacja, gdy skrzydło ma być wyprostowane. Eliminacja skomplikowanego systemu hydraulicznego na rzecz elementów z pamięcią kształtu związana jest ze zmniejszeniem masy konstrukcji i redukcją kosztów, co zdecydowanie przemawia na ich korzyść. Inteligentne skrzydła samolotów są obecnie opracowywane przez firmę Boeing oraz DARPA [2, 3].

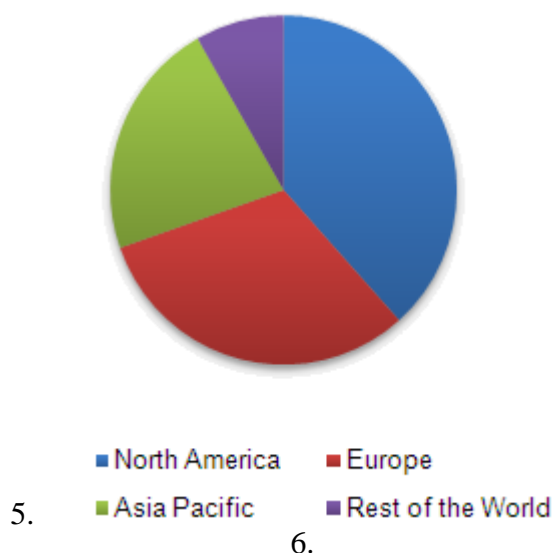


Rys. 3. Schemat skrzydła wykonanego ze stopu z pamięcią kształtu [2]

Fig. 3. Scheme of a aircraft wing manufactured from an shape-memory alloy [2].

#### 4. PODSUMOWANIE

Według badań w 2013 r. światowy rynek materiałów inteligentnych był warty powyżej 27,7 milionów dolarów, a do roku 2020 przewidywane jest, że jego wartość osiągnie nawet ponad 63 milionów dolarów (rys. 4) [7].



Rys. 4. Światowy rynek materiałów inteligentnych w roku 2013 [7]

Fig. 4. Worldwide usage of intelligent materials in 2013 [7]

Wciąż rosnące wymagania stawiane konstrukcjom lotniczym sprawiają, że materiałom klasycznym coraz trudniej im sprostać, stąd też zwiększające się zainteresowanie materiałami typu smart. W ostatnich latach znalazły one zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu, a jeden z największych ich udziałów można zaobserwować właśnie w przemyśle lotniczym. Alternatywę dla tradycyjnych materiałów stanowią między innymi materiały piezoelektryczne i stopy z pamięcią kształtu, których umiejętność adaptacji do zmieniającego się otoczenia pozwala na znaczne usprawnienie działania niektórych elementów konstrukcyjnych. Materiały te posiadają wiele zalet w porównaniu z konwencjonalnymi – są lżejsze, bezpieczniejsze, pozwalają na poprawę komfortu użytkowania i obniżenie kosztów eksploatacji. Coraz większa dostępność i specyficzne cechy materiałów inteligentnych pozwalają na uzyskanie innowacyjnych rozwiązań nieosiągalnych w żaden inny sposób, dlatego też przewiduje się, że materiały inteligentne stanowią będą przyszłość w branży lotniczej [3, 6].

#### LITERATURA

- [1]*Metaloznawstwo z podstawami nauki o metalach*, L.A. Dobrzański, WNT 1999 Warszawa
- [2]*Mechatroniczne człony wykonawcze z zastosowaniem materiałów inteligentnych*, Praca doktorska, mgr inż. Anna Sapińska-Wcisło, Kraków 2006
- [3]*Lotnicze zastosowania materiałów inteligentnych*, Adam Ćwikła, Prace Instytutu Lotnictwa 211, S. 48-56, Instytut Nauk Technicznych, Warszawa 2011
- [4]*Materiały funkcjonalne i złożone w transporcie lotniczym*, Barbara Surowska, Nauka i Technika, Eksploatacja i niezawodność, nr 3/2008
- [5]<http://www.matint.pl/>
- [6]*Inżynierskie materiały inteligentne w środkach transportu*, Małgorzata Trepczyńska-Lent, Logistyka 3/2011
- [7]<http://transparencymarketresearch.com/images/smart-materials-market.png>