

## Materiały do zastosowań militarno-wojskowych

K. Miś<sup>a</sup>, P. Majdecka<sup>a</sup>, T. Tański<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Student/ka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

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

**Streszczenie:** Współczesny przemysł zbrojeniowy zaopatrywany w najnowsze rozwiązania technologiczne może się poszczycić nowoczesnymi osiągnięciami w zakresie nowej generacji sprzętu ochrony osobistej, w tym także uniformami oraz różnego rodzaju sprzętem zbrojeniowym, wliczając w to również pojazdy militarne. Wykorzystywane materiały oraz towarzyszące im rozwiązania konstrukcyjne muszą spełnić szereg wymagań zarówno w zakresie użytkowym, jak również taktycznym. Dominującym czynnikiem przy projektowaniu i wytwarzaniu sprzętu wojskowego jest waga i funkcjonalność zaprojektowanych układów, ponieważ to właśnie te wyznaczniki odgrywają kluczową rolę zarówno na polu walki, jak również w działaniach prewencyjnych. Przemysł zbrojeniowy jest jedną z dziedzin, w której nastąpił niekwestionowany przełom z zakresy używanych materiałów oraz technologii, począwszy od pierwszych zastosowań drewna jako narzędzia walki, po obecnie stosowane zaawansowane materiały inżynierskie. W poniższej pracy przedstawimy możliwości dzisiejszej technologii materiałowej w wybranych zastosowaniach militarno-wojskowych.

**Abstract:** The modern defence industry supported by modern technological solutions provides retrofitting of a new generation in the field of uniforms, reinforcement equipment and military vehicles. The materials used and the accompanying construction solutions must meet several requirements both in terms of use and tactical. The dominant factor in the design and manufacture of military equipment is the weight and functionality of the designed systems, because it is these determinants that play a key role both on the battlefield and in preventive measures. The arms industry is one of the fields in which the unquestionable breakthrough in the field of used materials and technologies has occurred, from the initial use of wood as a combat tool to the currently used advanced engineering materials or intelligent materials. In the following work we will present the possibilities of today's material technology in military-military applications.

**Słowa kluczowe:** militaria, nowoczesna technologia, materiały

## 1. WSTĘP

Przemysł zbrojeniowy to z reguły najbardziej rozwinięty obszar inwestycyjny każdego kraju, w głównej mierze w zakresie ciągłej modernizacji i wprowadzania coraz to nowszych rozwiązań technologicznych. W tym także najnowsze osiągnięcia z zakresu inżynierii materiałowej pozwalają zapewnić rozwój przemysłu zbrojeniowego. Innowacyjne rozwiązania są wykorzystywane w każdym aspekcie, zaczynając od umundurowania żołnierzy, poprzez nowoczesne techniczne rozwiązania w zakresie konstrukcji pojazdów bojowych. W dzisiejszych czasach od stroju żołnierza nie wymaga się jedynie dobrego maskowania czy też wielofunkcyjnych przestrzeni umożliwiających magazynowanie i przechowywanie wszelkiego rodzaju wyposażenia, ale również najwyższej klasy wodoodporności, niepalności, odporności na wysokie temperatury i toksyny oraz własności wytrzymałościowych na poziomie tak wysokim, że przecięcie nożem staje się niemożliwe [1].

Umundurowanie wojskowe oraz wymagania stawiane odzieży wojskowej na przestrzeni lat wielokrotnie się zmieniały, zależnie od rozwoju technologicznego i aktualnej sytuacji geopolitycznej na świecie. W epoce napoleońskiej, w czasach wojny secesyjnej, zimnej wojny czy pierwszej i drugiej wojny światowej jako surowce do wytwarzania tekstyliów wojskowych wykorzystywano skórę, wełnę, jedwab, bawełnę czy len. Po drugiej wojnie światowej przemysł zbrojeniowy został zrewolucjonizowany, za sprawą otrzymanego w latach 60-tych przez Stephanie Kwolek pracującej dla koncernu DuPont włókna syntetycznego nazwanego kevlarem, z którego produkowano pierwsze kamizelki kuloodporne. Oprócz uniformów i wyposażenia osobistego każdego żołnierza, również sprzęt zmechanizowany stanowi jedną z głównych osi zainteresowań wojskowych. W dobie narastających konfliktów międzynarodowych, ważne jest zapewnienie współczesnej armii najnowszych rozwiązań w zakresie ochrony balistycznej [2-4].

## 2. ZASTOSOWANIA MATERIAŁÓW W SPRZĘCIE WOJSKOWYM

Głównym zadaniem materiałów wykorzystywanych w przemyśle zbrojeniowym jest ochrona zdrowia i życia żołnierza oraz skuteczne zwalczanie wroga. Inżynieria materiałowa w połączeniu z innymi obszarami nauki, takimi jak mechatronika, automatyka, elektronika, chemia, logistyka i wiele innych pozwala na tworzenie zaawansowanych technologicznie rozwiązań wspomagających sprawne funkcjonowanie współczesnej armii. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy ekwipunek sapera z Royal Engineers, stacjonującego w prowincji Helmland w Afganistanie.

Materiały te stosowane są głównie na [5]:

- a. umundurowanie żołnierza;
- b. kamizelki kuloodporne;
- c. namioty wojskowe;
- d. pokrowce, plandeki na pojazdy wojskowe;
- e. pokrowce na sprzęt wojskowy;
- f. osłony maskujące;
- g. pojazdy balistyczne (czołgi, samoloty, kadłuby statków);
- h. powłoki zabezpieczające na pojazdy wojskowe.



Rysunek 1. Ewipunek saperera z Royal Engineers, stacjonującego w prowincji Helmand w Afganistanie [6].

Picture 1. Royal Engineers sapper equipment stationed in Helmand, Afghanistan [6].

Dodatkowo od materiałów stosowanych w sprzęcie militarnym, które muszą pracować w utrudnionych warunkach, wymaga się spełniania specyficznych wymagań, takie jak: [5]

- a) kolor khaki lub pokrewny (np. RAL 6006);
- b) nieprzemakalność tkaniny;
- c) niepalność (materiały typu PLAWIL A-535) ;
- d) odporność na różne warunki atmosferyczne;
- e) odporność na działanie kwasów;
- f) wytrzymałość na zrywanie i rozdieranie;
- g) dobra przyczepność powłoki;
- h) pigmentacja podczerwona, która pozwala na odbicie promieni podczerwony, dzięki czemu możliwe jest ukrycie obiektów, pojazdów.

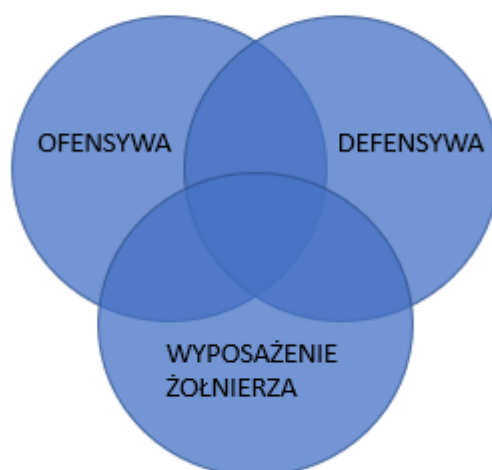
### 3. ZASTOSOWANIE NANOMATERIAŁÓW W PRZEMYSŁE ZBROJENIOWYM

Obecnie nanotechnologia jest jedną z najszybciej rozwijających się dziedzin nauki, a jej niezaprzeczalny sukces można przypisać możliwością jakie ze sobą niesie, między innymi umożliwia wytworzenie nowoczesnych materiałów o niespotykanych jak dotąd własnościach. Zgodnie z zaleceniem Komisji Europejskiej z dnia 18.10.2011 roku w sprawie przyjęcia definicji nanomateriału: „nanomateriał oznacza naturalny, powstały przypadkowo lub wytworzony materiał zawierający cząstki w stanie swobodnym lub w formie agregatu bądź aglomeratu, w którym co najmniej 50% lub więcej cząstek w liczbowym rozkładzie wielkości cząstek ma jeden lub więcej wymiarów w zakresie 1 nm-100 nm”. Jednak zgodnie ze standardami panującymi w środowisku naukowym za nanomateriał uważa się struktury,

których przynajmniej jeden z wymiarów nie przekracza 1  $\mu\text{m}$ . Do najbardziej rozpowszechnionych nanomateriałów należą fulereny, nanorurki, nanocząstki i kropki kwantowe [7].

Nanotechnologia oferuje innowacyjne rozwiązania dla wojska z zakresu umundurowania żołnierza, ofensywy oraz defensywy (rysunek 2). Oprócz tego, nanotechnologia znajduje zastosowanie w urządzeniach służących do wymiany informacji, na przykład [8]:

- a) czujniki ruchu;
- b) czujniki monitorujące stan zdrowia;
- c) radary;
- d) systemy raportowania;
- e) czujniki monitorujące jakość sprzętu i stan amunicji.



Rysunek 2. Zakres zastosowania nanotechnologii w wojsku [8].

Picture 2. The scope of application nanotechnology in the army [8].

### 3. 1 Umundurowanie

Badania z zakresu nanotechnologii pozwalają na rozwiązywanie problemów, z którymi borykają się żołnierze na polu walki. Zastosowanie nanotechnologii w produkcji umundurowania ma znaczący wpływ na [9]:

- a) obniżenia masy umundurowania żołnierza wraz z ekwipunkiem, poprzez zastosowanie bardzo lekkich nanopolimerów i nanokompozytów, zachowując jednocześnie jego własności funkcjonalne, dzięki czemu żołnierz może być bardziej mobilny;
- b) zaopatrzenie mundurów w systemy kamuflażu;
- c) zastosowanie tkaniny Nano-Care w produkcji odzieży wojskowej, która wykonana jest w 100% z bawełny. Dzięki odpowiedniej impregnacji przy użyciu nanocząstek, tkanina zyskuje wysoką trwałość i odporność na zabrudzenia oraz wilgoć;
- d) zastosowanie nanopianek, które wyróżniają się bardzo dobrymi własnościami termoizolacyjnymi.

Institute for Solider Nanotechnologies (ISN) to wiodący instytut w dziedzinie nanotechnologii w zakresie militarno-wojskowym. Ośrodek ten pracuje nad „udoskonaleniem żołnierzy”, poprzez stworzenie specjalistycznych mundurów, pozwalających na kontrolę stanu zdrowia i poziomu stresu żołnierza oraz wspomaganie leczenia. Instytut jako cel stawia sobie usprawnienie działań żołnierzy w ciężkich, nieprzewidywalnych sytuacjach, dlatego prowadzą badania nad kamizelkami kuloodpornymi o wysokiej wytrzymałości, które mają charakteryzować się bardzo dużą elastycznością oraz wysoką skutecznością w zatrzymywaniu pocisków, przy jednoczesnym zwiększeniu mobilności żołnierza i znaczącym obniżeniu jej masy. W tym celu, stosowane są matryce z nanowłóknien SiC, ze względu na ich wysoką odporność na rozciąganie, dobre właściwości elektryczne oraz wysoką przewodność cieplną. Wśród materiałów stosowanych do produkcji mundurów wojskowych znajdują się także nanorurki węglowe CNT. Panczerze wykonane z kompozytów z dodatkiem CNT mogą być nawet 100 razy mocniejszy niż panczerze stalowe. Nanorurki węglowe stosowane są także do produkcji hełmów i kamizelek kuloodpornych. Podczas uderzenia pocisku w żołnierza, mającego na sobie kamizelkę wykonaną z materiałów z dodatkiem nanorurek węglowych, włókna tkaniny rozciągają się i pochłaniają energię, powodują rozproszenie się siły i energii pocisku po całej powierzchni materiału. Nanorurki węglowe posiadają wysoki moduł sprężystości oraz bardzo dużą wytrzymałość na odkształcenia, dzięki czemu doskonale nadaje się do zastosowań balistycznych. Oprócz podstawowych funkcji umundurowania żołnierza, do jakich należy ochrona przed pociskami, ważne jest, aby mundur zapewnił ochronę przed toksyczną bronią biologiczną i chemiczną czy zapewnił bezpieczeństwo w ekstremalnych warunkach atmosferycznych [8,10].

Zespół NSC stworzył koncepcję żołnierza przyszłości, według której [13]:

- a) nakrycie głowy – umożliwi lokalizację oraz komunikację między żołnierzami; umożliwi obserwację pola walki w najtrudniejszych warunkach; zapewni bezpieczeństwo nawet podczas zagrożenia chemicznego;
- b) kombinezon bojowy – wyróżniać będzie się lekkością, funkcjonalnością oraz ochroną przed pociskami i uderzeniami; zapewni właściwą wilgotność oraz utrzyma odpowiednią temperaturę żołnierzowi;
- c) uzbrojenie – zastosowane zostaną pięciolufowe karabiny o niewielkiej wadze, do 2,5kg, gdzie 4 lufy będą przeznaczone dla pocisków o kalibrze 15mm, a piąta, o kalibrze 4,6mm, która pozwoli na strzały z bliskiej odległości;
- d) monitoring fizjologiczny – wbudowany w umundurowanie żołnierza pozwoli na kontrolę temperatury, ciśnienia krwi, poziom stresu, częstotliwość skurczów serca;
- e) mikroklimat – system klimatyzacji, który pozwoli na zachowanie stałego mikroklimatu w każdych warunkach

### 3.2 Ofensywa i defensywa

Nanotechnologia umożliwi modyfikację dotychczas stosowanych środków bojowych [8,9]:

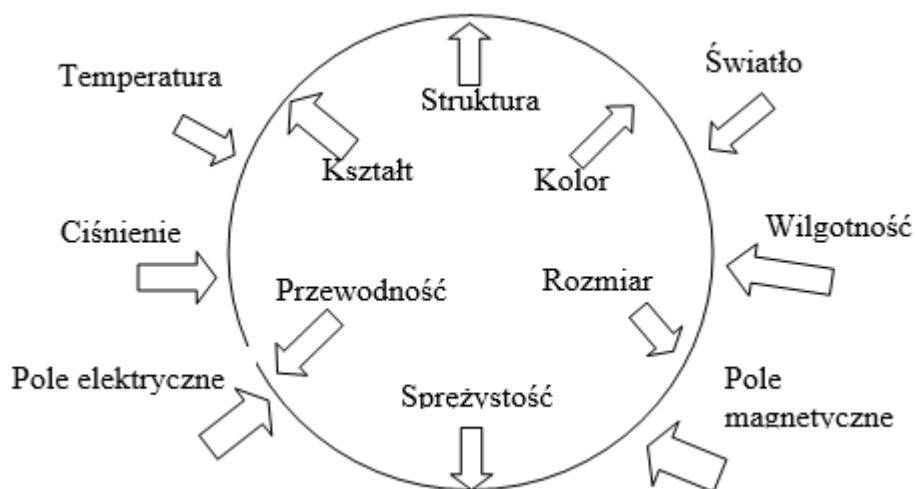
- 1) Wprowadzenie składników w skali nano do klasycznych mieszanin pirotechnicznych (termitów), co umożliwi uzyskanie środków bojowych o znacznie większej mocy od klasycznych materiałów wybuchowych. Połączenia nano metali z tlenkami metali znajduje zastosowanie w podwodnych ładunkach wybuchowych. Nanoproszek

- aluminium stosowany jako dodatek przy produkcji termitów wpływa na zwiększenie energetyczności ładunków wybuchowych.
- 2) Otrzymywanie nowoczesnej amunicji i głowic bojowych poprzez zastąpienie mikrometrycznego wolframu stosowanego na rdzenie w pociskach podkalibrowych oraz pełnokalibrowych, na jego nanometryczny odpowiednik, dzięki czemu własności mechaniczne i użytkowe broni palnej zostają spotęgowane.
  - 3) Nanofikacja składników paliw raketowych, która wpływa na zwiększenie gęstości mocy oraz redukcję opóźnień zapłonu pojazdów pancernych.
  - 4) Produkcja pancerzy ceramicznych na bazie nanoproszku węgliku boru, którą opracowała rosyjska firma NeVz. Oprócz pancerzy pojazdów bojowych, z tego materiału wykonuje się również indywidualne osłony, które przy 4-krotnie niższej masie, w porównaniu do wcześniej stosowanych osłon, osiągają nawet 6-krotnie wyższą skuteczność ochrony przed pociskami. W produkcji pancerzy pojazdów pancernych wykorzystywany są również stopy aluminium wraz z nanorurkami węglowymi, co poprawia odporność na uderzenia, przedłuża żywotność oraz zmniejsza masę pancerzy.

Gliwicki Instytut Metalurgii Żelaza przy współpracy z WITU podjął się próby stworzenia supertwardego nanostrukturalnego materiału ze stopów żelaza. Celem było zastosowanie wytworzonych materiałów w pancerzach pojazdów pancernych i indywidualnych, jako wkłady do kamizelek kulo- i nożoodpornych. Prowadzono również prace nad kompozytowymi pancerzami nanostrukturalnymi z cieczą koloidalną, magnetoreologiczną oraz nad połączeniem stopów aluminium z nanorurkami węglowymi, z czego wzmocnione mają być kadłuby samolotów i statków [8].

#### 4. MATERIAŁY INTELIGENTNE W PRZEMYŚLE WOJSKOWYM

Lata 80 XX wieku to czas, w którym wzrosło zainteresowanie materiałami o specjalnych właściwościach, tzw. materiałami inteligentnymi. Wiele materiałów, które dzisiaj określamy mianem materiałów inteligentnych było znanych i stosowanych już wcześniej, jak np. stopy z pamięcią kształtu. Do dziś grupa tych materiałów nie jest jednoznacznie definiowalna, jednak 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 pożądanej i skutecznej odpowiedzi na te bodźce”. Można również podejść do definicji materiałów inteligentnych ze strony informatycznej, stosując tę terminologię materiałem inteligentnym nazwiemy materiał, który będzie spełniać rolę zarówno czujnika jak i sensora, procesora i urządzenia uruchamiającego aktuatora przy jednoczesnym zachowaniu właściwości wykazujących cechy sprzężenia zwrotnego. Podsumowując obie te definicje można przedstawić eksplikację materiałów inteligentnych w postaci grafiki (Rysunek 3) [13-16].



Rysunek 3. Ogólna zasada działania materiałów inteligentnych [13].  
 Picture 3. The general principle of operation of intelligent materials [13].

Według definicji materiałów inteligentnych można je podzielić na:

**1) Materiały zmieniające kolor:**

- a) fotochromowe,
- b) termochromowe,
- c) elektrochromowe.

**2) Materiały emitujące światło:**

- a) elektroluminescencyjne,
- b) fluoroscencyjne,
- c) fotoluminescencyjne,
- d) katodoluminescencyjne
- e) termoluminescencyjne,
- f) radioluminescencyjne.

**3) Materiały zmieniające swój kształt lub wielkość:**

- a) polimery przewodzące,
- b) elastomery dielektryczne - materiały elektrostrykcyjne,
- c) materiały magnetostrykcyjne,
- d) materiały piezoelektryczne,
- e) żele polimerowe,
- f) materiały z pamięcią kształtu.

**4) Materiały zmieniające temperaturę:**

- a) materiały termoelektryczne.

**5) Ciecze zmieniające swoją gęstość:**

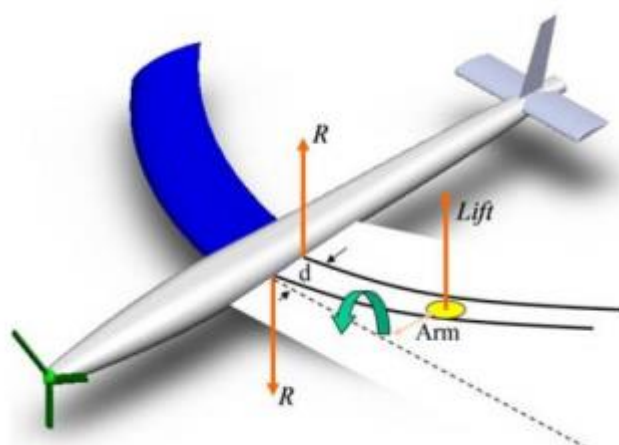
- b) ciecze magnetoreologiczne,
- c) ciecze elektroteologiczne;

**6) Materiały samogrupujące się****7) Materiały samonaprawiające się.**

Materiały inteligentne w przemyśle wojskowym wykorzystuje się na różnych płaszczyznach zaczynając od inteligentnego umundurowania, mającego na celu kontrolowanie funkcji życiowych żołnierza oraz reagowanie w sytuacjach zagrażających jego życiu, przez zastosowanie materiałów inteligentnych emitujących światło w miejscach, w których doprowadzenie prądu byłoby niemożliwe, zastosowanie soczewek zmieniających kolor w zależności od padającego światła, bezałogowe statki powietrzne i wodne mające na celu kontrolowanie i reagowanie na zagrożenia.

**4.1 Materiały inteligentne w lotnictwie wojskowym.****a) Inteligentne skrzydła samolotów bezałogowych.**

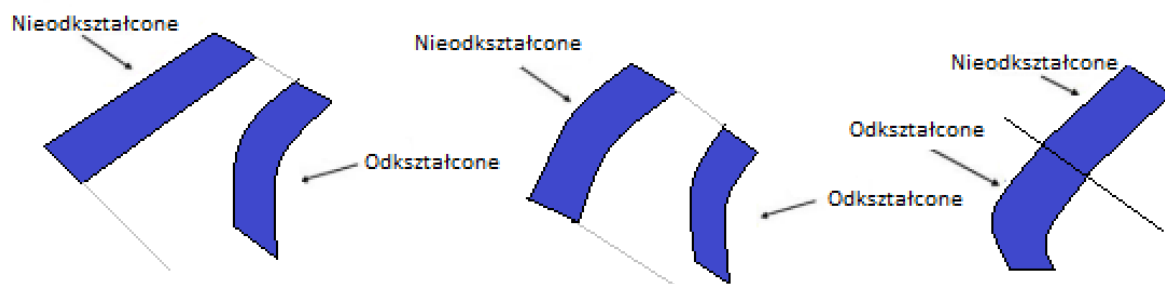
Zastosowanie stopów z pamięcią kształtu do wytwarzania skrzydeł w bezałogowych statkach powietrznych. Regulacja kształtu skrzydła następuje poprzez wprowadzenie specjalnie dedykowanych obwodów z materiałów z pamięcią kształtu, które w wyniku nagrzewania i chłodzenia cyklicznie zapewniają zmianę kształtu części, a w efekcie optymalną pracę skrzydła, która jest dostosowana do warunków lotu. Zmiana kształtu skrzydła wpływa pozytywnie na zmiany oporu powietrza, sił i momentów, które działają na skrzydło w czasie lotu. Model samolotu z inteligentnymi skrzydłami oraz modele ich zmian kształtu przedstawiono na rysunkach poniżej (Rysunek 4 i 5) [15].



R - promień skrzydła  
d – średnica skrzydła  
Lift – kierunek skrzydła

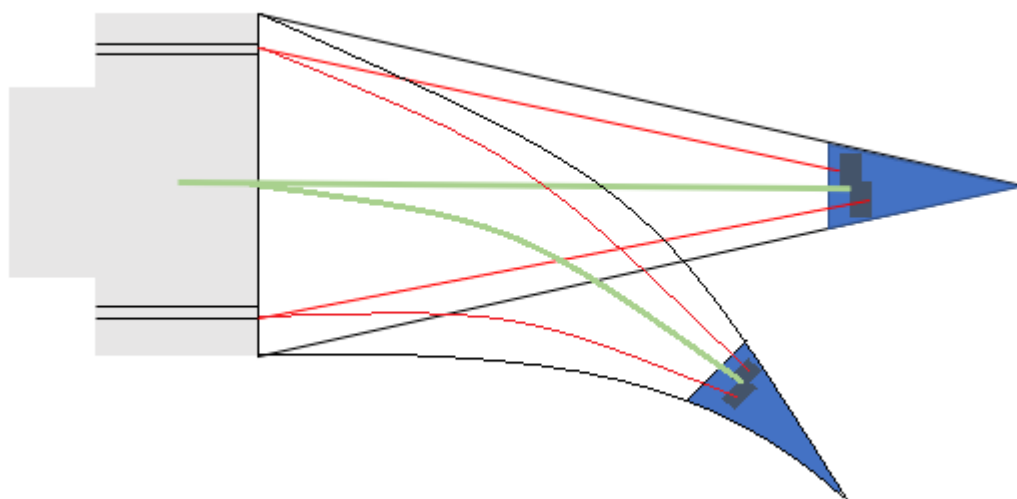
Rysunek 4. Model samolotu bezałogowego z inteligentnymi skrzydłami [15].  
Picture 4. Unmanned aerial vehicle model with intelligent wings [15].





Rysunek 5. Modele zmian kształtu inteligentnych skrzydeł bezzałogowego samolotu [14].  
Picture 5. Models of shape changes of intelligent unmanned aircraft wings [14].

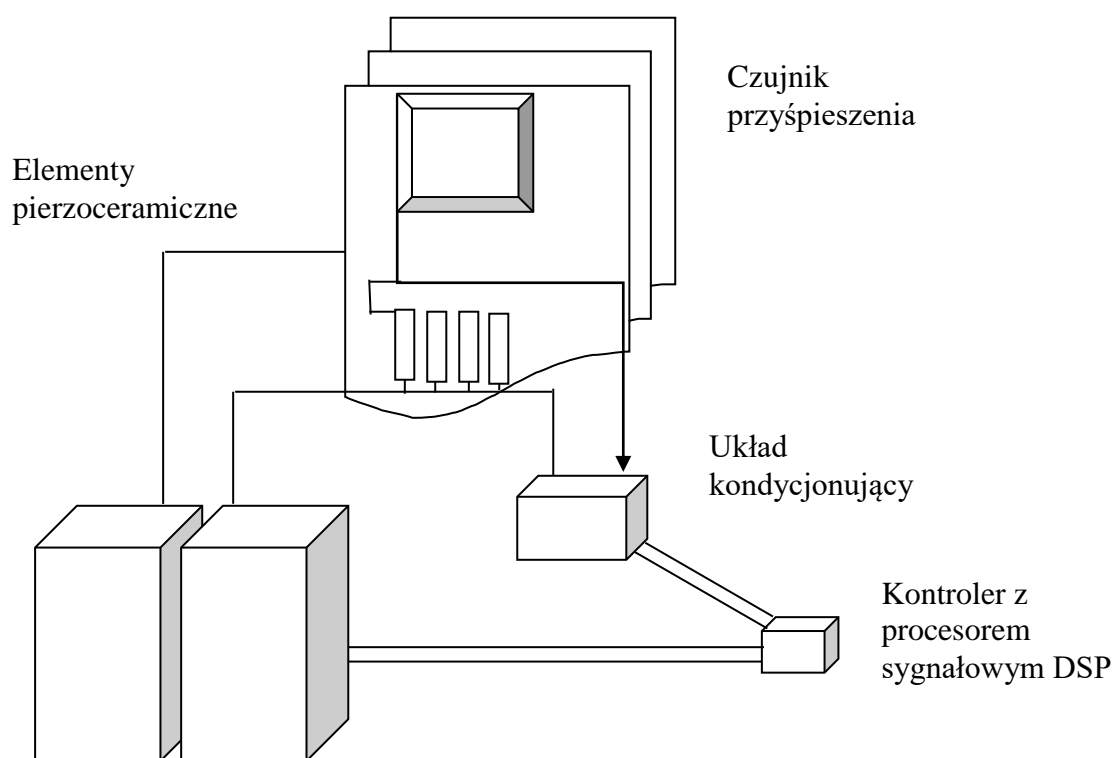
Możliwe jest również wprowadzenie tego rozwiązania w statkach załogowych do kontroli klap skrzydeł, które znajdują się w tylnej części skrzydła i odpowiadają za sterowność samolotu. Standardowe procedury zakładają wykorzystanie systemu hydraulicznego do kontroli klap. Wykorzystanie systemu hydraulicznego bardzo często jest kosztowne i zwiększa zdecydowanie masę samolotu. Jednym z alternatywnych rozwiązań jest wykorzystanie drutów z pamięcią kształtów, rozmieszczenie ich w górnej i dolnej części skrzydła pozwala na sterowanie klapą i jej podnoszenie i opuszczanie. W przypadku klap skrzydeł najczęściej stosuje się naprzemienne ogrzewanie drutów znajdujących się w górnej i dolnej części kłapy. Schemat układu wykorzystującego druty wykonane z materiału z pamięcią kształtu przedstawiono na rysunku poniżej (Rysunek 6) [14].



Rysunek 6. Schemat układu wykorzystującego druty wykonane z materiału z pamięcią kształtu [14].  
Picture 6. Diagram of a system using wires made of shape memory material [14].

**b) Redukcja drgań w ogonie samolotu.**

Najnowszej generacji samoloty wojskowe osiągają bardzo duże prędkości i jednocześnie muszą zachować najwyższą klasę zwrotności i dokładności podczas wykonywania powietrznych manewrów przy bardzo dużych obciążeniach. Niektóre samoloty są skonstruowane w taki sposób, że zaburzony strumień powietrza uderza w ogon wprowadzając go w niebezpieczne drgania, co w efekcie może doprowadzić do wypadku. Mogą w efekcie powodować one niebezpieczne obniżenie wytrzymałości konstrukcji ogona, a nawet zwiększoną awaryjność samolotu. System aktywnej kontroli tłumienia drgań konstrukcji ogona posiada piezoelektryczne, odkształcalne elementy wykonawcze stanowiące podstawę układu. W skład układu wchodzi również czujniki przyspieszeń i odkształceń, które wysyłają informację do sterownika opartego o procesor sygnałowy (DSP). Na poniższym rysunku przedstawiono schemat układu redukcji drgań na ogonie samolotu (Rysunek 7) [14].



Rysunek 7. Schemat układu redukcji drgań na ogonie samolotu [14]

System aktywnej redukcji drgań posiada sterownik, który przygotowuje i wysyła w czasie rzeczywistym sygnały do elementów wykonawczych. Następnie wzmacniacz wysokiego napięcia zamyka obwód elektryczny. Zaburzone strugi powietrza, które spływają ze skrzydeł samolotu wzbudzają formy drgań ogona, których zadaniem jest zmaksymalizowanie sterowności w zakresie zginania i skręcania. Testy wykazują ponad 50% redukcję naprężeń w rdzeniu struktury ogona [14].

### ***c) Inteligentny system przeciwooblodzeniowy.***

Aby wspomniany wcześniej system inteligentnych skrzydeł samolotowych działał prawidłowo i nic nie zakłócało jego pracy, musi współgrać z Inteligentnym Systemem Przeciwooblodzeniowym. System ten łączy w sobie unikatowe własności kompozytów oraz materiałów inteligentnych. Chcąc utrzymać optymalne własności aerodynamiczne w każdych warunkach lotu, statek skonstruowany ze stopów z pamięcią kształtu powinien być zabezpieczony przed oblodzeniem i jego negatywnymi skutkami. W tym celu skonstruowano nanokompozyty polimerowe i nanokrystaliczne stopy metali o właściwościach grzejnych. Wspomniane materiały są stosowane w strukturach statku i są w stanie stwierdzić w czasie rzeczywistym czy określony, kontrolowany obszar jest oblodzony. Kolejnym atutem wykorzystania tej technologii jest zdecydowanie dłuższy czas użytkowania niż przy używaniu tradycyjnych systemów ogrzewania wykorzystujących drut oporowy. Masa grzejna może być dowolnie elastyczna lub sztywna i nie zawiera zbędnych obwodów elektrycznych, co zarówno pozwala na ograniczenie kosztów, ale również pozwala na dłuższe użytkowanie i mniejsze ryzyko przepalenia lub przerwania obwodu. Kolejnym atutem jest równomierny, gradientowy rozkład temperatury na całej użytkowanej powierzchni, dzięki czemu system jest bardziej wydajny i oszczędny [16].

## **4.2 Materiały inteligentne w pojazdach lądowych w przemyśle wojskowym.**

### ***a) System podnoszenia maski samochodu.***

Jest to system, który ma za zadanie zmniejszyć skutki zderzenia pojazdu z pieszym przez co jest często nazywany systemem bezpieczeństwa pieszych. W momencie zderzenia samochodu z pieszym, maska samochodu otwiera się i podnosi w efekcie czego możliwa jest absorpcja energii kinetycznej zderzenia z pieszym. Podobne zabiegi były już wykorzystywane w przeszłości, ale dopiero zastosowanie stopu NiTi pozwoliło na wypracowanie modelu, którego skuteczność i zastosowanie jest powtarzalne. Takie zastosowanie może być również stosowane w pojazdach wojskowych, które niejednokrotnie są narażone na kolizje i uszkodzenia, co z całą pewnością zmniejszyłoby koszty i czas ich napraw [17].

### ***b) Samonaprawiające się kompozyty.***

Samonaprawiające się poszycia mogą wnieść zmiany zarówno w konstrukcjach pojazdów lądowych jak i powietrznych. Materiał składa się z mieszanki żywic epoksydowych wzbogaconych nanowypełniaczami w postaci włókien węglowych. Proces polega na chemicznej polimeryzacji opartej na metatezie z otwarciem pierścienia, co stymuluje samonaprawę. Do formowania sieci przewodzącej oraz jako katalizatory reakcji wykorzystano wielościennie nanorurki węglowe, nanowłókna, grafit i arkusze grafenu. Zastosowanie tego typu rozwiązań wpływa znacząco na poprawę bezpieczeństwa, a także na aspekt ekonomiczny całej konstrukcji [18].

### ***c) Samonaprawiające się opony.***

Opony bardzo często narażone są na niezliczone szkody, czy to przez złą jakość drogi, zróżnicowaną nawierzchnię pokrytą kamieniami i żwirem na drogach leśnych lub gruntowych,

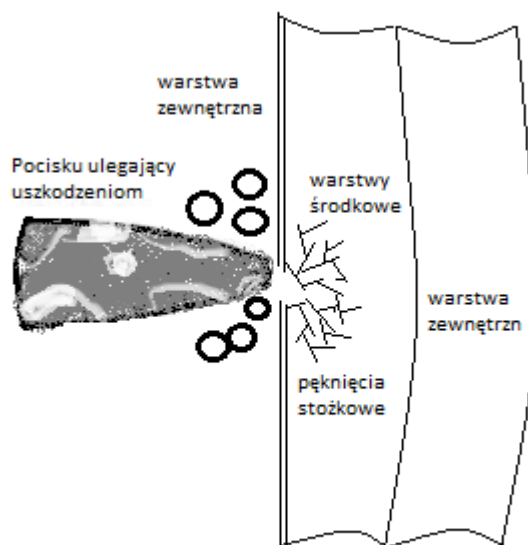
przedmioty znajdujące się na drodze czy ostrzał. Wymiana koła jest jednym z zagrożeń, które poprzez unieruchomienie pojazdu może bezpośrednio przyczynić się do zagrożenia dla poruszających się nim żołnierzy. Dlatego rozwiązaniem wychodzącym naprzeciw temu problemowi wydaje się być zastosowanie na całej szerokości bieżnika polimeru, który ma postać klejącej samouszczelniającej masy, nietracącej swoich właściwości przez cały okres użytkowania, do czasu pierwszego uszkodzenia. Bez względu na to, czy element, który uszkodził oponę zostanie z niej wyciągnięty czy nie, polimer jest w stanie zasklepić uszkodzenie. Minimalna strata ciśnienia spowodowana wystąpieniem dziury w oponie aktywuje polimer, który samoistnie wypełni cały powstały obszar lub oblepi ciało obce zasklepiając dziurę, zatrzymując w ten sposób dalszą utratę ciśnienia i pozwalając przejechać do bezpiecznego punktu wymiany opony bez strat na jakości w prowadzeniu pojazdu [19].

## 5. KOMPOZYTOWE PANCERZE

Gwałtowny rozwój inżynierii materiałowej w ostatnich kilkunastu latach pozwalał na wytwarzanie materiałów zapewniających większe bezpieczeństwo na polu walki. Jednym z wynalazków pozwalających na zapewnienie znaczniejszego bezpieczeństwa żołnierzy, nie tylko w aspekcie kamuflażu, ale również w kwestii odporności osłon są coraz bardziej popularne kompozytowe pancerze. Ze względu na ograniczoną masę, której wzrost determinowany jest przez nośność oraz użyteczność konstrukcji zaczęto rozważać rozwiązania opierające się na warstwowych kompozytach, których masa bardzo często jest zdecydowanie niższa, niż masa używanych wcześniej jednolitych osłon ceramicznych lub metalowych. Wybór rodzaju kompozytu używanego jako osłonę motywowany jest głównie przeznaczeniem danej osłony: czy jest to osłona główna czy dodatkowa, jakie są wymagane środki ochrony, przed jakim rodzaju bronią mają zabezpieczać konstrukcję oraz czy osłona montowana jest wewnętrznie czy zewnętrznie. Najczęściej używane ze względu na wysoką efektywność są rozwiązania: ceramika-tworzywo sztuczne, ceramika-metal oraz ceramika-tworzywo sztuczne -metal. [20,21].

Poszczególne warstwy pancerza spełniają dedykowane im role, dlatego w ich skład wchodzi różne mieszanki materiałów, a ich funkcje przedstawiono na rysunku poniżej:

- zadaniem najbardziej zewnętrznych warstw pancerza jest zmniejszenie prędkości pocisku poprzez stępienie oraz skruszenie ostrza pocisku. Poza zmniejszeniem prędkości pocisku istotną rolę jest również zmiana kierunku penetracji pocisku,
- środkowe warstwy mają za zadanie spowodować pęknięcia w pocisku oraz jego rozkruszenie. Efektem opisanych uszkodzeń powinno być radykalne wyhamowanie prędkości pocisku oraz zmiana kierunku penetracji,
- Tylne warstwy ma spowodować zupełne wyhamowanie pocisku i jego fragmentów odseparowanych w poprzednim etapie [21].



Rysunek 8. Schemat przedstawiający zniszczenia pocisku na drodze warstw pancerza [4].

Picture 8. Diagram showing the destruction of the projectile on the path of armor layers [4].

Ceramika ze względu na swoje unikatowe własności, takie jak wysoka twardość może spowodować, że pociski wykonane z materiałów jakimi są spieki wolframowe czy stal hartowana kruszą się na jej powierzchni. Niestety wysoka twardość niesie ze sobą wady w postaci wysokiej kruchości, przez co powłoka byłaby mniej odporna na wielokrotne strzały pocisków, uszkodzenia czy odkształcenia oraz niższą wytrzymałość na naprężenia rozciągające w porównaniu do powłoki wykonanej ze stali. Przeważającą jednak zaletą ceramiki nad stalą pancerną jest możliwość ograniczenia masy pancerza nawet o 40%. Ze względu na korzystny stosunek jakości do ceny najczęściej sięga się po ceramikę opartą na tlenku glinu nazywaną korundową lub arundową. Rzadziej używanymi ze względu na cenę są ceramika na bazie węgliku krzemu, jej masa jest zaledwie o kilka procent mniejsza od korundowej oraz ceramiki na bazie węgliku boru, w przypadku której różnica w masie jest już znacząca na poziomie 20-25%. Analizując powyższy balans własności najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie kompozytów, które pozwolą na zmniejszenie masy pancerza, a w efekcie również na podniesienie jego własności użytkowych przy zachowaniu jak największej odporności na pociski w aspekcie ciągłym, a nie jednorazowym [20-21].

Istotne cechy, które determinują wybrane stopy metali wykorzystywane w pancerzach to przede wszystkim korzystny stosunek wytrzymałości do wagi, odporność korozyjna, plastyczność. Stąd najczęściej stosuje się stopy tytanu, aluminium i magnezu. Aluminium można zakwalifikować do dwóch grup używanych do produkcji pancerzy: niewymagających obróbki cieplnej oraz wymagających obróbki cieplnej, które za to są znacznie bardziej wytrzymałe oraz można kształtować ich własności za pomocą dodatków stopowych, mikrostrukturę oraz obróbkę cieplną. Stopy magnezu są zdecydowanie mniej popularne zarówno w przemyśle jak i kwestii prowadzonych nad nimi badań [21].

### 5.1 Materiały na kompozyty oraz technologie ich wykonania.

Materiały użyte w kompozytowych pancerzach warstwowych [21]:

#### a) Stopy metali lekkich:

- AlZnCuMg,
- AlCuMg,
- AlMg,
- MgZn,
- MgAlZn,
- Ti Gr2,
- Ti Gr4,
- Ti Gr5.

#### b) Materiały ceramiczne:

- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,
- SiC,
- B<sub>4</sub>C.

#### c) Tworzywa sztuczne:

- Tkanina aramidowa (kevlar),
- Polietylen,
- Żywice epoksydowe zbrojone włóknami.

Materiały łączy się ze sobą na dwa sposoby zależne od przeznaczenia pancerza. Dodatkowy pancerz zewnętrzny wykonywany jest w metalowej kokili w technologii odlewania. Celem tego zabiegu było wykonanie kompozytu składającego się ze stopów aluminium i magnezu zbrojonych ceramiką oraz ze stopów na osnowie faz międzymetalicznych NiAl [21]. Drugim sposobem jest wykonywanie pancerza podstawowego w technologii procesu autoklawy i polega na klejeniu płytek ceramicznych ze stopami metali lekkich z kevlarem lub polietylenem przy pomocy zbrojonych żywic epoksydowych utwardzanych chemicznie lub termicznie [21].

## 6. MATERIAŁY POLIMEROWE W PRZEMYSŁE ZBROJENIOWYM

Materiały polimerowe znane są od drugiej połowy XIX wieku. Rozwój inżynierii materiałowej w dziedzinie materiałów polimerowych doprowadził do tego, że możliwości zastosowania tych materiałów są w pewnym zakresie nieograniczone. Rozwój i historia tych materiałów rozpoczyna się od momentu, kiedy to zastosowano po raz pierwszy polimery pochodzenia naturalnego, takich jak celulozoid. Następne materiały polimerowe wytwarzano poprzez polimeryzację występujących w przyrodzie związków chemicznych. W 1907r nastąpił przełom. Leo Beakeland opracował wówczas bakelit - pierwszy polimer stosowany na skalę masową. Lata 30-te XX wieku zaowocowały w pojawieniu się nowych tworzyw sztucznych, takich jak neopren, PLA, PA, teflon oraz materiały PMMA, które charakteryzowały się dobrą przezroczystością. W drugiej połowie XX wieku Stephanie Kwolek wraz z grupą badawczą wytworzyli niezwykle wytrzymały i ponad 5 razy lżejszy od stali, materiał polimerowy, który zachowuje swoje własności w przedziale temperatur od -200°C do +245°C.

Z biegiem czasu odkrywano również polimery charakteryzujące się odpornością na podwyższone temperatury oraz niepalnością (PEI), będące przewodnikami elektrycznymi (poliacetylen), polimery biodegradowalne, a także tworzywa z pamięcią kształtu.

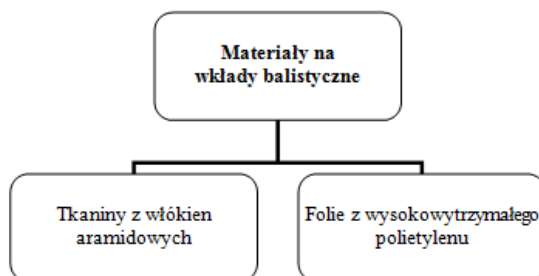
### 6.1 Kamizelki kuloodporne

Koniec Drugiej Wojny Światowej był czasem rozwoju przemysłu zbrojeniowego. Rewolucja rozpoczęła się wraz z pojawieniem się polimerów, które charakteryzują się wysoką

wytrzymałością i sztywnością, zachowując przy tym wielokrotnie niższą gęstość od stali [24-25]. W latach 60-tych XX wieku pojawiła się pierwsza kamizelka kuloodporna skonstruowana na bazie włókien polimerowych.

Początkowo głównym materiałem wykorzystywanym do produkcji kamizelek kuloodpornych był nylon, jednak w 1971 roku, w Nation Institute of Justice odkryło, że poli(pfenylenotereftalamid) (Kevlar) wyróżnia się znacznie mniejszą masą przy 16-krotnie wyższej sztywności [23].

Podział materiałów balistycznych został przedstawiony na rysunku 9.



Rysunek 9. Podział materiałów na wkłady balistyczne [24].

Picture 9. Division of materials into ballistic inserts [24].

Tablica 1. Charakterystyka materiałów stosowanych na kamizelki kuloodporne [24-27]

Table 1. Characteristics of materials used for bulletproof vests [24-27].

<b>Kevlar</b>	Zapewnia ochronę przed pociskami, szpikulcami oraz przecięciem nożem. Jest 5 razy lżejszy od stali, przy porównywalnej wytrzymałości.
<b>Tarwon</b>	Lekki, bardzo wytrzymały materiał o wysokiej odporności cieplnej i dużej odporności na uderzenia. Posiada wysoki moduł sztywności i zdolność absorpcji energii, posiada wysoką odporność chemiczną oraz własności samogaszące.
<b>Spectra</b>	Polietylen o dużej masie cząsteczkowej, wytwarzany metodą żelową. Posiada dobrą odporność na tarcie, działania promieni UV oraz chemikalia. Charakteryzuje się 10-krotnie wyższą odpornością na uderzenia niż stal oraz aż o 40% większą wytrzymałością od włókien aramidowych.
<b>Folia polietylenowa</b>	Pakiet warstw folii o grubości kilkunastu milimetrów wykazuje się bardzo dobrymi własnościami wytrzymałościowymi. W porównaniu do włókien, nie występują w nim miejsca skrzyżowania włókien tkaniny, dzięki czemu uderzenia pocisku rozkładają się równomiernie.

## 6.2 Odzież ochronna

Mundur ma zapewnić odpowiednią ochronę ciała żołnierza przed szkodliwymi czynnikami zewnętrznymi. Podstawowym surowcem stosowanym przy produkcji odzieży ochronnej jest bawełna połączona z tworzywem poliestrowym, a także inne tworzywa sztuczne, np. nylon. W celu zabezpieczenia żołnierza i uniemożliwienia wykrycia go poprzez detektory podczerwieni stosowane przez przeciwnika, wytwarza się mundury, które pochłaniają promieniowanie zewnętrzne i ciepłe [27,28].

Odzież filtracyjna zapewnia ochronę ciała przed działaniami środków toksycznych czy, promieniowaniem. Mimo to, przepuszcza powietrze oraz likwiduje nadmiar wilgoci. Belgijska firma Seyntex stworzyła dwuczęściowy mundur filtracyjny. Wykonywany jest zwykle z bawełny lub poliestrobawełny. Wewnętrzna strona mundury wykonana jest z winylo-bawełny, zewnętrzna domieszkowana jest węglem aktywnym i akrylanem, i warstwą niezwilżalną przez oleje. Wewnątrz, między warstwą ognioodporną i tkaniną poliamidową, umieszczona jest pianka poliuretanowa z węglem aktywnym. Amerykańskie jednostki walczące w Iraku wyposażone były w mundury chroniące przed działaniami toksycznych gazów. Wewnętrzna strona munduru wykonana była z nylonu, który przylegał do ciała. Część zewnętrzną stanowiła nieprzemakająca powłoka. Pomiędzy nimi, zastosowano potrójną warstwę węglową, która pełniła funkcję filtrującą i chroniła przed toksycznymi gazami. [24].

## 7. PODSUMOWANIE

Wytwarzanie nowych materiałów, których właściwości przewyższają właściwości znanych nam do tej pory materiałów inżynierskich, zapewnia ciągły rozwój technologii militarnych. Zastosowanie materiałów takich jak włókna polimerowe, kompozyty, materiały inteligentne czy nanomateriały w przemyśle wojskowym pozwala na unowocześnienie dotychczas stosowanego wyposażenia wojskowego czy pojazdów bojowych i udoskonalenie ich działania. Materiały polimerowe pozwalają na znaczące obniżenie masy kamizelek kuloodpornych, odzieży ochronnej oraz sprzętu bojowego, nie obniżając przy tym właściwości wytrzymałościowych elementów z nich wykonanych. Zastosowanie nanoproszków przy produkcji termitów oraz głowic bojowych wpływa na zwiększenie energetyczności ładunków oraz spotęgowanie właściwości mechanicznych i użytkowych broni palnej. Nowoczesne kompozyty wykorzystuje się do produkcji wielowarstwowych, wytrzymałych panczerzy czy samowulkanizujących się opon, a nanorurki są wykorzystywane do wytwarzania samonaprawiających się materiałów. Technika militarna podąża do przodu również w zakresie ergonomii i ekonomii dzięki wykorzystaniu materiałów inteligentnych pozwalających np. na zmniejszenie zużycia paliwa oraz szybszą pracę dzięki bardziej funkcjonalnym kształtom samolotów czy używaniu materiałów piezoelektrycznych. Materiały te wykorzystywane na szeroką skalę przyczyniają się do rozwoju technologii oraz zapewniają bezpieczeństwo zarówno żołnierzom jak i cywilom. Z powodzeniem można już powiedzieć, że są nie tylko alternatywą, ale w pełni mogą zastąpić wykorzystywane do tej pory tradycyjne materiały inżynierskie.



**LITERATURA**

- [1] [https://www.sakoexpo.com.pl/pl/aktualnosci/10\\_Przeogl%C4%85d-materia%C5%82%C3%B3w-do-zastosowa%C5%84-militarnych](https://www.sakoexpo.com.pl/pl/aktualnosci/10_Przeegl%C4%85d-materia%C5%82%C3%B3w-do-zastosowa%C5%84-militarnych) [dostęp 1.04.2020]
- [2] Płaczek J., Zmiany w mundurze polowym wojsk lądowych wojska polskiego w latach 1958-2018, 2018
- [3] <https://wynaizki.andrej.edu.pl/index.php/wynaizki/24-k/259-kamizelka> [dostęp 19.04.2020]
- [4] Woźniak D., Kukiełka L. Kompozyty w technice w aspektach materiałów nowej generacji, 2014
- [5] [https://www.sakoexpo.com.pl/pl/aktualnosci/10\\_Przeegl%C4%85d-materia%C5%82%C3%B3w-do-zastosowa%C5%84-militarnych](https://www.sakoexpo.com.pl/pl/aktualnosci/10_Przeegl%C4%85d-materia%C5%82%C3%B3w-do-zastosowa%C5%84-militarnych) [dostęp 25.04.2020]
- [6] <https://gadzetomania.pl/1645,wyposazenie-zolnierzy-od-1066-do-2014-roku-z-jakim-sprzetem-wyruszano-do-walki,all> [dostęp 25.04.2020]
- [7] Sokół J.L., Nanotechnologia w życiu człowieka, Politechnika Białostocka, 2012, Białystok
- [8] Czerwińska M., Zastosowanie nanomateriałów w przemyśle zbrojeniowym, Chemik 2014, 68,6, s. 536-543.
- [9] Foltynowicz Z., Czajka B., Maranda A., Wachowski L., Aspekty nanomateriałów w zastosowaniach cywilnych i militarnych. Część 2. Wykorzystanie i obawy wynikające z ich uwalniania do środowiska przyrodniczego, Materiały Wysokoenergetyczne, 2017, 9, 18–39
- [10] Tiwari A., Military Nanotechnology, IJESAT, 2012, str. 825-830
- [11] <https://3d-nano.com/pl/catalogue/sic-weglik-krzemu-nanoproszek-3/> [dostęp 25.04.2020]
- [12] <http://fizyka.iss.com.pl/nanorurki/08rysunki05.html> [dostęp 25.04.2020]
- [13] Śmiałkowska-Opalka M., Koncepcja wojownika przyszłości, Instytut Technologii Bezpieczeństwa “MORATEX”, Techniczne Wyroby Włókiennicze, 2009
- [14] 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] <http://www.matint.pl/index.php> [dostęp 25.04.2020]
- [3] <https://www.czasopismologistyka.pl/component/jdownloads/send/199-artykuly-na-plycie-cd/412-artykul> [dostęp 25.04.2020]
- [4] Ćwikła A.: Lotnicze zastosowanie materiałów inteligentnych. Prace instytutu lotnictwa 211, s. 48-56, Warszawa 2011
- [15] Skalski, P. , Bochenek, M. , Pastuszek, M. Rozwój bioniki w lotnictwie, Logistyka, tom 6, s. 9545—9553, 2014
- [16] Grenda B., Bielawski R., Bezpieczeństwo Lotnicze w aspekcie rozwoju technologicznego, Warszawa 2017
- [17] Trepczyńska-Łent M. Materiały inteligentne, materiały z pamięcią kształtu, materiały piezoelektryczne, Logistyka 3/2011
- [18] <http://laboratoria.net/technologie/25720.html> [dostęp 25.04.2020]
- [19] <https://www.iparts.pl/artykuly/samonaprawiajace-sie-opony-czym-sa-i-jak-dzialaja,332.html> [dostęp 25.04.2020]
- [20] <http://www.magnum-x.pl/artykul/nowoczesne-technologie-osen-kompozytowych> [dostęp 25.04.2020]
- [21] Płonka B., Remsak K., Rajda M., Wilczewski J., Stopy Metali Lekkich w Wielowarstwowych Pancierzach Pasywnych dla Pojazdów Wojskowych, Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe, 3, 2015

- [22] Klepki T., Nowoczesne materiały polimerowe i ich przetwórstwo. Część 1., Politechnika Lubelska, Lublin, 2014, str. 15-24
- [23] B. Scott, Kamizelki kuloodporne, Świat Nauki, 05/1997, s.110
- [24] Konieczny J., Materiały Polimerowe Stosowane w Przemysle Zbrojeniowym, Politechnika Śląska, str 1-6,2011
- [25] <https://materialyinzynierskie.pl/wytrzymały-kevlar-włókna-aramidowe/> [dostęp 28.04.2020]
- [26] <https://stbouton.ru/pl/kevlar-dlya-chego-primenyaetsya-kevlar---chto-eto-takoe-material-kevlar.html> [dostęp 28.04.2020]
- [27] S. Mitin, Broń versus zbroja – odwieczna rywalizacja, Młody Technik nr 9-2002, Avat
- [28] P. Wiąckiewicz , Kamuflaż na polu walki, Nowa Technika Wojskowa 4/1994, s 18÷20