



Józef BŁACHNIO ORCID 0000-0003-1909-488X,
jozef.blachnio@itwl.pl – corresponding author

Marek CHALIMONIUK ORCID 0000-0002-8950-4437, marek.chalimoniuk@itwl.pl

Adrianna NIDZGORSKA ORCID 0009-0009-3528-5871, adrianna.nidzgorska@itwl.pl

Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych), Poland

WYBRANE ZASTOSOWANIA KOMPOZYTÓW W WOJSKU

Selected applications of composites in the military

Streszczenie: *W artykule przedstawiono problematykę dotyczącą zastosowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych z wykorzystaniem materiałów kompozytowych, na szeroko rozumiane potrzeby wojska. Pokróćce przedstawiono charakterystykę kompozytów i ich właściwości, wyszczególniając ich liczne zalety, a także niedostatki. Omówiono nowe konstrukcje podzespołów samolotów, śmigłowców oraz zasygnalizowano wzrost udziału kompozytów polimerowych w lotnictwie wojskowym i cywilnym. Przedstawiono zastosowanie kompozytów do ochrony żołnierza: elastyczną kamizelkę kompozytową i hełm, do ochrony przed promieniowaniem mikrofalowym, jak również egzoskielet żołnierza ułatwiający operacje na polu działań. Podkreślono możliwości szerokiego zastosowania materiałów kompozytowych w różnych gałęziach przemysłu.*

Słowa kluczowe: kompozyty metalowe, kompozyty polimerowe, kompozyty ceramiczne

Abstract: *The article presents the issue of applying new design solutions from composite materials for military needs. The article also includes composites' characteristics and properties, underlining their benefits and deficiencies. New aircraft and helicopter subassembly designs were demonstrated, and an increased use of polymer composites in civil and military aviation was mentioned. In addition, the application of composites used for the soldier's protection in the form of elastic composite vest, helmet against microwave radiation was depicted, as well as the soldier's exoskeleton to facilitate operations on the field. Composites are future-oriented materials applied in civil and military areas due to their properties.*

Keywords: metal composites, polymer composites, ceramic composites

Received: October 11, 2023 / Revised: November 10, 2023 / Accepted: December 13, 2023 / Published: December 28, 2023



1. Wprowadzenie

Materiały kompozytowe są szeroko stosowane w różnych gałęziach przemysłu. Przemysł obronny w dużej mierze stosuje różnego rodzaju materiały kompozytowe. Wynika to z ich korzystnych właściwości mechanicznych, tribologicznych, cieplnych, elektrycznych: są lekkie, tłumią drgania itp. [1, 2, 3]. Właściwości te niekiedy znacznie przewyższają właściwości materiałów klasycznych. Są zatem perspektywiczne, zwłaszcza w dobie niedostatku niektórych surowców do materiałów klasycznych, i stanowią rezerwę materiałową.

Ze względu na swoje właściwości, zastosowanie kompozytów w wojsku jest bardzo szerokie. Zwiększyły się możliwości konstruowania elementów i całych zespołów w przemyśle kosmicznym, lotniczym, do budowy silników o większej mocy, w konstrukcji osłony czołgów, wozów bojowych, kamizelek kuloodpornych, hełmów żołnierza, specjalnych koców i plandek maskujących i innych [4, 5, 6].

2. Rodzaje i własności kompozytów

Kompozyty powstały jako rezultat poszukiwań nowych materiałów konstrukcyjnych, doskonalszych od stosowanych dotychczas – głównie ze względów wytrzymałościowych. Kompozyt jest to materiał utworzony z co najmniej dwóch komponentów (faz) o różnych właściwościach w taki sposób, że ma właściwości lepsze i (lub) właściwości nowe (dodatkowe) w stosunku do komponentów użytych osobno lub wynikających z prostego sumowania tych właściwości – kompozyt jest materiałem zewnętrznym monolitycznym, jednakże z widocznymi granicami między komponentami. Materiały kompozytowe spełniają wymogi systemu eksploatacji „tolerowanego uszkodzenia” (ang. *Damage Tolerance*) oraz mają korzystny stosunek masy do wytrzymałości, co powoduje, że producenci statków powietrznych coraz częściej stosują kompozyty do produkcji elementów konstrukcyjnych SP [1]. Kolejnym czynnikiem powodującym zwiększone zastosowanie materiałów kompozytowych jest możliwość zmniejszenia kosztów związanych ze zużyciem paliwa oraz innych kosztów eksploatacji [2]. Stosowane dotychczas stopy metali są podatne na powstawanie uszkodzeń związanych nie tylko z oddziaływaniem atmosfery (zjawisko korozji), ale również z oddziaływaniem cykli zmęczeniowych (przykładem jest zjawisko pęknięcia zmęczeniowego pod wpływem korozji – (ang. *Stress Corrosion Cracking* – SCC). Zastosowanie materiałów kompozytowych eliminuje problem związany z występowaniem efektów korozyjnych. Jednakże należy zdawać sobie sprawę z innych czynników wpływających na możliwość zmniejszenia wytrzymałości takich struktur, w szczególności [6]:

- brak powtarzalności przy wytwarzaniu elementów, w szczególności w tzw. technikach na mokro,
- brak jednoznacznie określonej granicy plastyczności materiału i związana z tym większa jego wrażliwość na obciążenia statyczne,
- anizotropia materiału i związane z tym różne rodzaje uszkodzeń,
- szczególna podatność na uszkodzenia od obciążeń prostopadłych do płaszczyzny powierzchni elementu,
- niedostatki kontroli jakości elementów opuszczających wytwórnię,
- wysoka podatność na powstawanie uszkodzeń od uderzeń o niewielkich energiach,
- możliwość powstawania uszkodzeń podczas wytwarzania elementów, m.in. takich jak: porowatość, odklejenia, wtrącenia ciał obcych, rozwarstwienia.

Kompozyty podzielono na grupy i je sklasyfikowano. Za podstawę klasyfikacji przyjęto materiał osnowy. Zatem wyróżniono kompozyty: metalowe, polimerowe i ceramiczne. Jeśli odwróci się rolę tych materiałów osnowa–zbrojenie, to można otrzymać szereg grup materiałów kompozytowych.

Wariantem jest przy tym możliwość odwrócenia roli tych materiałów i wykonania z nich zbrojenia. Przy wariacie „każdy z każdym” osnowa–zbrojenie otrzymujemy 9 grup materiałów kompozytowych (tabela 1). W zależności od sposobu wzmocnienia osnowy i rodzaju wzmocnienia najczęściej stosuje się poniższe rodzaje włókien: węglowe np. typu PAN, szklane np. typu E, borowe, organiczne aramidowe, korundowe, z węgla krzemu. Wśród kompozytów włóknistych można wyróżnić kompozyty warstwowe i hybrydowe. Stosuje się je zwłaszcza w lotnictwie. Powstały one w wyniku dążenia do tworzenia materiałów o dużej wytrzymałości i małej gęstości.

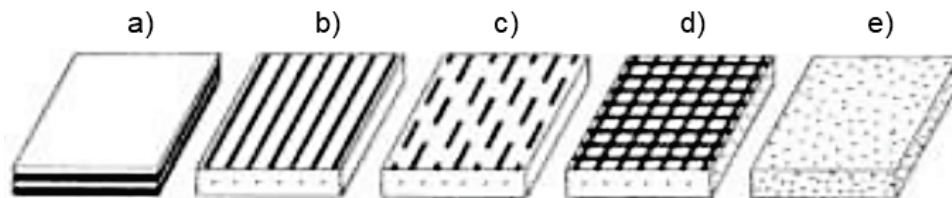
Tabela 1

Schemat możliwych kombinacji materiałów kompozytowych [7]

Umocnienie \ Osnowa	Metal	Polimer	Ceramika
Metal	m - m	m - p	m - c
Polimer	p - m	p - p	p - c
Ceramika	c - m	c - p	c - c

Do kompozytów warstwowych (rys. 1a) zalicza się laminaty i złożone konstrukcje przekładkowe typu „sandwich”, w których stosuje się rdzenie o małej gęstości oklejone sztywnymi okładkami. Kompozyty warstwowe zbudowane są z na przemian złożonych warstw osnowy i wypełniacza (napelniacza). W kompozytach włóknistych (rys. 1b,c) włókna stanowią umocnienie i są stosowane na różne konstrukcje. Natomiast kompozyty

umacniane cząstkami dyspersyjnymi (rys. 1e) zawierają sztucznie wprowadzane cząstki węglików, tlenków, azotków i inne trwałe termicznie związki, niereagujące ani nie rozpuszczające się w osnowie aż do temperatury topnienia faz.



Rys. 1. Modele budowy kompozytów: a) warstwowe, b) umacniane włóknami długimi, c) umacnianie włóknami krótkimi, d) umacniane siatką, tkaniną, e) umacniane cząstkami [7]

Do materiałów kompozytowych o budowie warstwowej stosuje się warstwy tkanin, włókien, dzianin, połączone na przemian z warstwami osnowy. Materiałem osnowy może być tworzywo sztuczne, metal lub ceramika. Nową generację materiałów stanowią kompozyty, w których blachy aluminiowe, tytanowe, miedziane, niklowe, kobaltowe są spoiwem, a warstwy o głównych właściwościach stanowią: ceramika, związki międzymetaliczne lub polimery. W tabeli 2 przedstawiono parametry wybranej grupy włókien aramidowych stosowanych w pancerzach czołgów i wozów bojowych.

Tabela 2

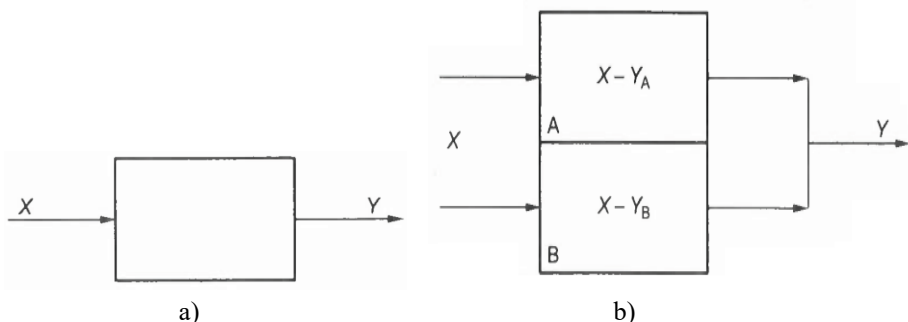
Parametry włókien aramidowych stosowanych w pancerzach [16]

WŁAŚCIWOŚĆ	WŁÓKNA BALISTYCZNE			WŁÓKNA KONSTRUKCYJNE				
	Kevlar® i Kevlar® 29	Kevlar® Ht (129)	Kevlar® He (119)	Kevlar® 49	E-szkło	Węgiel HT-300	Drut stalowy	Nylon H.T. (T-728)
Wytrzymałość właściwa, cN/tex*	205	235	205	205	-	-	-	86
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	2900	3320	2900	2900	3400	3530	2600	990
Moduł podczas rozciągania, GPa	60	75	45	120	70	235	200	5,6
Wydłużenie zrywające, %	3,6	3,6	4,5	1,9	4,5	1,5	2,0	1,8
Higroskopijność, %	7	7	7	3,5	0,1	-	0	4,5
Gęstość, g/cm ³	1,44	1,44	1,44	1,44	2,60	1,76	7,85	1,14
Temperatura rozkładu, °C	~500	~500	~500	~500	~800	-	1600	265

*tex – masa w gramach włókna lub przędzy o długości 1000 m

Praktyczne wykorzystanie kompozytów wymaga znajomości metod przewidywania ich właściwości. Jeśli na materiał działają czynniki zewnętrzne, np. siła czy temperatura, to wywołują one w tym materiale zmiany. Na przykład, pod wpływem siły materiał może się odkształcić. Pod wpływem temperatury, na skutek rozszerzalności termicznej, dochodzi do zmiany wymiarów materiału. Tak dzieje się najczęściej, gdy materiał jest jednorodny.

Można zatem stwierdzić, że efektem oddziaływania na materiał jednorodny czynnika X jest skutek Y (rys. 2).



Rys. 2. Efekt X-Y w materiale jednorodnym (a), efekt X-Y w kompozycie o właściwościach sumarycznych (b) [2]

Składniki kompozytu mają swoje własne zespoły efektów X-Y. Czynniki zewnętrzny X będzie oddziaływał na każdy ze składników, wywołując w nich określoną zmianę, zależną do rodzaju składnika. Kombinacja tych efektów określa właściwości kompozytów. Mogą one charakteryzować się właściwościami sumarycznymi (addytywnymi) lub właściwościami wynikowymi (synergicznymi). Właściwości sumaryczne są efektem sumowania właściwości poszczególnych składników (z różnymi współczynnikami proporcjonalności). Bodziec zewnętrzny X działa jednocześnie na oba składniki, przy czym każdy ze składników reaguje na bodziec w inny sposób. Zatem, efekt Y jest sumą efektów wywołanych dla składników A (Y_A) i B (Y_B), przy czym należy uwzględnić udziały objętościowe poszczególnych składników (V_A i V_B). Tak uzyskane właściwości odpowiadają regule mieszanin:

$$Y = V_A Y_A + V_B Y_B \quad (1)$$

Najczęściej właściwości sumaryczne są charakterystyczne dla kompozytów konstrukcyjnych. Są one stosunkowo łatwe do przewidzenia. Na przykład, znając właściwości poszczególnych składników i ich udział objętościowy, można wyznaczyć, korzystając z reguły mieszanin, moduł Younga (E) oraz wytrzymałość na rozciąganie w kierunku włókien (R_m) w przypadku kompozytów wzmacnianych włóknami ciągłymi:

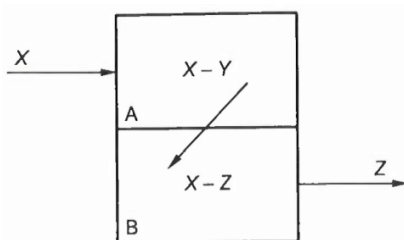
$$E_k = V_w E_w + V_0 E_0 \quad (2)$$

$$R_m^k = V_w R_m^w + V_0 R_m^0 \quad (3)$$

gdzie:

V_w, V_0 – udziały objętościowe odpowiednio włókna i osnowy, E_w, E_0 – moduły Younga odpowiednio włókna i osnowy, natomiast R_m^w, R_m^0 – wytrzymałość na rozciąganie odpowiednio włókna i osnowy.

Właściwości wynikowe są efektem przeniesienia właściwości jednego składnika na drugi. Czynniki zewnętrzny wywołuje określony efekt tylko w jednym ze składników, który z kolei oddziałuje na drugi składnik kompozytu. Na przykład, bodziec zewnętrzny X wywołuje efekt Y jedynie w składniku A, który z kolei działa na składnik B, wywołując w nim efekt Z . Efekty te ulegają sprzężeniu. A zatem, w wyniku działania bodźca X kompozyt odpowiada efektem Z (rys. 3). Warunkiem jest istnienie mechanizmu umożliwiającego przeniesienie efektu Y ze składnika A na składnik B.



Rys. 3. Efekt X-Z w kompozycie o właściwościach wynikowych [2]

Przykładem właściwości wynikowych może być efekt magnetoelektryczny uzyskany w kompozycie składającym się z komponentów o właściwościach magnetostrykcyjnych i piezoelektrycznych. Wówczas, w polu magnetycznym dochodzi do odkształcenia fazy magnetostrykcyjnej, która z kolei powoduje odkształcenie fazy piezoelektrycznej. Na skutek odkształcenia w fazie piezoelektrycznej dochodzi do powstania ładunku elektrycznego. Właściwości wynikowe są charakterystyczne dla kompozytów funkcjonalnych.

Nie zawsze jednak wielkość uzyskanego efektu jest taka, jaką można byłoby uzyskać w każdym ze składników osobno. Właściwości wynikowe kompozytu wymagają przeniesienia efektu Y pomiędzy składnikami. Może to być zrealizowane na skutek sprzężenia mechanicznego, elektrycznego, optycznego, magnetycznego, cieplnego lub chemicznego. Kompozyt składający się z fazy magnetostrykcyjnej i piezoelektrycznej jest właśnie przykładem działania sprzężenia mechanicznego. Efekt, który powstaje w składniku będącym częścią kompozytu, nie musi być równy takiemu, jaki powstałby

w składniku A występującym samodzielnie. Zatem odkształcenie składnika piezoelektrycznego w kompozycie będzie mniejsze, ponieważ: naprężenie wywołane działaniem pola magnetycznego w fazie magnetostrykcyjnej musi wywołać odkształcenie obu składników. W większości przypadków wytrzymałość i sztywność osnowy jest znacznie mniejsza od wytrzymałości i sztywności wzmocnienia. Wzmocnienie natomiast poprawia określone właściwości mechaniczne i/lub użytkowe wyrobu, a niekiedy także zmniejsza koszt wsadu surowcowego, tak jak w przypadku niektórych tanich napełniaczy proszkowych.

Zalety kompozytów [6, 8, 9]:

1. Wysoka odporność na uderzenia i pęknięcia,
2. Niska gęstość własna / niewielka masa,
3. Umiarkowana sztywność,
4. Niska rozszerzalność cieplna,
5. Nie przewodzą prądu, wykazują niską względną przenikalność elektryczną,
6. Dobra odporność na tarcie, przecięcie,
7. Tłumienie drgań.

Wady kompozytów [6, 8, 9]:

1. Chłonność wilgoci – higroskopijność,
2. Trudna obróbka i procesowanie,
3. Degradacja pod wpływem promieni UV,
4. Stosunkowo wysoki koszt materiału,
5. Niska wytrzymałość na ściskanie.

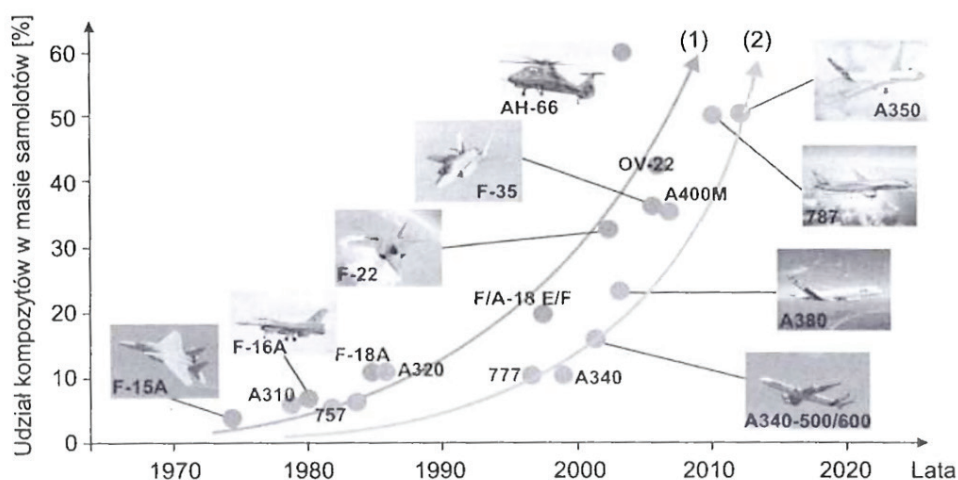
3. Zastosowanie kompozytów w wojsku

3.1. Zastosowanie kompozytów w lotnictwie

Kompozyty polimerowe są najbardziej rozpowszechnione w konstrukcjach sprzętu lotniczego ze wszystkich trzech grup kompozytów, o czym z pewnością decydują łatwiejsza technologia, niższe koszty produkcji i mała masa. W dziedzinie materiałów wykorzystywanych na struktury lotnicze nastąpił znaczny postęp wraz z rozwojem materiałów polimerowych. Metalowe półskorupowe struktury cienkościenne, które w warunkach obciążeń dopuszczalnych mogą wykazywać lokalną utratę stateczności, bardzo niekorzystną z punktu widzenia aerodynamicznego, zostały zastąpione strukturami przekładkowymi. Rozwój materiałów polimerowych i kompozytów włóknistych o osnowie polimerowej umożliwił modyfikację wcześniej stosowanych metalowych cienkościennych struktur lotniczych [10, 11, 12]. Zaczęto stosować izotropowe rdzenie ze spienionych

tworzyw sztucznych w takich konstrukcjach, w których nie ma ograniczeń ze względu na temperaturę pracy. Struktury o takiej konfiguracji w budowie szybowców, samolotów lekkich i śmigłowców tworzą integralne podzespoły ustrojów nośnych skorupowych o programowanych właściwościach mechanicznych, jak skrzydła, kadłuby, belki ogonowe.

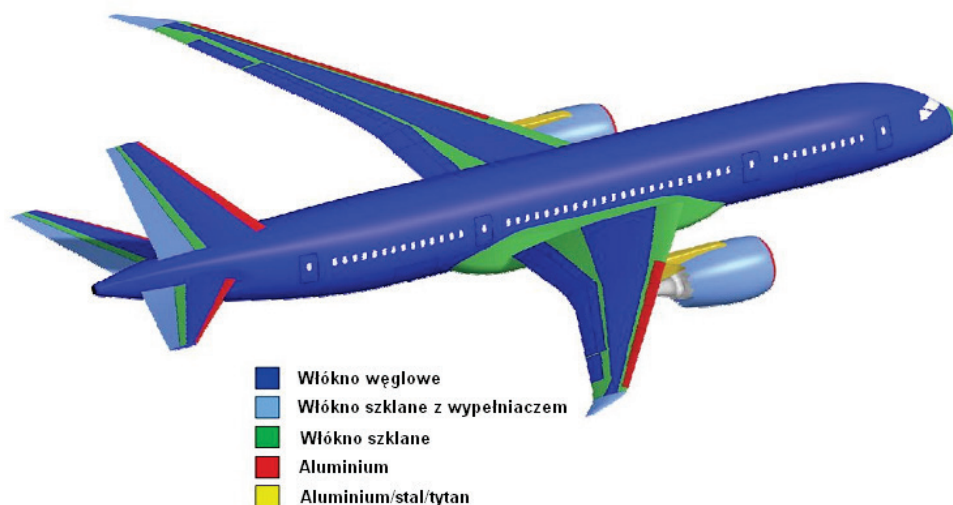
Z kompozytów polimerowych wykonywane są szybowce, samoloty bezzałogowe, małe samoloty pasażerskie, modele latające. Wykorzystanie kompozytów polimerowych do wytwarzania konstrukcji lotniczych sukcesywnie wzrasta, zarówno w lotnictwie wojskowym, jak i pasażerskim (rys. 4).



Rys. 4. Wzrost udziału kompozytów polimerowych w lotnictwie wojskowym (1) i pasażerskim (2) na przestrzeni lat [14, 15]

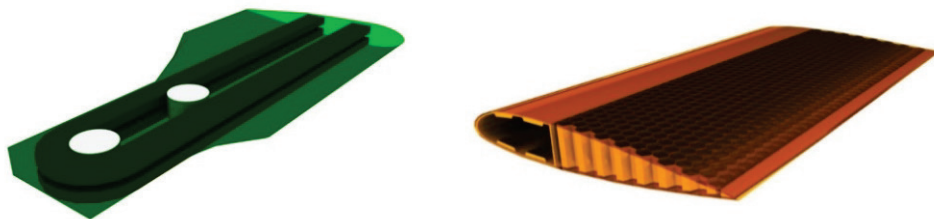
Kompozyty węglowo-polimerowe są obecnie szeroko stosowane, a najbardziej spektakularne wykorzystanie dotyczy przemysłu lotniczego i motoryzacyjnego. Przedsiębiorstwo Airbus wprowadziło do eksploatacji w 2005 r. samolot pasażerski A380 składający się w 24% mas. z kompozytów o osnowie z żywic epoksydowych wzmocnionych włóknami węglowymi. W samolocie A350 XWB kompozytów polimerowych jest nawet o 2% masowo więcej. Natomiast w samolocie Boeing 787 Dreamliner kompozyty włókniste stanowią już 50% masy komponentów konstrukcyjnych (rys. 5). Coraz częściej kompozyty epoksydowo-szklane, stosowane jako pierwsze w lotnictwie, ustępują miejsca kompozytom epoksydowo-węglowym. W konstrukcji nowoczesnych samolotów pasażerskich kompozyty wzmocnione włóknem węglowym są stosowane na pierwszorzędowe elementy konstrukcyjne (np. dźwigary, poszycie skrzydeł, kadłuba, gondole silnikowe, stery i stateczniki). Dzięki zastosowaniu kompozytów polimerowych w lotnictwie na tak szeroką skalę możliwe było zmniejszenie masy

samolotów, co przekłada się na ich osiągi (dla Boeinga 787 jest to zmniejszenie o 20% zużycia paliwa i zwiększenie zasięgu w porównaniu do wcześniejszych samolotów pasażerskich o podobnej wielkości). Zastosowanie kompozytów polimerowych prowadzi również do lepszego tłumienia drgań i zmniejszenia poziomu hałasu, a większa wilgotność powietrza w kabinie (wzrost z 10 do 20%) poprawia komfort podróżowania.



Rys. 5. Udział materiałów kompozytowych w konstrukcji samolotu B787 [14, 15]

W konstrukcjach śmigłowców z kompozytów polimerowych wykonywane są elementy wirników nośnych i śmigieł ogonowych, łopaty wirników, golenie podwozi, a także inne elementy struktury. Ze względów konstrukcyjnych elementy wykonane z kompozytów dzieli się na: elementy złożone z osnowy oraz zbrojenia włóknistego ułożonego jednokierunkowo, często nazywanego pasami oraz elementy złożone z osnowy oraz zbrojenia tkaninowego o budowie symetrycznej lub modułowej często nazywanego ściankami lub powłokami (rys. 6a). Pasy służą przede wszystkim do przenoszenia obciążeń działających wzdłuż włókien zbrojenia. Ścianki i powłoki stosuje się głównie w celu przeniesienia obciążeń ścinających. Ścianki dźwigara są wykonane z płótna szklanego ST-25 i żywicy epoksydowej. Środek dźwigara wypełnia pianka technologiczna. Krawędź natarcia łopaty jest osłonięta pakietem grzewczym instalacji przeciwołodziowej (rys 6b). Pakiet grzewczy jest wykonany z kompozytu szklano-fenolowego i posiada metalową osłonę krawędzi natarcia.



Rys. 6. Ułożenie pasów włókien rovingu w nasadzie łopaty (a), przekrój poprzeczny dźwigara w pobliżu nasady łopaty (b) [15]

Część spływowa jest integralna, bez podziału na sekcje. Takie rozwiązanie w konstrukcji łopaty powoduje, iż część spływowa łopaty ma większy wpływ na charakterystyki sztywności łopaty. Konstrukcja tego typu bierze większy udział w przenoszeniu obciążeń niż konstrukcja z występującym podziałem na sekcje. Część spływowa łopaty śmigłowca W-3 składa się z pokrycia oraz wypełniacza ulowego. Pokrycie jest połączone z dźwigarem na całej szerokości. Zewnętrzne pokrycie łopaty jest wykonane z kompozytu na bazie płótna szklanego ST-19. Wewnątrz znajduje się wypełniacz ulowy, który zapewnia odpowiednią sztywność konstrukcji przy zachowaniu niewielkiej masy.

3.2. Zastosowanie kompozytów w wojskach lądowych

3.2.1. Elastyczna kamizelka kompozytowa

Kamizelki kuloodporne w ciągu ostatnich trzydziestu lat podlegały modyfikacjom. Najistotniejszym elementem rozwoju było wprowadzenie tkanin wykonanych z przędzy kevlar i produktów Spektra, które znacząco obniżyły wagę kamizelek w stosunku do stosowanego wcześniej nylonu balistycznego. W celu podwyższenia poziomu ochrony balistycznej od dawna stosowano wkłady dodatkowe w postaci płyt stalowych lub kompozytowych. Aby zapewnić lepsze dopasowanie kamizelek kuloodpornych do ciała użytkownika, a także ułatwić poruszanie się w nich, wkłady te są profilowane w procesie ich wytwarzania. Przyszłością materiałów stosowanych do budowy kamizelek kuloodpornych będą niewątpliwie nanostruktury węglowe łączone ze strukturą tkanin bądź twardych kompozytów oraz żele, które pod wpływem uderzenia pocisku zmieniają swoją strukturę w lity, twardą skorupę, o wytrzymałości przekraczającej wytrzymałość stali. Jednym z ciekawszych rozwiązań w dziedzinie konstrukcji kamizelek kuloodpornych, jakie pojawiło się w ostatnich czasach, jest elastyczna kamizelka, choć zawierająca w swej strukturze twarde materiały kompozytowe, wykonana w technologii nazwanej przez jej autora Dragon Skin®. Dragon Skin® [8] jest zdolna do zatrzymania wielokrotnego

uderzenia pociskami wystrzelowanymi z karabinu. Pomimo zastosowania twardych elementów kompozytowych, kamizelki Dragon Skin® doginają się i dopasowują do konturów ciała użytkownika. Elastyczność kamizelki uzyskano dzięki zastosowaniu wkładów balistycznych składających się z krążków o średnicy ok. 2 cali, wykonanych, zależnie od typu kamizelki, z kompozytów ceramicznych lub tytanowych (rys. 7a). Gotowe wkłady kamizelek mają strukturę podobną do skóry węża. Uzyskana w ten sposób elastyczność kamizelki powoduje zwiększenie swobody ruchu i łatwości poruszania się, w stosunku do klasycznych kamizelek z wkładem dodatkowym w postaci sztywnej płyty stalowej, ceramicznej czy kompozytowej. Krążki są układane między warstwami tkaniny balistycznej (rys. 7b). Założeniem konstruktorów kamizelki Dragon Skin® jest zwiększenie powierzchni chroniącej, o poziomie ochrony III i IV według NIJ, w stosunku do powierzchni, jaką gwarantuje stosowana zwykle sztywna płyta, dlatego też kompozytowe krążki układa się na całej powierzchni tkaniny, stanowiącej pokrowiec tworzony wkładu, o kształtach gotowych elementów konstrukcyjnych kamizelek (rys. 8).



Rys. 7. Wkład kamizelki Dragon Skin® (a), krążki kompozytowe (b) [8]



Rys. 8. Kamizelka taktyczna Dragon Skin® [8]

Stabilność tak skonfigurowanych wkładów zapewnia zastosowanie odpowiedniego kleju, który musi zachować swoje właściwości w przedziale temperatur: -60°F ($-51,11^{\circ}\text{C}$) do $+160^{\circ}\text{F}$ ($71,11^{\circ}\text{C}$), czyli w temperaturach, w jakich są przeprowadzane badania odporności balistycznej. Gotowy wkład zachowuje pełną elastyczność we wszystkich płaszczyznach. Oprócz wkładów zbudowanych z kompozytowych krążków, wewnątrz gotowych kamizelek są umieszczone również tkaninowe wkłady balistyczne. Oba rodzaje wkładów znajdują się w poszyciu, którego wzór i kolor można dowolnie wybrać. Kamizelki Dragon Skin® są produkowane w trzech podstawowych wariantach o różnej klasie odporności balistycznej [8]. Kamizelki te dzięki zastosowanej konstrukcji i technologii charakteryzują się:

1. dużą elastycznością ułatwiającą poruszanie się, tym samym zwiększając mobilność żołnierzy, oraz równomiernym rozłożeniem ciężaru;
2. większym pokryciem torsu elementami o odpowiednio wysokim poziomie odporności balistycznej;
3. wysokim poziomem ochrony boków użytkownika, a w kamizelce taktycznej również ramion i szyi;
4. lepszą ochroną części krawędziowej kamizelki, ze względu na rozmieszczenie kompozytowych krążków;
5. zwiększoną ochroną balistyczną wynikającą z odporności na wielokrotne (powyżej 20-krotne) uderzenie pociskiem karabinowym.

Oferowane są w postaci podstawowej – podkoszulek, lub formie rozbudowanej – kamizelka taktyczna, z dodatkową osłoną szyi, ramion i pachwin. Elementy dodatkowe zawierają również wkłady Dragon Skin®. Kamizelka Dragon Skin® jest konkurencyjna dla stosowanych aktualnie przez armię amerykańską kamizelek z wkładem dodatkowym w postaci twardej płyty, dlatego też nie wszyscy są jej zwolennikami. Jednakże wprawne oko reportera uchwyciło wiceprezydenta USA w tej właśnie kamizelce podczas podróży do Iraku [8].

3.2.2. Hełm wojskowy z kevlaru

W wojsku stosowane są hełmy z kevlaru: starszy o wzorze 2005 oraz nowszy HP-05. Hełm HP-05 to opracowany przez rodzimych inżynierów hełm z kevlaru nowego typu (rys. 9). W zależności od rozmiaru waży on od 1,25 do 1,45 kg. Od klasycznych, zabudowanych hełmów (takich jak wz. 2005) odróżnia go wysoko wycięta część boczna, dzięki czemu żołnierzowi wygodniej jest nosić ochronniki słuchu. Hełm ma także po bokach szyny montażowe, na których można zamontować dodatkowe akcesoria, np. noktowizję [11].



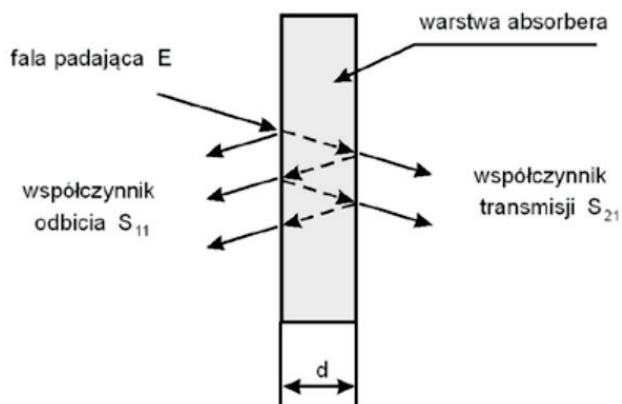
Rys. 9. Przykład hełmu wojskowego [11]

3.2.3. Ochrona przed promieniowaniem mikrofalowym

W wojsku istnieje szczególna konieczność opracowania skutecznych absorberów przeznaczonych do zabezpieczeń urządzeń elektronicznych w ramach kompatybilności elektromagnetycznej, do ochrony ludzi przed szkodliwym działaniem promieniowania, czy wreszcie do zabezpieczeń niewrażliwych urządzeń elektronicznych przed terrorystycznym lub przestępczym atakiem z użyciem impulsów elektromagnetycznych o wysokiej mocy. Wyróżnia się dwa mechanizmy ekranowania urządzeń ekspozycyjnych na promieniowanie elektromagnetyczne: absorpcja promieniowania wewnątrz materiału ekranującego (absorbera) oraz odbicie promieniowania od powierzchni materiału ekranującego. Do ilościowego opisu fali przechodzącej przez warstwę absorbera wykonuje się model tzw. wielokrotnych odbić. Fala elektromagnetyczna, przechodząc przez warstwę materiału, doznaje wielokrotnych wewnętrznych odbić, kształtując promienie odbite oraz przechodzące. Promieniowanie przechodzące przez absorber jest tłumione (rys. 10).

Wymagane jest, by materiały ekranujące charakteryzowały się wysokim poziomem pochłaniania energii padającej fali elektromagnetycznej w objętości czynnej absorbera. Trzeba również pamiętać, że fala elektromagnetyczna jest częściowo odbijana. W badaniach eksperymentalnych może powodować to uszkodzenia lub zakłócenia własnych urządzeń pomiarowych. W poszukiwaniu dobrego absorbera powinno się więc przyjąć założenie ograniczenia poziomu promieniowania odbitego. Warunek ten jest

szczególnie istotny, gdy falą padającą są wysokocowe impulsy HPM. Materiały wykorzystywane do ekranowania i pochłaniania można scharakteryzować ilościowo za pomocą parametru, jakim jest „skuteczność ekranowania L” (ang. *Shielding Effectivness*). Zależy on od wielu czynników, do których zaliczyć można: częstotliwość padającej fali elektromagnetycznej oraz kształt i objętość absorbera.



Rys. 10. Promienie odbite i przechodzące charakteryzowane są przez współczynniki macierzy rozproszenia (S_{ik}), przy czym poziom promieniowania odbitego charakteryzowany jest przez współczynnik odbicia (S_{11}), natomiast promienie przechodzące charakteryzowane są przez współczynnik transmisji (S_{21}) [12]

Techniki radiacyjne dają unikatowe możliwości w zakresie projektowania i modyfikacji materiałów kompozytowych. Pozwalają w wygodny sposób indukować w materiałach wolne rodniki, które w przypadku wielu polimerów inicjują procesy tworzenia wiązań poprzecznych. W ten sposób jesteśmy w stanie w korzystny sposób zmieniać właściwości materiałów polimerowych. Prowadzone w dowolnej temperaturze procesy radiacyjnej modyfikacji łatwo kontrolować wielkością dawki pochłoniętego promieniowania [12]. W przypadku kompozytów barierowych dla promieniowań mikrofalowych zjawisko sieciowania polimeru po uformowaniu wyrobu można połączyć z korzystną modyfikacją ferromagnetyku. Inaczej mówiąc, cząstki proszku szkła metalicznego dodatkowo umocowuje się w matrycy poprzez wiązania poprzeczne wytworzone w wyniku obróbki radiacyjnej. Procesy napromieniowania prowadzi się za pomocą wiązki elektronów (EB), promieniowania gamma lub promieniowania hamowania. Do badań, jako matryce kompozytu wytypowano polimery o nazwie handlowej Engage™ (elastomery poliolefinowe (POEs) typu etylen/okten lub etylen/buten). Stanowią one w istocie połączenie materiałów polimerowych z elastomerami. Pozwalają na produkcję lżejszych, cieńszych olefin termoplastycznych (TPO) o zwiększonej sztywności, wytrzymałości na uderzenia, lepszym dopasowaniu i wykończeniu oraz zmniejszonym

czasie cyklu w stosunku do wiodących obecnie tworzyw polimerowych. Radiacyjne sieciowanie Engage jest interesującym przykładem modyfikacji polimerów za pomocą promieniowania jonizującego. Znaczenie praktyczne może mieć połączenie tradycyjnego sieciowania (z wykorzystaniem nadtlenków) z sieciowaniem radiacyjnym, jak również proces odwrotny: nadtlenkowej wulkanizacji poprzedzony radiacyjną modyfikacją. Jednym z celów pracy było opisanie obu sposobów sieciowania na właściwości mechaniczne elastomerów. W szczególności zwrócono uwagę na wpływ efektów ochronnych aromatycznych dodatków do elastomeru (nadtlenki, termo- i fotostabilizatory) na zjawiska sieciowania i postradiacyjnego utleniania. Aromatyczne nadtlenki częściowo ulegają modyfikacji w procesie wstępnego napromieniowania, co ma wpływ na późniejszy proces wulkanizacji. Wpływają one również na zjawiska radiacyjnego sieciowania polimeru. W badaniach w oryginalny sposób zastosowano metodę chromatografii gazowej. Za jej pomocą określano wydajności radiacyjne wydzielania wodoru i wydajności pochłaniania tlenu przez tworzywo. Polimer Engage 8200 badano w formach: granulatu, folii, folii z dodatkiem nadtlenku, folii z dwukrotnie większą ilością nadtlenku, wulkanizowanej folii oraz dwóch wulkanizowanych folii z dodatkami nadtlenków. Wykazano, że w zakresie od 20 do 300 kGy stopień usieciowania jest proporcjonalny do wielkości dawki pochłoniętej promieniowania. Udowodniono, że stopień sieciowania elastomerów jest proporcjonalny do wydajności radiacyjnego wydzielania wodoru. W ten sposób potwierdzono, że obróbka radiacyjna jest wygodnym narzędziem kontroli stopnia usieciowania elastomeru.

Znane dotychczas materiały magnetyczne, w tym ferryty, w zakresie mikrofalowym tracą swoje wysokie wartości przenikalności magnetycznej. Z tego powodu w zakresie częstotliwości powyżej 100 MHz materiały te nie znalazły zastosowania jako absorbery.

W celu ochrony przed działaniem promieniowania mikrofalowego użyto stop na bazie żelaza lub kobaltu. Pierwszym tego typu materiałem był proszek Finemet (Fe73,5Si13,5B9Nb3Cu1) opracowany przez Yoshizawę z firmy Hitachi. Zostały przeprowadzone pomiary, dla różnych składów wagowych szkła metalicznego i grafitu. Wybrano materiał o następującym składzie wagowym: szkło metaliczne (79%) z domieszką grafitu (1%) oraz elastomer Engage 8200 (29%). Dodatkowo, w celu poprawienia własności absorpcyjnych szkła metalicznego zostało ono radiacyjnie zmodyfikowane dawką 100 kGy w źródle promieniowania gamma (GC 5000) o mocy dawki 4,1 kGy/h. Pozwoliło to również na uzyskanie lepszego usieciowania elastomeru, co spowodowało wzmocnienie materiału. Pomiary skuteczności ekranowania przeprowadzono w zakresie częstotliwości od 100 MHz do 10 GHz. Zbadano własności mechaniczne i elektryczne kompozytu zawierającego elastomer, szkło metaliczne i grafit oraz wyznaczono jego skuteczności ekranowania. Zastosowanie kompozytu elastomerowego powoduje, że materiał barierowy dla promieniowania mikrofalowego jest bardziej wytrzymały i zdecydowanie lepszy niż standardowe płytki ferrytowe stosowane

dotychczas. Do tego szkło metaliczne wprowadza własności magnetyczne w częstotliwościach mikrofalowych. Dzięki takiemu rozwiązaniu materiał powoduje zmniejszenie odbicia promieniowania i skutecznie pochłania energię promieniowania wewnątrz absorbera. Za pomocą obróbki radiacyjnej uzyskano korzystną modyfikację zarówno właściwości proszku ferrytowego, jak i parametrów mechanicznych tworzywa polimerowego. Uznano, że można go w przyszłości wykorzystać przy rozwiązywaniu problemów ze zdolnością danego urządzenia elektrycznego lub elektronicznego do poprawnej pracy w określonym środowisku elektromagnetycznym (EMC, ang. *ElectroMagnetic Compatibility*) i w systemach antenowych. Radiacyjna modyfikacja polimerów może zostać wykorzystana w wielu innych dziedzinach, np. do poprawy pożarowego bezpieczeństwa izolacji kabli i przewodów elektrycznych, produkcji uszczelek i opon samochodowych oraz usieciowania kompozytów polimerowych do specjalnych zastosowań [12].

3.2.4. Wojskowy egzoszkielet

Egzoszkielet jest to konstrukcja zbudowana z układu siłowników i wsporników, w celu pomocy żołnierzom w przenoszeniu kilkudziesięciokilogramowych ładunków na długich dystansach. Jest to konieczne na polu walki. W tego rodzaju oporządzeniu „zdjęcie ciężaru” z noszącej go osoby odbywa się poprzez użycie sprężyn lub innych urządzeń do magazynowania i uwalniania energii. Dodatkowo przenoszony ciężar nie jest utrzymywany przez samego żołnierza, ale opiera się w większej części na konstrukcji egzoszkieletu.

Rozwiązanie to jest już stosowane w przemyśle motoryzacyjnym i, jak wykazały wyniki badania, rzeczywiście pomaga w pracy, zmniejszając zmęczenie, a przy okazji zwiększając produktywność. W przypadku wojska, (pasywne jak dotąd) egzoszkielety są o tyle pożyteczne, że nie pozostawiają żołnierzy z ładunkiem po kilku godzinach działania. Konstrukcja oporządzenia wymaga zastosowania materiałów trwałych, odpornych na czynniki zewnętrzne i oczywiście lekkich. Większa część elementów została wykonana z kompozytów wzmocnionych włóknem węglowym (rys. 11).

Egzoszkielety stosowano już w Syrii i testy wykazały, że jest to prosta konstrukcja i ma jeszcze kilka innych zalet. Jest on przede wszystkim łatwy w użyciu i nawet krótko przeszkolony żołnierz jest w stanie go założyć samodzielnie w kilka minut i błyskawicznie zrzucić dzięki wypięciu awaryjnemu. Jest to dodatkowo rozwiązanie tanie, ponieważ obecny koszt całego egzoszkieletu nie przekracza 3500 dolarów.

W konstrukcji egzoszkieletu są również przygotowane zaczepy do przenoszenia ciężkiego uzbrojenia „w jednej ręce”, takiego jak np. karabiny maszynowe dużego kalibru. Może więc być wykorzystywany przez żołnierzy ze „zwykłych” jednostek zmechanizowanych, dając im możliwość zabierania również większej ilości amunicji.

Oprócz tej konstrukcji w wyposażenie żołnierza zamierza się wprowadzić m.in.: buty przeciwminowe, kombinezon kamuflujący (zabezpieczający przed wykryciem przez systemy

termiczne i radiolokacyjne, zmieniający kolor zależnie od otoczenia) oraz „łącze” integrujące automatycznie żołnierza z zewnętrznym systemem dowodzenia, dające mu jednocześnie możliwość kontrolowania przebywających w pobliżu dronów czy przesyłania obrazu z własnych gogli. Całość z egzozkieletem ma ważyć nie więcej niż 20 kg. Będzie on pasywny, aż pojawi się źródło zasilania na tyle lekkie, że można będzie je zastosować [13].



Rys. 11. Przykład egzozkieletu żołnierza [13]

4. Podsumowanie

Zapotrzebowanie na lekkie materiały konstrukcyjne o dużej wytrzymałości, twardości oraz odporności na zużycie staje się coraz bardziej powszechne. Zainicjowane zostało przez rozwój lekkich konstrukcji, jak: samoloty, statki kosmiczne, rakiety, pojazdy mechaniczne, a następnie pojawiło się w wielu innych dziedzinach.

Współczesny przemysł obronny szeroko stosuje nowe materiały konstrukcyjne o dużej wytrzymałości i trwałości oraz lepszych właściwościach od dotychczas użytkowanych. Wiodącą grupą materiałów, które w istotny sposób wpływają na rozwój przemysłu obronnego, są kompozyty. Właściwości kompozytów są funkcją ich struktury, którą definiują nie tylko ilość, kształt, wymiary i rozmieszczenie przestrzenne poszczególnych składników, ale także ilość, kształt, wymiary i rozmieszczenie defektów.

Kompozyty podzielono na grupy i sklasyfikowano, biorąc za podstawę klasyfikacji materiał osnowy. Wyróżniono m.in. kompozyty: metalowe, polimerowe i ceramiczne. Wariantem jest przy tym możliwość odwrócenia roli tych materiałów i wykonania z nich zbrojenia. Przy wariacie „każdy z każdym” osnowa–zbrojenie uzyskano kompozyty o osnowie: m – metalowej, p – polimerowej, c – ceramicznej.

Kompozyty cechują się wieloma zaletami, jak: wysoka odporność na uderzenia i pęknięcia, niewielka gęstość własna/niska masa, nie są podatne na korozję, niewielka rozszerzalność cieplna, nie przewodzą prądu, wykazują niską względną przenikalność elektryczną, tłumią drgania. Niestety mają również wady, jak: niska wytrzymałość na ściskanie, trudna obróbka i procesowanie, są higroskopijne oraz kosztowne. Defekty w strukturze mogą powstawać w trakcie wytwarzania kompozytów, a w szczególności w trakcie eksploatacji elementów kompozytowych. Kompozyty ze względu na swoje pozytywne właściwości szeroko są stosowane w wojsku. Wykonuje się szereg konstrukcji do budowy samolotów, śmigłowców, dronów, jak również sprzętu obsługowego. Ponadto materiały kompozytowe są szeroko stosowane w wielu dziedzinach, np.: w przemyśle, budownictwie, okrętownictwie, transporcie, wyczynowym sporcie itp.

5. Literatura

1. A. Boczkowska, G. Krześciński, *Kompozyty i techniki wytwarzania*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016.
2. W. Królikowski, *Polimerowe kompozyty konstrukcyjne*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012.
3. D. Roach, and J. Di Mambro, “Enhanced Inspection Methods to Characterize Bonded Joints: Moving Beyond Flaw Detection to Quantify Adhesive Strength”, *Air Transport Association Nondestructive Testing Forum*, Fort Worth (USA), 2006.
4. D. Roach and A. Nikhilesh, *Composite Structure Utilization - Commercial Airplanes*, SAE International 05AMT-51, 2005.
5. JEC Magazine Composites no. 89, Future Aeronautics, May 2014, www.JECcomposites.com.
6. Z. Żmudziński, *Kompozyty i inne materiały stosowane w konstrukcjach lotniczych*. Sprawozdanie ITWL 5134/50, 2009.
7. D. Woźniak, L. Kukielka, „Kompozyty w technice w aspektach materiałów nowej generacji Nowe konstrukcje”, *Autobusy* 6/2014.
8. M. Śmiałkowska-Opalka, Instytut Technologii Bezpieczeństwa „Moratex”, Łódź.
9. *Encyclopedia of Smart Materials*, vol. 1, Mel Schwartz, Wiley, Nowy Jork 2002.

10. A. Byme, B., B. Fuller, C. Winterfield and D. Gilbert, "Composite Materials in Aircraft Manufacture", *Aeronautical Engineering Mech. Eng.* 3016, University of Adelaide, Australia.
11. K. Wilewski, Polska Zbrojna, 2023. <https://www.polska-zbrojna.pl/home/articleshow/39213?t=Kompozytowe-helmy-dla-wojska> (dostęp 14.10.2023)
12. W. Głuszewski, R. Kubacki, „Polimerowe kompozyty w ochronie przed promieniowaniem mikrofalowym”, *Nowa Energia*, str. 80-84, 2022.
13. M. Dura, Defence24, 2020. <https://defence24.pl/rosyjski-ratnik-z-egzoszkieletem-juz-w-sluzbie> (dostęp 14.10.2023).
14. A. Leski, „Analiza wytrzymałości łopaty śmigłowca uszkodzonej w wyniku przestrzelenia”, *Rozprawa Doktorska*, WAT, Warszawa, 2000.
15. K. Dragan, „Metoda wykrywania uszkodzeń kompozytowych łopat wirnika nośnego śmigłowca”. *Rozprawa doktorska*, ITWL, 2008.
16. W. Habaj, „Technologia kompozytów polimerowych wzmacnianych krótkim włóknem aramidowym wykonanych metodą RTM”, *Problemy Techniki Uzbrojenia*, str. 61-73, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, 2008.

