

Monografia *Bezpieczeństwo lotnicze w aspekcie rozwoju technologicznego* powstała na podstawie artykułów naukowych dotyczących technologii, technik oraz materiałów konstrukcyjnych wykorzystywanych współcześnie w lotnictwie i, co istotne, wpływających na zapewnienie wysokiego poziomu bezpieczeństwa. Największą wartością tego tomu jest zebranie artykułów Autorów z różnych instytucji i uczelni, w których badania naukowe są skupione wokół lotnictwa i jego bezpieczeństwa. Należą do nich: Inspektorat Implementacji Innowacyjnych Technologii Obronnych (I3TO), Akademia Sztuki Wojennej, 7. Eskadra Działań Specjalnych, 23. Baza Lotnictwa Taktycznego, a także politechniki – warszawska i lubelska. Taka różnorodność wpłynęła na powstanie książki o wieloaspektowym podejściu Autorów do zagadnień związanych z lotnictwem i szeroko rozumianym bezpieczeństwem. Opracowanie jest skierowane do szerokiego grona czytelników, w tym zwłaszcza studentów, chcących wzbogacić wiedzę o bezpieczeństwie lotniczym rozwijanym wraz z postępem technologicznym.

**Bezpieczeństwo lotnicze w aspekcie rozwoju technologicznego**

ISBN 978-83-7523-587-6



# **Bezpieczeństwo lotnicze**

**w aspekcie  
rozwoju technologicznego**

Redakcja naukowa  
Radosław Bielawski  
Bogdan Grenda

AKADEMIA SZTUKI WOJENNEJ

# **Bezpieczeństwo lotnicze**

**w aspekcie  
rozwoju technologicznego**



AKADEMIA SZTUKI WOJENNEJ

# **Bezpieczeństwo lotnicze**

**w aspekcie  
rozwoju technologicznego**

Redakcja naukowa  
Radosław Bielawski  
Bogdan Grenda

WARSZAWA 2017

Recenzenci  
prof. dr hab. Ryszard Szpyra  
dr inż. Michał Kowalik

Opracowanie graficzne okładki  
Ewa Wiśniewska

Zdjęcie na okładce  
Sławek hesja Krajniewski

Redakcja techniczna i skład  
Małgorzata Gawłowska

Korekta  
Jolanta Puchalska

© Copyright by Akademia Sztuki Wojennej, Warszawa 2017

ISBN 978-83-7523-586-9

Sygn. ASzWoj 6485/17

Skład, druk i oprawa: Wydawnictwo Akademii Sztuki Wojennej  
00-910 Warszawa, al. gen. A. Chruściela 103, tel. 261-814-055, tel./faks 261-813-752  
e-mail: [wydawnictwo@akademia.mil.pl](mailto:wydawnictwo@akademia.mil.pl)  
Zam. nr 834/17

# Spis treści

Wstęp .....	7
Wykorzystanie innowacyjnych technologii SMART w strukturach płatu i bezzałogowego statku powietrznego <i>Sławomir Augustyn</i> .....	9
Współczesne materiały kompozytowe stosowane w cywilnych i wojskowych strukturach lotniczych oraz techniki ich wytwarzania a wpływ na bezpieczeństwo lotnicze <i>Radosław Bielański</i> .....	30
Zastosowanie nowych technologii i materiałów konstrukcyjnych na przykładach wybranych samolotów bojowych piątej generacji <i>Aleksandra Radomska</i> .....	50
Rozwój technologii śmigłowej jako odzwierciedlenie potrzeb nowoczesnego pola walki <i>Daniel Orłowski</i> .....	70
Technologie, techniki i wyposażenie stosowane przez wysuniętych nawigatorów naprowadzania lotnictwa (WNNL) – <i>Joint Terminal Attack Controller (JTAC)</i> <i>Rafał Zajkowski</i> .....	85
Wykorzystanie systemów bezzałogowych statków powietrznych w ugrupowaniu roju na przykładzie systemu bezzałogowych statków powietrznych (SBSP) Perdix <i>Dariusz Kompała</i> .....	103
Nowe technologie w dowodzeniu siłami powietrznymi <i>Bogdan Grenda</i> .....	118

Bezpieczeństwo w porcie lotniczym – aspekty techniczne <i>Luiza Wyszyńska</i> .....	145
Wykorzystanie symulatora lotniczego samolotu MiG-29 na potrzeby szkolenia do realizacji zadań w ramach misji „Baltic Air Policing” <i>Piotr Iwaszko</i> .....	157
Zastosowanie przetworników piezoelektrycznych w konstrukcjach lotniczych <i>Witold Rządkowski</i> .....	180
Wpływ zmiennych obciążeń cieplnych na bezpieczeństwo klejonych konstrukcji lotniczych <i>Mariusz Kłonica</i> .....	194
Kierunki rozwoju bezzałogowych statków powietrznych <i>Paweł Majdan</i> .....	209
Wykaz rysunków .....	220
Wykaz fotografii .....	222
Wykaz tabel.....	224

# Wstęp

Szanowny Czytelniku, przed Tobą monografia pt. *Bezpieczeństwo lotnicze w aspekcie rozwoju technologicznego*. Stanowi ona unikalny zbiór artykułów, których treści odnoszą się do technologii, technik oraz materiałów konstrukcyjnych wykorzystywanych współcześnie w lotnictwie, i co istotne – wpływających na zapewnienie wysokiego poziomu bezpieczeństwa.

Największą wartością tej monografii, w naszej ocenie, jest zebranie artykułów z różnych instytucji i uczelni, w których badania naukowe skupione są wokół lotnictwa i jego bezpieczeństwa. Należą do nich: Inspektorat Implementacji Innowacyjnych Technologii Obronnych (I3TO), Akademia Sztuki Wojennej, 7 Eskadra Działań Specjalnych, 23 Baza Lotnictwa Taktycznego, Politechnika Warszawska i Politechnika Lubelska. Różnorodność ta wpłynęła na powstanie książki o wieloaspektowym podejściu autorów do zagadnień związanych z lotnictwem i szeroko rozumianym bezpieczeństwem. Takie ujęcie może pozwolić Czytelnikowi na szerszy odbiór przedstawionych w monografii treści.

Opracowanie skierowane jest do szerokiego grona czytelników, w tym także studentów, chcących pogłębić i zaktualizować wiedzę dotyczącą aspektów związanych z bezpieczeństwem lotniczym.

Chcielibyśmy podziękować Autorom poszczególnych części tej monografii za zaangażowanie oraz materiał, dzięki któremu ona powstała. Książkę tę dedykujemy wszystkim pasjonatom lotnictwa.

*Z życzeniami miłej lektury*

*ppłk dr inż. Radosław Bielański*

*plk dr hab. Bogdan Grenda*





plk dr hab. inż. Sławomir Augustyn

Inspektorat Implementacji Innowacyjnych Technologii Obronnych (I3TO)

saugustyn@mon.gov.pl

# Wykorzystanie innowacyjnych technologii SMART w strukturach płatowca i bezzałogowego statku powietrznego

## Streszczenie

Technologia rozwija się w dynamicznym tempie. Również szybko kształtującym się sektorem jest lotnictwo. Dzieje się tak głównie przez zastosowanie inteligentnych materiałów. Stosowanie ich pozwala na szybki zwrot poniesionych kosztów. Wpływają również za redukcję zanieczyszczeń, hałasu itp. W praktyce znajdują swe zastosowanie głównie jako komponent struktury konstrukcyjnej lub funkcjonalnej. Obecnie są one coraz częściej wykorzystywane.

Przykładem zastosowania wspomnianych materiałów jest inteligentny system przeciwo-blodzeniowy (ISP). Jest to system informacyjny i komunikacyjny mający na celu ciągłą, automatyczną kontrolę temperatury i wilgotności nawierzchni wyznaczonego obszaru. Kolejną, również ważną i ciągle rozwijającą się technologią jest Smart Dust, czyli inteligentny kurz. Są to bezprzewodowe urządzenia zawierające czujniki mikroelektromechaniczne (**Micro-Electro-Mechanical Systems** – MENS) komunikujące się między sobą drogą radiową. Zbierają one określone dane o otoczeniu na rozległym terenie dzięki automatycznej konfigurowanej sieci informatycznej.

Coraz częściej słyszymy o łączeniu dwóch różnych dziedzin, które nie są ze sobą spokrewnione. Podobnie jest i w tym przypadku. Zaistniała potrzeba, aby stworzyć technologię, dzięki której praca skrzydeł samolotu przypominałaby ruch skrzydeł ptaka. W tym celu połączono zagadnienia z dziedziny bioniki wraz z wykorzystaniem materiałów inteligentnych. Wspomniana wyżej technologia zyskała nazwę The Adaptive Compliant Trailing Edge (ACTE). To innowacyjne rozwiązanie ma na celu zredukowanie poziomu hałasu wytwarzanego przy starcie i lądowaniu, a także ograniczenie kosztów zużytego paliwa oraz zmniejszenie całkowitej masy statku powietrznego. Wraz z powstaniem nowej technologii zaistniała potrzeba, aby przygotować elastyczne poszycie skrzydła. Wykorzystano farbę, która powstała na bazie skóry rekina. Kolejnym rozwiązaniem przyczyniającym się do rozwoju nowej techniki jest „bionic skin”, w wyniku czego powstał materiał, którego budowa oparta jest na strukturze skrzydła motyla.

**Słowa kluczowe:** technologia SMART, inteligentny kurz, materiały inteligentne, inteligentny system przeciwo-blodzeniowy (ISP), rozwiązania bioniczne (bionic skin).

## Wstęp

W celu utrzymania odpowiednich własności aerodynamicznych w każdych warunkach lotu statku powietrznego skonstruowanego z materiałów z pamięcią kształtu należy starannie dobrać odpowiednio inteligentne rozwiązanie przeciwdziałające skutkom oblodzenia. Naprzeciw temu wyzwaniu wychodzi **inteligentny system przeciwołodzienny (ISP)**. System ten dzięki możliwości zastosowania w strukturach statku powietrznego nanokompozytów polimerowych i nanokrystalicznych stopów metali o właściwościach grzejnych jest w stanie odpowiednio wcześniej stwierdzić, czy określony obszar kontrolowanej nawierzchni jest oblodzony. Dzięki użyciu różnego rodzaju polimerów w nanokompozytach możliwe stało się nadanie cech elastyczności lub sztywności w każdym miejscu struktury płatowca z pamięcią kształtu. W przeciwieństwie do tradycyjnych stopów w konstrukcji samolotu czy śmigłowca kompozyty są materiałem o mniejszej masie oraz o zwiększonej wytrzymałości mechanicznej, a zatem posiadają lepsze właściwości konstrukcyjne i eksploatacyjne, co pozwala na świadome kształtowanie pożądanych właściwości. Oznacza to, że mogą być one w jednym kierunku giętkie, a w innym sztywne, przenosząc doskonale drgania giętno-skrętne. Prócz możliwości dowolnego kształtowania według określonych potrzeb elastyczności powierzchni w takich miejscach jak zawieszenie, skrzydła czy łopaty wirnika nośnego, nanokompozyty wraz z materiałem z pamięcią kształtu przyczyniają się do zmiany właściwości dynamicznych konstrukcji statku powietrznego.

Zastosowane nanokompozyty polimerowe i nanokrystaliczne stopy metali o właściwościach grzejnych w strukturach materiału z pamięcią kształtu uzyskują niespotykane dotąd, nowe właściwości, cechujące się zwiększonym oporem elektrycznym dla przepływającego prądu elektrycznego. Dzięki tej technologii znane dotychczas tradycyjne rozwiązania, wykorzystujące elektryczne ścieżki lub przewody o cechach opornościowych dla przepływającego prądu, można zastąpić jednorodną elastyczną masą z nanokompozytów polimerowych, które mogą być nanoszone w strukturach wielu materiałów (np. włókniny, materiały polimerowe, materiały naturalne itp.). Okres użytkowania wyrobów wyposażonych w funkcjonalne elementy ogrzewania wykonane w tej technologii jest dłuższy niż przy zastosowaniu klasycznego ogrzewania za pomocą układów wykorzystujących drut oporowy. Grzejąca, dowolnie elastyczna lub sztywna masa nie zawiera żadnych ścieżek ani elektrycznych obwodów oporowych, nie zachodzi więc niebezpieczeństwo przepalenia ich

czy przerwania. Dopóki cała płaszczyzna powierzchni grzejnej nie zostanie rozerwana, będzie ona funkcjonalna w ogrzewaniu.

Dzięki równomiernemu rozkładowi temperatury (gradient) na całej powierzchni grzejnej szybciej i równomiernie ogrzewamy element użytkowy. Taka funkcjonalność nanokompozytów polimerowych przekłada się na większą wydajność i oszczędność, gdyż nie wymaga zakupu dodatkowych urządzeń grzejnych.

Pomimo coraz bardziej powszechnego stosowania materiałów inteligentnych w wielu dziedzinach życia codziennego niezbędna staje się wiedza interdyscyplinarna z takich dziedzin nauki jak matematyka, chemia, fizyka, materiałoznawstwo oraz specjalistyczna wiedza z dziedzin techniki, w których będą one wdrażane. Niezbędne jest zatem tworzenie interdyscyplinarnych zespołów i instytucji naukowych.

## Istota materiałów inteligentnych

Jednym z powodów dynamicznego rozwoju lotnictwa są duże nakłady finansowe inwestowane przez firmy produkujące samoloty, takie jak Boeing czy Airbus. Celem takich inwestycji jest osiągnięcie przewagi technologicznej nad konkurencją będącą na danym rynku. Zastosowanie materiałów inteligentnych w budowie samolotów bez wątpienia zwiększa konkurencyjność oferowanych produktów. Inteligentne rozwiązania i materiały typu „smart” wpływają na szybki zwrot poniesionych kosztów wdrożenia poprzez redukcję wagi całkowitej samolotu, co pozwala na zmniejszenie zużycia paliwa. Użycie materiałów inteligentnych w strukturach płatowca i silnika samolotu wpływa znacząco na redukcję zanieczyszczeń, hałasu i wibracji, co prowadzi do wzrostu bezpieczeństwa i komfortu lotu.

W chwili obecnej nie istnieje powszechnie akceptowalna definicja materiałów inteligentnych, jednakże w pracach badawczych i w literaturze można spotkać zróżnicowane nazewnictwo, np.: *intelligent materials*, *smart materials*, *adaptive materials*, a nawet *multifunctional materials*.

Obecnie najbardziej znane jest określenie japońskiego naukowca T. Takagi, stwierdzające, że materiał inteligentny to taki, który jest zdolny do reagowania na bodźce zewnętrzne przez istotne zmiany swoich właściwości dla

pożądaney i skutecznej odpowiedzi na te bodźce<sup>1</sup>. Stosując natomiast terminologię informatyki, stwierdzono, że materiał inteligentny powinien spełniać rolę czujnika, sensora, procesora i urządzenia uruchamiającego – aktuatora, przy czym jego właściwości powinny wykazywać cechy sprzężenia zwrotnego<sup>2</sup>. Podobne stwierdzenie traktuje materiały inteligentne jako projektowane w taki sposób, aby reagowały na zewnętrzną symulację i – adaptując się do warunków środowiskowych – polepszały swoje właściwości, zwiększając trwałość, oszczędzając energię oraz dostosowując warunki dla poprawy komfortu ludzi, a także samoistnie się powielając, naprawiając lub uszkadzając w miarę potrzeby, zmniejszając odpady i zwiększając efektywność<sup>3</sup>. Materiały inteligentne w praktycznym zastosowaniu często występują jako komponent struktury konstrukcyjnej lub funkcjonalnej zwanej inteligentną strukturą<sup>4</sup>. Podział materiałów inteligentnych zmieniał się na przestrzeni lat. Wraz z rozwojem tej dziedziny dochodziły kolejne grupy, dlatego też w literaturze można znaleźć wiele klasyfikacji. Jedna z nich dzieli te materiały na siedem grup: zmieniające kolor, emitujące światło, zmieniające swój kształt lub wielkość, zmieniające temperaturę, zmieniające swoją gęstość, samogrupujące się i samonaprawiające się<sup>5</sup>.

Inżynierskie materiały inteligentne są obecnie coraz powszechniej używane i znajdują swoje zastosowanie w wielu dziedzinach życia i przemysłu, lecz największy ich rozwój i najwięcej zastosowań można zaobserwować w przemyśle lotniczym i samochodowym. Rosnące wymagania stawiane współczesnym konstrukcjom lotniczym coraz trudniej spełnić w oparciu o klasyczne materiały. Zastosowanie materiałów inteligentnych zwiększa wydajność i niezawodność niektórych systemów oraz umożliwia stworzenie nowych układów dla starszych pod względem budowy i użytej technologii statków powietrznych. Materiały typu „smart” wykorzystywane są m.in. jako układy napędowe, elementy sterujące czy sensory. Można je również znaleźć w zaawansowanych systemach bezpieczeństwa oraz w elementach konstrukcyjnych, takich jak:

1 T. Takagi, *Present state and future of the intelligent materials and systems in Japan*, “Journal of Intelligent Material Systems and Structures” 1999, vol. 10, Issue 7, s. 575–581.

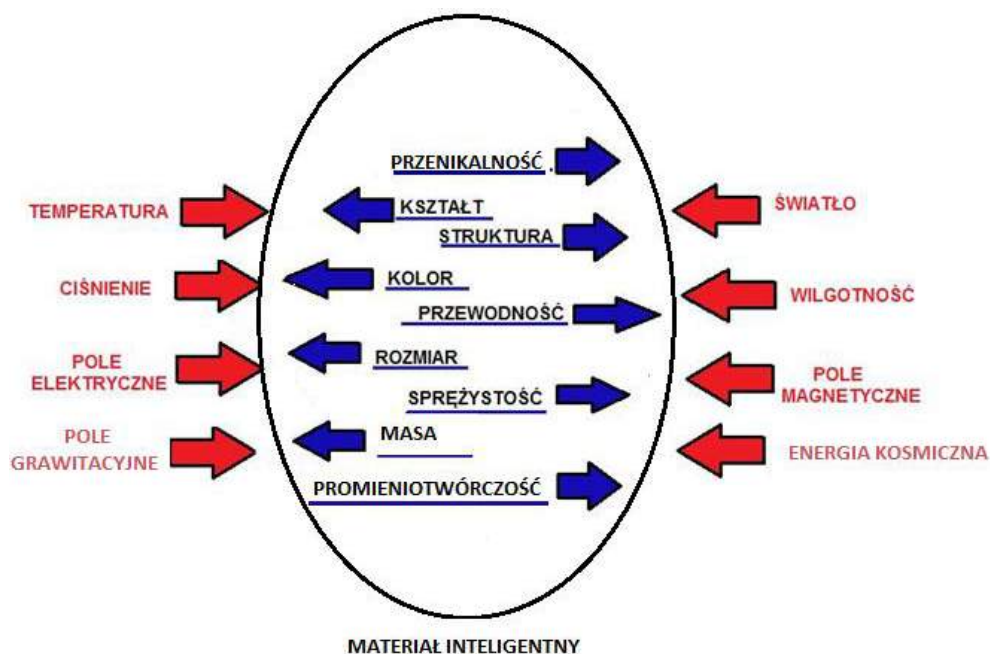
2 S. Wojciechowski, *Materiały inteligentne – stan zagadnienia 2003*, „Inżynieria Materiałowa” 2004, R. XXV, nr 2, s. 59–61.

3 L.A. Dobrzański, *Podstawy nauki o materiałach i materiałoznawstwo*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.

4 G. Akhras, *Smart materials and smart systems for the future*, “Canadian Military Journal”, Autumn 2000, s. 25–31.

5 *Materiały inteligentne*, online – [www.matint.pl](http://www.matint.pl) [dostęp: 9.12.2015].

zawieszenie, silniki, urządzenia elektroniczne, skrzydła, łopaty wirnika nośnego. Materiały te mogą występować samodzielnie albo stanowić komponent struktury konstrukcyjnej lub funkcjonalnej, tworząc tym samym nowoczesne powierzchnie sterowe i nośne. Używane są w celu zmiany właściwości dynamicznych konstrukcji, dopasowania kształtu struktury do określonych potrzeb w czasie użytkowania lub do zbierania informacji o konstrukcji w czasie obsługi. Wykorzystanie materiałów inteligentnych wpływa znacząco na zwiększenie bezpieczeństwa, komfortu, niezawodności, jak też redukcję zanieczyszczeń, wibracji oraz hałasu. Mogą być one również wykorzystywane jako dodatek zmieniający wygląd, np. stopy z pamięcią kształtu, lakier samochodowy zmieniający kolor pod wpływem zmian temperatury, materiały piezoelektryczne, elektrochromowe, elektroluminescencyjne, elektoreologiczne bądź magnetoreologiczne.

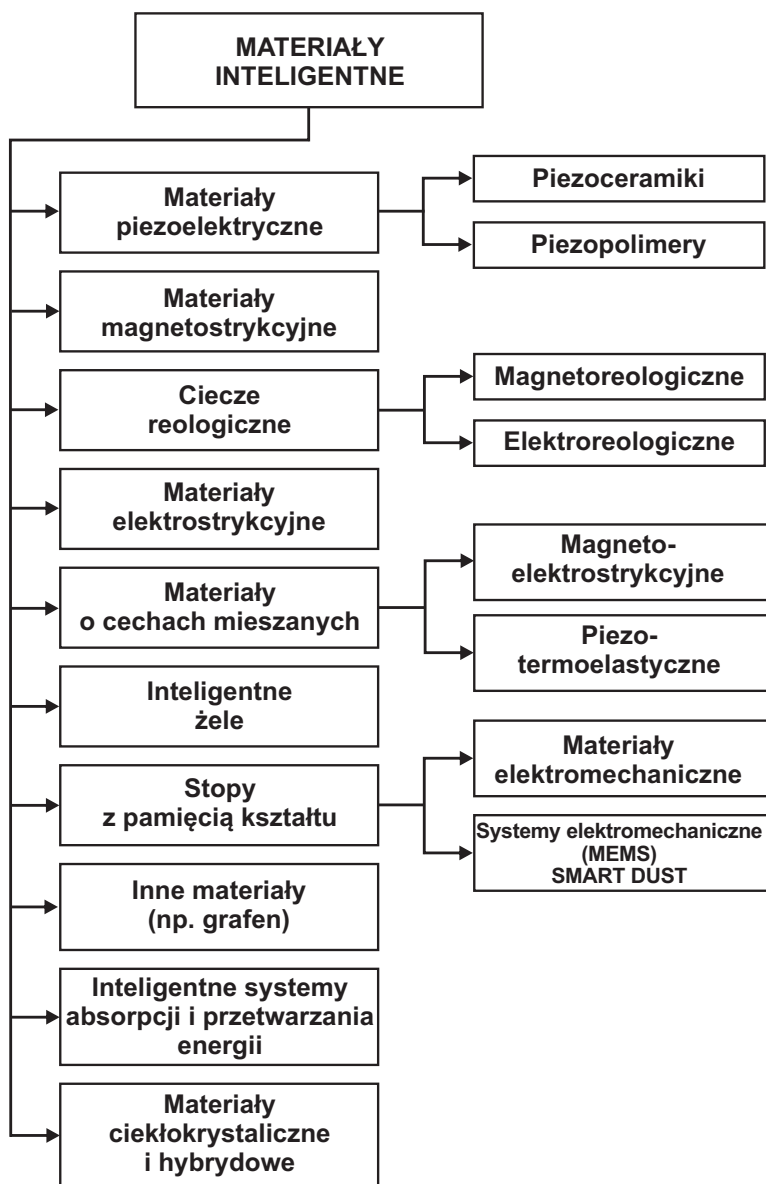


Źródło: opracowanie własne na podstawie: A. Ćwikła, *Lotnicze zastosowania materiałów inteligentnych*, „Prace Instytutu Lotnictwa” 2011, nr 211, s. 48.

Rys. 1. Ogólna zasada działania materiałów inteligentnych

Na rysunku 1 przedstawiona została ogólna idea działania materiałów inteligentnych z uwzględnieniem nanotechnologii. W materiałach tych pod wpływem czynników zewnętrznych, takich jak: temperatura, wilgotność, ciśnienie, pole elektryczne lub magnetyczne, pole grawitacyjne czy energia

kosmiczna, zmianie ulega jedna lub kilka własności fizycznych. Zależnie od rodzaju materiału i wywieranego oddziaływania zmianom mogą ulegać: kształt, rozmiar, masa, struktura wewnętrzna, kolor, przewodność elektryczna, magnetyczna lub cieplna oraz sprężystość, przenikanie i promieniowanie (rys. 2).



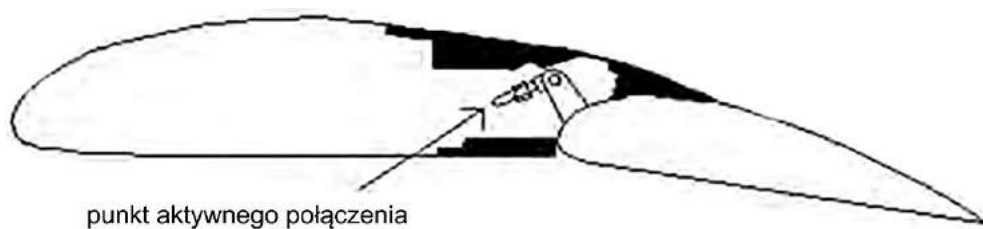
Źródło: ibidem, s. 49.

Rys. 2. Rodzaje materiałów inteligentnych

## Wykorzystanie materiałów inteligentnych w lotnictwie

Inteligentny system przeciwoślodzeniowy (ISP) można zaliczyć do tzw. inteligentnych rozwiązań. Aby sformułowanie to było jak najbardziej trafne, w procesie tworzenia ISP nie powinno zabraknąć materiałów inteligentnych (*smart materials*).

Materiały inteligentne ze względu na swoje specyficzne cechy, łatwość stosowania oraz niski koszt mogą stanowić o przyszłości konstrukcji statków powietrznych. Skrzydło samolotu, wirnik nośny i śmigło ogonowe są jednymi z najważniejszych elementów konstrukcyjnych. Działają na nie podczas lotu duże siły giętno-skrętne i ściskające, a więc ich poprawne działanie umożliwia zwiększenie komfortu, prędkości, bezpieczeństwa i niezawodności. Przewody wykonane ze stopów z pamięcią kształtu powodują zmianę kształtu ruchomej końcówki skrzydła, która dostosowuje się do warunków panujących podczas lotu (rys. 3). Maksymalne odkształcenie tych przewodów wynosi 11 mm, co pozwala na odkształcenie kątowe końca skrzydła nawet do 45°. Odkształcenie tych przewodów powoduje napięcie od 2 do 5 V, natomiast powrót do poprzedniego stanu jest możliwy przez oziębienie zimnym powietrzem. Przewody wykonane ze stopu NiTi mogą działać nawet w temperaturze do -55°C na wysokości 2000 m nad poziomem morza, czyli w warunkach typowych dla małych samolotów pasażerskich<sup>6</sup> lub dla bezałogowych statków powietrznych (BSP). Ponadto w elementach połączeniowych można zastosować inteligentne żele lub inne hybrydowe materiały, tj. materiały kompozytowe wraz energią fotowoltaiczną, np. perowskity dające większą elastyczność w systemie sterowania statkiem powietrznym.



Opracowanie własne.

Rys. 3. Schemat klapy w skrzydle samolotu

<sup>6</sup> Raport Zespołu Badawczego Benoit BERTON Dassault Aviation: Shape Memory Alloys Application, Trailing Edge Shape Control, 2006.



Usieciowienie wewnętrzne skrzydła przewodami ze stopów z pamięcią kształtu umożliwi odkształcenie całego skrzydła, a nie tylko jego ruchomej części. Tego typu konstrukcje zostały zastosowane w lotnictwie wojskowym, chociaż prowadzone są także badania nad wdrożeniem ich w lotnictwie cywilnym<sup>7</sup>.

Stopy oraz kompozyty z pamięcią kształtu znajdują także zastosowanie w łopatach wirników nośnych śmigłowców. Mają one za zadanie zmniejszyć niewyważanie wirników poprzez zmianę ich kształtu. Śmigłowce są wyposażone w ruchome kłapy na końcach łopat wirników, jednak zmiana ich położenia jest pasywna, co nadal jest niedoskonałym elementem układu sterowania. Dzięki użyciu materiałów inteligentnych w określonym miejscu możliwe jest aktywne przystosowanie się łopat do warunków podczas lotu śmigłowca, a co za tym idzie – następuje redukcja drgań mechanicznych i wibracji w kabinie wywoływanych przez wirnik nośny<sup>8</sup>. Zastosowanie stopów z pamięcią kształtu ma doprowadzić do zwiększenia komfortu i bezpieczeństwa lotu<sup>9</sup>. Elektryczny układ sterowania w łopatach wirnika śmigłowca wykorzystuje pręty z pamięcią kształtu do ustawiania łopat w jednej z dwóch pozycji. Każda łopata zawiera kilkanaście prętów ze stopów materiału typu SMA (*Shape Memory Alloys*). Przewody z SMA połączone są z instalacją elektryczną, która umożliwia podgrzewanie ich, a następnie aktywację poprzez połączenie z systemem sterującym i kontrolującym, który reguluje zmianę położenia kłapy na końcach wirników w zależności od lotu.

Dzięki nowoczesnemu układowi wykonawczemu łopat wirnika śmigłowca i zastosowanym w nich materiałom inteligentnym informacja o zasilaniu prętów daje „cyfrową” informację o stanie technicznym, w jakim znajduje się element nośny. Takie wykorzystanie inteligentnych prętów spowodowało zmniejszenie drgań, co w następstwie prowadzi do dodatkowych wibracji w kabinie pilota, wywoływanych przez wirnik o wartości równej 1/liczba obrotów wirnika<sup>10</sup>.

7 J. Frautschi, *Finite element simulation of shape memory alloy actuator in adaptive structures*, “Mechanical and Aerospace Engineering” 2003.

8 A. Ćwikła, *Medyczne zastosowania materiałów inteligentnych*, VII konferencja informatyki stosowanej, Chełm 2008.

9 V. Giurgiutiu, C. Rogers, J. Zuidevaart, *Incrementally adjustable rotor-blade tracking tab using SMA composite*, Proceedings of the 38th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, and Adaptive Structures Forum, Kissimmee, FL, April 7–10, 1997, Paper #97-1387, s. 1–11.

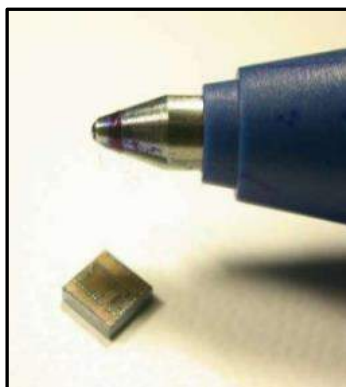
10 <http://www.continuumdynamics.com/solutionaesma.html> [dostęp: 10.06.2013].

Materiały z pamięcią kształtu wykorzystywane są także w celu zmniejszenia poziomu hałasu w Boeingu 747-8 Intercontinental. System redukcji drgań wykorzystujący te materiały został zastosowany w szerokokadłubowym samolocie dalekiego zasięgu. Podczas startu samolotu z silników GENx strumień wychodzących gorących gazów wylotowych wpływa na podgrzanie, a następnie odkształcenie 14-calowych trójkątnych płytek osadzonych na dyszy wylotowej silnika. Powyższe rozwiązanie powoduje mieszanie się powietrza z otoczenia z gazami wylotowymi silnika. Następnie skutkuje to dławieniem przepływu nawet o połowę oraz spadkiem prędkości strumienia zaraz za wylotem silnika. Po osiągnięciu przez samolot wysokości (np. 11 000 m), gdzie temperatura spada do minus 52–56°C, następuje ochłodzenie końcówek zawierających stopy z pamięcią kształtu, co umożliwia powrót dyszy silnika do poprzedniego kształtu. Metoda ta pozwala na redukcję masy samolotu, gdyż pozwala na mniejszą grubość izolacji silnika, a to wpływa na mniejszy hałas oraz zmniejszenie ilości spalanej paliwa<sup>11</sup>.

W rozważaniach teoretycznych uwzględnia się fakt, iż materiały inteligentne mogą tak jak materiały piezoelektryczne i z pamięcią kształtu być również wykorzystane do budowy tzw. wirtualnego systemu sterowania. Stery takie byłyby uruchamiane tylko podczas sterowania. W dalszych planach jest budowa maszyn transportowych i pasażerskich mogących latać z prędkościami ponaddźwiękowymi. Wykorzystanie materiałów inteligentnych pozwoli ograniczyć zjawisko kryzysu falowego podczas przejścia z prędkości poddźwiękowych na naddźwiękowe w postaci zmniejszonego poziomu ciśnienia akustycznego, tzw. grzmotu naddźwiękowego.

Smart Dust („inteligentny kurz”) to technologia bezprzewodowych urządzeń zawierających czujniki mikroelektromechaniczne komunikujące się między sobą drogą radiową, polegająca na zbieraniu określonych danych o otoczeniu na rozległym terenie dzięki automatycznie konfigurowanej sieci informatycznej. Każdy z czujników działa w oparciu o kompletny system operacyjny zwany TinyOS. Instalacja czujników ogranicza się jedynie do rozrzucenia ich w dowolnie wybranym obszarze. Docelowy rozmiar czujników ma nie przekraczać 1 mm<sup>3</sup>, czyli wielkości ziarnka piasku (rys. 4).

11 [www.boeing.com](http://www.boeing.com) – materiały firmy Boeing.



Źródło: <http://www.nanotech-now.com/smardust.htm> [dostęp: 10.06.2013]; [http://www.jhlhlab.com/jhill\\_cs/spec/](http://www.jhlhlab.com/jhill_cs/spec/) [dostęp: 10.06.2013].

*Rys. 4. Rozmiar czujników MEMS*

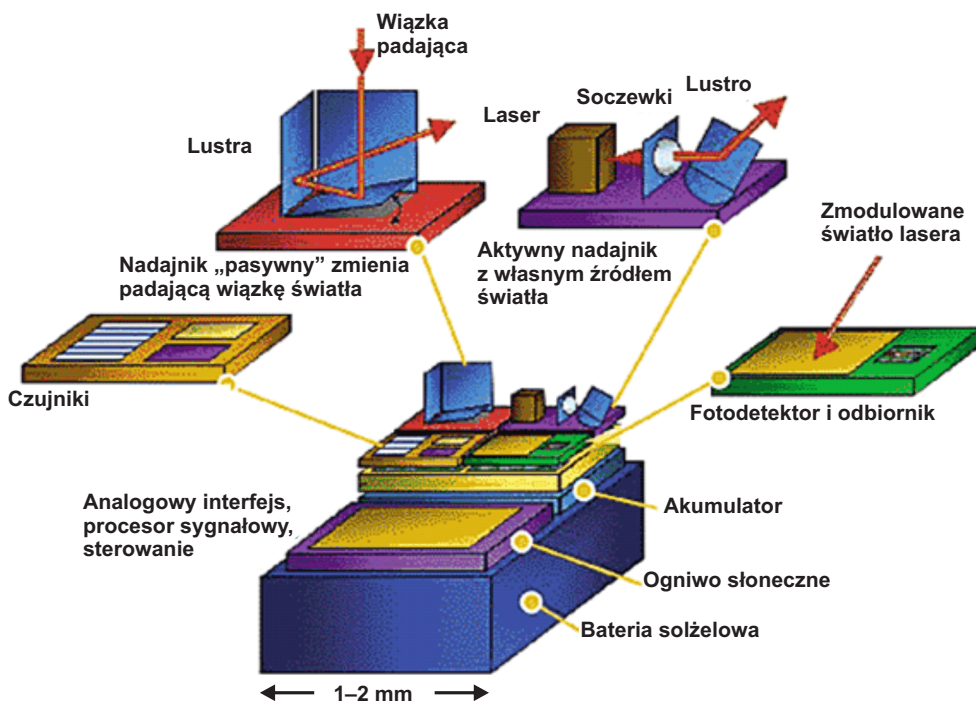
Z założenia każde urządzenie ma się składać z czujnika, układu obliczeniowego, zasilacza i radia bezprzewodowego. Umożliwiłoby to obserwację stanu (np. okolicy, wilgotności powietrza) bądź funkcji (np. powierzchni użytkowej magazynu). Zebrane informacje byłyby przekazywane w czasie rzeczywistym do centralnego komputera. Inteligentny kurz służyłby więc pozyskiwaniu, przetwarzaniu i przesyłaniu bezprzewodowo informacji (za pomocą fal radiowych) na odległość około 250 m.

Niezwykle małej wielkości urządzenia są w stanie komunikować się z otoczeniem, między sobą oraz tworzyć rozproszoną sieć (umożliwiająca ocenę sytuacji na bardzo wysokim poziomie). Podstawowymi składowymi są czujniki przystosowane do zbierania informacji na temat temperatury, wilgotności, intensywności światła, wibracji czy ciśnienia powietrza. Nie wyklucza się stosowania również czujników odbierających dźwięki czy obraz. Funkcjonowanie inteligentnego kurzu w 99% oparte jest na pozycji „stand-by”.

Zastosowanie inteligentnego kurzu:

- monitorowanie pogody/ruchów sejsmologicznych,
- monitorowanie pojazdów/statków powietrznych oraz transportu towarów,
- monitorowanie parametrów różnego typu pojazdów oraz regulacja parametrów na odległość,
- monitorowanie natężenia ruchu,
- wyłapywanie uszkodzeń, niewłaściwego wykonania produktów,
- monitorowanie klientów,

- zarządzanie budynkami poprzez zbieranie informacji na temat ich stanu faktycznego (np. lotnisk),
- monitorowanie otoczenia, np. chemicznego składu powietrza, stężenia substancji, pojawiających się zmian parametrów w celu zaalarmowania o możliwości pojawienia się np. pożaru,
- zabezpieczanie przed kradzieżą, podrobieniem,
- zapewnienie bezpieczeństwa w składowaniu towarów oraz materiałów wymagających stworzenia specjalnych warunków,
- możliwość monitorowania ekosystemów wymierających gatunków roślin i zwierząt,
- ułatwianie wykrywania złóż ropy naftowej,
- monitorowanie poziomu zużycia energii w gospodarstwach domowych w celu ustalenia najlepszej wydajności,
- możliwość prowadzenia badań w miejscach nieprzyjaznych dla ludzi, np. mierzenie stopnia topnienia lodowców, badanie zanieczyszczeń w głębinach oceanu.



Źródło: [http://www.computerworld.com/s/article/79572/Smart\\_Dust](http://www.computerworld.com/s/article/79572/Smart_Dust) [dostęp: 01.12.2012].

Rys. 5. Wielofunkcyjny kurz

Wykorzystanie inteligentnego kurzu w lotnictwie może przyczynić się do poprawy efektywności i bezpieczeństwa lotów dzięki możliwości natychmiastowego wykrycia zachodzącego zjawiska oblodzenia na powierzchni statku powietrznego. Zastosowanie tej technologii umożliwiłoby znaczną poprawę warunków oraz szybszą i skuteczniejszą reakcję dzięki możliwości pozyskiwania, przetwarzania oraz przekazywania wielu istotnych informacji, dotyczących warunków pogodowych oraz stanu technicznego samolotu w czasie rzeczywistym. W przypadku lotnictwa najlepszym miejscem do zastosowania inteligentnego kurzu byłyby niewątpliwie elementy statku powietrznego najbardziej narażone na działanie oblodzenia, czyli m.in. krawędzie natarcia skrzydeł oraz stateczników.

## Rozwiązania bioniczne w lotnictwie

Obecnie coraz częściej stosowanym rozwiązaniem jest innowacyjne połączenie zagadnień z dziedziny bioniki i wykorzystania materiałów inteligentnych. Celem stosowania tego rodzaju materiałów w strukturach kompozytowych statków powietrznych jest stworzenie technologii, dzięki której praca skrzydeł samolotu przypominałaby ruch skrzydeł ptaka. W wyniku dążenia do wdrożenia tego typu technologii zaobserwowano wyraźnie rosnące zainteresowanie bioniką oraz pokrewnymi jej dziedzinami.

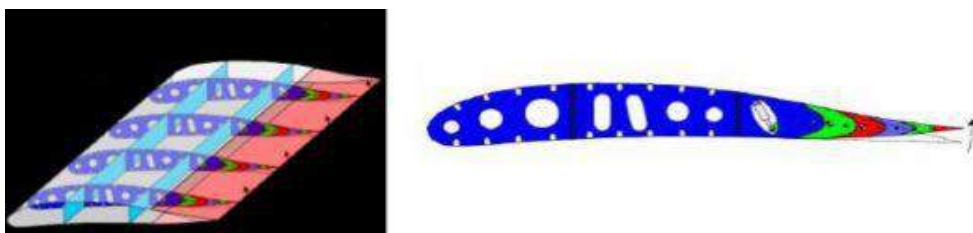
Dzięki praktycznemu wykorzystaniu materiałów inteligentnych Firmy FlexSys Inc. (rys. 6) NASA oraz Air Force Research Laboratory (AFRL) stworzyły samolot zmieniający kształt skrzydeł w trakcie lotu. Od początku 2014 roku wykonano 22 loty testowe sprawdzające technologię znaną jako *The Adaptive Compliant Trailing Edge* (ACTE), czyli adaptacyjna zgodność (ustalenie, reakcja) krawędzi spływu skrzydła. Technologia ta ma przyczynić się do zmniejszenia poziomu hałasu przy starcie i lądowaniu, a także redukcji kosztów paliwa oraz masy całkowitej statku powietrznego. Współczesne samoloty stają się szybsze i wydajniejsze, dlatego zrozumiałe jest poszukiwanie nowych rozwiązań, które wpłynęłyby na zwiększenie wytrzymałości przy jednoczesnym zmniejszeniu masy samolotu oraz kosztów produkcyjnych i eksploatacyjnych. Technologia ACTE może być wykorzystana w istniejących już statkach powietrznych, jak również w tych nowo powstających. Zastosowanie materiałów z pamięcią kształtu w strukturach skrzydeł (rys. 7) nowo powstającego

płatowca daje możliwość dostosowania zdolności aerodynamicznych skrzydeł do warunków lotu, co wpływa na zwiększenie oszczędności paliwa i zmniejszenie bezpośredniego wpływu lotnictwa na środowisko naturalne<sup>12</sup>.



Źródło: <http://www.flexsys.com/blog/2014/12/19/flexfoil-variable-geometry-control-surface-youtube-video-january-2014-flexsys-update-long-sought-seamless-wing-technology-introduced-at-aaaa-scitech-2014-show> [dostęp: 10.06.2013].

Rys. 6. Skrzydło z pamięcią kształtu wykorzystujące materiały inteligentne firmy FlexSys Inc.



Źródło: S. Ozgen, Y. Yaman, M. Sahin, G. Seber, E. Sakarya, *Morphing Air Vehicle Concepts*, Middle Est Technical University, Ankara 2015, s. 46–51.

Rys. 7. Model elastycznej końcówki szkieletu skrzydła

W wyniku badań obliczono, że praca skrzydła po odkształceniu w trakcie lotu (fot. 1) przy maksymalnej prędkości może zmniejszyć zapotrzebowanie na moc o około 9–12%. Wpływa to na zmniejszenie zużycia paliwa, a w konsekwencji na wydłużenie lotu statku powietrznego. Ustalono także, iż uelastycznienie tylnej krawędzi spływu skrzydła wykonanej z elastycznej powłoki zwiększa aerodynamikę profilu skrzydła. Wykorzystanie materiałów z pamięcią kształtu w strukturach skrzydła wymusiło zatem rozpoczęcie badań nad elastycznym poszyciem skrzydeł, mającym za zadanie umożliwienie zmiany właściwości dynamicznych konstrukcji i dopasowanie kształtu struktury do określonych potrzeb bez uszkodzeń powłoki zewnętrznej skrzydła<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> [http://www.nasa.gov/centers/armstrong/Features/acte\\_milestone.html](http://www.nasa.gov/centers/armstrong/Features/acte_milestone.html) [dostęp: 10.06.2013].

<sup>13</sup> S. Ozgen, Y. Yaman, M. Sahin, G. Seber, E. Sakarya, *Morphing Air Vehicle Concepts*, Middle Est Technical University, Ankara 2015, s. 46–51.



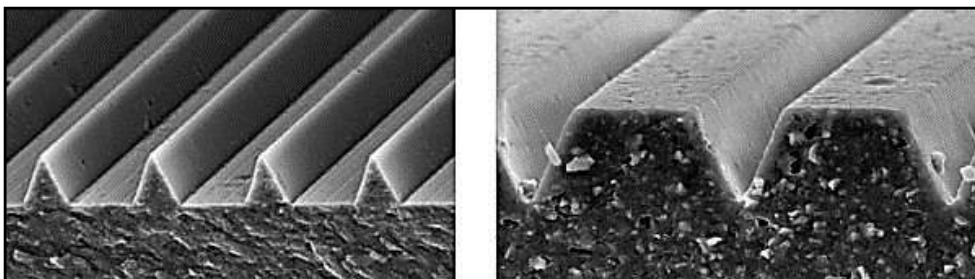
Źródło: <http://aerosociety.com/News/Insight-Blog/2677/Transforming-flight> [dostęp: 10.06.2013].

*Fot. 1. Morphing Airplane – statek powietrzny zmieniający kształt w zależności od danych potrzeb podczas lotu*

W badaniach nad poszyciem konstrukcji latających posłużono się wiedzą z dziedziny bioniki, która umożliwiła powstanie nowych rozwiązań. Przykładem takiego rozwiązania jest stworzona na bazie skóry rekina farba, która zmniejsza opór powietrza. Przeprowadzone badania udowodniły, że wytworzona w ten sposób powłoka powoduje uporządkowanie ruchu cząstek ośrodka, co likwiduje jego zawirowania i ułatwia przepływ. Zadaniem takiej powłoki jest więc zapewnienie laminarnego przepływu wokół skrzydła samolotu. Badania przeprowadzone w specjalnym tunelu aerodynamicznym na próbce odwzorowującej profil skrzydła samolotu dowiodły redukcję oporu o ponad 5% przy użyciu farby bazującej na skórze rekina<sup>14</sup> (fot. 2).

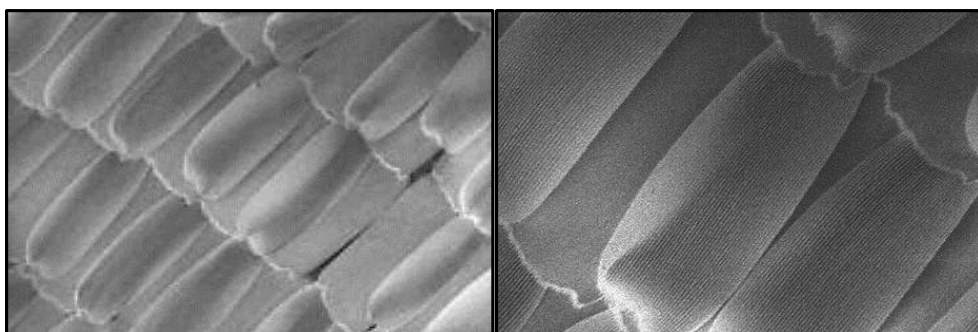
Kolejnym pionierskim rozwiązaniem, wywodzącym się z bioniki, jest materiał nazwany „bionic skin”. Struktura tego materiału oparta jest na budowie łusek występujących na skrzydle motyla z gatunku *Morpho Menelaus* (fot. 3). Łuskowata budowa skrzydła stała się inspiracją przy projektowaniu powierzchni o zmniejszonym oporze oraz odpornej na zabrudzenia. Skrzydła motyla o łuskowatej budowie są niezwykle lekkie, cienkie, elastyczne i charakteryzują się zdolnością do pochłaniania energii słonecznej, samoistnego czyszczenia oraz są hydrofobowe.

<sup>14</sup> V. Stenzel, Y. Wilke, W. Hage, *Drag-reducing paints for the reduction of fuel consumption in aviation and shipping*, “Progress in Organic Coatings” 2011, nr 70, s. 224–229.



Źródło: <http://www.rynekfarb.pl/efekt-motyła> [dostęp: 22.09.2014].

*Fot. 2. Obrazy ze skaningowego mikroskopu elektronowego modelu skóry rekina (po lewej) i farby odwzorowującej powierzchnię (po prawej)*



Źródło: <http://www.rynekfarb.pl/efekt-motyła> [dostęp: 22.09.2014].

*Fot. 3. Łuski na powierzchni skrzydła motyla *Morpho Menelaus**

W celu zbadania łuskowej budowy skrzydła motyla naukowcy wykonali odlew skrzydła, a łuski zastąpione nanocząstkami powiększono aż 333 razy. Elementy skrzydła zostały również połączone z nanorurkami węglowymi, w wyniku czego otrzymano materiał hybrydowy charakteryzujący się wysokim przewodnictwem elektrycznym oraz zdolnością do kopiowania DNA na



powierzchni bez jego absorpcji<sup>15</sup>. Grubość powłoki materiału wyniosła 1 mm, a sam materiał składał się z dwóch metalowych warstw, między którymi znajdowała się wolna przestrzeń wypełniona powietrzem. Górna część materiału została pokryta z obu stron głębokimi na 0,5 mm rowkami przypominającymi swoim kształtem odwróconą literę V, a odległość między nimi wynosiła 1 mm. Dolna część materiału swoim wyglądem przypominała cienki, gładki arkusz papieru<sup>16</sup>. Pierwszy test materiału stworzonego w oparciu o strukturę łusek skrzydeł motyla polegał na przepuszczeniu wody przez wąskie rurki pokryte od wewnątrz badaną powłoką. Punktem odniesienia była idealnie gładka powierzchnia, a mierzoną wielkością był spadek ciśnienia wody w środku wąskiej rurki. Przepływ wody był tym szybszy, im większy był spadek ciśnienia. Powierzchnia skrzydła wykazała się większą prędkością przepływu wody. Następnie zbadano odporność powłoki skrzydła na zabrudzenia. Badana powierzchnia pokryta została sproszkowanym węglikiem imitującym pyły i kurz, a następnie spłukiwano ją wodą nieustannie przez 2 minuty. Dzięki odpowiedniemu oprogramowaniu zliczono ilość cząstek węgla na powierzchni przed i po spłukaniu.

Z powierzchni wzorowanej na skrzydle motyla udało się spłukać 85% zanieczyszczeń, a z powierzchni gładkiej 70%. Materiał ten wykorzystano do budowy łopaty wirnika śmigłowca i porównano go z pokryciem stosowanym tradycyjnie. Wyniki wykazały, iż pokrycie „bionic skin” charakteryzuje się lepszą siłą nośną oraz zmniejszeniem takich wartości, jak: tarcie aerodynamiczne, częstotliwość drgań wirnika, współczynnik kołysania. Dzięki uzyskaniu lepszych osiągnięć łopaty wirnika lot śmigłowcem stał się bezpieczniejszy i bardziej komfortowy<sup>17</sup>. Sterowanie i manewrowanie śmigłowcem dzięki zwiększeniu siły nośnej stało się łatwiejsze. Niestety, naukowcy stwierdzili, iż obecna technologia nie jest w stanie całkowicie odtworzyć budowy skrzydeł motyla Morpho.

15 E. Miyako, T. Sugino, T. Okazaki, A. Bianco, M. Yudasaka, S. Iijima, *Self-assembled carbon nanotube honeycomb network using a butterfly wing template as a multifunctional nanobiohybrid*, ACS Nano 2013, 7(10).

16 I. Kovalev, *Bionic skin*, Kinneret College on the Sea of Galilee, Emek Hayarden 15132, Israel 2010, 2(9), s. 41–48.

17 Ibidem.

## Zastosowanie inteligentnego systemu przeciwooblodzeniowego (ISP) w strukturach płatowca i silnika BSP

Inteligentny system przeciwooblodzeniowy to system informacyjny i komunikacyjny mający na celu ciągłą, automatyczną kontrolę temperatury i wilgotności nawierzchni wyznaczonego obszaru. Ma za zadanie odpowiednio wcześniej stwierdzić, czy kontrolowana nawierzchnia jest oblodzona. W przypadku wystąpienia zagrożenia oblodzeniowego połączone z czujnikiem urządzenie sterujące włącza układ ogrzewania kontrolowanej nawierzchni na ustawiony okres czasu. System umożliwia ustawienie i zmianę minimalnego czasu podgrzewania kontrolowanej nawierzchni, zabezpieczając ją w ten sposób przed zbyt szybkim ponownym oblodzeniem.

W celu stworzenia inteligentnego systemu przeciwooblodzeniowego niezbędne jest połączenie czujników mikroelektromechanicznych (będących jednocześnie systemem detekcji oblodzenia) wraz z nanokompozytami polimerowymi i nanokrystalicznymi stopami metali o właściwościach grzejnych w strukturach kompozytowych statku powietrznego.

Kompozyty są obecnie odpowiedzią na rosnące zapotrzebowanie na materiały o lepszych właściwościach konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Ponadto pozwalają na świadome kształtowanie pożądanych właściwości w stopniu niedostępnym w przypadku stosowania tradycyjnych stopów aluminium.

W lotnictwie spotyka się z reguły dwa rodzaje kompozytów<sup>18</sup>:

- warstwowe – złożone z kilku rodzajów warstw charakteryzujących się ukierunkowanymi właściwościami wytrzymałościowymi. Warstwy te nakładają się na przemian i potem trwale zespala. To rozwiązanie stosuje się głównie jako poszycie kadłuba i skrzydeł;

- przekładkowe – przykładem jest szeroko stosowany w lotnictwie kompozyt z rdzeniem w postaci „plastra miodu”, spotykany przede wszystkim w konstrukcji stateczników pionowych i poziomych, klap oraz lotek.

Główną zaletą stosowania kompozytów w lotnictwie jest ich mniejsza masa oraz większa wytrzymałość mechaniczna od dotychczas stosowanych stopów aluminium. Są one o mniej więcej 30% lżejsze w porównaniu z tradycyjnym aluminium. Dodatkowo istnieje możliwość prawie dowolnego kształtowania

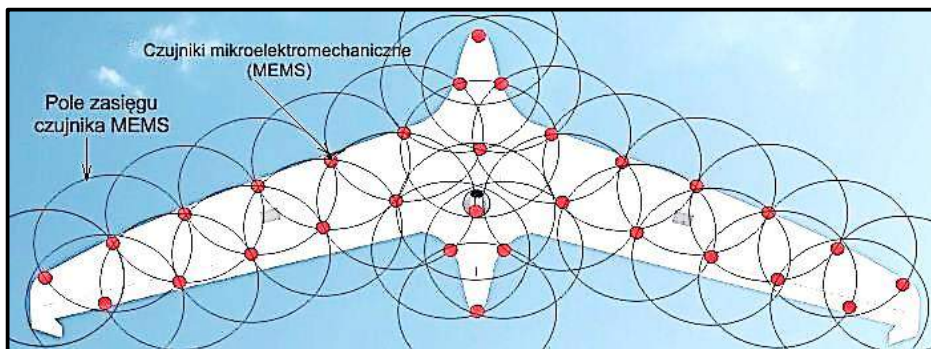
<sup>18</sup> P. Swornowski, *Kompozyty – rewolucja materiałowa: lotnictwo wojskowe*, „Lotnictwo” 2012, nr 3, s. 22.

wytrzymałości elementu kompozytowego. Oznacza to, że może on być w jednym kierunku giętki, a w innym bardzo sztywny. Obecnie na podstawie wielu symulacji przyjmuje się, że ich trwałość jest „teoretycznie” nieograniczona. Jednak w praktyce trzeba pamiętać o tym, że wieloletnia eksploatacja samolotu narażonego na niekorzystne warunki atmosferyczne (przede wszystkim duży przedział temperatur i ciśnienia) obniża ich właściwości.

Ogólnie można stwierdzić, że kompozyt zachowuje swoje właściwości wtedy, gdy jego struktura jest jednolita. Jednak po pewnym czasie eksploatacji mogą pojawić się mikropęknięcia, które niezauważone przyczyniają się do rozwarstwienia kompozytu, doprowadzając do jego zniszczenia.

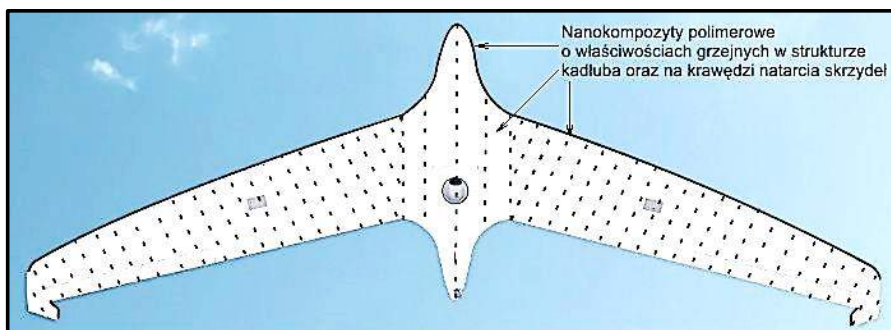
Głównym miejscem wykorzystania inteligentnego systemu przeciwołdzeniowego (ISP) byłyby kompozyty konstrukcyjne w strukturach płatowca i silnika bezzałogowych stawków powietrznych (BSP). Czujniki umieszczone w strukturze kompozytowej skrzydeł samolotu łączyłyby się między sobą bezprzewodowo i zbierałyby określone dane, np. o stanie wilgotności i temperatury panującej na krawędzi natarcia skrzydeł i stateczników, dzięki automatycznie skonfigurowanej sieci informatycznej, chroniąc tym samym statek powietrzny przed skutkami oblodzenia.

W przypadku zastosowania ISP podstawowym materiałem wykorzystywanym w strukturach płatowca i silnika BSP będą modyfikowane w warunkach laboratoryjnych nanomateriały węglowe (*Multiwall Carbon Nanotubes* – MWCNT). Technologia ta polega na modyfikowaniu nanomateriałów węglowych do wytworzenia polimerowych nanokompozytów i nanokrystalicznych stopów metali w celu uzyskania efektów grzejnych (rys. 8–10). Takie nanokompozyty uzyskują niespotykane dotąd właściwości i cechują się zwiększonym oporem elektrycznym dla przepływającego prądu. Dzięki tej technologii znane dotychczas tradycyjne rozwiązania, wykorzystujące elektryczne ścieżki lub przewody o cechach opornościowych dla przepływającego prądu, można zastąpić jednorodną masą z nanokompozytów polimerowych, które mogą być nanoszone na wiele materiałów, np. włókny, materiały polimerowe i materiały naturalne. Okres użytkowania wyrobów wyposażonych w funkcjonalne elementy ogrzewania wykonane w tej technologii jest dłuższy niż przy wykorzystaniu klasycznego ogrzewania za pomocą układów wykorzystujących drut oporowy. Grzejąca masa nie zawiera żadnych ścieżek ani elektrycznych obwodów oporowych, nie zachodzi więc niebezpieczeństwo ich przepalenia czy przerwania. Dopóki cała płaszczyzna powierzchni grzejnej nie zostanie rozerwana, będzie ona funkcjonalna w ogrzewaniu.



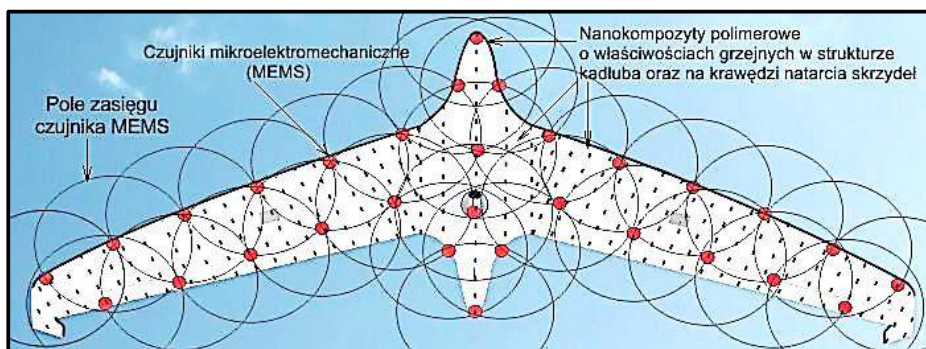
Opracowanie własne.

*Rys. 8. Miejsca montażu czujników mikroelektromechanicznych (MEMS) w strukturze statku powietrznego*



Opracowanie własne.

*Rys. 9. Nanokompozytowe maty grzejne w strukturze kompozytowej oraz na krawędzi natarcia skrzydeł i kadłuba statku powietrznego*



Opracowanie własne.

*Rys. 10. Statek powietrzny wykorzystujący czujniki MEMS oraz nanokompozyty polimerowe o właściwościach grzejnych zapobiegające zjawisku oblodzenia*

Dzięki równomiernemu rozkładowi temperatury na całej powierzchni grzejnej szybciej uzyskujemy komfort cieplny, lub też szybciej i równomier- nie ogrzewamy przedmiot użytkowy. Taka funkcjonalność nanokompozytów polimerowych przekłada się na większą wydajność i oszczędność, gdyż nie wymaga zakupu dodatkowych urządzeń grzejnych.

Przy zastosowaniu różnego rodzaju polimerów możliwe jest nadanie ce- chy elastyczności lub sztywności.

## Zakończenie

Inteligentny system przeciwooblodzeniowy (ISP) składa się z prostego ukła- du sterowania prądowego: regulatora napięcia, termostatu, mikroskopijne- go czujnika temperatury, wilgotności, ciśnienia, a także programatora, który umożliwia precyzyjne sterowanie i programowanie zakresu temperatur od zera do kilkudziesięciu °C.

Zalety inteligentnego systemu przeciwooblodzeniowego (ISP):

- wydłużony czas przelotu w strefie oblodzenia,
- możliwość kontynuacji lotu w warunkach wystąpienia oblodzenia,
- utrzymana stała wartość siły nośnej w strefie oblodzenia (utrzymanie właściwości aerodynamicznych),
- bezpieczeństwo i ochrona bezzałogowego statku powietrznego wraz z jego wyposażeniem (np. kamery),
- niski koszt produkcji.

Wady inteligentnego systemu przeciwooblodzeniowego (ISP):

- słaba odporność czujników MEMS na uszkodzenia mechaniczne,
- ograniczony dostęp ze względu na „wtapianie” technologii w struktury kompozytowe statku powietrznego.

Wykorzystanie innowacyjnych technologii SMART w strukturach pła- towca i bezzałogowego statku powietrznego powoduje zwiększenie efektyw- ności przy utrzymaniu odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa podczas wy- konywania lotów w różnych warunkach atmosferycznych.

## Bibliografia

- Akhras G., *Smart materials and smart systems for the future*, "Canadian Military Journal", Autumn 2000.
- Ćwikła A., *Lotnicze zastosowania materiałów inteligentnych*, „Prace Instytutu Lotnictwa” 2011, nr 211.
- Ćwikła A., *Medyczne zastosowania materiałów inteligentnych*, VII konferencja informatyki stosowanej, Chełm 2008.
- Dobrzański L.A., *Podstawy nauki o materiałach i materiałoznawstwo*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- Frautschi J., *Finite element simulation of shape memory alloy actuator in adaptive structures*, Mechanical and Aerospace Engineering, 2003.
- Giurguti V., Rogers C., Zuidevaart J., *Incrementally adjustable rotor-blade tracking tab using SMA composite*, Proceedings of the 38th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, and Adaptive Structures Forum, Kissimmee, FL, April 7–10, 1997, Paper #97-1387.
- <http://aerosociety.com>.
- <http://www.computerworld.com>.
- <http://www.continuumdynamics.com>.
- <http://www.flxsys.com>.
- <http://www.jlhlabs.com>.
- <http://www.nanotech-now.com>.
- <http://www.nasa.gov>.
- <http://www.rynekfarb.pl>.
- Kovalev I., *Bionic skin*, Kinneret College on the Sea of Galilee, Emek Hayarden 15132, Israel 2010, 2(9).
- Materiały inteligentne*, online – [www.matint.pl](http://www.matint.pl).
- Miyako E., Sugino T., Okazaki T., Bianco A., Yudasaka M., Iijima S., *Self-assembled carbon nanotube honeycomb networks using a butterfly wing template as a multifunctional nanobio-hybrid*, ACS Nano 2013, 7(10).
- Ozgen S., Yaman Y., Sahin M., Seber G., Sakarya E., *Morphing Air Vehicle Concepts*, Middle Est Technical University, Ankara 2015.
- Raport Zespołu Badawczego Benoit BERTON Dassault Aviation: Shape Memory Alloys Application, Trailing Edge Shape Control, 2006.
- Stenzel V., Wilke Y., Hage W., *Drag-reducing paints for the reduction of fuel consumption in aviation and shipping*, "Progress in Organic Coatings" 2011, nr 70.
- Swornowski P., *Kompozyty – rewolucja materiałowa: lotnictwo wojskowe*, „Lotnictwo” 2012, nr 3.
- Takagi T., *Present state and future of the intelligent materials and systems in Japan*, "Journal of Intelligent Material Systems and Structures" 1999, vol. 10, Issue 7.
- Wojciechowski S., *Materiały inteligentne – stan zagadnienia 2003*, „Inżynieria Materiałowa” 2004, R. XXV, nr 2.
- [www.boeing.com](http://www.boeing.com) – materiały firmy Boeing.

# Współczesne materiały kompozytowe stosowane w cywilnych i wojskowych strukturach lotniczych oraz techniki ich wytwarzania a wpływ na bezpieczeństwo lotnicze

## Streszczenie

W pracy przedstawiono charakterystykę współczesnych materiałów kompozytowych: definicję, budowę oraz rodzaje i właściwości tych materiałów, a także ich nomenklaturę. Wskazano na kierunki rozwoju laminatów lotniczych. W kolejnej części opisano współczesne metody wytwarzania kompozytów na potrzeby elementów konstrukcyjnych statków powietrznych, w szczególności tych znajdujących zastosowanie w ich poszyciu. Wskazano na zalety i wady metod laminacji, a przez to powody ich wyboru do wytwarzanych, a następnie implementowanych elementów konstrukcji lotniczych. Ostatnia część pracy opisuje zastosowanie laminatów w cywilnych i wojskowych statkach powietrznych oraz – co ważne – determinanty ich użycia.

**Słowa kluczowe:** materiały kompozytowe, lotnictwo, sposoby wytwarzania.

## Wstęp

Od pierwszych udanych konstrukcji lotniczych do czasów obecnych w konstruowaniu statków powietrznych używane były różne materiały konstrukcyjne, począwszy od ciężkiej stali, poprzez stopy aluminium oraz inne metale i ich stopy. Od kilkunastu lat w przemyśle lotniczym zauważalny jest dynamiczny wzrost zastosowania materiałów kompozytowych. Przyczyną takiego stanu rzeczy są ich właściwości. Kompozyty są materiałami stosunkowo lekkimi, a jednocześnie wytrzymałymi mechanicznie, posiadającymi wysoką sztywność i dającymi się łatwo kształtować.

Współcześnie w przemyśle lotniczym poszukuje się stosunkowo tanich oraz efektywnych metod wytwarzania kompozytów. To właśnie one w dużej mierze odpowiadają za właściwości tych materiałów. W aplikacjach lotnictwa komunikacyjnego oraz wojskowego mają one bardzo duże znaczenie. Wpływają nie tylko na zmniejszenie masy elementu, ale także na zwiększenie różnych oczekiwanych parametrów wytrzymałościowych.

Obecnie z laminatów konstrukcyjnych wytwarza się pojedyncze części statków powietrznych, a także obiekty latające (np. samoloty komunikacyjne), w których sumaryczna masa zastosowanych w nich elementów zbudowanych z kompozytów konstrukcyjnych wynosi ponad 50%. Spotyka się także takie obiekty latające, jak np. bezzałogowe statki powietrzne, które prawie w całości zbudowane są z laminatów konstrukcyjnych. Kompozyty znalazły także zastosowanie w lotnictwie wojskowym, znacząco zmniejszając masę konstrukcji. Dzięki właściwościom balistycznym są one wykorzystywane w różnego rodzaju osłonach, zwiększając bezpieczeństwo załogi. Wszelkie szacunki wskazują, że zastosowanie kompozytów w lotnictwie zarówno cywilnym, jak i wojskowym będzie wzrastało.

Przedmiotem badań w tej publikacji są materiały kompozytowe stosowane w cywilnych i wojskowych konstrukcjach lotniczych. Celem pracy jest przedstawienie i analiza materiałów kompozytowych, metod ich wytwarzania oraz aplikacji w cywilnych i wojskowych strukturach lotniczych.

## Charakterystyka lotniczych materiałów kompozytowych

W literaturze przedmiotu trudno jest znaleźć spójną i jednoznaczną definicję kompozytu (materiału kompozytowego) z uwagi na fakt, że terminologia związana z tworzywami kompozytowymi pochodzi z różnych obszarów nauki i techniki, takich jak: polimery, metaloznawstwo, ceramika, inżynieria materiałowa i inne<sup>1</sup>. Od wielu lat funkcjonuje tzw. czteroczłonowa definicja kompozytu, zaproponowana przez L.J. Brautmana, R.H. Krocka w 1967 roku, która przedstawia go poprzez następujące cechy<sup>2</sup>:

1 K.N. Braszczyńska-Malik, Z. Pędzich, K. Pietrzak, Z. Roślaniec, T. Sterzyński, M. Szweycer, *Problemy terminologii w kompozytach i wyrobach kompozytowych*, „Kompozyty (Composites)” 2005, nr 5(1), s. 19–24.

2 L.J. Brautman, R.H. Krock, *Composite materials*, Academic Press, New York 1975.



- jest wytworzony przez człowieka,
- musi składać się z co najmniej dwóch różnych (pod względem chemicznym) materiałów z wyraźnie zaznaczonymi granicami rozdziału między komponentami,
- komponenty kompozytu tworzą go przez udział w całej jego objętości,
- kompozyt powinien mieć właściwości różne od jego poszczególnych komponentów.

Zgodnie z przytoczoną definicją kompozyt jest materiałem złożonym z komponentów (składników). Jako jego podstawowe składniki przyjmuje się osnowę i wzmocnienie<sup>3</sup>. Osnowa (inaczej: matryca, wątek) jest ciągłym składnikiem struktury kompozytu, w którym rozmieszcza się elementy wzmocnienia. Stanowi ją jednolity materiał wypełniający przestrzeń między elementami wzmacniającymi, jednocześnie stanowiący dla nich spoinę. Jej dodatkową rolą jest ochrona materiału wzmacniającego przed czynnikami zewnętrznymi, przenoszenie na niego naprężeń zewnętrznych i nadawanieżądanego kształtu wytworzonej części. Stanowi ona zazwyczaj 10–80% objętości kompozytu. Przykładem osnowy do zastosowań lotniczych jest żywica epoksydowa – epidian 53, stosowana wraz z utwardzaczem Z-1 w stosunku 10:1. Drugim z podstawowych składników kompozytu jest jego wzmocnienie, określane w literaturze zamiennie jako: zbrojenie (obecnie określenie to jest niezalecane<sup>4</sup>), napełniacz czy faza rozproszona. Jest ono elementem odpowiadającym za przenoszenie obciążenia i ukształtowanie pozostałych jego właściwości<sup>5</sup>. Oba te podstawowe elementy budowy kompozytów stanowią także kryterium klasyfikacji tych materiałów. Wzmocnienie jest jednym z kryteriów klasyfikacji materiałów kompozytowych.

W odniesieniu do pierwszego kryterium – rodzaju osnowy, materiały kompozytowe dzielimy zasadniczo na metaliczne i niemetaliczne. Kompozyty metaliczne (*Metal Matrix Composite* – MMC) to takie, w których budowie

3 M.F. Ashby, D.R.H. Jones, S. Wojciechowski, *Materiały inżynierskie*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.

4 A. Boczkowska, G. Krześciński, *Kompozyty i techniki ich wytwarzania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016, s. 14.

5 R. Bielawski, W. Rządkowski, S. Augustyn, P. Pyrzanowski, *Nowoczesne materiały stosowane w konstrukcjach lotniczych. Wybrane problemy oraz kierunki rozwoju*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika” 2015, RUTMech, t. XXXII, zeszyt 87, nr 3, s. 203–216.

rozdziela się wyraźny udział metalu<sup>6</sup> stanowiącego jego osnowę. Do najczęściej stosowanych zalicza się takie metale, jak: wolfram, kobalt, nikiel, żelazo. W procesie formowania kompozytu występują one zazwyczaj w formie sproszkowanej<sup>7</sup>. Kompozyty o osnowie niemetalicznej dzielimy na: polimerowe (*Polymer Matrix Composites* – PMC) oraz ceramiczne (*Ceramic Matrix Composites* – CMC) – stanowi je grupa materiałów o kruchej osnowie ceramicznej o wymiarach mikro- i nanometrycznych<sup>8</sup>.

Przyjmując kryterium rodzaju i postaci wzmocnienia, wyróżniamy kompozyty wzmocnione: cząstkami (ceramicznymi lub metalicznymi o średnicy 0,01–0,1 μm i udziale objętościowym w kompozycie wynoszącym około 15%) oraz włóknem. W kompozytach wzmocnionych włóknem wzmocnienie ma postać włókien, natomiast osnowa służy jako ich spoiwo. W zależności od długości włókien możemy wyróżnić włókna: krótkie (do około 0,3 mm), długie (0,3–20 mm) i ciągłe (długość włókna dużo większa od średnicy włókna)<sup>9</sup>. Włókna w tego typu kompozytach mogą być zorientowane, czyli posiadać jeden kierunek ich rozmieszczenia, lub niezorientowane (zazwyczaj w postaci włókien nieciągłych) o losowym kierunku ich ułożenia w kompozycie. Trzecia kategoria kompozytów włóknistych określa ich podział, uwzględniając materiał, z jakiego są zbudowane. W konstrukcjach lotniczych są to najczęściej włókna: szklane (*Glass* – G), węglowe (*Carbon* – C) czy aramidowe (*Aramid* – A).

Kompozyty polimerowe wzmocniane włóknami w literaturze anglojęzycznej określamy jako – FRP (*Fiber Reinforced Polymer/Plastics*), a do identyfikacji materiału włókna, z którego są wykonane, stosuje się ich nazwy skrótowe, pochodzące od akronimów. Zatem kompozyty o osnowie polimerowej wzmocniane włóknami szklanymi oznaczane są akronimem – GFRP (*Glass Fibre Reinforced Plastics*). Kompozyty polimerowe na bazie kwarcu (odmiana włókien szklanych) oznaczają się jako – QFRP (*Quartz Fiber Reinforced*

6 G. Rzyzińska, *Zjawisko pęknięcia w procesie wyciskania metalowych kompozytów warstwowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.

7 F. Li, Z. Gao, L. Li, Y. Chen, *Microstructural study of MMC layers produced by combining wire and coaxial WC powder feeding in laser direct metal deposition*, „Optics & Laser Technology” 2016, nr 3(77), s. 134–143.

8 U. Santhosh, J. Ahmad, G. Ojard, R. Miller, Y. Gawayed, *Deformation and damage modeling of ceramic matrix composites under multiaxial stresses*, „Composites Part B: Engineering” 2016, nr 4/1(90), s. 97–106.

9 K.N. Braszczyńska-Malik, Z. Pędzich, K. Pietrzak, Z. Rosłaniec, T. Sterzyński, M. Szweycer, *Problemy terminologii w kompozytach...*, op. cit., s. 19–24.

*Plastic*). Kompozyty PMC wzmocnione włóknami węglowymi lub aramidowymi oznaczamy odpowiednio – CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Plastics*) i AFRP (*Aramid Fibre Reinforced Plastics*).

W ostatnich latach w lotnictwie zauważalna jest tendencja do poszukiwania materiałów kompozytowych o coraz lepszych własnościach mechanicznych. Fakt, że własności mechaniczne kompozytów wzrastają proporcjonalnie do odwrotności wymiaru poprzecznego ich wzmocnienia, był asumptem do stworzenia i rozwijania nanokompozytów. Określa się nimi grupę materiałów składających się z dwóch faz o wyraźnych powierzchniach rozdziału, w których przynajmniej jeden składnik rozproszony charakteryzuje się wymiarem w skali nanometrycznej ( $10^{-9}$  m)<sup>10</sup>. We współczesnej technice lotniczej bardzo rozpowszechnione są nanokompozyty liniowe w postaci nanowłókien (*Carbon Nanofibers* – CNF) i nanorurek węglowych (*Carbon Nanotubes* – CNT), stanowiących najczęściej whiskersy – pojedyncze krystaliczne i amorficzne cząstki w kształcie igieł<sup>11</sup>. Po pierwsze wypełniacze te znacząco wzmocniają mechanicznie i usztywniają strukturę kompozytu lotniczego. Po drugie stanowią elementy mostkujące w przypadku występowania pęknięć, które mają w kompozytach zazwyczaj tendencje propagujące i przez to niebezpieczne. Po trzecie przewodzą prąd, dzięki czemu możliwe jest stosowanie metod monitorowania stanu struktury – SHM (*Structure Health Monitoring*).

Kompozyty konstrukcyjne w strukturach lotniczych występują zazwyczaj w dwóch formach. Pierwsza z nich to laminaty, natomiast druga to kompozyty warstwowe, zwane przekładkowymi lub kanapkowymi, a w literaturze anglojęzycznej – typu *sandwich*<sup>12</sup>. W ostatnich latach w konstrukcjach lotniczych zauważalna jest także tendencja do stosowania kompozytów hybrydowych – metalowo-kompozytowych. Nazywamy nimi taki rodzaj materiałów, w których poszczególne laminy zbudowane są z różnych materiałów konstrukcyjnych. W technice lotniczej stanowią je najczęściej laminaty zbudowane z łączonych adhezyjnie cienkich warstw blach metalowych z kompozytem polimerowym wzmocnianym włóknami: szklanymi, węglowymi lub

**10** W. Królikowski, *Polimerowe kompozyty konstrukcyjne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012, s. 290.

**11** J. Łopacka, *Nanocząstki wykorzystywane w celu poprawy właściwości fizycznych kompozytów polimerowych*, „Polimery” 2013, nr 11/12(58), s. 864–868.

**12** H.G. Allen, *Analysis and design of structural sandwich panels*, Pergamon Press, London 1969.

aramidowymi<sup>13</sup>. W literaturze anglojęzycznej materiały te określane są jako FML/s (*Fibre Metal Laminat/s*).

Jednym z hybrydowych kompozytów aluminiowych jest GLARE (*Glass-Reinforced Aluminum Laminates*). Stanowi on rozwiązanie złożone z 2–6 warstw aluminium o grubości od 0,2 do 0,5 mm. Pomiędzy skrajnymi warstwami aluminium usytuowane są przemiennie warstwy włókien i metalu. Innym tego typu rozwiązaniami są CARALL (*Carbon Reinforced Aluminum Laminates*) i ARALL (*Aramid Aluminium Laminate*), w których zastosowano kolejno włókno węglowe oraz aramidowe.

## Metody wytwarzania kompozytów lotniczych

Proces wytwarzania kompozytów i wyrobów kompozytowych (**laminowanie**) jest prowadzony z zastosowaniem różnych metod. Zależą one głównie od rodzaju osnowy (polimery: termoutwardzalne lub termoplastyczne) z uwagi na istotne różnice we właściwościach stosowanych polimerów.

Jednym z decydujących determinantów wyboru metody wytwarzania wyrobów kompozytowych aplikowanych do współczesnych konstrukcji lotniczych jest uzyskanie wysokiego masowego stopnia wzmocnienia (*Fiber Mass Fraction*). Definiowany jest on jako stosunek masy włókna do całkowitej masy laminatu. Parametr ten decyduje o właściwościach gotowego wyrobu i wzrasta proporcjonalnie do jego wytrzymałości.

We współczesnej technice lotniczej wykorzystuje się kilka metod wytwarzania materiałów kompozytowych. Zazwyczaj elementy do budowy niewielkich rozmiarów statków powietrznych (np. bezzałogowych statków powietrznych – BSP), o niewielkiej powtarzalności, z uwagi na nieduże nakłady finansowe wytwarza się takimi metodami, jak metoda ręczna (kontaktowa) oraz jej rozwinięcie – metoda z użyciem elastycznego worka próżniowego. W przemyśle lotniczym do wytwarzania wielkogabarytowych elementów kompozytowych – z uwagi na potrzebę uzyskania wysokiego masowego stopnia wzmocnienia – wykorzystuje się dwie metody: z użyciem autoklawu oraz metodę infuzji. W tabeli 1 przedstawiono wartości masowego stopnia wzmocnienia w zależności od zastosowanej metody wytwarzania lotniczych materiałów kompozytowych.

13 J. Godzimirski, A. Pietras, *Numeryczna analiza wytrzymałości hybrydowych kompozytów warstwowych*, „Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej” 2012, vol. LXI, nr 3, s. 129–146.

*Tabela 1. Wartości masowego stopnia wzmocnienia wyrobów kompozytowych uzyskanego w typowych lotniczych metodach wytwarzania laminatów*

Metoda wytwarzania	Udział masowy wzmocnienia (%)
Laminowanie ręczne	30–40
Laminowanie z zastosowaniem worka próżniowego	40–50
Laminowane przy użyciu autoklawu	45–62
Metoda infuzji	do 90

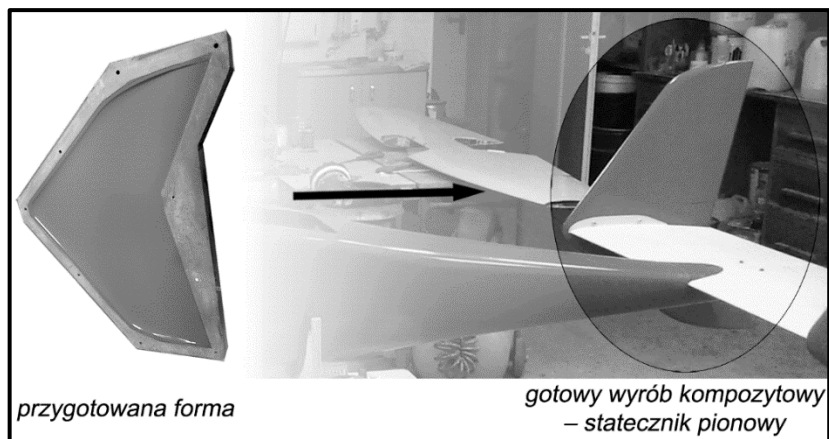
Źródło: opracowanie własne na podstawie: M. Makuliński, *Comparing the technique of the infusion and the vacuum sack in practice* [w:] *Polimery i kompozyty konstrukcyjne*, red. G. Wróbel, Wyd. Logos Press, Cieszyn 2010, s. 461–466.

**Laminowanie ręczne**, zwane także metodą kontaktową (*hand lay-up*), jest najstarszym i nadal powszechnie stosowanym sposobem wytwarzania wyrobów kompozytowych<sup>14</sup>. Jest procesem otwartym, realizowanym w pokojowej temperaturze otoczenia. Polega na ręcznym nanoszeniu żywicy i przesycaniu nią układanych kolejno warstw laminatu. Nanoszenie żywicy odbywa się za pomocą wałków i pędzli malarskich. W celu usunięcia powietrza i zagęszczenia warstw używa się metalowych ryflowanych wałków. Pierwszym etapem laminowania przy użyciu metody kontaktowej jest budowa modelu (rys. 11), następnie przygotowanie go za pomocą oszlifowania jego powierzchni, polakierowania jej oraz naniesienie na model warstwy podziałowej (rozdzielającej/rozdzielczej), najczęściej stworzonej z wosku z dodatkiem silikonu.

Kolejnym krokiem w procesie budowy wyrobu kompozytowego metodą laminowania ręcznego jest naniesienie cienkiej warstwy (do 0,3 mm) pigmentowej wykonanej z żywicy, zwanej od jej angielskiej nazwy – żelkotem (*gel coat*). Stanowi ona element ochronno-dekoracyjny wyrobu kompozytowego. W dalszym etapie wytwarzania następuje laminowanie kolejnych warstw laminatu z użyciem mat, tkanin lub innego wzmocnienia. Po ostatniej laminie wyrób często pokrywa się cienką warstwą żywicy (*top coat*) zapobiegającej parowaniu styrenu oraz utlenianiu, polepszając w ten sposób właściwości kompozytu. Innymi stosowanymi metodami przy laminowaniu ostatniej warstwy jest wykorzystywanie specjalnych dodatków chemicznych, takich jak np. antivol. Kolejne etapy wytwarzania laminatu to jego: utwardzenie, obróbka (np. docięcie, szlifowanie, wiercenie) oraz wykończenie wyrobu. Gotowy produkt, w celu uzyskania

<sup>14</sup> C. Atas, Y. Akgun, O. Dagdelen, B.M. Icten, M. Sarikanat, *An experimental investigation on the low velocity impact response of composite plates repaired by VARIM and hand lay-up processes*, „Composite Structures” 2011, nr 2/93(3), s. 1178–1186.

wysokiego stopnia utwardzenia żywicy oraz osiągnięcia wysokich właściwości mechanicznych laminatu, poddaje się procesowi wygrzewania w podwyższonej temperaturze, w czasie najczęściej od kilku do kilkunastu godzin.



Opracowanie własne.

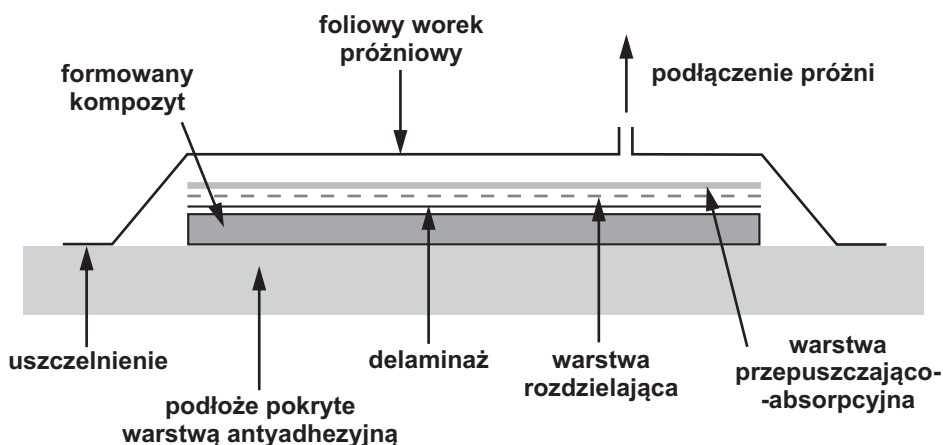
*Rys. 11. Budowa statecznika pionowego bezzałogowego statku powietrznego z elementów kompozytowych laminowanych ręcznie (model statecznika pionowego – lewa strona; gotowy statecznik pionowy zamocowany do konstrukcji płatowca BSP – prawa strona)*

Laminowanie ręczne najczęściej stosuje się do średnich i dużych konstrukcji w małych seriach produkcyjnych (od kilku do kilkuset sztuk). Ten rodzaj wytwarzania wyrobów kompozytowych charakteryzuje się niskimi kosztami produkcji, natomiast do mankamentów możemy zaliczyć niedoskonałość wyrobu wynikającą ze stopnia staranności jej wykonania.

**Laminowanie z zastosowaniem elastycznego worka** (*vacuum bagging*) jest rozwinięciem metody laminowania ręcznego. Jej celem jest zwiększenie współczynnika wzmocnienia laminatu, a co za tym idzie – właściwości mechanicznych wyrobu poprzez odprowadzenie nadmiaru żywicy. Poza tym zamknięta powierzchnia ogranicza dopływ tlenu z powietrza inhibitującego utwardzanie wyrobu oraz umożliwia ograniczanie odparowywania styrenu, co pozwala uzyskać niską lepkość oraz właściwe utwardzenie kompozytu.

Metoda laminowania z zastosowaniem elastycznego worka polega na sformowaniu wyrobu metodą kontaktową, a następnie nałożeniu na niego elastycznego worka (folii perforowanej) oraz uszczelnieniu jego brzegów (np. za pomocą zacisków, taśmy). Do worka dołącza się króciec, przez który za

pomocą pompy próżniowej odsysane jest powietrze oraz nadmiar żywicy, zatrzymywany następnie przez warstwę absorpcyjną. Schemat układu do formowania kompozytu metodą worka próżniowego przedstawiono na rysunku 12.



Opracowanie własne.

Rys. 12. Schemat układu do formowania laminatów przy użyciu elastycznego worka

Warstwy absorpcyjne tworzą materiały warstwowe o charakterze igłowanej włókniny lub filcu. Wykonane są z cienkich włókien poliestrowych, polipropylenowych lub polietylenowych o gramaturze 150–350 g/m<sup>2</sup> oraz grubości w przedziale 1–5 mm z możliwością pracy w zakresie temperatur 100–200°C. Pełnią one dwie zasadnicze funkcje. Pierwszą z nich jest równomierne rozłożenie ciśnienia, natomiast drugą odsączenie od laminatu, pochłonięcie i zatrzymanie w swojej strukturze nadmiaru żywicy.

W metodzie z zastosowaniem elastycznego worka poza warstwą absorpcyjną opcjonalnie stosuje się także dwa dodatkowe rodzaje warstw. Pierwszą z nich jest odrywana po laminowaniu warstwa tkaniny delaminażowej (*peel ply*), której zadaniem jest zapewnienie czystości, równości oraz wysokiej adhezji rozwiniętej powierzchni w celach dalszej obróbki laminatu (np. malowanie, klejenie, laminowanie). Stanowią ją materiały wytworzone z poliamidów lub poliestrów w postaci cienkich tkanin o gramaturze wynoszącej zazwyczaj około 80 g/m<sup>2</sup>. Drugą z dodatkowych warstw stanowi antyadhezyjna folia rozdzielająca (*release film*), której zadaniem jest zapobieganie przywarciu laminatu do różnych powierzchni. Warstwę tę tworzą perforowane i nieperforowane folie polipropylenowe o grubości około 0,025 mm z możliwością pracy do temperatury 100°C.

W nowszych rozwinięciach metody formowania wyrobów kompozytowych przy użyciu worka próżniowego stosuje się osnowę z żywicy epoksydowej w stanie stałym w formie folii. Jest ona układana na przemian ze wzmocnieniem. W następnej fazie na przygotowany do laminowania zestaw nakładany jest worek, w którym wytwarza się próżnię, oraz ogrzewa się go. Żywica ulega stopnieniu, przesyca wzmocnienie i ulega utwardzeniu. Taki rodzaj laminowania zwiększa czystość produktu, wydajność procesu oraz ogranicza problemy związane z dużą lepkością żywicy podczas rozprowadzania jej w sposób tradycyjny (za pomocą wałków i pędzli malarskich).

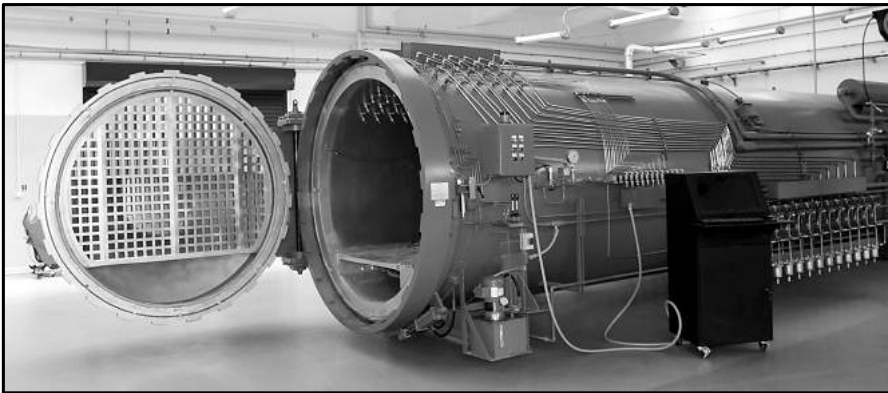
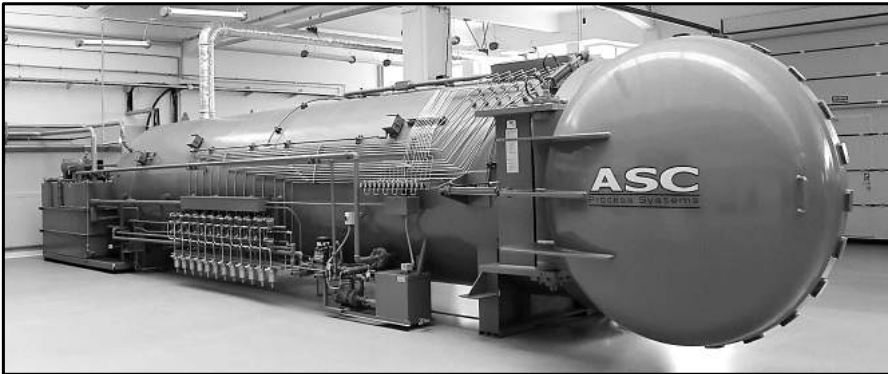
**Formowanie kompozytów z zastosowaniem autokławu** (*autoclave molding*) jest dalszym rozwinięciem metody z zastosowaniem elastycznego worka. Proces ten, pomimo że jest kosztowny, uważany jest obecnie za jeden najlepszych pod względem jakości oraz uzyskiwania wysokich wskaźników wytrzymałościowych otrzymanego wyrobu, co jest głównym determinantem wykorzystywania metody w zastosowaniach lotniczych<sup>15</sup>. Najczęstszymi wyrobami uzyskiwanymi tego typu metodą są kompozyty włókniste wzmocniane włóknami szklanymi, węglowymi i aramidowymi oraz kompozyty metaliczne i hybrydowe.

Autokław (fot. 4) stanowi rodzaj ciśnieniowego zbiornika wykonanego ze stali o średnicy od 1,5 do kilku metrów i długości 5–10 m, wyposażonego w systemy: próżniowe, ciśnieniowe, grzewcze, chłodzące, kontrolery próżni i temperatury oraz układ sterowania urządzeniem. Atmosferę wewnątrz autokławu stanowi zazwyczaj azot, powietrze lub dwutlenek węgla, którego ciśnienie podczas procesu wynosi 0,1–2 MPa, natomiast temperatura do 250°C.

Formowanie laminatów z zastosowaniem autokławu polega na sformowaniu kompozytu metodą worka próżniowego i wstawieniu takiego zestawu do ogrzanego autokławu (rys. 13), gdzie wytwarza się ciśnienie, pod wpływem którego następuje formowanie produktu.

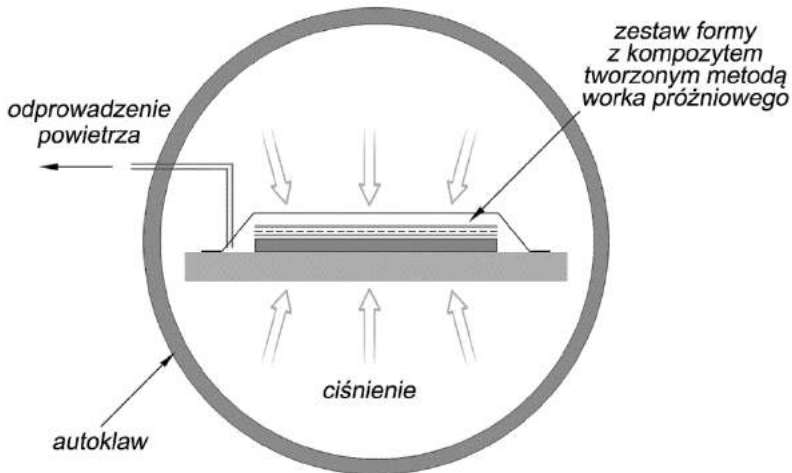
<sup>15</sup> T. Uchida, H. Hamada, K. Kuroda, A. Endo, M. Migaki, J. Ochiai, *Process analysis of the hand lay-up method using CFRP prepreg sheets* [w:] *Digital Human Modeling. Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk, Management: Ergonomics and Health: 6th International Conference*, red. G.V. Duffy, Springer International Publishing, Cham 2015, s. 227–236.





Źródło: materiały promocyjne Wojskowych Zakładów Lotniczych nr 1 w Łodzi, online – <http://www.wzl1.mil.pl/oferta/uslugi/kompozyty> [dostęp: 01.05.2017].

*Fot. 4. Autoklaw do wytwarzania lotniczych wyrobów kompozytowych*



Opracowanie własne.

*Rys. 13. Schemat formowania wyrobów kompozytowych przy użyciu autoklawu*

Proces utwardzania laminatu w metodzie autoklawowej zazwyczaj odbywa się w dwóch typowych etapach<sup>16</sup>. W pierwszej fazie obniża się ciśnienie, uzyskując podciśnienie o wartości około -0,1 MPa, oraz nagrzewa się otoczenie wewnątrz autoklawu do temperatury około 80°C w stosunkowo krótkim czasie. Kolejny, drugi etap formowania polega na podwyższeniu ciśnienia (dla struktur monolitycznych – 0,4–0,7 MPa, dla konstrukcji przekładkowych – 0,2 MPa) oraz temperatury do wartości około 180°C i wygrzewaniu kompozytu przez około 2 godziny. Etap końcowy procesu to obniżanie temperatury (z prędkością porównywalną w pierwszym etapie), wyrównanie ciśnienia do normalnego, zamknięcie próżni oraz wyłączenie autoklawu. Podczas całego procesu bardzo ważnymi jego parametrami są prędkości nagrzewania oraz chłodzenia. Zbyt szybkie nagrzewanie może prowadzić do powstania niepożądanego poziomu naprężeń cieplnych w materiale, natomiast za szybkie chłodzenie ogranicza możliwość relaksacji naprężeń pierwotnych i cieplnych oraz może powodować odkształcenia materiału w postaci pofalowania i zniekształcenia wyrobu.

Kolejną metodą wytwarzania wyrobów kompozytowych jest **metoda infuzji** (*vacuum infusion*). Początki laminowania przy jej użyciu datuje się na lata 70. XX wieku, a pierwsze zastosowania tej metody znalazły zapotrzebowanie w produkcji kompozytów na potrzeby lotnictwa wojskowego. Metoda infuzji polega na układaniu suchego wzmocnienia do formy z wcześniej nałożonym żelkotem, ułożeniu tkaniny delaminacyjnej oraz siatki usprawniającej płynięcie żywicy, szczelnym zamknięciu formy workiem próżniowym, a następnie wytworzeniu podciśnienia i zassaniu żywicy. Powoduje to równomierne przesączenie nią wzmocnienia.

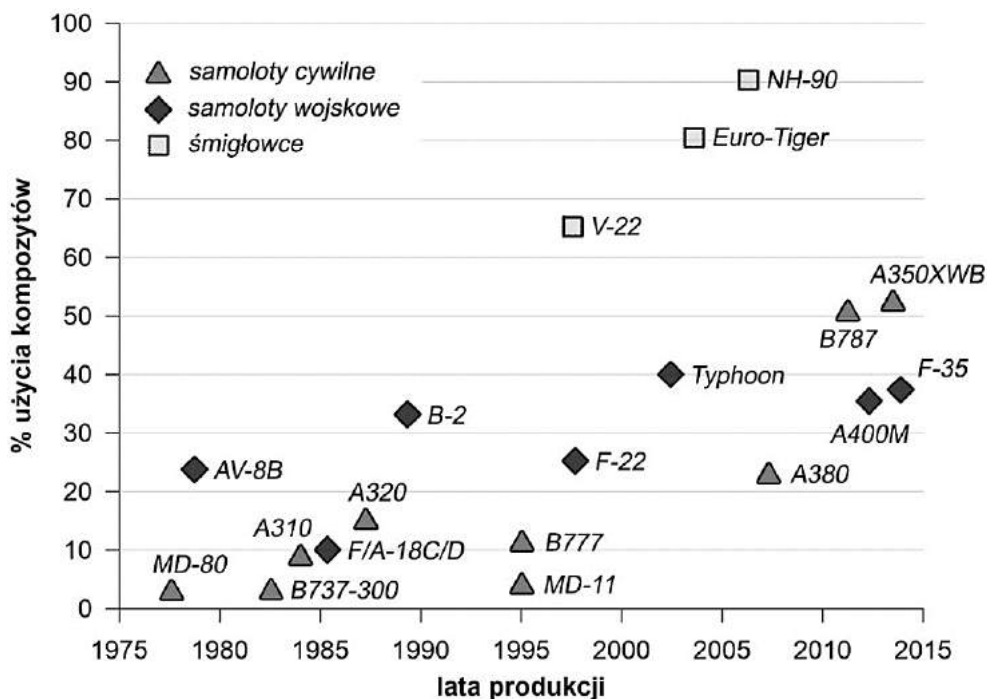
Metoda infuzji pozwala na uzyskanie stosunkowo wysokiego udziału masy wzmocnienia, a przez to wysokich parametrów wytrzymałościowych. Kolejną zaletą jest wytwarzanie wysokogabarytowych elementów, szczególnie dla lotnictwa komunikacyjnego, np. w produkcji elementów konstrukcji samolotów szerokokadłubowych. Infuzja jest procesem dającym się zautomatyzować, dzięki czemu możliwe jest obniżenie kosztów produkcji. Następną zaletą jest możliwość wzmocnienia wytwarzanych elementów poprzez zespolenie części z żebrami, spornikami, usztywnieniami, które można wykonać w jednym procesie produkcyjnym. Pomimo wielu zalet metoda infuzji

16 J. Ye, B. Zhang, H. Qi, *Cost estimates to guide manufacturing of composite waved beam*, „Mater Des” 2009, nr 3/30(3), s. 452–458.

posiada także wady, z których za największą uważa się wysoki koszt materiałów (używa się zazwyczaj dedykowanych wzmocnień oraz żywic) oraz samej produkcji.

## Zastosowanie kompozytów w cywilnych i wojskowych strukturach lotniczych

W ostatnich latach obserwuje się tendencję wzrostową w wykorzystaniu materiałów kompozytowych do budowy płatowców statków powietrznych (rys. 14).



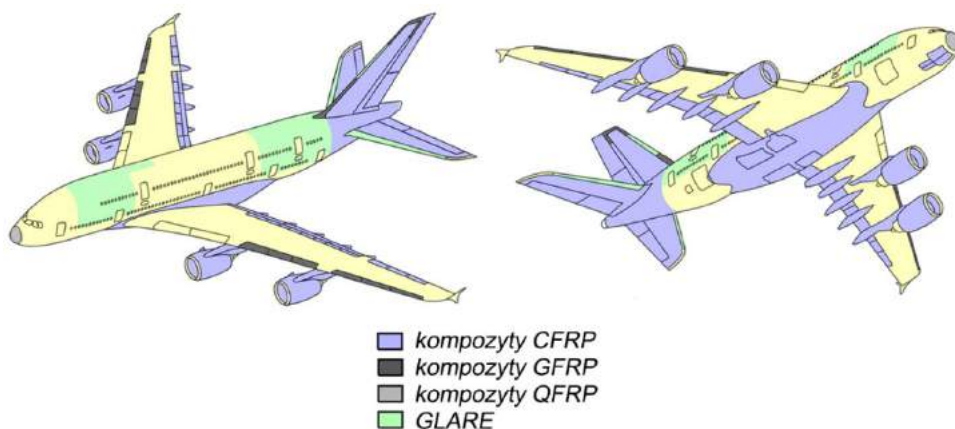
Źródło: opracowanie własne na podstawie: R. Benton Heslehurst, *Defects and damage in composite materials and structures*, CRC Press, Boca Raton 2014.

Rys. 14. Masowy udział materiałów kompozytowych w budowie płatowców statków powietrznych w ostatnich latach

Obecnie z kompozytów wytwarza się całe struktury nośne szybowców, motoszybowców, samolotów podkategorii bardzo lekkich oraz bezzałogowych statków powietrznych. Ponadto z ich udziałem powstają elementy do budowy samolotów pasażerskich, takie jak: stateczniki pionowe i poziome,

elementy konstrukcji skrzydła oraz jego poszycia, kadłuby, osłony anten oraz inne. W wiatrakowcach kompozyty stosuje się do produkcji łopat, wirników oraz ich kadłubów. Poza tym uczestniczą one w elementach budowy zespołów napędowych statków powietrznych, takich jak łopaty silników, śmigła ogonowe oraz wentylatory<sup>17</sup>. W konstrukcjach lotniczych stosuje się najczęściej kompozyty włókniste wzmocnione włóknem szklanym, węglowym oraz aramidowym, a także kompozyty hybrydowe (włóknisto-metalowe) oraz laminaty o osnowie metalowej i ceramicznej. W kontekście budowy statków powietrznych stawia się im wysokie wymagania nie tylko mechaniczne<sup>18</sup>, lecz również termiczne, determinowane dużymi prędkościami poruszania się, a w odniesieniu do wojskowych statków powietrznych często balistyczne, w literaturze przedmiotu określone jako wysoka odporność udarowa kompozytu<sup>19</sup>.

Jednym z obszarów masowego wykorzystywania materiałów kompozytowych jest produkcja samolotów dla **lotnictwa cywilnego**. Największy samolot pasażerski świata – Airbus A380, stanowi przykład takiej konstrukcji (rys. 15).



Źródło: opracowanie własne na podstawie: *A380 – aircraft characteristics airport and maintenance planning*, Airbus S.A.S., Blagnac 2015, s. 340.

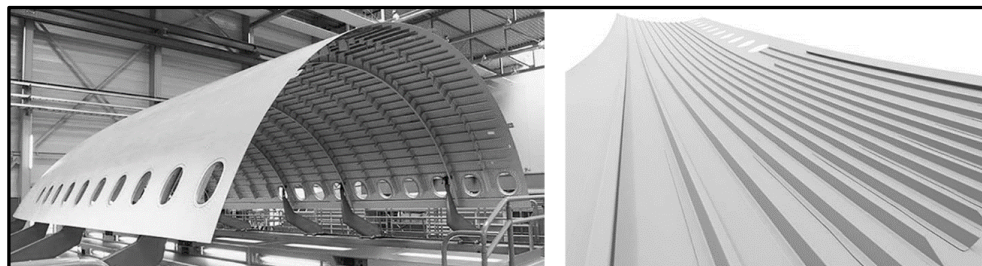
Rys. 15. Udział materiałów kompozytowych w konstrukcji samolotu pasażerskiego Airbus A380

<sup>17</sup> D. Gay, *Composite materials: Design and applications*, CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton 2015.

<sup>18</sup> B. Surowska, *Materiały funkcjonalne i złożone w transporcie lotniczym*, „Eksplatacja i Niezawodność” 2008, 3, s. 30–40.

<sup>19</sup> P. Jakubczak, J. Bieniaś, K. Dragan, *Odporność kompozytów epoksydowo-węglowych na uderzenia udarowe przy niskich prędkościach*, „Przetwórstwo Tworzyw” 2012, nr 3 (maj/czerwiec), s. 205–209.

Około 22% struktury płatowca samolotu (w stosunku masowym) wykonano z różnych kompozytów włóknistych z osnową z żywicy epoksydowej. Głównym powodem takiego rozwiązania była wysoka sztywność włókien (935 GPa) w porównaniu do stopów aluminium (70 GPa)<sup>20</sup>. Z kompozytu CFRP wykonano takie główne elementy samolotu, jak: obudowy zespołów napędowych, stateczniki: pionowy i poziomy (z wyłączeniem okolic krawędzi natarcia), klapy oraz część kadłuba w okolicach podwozia. Laminaty GFRP znalazły zastosowanie w budowie slotów oraz części statecznika pionowego. Kompozyt polimerowy wzmocniony włóknami kwarcowymi wykorzystano do zabezpieczenia anteny i urządzeń awionicznych umieszczonych w części dziobowej kadłuba. Poza tymi laminatami wykorzystano także kompozyt typu GLARE (3% masy samolotu), z którego wykonano części kadłuba umieszczone powyżej jego osi bezpośrednio przed i za skrzydłem (fot. 5) oraz okolice krawędzi natarcia stateczników (poziomych i pionowego).



Źródło: *Along the bond line. Groundbreaking aircraft structures*, Fokker Aerostructures Inc., Mukilteo 2015.

*Fot. 5. Części kadłuba samolotu pasażerskiego Airbus A380 wykonane z kompozytu hybrydowego GLARE*

Kolejnym przykładem szerokiego zastosowania materiałów kompozytowych w konstrukcji lotniczej jest Boeing 787 Dreamliner. Udział masowy laminatów w jego płatowcu wynosi około 50%, natomiast udział objętościowy – 80%<sup>21</sup>. W większości stanowią je kompozyty wzmocnione włóknem węglowym oraz szklanym, a także konstrukcje przekładkowe. Z kompozytów CFRP wykonano kadłub stanowiący powłokę ciśnieniową oraz poszycie skrzydeł. Konstruk-

<sup>20</sup> J. Merkisz, M. Bajerlein, *Materiały kompozytowe stosowane we współczesnych statkach powietrznych*, „Logistyka” 2011, nr 6, s. 2829–2837.

<sup>21</sup> J. Milan, *Advanced transport systems. Analysis, modeling, and evaluation of performances*, Springer, London 2014.

cje przekładkowe z zastosowaniem kompozytów polimerowych wzmocnione włóknami węglowymi zostały zastosowane w takich elementach samolotu, jak obudowy zespołów napędowych, winglety, części poszycia skrzydeł oraz sterów kierunku i wysokości. Laminaty GFRP wykorzystano w elementach poszycia w okolicach łączenia skrzydeł z kadłubem samolotu. Zastosowanie materiałów kompozytowych w samolocie Boeing 787 Dreamliner przyczyniło się do około 20% redukcji jego masy<sup>22</sup> (w stosunku do podzespołów wykonanych ze stopów aluminium), oszczędności paliwa oraz zmniejszenia emisji hałasu.

Materiały kompozytowe wykorzystywane są powszechnie w budowie współczesnych konstrukcji **lotnictwa wojskowego**. W samolocie Lockheed Martin F-35 Lightning II zastosowano laminaty CFRP w wielu elementach (w tym także nośnych) jego konstrukcji, takich jak: kadłub, stateczniki pionowy i poziomy, kłapy czy poszycie skrzydeł. Stanowią one około 40% jego masy. Jednym z powodów zastosowania kompozytów włóknistych w konstrukcji samolotu F-35 jest jego niska wykrywalność przez stacje radiolokacyjne dzięki łączeniu ich z bardzo małymi tolerancjami wynoszącymi około 0,2 mm.

Kolejnym przykładem zastosowania kompozytów jest amerykański śmigłowiec bojowy Boeing AH-64 Apache (fot. 6).



Źródło: R. Bielawski, *Konstrukcje lotnictwa wojskowego*, „Materiały Kompozytowe” 2014, nr 4, s. 12.

*Fot. 6. Jeden z etapów budowy kadłuba śmigłowca Boeing AH-64 wraz z elementami wykonanymi z kompozytu AFRP*

<sup>22</sup> T. Hamaide, R. Deterre, J. Feller, *Environmental impact of polymers*, ISTE Ltd. and John Wiley & Sons, London 2014.

Z laminatów AFRP wykonano m.in. łopaty wirnika głównego i ogonowego<sup>23</sup>. Osobliwym rozwiązaniem jest tutaj tzw. kevlarowa wanna. Osadzone są w niej fotele dla załogi. Taka budowa zapewnia jej ochronę balistyczną przed ostrzałem z broni lufowej o kalibrze do 23 mm. Powodem zastosowania kompozytów wytworzonych z włókna aramidowego w budowie śmigłowca Boeing AH-64 Apache była wysoka wytrzymałość mechaniczno-termiczna, stabilność wymiarowa, niepalność oraz odporność na uderzenia.

W ostatnich latach oprócz kompozytów włóknistych w budowie wojskowych statków powietrznych obserwuje się duże zainteresowanie laminatami FML. Badania wykonane na skrzydle samolotu S-11 oraz F-27 potwierdziły jego podwyższone właściwości mechaniczne, co przyczyniło się do prowadzenia dalszych testów. W materiałach GLARE zaobserwowano efekt trzykrotnie wolniejszej propagacji pęknięć<sup>24</sup>. Poza tym podczas prowadzenia testów balistycznych, polegających na przestrzeleniu go pociskami kalibru 16,5 mm z prędkością 171 m/s, zaobserwowano jedynie lokalne zniszczenie w miejscu uderzenia pocisku oraz w niewielkiej jego okolicy<sup>25</sup>. Wadami materiałów FML są stosunkowo mała wytrzymałość adhezyjna i kohezyjna związane z klejeniem poszczególnych warstw kompozytu, co ogranicza zastosowanie ich w wojskowych statkach powietrznych.

Kompozyty o osnowie metalowej stanowią grupę laminatów, wokół których istnieje obecnie duże zainteresowanie w kontekście budowy wojskowych statków powietrznych. Stosowanie ich w konstrukcjach lotniczych wymaga uwzględnienia wymogu obniżonej gęstości, co w zasadzie oznacza zastosowanie osnowy z metali lekkich, takich jak: glin, magnez, tytan czy beryl. Przykładem zastosowania kompozytów o osnowie metalowej jest samolot bojowy Lockheed Martin F-22 Raptor. W jego strukturze wykorzystano m.in. kompozyty na bazie stopów aluminium i tytanu<sup>26</sup>, które zastosowano w konstrukcji

23 C. Kessler, *Active rotor control for helicopters: Individual blade control and swashplate-less rotor designs*, „CEAS Aeronautical Journal” 2011, nr 1(1), s. 23–54.

24 A. Vlot, *The birth of arall [w:] Glare: history of the development of a new aircraft material*, Springer Netherlands, Dordrecht 2001, s. 17–50.

25 A. Seyed Yaghoubi, B. Liaw, *Thickness influence on ballistic impact behaviors of GLARE 5 fiber-metal laminated beams: Experimental and numerical studies*, „Composite Structures” 2012, nr 7/94(8), s. 2585–2598.

26 C. Gilmore, *Materials science and engineering properties*, Cengage Learning, Stamford 2014.

jego poszycia (w tym obramowania szkieletowego) i układu sterowania. Dzięki temu wykonane z nich części zapewniają bezpieczną eksploatację w temperaturze do kilkuset stopni Celsjusza<sup>27</sup>.

## Zakończenie

Współcześnie w przemyśle lotniczym stosuje się różne rodzaje materiałów kompozytowych, z których najbardziej rozpowszechnione są kompozyty wzmocnione włóknem ciągłym oraz kompozyty hybrydowe występujące w formie laminatów i konstrukcji przekładkowych.

Ważną kwestią są metody wytwarzania kompozytów. Pozwalają one na wybór pomiędzy ceną a jakością wyrobu i w dużej mierze decydują o ich aplikacji. Współcześnie stosuje się zazwyczaj cztery metody laminowania. Dwie pierwsze – laminowanie ręczne oraz z użyciem elastycznego próżniowego worka, dotyczą raczej małogabarytowych konstrukcji, często w małych ilościach produkcyjnych, pozwalając na niskie koszty produkcji. W przemyśle lotniczym, w szczególności w lotnictwie komunikacyjnym, stosuje się metody autoklawowe oraz metodę infuzji. Wytwarzane tymi metodami kompozyty charakteryzują się wysokimi właściwościami mechanicznymi oraz wysokim masowym stopniem wzmocnienia. Z drugiej zaś strony wymagają dużych nakładów finansowych.

Cywilne statki powietrzne posiadają inne wymagania materiałowe niż konstrukcje lotnictwa wojskowego. W konstrukcjach cywilnych oczekuje się wysokiej sztywności kompozytów oraz ich niskiej masy. W lotnictwie wojskowym ważne są także właściwości termiczne oraz balistyczne, a przez to ochrona załogi i zachowanie wysokiej przeżywalności podczas eksploatacji takiej konstrukcji, często w ekstremalnych warunkach bojowych. Dlatego też w zależności od przeznaczenia statku powietrznego używa się różnych kompozytów, uzyskanych różnymi metodami ich wytwarzania.

<sup>27</sup> J. Sobczak, S. Wojciechowski, *Współczesne tendencje praktycznego zastosowania kompozytów metalowych*, „Kompozyty (Composites)” 2002, nr 2/3, s. 24–37.



## Bibliografia

- A380 – aircraft characteristics airport and maintenance planning*, Airbus S.A.S., Blagnac 2015.
- Allen H.G., *Analysis and design of structural sandwich panels*, Pergamon Press, London 1969.
- Along the bond line. Groundbreaking aircraft structures*, Fokker Aerostructures Inc., Mukilteo 2015.
- Ashby M.F., Jones D.R.H., Wojciechowski S., *Materiały inżynierskie*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
- Atas C., Akgun Y., Dagdelen O., Icten B.M., Sarikanat M., *An experimental investigation on the low velocity impact response of composite plates repaired by VARIM and hand lay-up processes*, „Composite Structures” 2011, nr 2/93(3).
- Benton Heslehurst R., *Defects and damage in composite materials and structures*, CRC Press, Boca Raton 2014.
- Bielawski R., *Konstrukcje lotnictwa wojskowego*, „Materiały Kompozytowe” 2014, nr 4.
- Bielawski R., Rządowski W., Augustyn S., Pyrzanowski P., *Nowoczesne materiały stosowane w konstrukcjach lotniczych. Wybrane problemy oraz kierunki rozwoju*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika” 2015, RUTMech, t. XXXII, zeszyt 87, nr 3.
- Boczowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witemberg-Perzyk D., Wojciechowski S., *Kompozyty*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- Boczowska A., Krzesiński G., *Kompozyty i techniki ich wytwarzania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016.
- Braszczyńska-Malik K.N., Pędzich Z., Pietrzak K., Roślaniec Z., Sterzyński T., Szweycer M., *Problemy terminologii w kompozytach i wyrobach kompozytowych*, „Kompozyty (Composites)” 2005, nr 5(1).
- Gay D., *Composite materials: Design and applications*, CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton 2015.
- Gilmore C., *Materials science and engineering properties*, Cengage Learning, Stamford 2014.
- Godzimirski J., Pietras A., *Numeryczna analiza wytrzymałości hybrydowych kompozytów warstwowych*, „Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej” 2012, vol. LXI, nr 3.
- Hamaide T., Deterre R., Feller J., *Environmental impact of polymers*, ISTE Ltd. and John Wiley & Sons, London 2014.
- Jakubczak P., Bienias J., Dragan K., *Odporność kompozytów epoksydowo-węglowych na uderzenia udarowe przy niskich prędkościach*, „Przetwórstwo Tworzyw” 2012, nr 3 (maj/czerwiec).
- Kessler C., *Active rotor control for helicopters: Individual blade control and swashplateless rotor designs*, „CEAS Aeronautical Journal” 2011, nr 1(1).
- Królikowski W., *Polimerowe kompozyty konstrukcyjne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- Li F., Gao Z., Li L., Chen Y., *Microstructural study of MMC layers produced by combining wire and coaxial WC powder feeding in laser direct metal deposition*, „Optics & Laser Technology” 2016, nr 3(77).
- Łopacka J., *Nanocząstki wykorzystywane w celu poprawy właściwości fizycznych kompozytów polimerowych*, „Polimery” 2013, nr 11/12(58).
- Makuliński M., *Comparing the technique of the infusion and the vacuum sack in practice* [w:] *Polimery i kompozyty konstrukcyjne*, red. G. Wróbel, Wyd. Logos Press, Cieszyn 2010.
- Merkisz J., Bajerlein M., *Materiały kompozytowe stosowane we współczesnych statkach powietrznych*, „Logistyka” 2011, nr 6.

- Milan J., *Advanced transport systems. Analysis, modeling, and evaluation of performances*, Springer, London 2014.
- Ryzińska G., *Zjawisko pęknięcia w procesie wyciskania metalowych kompozytów warstwowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.
- Santhosh U., Ahmad J., Ojard G., Miller R., Gowayed Y., *Deformation and damage modeling of ceramic matrix composites under multiaxial stresses*, „Composites Part B: Engineering” 2016, nr 4/1(90).
- Seyed Yaghoubi A., Liaw B., *Thickness influence on ballistic impact behaviors of GLARE 5 fiber-metal laminated beams: Experimental and numerical studies*, „Composite Structures” 2012, nr 7/94(8).
- Sobczak J., Wojciechowski S., *Współczesne tendencje praktycznego zastosowania kompozytów metalowych*, „Kompozyty (Composites)” 2002, nr 2/3.
- Surowska B., *Materiały funkcjonalne i złożone w transporcie lotniczym*, „Eksploatacja i Niezawodność” 2008, nr 3.
- Uchida T., Hamada H., Kuroda K., Endo A., Migaki M., Ochiai J., *Process analysis of the hand lay-up method using CFRP prepreg sheets [w:] Digital Human Modeling. Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk, Management: Ergonomics and Health: 6th International Conference*, red. G.V. Duffy, Springer International Publishing, Cham 2015.
- Vlot A., *The birth of arall [w:] Glare: history of the development of a new aircraft material*, Springer Netherlands, Dordrecht 2001.
- [www.wzl1.mil.pl](http://www.wzl1.mil.pl).
- Ye J., Zhang B., Qi H., *Cost estimates to guide manufacturing of composite waved beam*, „Mater Des” 2009, nr 3/30(3).

# Zastosowanie nowych technologii i materiałów konstrukcyjnych na przykładach wybranych samolotów bojowych piątej generacji

## Streszczenie

Prezentowany artykuł został napisany w celu zwrócenia uwagi na kierunki rozwoju przyszłościowych wielozadaniowych samolotów myśliwskich piątej generacji w lotnictwie bojowym w aspekcie konstrukcji płatowców, uzbrojenia oraz zespołów napędowych. Aby precyzyjnie określić zakres zachodzącego postępu technologicznego, przytoczono wybrane trzy przykłady najbardziej zaawansowanych projektów platform bojowych piątej generacji. W trakcie podjętych badań dokonano analizy i syntezy danych taktyczno-technicznych oraz porównania zaawansowania w odniesieniu do samolotów myśliwskich poprzednich generacji. Wskazując na zmiany zachodzące w strukturach tych statków powietrznych, jednocześnie poruszono kwestię wykorzystania ich na polu walki i przeznaczenia w przyszłych operacjach.

**Słowa kluczowe:** lotnictwo bojowe, wielozadaniowy samolot myśliwski, piąta generacja.

## Wstęp

Mianem samolotów piątej generacji określa się wielozadaniowe konstrukcje lotnicze wzbogacone o najnowocześniejsze rozwiązania technologiczne. Część z nich wciąż znajduje się w fazie prototypów i jest rozwijana w celu zaspokojenia potrzeb sił powietrznych oraz marynarki wojennej państw na całym świecie.

Pierwszą strukturą myśliwską sklasyfikowaną do piątej generacji w lotnictwie bojowym, która została produkowana seryjnie, a następnie wdrożona do czynnej służby, i spełniająca jej wymogi był Lockheed Martin F-22 Raptor – wygrana konstrukcja programu zaawansowanego myśliwca taktycznego

(*Advanced Tactical Fighter*). F-22 Raptor łączył w sobie nowoczesny płatowiec, wysoki stopień niewykrywalności oraz zwrotności, uzyskany dzięki znakomitym charakterystykom aerodynamicznym w połączeniu z wektorowaniem ciągu, ze ściśle zintegrowanym systemem awioniki pokładowej. To właśnie Raptor wyznaczył ogólny kierunek rozwoju kolejnych wielozadaniowych samolotów myśliwskich, będąc wzorcem dla konstruktorów.

Przedmiotem artykułu są wybrane konstrukcje samolotów bojowych piątej generacji. Za cel pracy wzięto przedstawienie rozwiązań konstrukcyjnych – nowych technologii i materiałów konstrukcyjnych, które znalazły zastosowanie w elementach poszycia, uzbrojenia i zespołu napędowego trzech wybranych konstrukcji lotniczych piątej generacji.

## **Nowe technologie i rozwiązania konstrukcyjne zastosowane w samolocie F-35 Lightning II**

Przykładem samolotu bojowego piątej generacji jest jedna z najbardziej zaawansowanych technologicznie platform lotniczych na świecie – konstrukcja F-35 Lightning II. Jej projekt powstał na bazie programu JSF (*Joint Strike Fighter* – wspólny samolot myśliwsko-szturmowy), którego głównym inicjatorem był Lockheed Martin Corporation. Sprawował on kierownictwo nad przebiegiem i rozwojem koncepcji F-35 Lightning II przy kooperacji z koncernami zbrojeniowymi: Northrop Grumman, Boeing, McDonnell Douglas i BAE Systems. Ponadto do współpracy zaproszono państwa zainteresowane eksploataowaniem myśliwca w swoich siłach powietrznych bądź marynarce wojennej. Warunkiem przystąpienia do projektu było zobowiązanie w postaci współfinansowania jego wykonania. Oprócz czynnika finansowego determinantem połączenia sił i środków była chęć zapoznania się ze współczesnymi oraz prognozowanymi potrzebami wielu armii świata. Celem stała się potrzeba skonstruowania wielozadaniowego samolotu, który mógłby zastąpić różne typy myśliwców na przyszłym polu walki w krajach współuczestniczących w programie JSF. W konsekwencji to rozwiązanie ma doprowadzić do redukcji kosztów związanych z produkcją, utrzymaniem, a zarazem uzyskania maksymalizmu unifikacji. Przewidziano, że w USAF samolot F-35 Lightning II będzie zdolny do wykonywania zadań bojowych, które obecnie zostały powierzone modelom, tj.: F-16 Fighting Falcon, A-10 Thunderbolt II, AV-8B Harrier II oraz F/A-18 Hornet. Docelowo konstrukcja ma być rozpatrywana

w trzech nieznacznie różniących się od siebie wariantach: A, B, C. Podział ten został podyktowany koniecznością dostosowania platformy do charakteru misji prowadzonych przez poszczególne rodzaje wojsk Stanów Zjednoczonych. US Air Force poświęcono wersję A posiadającą możliwości wykonywania konwencjonalnego startu i lądowania (*Conventional Take Off and Landing* – CTOL). United States Marine Corps przeznaczono wersję B mającą opcję krótkiego startu i pionowego lądowania (*Short Take Off and Vertical Landing* – STOVL) – fot. 7. Dla US Navy do eksploatacji ma zostać oddana wersja C potraktowana jako struktura operująca z lotniskowców, optymalna do warunków hangarowania na ich pokładzie.



Źródło: <https://marinecorpsconceptsandprograms.com/programs/aviation/joint-strike-fighter-jsf> [dostęp: 08.04.2017].

*Fot. 7. Samolot piątej generacji F-35B Lightning II z systemem STOVL F-35*

Do zasadniczych zadań F-35 Lightning II po uzyskaniu pełnej gotowości operacyjnej będzie należeć m.in.: prowadzenie aktywnej i pasywnej walki elektronicznej w celu opanowania obrony powietrznej przeciwnika, działania defensywne przeciwko wrogim siłom powietrznym, ofensywa własnych wojsk w ramach utrzymania i wywalczenia przewagi w powietrzu, rozpoznawanie, wymiatanie, obserwacja, izolacja lotnicza.

Zewnątrz poszycie płatowca zostało zaprojektowane w taki sposób, aby kształt struktury jak najskuteczniej rozpraszał emisję promieniowania fal elektromagnetycznych w ramach rozwoju technologii *stealth*. W tym celu zniwelowano ilość luków oraz szczeliny pomiędzy łączeniami blach pokrycia, a także ograniczono powierzchnię mechanizmów zwiększających siłę nośną

na skrzydłach. Zrezygnowano także z demontowanych, w razie potrzeby, paneli ułatwiających przegląd wybranej części samolotu w przypadku wystąpienia awarii (np. stosowanych wokół obudowy jednostki napędowej). Do budowy F-35 Lightning II wykorzystano stopy aluminium nadające konstrukcji lekkość, tytan cechujący się wysokim stopniem termoodporności. Materiały kompozytowe stanowią 35% masy własnej samolotu. Zastosowano wytrzymałe laminaty wzmocnione włóknem ciągłym – węglowym (*Carbon Fibres Reinforced Plastic – CFRP*) i szklanym o osnowie z żywicy epoksydowej (*Glass Fibres Reinforced Plastic – GFRP*).

Kadłub podzielono technologicznie na cztery zasadnicze części. W jego strukturze umieszczono gniazdo przeznaczone do tankowania w powietrzu przy użyciu latających samolotów tankowania powietrznego za pomocą przewodu sztywnego (wersja A) oraz giętkiego (wersja B i C). Po obu stronach konstrukcji samolotu znajdują się wloty powietrza, natomiast na spodniej części znajduje się komora przeznaczona do przenoszenia uzbrojenia. Uzupełnia ona podwieszane lotnicze środki rażenia. Kabina pilota została wyposażona w systemy ciśnieniowe, klimatyzacyjne i zakryta kropłową owiewką odchylającą się do tyłu. Umieszczono w niej fotel katapultowy US16E klasy 0-0. Kokpit zaprojektowano w taki sposób, aby spełniał także funkcję kapsuły ratunkowej. Znajdowało się w niej wyspecjalizowane wyposażenie medyczne niezbędne do przetrwania załogi w przypadku awaryjnego opuszczenia samolotu. Widoczność z przodu kabiny ocenia się jako przeciętną, co stanowi przeciwieństwo wobec samolotów sklasyfikowanych do czwartej generacji w lotnictwie bojowym (np. F-16 Fighting Falcon). Pilot nie jest zmuszony do bieżącej obserwacji otoczenia, a wszelkie informacje w postaci obrazu przekazywane są do celownika nahałmowego w czasie rzeczywistym.

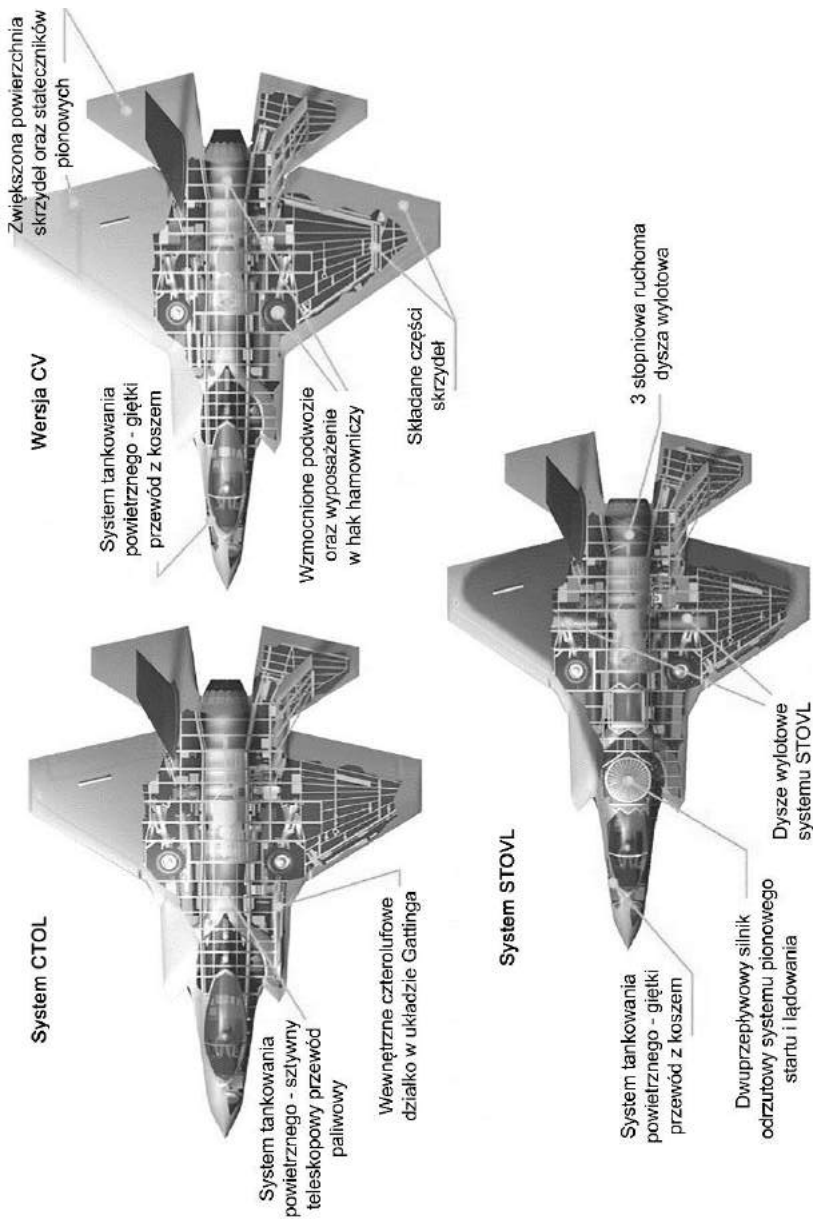
Płaty nośne w poszczególnych wariantach różnią się od siebie rozpiętością (wersja C posiada największy rozmiar skrzydeł, a więc i powierzchnię nośną), jednak wszystkie mają identyczną budowę ogólną. Można w nich wyróżnić podwójny skos – większy na krawędzi natarcia oraz mniejszy na krawędzi spływu. Końce skrzydeł są odcięte i skrócone, co zapobiega odrywaniu się strug powietrza od ich płaszczyzny. Ten celowy zabieg w koncepcji konstruktorów miał zapewnić odpowiednią stateczność myśliwca podczas wykonywania ciasnych zakrętów przy dużych prędkościach przelotowych. Płaty wyposażono w mechanizmy zwiększające siłę nośną, tj. sloty oraz sterolotki. Usterzenie składa się ze stateczników pionowych oraz poziomych. Zdwojone stateczniki pionowe z zawartymi w nich wychylanymi sterami kierunku są w swojej budowie odchyłone symetrycznie na zewnątrz. Stateczniki poziome

przypominają pomniejszoną konfigurację skrzydeł. Podobnie jak w przypadku płatów nośnych F-35C Lightning II otrzymał największą powierzchnię usterzenia poziomego. Podwozie każdego z wariantów różni się konstrukcją z uwagi na odmienne sposoby wykonywania startów i lądowań (CTOL, STOVL) – rys. 16.

Z każdego z rozwiązań konstrukcyjnych systemu lądowania wykorzystano około 10% wspólnych części w celu optymalnego dopasowania ich do charakteru środowiska operacyjnego. We wszystkich przypadkach jest to chowane w locie trójpodporowe podwozie. Golenie główne są wciągane do luków podskrzydłowych, goleń pomocnicza umieszczona jest na półwidelcu i chowana do wnęki podkadłubowej pod kabiną pilota. Wariant przeznaczony dla US Navy posiada dodatkowo hak zaczepu umiejscowiony w przedniej goleni. Celem takiego rozwiązania jest ustabilizowanie samolotu podczas hangarowania na pokładzie lotniskowców<sup>1</sup>.

Rozważając kwestię uzbrojenia F-35 Lightning II, należy stwierdzić, że jest ono dostosowane do specyfiki wykonywanych działań, ale w pewnym zakresie ograniczone. Oznacza to, że każdy z wariantów platformy może przenosić takie same lotnicze środki rażenia, które w zależności od potrzeb i przeznaczenia są montowane lub demontowane. Do uzbrojenia strzeleckiego zalicza się zasilane elektrycznie, zabudowane czterolufowe działko GAU-22/U kalibru 25 mm. F-35A Lightning II jako jedyny z wersji posiada stałe uzbrojenie strzeleckie. W przypadku F-35B/C Lightning II działko może być przenoszone w zasobniku pod strukturą płatowca. W zewnętrznych pylonach podskrzydłowych istniała możliwość przenoszenia bomb kierowanych i naprowadzanych laserowo (GBU-10/16 Paveway II, GBU-24B Paveway III), bomb niekierowanych (Mark 82/83/84), w tym bombę termojądrową B61, oraz bomby kasetowe (CBU-99/100). Oprócz szerokiej gamy uzbrojenia bombowego samolot wielozadaniowy mógł przenosić kierowane pociski raketowe klasy powietrze-ziemia naprowadzane na cel termicznie lub radiolokacyjnie (w zależności od stosowanej głowicy bojowej). Należały do nich pociski: AGM-65 Maverick, AGM-88 HARM, Storm Shadow i AGM-158 JASSM. Aby jak najbardziej skutecznie eksploatować nowoczesny myśliwiec, oprócz używanego w poprzednich generacjach uzbrojenia strzeleckiego, bombowego oraz pocisków niekierowanych i kierowanych podwieszanych pod

1 Lockheed Martin F-35 "Lightning II", 2006, online – <http://www.samolotypolskie.pl/samoloty/1655/126/Lockheed-Martin-F-35-Lightning-II2> [dostęp: 08.02.2017].



Źródło: opracowanie własne na podstawie: *F-35 Joint Strike Fighter (JSF) Lightning II*, online – <http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/f-35.htm> [dostęp: 08.04.2017].

Rys. 16. Wersje konstrukcyjne układów lądowania samolotu F-35 Lightning II



konstrukcją płatowca bądź skrzydeł wykorzystano dwie wewnętrzne komory. Na etapie projektowania umieszczono je w części podkadłubowej oraz doposażono w zaczepy do podwieszenia i odpowiedniego zabezpieczenia ładunku. Do uzbrojenia przenoszonego w komorach zalicza się bomby kierowane (GBU-12 Paveway II, GBU-32/38 JDAM, GBU-39 SDB, GBU-31 JDAM i AGM-154 JSOW z możliwością podłączenia wyłącznie w wariantcie F-35B Lightning II) oraz bomby kasetowe (CBU-103/105). Ponadto komora może pomieścić kierowane pociski raketowe klasy powietrze-ziemia Brimstone przeznaczone do niszczenia celów opancerzonych i kierowane pociski raketowe klasy powietrze-powietrze (AIM-9X Sidewinder, AIM-120 AMRAAM, AIM-132 ASRAAM)<sup>2</sup>.

Konstrukcję F-35 doposażono w pojedynczy turboodrzurowy silnik, cechujący się wysokim stopniem dwuprzepływowości. Jednostka napędowa wyprodukowana została przez firmę Pratt & Whitney. Chociaż we wszystkich wariantach samolotu wielozadaniowego zastosowano jednostkę napędową oznaczoną F-135, różni się ona w poszczególnych wersjach i jest dopasowana do charakteru wykonywanych startów oraz lądowań platformy. W F-35A Lightning II wykorzystano napęd F135-PW-100, którego maksymalna wartość ciągu bez dopalania wynosi 124,55 kN i pozwala na osiągnięcie prędkości *supercruise*. Natomiast ciąg na trzecim stopniu dopalania jest równy 191,3 kN. W F-35B Lightning II z uwagi na realizację systemu STOVL silnik F-135-PW-600 wyposażono w wentylator wspomagający manewrowość samolotu oraz loty wykonywane w pionie i w zawisie. Produkowany jest on przez zakłady Rolls-Royce'a. Całokształt skomplikowanego układu napędowego jest sterowany za pomocą sygnału cyfrowego. Za kontrolę nad działaniem silnika w locie z określoną prędkością oraz rozłożenie ciśnienia gazów wylotowych i powietrza na główną dyszę silnika i wentylatora oraz dysze kierunkowe odpowiedzialny jest komputer pokładowy. Trójmodułowe dysze wylotowe typu 3BSM (*Three Bearing Swivel Module*) są zdolne do obracania jednostki napędowej w zakresie  $-5^{\circ}/+90^{\circ}$ . Wartość ciągu silnika należy rozpatrywać w kilku płaszczyznach: w zawisie (180,8 kN), rozkładzie gazów wylotowych na pojedynczą dyszę i wentylator (83,1 kN) oraz sterowane hydraulicznie dysze podskrzydłowe (14,6 kN). W strukturę F-35C Lightning II wmontowano wersję jednostki napędowej F-135-PW-400, której wartości ciągu są zbliżone do wartości generowanych przez F135-PW-100.

2 *F-35 JSF Weapon Carriage Capacity*, online – <http://www.aerospaceweb.org/question/planes/q0163.shtml> [dostęp: 09.02.2017].

## Nowe technologie i rozwiązania konstrukcyjne zastosowane w samolocie T-50 PAK FA

Innym przedstawicielem wielozadaniowego samolotu myśliwskiego piątej generacji w lotnictwie bojowym jest prototyp T-50 PAK FA, wyprodukowany przez koncern zbrojeniowy Pawła Suchoja. PAK FA (rus. *perspektywiczny kompleks lotniczy – myśliwiec*) jest pierwszym projektem w przyszłości przeznaczonym na potrzeby sił powietrznych i w całości zbudowany w Rosji, po upadku ZSRR. W związku z powstaniem nowego państwa dotychczasowe projekty w dużym stopniu straciły możliwość ich dalszego finansowania. Pomimo trudności kontynuowano prace konstruktorskie mające być odpowiedzią na amerykański program zaawansowanego myśliwca taktycznego – F-22 Raptor. Początki prób, jakie podejmowała Rosja w kwestii zaprojektowania swojego myśliwca piątej generacji, sięgają koncepcji ciężkiego samolotu przewagi powietrznej w układzie kaczki MiG 1-44 opatentowanego przez biuro Mikojana-Gurewicza. Ideę porzucono na korzyść zakładów Suchoja cieszących się zainteresowaniem i sukcesem eksportowym modelu Su-27 Flanker. Koncern był w posiadaniu wystarczającego funduszu, który mógłby zostać przeznaczony na rozwój alternatywnego programu nowoczesnej konstrukcji lotniczej. W tym celu podjęto działalność, która finalnie miała doprowadzić do zbudowania struktury podobnej do F-22 Raptor, zamiast do europejskich samolotów bojowych w układzie kaczki, sklasyfikowanych do generacji cztery i pół. Priorytet niezmiennie stanowił wysoki poziom niewykrywalności przez niektóre pasma radiowe, czyli zastosowanie dotychczas znakomicie rozwiniętej w Stanach Zjednoczonych technologii *stealth*. W przypadku samolotu T-50, podobnie jak na przykładzie platformy F-35 Lightning II, konstrukcja także opierała się na sposobie projektowania poszycia samolotu w taki sposób, aby skutecznie odbijało ono lub częściowo pochłaniało wrogą emisję elektromagnetyczną. 29 stycznia 2010 roku w Komsomolsku dokonano zakończonego sukcesem 45-minutowego oblotu T-50. Do 2016 roku zostało wyprodukowanych 14 prototypów, natomiast pierwsze próbne egzemplarze mają być wdrożone do służby w 2017 roku ze zmianą oznaczenia fabrycznego na Su-50. Prognozuje się, że program PAK FA nie zakończy się na wprowadzeniu do seryjnej produkcji modelu T-50. Oprócz niego w przyszłości rosyjskie siły powietrzne będą wspierane konstrukcją Su-35S, która w stosunku do Su-27 posiada bardziej zaawansowaną konfigurację aerodynamiczną. Dodatkowo przewidywane są prace nad zbudowaniem lekkiego wielozadaniowego

samolotu myśliwskiego niedługo po udoskonaleniu struktury T-50. Obecnie trwają testy nad rozwojem i zamianą zespołów napędowych T-50 PAK FA oraz komplementacją wyposażenia bojowego.

W założeniu rosyjskich konstruktorów struktura T-50 ma nie przypominać żadnej z dotychczas zbudowanych lotniczych platform bojowych na świecie. Pierwowzorem wykorzystywanym przy jej projektowaniu pozostał F-22 Raptor. Warto zauważyć, że amerykańskie koncerny zbrojeniowe są liderami w kwestii budowania statków powietrznych piątej generacji, przede wszystkim przez wzgląd na zastosowanie materiałów konstrukcyjnych. Udało im się dokonać połączenia lekkich i jednocześnie charakteryzujących się dużą wytrzymałością kompozytów w kontekście technologii *stealth*. W celu dorównania zachodnim standardom zaawansowane techniki kamuflażu przy użyciu tego rodzaju tworzywa stały się koniecznością już na etapie projektowania T-50. Niedostatki w wiedzy z zakresu materiałoznawstwa doprowadziły do tego, że realizacja programu PAK FA opóźnia się. Problemy związane są z doбором odpowiedniego materiału kompozytowego oraz metali odpornych na korozję lub pękanie poszycia podczas lotu z prędkościami naddźwiękowymi. Przewiduje się, że kompozyty będą stanowić ponad połowę masy własnej samolotu z udziałem stopów metali o wysokim stopniu termoodporności w częściach budowy silników.

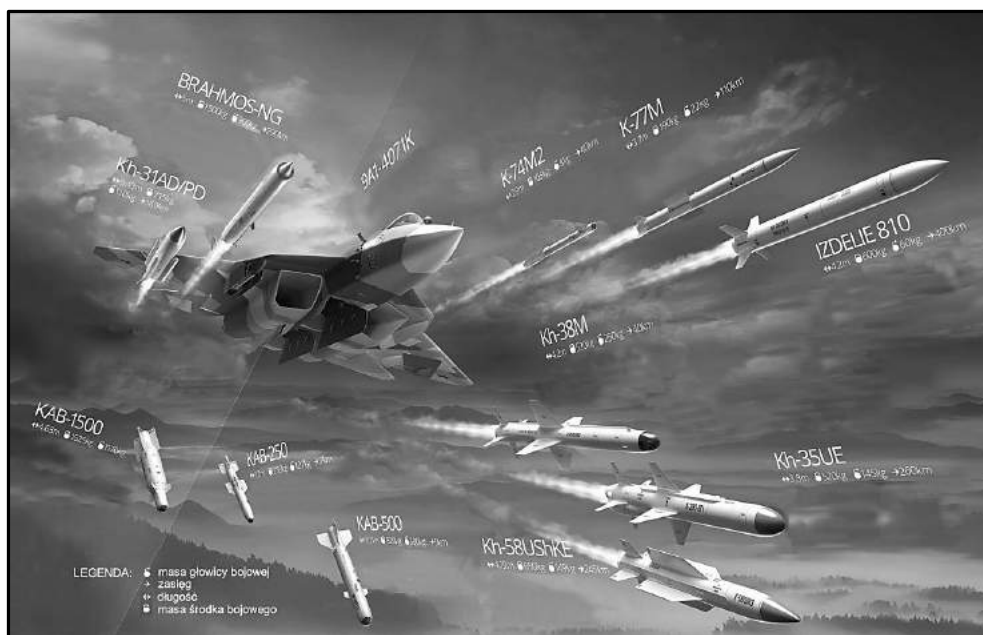
Kadłub T-50 zaprojektowano w taki sposób, aby jego poszycie generowało dodatkową siłę nośną. To rozwiązanie zastosowano w radzieckich konstrukcjach czwartej generacji lotnictwa bojowego, do których należały modele: ciężki myśliwiec przewagi powietrznej Su-27 Flanker lub uzupełniający jego możliwości operacyjne lekki myśliwiec MiG-29 Fulcrum. W przeciwieństwie do amerykańskiego F-35 Lightning II postanowiono poprawić widoczność z kabiny pilota poprzez obniżenie przedniej szyby oraz wysmuklenie płatowca w kierunku sekcji usterzenia. Kokpit wyposażono w niezbędne systemy regulujące ciśnienie i klimatyzacyjne. Planuje się wmontowanie nowoczesnego fotela katapultowego, który przewyższy standardami konkurencyjną platformę Lockheed Martin. W spodniej części płatowca umieszczono wewnętrzne komory uzbrojenia i podwójne, szeroko rozstawione wloty powietrza o przekroju w kształcie rombu, połączone bezpośrednio z zespołami napędowymi. W ich wnętrzu, podobnie jak w Su-27 Flanker, zastosowano mechanizm regulujący przepływ powietrza, który nie został wykorzystany w zachodnich konstrukcjach, takich jak F-22 Raptor czy F-35 Lightning II. Dodatkowo powierzchnię wlotów doposażono w ruchome żaluzje. Ich rozmieszczenie w dolnej oraz bocznej części struktury wlotów pozwala uniknąć zaburzeń

cyrkulacji powietrza wokół poszycia samolotu lub gwałtownego spadku ciągu podczas wykonywania ciasnych zakrętów. T-50 zaprojektowano jako górno-  
płat ze skrzydłami w układzie delta, które technologicznie można podzielić  
na dwie części. Pierwsza z nich w sekcji przykadłubowej przypomina skrzydło  
pasmowe stosowane w platformach lotniczych czwartej generacji, ale posia-  
da dodatkowe elementy zwiększające siłę nośną, do których należą wychy-  
lane w dół kłapy bojowe. W dalszej części płata wyróżniono trójkątny obrys  
o skosie  $46^\circ$  na krawędzi natarcia i z odciętymi końcami. Wzdłuż krawę-  
dzi natarcia zamontowano również kłapy bojowe zwiększające powierzchnie  
nośne. Krawędzie spływu wyposażono w klapolotki wewnętrzne i zewnętrzne  
wychylane w sposób od siebie niezależny. Ich funkcją jest zmiana kształtu  
profilu skrzydła w celu lepszego opływu powietrza w locie na dużych kątach  
natarcia, wykonywania obrotów i manewrów bądź dostosowania do aktualnej  
prędkości T-50. Całkowita powierzchnia płatów nośnych wynosi  $78,8 \text{ m}^2$ .  
Usterzenie wykonano w konfiguracji klasycznej, ze zdwojonymi, odchylony-  
mi symetrycznie statecznikami pionowymi oraz poziomymi. Stateczniki pio-  
nowe składają się z pojedynczej płaszczyzny ruchomego płata, spełniającego  
funkcję wychylanych hamulców aerodynamicznych. Stateczniki poziome  
posiadają na krawędzi natarcia dodatkowe lotki, należące do mechanizmów  
zwiększających siłę nośną i jednocześnie pomocniczych powierzchni stero-  
wych. Ogółem T-50 posiada 12 powierzchni sterowych na poszyciu płatow-  
ca. W konstrukcję wmontowano trójpodporowe podwozie chowane w locie  
do luków podkadłubowych. Goleń pomocniczą doposażono w zdwojone  
koła o mniejszej średnicy. Dwie golenie główne zawierają pojedyncze koła  
o większej średnicy. Podwozie pozwala na wykonywanie skróconych startów  
i lądowań z nieutwardzonych pasów startowych lub w środowisku o mało  
rozwinętej infrastrukturze.

Chociaż eksperymentalna konstrukcja T-50 programu PAK FA nie po-  
siada jeszcze pylonów podskrzydłowych do przenoszenia podwieszanego  
uzbrojenia, prognozuje się jego podział oraz przeznaczenie (rys. 17).

W przyszłości w skład osprzętu bojowego ma wchodzić zabudowane  
działko pokładowe, mieszczące się po prawej stronie kadłuba. Przewiduje się  
wykorzystanie automatycznego działka Grazjew-Szipunow, działającego na  
zasadzie odprowadzenia części gazów prochowych. Działko kalibru 30 mm  
oznaczone zostało GSz-30-1. Zostało ono po raz pierwszy zastosowane  
w lekkim samolocie myśliwskim MiG-29 Fulcrum. W strukturze T-50 pla-  
nuje się umieszczenie 16 węzłów do podczepienia uzbrojenia w postaci kie-  
rowanych pocisków raketowych. Wśród nich znajdować się ma kierowany

pocisk raketowy klasy powietrze-powietrze RVV-MD (rosyjskie oznaczenie R-73) zdolny do zwalczania celów na krótkim dystansie operacyjnym. Jest on naprowadzany termicznie – po wystrzeleniu go lub po zwolnieniu z wewnętrznej komory przechodzi w tryb „wystrel i zapomnij” (*fire and forget*), co oznacza, że pocisk samoistnie naprowadza się na cel za pomocą źródła ciepła bez konieczności ingerowania w jego trajektorię lotu przez inne sygnały kierujące. RVV-MD jest odpowiednikiem konkurencyjnego pocisku lotniczego AIM-9 Sidewinder (amerykańskiej produkcji). Drugim rozważanym typem kierowanego pocisku raketowego klasy powietrze-powietrze jest RVV-SD (rosyjskie oznaczenie R-77). Jego przeznaczeniem będą obiekty powietrzne na średnim dystansie. Jego naprowadzanie odbywa się poprzez system bezwładnościowy z pomocniczą korekcją kursu, która jest przesyłana drogą radiową w celu utrzymania pożądanej trajektorii lotu. Po wystrzeleniu pocisku z samolotu-nosiela zostaje on skierowany na cel na podstawie danych przekazywanych do pokładowych stacji radiolokacyjnych. RVV-SD powstał na bazie parametrów zachodniego pocisku AIM-120 AMRAAM.



Źródło: D. Cenciotti, *All the weapons Russia's Sukhoi T-50 fighter jet is designed to carry in one infographic*, Military & Defense – Business Insider, 2015, online – <http://www.businessinsider.com/all-the-weapons-russias-sukhoi-t-50-fighter-jet-is-designed-to-carry-in-one-infographic-2015-8?IR=T> [dostęp: 08.04.2017].

Rys. 17. Wizja uzbrojenia samolotu T-50

W konstrukcji T-50 PAK FA umieszczono zabudowę przeznaczoną do wmontowania dwóch silników turboodrzutowych. W celu dorównania amerykańskiemu standardom głównym wyzwaniem postawionym przed zespołami napędowymi jest system STOL. Założono, że ścieżka rozbiegu i dobiegu samolotu nie może przekraczać 300 m. Uwzględniając masę własną T-50, rozpiętość oraz przewidywane warianty podwieszanego uzbrojenia, skonstruowano, że nie istnieje możliwość zastosowania rozwiązania VTOL (*Vertical Take Off and Landing*). Okazało się, że wykracza on poza zasoby i doświadczenie będące w posiadaniu rosyjskich konstruktorów lotniczych. Prognozuje się wykorzystanie w przyszłości wektorowania ciągu w szerokim spektrum operowania, jednak obecnie największy mankament projektu PAK FA stanowi odpowiedni dobór silników. Chcąc dokonać oblotu i sprawdzenia struktury pod względem oceny charakterystyk aerodynamicznych, jakimi będzie się wykazywać konstrukcja, zainstalowano dwuprzepływowe, turboodrzutowe jednostki napędowe Saturn-Liulka AL-41F1 o wartości ciągu bez dopalania 86,3 kN i z użyciem dopalania 142,2 kN. Posiadają one ruchome dysze wylotowe oraz cyfrowy układ sterowania zakresem ich pracy. Zostały one tymczasowo zapożyczone od zmodernizowanego wielozadaniowego samolotu myśliwskiego generacji cztery i pół Su-35. Ich wybór podyktowany był wysokim stopniem niezawodności oraz odpornością w przypadku wystąpienia pompażu. Pomimo że początkowo silniki z rodziny AL wydawały się najbardziej odpowiednie dla pierwszych egzemplarzy T-50 PAK FA do czasu opracowania optymalnych dla niego zespołów napędowych, podczas wykonywania krótkotrwałych lotów doszło do nieoczekiwanego zapłonu na skutek silnego pompażu. W efekcie samoloty zostały uziemione. Docelowo mają być doposażone w nowy napęd, obecnie znajdujący się w fazie prac podjętych przez zakłady NPO Saturn (oznaczonych jako *Faza II*). Działania prowadzące do rozwoju i budowy silników *Fazy II* skupiają się wokół testowania rdzeni znajdujących się wewnątrz ich konstrukcji<sup>3</sup>. Analizując strukturę AL-41, można wnioskować, że prototypy silników *Fazy II* zostaną zbudowane na ich podstawie, lecz mają być wydajniejsze o 15–20%. Przewiduje się, że wielozadaniowe samoloty myśliwskie T-50 PAK FA zostaną oblatane z nowym napędem jeszcze w 2017 roku.

3 *Nowe silniki dla T-50 PAK FA*, online – <http://www.nowastrategia.org.pl/nowe-silniki-dla-t-50-pak-fa/> [dostęp: 18.02.2017].

## Nowe technologie i rozwiązania konstrukcyjne zastosowane w samolocie J-20 Black Eagle

Inną platformą lotniczą uznaną za odpowiednią do sklasyfikowania zgodnie z wymogami postawionymi przed samolotami bojowymi piątej generacji jest wielozadaniowy myśliwiec J-20 Black Eagle. Jego produkcją zajęła się firma Chengdu Aircraft Industry Corporation. Początki J-20 sięgają schyłku lat 80., kiedy podjęto prace nad projektem zbudowania nowej struktury mającej na celu zastąpienie w służbie sił powietrznych Chin ciężki myśliwiec przewagi powietrznej J-8II oznaczony „2-03”. Według nieoficjalnych i niepotwierdzonych źródeł do działalności związanej ze skonstruowaniem statku powietrznego mieli zostać zaangażowani zagraniczni technicy. Można wnioskować to na podstawie podobieństwa prototypu J-20 do nieudanego modelu MiG 1.44. Jednocześnie należy stwierdzić, że Chińscy konstruktorzy czerpali wzorce na etapie projektowania myśliwca piątej generacji z rosyjskich programów lotniczych. Oprócz tego wszystkie swoje dotychczasowe prace utrzymywano jako tajne koncepcje, przypatrując się trendom panującym obecnie w lotnictwie bojowym – myśliwskim i wielozadaniowym. Chcąc stworzyć własny samolot, który w przyszłości może stanowić liczącą się konstrukcję bojową sił powietrznych, rozpoczęto jej realizację pod kierownictwem głównego konstruktora Jang Wei. W 2008 roku programowi nadano oficjalne oznaczenie „Projekt 718”<sup>4</sup>. W jego dalszej ewolucji powstała koncepcja nazwana „J-XX”. W ramach tajnego projektu prowadzonego przez Chiny mają powstać co najmniej dwie wielozadaniowe konstrukcje. Obecnie znane są modele Shenyang J-31 i Chengdu J-20, bazujące na konfiguracjach myśliwców MiG-31, F-15 Eagle oraz Su-47. Aby dorównać konkurencyjnym strukturom piątej generacji, przed J-20 postawiono wyzwanie w postaci obniżania sygnatury radiolokacyjnej za pomocą odpowiednio opracowanego poszycia zewnętrznego oraz farb wykorzystanych do jego pokrycia. Pożądaną cechą jest również tzw. supermanewrowość, czyli osiągnięcie zamierzonej niestabilności samolotu, co w połączeniu z zintegrowaną, zaawansowaną awioniką pozwala na rozwijanie dużych prędkości i wykonywanie ciasnych zakrętów. Supermanewrowość nie jest jednak możliwa do osiągnięcia bez zastosowania wektorowania ciągu w jednostkach napędowych. Chociaż poszukiwanie optymalnych silników dla

4 T. Szulc, *Ewolucja chińskiego myśliwca J-20*, „Nowa Technika Wojskowa” 2014, nr 5, s. 72–77.

konstrukcji J-20 Black Eagle może okazać się równie kłopotliwe jak w przypadku programu PAK FA, to jego oficjalnego oblotu dokonano 16 maja 2012 roku.

Konstrukcję J-20 Black Eagle opracowano w układzie aerodynamicznym górnopłata – układzie kaczki. Zastosowanie tego rozwiązania sprawia, że ster wysokości zostaje przeniesiony z części ogonowej statku powietrznego przed powierzchnię nośną skrzydeł. Oprócz generowania dodatkowej siły nośnej lub celowego wytworzenia wirów w warstwie przyściennej układ kaczki może zostać potraktowany analogicznie do skrzydła pasmowego, rozpowszechnionego w czwartej generacji lotnictwa bojowego. Płaty nośne zaprojektowano w konfiguracji delta z napływami, która w połączeniu z kawką miała zagwarantować samolotowi dobre charakterystyki manewrów wykonywanych przy dużych prędkościach. W skład mechanizacji skrzydła zwiększającej siłę nośną wchodzi: kłapy noskowe na krawędzi natarcia oraz klapolotki na krawędzi spływu. Poszycie kadłuba najprawdopodobniej zbudowane zostanie z lekkich materiałów kompozytowych oraz termoodpornych. Jednak zarówno rosyjscy, jak i chińscy konstruktorzy nie są w posiadaniu wiedzy w zakresie stosowania kompozytów w lotnictwie bojowym. Z tego powodu wszelkie materiały znajdują się w fazie testów. Ważnym aspektem jest sposób, w jaki zbudowano płatowiec J-20 Black Eagle. Podobnie jak we wszystkich dotychczas zaprojektowanych strukturach piątej generacji, położono szczególny nacisk na rozwinięcie technologii *stealth*. Chociaż prace nad nowoczesnym chińskim wielozadaniowym myśliwcem utrzymywane są jako tajne, istnieje możliwość, że w J-20 zastosowano sposób maskowania wykorzystany także w F-117 Nighthawk, który jest pierwszą platformą skonstruowaną w *stealth*. W przypadku F-117 Nighthawk zmniejszenie sygnatury radiolokacyjnej uzyskano poprzez użycie kilku płaszczyzn pokrycia, ułożonych pod różnymi kątami zwiększającymi odbicie fal elektromagnetycznych od jego powierzchni. Po obu stronach kadłuba umieszczono szeroko rozstawione prostokątne wloty powietrza. Natomiast tuż przed ich strukturą w płatowiec wmontowano kłapki przeciwpompazowe i regulatory przepływu. Do ich funkcji należy nie tylko kontrolowanie cyrkulacji powietrza dostającego się do wlotów, ale również redukcja echa radarowego. O wyposażeniu kabiny pilota wiadomo, że zostanie zbudowana i udoskonalona zgodnie z regułą *glass cockpit*<sup>5</sup> z ekranami ciekłokrystalicznymi (*Liquid Crystal Display* –

5 *Glass cockpit* (szklany kokpit) – rodzaj kokpitu stosowanego w statkach powietrznych najnowszej generacji. Charakteryzuje się całkowitą rezygnacją ze wskaźników analogowych na korzyść zintegrowanych, wielofunkcyjnych wyświetlaczy cyfrowych. Całokształt awioniki jest ściśle sprzężony z systemami sterowania lotem.



LCD) oraz wyświetlaczami typu HUD<sup>6</sup>. Podobnie jak w F-35 Lightning II, planuje się zastosowanie fotela katapultowego klasy 0-0. Z racji tego, że funkcję usterzenia poziomego spełnia w konstrukcji układu kaczki usterzenie pionowe, w tym przypadku stanowią je dwa symetrycznie odchyłone stateczniki. Wykonano je w kompozycji płytowej. Istnieje możliwość, że zaprojektowano je nie tylko z myślą o sterach, ale jednocześnie mogą one pełnić funkcję hamulców aerodynamicznych, skracających ścieżkę dobiegu. W spodniej części umieszczono dodatkowe powierzchnie aerodynamiczne w kształcie trapezu, przeznaczone do utrzymania odpowiedniej stateczności kierunkowej samolotu. J-20 Black Eagle doposażono w trójpodporowe podwozie chowane w locie, składające się z pojedynczej goleni pomocniczej oraz dwóch goleni głównych. Goleń pomocnicza zawiera w sobie koło o mniejszej średnicy względem goleni głównych. Podwozie wciągane jest do luków podkadłubowych. Pomiędzy dyszami wylotowymi zespołów napędowych umiejscowiono wnękę spadochronu hamującego<sup>7</sup>.

Lotnicze środki rażenia przeznaczone do samolotu J-20 Black Eagle nie są jeszcze sprecyzowane. Władze Chin w oficjalnych źródłach nie podają także, czy znajdują się one w fazie testów. Natomiast w płatowcu przewiduje się umieszczenie otworu w celu zamontowania zabudowanego działka pokładowego najprawdopodobniej chińskiej produkcji. Aby skutecznie i jak najbardziej efektywnie eksploatować konstrukcję w technologii *stealth*, realna może okazać się prognoza względem uzbrojenia przenoszonego w wewnętrznych komorach kadłuba. Plany wobec użytkowania J-20 Black Eagle wskazują, że większość lotniczych środków bojowych będzie przenoszona właśnie w nich, aby zredukować sygnaturę radiolokacyjną. Spodnia duża powierzchnia nośna skrzydeł oraz wnęka pomiędzy wlotami powietrza pozostawiają wolną przestrzeń, która również może zostać wykorzystana do podwieszania uzbrojenia lub dodatkowych zbiorników z paliwem. W jego ogólny skład mają wchodzić kierowane pociski raketowe klasy powietrze-powietrze krótkiego, średniego i dalekiego zasięgu, samonaprowadzające, zaawansowane pociski manewrujące oraz bomby o niedużym wagomiarze. Przewiduje się, że nowa platforma nie będzie tylko ciężkim samolotem przewagi powietrznej, ale jej potencjał zostanie rozwinięty do zdolności atakowania celów naziemnych oraz nawodnych. W tym celu planowany osprzęt bojowy w przyszłości może być szeroko

6 *Mysliwce 5. generacji – stan na a.d. 2015*, online – <http://www.nowastrategia.org.pl/mysliwce-5-generacji-stan-na-a-d-2015/> [dostęp: 21.02.2017].

7 B. Głowacki, *Chińska zagadka w powietrzu*, „Raport” 2011, nr 1, s. 36–42.

rozwinęty w postaci kierowanych pocisków raketowych klasy powietrze-zie-  
mia lub powietrze-woda. Całokształt uzbrojenia ma być dostosowany do ope-  
racyjnego charakteru wielozadaniowego myśliwca, mającego zastąpić przesta-  
rzałe konstrukcje bojowe w chińskich siłach powietrznych.

W tylnej części konstrukcji J-20 Black Eagle zastosowano obudowę prze-  
znaczonych do zamieszczenia w niej zdwojonych, wąsko zestawionych ze sobą  
silników turboodrzutowych. Aby jak najefektywniej eksploatować strukturę,  
poszukiwane są zespoły napędowe, które mają być dostosowane do specyfiki  
wykonywania zadań bojowych na określonym zasięgu operowania. Pierwszym  
postawionym przed nimi wymogiem jest rozpowszechniona w piątej generacji  
zdolność *supercruise* i możliwość osiągania maksymalnej prędkości wynoszącej  
około 2,5 Ma. Kolejnym pożądanym atrybutem może okazać się system STOL  
(*Short Take Off and Landing*), który odnosi się do możliwości statków powietrz-  
nych wykonujących krótki start oraz lądowanie (skrótowa ścieżka rozbiegu/  
dobiegu). To rozwiązanie sprawiłoby, że J-20 Black Eagle mógłby operować  
z lotnisk o mało rozwiniętej infrastrukturze, w tym z krótkich pasów starto-  
wych. Innym priorytetem rozwojowym może okazać się dążenie do zastoso-  
wania techniki wektorowania ciągu. Docelowo konstrukcja ma zostać dopo-  
sazona w dwie bliźniacze jednostki napędowe WS-15, zaprojektowane przez  
koncern zbrojeniowy silników lotniczych Shenyang Aircraft Design Institute  
i wyprodukowane przez Xi'an Aero-Engine Corporation. Prognozuje się, że  
napęd będzie posiadać ciąg równy 76 kN przypadający na każdy z silników, a po  
uruchomieniu mechanizmu dopalania 180 kN. Przewidywane wartości ciągu  
są zbliżone do specyfikacji zespołów F135-PW, które umieszczono w samo-  
lotach F-35 Lightning II. Na tej podstawie można wywnioskować, że chińscy  
konstruktorzy wzorowali się na amerykańskich dwuprzepływowych silnikach  
turboodrzutowych. WS-15 w niedługim czasie mają być testowane w płatowcu  
J-20 Black Eagle. Do tej pory platforma posiada dwie zapożyczone jednostki  
napędowe rosyjskiej produkcji – Saturn-Liulka AL-31F, o wartości ciągu bez  
dopalania 75,53 kN i z dopalaniem 122,58 kN. Silniki te są wykorzystywane  
m.in. w samolotach czwartej generacji Suchoj Su-27 Flanker<sup>8</sup>.

Charakterystykę wybranych samolotów myśliwskich piątej generacji  
(w celu porównania) zestawiono w tabeli 2.

<sup>8</sup> Chengdu J-20 – Chińczycy mają nowy niewidzialny supermyśliwiec piątej generacji. Cał-  
kowita dominacja USA w powietrzu zagrożona?, online – [http://technowinki.onet.pl/lot-  
nictwo/chengdu-j-20-chinczycy-maja-nowy-niewidzialny-supermyśliwiec-piatej-gene-  
racji/h9n69w](http://technowinki.onet.pl/lot-<br/>nictwo/chengdu-j-20-chinczycy-maja-nowy-niewidzialny-supermyśliwiec-piatej-gene-<br/>racji/h9n69w) [dostęp: 24.02.2017].

Tabela 2. Charakterystyka wybranych samolotów myśliwskich piątej generacji

Model	Materiały konstrukcyjne	Obrys skrzydeł	Usterzenie	Podwozie	Uzbrojenie	Zespół napędowy
Lockheed Martin F-35A/B/C Lightning II	konstrukcja mieszana (stopy aluminium i tytanu), materiały kompozytowe (35% udziału masy własnej przy budowie całego płatowca): żywice epoksydowe, włókna węglowe i szklane	podwójny skos na krawędzi natarcia i spływu z odciętymi końcami płatów nośnych (zmodyfikowany obrys trapezowy), górnopłat	zdwojone sta- teczniki pionowe i poziome	trójpodporowe, chowane w locie	strzeleckie: 1x GAU-22/U kal. 25 mm; podwieszane: bomby kierowane (GBU-10/16 Paveway II, GBU-24B Paveway III), bomby niekierowane (Mark 82/83/84), bomba termojądrowa B61, bomby kasetowe (CBU-99/100), kierowane pociski raketowe klasy powietrze-ziemia (AGM-65 Maverick, AGM-88 HARM, Storm Shadow, AGM-158 JASSM), przenoszone w komorach wewnętrznych: bomby kierowane (GBU-12 Paveway II, GBU-32/38 JDAM, GBU-39 SDB, GBU-31 JDAM i AGM-154 JSOW), bomby kasetowe (CBU-103/105), kierowane pociski raketowe klasy powietrze-ziemia (Brimstone) i powietrze-powietrze (AIM-9X Sidewinder, AIM-120 AMRAAM, AIM-132 ASRAAM)	dwuprzeplywowy, turbo-odrzutowy silnik Pratt & Whitney: wersja A (F135-PW-100 o ciągu 124,55 kN, z dopalaniem 191,3 kN), wersja B (F135-PW-600 o ciągu w zawiesz 180,8 kN), po rozkładzie gazów wylotowych na pojedynczą dyszę i wentylator (83,1 kN), dysze podskrzydłowe (14,6 kN), wersja C (F135-PW-400 o ciągu przybliżonym do F135-PW-100)

Model	Materiały konstrukcyjne	Obrys skrzydeł	Usterzenie	Podwozie	Uzbrojenie	Zespół napędowy
Suchoj T-50 PAK FA	materiały kompozytowe i żaroodporne (w fazie testów i dostosowania ich właściwości do charakteru operacyjnego T-50)	układ delta, górnopłat	zdwojone stateczniki pionowe i poziome	trójpodporowe, chowane w locie	strzeleckie: 1x działko pokładowe GSz-30-1 kal. 30 mm; podwieszane: kierowane pociski raketowe klasy powietrzno-powietrze krótkiego zasięgu RVV-MD i średniego zasięgu RVV-SD	dwuprzeplywowe, turbodrzutowe silniki Saturn-Liulka AL-41F1 o ciągu bez dopalania 86,3 kN i z dopalaniem 142,2kN, <b>docelowo</b> zespoły napędowe <i>Fazy II</i> NPO Saturn
Chengdu J-20 Black Eagle	materiały kompozytowe i żaroodporne (w fazie testów i dostosowania ich właściwości do charakteru operacyjnego J-20)	układ kaczki, układ delta, górnopłat	zdwojone stateczniki pionowe, stateczniki poziome (układ kaczki), trapezowe powierzchni aerodynamiczne	trójpodporowe, chowane w locie	planowane: 1x działko pokładowe, kierowane pociski raketowe klasy powietrzno-powietrze krótkiego, średniego i dalekiego zasięgu, samonaprowadzające, zaawansowane pociski manewrujące, bomby o niedużym wagomiarze	dwuprzeplywowe, turbodrzutowe silniki Saturn-Liulka AL-31F o ciągu bez dopalania 75,53 kN, i z dopalaniem 122,58 kN, <b>docelowo</b> zespoły napędowe WS-11 produkcji Xi'an Aero-Engine Corporation o ciągu bez dopalania 76 kN i z dopalaniem 180 kN

Źródło: opracowanie własne na podstawie pozycji wyszczególnionych w bibliografii.

## Zakończenie

Jednym z poruszonych w artykule aspektów w kontekście nowych technologii wykorzystanych do budowy samolotów bojowych jest nowatorski i dotychczas niestosowany sposób projektowania statków powietrznych, redukujący do minimum szczeliny pomiędzy połączeniami blach poszycia zewnętrznego. Ponadto rozpoczęto budowę platform o charakterystycznym trapezowym przekroju kadłuba i nachylonymi krawędziami bocznymi. Obie techniki miały służyć zmniejszeniu sygnatury radiolokacyjnej, a co za tym idzie – wyznaczyły kolejny stopień rozwoju technologii *stealth*.

Zauważono, że postęp technologiczny miał również wpływ na stosowane uzbrojenie. Środki napadu powietrznego są w większej części podwieszane w przystosowanych do tego komorach wewnętrznych wielozadaniowych konstrukcji. Celem niezmiennie pozostaje potrzeba rozpraszania emisji fal elektromagnetycznych, by jak najbardziej ograniczyć radiolokacyjne rozpoznanie. Lotnicze środki rażenia wykorzystywane w piątej generacji stanowią udoskonalone manewrujące pociski raketowe naprowadzane laserowo, termicznie lub na podczerwień, zwalniane z wnęk podkadłubowych.

Kolejnym kryterium zmian są użytkowane zespoły napędowe, na które postawiono szczególny nacisk na etapie ich budowy. Kluczowym i najnowocześniejszym rozwiązaniem, nadającym strukturom dodatkowe cechy wielozadaniowości, okazało się wektorowanie ciągu. Z sukcesem zastosowano je w najszerszym zakresie w F-35B Lightning II, wzbogacając platformę o zdolności STOVL. Dodatkowo dołożono starań, aby silniki posiadały zwiększony (względem konstrukcji lotniczych poprzednich generacji) ciąg właściwy. Doprowadziło to do osiągania prędkości *supercruise* i do tego, że przyrost przyspieszenia w przypadku użycia dopalania zwiększał się niemal dwukrotnie. Warto zauważyć, że nieustannie trwają prace nad poszukiwaniem i opracowaniem optymalnych jednostek napędowych rosyjskiej oraz chińskiej produkcji. Prawdopodobnie ta konieczność jest podyktowana potrzebą jak najbardziej efektywnego eksploataowania struktury, zwiększenia zasięgu operacyjnego lub zabezpieczenia przed pompazem.

## Bibliografia

- Cenciotti D., *All the weapons Russia's Sukhoi T-50 fighter jet is designed to carry in one infographic*, Military & Defense – Business Insider 2015, online – <http://www.businessinsider.com/all-the-weapons-russias-sukhoi-t-50-fighter-jet-is-designed-to-carry-in-one-infographic-2015-8?IR=T>.
- Chengdu J-20 – Chińczycy mają nowy niewidzialny supermyśliwiec piątej generacji. Całkowita dominacja USA w powietrzu zagrożona?*, online – <http://technowinki.onet.pl/lotnictwo/chengdu-j-20-chinczycy-maja-nowy-iewidzialny-supermyśliwiec-piatej-generacji/h9n69w>.
- F-35 Joint Strike Fighter (JSF) Lightning II*, online – <http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/f-35.htm>.
- F-35 JSF Weapon Carriage Capacity*, online – <http://www.aerospaceweb.org/question/planes/q0163.shtml>.
- Głowacki B., *Chińska zagadka w powietrzu*, „Raport” 2011, nr 1.
- Lockheed Martin F-35 “Lightning II”, 2006*, online – <http://www.samoloty.polskie.pl/samoloty/1655/126/Lockheed-Martin-F-35-Lightning-II2>.
- Myśliwce 5. generacji – stan na a.d. 2015*, online – <http://www.nowastrategia.org.pl/myśliwce-5-generacji-stan-na-a-d-2015/>.
- Nowe silniki dla T-50 PAK FA*, online – <http://www.nowastrategia.org.pl/nowe-silniki-dla-t-50-pak-fa/>.
- Szulc T., *Ewolucja chińskiego myśliwca J-20*, „Nowa Technika Wojskowa” 2014, nr 5.

# Rozwój technologii śmigłowcowej jako odzwierciedlenie potrzeb nowoczesnego pola walki

## Streszczenie

Zaprezentowany artykuł przedstawia rozwój technologii śmigłowcowej w aspekcie wymogów nowoczesnego pola walki oraz roli, jaką może spełnić w operacji zbrojnej, aby umożliwić lub przyspieszyć jej pomyślny przebieg. W pierwszej części skupiono się na zjawisku asymetrii jako czynniku kształtującym współczesny konflikt zbrojny, stawiającym przed lotnictwem śmigłowcowym często priorytetowe zadanie. Kolejny rozdział opisuje początki i rozwój techniki śmigłowcowej jako pomocniczego środka pola walki, który z czasem ewoluował do roli głównego środka transportu wojsk, zdolnego przełamywać wszelkie bariery geograficzne. W ostatnim rozdziale podjęto próbę odpowiedzi na pytanie, w jakim stopniu śmigłowiec determinuje powodzenie we współczesnych działaniach zbrojnych.

**Słowa kluczowe:** śmigłowiec, taktyka śmigłowcowa, konflikt asymetryczny.

## Wstęp

Śmigłowiec jako narzędzie prowadzenia działań zbrojnych już na stałe znalazł swoje miejsce na współczesnym polu bitwy. Specyfika konfliktów przełomu XX i XXI wieku sprawiła, że zaczęto odchodzić od klasycznego modelu „potęgi powietrznej” (*Airpower*) na rzecz rozwoju środków bezzałogowych (*Unmanned Aerial Vehicle* – UAV), systemów raketowych i śmigłowców. Według danych z 2009 roku duża ilość państw zredukowała swoją flotę samolotów wojskowych, odpowiednio: USA z 3002 do 2159, Chiny z 4600 do 2785, Niemcy z 360 do 269, Japonia z 360 do 263, Izrael z 449 do 335, co stanowi średnią wartość 3% w skali roku. W przypadku Federacji Rosyjskiej produkcja

samolotów spadła ze 100 w latach 1992–1997 do 2 w latach 2000–2007<sup>1</sup>. Wiadomym jest, że samolot przewyższa śmigłowce pod względem prędkości i możliwości ładunkowych. Gdzie więc szukać przyczyn takiego stanu rzeczy? Prawdopodobnie w uniwersalności i mobilności śmigłowców. Jak się okazuje – to, co stanowiło o dominacji w powietrznym wyścigu zbrojeń XX wieku (prędkość, ładowność statku powietrznego), niekoniecznie znajduje się na liście priorytetów w nowoczesnym konflikcie przeciwirebelianckim.

Samolot transportowy typu Boeing C-17 Globemaster III jest w stanie zabrać na pokład około 130 żołnierzy, czyli o 50 osób więcej niż najcięższy produkowany seryjnie śmigłowiec świata Mil Mi-26<sup>2</sup>. Pierwszy z wymienionych potrzebuje jednak prawie 2500 m rozbiegu, aby się wznieść w powietrze, drugi natomiast kilkudziesięciu metrów lądowiska, wyznaczanego według wytycznych z dokumentów normatywnych, zgodnie z którymi zapewniona musi być bezpieczna odległość łopat wirnika od przeszkód terenowych oraz odpowiednie ukształtowanie terenu. Przykładowo dla największego śmigłowca użytkowanego obecnie przez Wojsko Polskie – Mil Mi-8/17, rozmiary tego lądowiska wynoszą 50x50 m, jeżeli nie występują przeszkody na podejściu do lądowania<sup>3</sup>. Do tego śmigłowiec jest w stanie zapewnić desantującym się wojskom bezpośrednie wsparcie przy użyciu różnego rodzaju uzbrojenia, począwszy od broni ręcznej strzelców pokładowych do kierowanych pocisków raketowych zdolnych razić cele opancerzone. Śmigłowce zdolne są również do stawiania pól minowych oraz zasłon dymnych, co tylko dopełnia ich uniwersalności. Oczywistym jest fakt, że prowadzenie kompleksowych i dynamicznych działań zbrojnych wymaga od stron wykorzystania różnego rodzaju wyposażenia – floty ciężkich samolotów transportowych, myśliwskich, bombowych i śmigłowców wielozadaniowych. Niemniej jednak to śmigłowce w konfliktach ostatnich 60 lat pełniły główną rolę bezpośredniego środka oddziaływania na przeciwnika, wymuszając na nim opracowywanie skutecznych metod pokonywania ich.

W próbie porównania możliwości ładunkowych C-17 i Mi-26 pojedynek wygrywa ten pierwszy, jednakże akurat ta „zdolność”, „cecha” czy „parametr”

1 J.A. Olsen, *A History of Air Warfare*, Potomac Books, Washington D.C. 2010, s. 369–370.

2 <http://www.russianhelicopters.aero/en/helicopters/military/mi-26/features.html>.

3 *Śmigłowiec Mi-17. Metodyka szkolenia lotniczego, cz. I: Technika pilotowania i nawigowania*, Dowództwo Wojsk Lotniczych i Obrony Powietrznej, WLOP 146/93, Warszawa 1993, s. 191.



statku powietrznego, jaką jest ładowność, niekoniecznie znajduje odzwierciedlenie w dominujących potrzebach współczesnego konfliktu asymetrycznego. Zestrzelenie rosyjskiego Mi-26 przez czeczeńskich bojowników 19 sierpnia 2002 roku zdaje się potwierdzać te słowa. Należący do rosyjskich sił zbrojnych śmigłowiec transportował około 140 żołnierzy, znacznie przekraczając ograniczenia instrukcyjne. W wyniku trafienia go rakieta z ręcznego zestawu ziemia-powietrze 9K38 Igla i przymusowego lądowania na polu minowym w bazie Khankala pod stolicą Czeczenii – Groznym, życie straciło 127 osób<sup>4</sup>. Do tej pory jest to największa jednorazowa strata rosyjskich sił zbrojnych i największa katastrofa śmigłowcowa w historii. Sytuacja ta nasuwa pewne wnioski. Operowanie maszyn w bliskiej odległości od ziemi naraża je na ostrzał przenośnych zestawów rakietowych oraz broni strzeleckiej. Lądowanie na nieznanym i często niezabezpieczonym lądowisku zwiększa ryzyko strat w wyniku oddziaływania min lub improwizowanych ładunków wybuchowych. Komfort, jakim dysponuje słabsza strona konfliktu asymetrycznego, dotyczący możliwości sprawnego ukrycia się i wykorzystania ukształtowania terenu w celu zestrzelenia maszyny, skłania do wykorzystania większej ilości śmigłowców załadowanych mniejszą ilością desantu. Dlatego współczesne pole walki w konflikcie asymetrycznym zdominowały maszyny tzw. lekkie i średnie.

Celem tego artykułu jest przedstawienie historii rozwoju śmigłowca jako skutecznego środka walki i odpowiedź na pytanie badawcze: w jakim stopniu narzędzie pola walki, jakim jest śmigłowiec, determinuje powodzenie realizacji działań we współczesnym konflikcie zbrojnym?

## Asymetria jako czynnik kształtujący współczesne pole walki

Co rozumiemy pod pojęciem *konflikt asymetryczny*? Zasadą naczelną jego występowania jest „asymetria” walczących stron, kiedy do walki ze sobą stają „nierówni” przeciwnicy. Istniejące próby interpretacji poruszają kwestie polityczno-prawne, ekonomiczne czy militarne. Zdaniem prof. dr. hab. T. Szubrychta „konflikt jest asymetryczny jedynie wówczas, gdy strony konfliktu mają różny status prawnomiędzynarodowy (jedna ze stron nie jest podmiotem prawa

4 <https://www.theguardian.com/world/2004/apr/30/russia.chechnya> [dostęp: 16.06.2017].

międzynarodowego)”<sup>5</sup>. Na przykładzie wojny zimowej pomiędzy Związkiem Radzieckim a Finlandią na przełomie lat 1939 i 1940 ciężko jednak stwierdzić, że był to decydujący czynnik, który świadczył o zaistnieniu konfliktu zawierającego wszelkie znamiona asymetrii. Biorąc pod uwagę dysproporcję w ilości ciężkiego sprzętu, lotnictwa oraz żołnierzy biorących udział w walce, bliższy wyjaśnieniu interesującego nas terminu wydaje się aspekt militarno-taktyczny. Przewaga Związku Radzieckiego w samych tylko czołgach wynosiła minimum 23 do 1<sup>6</sup>. Kiedy jednak wydano rozkaz do ataku, szybko okazało się, że nieudolna kopia niemieckiego Blitzkriegu (z niem. wojna błyskawiczna) pod szyldem czerwonej gwiazdy, przygotowana z myślą o środkowoeuropejskim „polnym” krajobrazie, poprzecinanym siecią dróg i autostrad, niekoniecznie sprawdza się w zimowym, leśnym i jeziorno-bagiennym terenie. Czołgi takie jak T-26 czy ciężkie T-28 z trudem pokonywały każdy kilometr, gęste lasy utrudniały celne ataki z powietrza, natomiast radzieckie płaskotorowe armaty radziły sobie dużo gorzej w terenie zalesionym niż haubice i moździerze, w które głównie uzbrojeni byli obrońcy. Finowie wykorzystali ukształtowanie geograficzne swojego kraju i przeszli do walki podjazdowej, używając przy tym nart, kombinezonów maskujących, karabinów wyborowych, rusznic przeciwpancernych, koktajli Mołotowa i wielu innych środków walki, które zaskoczyły „wielkiego” przeciwnika.

Uwidocznia się tutaj bardzo ważna cecha wojny asymetrycznej, która znajduje potwierdzenie w słowach H. Münklera. Jego zdaniem wojna asymetryczna determinuje wzrost popularności form defensywnych w postaci strategii partyzanckich. Sukces wojny partyzanckiej nie musi się odnosić tylko do sukcesów militarnych. Według Münklera wystarczy jedynie „utrzymać nieusuwalny potencjał zagrożenia” poprzez ciągłe zaskakiwanie przeciwnika nowymi, mało popularnymi jeszcze sposobami, które nie mieszczą się w konwencjonalnym pojęciu wojny<sup>7</sup>.

Gdybyśmy sytuację z 1940 roku przenieśli w czasy bardziej współczesne, dość jasna i czytelna wydałaby się analogia do konfliktu wietnamskiego, afgańskiego przy udziale ZSRR i ISAF, czy też najnowszych wydarzeń na Bliskim Wschodzie i Ukrainie. Zmieniły się technologie użyte w walce,

5 T. Szubrycht, *Analiza podobieństw operacji militarnych innych niż wojna oraz działań pozwalających zminimalizować zagrożenia asymetryczne*, „Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej” 2006, nr 1(164), s. 141.

6 M. Kołomyjec, *Wojna zimowa 1939–1940*, Wyd. Militaria, Warszawa 2002, s. 7.

7 <https://wnpid.amu.edu.pl/files/119-128.pdf>, s. 121 [dostęp: 16.06.2017].

a głównym środkiem pokonania bariery terenowej stał się śmigłowiec. Na początku ograniczenia technologiczne powodowały jednak, że środek ten nie cieszył się zaufaniem pierwszych lotników i był on wykorzystywany na początku w wąskim zakresie. Odzwierciedlają to słowa pioniera lotnictwa Wilbura Wrighta z 1906 roku: „helikopter wykonuje z dużym wysiłkiem pracę, którą balon wykonuje bez wysiłku”<sup>8</sup>.

## Geneza powstania i rozwoju śmigłowca w roli środka pomocniczego pola walki

Pierwsza udana próba podniesienia wiroplatu wraz z pilotem do zawisu (stanu lotu, w którym nie występuje przemieszczenie się względem ziemi) została przeprowadzona w 1907 roku i trwała minutę. W 1924 roku w czasie lotu na maszynie Oehmichen No.2 ustanowiono nowy rekord, który trwał 7 minut 40 sekund. 12 lat później Gyroplane Laboratoire – konstrukcja z dwoma wirnikami w układzie współosiowym, wzbił się na wysokość 158 m<sup>9</sup>, przy długości lotu wynoszącej 1 godzinę i 2 minuty<sup>10</sup>. Kolejnym ważnym projektem był niemiecki wiatrakowiec firmy Focke-Wulf – oznaczony jako Fw 61. Ta oblatana 26 czerwca 1936 roku maszyna posiadała dwa wirniki o średnicy 6 m ustawione w układzie poprzecznym. W skład układu sterowania wchodziły natomiast: drążek sterowy, sterownice nożne (pedały) oraz układ sterowania skokiem łopat wirnika, czyli elementy znane współczesnym konstrukcjom. Śmigłowiec ten mógł wykonywać pełną autorotację, obrót w zawisie i wznieść się na wysokość 2439 m, co w czerwcu 1937 roku zostało zanotowane przez FAI jako nowy rekord wysokości lotu wiroplatu<sup>11</sup>. Jednak pierwszą maszyną, która konstrukcyjnie przypominała dzisiejsze śmigłowce, był amerykański Vought-Sikorsky VS-300. Zastosowano w nim układ tzw. klasyczny, czyli jeden wirnik nośny oraz eliminujące moment obrotowy śmigiełko ogonowe. Wersja rozwojowa tego śmigłowca – VS-316 (inaczej R-4), trafiła do seryjnej produkcji w 1943 roku, będąc tym samym pierwszym w historii śmigłowcem

8 K. Munson, *Helicopters and other rotorcraft since 1907*, Brandford Press, London 1973, s. 10.

9 <http://www.fai.org/fai-record-file/?recordId=13084> [dostęp: 16.06.2017].

10 <http://www.fai.org/fai-record-file/?recordId=13062> [dostęp: 16.06.2017].

11 R. Witkowski, *Rotorcraft of the Third Reich*, Mushroom Model Publications, Redbourn (UK) 2007, s. 17.

zamówionym przez rząd USA dla potrzeb US Army Air Forces oraz US Navy<sup>12</sup>. Był on wykorzystywany m.in. do ewakuacji pilotów zestrzelonych we wschodniej Azji w czasie II wojny światowej – 23 kwietnia 1944 roku załoga śmigłowca Sikorsky R-4 ewakuowała pilota oraz pasażerów samolotu, który rozbił się za linią nieprzyjaciela. Tym samym śmigłowcem dokonano także lądowania na pokładzie okrętu USS „Bunker Hill”. Już w listopadzie 1945 roku przeprowadzono pierwszą w historii akcję ratunkową z użyciem dźwigu pokładowego, kiedy to załoga śmigłowca Sikorsky R-5 ewakuowała załogę barki transportującej olej. Ratownicze i ewakuacyjne walory śmigłowców idealnie opisują słowa rzeczonoego wyżej Igora Sikorskiego: „Osobę potrzebującą pomocy samolot może co najwyżej obsypać kwiatami. Tylko maszyna zdolna do bezpośredniej ewakuacji jest w stanie ją ocalić”<sup>13</sup>.

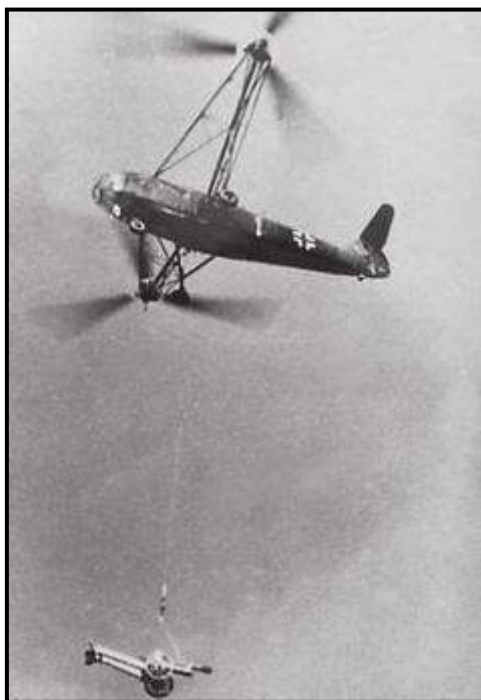
Bojowe i ratownicze walory silnikowych pionowzłotów jako pierwsi wykorzystali jednak Niemcy. Ich produkowany seryjnie od 1942 roku Flettner Fl 282 Kolibri znalazł swoje zastosowanie głównie w działaniach rozpoznawczych, operując z pokładów okrętów Kriegsmarine. Pełnił on także funkcje łącznikowe i kierowania ogniem artylerii. Jego zmodyfikowana wersja – Fl 285, mogła przenieść dwie pięciokilogramowe bomby<sup>14</sup>. W związku z produkcją silników o coraz większej mocy zaczęto przystosowywać wiropląty do przenoszenia ładunków zewnętrznych, uzbrojenia lub innych osób, w tym rannych. Drugim użytym bojowo śmigłowcem w historii był dwumiejscowy Focke-Achgelis Fa 223 Drache. Ta niemiecka konstrukcja, oblatana we wrześniu 1939 roku, posiadała dwa wirniki w układzie poprzecznym i jako pierwsza została użyta w działaniach, których specyfika ma odniesienie we współczesnym konflikcie asymetrycznym. Ważne są tu dwa podmioty – mobilność oraz trudny teren. Fa 223 V16 pokonał te bariery we wrześniu 1944 roku w trakcie prób w Alpach austriackich w rejonie Mittenwald, przynosząc na podwieszeniu zewnętrznym działo o wagomiarze 840 kg na wzniesienie o wysokości 2800 m. Normalnie operacja ta zajęłaby 36 godzin przy udziale 20 osób. Śmigłowiec wykonał także pierwsze w Europie misje ratunkowe w górach<sup>15</sup>. Możliwości transportowe tego wiroplątu przedstawia fotografia 8.

12 [http://www.sikorskyarchives.com/pdf/news%202013/Sikorsky\\_Jan28%2013\\_%205.pdf](http://www.sikorskyarchives.com/pdf/news%202013/Sikorsky_Jan28%2013_%205.pdf) [dostęp: 16.06.2017].

13 W. Mateja, *Ratownictwo z powietrza w Tatrach. Podręcznik śmigłowcowych technik ratowniczych*, Wyd. Stapis, Katowice 2013, s. 8.

14 K. Munson, *Helicopters...*, op. cit., s. 113.

15 R. Witkowski, *Rotorcraft...*, op. cit., s. 44.



Źródło: <https://pl.pinterest.com/pin/362821313707397367/> [dostęp: 05.04.2017].

*Fot. 8. Focke-Achgelis Fa 223 Drache w trakcie transportu działa*

## Śmigłowiec jako czynnik determinujący powodzenie współczesnej operacji powietrzno-lądowej

Po zakończeniu II wojny światowej zwycięskie państwa, korzystając z własnych doświadczeń oraz wyników testów na przejętych od Niemców konstrukcjach, rozpoczęły prace nad nowymi śmigłowcami. Już w latach 1950–1953 w trakcie konfliktu między USA a Koreą Północną śmigłowce wykazały wysoką skuteczność w dziedzinie powietrznego transportu wojsk oraz ewakuacji medycznej. Przykład działania ratowniczego w trudnych warunkach morskich przedstawia fotografia 9.

Głównodowodzący 8 Armią USA w Korei – gen. Matthew B. Ridgway, w uznaniu możliwości śmigłowców złożył zamówienie na cztery bataliony transportu powietrznego, z których każdy miał się składać z 280 maszyn.

Docelowo liczbę tę planował podnieść do 2800 sztuk<sup>16</sup>. Jego wizja zwiększenia mobilności wojsk poprzez masowy transport śmigłowcowy w trudnym terenie znalazła swoje odzwierciedlenie w konflikcie francusko-algierskim w latach 1954–1962 oraz interwencji USA w Wietnamie. Pierwszy z nich wniósł zupełnie nowe rozwiązania zarówno pod względem taktycznym, jak i organizacyjnym. Śmigłowce przestały „uzupełniać” działania innych wojsk i stały się równorzędnym narzędziem do osiągnięcia celu wojennego, tak jak samolot, środki transportu kołowego czy gąsienicowego.



Źródło: <http://aviationclub.aero/article/view/4980/> [dostęp: 05.04.2017].

*Fot. 9. Śmigłowiec Piasecki HUP-2 podejmujący rozbitka na Oceanie Atlantyckim w pobliżu lotniskowca eskortowego USS „Block Island” (CVE 106)*

W 1955 roku Francuzi posiadali w Algierii zaledwie 18 śmigłowców. Pod koniec wojny w 1962 roku było ich już ponad 600, m.in. Piasecki H-21 Shawnee, Sikorsky H-19 Chickasaw czy Alouette<sup>17</sup>. Po raz pierwszy użyto śmigłowców w roli wsparcia powietrznego (tzw. *gunship*), uzbrajając je,

<sup>16</sup> J.A. Olsen, *A History...*, op. cit., s. 104.

<sup>17</sup> C.R. Shrader, *The first helicopter war. Logistics and mobility in Algeria, 1954–1962*, Praeger, London 1999, s. 77.

i dając tym samym możliwość oddziaływania na przeciwnika z góry. Równie istotny był aspekt organizacyjny. Francuskie dowództwo sił powietrznych operujących w Algierii podlegało bezpośrednio szefowi sztabu, podobnie jak dowództwo wojsk lądowych. Większość statków powietrznych weszła w skład 101 Lekkiej Grupy Lotniczej Armii (*Groupement d'Aviation Legere de L'Armee de Terre 101 – GALAT 101*), w której wydzielono 2 Grupę Śmigłowców (*Groupe d'Helicopteres No. 2 – GH 2*). Śmigłowce operowały przede wszystkim w małych ugrupowaniach, tzw. śmigłowcowych grupach interwencyjnych (*Detachements d'Intervention Helicoptere – DIH*). Składały się one z 7 lub 8 maszyn, przeważnie 7 transportowych H-21 i 1 Alouette do zadań rozpoznawczych lub dowodzenia. Tak zorganizowana komórka mogła przerzucić kompanię wojska w dwóch rzutach<sup>18</sup>. Rozwiązania te znacznie wpłynęły na poprawę skuteczności prowadzonych przez Francuzów działań w trudnych warunkach górskich i pustynnych, tym samym osłabiając siłę partyzantów z FLN Front de Libération Nationale (FLN). Wojna ta, nazywana „pierwszą wojną śmigłowcową”, zmieniła na zawsze oblicze prowadzenia działań powietrzno-lądowych.

Amerykanie, wyciągając wnioski z konfliktu koreańskiego oraz algierskiego, stworzyli w 1965 roku 1 Dywizję Kawalerii Powietrznej (1st Air Cavalry Division), czyli w pełni samodzielny związek taktyczny, którego głównym środkiem transportu został śmigłowiec. W trakcie amerykańskich działań przeciwpartyzanckich w trudnym terenie, które zakończyły się w 1975 roku, łącznie wzięło udział 11 827 śmigłowców różnego typu oraz 40 000 pilotów<sup>19</sup>.

Rewolucja technologiczna, jaką było wprowadzenie silnika turbinowego, spowodowała zwiększenie maksymalnego udźwigu śmigłowców, dzięki czemu jedna maszyna mogła zabierać pluton wojsk lub zestawy artyleryjskie na podwieszeniu zewnętrznym. Do użycia weszły śmigłowce bojowe Bell AH-1 Cobra wyposażone w pociski rakietowe i powietrzne dźwigi Sikorsky CH-54 Tarhe, zdolne do transportu ładunku o wagomiarze 12 ton. Z tego okresu pochodzi również największy wyprodukowany śmigłowiec w historii – radziecki Mil Mi-12, wyposażony w cztery silniki po 6500 KM każdy. Ustanowił on w 1969 roku aktualny rekord świata w udźwigu przez śmigłowiec – 44 205 kg<sup>20</sup>.

18 J.A. Olsen, *A History...*, op. cit., s. 338.

19 <http://www.vhpa.org/heliloss.pdf> [dostęp: 16.06.2017].

20 [http://www.aviastar.org/helicopters\\_eng/mi-12.php](http://www.aviastar.org/helicopters_eng/mi-12.php) [dostęp: 16.06.2017].

Rosjanie skupili się jednak głównie na rozwoju średnich śmigłowców transportowych i bojowych, które zostały poddane próbie w wojnie afgańskiej w latach 1979–1989. Radziecka 40 Armia straciła podczas interwencji łącznie 333 maszyny, głównie Mil Mi-8 oraz Mil Mi-24<sup>21</sup>. W trakcie tej wojny, posiadającej wszelkie cechy konfliktu asymetrycznego, śmigłowce udowodniły swoją przydatność w pokonywaniu wszelkich barier terenowych, zaopatrując wysoko położone posterunki, ewakuując rannych lub wysadzając grupy sił szybkiego reagowania w trudno dostępnym terenie.

Współczesne konflikty pokazały, że prowadzenie nowoczesnych, dynamicznych działań zbrojnych wymaga użycia śmigłowców. Podstawą sukcesu jest manewr oraz czas reakcji (uprzedzenie działań przeciwnika) przy wzroście znaczenia działań powietrznych i zgrania komponentów.

Dzięki takim czynnikom, jak: zaskoczenie, mobilność, skrytość, siła ognia, atak z powietrza, śmigłowce są w stanie skutecznie wykonywać operacje specjalne oraz antyterrorystyczne, do samego końca utrzymując przeciwnika w stanie niewiedzy o przeprowadzanych działaniach. Zaskoczenie jest głównym atutem przeciwko wrogowi, który wykorzystuje swój teren, aby się ukryć. Fotografia 10 przedstawia technikę tzw. grubej linii, która umożliwia dynamiczne wysadzenie desantu w trudnym terenie bez konieczności przyziemienia śmigłowca. Jest to jedna z technik wykorzystywanych w działaniach kontrterrorystycznych, zapewniających zaskoczenie przeciwnika.

Potwierdzeniem powyższych założeń mogą być operacje Wielkiej Brytanii na Falklandach w 1982 roku, udział USA w inwazji na Grenadę w 1983 roku, operacja „Pustynna Burza” w 1991 roku, działania w Iraku prowadzone od 2003 roku, w Afganistanie od 2001 roku czy obecnie w Syrii. Większość tych konfliktów miała charakter wojny asymetrycznej. Przeciwnik wykorzystywał teren oraz niekonwencjonalne metody walki w celu pokonania silniejszego napastnika. Śmigłowiec jako narzędzie prowadzenia działań zbrojnych nie był głównym i jedynym determinantem ich powodzenia, jednakże z pewnością przyczynił się do ograniczenia strat, zmniejszenia zaangażowanych środków walki oraz przyspieszył realizację stawianych zadań.

21 R. Braithwaite, *Afgańcy. Ostatnia wojna imperium*, Wyd. Znak, Kraków 2012, s. 235.





Źródło: [http://17wbz.wp.mil.pl/pl/1\\_672.html](http://17wbz.wp.mil.pl/pl/1_672.html) [dostęp: 05.04.2017].

*Fot. 10. Polski śmigłowiec Mil Mi-17 należący do 25 Brygady Kawalerii Powietrznej w trakcie wysadzania desantu za pomocą techniki tzw. grubej liny*

Doświadczenia Amerykanów z operacji „Desert Storm” w Iraku w 1991 roku pokazały, że pojedyncze śmigłowce szturmowe są w stanie eliminować całe kolumny czołgów, co potwierdzało ideę ich masowej produkcji jeszcze w czasach zimnej wojny. Podczas interwencji ISAF w Afganistanie po roku 2003 śmigłowce koalicji bardzo sprawnie eliminowały zagrożenia ze strony uzbrojonych bojowników zarówno w dzień, jak i w nocy dzięki wykorzystaniu odpowiedniej aparatury termo- i noktowizyjnej.

Jak pokazują materiały filmowe z przeprowadzonych operacji, śmigłowce uderzeniowe, takie jak Boeing AH-64 Apache, wykonywały skuteczne ataki z powietrza na nieświadomych ich obecności bojowników Al-Kaidy. Fotografia 11 przedstawia zobrazowanie głowicy FLIR jednego z dwóch amerykańskich śmigłowców Apache w trakcie wsparcia żołnierzy sił specjalnych w Afganistanie. W wyniku tej akcji wyeliminowano 20 bojowników zamierzających przeprowadzić zasadzkę na siły koalicji. Jak wynika z materiału filmowego, rebelianci nie mieli świadomości obecności śmigłowców, które znajdowały się w bezpiecznej odległości i rozpoczęły celny ostrzał z broni raketowej oraz działka 30 mm. Materiał ten pokazuje, jak skuteczną bronią może być śmigłowiec na współczesnym polu bitwy. Dysponując szeroką gamą

uzbrojenia (działka, niekierowane i kierowane pociski rakietowe, bomby czy miny), załoga śmigłowca jest w stanie zarówno w dzień, jak i w nocy zlikwidować zagrożenie ze strony siły żywej oraz pojazdów opancerzonych, zanim zostanie wykryta.



Źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=G1Ho5DzUC7g> [dostęp: 29.03.2017].

*Fot. 11. Podgląd z kamery termowizyjnej podczas uderzenia na ugrupowanie bojowników Al-Kaidy*

Świadomość poziomu efektywności śmigłowców w działaniach zbrojnych mogą potwierdzić również dane dotyczące wzrostu ich produkcji w ostatnich latach. Szacuje się, że w latach 2010–2017 sprzedaż eksportowa nowych śmigłowców wojskowych osiągnęła liczbę 3080 sztuk o łącznej wartości około 103 mld USD. Największy wzrost odnotowano w sektorze zamówień na śmigłowce uderzeniowe. Ocenia się, że średnioroczne zapotrzebowanie na wiropląty tego typu w latach 2010–2013 wynosiło 23 sztuki, natomiast w latach 2010–2017 osiągnęło liczbę 102 sztuk, co oznacza wzrost o 345%<sup>22</sup>. Według szacunków produkcja tego typu wzrośnie o kolejne 5% w latach 2017–2021.

<sup>22</sup> [http://militarium.net/index-phoptioncom\\_contentviewarticleid5rynek-migowcow-w-latach-2010-2017catid1armieitemid2/](http://militarium.net/index-phoptioncom_contentviewarticleid5rynek-migowcow-w-latach-2010-2017catid1armieitemid2/) [dostęp: 16.06.2017].

Przodującymi firmami w produkcji śmigłowców szturmowych są: Airbus Helicopters, Boeing, Bell Helicopter oraz HAL<sup>23</sup>.

Podobną tendencję zauważamy w przypadku zamówień i produkcji śmigłowców morskich przeznaczonych do zwalczania okrętów podwodnych oraz patrolowych. Prognozowany wzrost przypadający na lata 2013–2017 wynosił 78,65% w porównaniu do lat 2010–2013 – z 22 do 40 maszyn rocznie. Podobne wyniki odnotował rynek ciężkich śmigłowców transportowych – wzrost z 5 do 19 maszyn w skali roku<sup>24</sup>.

## Zakończenie

Przytoczone dane wydają się jasno wskazywać, jak ważną rolę na współczesnym polu walki odgrywa śmigłowiec. Wydaje się wręcz niemożliwe, aby prowadzić nowoczesne, kompleksowe działania zbrojne, pomijając ten środek walki. Wysoka wydajność i skuteczność w prowadzeniu różnego rodzaju operacji, począwszy od ewakuacji rannych, poprzez eliminację broni pancerniej, do transportu sił specjalnych podczas operacji typu DA (*Direct Action* – akcje bezpośrednie), powoduje, że ten typ statku powietrznego znajduje szerokie uznanie i zastosowanie w trakcie planowania i realizacji działań militarnych, również w ujęciu perspektywicznym.

Pomimo rozwoju i wykorzystywania coraz większej ilości środków bezzałogowych nic nie wskazuje na to, by w najbliższym czasie ilość śmigłowców była zredukowana. Wręcz przeciwnie – śmigłowiec w swojej klasycznej formie (II–IV generacja) wciąż jest masowo produkowany i wdrażany do armii wszystkich wiodących militarnie krajów świata, z uwzględnieniem potrzeb modernizacyjnych, takich jak nowoczesna awionika, systemy obrony czynnej i biernej czy środki ognia. Przykładem może tu być Bell AH-1Z Viper, czyli najmłodszy członek rodziny amerykańskiego śmigłowca szturmowego typu Cobra. Pierwszy model – AH-1G, został dostarczony do armii amerykańskiej w 1967 roku, najnowsza wersja – AH-1Z, została oblatana w 2000 roku i jej dostawy mają potrwać do 2019 roku. Podobnie wygląda sytuacja śmigłowca transportowego Sikorsky CH-53 – konstrukcji z początku lat 60. Jego

<sup>23</sup> <https://www.technavio.com/report/global-defense-global-attack-helicopter-market-2017-2021> [dostęp: 16.06.2017].

<sup>24</sup> [http://militarium.net/index-phoptioncom\\_contentviewarticleid5rynek-migowcow-w-latach-2010-2017catid1armieitemid2/](http://militarium.net/index-phoptioncom_contentviewarticleid5rynek-migowcow-w-latach-2010-2017catid1armieitemid2/) [dostęp: 16.06.2017].

najnowsza wersja – CH-53K, określona jako King Stallion, została oblatana w 2015 roku, a dostawy mają potrwać do 2021 roku<sup>25</sup>.

Jak widać, Amerykanie odeszli od planów masowej produkcji śmigłowców tzw. piątej generacji, wykorzystujących technologię *stealth* (z ang. skradanie się). Przykładem jest tu Boeing-Sikorsky RAH-66 Comanche, w którym zastosowano kompozyty na bazie włókna węglowego i kevlaru w postaci jednolitego materiału przekładkowego. Oprócz wzmocnienia konstrukcji w śmigłowcu tym zastosowano również inne rozwiązania, mające na celu utrudnienie wykrycia go przez nasłuch, radar i głowice termoaktywne. W celu zmniejszenia hałasu zamontowano sztywny pięciopłatowy wirnik o średnicy 11,9 m oraz zabudowane śmigło ogonowe typu fenestron. Zastosowanie w pokryciu płatowca materiałów absorbujących fale radarowe (*radiation-absorbent material* – RAM) zmniejszyło sygnaturę radarową, obniżając tym samym możliwość wykrycia przez stacje radiolokacyjne. Aby utrudnić zlokalizowanie śmigłowca jako źródła promieniowania podczerwonego, zastosowano układ chłodzenia spalin, a układ napędowy umieszczono wewnątrz kadłuba. Pomimo wysokiego stopnia zaawansowania konstrukcji program *Comanche* został zawieszony w 2004 roku po wyprodukowaniu zaledwie dwóch prototypów. Powodem była wysoka cena<sup>26</sup>.

Co jakiś czas pojawiają się informacje o pracach nad rosyjskim śmigłowcem nowej generacji<sup>27</sup>. Niewykluczone również, że Amerykanie są aktualnie w posiadaniu śmigłowców *stealth* wykorzystywanych w operacjach specjalnych<sup>28</sup>. Niemniej jednak pierwszy przypadek odnosi się do faz projekcyjnych, a drugi (zakładając jego pozytywną weryfikację) dotyczyłby tylko marginalnej części wiropłatów wykorzystywanych w celach militarnych. Ze względu na niższą cenę oraz dowiedzioną skuteczność na polu walki najczęściej wykorzystywaną formą pionowzlotów pozostają śmigłowce poprzednich generacji. Odpowiadając na postawione na początku pytanie badawcze (w jakim stopniu narzędzie pola walki, jakim jest śmigłowiec, determinuje powodzenie realizacji działań we współczesnym konflikcie zbrojnym?), można stwierdzić, że w dużym. Nie jest to czynnik decydujący, gdyż pomysłność operacji zależy

25 [http://www.aviationtoday.com/?s=rw/commercial/eng/Rotorcraft-Report\\_7571.html](http://www.aviationtoday.com/?s=rw/commercial/eng/Rotorcraft-Report_7571.html) [dostęp: 16.06.2017].

26 <http://www.army-technology.com/projects/comanche/> [dostęp: 16.06.2017].

27 <http://www.defence24.pl/41443,rosja-pracuje-nad-smiglowcem-szturmowym-5-generacji> [dostęp: 16.06.2017].

28 <https://theaviationist.com/category/stealth-black-hawk/> [dostęp: 16.06.2017].

często od zgrania wielu komponentów. Niemniej jednak, biorąc pod uwagę mobilność, skrytość i wszechstronność tych maszyn, realizacja zadań byłaby bez nich w znacznym stopniu utrudniona lub wymagałaby dużo większego nakładu sił i środków.

### Bibliografia

- Braithwaite S., *Afgańcy. Ostatnia wojna imperium*, Wyd. Znak, Kraków 2012.  
[http://militarium.net/index-phppoptioncom\\_contentviewarticleid5rynek-migowcow-w-latach-2010-2017catid1armieitemid2/](http://militarium.net/index-phppoptioncom_contentviewarticleid5rynek-migowcow-w-latach-2010-2017catid1armieitemid2/).  
<http://www.army-technology.com/projects/comanche/>.  
<http://www.aviastar.org>.  
[http://www.aviationtoday.com/?s=rw/commercial/eng/Rotorcraft-Report\\_7571.html](http://www.aviationtoday.com/?s=rw/commercial/eng/Rotorcraft-Report_7571.html).  
<http://www.defence24.pl/41443,rosja-pracuje-nad-smiglowcem-szturmowym-5-generacji>.  
<http://www.fai.org>.  
<http://www.russianhelicopters.aero/en/helicopters/military/mi26/features.htm>.  
[http://www.sikorskyarchives.com/pdf/news%202013/Sikorsky\\_Jan28%2013\\_%205.pdf](http://www.sikorskyarchives.com/pdf/news%202013/Sikorsky_Jan28%2013_%205.pdf).  
<http://www.vhpa.org/heliloss.pdf>.  
<https://theaviationist.com/category/stealth-black-hawk/>.  
<https://wnpid.amu.edu.pl/files/119-128.pdf>.  
<https://www.technavio.com/report/global-defense-global-attack-helicopter-market-2017-2021>.  
<https://www.theguardian.com>.  
Kołomyjec M., *Wojna zimowa 1939–1940*, Wyd. Militaria, Warszawa 2002.  
Mateja W., *Ratownictwo z powietrza w Tatrach. Podręcznik śmigłowcowych technik ratowniczych*, Wyd. Stapis, Katowice 2013.  
Munson K., *Helicopters and other rotorcraft since 1907*, Brandford Press, London 1973.  
Olsen J.A., *A History of Air Warfare*, Potomac Books, Washington D.C. 2010.  
Shrader C.R., *The first helicopter war. Logistics and mobility in Algeria, 1954–1962*, Preager, London 1999.  
Szubrycht T., *Analiza podobieństw operacji militarnych innych niż wojna oraz działań pozwalających zminimalizowanie zagrożenia asymetryczne*, „Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej” 2006, nr 1(164).  
Śmigłowiec Mi-17. *Metodyka szkolenia lotniczego*, cz. I: *Technika pilotowania i nawigowania*, Dowództwo Wojsk Lotniczych i Obrony Powietrznej, WLOP 146/93, Warszawa 1993.  
Witkowski R., *Rotorcraft of the Third Reich*, Mushroom Model Publications, Redbourn (UK) 2007.

# Technologie, techniki i wyposażenie stosowane przez wysuniętych nawigatorów naprowadzania lotnictwa (WNNL) – *Joint Terminal Attack Controller (JTAC)*

## Streszczenie

W artykule scharakteryzowano technologie i techniki oraz wyposażenie techniczne wykorzystywane przez wysuniętych nawigatorów naprowadzania lotnictwa (WNNL). W ramach technologii opisano symulatory oraz szkolenie symulatorowe na urządzeniach ARTMACS i VBS 2. Dokonano charakterystyki i porównania wyposażenia używanego przez WNNL, do którego należą: wskaźniki podczerwieni, dalmierze laserowe, naziemne systemy podświetlania celów, wozy dowodzenia, odbiorniki GPS, radiostacje oraz zdalnie sterowane odbiorniki wideo. Całość pracy – w celu lepszego zrozumienia specyfiki działania – poprzedzono opisem standardów i technik w szkoleniu JTAC (Joint Terminal Attack Controller) wykonujących swoje zadania głównie w ramach Centralnej Grupy Taktycznych Zespołów Kontroli Obszaru Powietrznego (CG TZKOP).

**Słowa kluczowe:** bliskie wsparcie lotnicze (*Close Air Support – CAS*), wysunięty nawigator naprowadzania lotnictwa (*Joint Terminal Attack Controller – JTAC*).

## Wstęp

Zapewnienie powodzenia misji lotniczej, zniszczenia celu w bliskim kontakcie wojsk własnych<sup>1</sup> wymaga wysokiego poziomu wyszkolenia pilota, ale także wysuniętego nawigatora naprowadzania lotnictwa (WNNL). Za pomocą in-

<sup>1</sup> Zob. *Bezpośrednie wsparcie lotnicze i izolacja lotnicza w operacji połączonej – DD 3.2.2(A)*, Centrum Doktryn i Szkolenia Sił Zbrojnych, Bydgoszcz 2014, s. 1–2; *Joint Publication 3–09.3 Close Air Support*, 25 November 2014; *ATP-3.3.2.1(C), Tactics, Techniques and Procedures for Close Air Support and Air Interdiction*, 2011, s. 1–2.

formacji, które od niego uzyskuje, pilot może ustalić, że wystrzelony ładunek precyzyjnie uderzy we wrogi cel, nie rażąc własnych wojsk. JTAC (*Joint Terminal Attack Controller*) – bo takie sformułowanie jest praktycznie używane w odniesieniu do wysuniętego nawigatora naprowadzania lotnictwa – wydaje zgodę na wykonanie uderzenia, czyli otwarcia ognia przez załogę lub operatora statku powietrznego. Zanim to jednak nastąpi, wykonuje szereg zadań, które pomagają w namierzeniu i identyfikacji celu. Po pozytywnie przeprowadzonej identyfikacji z załogą statku powietrznego JTAC podaje pilotowi (lub operatorowi UAS<sup>2</sup>) szereg informacji, zgodnie ze ściśle określonymi procedurami<sup>3</sup>, dzięki którym pilot rozpoznaje cel. Do właściwej realizacji zadań niezbędne jest zaawansowane wyposażenie, oparte na najnowszych technologiach. Oczywiście cała korespondencja odbywa się w języku angielskim, z użyciem frazeologii lotniczej.

Inspiracją do przeprowadzenia badań naukowych na potrzeby opracowania artykułu było znalezienie odpowiedzi na problem badawczy wygenerowany w postaci pytania: jakie są technologie, techniki i wyposażenie stosowane do szkolenia i realizacji zadań wysuniętych nawigatorów naprowadzania lotnictwa? Podstawową techniką w badaniach empirycznych było zastosowanie wywiadu eksperckiego.

## Miejsce TZKOP w strukturach dowodzenia

W 2012 roku w 1 Brygadzie Lotnictwa Wojsk Lądowych w Inowrocławiu została sformowana Centralna Grupa Taktycznych Zespołów Kontroli Obszaru Powietrznego (CG TZKOP), w której skład wchodzi personel wraz z wysuniętymi nawigatorami JTAC. Jest ona odpowiedzialna za pomoc dowódcy komponentu lądowego w użyciu bliskiego wsparcia powietrznego CAS (*Close Air Support*)<sup>4</sup>. Centralna Grupa TZKOP dysponuje 22 zespołami operacyjnymi<sup>5</sup>, które mają wspierać brygady, bataliony i kompanie wchodzące głównie w skład 11 i 12 Dywizji. W przypadku zaistnienia konieczności mogą być

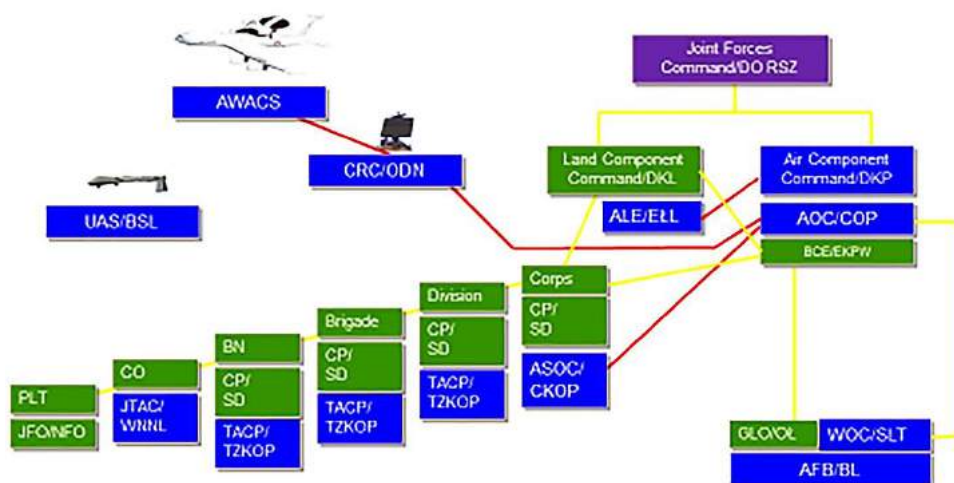
2 Bezzałogowe systemy powietrzne – UAS (*Unmanned Aircraft Systems*).

3 Procedury określone w *Standardized Briefing*, znane również jako *9-line briefig*, używane zarówno przez lotnictwo śmigłowcowe RW (*Rotary Wing*), jak i statki powietrzne uzyskujące siłę nośną dzięki skrzydłom FX (*Fixed Wing*).

4 Zob. *ATP-3.3.2.1(C), Tactics, Techniques...*, op. cit., s. 2–14.

5 Zgodnie ze stanem ustalonym od 2017 roku.

również skierowane do innych komórek i jednostek spoza wspomnianych dywizji. Dzięki temu zostaną utrzymane standardy wyszkolenia narzucone naszym siłom zbrojnym przez NATO. Ponadto zapewni to ciągłość dowodzenia lotnictwem wspierającym działania wojsk lądowych na wszystkich szczeblach (rys. 18). „Naprowadzacze” służą nie tylko w wojskach lądowych, ale także w wojskach specjalnych oraz w Ośrodku Szkolenia Personelu TZKOP w Dęblinie<sup>6</sup>.



JFC – Joint Forces Command / DO RSZ – dowództwo operacyjne RSZ  
 LCC – Land Component Command / DKL – dowództwo komponentu lądowego  
 ACC – Air Component Command / DKP – dowództwo komponentu powietrznego  
 ASOC – Air Support Operations Center / CKOP – centrum koordynacji operacji powietrznych  
 CRC – Control and Reporting Centre / ODN – ośrodek dowodzenia i naprowadzania  
 ALE – Air Liason Element / ELL – element łącznikowy lotnictwa  
 BCE – Battlefield Coordination Element / EKPW – element koordynacji pola walki  
 GLO – Ground Liason Officer / OŁ – oficer łącznikowy  
 TACP – Tactical Air Control Party / TZKOP – taktyczny zespół kontroli obszaru powietrznego  
 JFO/NFO – Joint Fires Observer / National Fires Observer – obserwator ognia połączony

Źródło: materiały OSzP TZKOP Dęblin.

Rys. 18. Komórki TZKOP w strukturze dowodzenia w operacjach połączonych

6 M. Kowalska-Sendek, *Między ziemią a niebem*, „Polska Zbrojna”, online – <http://www.polska-zbrojna.pl/home/articleinmagazineshow/5104?t=MIEDZY-ZIEMIA-A-NIEBEM> [dostęp: 04.06.2017].



## Standaryzacja w procesie dydaktycznym JTAC

W 2007 roku w Wyższej Szkole Oficerskiej Sił Powietrznych w Dęblinie utworzono Ośrodek Szkolenia Personelu TZKOP (OSzP TZKOP) w celu zapewnienia zgodnego z obowiązującymi standardami NATO szkolenia WNNL oraz pilotów wykonujących misję bezpośredniego wsparcia lotniczego. Na podstawie umowy między ministrem obrony narodowej Rzeczypospolitej Polskiej a ministerstwem obrony Republiki Łotwy (o wzajemnym wsparciu szkolenia wysuniętych nawigatorów naprowadzania lotnictwa) Ośrodek Szkolenia Personelu TZKOP w Dęblinie funkcjonuje od 2013 roku jako ośrodek z międzynarodową obsadą. W etacie figurują stanowiska obsadzone przez instruktorów lotewskich. W wyniku wizytacji przeprowadzonej pozytywnie w 2014 roku przez połączony zespół NATO FAC Capability Section oraz US Joint Fire Support Executive Steering Committee ośrodek uzyskał akredytację<sup>7</sup> i jest bardzo atrakcyjną instytucją szkoleniową dla wszystkich państw utrzymujących w swoich siłach zbrojnych specjalność wysuniętego nawigatora naprowadzania lotnictwa<sup>8</sup>. Kolejnym atutem ośrodka jest profesjonalnie wyposażona baza szkoleniowa z profesjonalnymi symulatorami. Dzięki temu zapewniane jest szkolenie JTAC-ów, podnoszenie kwalifikacji specjalistów w korpusie zarówno oficerskim, jak i podoficerskim. OSzP TZKOP prowadzi także kursy instruktorsko-metodyczne oraz szkoli personel taktycznych zespołów kontroli obszaru powietrznego i załogi lotnicze wykonujące misje bezpośredniego wsparcia lotniczego (CAS). OSzP TZKOP prowadzi następujące kursy na potrzeby wszystkich rodzajów sił zbrojnych<sup>9</sup>:

- wysuniętych nawigatorów naprowadzania lotnictwa (*JTAC IQC Initial Qualification Course*),
- metodyczny dla WNNL (*Methodology Course*),
- personelu TZKOP (*TACP Personel Course*),
- bezpośredniego wsparcia lotniczego dla pilotów (*CAS for Pilots Course*),
- frazeologii lotniczej z zakresu naprowadzania na cele naziemne (*Radio Comms & CAS Phraseology Course*),
- wysuniętych obserwatorów ognia (*Forward Observers Course*) z zakresu CAS przy współpracy z Centrum Szkolenia Artylerii i Uzbrojenia w Toruniu.

7 Ośrodek w Dęblinie posiada akredytację NATO oraz USA, dlatego szkolenie odbywa się zgodnie z normami NATO zawartymi w *ATP-3.3.2.1(C)* oraz normami USA zawartymi w *JFMoA (Joint Fire Memorandum of Agreement)*.

8 Na podstawie strony źródłowej WSOSP w Dęblinie, online – <http://www.wsosp.pl/index.php/pl/o-osptzkop> [dostęp: 13.04.2017].

9 *Joint Publication 3-09.3...*, op. cit., s. 2–10.

Proces dydaktyczny w Dęblinie prowadzony jest zgodnie z wytycznymi zawartymi w STANAG 3797 edycji IV i porozumieniem podpisanym w 2011 roku przez szefa Sztabu Generalnego WP (*Joint Close Air Support Action Plan Memorandum of Agreement – JCAS MoA*). W dokumentach tych określono wymagania stawiane certyfikowanym JTAC-om, przy czym JCAS MoA nakłada wymagania wyższe. Według tego porozumienia nawigator powinien wykonywać naprowadzenia w reżimie półrocznym. Istotne są też rodzaje wymaganych naprowadzeń: dwa – gdy JTAC w chwili ataku widzi samolot oraz cel<sup>10</sup>, jedno – gdy JTAC może, ale nie musi widzieć samolotu i celu<sup>11</sup>; trzy naprowadzenia z samolotem bojowym, jedno z wykorzystaniem laserowego wskaźnika celu, jedno z użyciem uzbrojenia, jedno w nocy i dwa podczas prowadzenia misji o dużym zagrożeniu dla statku powietrznego z ziemi.

Koszt wyszkolenia jednego żołnierza JTAC to ponad 800 tys. złotych<sup>12</sup>, żeby zaś podtrzymać jego kwalifikacje, rocznie trzeba wydać jeszcze ponad 200 tys. (tab. 3).

**Tabela 3. Kosztorys wyszkolenia i utrzymania uprawnień JTAC**

Przedsięwzięcie	Etapy szkolenia	Koszt szkolenia (w PLN)	
		Wyszkolony WNNL	Kandydat na WNNL
Szkolenie językowe zgodnie ze NATO STANAG 6001 na poziomie – 3,2+,3,3	I	–	30 000
Szkolenie językowe specjalistyczne	I	–	5 000
<b>Łączne koszty wyszkolenia</b>	I	–	35 000
Szkolenie specjalistyczne do statusu „Combat Ready”	II	–	600 000
<b>Łączne koszty wyszkolenia</b>	I i II	–	635 000
Utrzymanie statusu „Combat Ready” (12 naprowadzeń/rok)	III	240 000	240 000
<b>RAZEM</b>	I, II i III	240 000	875 000

Uwaga: przyjęto koszty godziny lotu samolotem – 100 tys. zł. W zestawieniu nie uwzględniono kosztów lotniczych środków bojowych, zużywanych w trakcie wykonywanych naprowadzeń.

Źródło: ibidem.

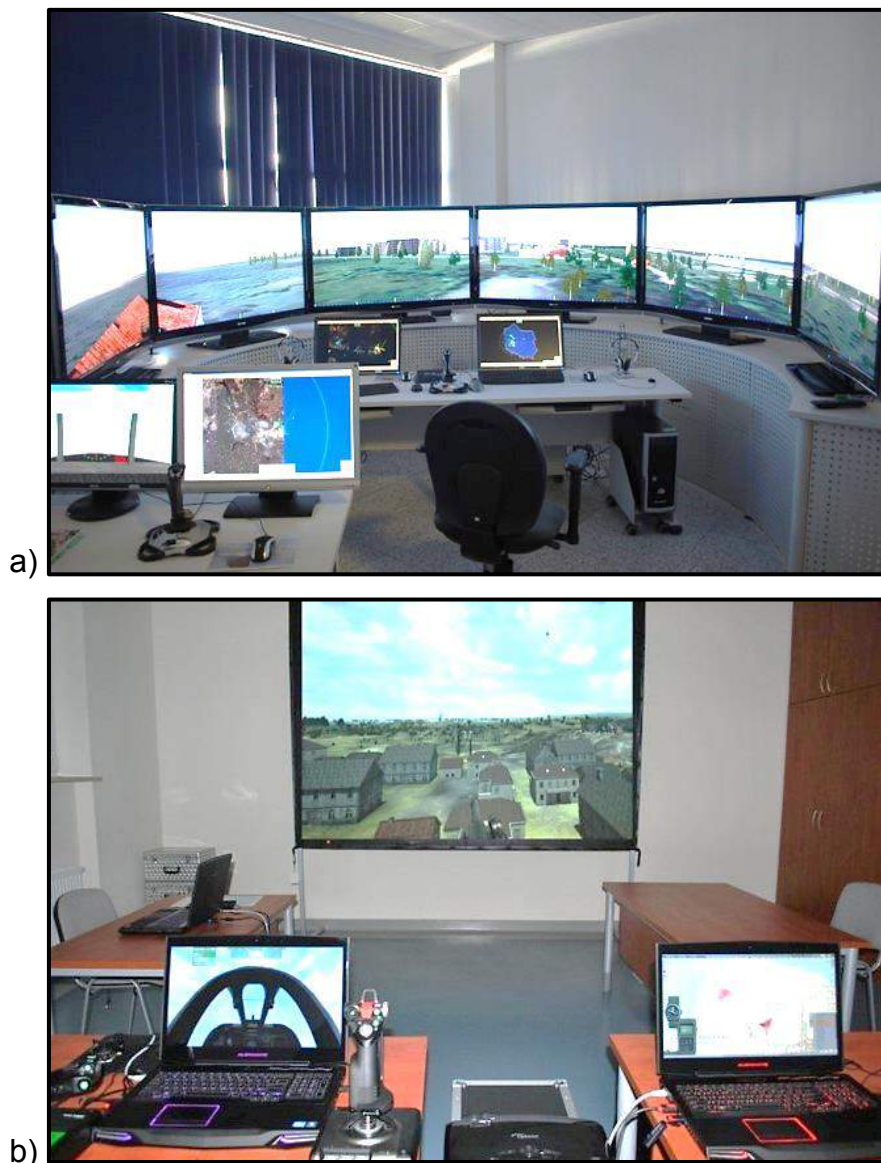
**10** Istnieją trzy typy kontroli ataków CAS. Każdy z typów wykorzystuje ściśle określone zasady związane z zagrożeniem dla wojsk własnych. Dowódca na podstawie oceny sytuacji podejmuje decyzję, który typ kontroli jest możliwy do wykorzystania i pozwoli w najlepszym stopniu wesprzeć wojska własne przy najmniejszym ryzyku ich rażenia.

**11** *Joint Publication 3-09.3...*, op. cit., s. 1–2.

**12** M. Kowalska-Sendek, *Między ziemią...*, op. cit.

## Technologie w szkoleniu JTAC

Szkolenie przygotowawcze JTAC-ów zorganizowane jest na dwóch symulatorach: stacjonarnym ARTMACS (*Air Traffic Management and Control Simulator*) i mobilnym symulatorze VBS 2 (*Virtual Battle Space*) – fot. 12.



Źródło: ibidem.

Fot. 12. Symulatory Ośrodka Szkolenia Personelu TZKOP ARTMACS (a) oraz VBS 2 (b)

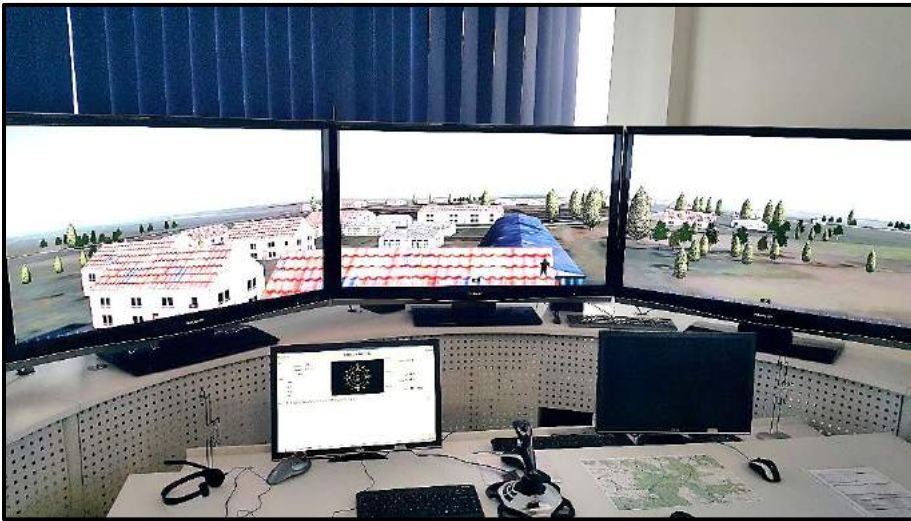
Każde z ćwiczeń zajmuje około 90 minut. Składa się na to: przygotowanie kandydata do misji, kalibracja elektronicznego wyposażenia, określenie miejsca, współrzędnych, zgranie terenu z mapą oraz odprawa ze wspieranym dowódcą. Zadaniem JTAC-a na tym etapie ćwiczenia jest zapoznanie dowódcy z sytuacją, rodzajem planowanego naprowadzania (typ I, II lub III), a także uzyskanie niezbędnych informacji od dowódcy lub podległych mu komórek. Zasadniczą część misji na symulatorze (od nawiązania łączności z pilotem) zajmuje około 40 minut. W tym czasie JTAC prowadzi frazeologię lotniczą z pilotem, naprowadzając go na żądany cel. W razie potrzeby koordynuje przestrzeń powietrzną z innymi jej użytkownikami w rejonie misji. Pozostały czas instruktor wykorzystuje na omówienie ćwiczenia, zasygnalizowanie błędów i ewentualnych porad na przyszłą praktykę, a także uzupełnia indywidualną kartę oceny kandydata.

Stacjonarne szkolenie odbywa się na symulatorze ARTMACS, którego zobrazowanie oparte jest na 6 monitorach. W zestawie tego symulatora należy wyróżnić następujące stanowiska: szkolonego, instruktora, pilota i administratora.

Kandydat na stanowisku WNNL ma do dyspozycji joystick, klawiaturę, mysz, monitor z aktualną pogodą w rejonie misji, a także zestaw do prowadzenia korespondencji z pilotem (rys. 31). To wystarczy do obsługi wszystkich funkcji symulatora, począwszy od zmiany perspektywy widoku do użycia odpowiedniego wyposażenia znajdującego się w zasobniku JTAC-a, tj. broni, naziemnego systemu podświetlania celów GLTD (*Ground Laser Target Designator*), lornetki, dalmierza itp. Instruktor obecny przez cały czas trwania ćwiczenia obserwuje pracę kandydata, jego przygotowanie, podział uwagi, prowadzenie korespondencji z pilotem i kolejno wykonywane czynności.

Stanowisko pilota na symulatorze ARTMACS dysponuje trzema programami statków powietrznych: F-16, A-10 i Mi-24 (fot. 13, 14). Trener z kokpitem umożliwia śledzenie parametrów lotu. Na podstawie porozumienia stanowisko pseudopilotów obsługują piloci m.in. z 42 Bazy Lotnictwa Szkolnego w Radomiu i 21 Bazy Lotnictwa Taktycznego w Świdwinie. Ponadto samoloty PZL-130 Orlik z Radomia, ze względu na tańszą od samolotów odrzutowych eksploatację, wykonują dodatkowo realne loty na potrzeby szkolenia JTAC-ów. Zgodnie z ich wytycznymi „Orliki” symulują ataki na cel określony przez nawigatora, a także prowadzą realną korespondencję<sup>13</sup>.

13 Opracowano na podstawie wywiadu eksperckiego z por. pil. J. Krychem i por. pil. P. Marcinkiewiczem z 42 Bazy Lotnictwa Szkolnego w Radomiu.



Źródło: zdjęcie autorskie.

*Fot. 13. Stanowisko kandydata na symulatorze ARTMACS*



Źródło: zdjęcie autorskie.

*Fot. 14. Stanowisko pilota na symulatorze ARTMACS*

Rolą administratora jest implementacja scenariusza odpowiedniego ćwiczenia, wprowadzanie nowych obiektów, a także – w czasie scenariusza z użyciem artylerii – obsługiwanie prowadzonego przez nią ognia. W czasie szkolenia na symulatorze ARTMACS kandydat odbywa następujące ćwiczenia:

- Basic CAS – podstawowa misja bezpośredniego wsparcia lotniczego,
- Adverse Weather CAS – bezpośrednie wsparcie lotnicze w niekorzystnych warunkach meteorologicznych,
- Low Level CAS – bezpośrednie wsparcie lotnicze wykonywane na małych wysokościach lotu w warunkach zagrożenia obroną przeciwlotniczą przeciwnika.

Uzupełnieniem procesu symulatorowego w zakresie wsparcia ogniowego jest mobilny symulator VBS 2. Dzięki swojej konstrukcji (w której skład wchodzi trzy laptopy, projektor, ekran i wyposażenie stanowiska praktykanta zbieżne ze stanowiskiem symulatora ARTMACS) może być rozwijany i pracować w dowolnym miejscu. Dlatego zazwyczaj towarzyszy kadrze OSzP TZKOP w czasie treningu poligonowego dla kandydatów. Realne warunki naprowadzania są często uzależnione od warunków meteorologicznych. W przypadku zaistnienia niekorzystnej pogody, uniemożliwiającej loty, kandydaci podtrzymują nawyki właśnie na mobilnym VBS 2, gdzie zaprogramowane są następujące ćwiczenia:

- Call for Fire – wezwanie wsparcia ogniowego artylerii,
- Night CAS – misja bezpośredniego wsparcia lotniczego realizowana w warunkach nocnych,
- CAS with Remote Observer – misja CAS z dodatkowym obserwatorem, np. JFO,
- Integrated CAS – ćwiczenie, w którym występują różne elementy i środki ogniowe, np. artyleria, bezzałogowe statki powietrzne UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*).

W symulatorze VBS 2 liczba stanowisk jest ograniczona, a rolę pseudopilota może pełnić administrator. Scenariusze VBS 2 odwzorowują fikcyjny teren zgodny z mapami wygenerowanymi z systemu VBS 2 na potrzeby ćwiczenia. Natomiast w ćwiczeniach na ARTMACS praktykanci pracują na realnych mapach 1:50 000, ponieważ odwzorowany teren odpowiada realnym miejscom w Europie i Afganistanie. Mimo wielu zalet, które posiadają symulatory, np. możliwość realnego odzwierciedlenia wizualnej sytuacji w czasie naprowadzania CAS, symulator wymaga znajomości skrótów klawiszy funkcyjnych, których używanie jest dodatkowym utrudnieniem dla kandydata. Rekompensatą za powyższe niedogodności może być fakt, iż niekorzystne warunki atmosferyczne, takie jak deszcz, wiatr, duża wilgotność, widoczne są tylko na ekranie monitorów, nie są zaś odczuwalne przez ćwiczącego, w przeciwieństwie do sytuacji naprowadzania w realnych warunkach poligonowych.

## Wyposażenie TZKOP

Podstawowym wyposażeniem używanym przez TZKOP jest wóz dowodzenia ZWD-3 wyposażony w radiostacje HF, VHF i UHF oraz zintegrowany zestaw do lokalizacji i wskazywania celów. Ponadto personel TZKOP dysponuje urządzeniami typu ROVER (*Remotely Operated Video Enhanced Receiver*) do odbioru obrazu ze statku powietrznego. Niestety, jego użycie uzależnione jest od wyposażania statku powietrznego naprowadzanego przez JTAC-a. W Polsce wspomniane zasobniki rozpoznawcze, które są w stanie wysłać obraz do obsługiwanego przez nawigatora urządzenia ROVER, posiada tylko F-16. W skład wyposażenia indywidualnego wchodzi m.in.: lornetka-noktowizor-dalmierz VECTOR-21N, gogle noktowizyjne, wskaźnik laserowy IZLID 1000P używany w nocy oraz wskaźnik światła widzialnego GBD III (*Green Beam Designator*) używany w czasie dziennych naprowadzeń, a także GPS (rys. 19).



Źródło: materiały OSzP TZKOP Dęblin.

Rys. 19. Podstawowe wyposażenie personelu TZKOP

**Ad 1.** Wskaźnik podczerwieni Night Master SeeSpot IZLID 1000P/Laser GDB III (*Green Beam Designator*)

IZLID 1000P (AN/PEQ-18) jest laserem podczerwonym używanym w nocy do wskazywania celów na ziemi i w powietrzu. Prosta regulacja powoduje włączenie lasera w promiennik podczerwieni, co umożliwi szybką identyfikację obiektu za pomocą okularów nocnych NVG (*Night Vision Goggles*) i czujników podczerwieni. Jest idealny jako wskaźnik dowodzenia, do wyznaczania celów oraz do wizualnej komunikacji między JTAC-iem a samolotami. Przewycięzając praktycznie wszystkie warunki oświetlenia otoczenia, laser IZLID 1000P umieszcza bardzo silny i mocno ustawiony punkt podczerwony na cel. IZLID 1000P znany jest ze swojej charakterystycznej, mocnej belki o zasięgu 43 km, wyróżniającej się od innych laserów IR na polu walki. Jego odpowiednikiem w działaniach dziennych jest GDB III. Laser Green Beam Designator jest najpotężniejszym laserowym wskaźnikiem występującym na rynku wojskowym. Zapewnia dużą dokładność wyznaczania celów dzięki częściowemu wykorzystywaniu światła dziennego, jednakże tym samym jest dobrze widoczny dla przeciwnika i może wskazać pozycję JTAC-a. Parametry wskaźników, w celu ich porównania, zestawiono w tabeli 4.

*Tabela 4. Porównanie parametrów wskaźników podczernieni stosowanych przez JTAC*

Nazwa wskaźnika	GDB III	IZLID 1000P
Producent	BE Meyers Electro Optics	
Numer modelu	532-A1	428P-A1-1
NSN	5855-01-526-4142	5855-01-502-6414
Wymiary (cale)	10,6/1,8/2,3	10,0/2,3/3,1
Masa	595 g	734 g
Zasilanie	baterie typu AA – 4 sztuki	
Wodoodporność	N/A	20 m/2 h
Klasa	IIIb (widoczny zielony)	IV (czerwony)
Wydajność	250 mW	990 mW
Rozbieżność	0,01°	0,08–0,9°
Długość fali	532 nm (zielony)	860 nm
Zasięg efektywny	300 m–6,5 km	43 km (wskaźnik), 7 km
NOHD	1460 m (gołym okiem)	620 m (gołym okiem)
Wyrównanie	nie	wbudowana korekta
Tryby	wysoki, wolny i szybki impuls	wysoki, niski, impulsowy (4 Hz)

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych producenta.



## **Ad 2.** Dalmierz laserowy Vector 21 Nite

W podstawowej wersji wykorzystywany jest jako lornetka. W wersji „Nite” wyposażony jest w możliwość prowadzenia obserwacji w nocy jako nocne urządzenie optyczne NOD (*Night Optical/Observation Device*). Ponadto służy do określenia azymutu i mierzenia odległości do wybranego punktu/celu, a także odległości między dwoma punktami. Po podłączeniu do GPS typu DAGR (*Defense Advanced GPS Receiver* – zaawansowany odbiornik GPS) współrzędne interesującego obiektu zostają zapisane i mogą być wysłane załodze wykonującej misję CAS. Vector 21 do mierzenia odległości wykorzystuje wiązkę lasera (bezpiecznego dla oczu), której działanie mogą zakłócić niekorzystne warunki atmosferyczne (WA), takie jak duże zachmurzenie czy mgła. Z jednej strony duża czułość wiązki lasera przedstawiona jest jako wada w mierzeniu odległości, z drugiej – pozwala ona urządzeniu na pomiar wysokości podstawy chmur w rejonie działań, co dla nawigatora i załogi statku powietrznego jest informacją bezcenną. Pomiar azymutu w dalmierzu otrzymywany jest z kompasu elektronicznego. Dla poprawnego odczytu pomiaru konieczna jest odpowiednia kalibracja przed użyciem (wykonywanie kolejnych poleceń wyświetlanych w urządzeniu). Zakłócenia wskazań mogą powodować przedmioty metalowe, np.: hełm, kamizelka, ogrodzenie, rzeczy w umundurowaniu.

## **Ad 3.** Naziemny system podświetlania celów GLTD II/III (*Ground Laser Target Designator*)

Aktualnie na wyposażeniu TZKOP są dwa rodzaje naziemnych systemów podświetlania celów. Starszy – GLTD II, oraz jego następca – GLTD III. Zasada ich pracy jest zbliżona, a efekt końcowy taki sam. Za pomocą każdego z nich JTAC jest w stanie wyznaczyć (podświetlić) cel dla załogi statku powietrznego. Ponadto systemy te idealnie nadają się do precyzyjnego naprowadzania pocisków AGM-114 Hellfire i bomb lotniczych PAVE (*Precision Avionics Vectoring Equipment* – precyzyjnie wektorujące wyposażenie awioniczne). GLTD III zastępuje wiązkę pompowaną lampą błyskową w urządzeniu GLTD II (fot. 15) nowocześniejszą, pompowaną laserem, który nie wymaga aktywnego układu chłodzenia.



Źródło: zdjęcie autorskie.

*Fot. 15. Naziemny system podświetlania celów GLTD II*

Zastosowanie nowoczesnej technologii eliminuje główne wady większości systemów laserowych pompowanych diodami, w szczególności czas nagrzewania i zużycie energii w trybie gotowości. GLTD III znacznie redukuje liczbę potrzebnych do pracy baterii, umożliwiając operatorom przenoszenie dodatkowych, istotnych elementów podczas wykonywania misji naprowadzania końcowego. W rezultacie jest cichym, wydajniejszym wskaźnikiem, o dłuższym czasie pracy. Oznaczniki laserowe działają najlepiej przy braku zachmurzenia, szczególnie niskich warstw chmur. Niekorzystne warunki atmosferyczne (chmury, deszcz lub dym) mogą sprawić, że cele są trudne, a nawet niemożliwe do podświetlenia. Emitowana wiązka laserowa jest niebezpieczna dla oczu.

Korzyści z GLTD III:

- mniejszy rozmiar i objętość,
- mniejsza masa urządzenia,
- intuicyjna obsługa,
- znacznie dłuższy okres żywotności baterii,
- cicha praca,
- zwiększona niezawodność systemu,

- ciągła praca w temperaturze 25°C,
- możliwość podświetlenia celu powyżej 10 km<sup>14</sup>.

#### **Ad 4. Wóz dowodzenia ZWD – 3 SO-1-2**

Zautomatyzowany wóz dowódczy typu 3 (ZWD-3) umiejscowiony jest na samochodzie osobowo-terenowym typu Honker. ZWD-3 przeznaczony jest do pracy w systemie dowodzenia i współdziałania. Wozy dowodzenia typu ZWD-3 (jako elementy systemu<sup>15</sup>) w sieciach wymiany danych związku taktycznego (SWD ZT)<sup>16</sup> mogą zapewnić łączność w ruchu i na postoju. Radiostacje zamontowane na ZWD-3<sup>17</sup> zapewniają łączność z radiostacjami starszego typu we wspólnych rodzajach pracy i na wspólnych odcinkach częstotliwości, a także współpracę z innymi wozami dowodzenia i węzłami łączności. Ponadto wóz dowodzenia ZWD-3 jest przeznaczony do zapewnienia zautomatyzowanych miejsc pracy dowódcy oraz współpracującym z nim zespołom osób funkcyjnych<sup>18</sup>. Zapewnia on również możliwość wymiany informacji fonicznej w relacjach systemu dowodzenia i współdziałania na szczeblu taktycznym we wspólnych operacjach lądowych i powietrznych.

Pojazdy te nie posiadają agregatu prądotwórczego, a cała aparatura obsługiwana jest z akumulatorów samochodu. W razie potrzeby doładowywane są one za pomocą niezależnej prądnicy napędzanej przez silnik pojazdu. Pojazdy ZWD-3 przystosowane są do współpracy z pojazdami Łowcza i Topaz.

Wyposażenie ZWD-3:

- radiostacja UKF typu RRC-9311AP,
- radiostacja KF typu RF-5800H-V002 (ze wzmacniaczem mocy) i sprzężaczem antenowym,
- radiostacja UKF (VHF/UHF) typu RF-5800M-V033 (ze wzmacniaczem mocy),

**14** Odległość podświetlenia zależna jest od warunków atmosferycznych i wyszkolenia operatora. Dla porównania – odległość podświetlenia w GLTD II wynosi do 5 km, natomiast odległość urządzenia od celu jest taka sama w przypadku GDLT II i III, tj. do 20 km.

**15** ZWD-3 wraz z wozami ZWD-1 i ZWD-2 tworzy system IRYS 2000. Wprowadzony do służby w roku 2001 wóz dowodzenia ZWD-3 przeznaczony jest dla batalionów jednostek lekkich.

**16** Sieci wymiany danych związku taktycznego budowane są na bazie wozów dowodzenia serii IRYS 2000 i/lub wozów dowodzenia batalionu desantowo-szturmowego.

**17** Wyposażony głównie w radiostacje HF, VHF i UHF, z których nagrywana jest i archiwizowana cała korespondencja prowadzona podczas pracy nawigatora.

**18** Nazwy stanowisk czteroosobowej załogi wozu dowodzenia ZWD-3 są przyjęte umownie i mogą być wyznaczone przez dowództwo jednostki dysponującej tym wozem – w tym przypadku TZKOP.

- odbiornik sygnałów GPS,
- terminal komputerowy TK 51,
- komputer laptop Rocky III,
- przełącznik sieciowy (*Lan-switch*)<sup>19</sup>,
- moduł komputerowy MK-16A,
- rejestrator korespondencji,
- zestaw do lokalizacji i wskazywania celów (kompletuje użytkownik),
- aparat telefoniczny AP-92,
- aparat telefoniczny cyfrowy utajniony (kompletuje użytkownik)<sup>20</sup>.

#### **Ad 5. Odbiornik GPS DAGR**

GPS typu DAGR (*Defense Advanced GPS Receiver* – zaawansowany odbiornik GPS), zwany potocznie „dagger” (ang. sztylet) – wojskowy odbiornik o podwójnej częstotliwości, wyposażony w sprzęt zabezpieczający niezbędny do dekodowania zaszyfrowanych sygnałów GPS. Wyprodukowany przez firmę Rockwell Collins. Ze względu na zaawansowaną elektronikę niedopuszczony dla użytkowników innych niż wojsko. Firma Rockwell Collins produkuje również odbiornik GPS, który wygląda jak DAGR, ale wykorzystuje wyłącznie sygnały cywilne. Te modele mogą być wykorzystywane przez użytkowników innych niż wojsko.

#### **Ad 6. Radiostacje Harris**

Środki łączności zapewniające możliwość prowadzenia korespondencji JTAC-om ze wszystkimi jednostkami to radiostacje Harris Falcon II i III generacji. Oprogramowanie Harris Falcon III AN/PRC-117G (V) 1 (C) umożliwia programowanie danych szerokopasmowych i starszej wąskopasmowej interoperacyjności w jednym urządzeniu. To jednokanałowe radio jest o 30% mniejsze oraz 35% lżejsze od obecnie używanych radiotelefonów wielopasmowych i pracuje z jednym standardowym akumulatorem, obejmując zakres częstotliwości od 30 MHz do 2 GHz.

Multimedialna przenośna sieć Harris Multipand Radio Manpack jest w pełni zgodna z połączonym taktycznym systemem radiowym JTRS (*Joint Tactical Radio System*)<sup>21</sup>. Dodatkowo wyposażona została w architekturę SCA

<sup>19</sup> Przełącznik sieciowy typu LAN umożliwia budowanie lokalnej sieci komputerowej LAN i dołączenie jej do sieci zewnętrznej.

<sup>20</sup> *Instrukcja – Opis techniczny eksploatacji ZWD-3 SO-1-2*, 2009.

<sup>21</sup> Sieć JTRS ma na celu zastąpienie istniejących w wojsku radiotelefonów jednym zestawem, który mógłby mieć nowe częstotliwości i tryby (przebiegi) dodane przez przesłanie. Sieć nie wymaga wielu typów radiostacji na ziemi.

(*Software Communications Architecture*), która umożliwia współdziałanie ze starszymi i przyszłymi przebiegami za pomocą uaktualnień oprogramowania. Harris RF-7800B zapewnia szerokopasmową łączność SATCOM (*Satellite Communications System*), automatyczne i bezpieczne rozszerzenie zakresu, połączenie z sieciami poza zasięgiem oraz dostęp do Internetu i zdalnych sieci prywatnych. Podręcznym odpowiednikiem w rodzinie III generacji jest AN/PRC-152A.

#### **Ad 7. Zdalnie sterowany odbiornik wideo (ROVER)**

ROVER (*Remotely Operated Video Enhanced Receiver*) jest systemem naziemnym, który pozwala JTAC na zobrazowanie na laptopie tego, co w czasie rzeczywistym widzi pilot. Za pomocą obrazów odbieranych przez czujniki statku powietrznego nawigator może w krótkim czasie dokonać rozpoznania naziemnego i identyfikacji docelowej pożądanego obiektu, a także potwierdzić poprawność wyboru celu, co jest niezbędne do zakończenia naprowadzania końcowego i wydania zgody na użycie uzbrojenia (rys. 20).



Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów OSzP TZKOP Dęblin.

*Rys. 20. Zobrazowanie pracy zdalnego odbiornika ROVER*

System ROVER zasilany jest baterią umieszczoną w plecaku, może również pobierać energię z dowolnego punktu zasilania za pomocą odpowiedniego kabla. Dodatkowym udogodnieniem jest możliwość podłączenia dublującego ekranu, z którego może korzystać dowódca wspieranego komponentu. W komplecie znajdują się cztery anteny do odpowiednich zakresów częstotliwości. Urządzenie występuje również w wersji podręcznej (fot. 16), w której obraz przekazywany jest do małego okularu.



Źródło: zdjęcia autorskie.

*Fot. 16. Laptop do zobrazowania systemu ROVER w wersji standardowej (a);  
podręczna wersja z monitorem okularowym (b)*

## Zakończenie

Przedstawione w artykule technologie i techniki oraz wyposażenie techniczne wykorzystywane przez wysuniętych nawigatorów naprowadzania lotnictwa wpływają na wysoki poziom wykonywania zadań przez polskich JTAC-ów. Nowoczesne technologie wykorzystywane w szkoleniu symulatorowym w połączeniu z programem szkolenia i wysokim poziomem reprezentowanym przez kadrę dydaktyczną ośrodka – OSzP TZKOP w Dęblinie, dają możliwość kompleksowego przygotowania kandydatów do zabezpieczenia misji CAS. Całość dopełnia nowoczesne wyposażenie, które daje duże możliwości oraz sposobność do efektywnego wykorzystania WNNL podczas ich pracy. Opisanie w artykule procedury i techniki stosowane w OSzP TZKOP są akredytowane przez NATO i USA, które proces szkolenia z użyciem technik i technologicznie zaawansowanego wyposażenia oceniają na wysokim poziomie.

## Bibliografia

*ATP-3.3.2.1(C), Tactics, Techniques and Procedures for Close Air Support and Air Interdiction*, 2011.

*Bezpośrednie wsparcie lotnicze i izolacja lotnicza w operacji połączonej – DD 3.2.2(A)*, Centrum Doktryn i Szkolenia Sił Zbrojnych, Bydgoszcz 2014.

<http://www.wsosp.pl>.

*Instrukcja – Opis techniczny eksploatacji ZWD-3 SO-1-2*, 2009.

*Joint Publication 3-09.3, Close Air Support*, 25 November 2014.

Kowalska-Sendek M., *Między ziemią a niebem*, „Polska Zbrojna”, online – <http://www.polska-zbrojna.pl/home/articleinmagazineshow/5104?t=MIEDZY-ZIEMIA-A-NIEBEM>.

# Wykorzystanie systemów bezzałogowych statków powietrznych w ugrupowaniu roju na przykładzie systemu bezzałogowych statków powietrznych (SBSP) Perdix

## Streszczenie

Przez wieki strategia prowadzenia działań ulegała znacznym przemianom. Początkowo, aby zwyciężyć przeciwnika, wystarczała w głównej mierze przewaga liczebna wojsk oraz ich lepsze uzbrojenie – współcześnie wspomniane elementy schodzą na drugi plan, ustępując miejsca przewadze informacyjnej. Uzyskanie oraz utrzymanie przewagi możliwe jest dzięki rozpoznaniu – szczególnie rozpoznaniu prowadzonemu z powietrza.

Prowadzenie rozpoznania powietrznego przy pomocy załogowych statków powietrznych przez długi czas było jedną z najskuteczniejszych, jak również najszybszych metod zdobywania oraz przekazywania danych rozpoznawczych. Wzrastające ryzyko możliwości utraty załogi oraz statku powietrznego spowodowało, iż nad teatrem działań coraz częściej zaczęły się pojawiać systemy bezzałogowych statków powietrznych (SBSP). Wykorzystanie SBSP w pierwszej kolejności do rozpoznania powietrznego możliwe było dzięki znacznemu postępowi technologicznemu, który dotyczył m.in. długotrwałości lotu oraz pozyskiwania danych rozpoznawczych.

Dynamiczność oraz obszar, na jakim prowadzone są działania, powoduje konieczność prowadzenia permanentnej obserwacji pola walki. Dlatego też konieczne staje się poszukiwanie nowych sposobów wykorzystania SBSP. Jednym z takich sposobów jest wykorzystanie SBSP w formacji roju.

**Słowa kluczowe:** lotnictwo, systemy bezzałogowych statków powietrznych, bezzałogowe statki powietrzne, ugrupowanie roju, Perdix.

## Wstęp

W porównaniu z innymi komponentami sił zbrojnych lotnictwo dysponuje unikalnymi cechami, co czyni je w pewnym sensie niezastąpionym w operacjach militarnych. Szybkość reakcji i oddziaływania, elastyczność użycia,



globalny zasięg oddziaływania, jak również manewrowość czynią z lotnictwa głównego aktora (w zdecydowanej większości przypadków) na teatrze działań wojennych<sup>1</sup>.

Możliwość oddziaływania lotnictwa w przestrzeni powietrznej, nieustannie zwiększające się możliwości precyzyjnego oddziaływania zarówno na obiekty infrastruktury, jak również na wojska znajdujące się na teatrze działań (jak i poza nim) predestynują je do udziału w działaniach na współczesnym i przyszłym polu walki. Sposobność do realizacji zadań w trzecim wymiarze umocniła bardzo wysoką pozycję lotnictwa wśród podstawowych, konwencjonalnych środków walki. W większości przypadków siły powietrzne uważane są za wiodące narzędzie na współczesnym polu walki<sup>2</sup>. Obecnie jednym z głównych środków wykorzystywanych przez siły powietrze (i nie tylko) są systemy bezzałogowych statków powietrznych (SBSP)<sup>3</sup>.

Współcześnie SBSP znajdują się na wyposażeniu sił powietrznych, morskich oraz lądowych armii wielu wysoko rozwiniętych państw. Nieustanny postęp technologiczny wpływa znacząco na rozszerzające się możliwości realizacji całego spectrum działań. W związku z powyższym należy stwierdzić, iż SBSP są jednym z najbardziej wyrafinowanych oraz zaawansowanych środków walki nowoczesnych armii.

Niewielkiej wielkości bezzałogowe statki powietrzne (BSP<sup>4</sup>), będące głównym elementem SBSP, zaprojektowane zostały w głównej mierze do prowadzenia rozpoznania taktycznego – do tego celu wykorzystują przede wszystkim podstawowe detektory rozpoznawcze. Należy przy tym jednak

1 S. Zajas, *Siły powietrzne. Dzień dzisiejszy i wyzwania przyszłości*, AON, Warszawa 2008, s. 71.

2 J. Karpowicz, *Bezzałogowe aparaty latające w operacjach powietrznych*, AON, Warszawa 2003, s. 6–7.

3 System bezzałogowych statków powietrznych (SBSP) – bezzałogowe statki powietrzne wyposażone w sensory służące realizacji wyznaczonych zadań, stanowiące komponent powietrzny systemu oraz personel, elementy kontroli (sterowania), przesyłania danych, użytkowników oraz elementy wspierające tworzące komponent naziemny systemu.

4 Bezzałogowy statek powietrzny (BSP) – aparat latający z napędem oraz bez załogi na pokładzie. Do utrzymywania się w powietrzu wykorzystuje siłę nośną wskutek działania sił aerodynamicznych na stałych (skrzydła) lub ruchomych powierzchniach nośnych (wirnik) albo siłę wyporu aerostaticznego (aerostat). Sterowany jest za pomocą systemów autonomicznych lub zdalnie przez operatora (z ziemi, powietrza lub okrętu). Został zaprojektowany w sposób pozwalający na jego ponowne wykorzystanie. Może być również statkiem powietrznym jednorazowego użytku, jak również posiada możliwość przeniesienia na pokładzie różnego rodzaju uzbrojenia (śmiercionośne i nieśmiercionośne).

podkreślić, iż występują również ograniczenia dotyczące możliwości ich wykorzystania. Dotyczą one szczególnie możliwości przenoszenia aparatury rozpoznawczej, zakłócającej, czy też uderzeniowej. Aczkolwiek bardzo często są one rekompensowane przez ich stosunkowo niskie koszty produkcji i utrzymania, co w sposób bezpośredni przekłada się na ich dostępność w dużych ilościach. Dysponowanie możliwością obserwacji z powietrza jest szczególnie istotne w przypadku prowadzenia operacji w terenie, do którego dostęp jest ograniczony bądź szczególnie trudny.

Drogie i wszechstronne rozpoznawcze, bądź też wielozadaniowe SBSP przeznaczone są w głównej mierze do pozyskiwania informacji szczebla strategicznego, a następnie dokonywania uderzenia na wcześniej rozpoznany cel – rozpoznawczo-uderzeniowe lub wielozadaniowe BSP. Z kolei niewielkich wielkości „bezzałogowce” można uznać za swego rodzaju „projektorzy siły” służące do pozyskiwania informacji szczebla taktycznego i operacyjnego.

Niewielkich rozmiarów BSP mogą być wykorzystywane m.in. do wykrywania potencjalnego niebezpieczeństwa w pobliżu baz własnych, bądź też do śledzenia nieustannie zmieniającego położenie obiektu. Ponadto mogą być one również wykorzystywane do oceny działań własnych (BDA<sup>5</sup>), planowania uderzeń, dostarczania aktualnych danych dotyczących sytuacji w rejonie potencjalnego uderzenia.

W związku z powyższym, chociaż możliwości niewielkiej wielkości BSP są dość ograniczone, to mimo wszystko efekty ich działania mogą być nie do przecenienia, jeśli zostaną one wykorzystane w odpowiedni sposób – efekt synergii. Można spotkać się z opiniami, iż pojedyncze niewielkich rozmiarów BSP posiadają niewielką wartość operacyjną, aczkolwiek w momencie wykorzystania ich w zintegrowany sposób ich skuteczność oraz efektywność znacznie wzrasta – niekiedy może przewyższyć wartość operacyjną większych odpowiedników. Dlatego też niezwykle istotne jest opracowanie zintegrowanego sposobu wykorzystania ich. Jedną z takich możliwości jest operowanie niewielkich rozmiarów BSP w dużych grupach (ugrupowaniach) – rojach czy chmarach (*swarm*).

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie możliwości wykorzystania mikro BSP funkcjonujących w ramach rojów mikro bezzałogowych statków powietrznych.

5 BDA (*Battle Damage Assessment*) – ocena rezultatów działań własnych.

## Klasyfikacja systemów bezzałogowych statków powietrznych<sup>6</sup>

Permanently postępujący rozwój SBSP oraz rosnące wymagania współczesnego oraz przyszłego pola walki sprawiają, iż wykorzystywane oraz projektowane systemy muszą spełniać szereg wymagań, wśród których znajdują się m.in.: prowadzenie rozpoznania przy jednoczesnej możliwości wykonania precyzyjnego uderzenia na wykryty obiekt. Należy również podkreślić, iż obecnie odchodzi się od projektowania i produkcji specjalizowanych SBSP na korzyść wielozadaniowych. Ponadto nowoprojektowane systemy charakteryzują się właściwościami taktyczno-technicznymi pozwalającymi na realizację wielu zadań – od rozpoznawczych na uderzeniowych kończąc.

Zgodnie z obowiązującą w NATO klasyfikacją systemów bezzałogowych statków powietrznych<sup>7</sup> w oparciu o kryterium maksymalnej masy startowej oraz pułapu praktycznego wyróżnia się trzy klasy wspomnianych systemów<sup>8</sup>. Szczegółowa klasyfikacja przedstawiona została w tabeli 5.

Z analizy danych zawartych w tabeli wynika, iż wyróżnia się trzy klasy SBSP, które dodatkowo dzielą się na kategorie. Mikro bezzałogowe statki powietrzne zaklasyfikowane zostały do klasy pierwszej, która obejmuje w głównej mierze te przeznaczone do realizacji zadań szczebla taktycznego. Charakteryzują się one przede wszystkim niewielką wagą oraz rozmiarami, co w sposób zdecydowany wpływa na ograniczenie możliwości wykrycia ich przez przeciwnika – zmniejszenie skutecznej powierzchni odbicia, oraz na koszty produkcji aparatów, jak również wykorzystania ich na niewielkich przestrzeniach.

<sup>6</sup> Charakterystyka systemów klasy II i III została pominięta przez autora celowo, ponieważ nie stanowi ona sedna niniejszej publikacji.

<sup>7</sup> Przeprowadzona analiza literatury przedmiotu wskazuje, iż w zależności od przyjętego kryterium można dokonać systematyzacji SBSP. W związku z tym konieczne jest opracowanie powszechnie akceptowalnych podziałów oraz klasyfikacji, które pozwolą na opracowanie jasnych i spójnych procedur obowiązujących w NATO – pozwoli to na przyjęcie wspólnej doktryny oraz standardów dotyczących SBSP.

<sup>8</sup> ATP-3.3.7 *Guidance for the training of unmanned aircraft systems (UAS) operators*, Edition B, Version 1, NATO Standardization Agency 2014, s. 1–4.

Tabela 5. Klasyfikacja systemów bezzałogowych statków powietrznych w NATO

Klasa	Kategoria	Zastosowanie	Wysokość operowania (m)	Promień działania (km)	Przykładowa platforma
Klasa III (powyżej 600 kg)	uderzeniowe/ bojowe	strategiczne/ narodowe	do 20 000	bez ograniczeń	Reaper
	HALE	strategiczne/ narodowe	do 20 000	bez ograniczeń	Global Hawk
	MALE	operacyjne/ teatr działań	do 14 000	bez ograniczeń	Heron
Klasa II (150–600 kg)	taktycznego przeznaczenia	taktyczne	do 5 500	200	Hermes 450
Klasa I (do 150 kg)	małe (powyżej 15 kg)	taktyczne	do 1 600	50	Scan Eagle
	mini (poniżej 15 kg)	taktyczne	do 1 000	25	Skylark
	mikro (maksymalna energia poniżej 66 J)	taktyczne	do 60	5	Black Widow

Źródło: ATP-3.3.7 *Guidance for the training of unmanned aircraft systems (UAS) operators*, Edition B, Version 1, NATO Standardization Agency 2014, s. 1–4.

Należy jednak również podkreślić, iż niewielkie rozmiary mikro BSP wpływają na ograniczenia, jakimi są m.in. możliwości przenoszenia aparatury rozpoznawczej. Aczkolwiek w najbliższej przyszłości należy spodziewać się jeszcze większej miniaturyzacji aparatury przenoszonej przez bezzałogowe statki powietrzne. Współcześnie jednym ze sposobów ograniczenia wspomnianej powyżej niedogodności jest opracowanie sposobu wykorzystania mikro BSP, który rekompensowałby wspomniane ograniczenia. Jednym z takich sposobów jest operowanie mikro BSP w rojach (rojach) bezzałogowych statków powietrznych.

## Operowanie w rojach mikro bezzałogowych statków powietrznych

Ilościowy, jak również jakościowy wzrost wykorzystania broni precyzyjnego rażenia, globalny zasięg działań militarnych prowadzonych na sieciocentrycznym polu walki w połączeniu z szybkim tempem prowadzonych działań wpływają na zmiany sposobów wykorzystania SBSP do rozpoznania powietrznego.

Dysponowanie najnowszymi technologiami wykorzystywanymi w budowie SBSP, jak również nieustanne udoskonalanie aparatury rozpoznawczej musi być powiązane z adekwatnymi sposobami wykorzystania ich. Dążąc do pełnego wykorzystania możliwości danego SBSP, należy posiadać odpowiednią wiedzę i umiejętności do ich obsługi. Dlatego też niezwykle istotne jest to, aby w sposób permanentny doskonalić, jak również poszukiwać sposobów wykorzystania SBSP do rozpoznania powietrznego.

Na współczesnym teatrze działań operujący samodzielnie bezzałogowy statek powietrzny nie jest już wystarczający do osiągnięcia oraz przede wszystkim utrzymania tak pożądanej współcześnie przewagi powietrznej<sup>9</sup>. Rozwój sztucznej inteligencji umożliwił naukowcom rozpoczęcie prac nad projektowaniem aparatów latających, które będą mogły współpracować razem jako zespół, z ograniczonym do minimum udziałem pilota-operatora. W przyszłości można spodziewać się w pełni autonomicznych bezzałogowych statków powietrznych.

Współcześnie w laboratoriach trwają badania nad możliwością wykorzystania BSP w dużych grupach – rojach czy chmarach. Opracowanie wspomnianego sposobu wykorzystania BSP ma na celu umożliwienie funkcjonowania w roju dziesiątek bądź nawet setek BSP realizujących zadania – w pierwszej kolejności rozpoznawcze, a w dalszej przyszłości uderzeniowe. Należy przy tym jednoznacznie podkreślić, iż w pierwszej kolejności formowanie rojów będzie dotyczyło BSP klasyfikowanych w kategorii mikro.

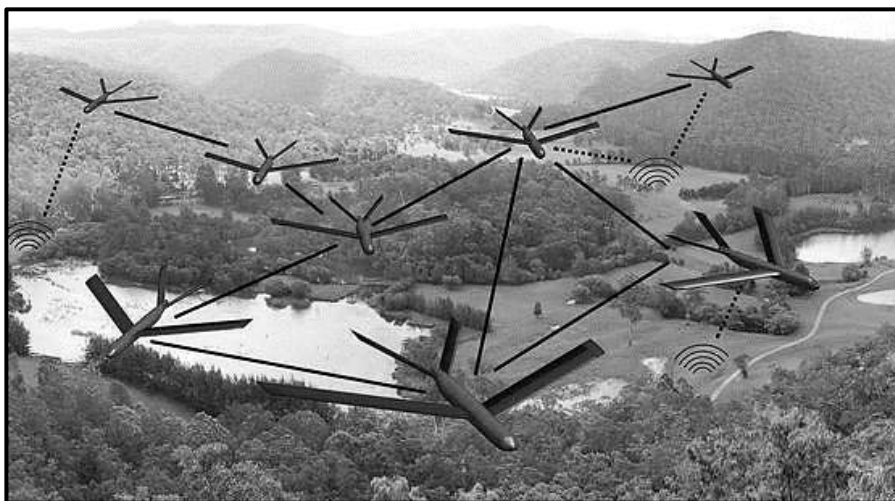
Roje bezzałogowych statków powietrznych stanowią obecnie jeden z najbardziej perspektywicznych kierunków doskonalenia sposobów wykorzystania mikro BSP do rozpoznania powietrznego. Dlatego też w pierwszej kolejności należy wyjaśnić, czym różni się pilotowanie (kierowanie) pojedynczym bezzałogowym statkiem powietrznym od kierowania wspomnianym ugrupowaniem – rojem mikro BSP.

W sytuacji pojedynczego BSP, np. RQ-1 Predator czy RQ-4 Global Hawk, kierowanie (pilotowanie) odbywa się przy pomocy stacji kierowania, która może być usytuowana na lądzie, na morzu lub w powietrzu. W takiej sytuacji lot BSP cały czas kontrolowany jest przez pilota-operatora. Należy

<sup>9</sup> Przewaga powietrzna (*Air Superiority*) – stopień dominacji w walce powietrznej jednych sił nad drugimi, pozwalający tym pierwszym na prowadzenie działań przez siły lądowe, powietrzne i morskie w danym miejscu i czasie bez istotnego (wzbraniającego) przeciwdziałania ze strony przeciwnika, W. Michalak, *Dominacja w powietrzu i z powietrza*, „Zeszyty Naukowe AON” 2013, nr 3(92), s. 212.

przy tym również podkreślić, iż kontrola nad statkiem powietrznym może być przekazywana w sposób zdalny pomiędzy stanowiskami kontroli znacznie od siebie oddalonymi – usytuowanymi w różnych miejscach na kuli ziemskiej. W takim przypadku przed rozpoczęciem misji BSP jest on programowany na realizację wcześniej zdefiniowanego zadania, które może być modyfikowane albo całkowicie zmienione w trakcie prowadzenia operacji w zależności od sytuacji na teatrze działań – elastyczność prowadzonych działań.

Z kolej koncepcja roju w sposób zdecydowany odbiega od wykorzystywania pojedynczych BSP na teatrze działań. W skład roju mogą wchodzić BSP różnego przeznaczenia – od rozpoznawczych do uderzeniowych. Należy przy tym podkreślić, iż „bezzałogowce” operujące w roju nie posiadają wyznaczonego przywódcy (lidera), który determinowałby sposób zachowania pozostałych członków ugrupowania. Dlatego też można przyjąć, iż cały rój stanowi jeden kolektywny organizm, dysponujący „rozproszonym mózgiem” w poszczególnych aparatach. Na rysunku 21 przedstawiona została idea funkcjonowania BSP w formacji roju oraz występujące pomiędzy nimi interakcje.



Źródło: [https://www.researchgate.net/figure/278681689\\_fig15\\_Figure-1-21-A-UAV-swarming-concept-where-only-a-subset-of-the-UAVs-are-directly](https://www.researchgate.net/figure/278681689_fig15_Figure-1-21-A-UAV-swarming-concept-where-only-a-subset-of-the-UAVs-are-directly) [dostęp: 08.05.2017].

*Rys. 21. Funkcjonowanie BSP w formacji roju*

W związku z powyższym wszystkie „bezzałogowce” operujące w roju komunikują się pomiędzy sobą, przekazując pozyskane informacje w ramach ugrupowania. Umożliwia to posiadanie przeglądu sytuacji na teatrze działań przez wszystkich członków ugrupowania. Wspomniana zdolność umożliwia

również włączenie do wcześniej już sformowanego roju dodatkowych BSP, bądź też ich wykluczenie w razie zaistnienia takiej potrzeby. Ponadto sposób funkcjonowania roju pozwala na swobodną realizację zadania w momencie poniesienia strat na teatrze działań (ograniczona liczba BSP) – utrata BSP nie wpływa na integralność oraz funkcjonowanie pozostałych aparatów znajdujących się w roju.

Funkcjonowanie BSP w formacji roju umożliwia dostosowywanie się do warunków panujących na teatrze działań, co wpływa na możliwość korygowania lotu całej formacji, jak również na wymianę informacji oraz wspólne podejmowanie decyzji. Należy również podkreślić, iż małe, funkcjonujące w postaci roju BSP są zdecydowanie trudniejszym celem do zestrzelenia niż pojedynczy duży aparat latający kategorii MALE<sup>10</sup>, np. RQ-1 Predator, lub też kategorii HALE<sup>11</sup>, np. RQ-4 Global Hawk.

Współcześnie prace nad nowym sposobem wykorzystania BSP prowadzi kilkanaście państw. Jednakże należy podkreślić, iż najbardziej zaawansowani w prowadzeniu badań są naukowcy z USA. W październiku 2016 roku Stany Zjednoczone przeprowadziły testy praktyczne systemu nowej generacji mikro SBSP Perdix<sup>12</sup> – to składający się z kilkudziesięciu niewielkich bezzałogowych statków powietrznych tworzących rój mogący realizować zadania ofensywne i zwiadowcze.

Idea powstania mikro bezzałogowych statków powietrznych, które mogłyby się w sposób bezpośredni komunikować pomiędzy sobą, zapoczątkowana została przez grupę studentów z Wydziału Astronautyki i Aeronautyki Massachusetts Institute of Technology (MIT) w 2011 roku. Tam też rozpoczęto wstępne prace projektowe. Następnie w toku prowadzonych badań do celów wojskowych projekt został zmodyfikowany. Dlatego też ulegał systematycznej modernizacji w Special Capabilities Office<sup>13</sup> w Departamencie Obrony USA. Prowadzone badania były odpowiedzią Stanów Zjednoczonych na wzrost zagrożenia ze strony Rosji oraz Chin, jak również miały na

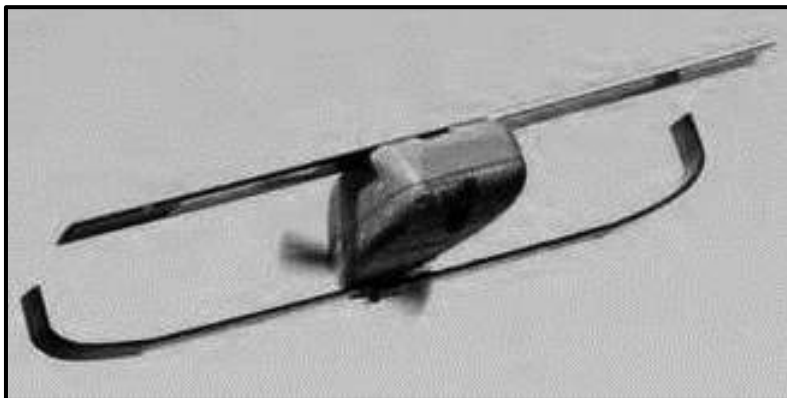
**10** MALE (*Medium Altitude Long Endurance*) – SBSP średniego pułapu i dużej długotrwałości lotu.

**11** HALE (*High Altitude Long Endurance*) – SBSP wysokiego pułapu i dużej długotrwałości lotu.

**12** Perdix – w mitologii greckiej był studentem, który został uratowany od pewnej śmierci przez Atenę, kiedy zazdrosny wuj Dedal zepchnął go z wieży, został przemieniony w małego ptaka. Podobnie jak student mikro BSP po wystrzeleniu musi być w stanie szybko i sprawnie operować w powietrzu.

**13** SCO (*Special Capabilities Office*) – Biuro ds. Specjalnych Departamentu Obrony USA.

celu umożliwienie ich seryjnej produkcji i eksploatacji na dużą skalę. Mikro BSP Perdix (fot. 17) opracowany został w 2013 roku w USA przez Lincoln Laboratory Massachusetts Institute of Technology (MIT). Do tej pory wyprodukowanych zostało około 670 sztuk tego rodzaju aparatów<sup>14</sup>.



Źródło: D. Szondy, *Super Hornets drop world's largest swarm of micro-drones*, online – <http://newatlas.com/perdix-micro-drones-super-hornets/47333/> [dostęp: 26.05.2017].

*Fot. 17. Mikro BSP Perdix*

We wrześniu 2014 roku po raz pierwszy w historii mikro BSP Perdix wystrzelone zostały z pokładu samolotu F-16 – z wyrzutni flar (BSP może być spakowany w małe pudełko), nad terytorium bazy Sił Powietrznych USA w Edwards. Rok później, we wrześniu 2015 roku około 90 mikro BSP Perdix wykorzystanych zostało w ćwiczeniu przeprowadzonym na północnym krańcu Alaski, zorganizowanym przez dowództwo Sił Powietrznych USA. Podczas wspomnianego ćwiczenia mikro BSP realizowały misje rozpoznawcze w pierwszym w historii roju składającym się z 20 mikro BSP Perdix.

Mikro BSP Perdix nie są zaprogramowane ani zsynchronizowane indywidualnie. Dzielą ze sobą jeden wspólny „mózg”, umożliwiający podejmowanie decyzji oraz dostosowywanie się do pozostałych członków roju oraz warunków występujących na teatrze działań – funkcjonują podobnie jak roje owadów w przyrodzie. W związku z tym, iż wszystkie bezałogowe statki powietrzne w roju współpracują między sobą, nie funkcjonuje wśród nich jeden ściśle określony „dowódca”. Dlatego też w razie utraty jakiegokolwiek BSP z roju są one w stanie bez problemu dostosować się do nowej sytuacji na

<sup>14</sup> <http://www.navaldrone.com/perdix.html> [dostęp: 12.06.2017].



teatrze działań. Dzięki dysponowaniu wspomnianą umiejętnością mały rój stosunkowo niedrogich „bezzałogowców” jest w stanie realizować zadania do tej pory wykonywane przez ich większe i dużo droższe odpowiedniki.

Kontrolowanie indywidualnie ponad 100 mikro BSP byłoby niezwykle uciążliwe, dlatego też przed całym rojem mikro BSP stawiane jest zadanie, np. rozpoznanie określonego pola, i to one decydują, w jaki sposób to zrealizować. Operatorzy określają taki sposób działania mianem gry sportowej, w której całej drużynie stawiane jest zadanie. Poszczególne BSP komunikują się pomiędzy sobą – przekazują sobie informację, gdzie się znajdują oraz czym obecnie się zajmują. Ponieważ rój mikro BSP nie może zmieniać swoich „graczy”, operatorzy dysponują możliwością przewidywania zachowania roju bez konieczności analizy pojedynczych mikro BSP. Przedstawiony sposób kontroli może wydawać się na pozór dość chaotyczny, lecz wbrew pozorom funkcjonowanie roju w przedstawiony sposób jest bardzo dobrze zorganizowane.

W październiku 2016 roku SCO Naval Air System Command oraz Lincoln Laboratory MIT doprowadziły do wystrzelenia roju 103 mikro BSP Perdix z pokładu trzech F/A-18 Super Hornet nad China Lake w Kalifornii. Wykorzystanie wspomnianego roju zademonstrowało, jak zaawansowanymi zachowaniami może się on charakteryzować – m.in. zbiorowe podejmowanie decyzji, tworzenie samodzielnej formacji oraz możliwość samoregeneracji. Ponadto przeprowadzone testy potwierdziły, iż Perdix-y mogą swobodnie operować z prędkością 0,6 Macha, jak również w niskich temperaturach, oscylujących w granicach około  $-10^{\circ}\text{C}^{15}$ .

## Perdix – charakterystyka

Perdix jest bezzałogowym statkiem powietrznym klasy micro, służącym przede wszystkim do realizacji misji kategorii ISR<sup>16</sup> – szczegółowa charakterystyka dotycząca możliwości aparatu jest ściśle tajna. Perdixy mogą być wystrzeliwane z platform powietrznych, morskich, jak również z wyrzutni stacjonarnych znajdujących się na ziemi. Zadania realizowane przez tego typu BSP mogą być zarówno w małych, jak i dużych rojach BSP.

<sup>15</sup> *Department of Defense Announces Successful Micro-Drone Demonstration*, online – <https://www.defense.gov/News/News-Releases/News-Release-View/Article/1044811/department-of-defense-announces-successful-micro-drone-demonstration> [dostęp: 01.05.2017].

<sup>16</sup> ISR – akronim od anglojęzycznych słów: *Intelligence, Surveillance, Reconnaissance*.

Mikro BSP Perdix dysponuje dwiema parami skrzydeł przytwierdzonych do plastikowego kadłuba, wewnątrz którego znajduje się bateria litowo-jonowa oraz mała kamera<sup>17</sup>. Napęd stanowi 15-centymetrowe skrzydło pchające umieszczone z tyłu aparatu. Kadłub wykonany został przy pomocy technologii druku 3D, dzięki czemu jego produkcja jest stosunkowo szybka oraz nie wymaga wysokich nakładów finansowych.

Każdy mikro BSP wyposażony jest w radio, dzięki któremu wymienia informacje z pozostałymi członkami roju, m.in. takie jak: aktualne położenie czy kierunek poruszania się. Ponadto na pokładzie aparatu mogą znajdować się również nadajniki elektroniczne służące do wykrywania radarów wroga. W tabeli 6 przedstawiona została charakterystyka mikro BSP Perdix.

*Tabela 6. Charakterystyka mikro BSP Perdix*

Typ	Mikro bezzałogowy statek powietrzny
Kraj pochodzenia	USA
Producent	Lincoln Laboratory Massachusetts Institute of Technology
Projekt	Massachusetts Institute of Technology
Pierwszy lot	wrzesień 2014
Status	testowany
Główny użytkownik	Departament Obrony USA
Produkcja	od 2013
Liczba wyprodukowanych sztuk	670
Koszt programu	20 mln dolarów
<b>Dane techniczne</b>	
Śmigła	15,2 cm
Nadwozie	12,7 cm
Rozpiętość skrzydeł	20,3 cm
Masa	290 g
Długość operowania	>20 min
Prędkość maksymalna	74–111 km/h

Źródło: <https://www.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/Perdix%20Fact%20Sheet.pdf> [dostęp: 26.05.2017].

<sup>17</sup> S. Snow, *Pentagon successfully tests world's largest micro-drone swarm*, online – <http://www.militarytimes.com/articles/pentagon-successfully-tests-worlds-largest-micro-drone-swarm> [dostęp: 01.05.2017].

Oprogramowanie oraz osprzęt są sukcesywnie uaktualniane oraz modernizowane. Wpływa to na możliwość wgrzywania poprawek bez konieczności produkcji nowego statku powietrznego. Obecna wersja jest szóstą generacją Perdixa, w której zwiększony został pojemnik na paliwo oraz formowany wtryskowo kadłub. Biuro ds. Specjalnych Departamentu Obrony USA wspólnie z Przemysłowym Centrum Obrony (*Defense Industrial Unit-Experimental-DIUx*) poszukuje obecnie firmy, która byłaby zdolna dostarczać mikro BSP Perdix w partiach po 1000 sztuk. SCO pracuje również nad siódmą generacją aparatu, który najprawdopodobniej w jeszcze większym stopniu będzie autonomiczny. Ponadto Pentagon skupia się również nad przyspieszeniem procesu integracji mikro BSP do Sił Zbrojnych USA.

Mikro BSP Perdix jest całkowicie samodzielny, dlatego też trajektoria jego lotu jest diametralnie różna od lotu piłki golfowej. W tym przypadku nawet technicy nie są w stanie przewidzieć, w jaki sposób lot będzie realizowany.

Po wystrzeleniu mikro BSP Perdix z wyrzutni flar pudełko, w którym znajduje się aparat, ma za zadanie ochronić BSP przed uszkodzeniami. Mogą one być spowodowane wpadnięciem aparatu w strumień gazów wylotowych z silników statku powietrznego, z którego został wystrzelony. Następnie Perdix „zrzuca” obudowę ochronną w celu pełnego uruchomienia się oraz poszukiwania i łączenia się z pozostałymi aparatami – tworząc rój mikro bezzałogowych statków powietrznych pozyskujących oraz przetwarzających informacje pomiędzy pozostałymi członkami ugrupowania, jak również z możliwością przekazania pozyskanych danych do zainteresowanych użytkowników<sup>18</sup>.

## Testy mikro SBSP Perdix

Przeprowadzone testy roju mikro SBSP Perdix są jednymi z pierwszych, w których zademonstrowany został prawdziwy potencjał autonomicznego roju BSP. Wcześniej do osiągnięcia tego samego celu trzeba było wykorzystywać duże samoloty bezzałogowe, które kosztują tyle samo co ich załogowe odpowiedniki. Dzięki wykorzystaniu technologii roju znacznie utrudniona została możliwość likwidacji poszczególnych elementów w celu zakłócenia bądź zapobiegania możliwości realizacji zadania. Dodatkowo należy podkreślić, iż

<sup>18</sup> A. Mehta, *Panatagon Launches 103 Unit Drone Swarm*, online – <http://www.defense-news.com/articles/pentagon-launches-103-unit-drone-swarm> [dostęp: 05.06.2017].

zniszczenie kilku aparatów z roju nie wpływa na możliwość realizacji zadania. Dlatego też należy stwierdzić, iż potencjał operacyjny ugrupowania roju jest niemalże nieograniczony<sup>19</sup>.

Podczas testu z użyciem BSP Perdix sprawdzone zostały możliwości formowania roju oraz wykonywania autonomicznych manewrów bez udziału operatorów. Dane pochodzące z nawigacji GPS w połączeniu z mapą okolicy pozwoliły w pierwszej kolejności na sformowanie ugrupowania roju. Następnie po zgrupowaniu mikro BSP we wcześniej określonym miejscu rozpoczęły realizację czterech zdefiniowanych misji. Trzy z nich dotyczyły rozpoznania określonych wcześniej celów, z kolei czwarta dotyczyła sformowania 100-metrowego kręgu<sup>20</sup>.

Połączone ze sobą mikro „bezzałogowce” już po wystrzeleniu tworzą samodzielnie rój bez konieczności kontaktu z operatorami. Rój może również reagować na wydarzenie mające miejsce na teatrze działań – dokonywać reorganizacji formacji, czy też dokończyć zadanie pomimo utraty części członków formacji.

Na podstawie przeprowadzonych testów należy stwierdzić, iż tworzące formację roju mikro bezzałogowe statki powietrzne Perdix mogą być wykorzystywane<sup>21</sup>:

- jako wabiki w misjach SEAD<sup>22</sup>,
- do wykrywania radarów wroga, jeśli są wyposażone w nadajniki elektroniczne,
- do śledzenia terrorystów, jeśli są wyposażone w kamery,
- przede wszystkim do rozpoznania.

Ponadto przewiduje się, iż w przyszłości będą one zdolne do przenoszenia bomb półmetrowej długości.

**19** *U.S. Military Successfully Tested Its Latest Super Weapon: “The Swarm”*, online – <http://nationalinterest.org/blog/the-buzz/us-military-successfully-tested-its-latest-super-weapon-%E2%80%98the-19002> [dostęp: 05.06.2017].

**20** *The Pentagon’s autonomous warping drones are the most unsettling thing you’ll see today*, online – <http://www.popularmechanics.com/military/aviation/a24675/pentagon-autonomous-swarming-drones/> [dostęp: 12.06.2017].

**21** *Pentagon tests world’s largest hive mind controlled drone swarm jam weapons spy enemy launch deadly attacks*, online – <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4105554/Pentagon-tests-world-s-largest-hive-mind-controlled-drone-swarm-jam-weapons-spy-enemy-launch-deadly-attacks.html> [dostęp: 06.03.2017].

**22** SEAD (*Suppression of Enemy Air Defenses*) – misje zwalczania systemów obrony obszaru powietrznego przeciwnika.

Przeprowadzone testy pokazują, jak dużym potencjałem dysponują mikro BSP. Pomimo ograniczeń są one w stanie z powodzeniem zastąpić ich większe i dużo droższe odpowiedniki. Ponadto należy również podkreślić, że jeśli ugrupowanie roju zaadaptowane zostanie do działań mikro BSP, to należy spodziewać się, że w przyszłości w formacji roju zaczną również operować SBSP kategorii MALE oraz HALE.

## Zakończenie

Idea funkcjonowania BSP w ugrupowaniu roju – autonomicznych układów BSP, nie jest nowa. Departament Obrony Stanów Zjednoczonych dysponuje szeregiem programów bezzałogowych rojów zarówno dla sił powietrznych, jak również marynarki wojennej. Jednakże wydaje się, iż program mikro BSP Perdix jest obecnie najbardziej zaawansowanym technologicznie przykładem wykorzystania bardzo dużego zbioru (ugrupowania) bezzałogowych statków powietrznych. Istnieją przesłanki, iż Pentagon będzie starał się jak najszybciej wdrożyć mikro BSP Perdix do służby w regularnych jednostkach.

Wydaje się, iż Perdix jest tylko namiastką tego, czego można spodziewać się w najbliższej przyszłości. Operujące w przyszłości roje bezzałogowych statków powietrznych wykorzystywane będą do realizacji wielu zadań – od rozpoznania powietrznego, przez walkę elektroniczną, na misjach SEAD kończąc. Przedstawiana technologia jest dopiero w fazie początkowej, aczkolwiek dysponuje znacznym potencjałem rozwojowym.

Mikro BSP Perdix przedstawiane są przede wszystkim jako aparaty służące do rozpoznania, jednakże w przyszłości można spodziewać się, iż mikro BSP będą zdolne do przenoszenia bomb około półmetrowej długości. Ponadto bardzo prawdopodobne jest, że bardzo duże liczebnie roje będą angażowane do realizacji misji SEAD – zwalczania obrony powietrznej przeciwnika.

Istnieje wiele możliwości zastosowań dla rojów mikro bezzałogowych statków powietrznych. Po uwolnieniu mikro BSP z zasobników „myśliwców” mogą one zostać zaangażowane do zapewnienia rozpoznania dla żołnierzy operujących na lądzie, śledzenia ruchów przeciwnika oraz przekazywania informacji do zainteresowanych na temat sytuacji na terenie działań. Ponadto mogą być wykorzystywane do prowadzenia dezinformacji w szeregach przeciwnika, bądź też zapewniania ciągłego dopływu informacji z wcześniej wybranego (określonego) obszaru.

Bardzo prawdopodobne jest, iż w przyszłości tego rodzaju aparaty latające wyposażone w środki rażenia będą w stanie wykonywać ataki na wyznaczone obiekty – w pierwszej kolejności na pojedynczych żołnierzach. Nie należy również wykluczać, że zaangażowane zostaną do walk powietrznych, w których będą wykorzystywane do mylenia radarów statków powietrznych przeciwnika, jak również do imitacji obiektów naziemnych, np. pojazdów czy rakiet balistycznych. Prawdopodobne jest również to, iż ugrupowanie roju SBSP zdolne będzie do tworzenia ugrupowania COMAO<sup>23</sup> na wzór ich załogowych odpowiedników.

### Bibliografia

- ATP-3.3.7 Guidance for the training of unmanned aircraft systems (UAS) operators*, Edition B, Version 1, NATO Standardization Agency 2014.
- Department of Defense Announces Successful Micro-Drone Demonstration*, online – <https://www.defense.gov/News/News-Releases/News-ReleaseView/Article/1044811/department-of-defense-announces-successful-micro-drone-demonstration>.
- <http://www.navaldrone.com/perdix.html>.
- <https://www.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/Perdix%20Fact%20Sheet.pdf>.
- [https://www.researchgate.net/figure/278681689\\_fig15\\_Figure-1-21-A-UAV-swarming-concept-where-only-a-subset-of-the-UAVs-are-directly](https://www.researchgate.net/figure/278681689_fig15_Figure-1-21-A-UAV-swarming-concept-where-only-a-subset-of-the-UAVs-are-directly).
- Karpowicz J., *Bezzałogowe aparaty latające w operacjach powietrznych*, AON, Warszawa 2003.
- Mehta A., *Panatagon Launches 103 Unit Drone Swarm*, online – <http://www.defensenews.com/articles/pentagon-launches-103-unit-drone-swarm>.
- Michalak W., *Dominacja w powietrzu i z powietrza*, „Zeszyty Naukowe AON” 2013, nr 3(92).
- Pentagon tests world's largest hive mind controlled drone swarm jam weapons spy enemy launch deadly attacks*, online – <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4105554/Pentagon-tests-world-s-largest-hive-mind-controlled-drone-swarm-jam-weapons-spy-enemy-launch-deadly-attacks.html>.
- Snow S., *Pentagon successfully tests world's largest micro-drone swarm*, online – <http://www.militarytimes.com/articles/pentagon-successfully-tests-worlds-largest-micro-drone-swarm>.
- Szondy D., *Super Hornets drop world's largest swarm of micro-drones*, online – <http://newatlas.com/perdix-micro-drones-super-hornets/47333>.
- The Pentagon's autonomous swarming drones are the most unsettling thing you'll see today*, online – <http://www.popularmechanics.com/military/aviation/a24675/pentagon-autonomous-swarming-drones/>.
- Zajac S., *Siły powietrzne. Dzień dzisiejszy i wyzwania przyszłości*, AON, Warszawa 2008.

23 COMAO (*Composite Air Operation*) – połączona operacja powietrzna.

# Nowe technologie w dowodzeniu siłami powietrznymi

## Streszczenie

Zidentyfikowanie nowych technologii jest niezwykle istotne z punktu widzenia rozwoju systemu dowodzenia siłami powietrznymi. Z wielu rodzajów technologii wybrano jednak te, które są najbardziej rozwinięte i mogą w istotny sposób kształtować system dowodzenia, tj.: informatyczne, nanotechnologie, hologram i holografia, sztuczna inteligencja oraz materiały fotoniczne. W artykule przedstawiono możliwy wpływ nowych technologii na wybrane obszary systemu dowodzenia, takie jak: personel, stanowiska dowodzenia, proces decyzyjny, łączność oraz dokumenty dowodzenia.

**Słowa kluczowe:** dowodzenie, planowanie, technologie, materiały.

## Wstęp

Daleko idące zmiany, powstałe przez komputeryzację i rozwój nowych technologii od drugiej połowy XX wieku po dzień dzisiejszy, nazywane rewolucją cyfrową, mają coraz większy wpływ na wszystkie dziedziny działalności człowieka. Dynamiczny rozwój technologii będzie także znajdował coraz szersze odzwierciedlenie w organizacjach wojskowych, a w szczególności we wszelkiego rodzaju platformach, systemach rażenia, rozpoznania, a także dowodzenia. Wymagania operacyjne poszczególnych rodzajów sił zbrojnych zdeterminowane są postęпом w rozwoju technologii, który następuje wielokierunkowo. Można z pewnym błędem prognozować obszary potencjalnych osiągnięć w wybranych rodzajach technologii. Rozwój naukowo-techniczny zauważalny jest w takich dziedzinach, jak: mechatronika, spintronika, biotechnologia, nanotechnologia, technologia cyfrowa i informacyjna, fotonika, inżynieria kwantowa itp., a postęп w tych obszarach działania ma znaczący

wpływ na budownictwo, rozwój maszyn i urządzeń, środki łączności i informatyki. Jednak ich dalszy rozwój uzależniony będzie od uwzględnienia takich czynników, jak: ekonomiczne (dostępność środków finansowych, wielkość zamówień oraz organizacyjno-strukturalne uwarunkowania badań, rozwoju i produkcji), technologiczne (ogólny poziom rozwoju nauki i technologiczne zaawansowanie zaplecza badawczego).

Zastosowanie nowoczesnych technologii na potrzeby wojska pozwala na osiągnięcie przewagi nad przeciwnikiem i w rezultacie pokonanie go. Aby siły powietrzne mogły z powodzeniem prowadzić działania, muszą posiadać zmotywowane, dobrze wyszkolone siły oraz niezbędną ilość nowoczesnych i niezawodnych środków walki. W celu efektywnego wykorzystania zasadniczych cech sił powietrznych, czyli elastyczności użycia, zasięgu oddziaływania, szybkości oraz manewrowości, należy w odpowiedni sposób zorganizować i wykorzystywać system dowodzenia tymi siłami. Zapewni to także osiągnięcie efektu synergiczności podczas prowadzonej operacji połączonej, a w czasie pokoju – realizację zadań w ramach Zintegrowanego Systemu Obrony Powietrznej i Przeciwrakietowej NATO (*NATO Integrated Air and Missile Defence System – NATINAMDS*), a także umożliwi bezpieczne szkolenie personelu latającego w powietrzu. Zadania te realizowane są z wykorzystaniem obsad stanowisk dowodzenia oraz środków dowodzenia<sup>1</sup> rozmieszczonych na stanowiskach dowodzenia. Bez sprawnego i nowoczesnego systemu dowodzenia niemożliwe będzie także właściwe planowanie, organizowanie i kontrola działań. Jednakże, aby zapewnić właściwe funkcjonowanie organów dowodzenia, niezbędnym jawi się poszukiwanie nowych rozwiązań zapewniających ich żywotność, sprawność i ciągłość działania.

Celem artykułu było zidentyfikowanie nowych technologii oraz określenie ich wpływu na dowodzenie siłami powietrznymi.

## Wpływ nowych technologii na czynnik ludzki w dowodzeniu siłami powietrznymi

Czynnik ludzki jest jednym z najistotniejszych elementów zapewniających efektywne i skuteczne dowodzenie siłami powietrznymi. Czynnik ludzki można rozpatrywać na wielu płaszczyznach. W węższym znaczeniu można

<sup>1</sup> *Doktryna systemu dowodzenia Sił Zbrojnych RP – DD/6.1*, Szt. Gen. WP, Warszawa 2009, s. 10.



go odnieść do wykonawcy zadań (np. pilota, obsługi stacji radiolokacyjnej, systemów przeciwlotniczych itp.), czy też – szerzej rozpatrując – do obsady stanowiska dowodzenia planującej użycie sił powietrznych w ramach narodowej operacji obronnej. Dodatkowo czynnik ludzki może być rozpatrywany jako pewnego rodzaju interakcje między człowiekiem a technologią, pracownikami, maszynami czy środowiskiem.

W siłach powietrznych czynnik ludzki jest analizowany w celu lepszego zrozumienia, w jaki sposób ludzie mogą szerzej wykorzystywać coraz bardziej zaawansowane technologicznie systemy oraz w jaki sposób mogą bezpiecznie i skutecznie być zintegrowani z technologią.

Biorąc powyższe pod uwagę, należy wskazać, że przygotowanie obsad etatowych stanowiska dowodzenia do pracy twórczej wymaga kształtowania wielu umiejętności, często pomijanych lub nienależycie akcentowanych w tradycyjnej edukacji wojskowej. Zaliczyć do nich można kształtowanie podejmowania decyzji, wyszukiwanie i wykorzystywanie informacji, wyobraźni itp. Zmusza to zatem system szkolenia sił zbrojnych do bardziej aktywnego poszukiwania rozwiązań gwarantujących przygotowanie człowieka do działalności zawodowej, charakteryzującej się kompetencją i otwartością na nowości oraz działaniem twórczym. Dlatego też coraz więcej wysiłku ukierunkowuje się przede wszystkim na poszukiwanie nowych rozwiązań technologicznych, sprzyjających szybszemu uczeniu się, zapamiętywaniu, analizowaniu, diagnozowaniu itp. Jednym z istotnych czynników sprzyjających temu zadaniu jest upowszechnienie stosowania metod informatycznych.

Komputer i Internet mogą wspomagać rozwój intelektualny, pozwalają pogłębiać zasoby wiedzy, ucą rozwiązywania problemów, wyrabiania nawyków samodzielnego i twórczego myślenia oraz rozwijania samodzielności. Zasoby wiedzy są różnie definiowane w literaturze. Jak wskazuje T. Stewart, obejmują one: wiedzę zawartą w umysłach pracowników (umiejętności, sposób działania, doświadczenie), wiedzę zapisaną w dokumentach oraz wiedzę chronioną za pomocą patentów, znaków towarowych, tajemnic handlowych<sup>2</sup>. Istnieją więc różne kategorie wiedzy – nie każda jest w równym stopniu dostępna i różny przebieg ma proces jej przekazywania. Technologie informacyjno-komunikacyjne bez wątpienia zwiększyły dostęp zarówno do informacji, jak i do zasobów wiedzy. Obecnie

2 M. Kolarz, *Znaczenie wiedzy i kapitału intelektualnego we współczesnej gospodarce i organizacji* [w:] *Kapitał ludzki w dobie integracji i globalizacji*, red. B. Kulusznik, Wydawnictwo UŚ, Katowice 2005, s. 79–80.

na stanowiskach dowodzenia wykorzystywane są komputery o dużych możliwościach pamięciowych, co umożliwia przechowywanie ogromnych zbiorów danych. Mogą to być informacje dotyczące aktualnych dokumentów doktrynalnych, procedur i taktyki działania, możliwości taktyczno-operacyjnych posiadanego uzbrojenia i sprzętu wojskowego itp. Ponadto poprzez połączenia sieciowe lub Internet można w szybki sposób pozyskać daną informację z innych źródeł (np. NATO, bibliotek, ośrodków naukowo-badawczych, innych stanowisk dowodzenia itp.). W tym przypadku technika daje możliwości zdobycia wiedzy specjalistycznej niezbędnej na danym stanowisku służbowym. Z kolei zastosowanie holografii zwiększa możliwość wizualizacji prezentowanych danych. Umożliwia dokładne i rzeczywiste odwzorowanie obiektu (nawet, jeśli jest fragmentaryczny), a przez to zapewnia obsadzie stanowiska dowodzenia właściwą ocenę sytuacji. Szczególnie przydatna jest przy kształtowaniu takich cech osobowych, jak: wyobraźnia, umiejętność przewidywania zmian, szybkość reakcji itp.

Z kolei, jak pokazują badania, najbardziej interesujące dla kształtowania rozwoju myślenia twórczego są gry sprzyjające tworzeniu wiedzy generatywnej (problemowe), do których zalicza się gry symulacyjne, sytuacyjne oraz inscenizacyjne. Gry symulacyjne przedstawiają rzeczywistość w dowolnym czasie. Idea tych gier polega na przejściu punktu wyjściowego, po którym następuje ciąg posunięć. W każdym ruchu gracz wybiera spośród kilku możliwości określonych przez zmienne wejściowe i parametry modelu symulacyjnego. Obok gier symulacyjnych mających charakter dywergencyjny obserwuje się także gry oparte na zasadzie tworzenia sztywnego ciągu sytuacji, czyli konwergencyjne. W procesie edukacyjnym personelu stanowisk dowodzenia są one szczególnie istotne, gdy chcemy, aby uczący się dokonywał określonego wyboru. Sprzyja to kształtowaniu umiejętności niezbędnych do planowania działań, przewidywania określonych sytuacji oraz podejmowania decyzji. Oprócz komputera także system sztucznej inteligencji stanowi innowacyjną technologię, która może mieć szerokie wykorzystanie w procesie uczenia się oraz uogólniania nabytej wiedzy. Głównym celem badań nad sztuczną inteligencją w drugim znaczeniu jest konstruowanie maszyn i programów komputerowych zdolnych do realizacji wybranych funkcji umysłu i ludzkich zmysłów niepoddających się prostej numerycznej algorytmizacji. Istnieją dwa podstawowe podejścia do pracy nad sztuczną inteligencją. Pierwsze to tworzenie modeli matematyczno-logicznych analizowanych problemów i implementowanie ich w formie programów komputerowych mających realizować konkretne funkcje, uważane powszechnie za składowe inteligencji. W tej grupie, tzw. podejścia symbolicznego, są np. algorytmy genetyczne, metody logiki rozmytej i wnioskowania

bazującego na doświadczeniu. Drugie to podejście subsymboliczne polega na tworzeniu struktur i programów „samouczących się”, bazujących na modelach sieci neuronowej i sieci asocjacyjnych, oraz opracowywaniu procedur „uczenia” takich programów, rozwiązywania postawionych im zadań i szukania odpowiedzi na wybrane klasy „pytań”. W trakcie wieloletniej pracy laboratoriów i zespołów stosujących oba podejścia do problemu okazało się, że postęp w tej dziedzinie będzie bardzo trudny i powolny. Często mimo niepowodzeń w osiąganiu zaplanowanych celów laboratoria te wypracowywały nowe techniki informatyczne, które okazywały się użyteczne do zupełnie innych celów. Najnowsze podejście do problemów sztucznej inteligencji to rozwijanie różnych form inteligencji rozproszonej (wzorowanej na organizacjach ludzkich, np. personoidy), oraz tzw. agentów autonomicznych i „inteligentnych”. Dziedzina ta nosi nazwę *technologii agentów inteligentnych (Intelligent Agent Technology)*. Prace w dziedzinie sztucznej inteligencji przyniosły wiele konkretnych rezultatów, które znalazły już praktyczne i powszechne zastosowania, m.in. w programach kosmicznych, ekspertowych systemach dowodzenia, identyfikowaniu obrazów, np. zdjęć satelitarnych<sup>3</sup>. Należy również wskazać na ogromny wpływ sztucznej inteligencji na tworzenie wszelkiego rodzaju symulatorów. W dniu dzisiejszym symulacja znajduje szerokie zastosowanie w wojsku. Umożliwia wprowadzenie uczestników w ciekawą i bardzo złożoną wirtualną rzeczywistość. Symulator zapewnia naukę przez działanie i doświadczenie, pozwala na skupienie uwagi i rozwija koordynację ruchową oraz spostrzegawczość i szybkość reakcji. Wyrabia umiejętności zapamiętywania odpowiednich sekwencji działań. Dzięki powyższym cechom symulator jest uznawany za niezbędne narzędzie wspomagające proces planowania działań sił powietrznych. Szczególnie w aspekcie opracowywania ofensywnych i defensywnych wariantów działań w odniesieniu do przeciwnika oraz wojsk własnych.

## **Wpływ nowych technologii na stanowisko dowodzenia siłami powietrznymi**

Ważnym elementem organizacji wojskowej są jej struktury funkcjonalne (stanowiska dowodzenia), które stanowią centra kierowania działaniami na czas konfliktu zbrojnego. Zgodnie z definicją stanowisko dowodzenia to

3 [http://pl.wikipedia.org/wiki/Sztuczna\\_inteligencja](http://pl.wikipedia.org/wiki/Sztuczna_inteligencja) [dostęp: 19.05.2017].

powiązane organizacyjnie i funkcjonalnie elementy koncepcyjne (organa dowodzenia) i zabezpieczające (oddziały i pododdziały dowodzenia) rozmieszczone w określonych miejscach (obiektach) w celu zapewnienia sprawnego dowodzenia wojskami. Na stanowiskach tych znajduje się określony skład osób funkcyjnych (dowództwo danego szczebla oraz oficerowie łącznikowi innych jednostek), niezbędne techniczne środki dowodzenia (łączości, informatyki, automatyzacji dowodzenia), miejsca do pracy i środki do przemieszczania stanowiska dowodzenia (kontenery, namioty, wozy dowodzenia, wozy dowódczo-sztabowe, autobusy sztabowe, inne pojazdy) oraz pododdziały wsparcia dowodzenia wyznaczone do ochrony, obrony oraz szeroko rozumianego zabezpieczenia logistycznego (hotel, stołówka itp.). W celu zapewnienia sprawnego i skutecznego dowodzenia wojskami stanowiska dowodzenia powinny być mobilne (łatwe do przemieszczania i rozmieszczania), wyposażone w nowoczesne techniczne środki dowodzenia i łączności, chronione oraz odporne na działanie środków rażenia przeciwnika. Ponadto powinny zapewniać ciągłość dowodzenia, dobre warunki pracy i wypoczynku dla obsady personalnej stanowiska oraz odpowiadać liczebnie (ilość personelu) potrzebom zadań przewidzianych do realizacji w systemie pracy zmianowej<sup>4</sup>. Aby sprostać tym wymaganiom, w siłach powietrznych przyjęto, że na każdym szczeblu dowodzenia organizowane jest stanowisko dowodzenia (SD) rozwijane w dotychczasowym miejscu pracy (DMP) i zapasowym miejscu pracy (ZMP). Ponadto na poziomie taktycznym SP w jednostkach szkolenia, zabezpieczenia logistycznego oraz wsparcia dowodzenia rozwijane są punkty kierowania (PK).

Od lat można zauważyć dwa trendy w rozwoju środków rozmieszczenia stanu osobowego – budowanie dużych, umocnionych podziemnych stanowisk dowodzenia oraz tworzenie ich mobilnych odpowiedników. Rozwój obiektów stacjonarnych zmierza do zastosowania wszystkich, aktualnie dostępnych rozwiązań technicznych, mających wpływ na żywotność takich obiektów.

Praktyka dowodzenia siłami powietrznymi w wielu państwach wskazuje, że nadal są wykorzystywane rozbudowane inżynieryjnie, umocnione stanowiska dowodzenia, pełniące funkcje centralnych organów dowodzenia siłami powietrznymi. Niejednokrotnie tego rodzaju stanowiska dowodzenia rozmieszczane są wewnątrz masywów skalnych, które zapewniają im kilkudziesięciometrową osłonę przed lotniczymi lub raketowymi środkami rażenia. Nowym zjawiskiem obserwowanym w krajach arabskich jest stosowanie

4 J. Michniak, *Dowodzenie w teorii i praktyce wojsk*, AON, Warszawa 2003, s. 77.

technik górniczych w budowie nowych, głęboko umieszczonych obiektów (*deeply buried targets*) na potrzeby systemu dowodzenia siłami powietrznymi<sup>5</sup>. Pozwala to na maskowanie położenia powstających w ten sposób obiektów przed rozpoznaniem satelitarnym oraz uzyskiwanie wysokiej odporności na uderzenia konwencjonalnych środków rażenia. Stacjonarne umocnione obiekty zabezpieczające funkcjonowanie organów dowodzenia siłami powietrznymi będą w perspektywie kilkunastu najbliższych lat mogły funkcjonować zupełnie odizolowane od otoczenia przez bardzo długi okres czasu i realizować funkcje dowodzenia w warunkach użycia broni masowego rażenia. Takie obiekty sprawdzają się w terytorialnych systemach obrony powietrznej, lecz mimo wszystko są dość łatwe do rozpoznania i zniszczenia. Dlatego też w dalszym ciągu będą organizowane obiekty zapasowe i pozorne mające zmylić potencjalnego przeciwnika. Ważnym aspektem utrzymywania stacjonarnych obiektów zabezpieczających funkcjonowanie systemu dowodzenia siłami powietrznymi są wysokie koszty. Powoduje to, że nie dąży się obecnie do zwiększania ilości umocnionych obiektów dla rozmieszczenia elementów systemu dowodzenia siłami powietrznymi, ale poszukuje się innych sposobów zwiększania żywotności systemu. Analiza dostępnych materiałów o współczesnych konfliktach pozwala na stwierdzenie, że zapewnienie zdolności przetrwania odgrywało w nich zawsze bardzo istotną rolę. W świetle powyższego zagadnienia związane ze zwiększeniem odporności obiektów stanowisk dowodzenia na oddziaływanie środków rażenia nabierają szczególnego znaczenia. Skuteczne przeciwdziałanie współczesnym środkom rażenia może być osiągnięte poprzez stosowanie nowych materiałów i konstrukcji zarówno do budowy obiektu, jak i do maskowania go oraz fortyfikacji. Wymagany efekt zapewnienia zdolności przetrwania stanowisk dowodzenia zostanie osiągnięty pod warunkiem zastosowania nowoczesnych technologii zapewniających:

- ochronę przed rozpoznaniem,
- ochronę i osłonę przed środkami walki, takimi jak broń inteligentna, środki precyzyjnego rażenia wyposażone w kompleksowe systemy rozpoznawcze,
- wyeliminowanie dysproporcji istniejącej między możliwościami rozpoznania i maskowania.

5 E.M. Sepp, *Deeply Buried Facilities: Implications for Military Operations*, Air University, Maxwell AFB 2000, s. 10.

Z dostępnych materiałów wynika, że w wyposażeniu czołowych armii świata znajduje się bogaty asortyment środków przeznaczonych do maskowania. Cechują się one szerokim zakresem promieniowania elektromagnetycznego – od ultrafioletu do pasma mikrofalowego.

Powszechnie stosowanym sposobem maskowania jest malowanie deformujące. Używane są dwa rodzaje farb:

- farby zasadnicze, o wysokiej wytrzymałości, na bazie dyspersji alkidowej, poliuretanowej lub z żywic, przewidziane do malowania sprzętu wojkowego podstawowego w okresie pokoju,

- farby przewidziane do sezonowego malowania obiektów lub sprzętu w warunkach bojowych.

Nowoczesne pokrycia maskujące mają podobną konstrukcję (sieć + materiał zapełniający), a zróżnicowanie dotyczy rodzaju i struktury materiału, wybarwień oraz zakresu własności maskujących. Występuje tendencja do wprowadzania pokryć o poszerzonym zakresie maskowania. Zastępują one pokrycia pierwszej generacji o właściwościach maskujących tylko w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni, przy czym w kolejnych wersjach pokryć własności te zostają zachowane. Pokrycia maskujące mają zróżnicowany układ wybarwień po obu stronach (procentowy udział barwy zielonej jest różny dla wybarwień wczesnowiosennych i jesiennych). W skład zestawów do maskowania wchodzi pokrycia maskujące o rozmiarach dostosowanych do gabarytów sprzętu i obiektów oraz elementy wsporcze do rozpinania pokryć nad maskowanym obiektem czy urządzeniem. Występuje duża różnorodność zestawów w różnych armiach. Na uwagę zasługują zestawy składające się z kilku dużych parasoli przewidzianych do ustawiania bezpośrednio na sprzęcie lub obok niego oraz tzw. maski deformujące. Parasole ustawiane obok sprzętu nie zakrywają całej jego powierzchni, a jedynie deformują charakterystyczne kształty. System ten pozwala na zmniejszenie powierzchni pokryć, ułatwia szybkie zamaskowanie (czas markowania wynosi kilka minut). Elementy wsporcze maski deformującej połączone są w sposób przegubowy z korpusem sprzętu i umożliwiają rozpinanie odcinków siatki w celu zdeformowania sylwetki sprzętu. W sprzyjających warunkach terenowych maska deformująca może spełniać swoją funkcję również w czasie ruchu, np. wozu bojowego.

Oprócz pokryć w postaci siatek opracowano różnego rodzaju materiały absorbujące promieniowanie radarowe (RAM). Są one przewidziane do nakładania bezpośrednio na powierzchnie zewnętrzne obiektów w miejscach największych odbić. Występują w postaci past (farb) nakładanych metodą malowania warstwowego lub elastycznych arkuszy bądź płytek przyklejanych

do podłoża (korpusu). W połączeniu z pokryciami antyradarowymi w formie siatek materiały RAM nałożone na zewnętrzne powierzchnie sprzętu znacznie zwiększają stopień osłony sprzętu przed rozpoznaniem radarowym, a ponadto zapewniają maskowanie dynamiczne, tzn. w czasie ruchu obiektu. Środki do maskowania przed rozpoznaniem termalnym stosowane są samodzielnie lub łącznie z pokryciami typu siatki. Występują one w postaci osłon termicznych, mat teksturowych i ekranów termoizolacyjnych. Mogą one spełniać jedno z dwóch zadań: przesłaniać silnie promieniujące elementy sprzętu oraz przeciwdziałać nagrzewaniu się zewnętrznych powierzchni sprzętu przy intensywnym nasłonecznieniu. Efektem stosowania tego typu środków jest obniżenie emisji promieniowania obiektu oraz zniekształcenie zobrazowania termalnego maskowanego obiektu.

Zestawy do maskowania aktywnego nabierają szczególnego znaczenia w warunkach stosowania inteligentnych środków rażenia. W skład tych zestawów wchodzi urządzenie ostrzegające o opromieniowaniu obiektu wiązką laserową lub radiolokacyjną; wyrzutnie środków dymnych, instalacje do zadymiania oparte na spalaniu oleju napędowego; wyrzutnie pozornych celów radiolokacyjnych (paski folii metalizowanej – tzw. odbijacze dipolowe); wyrzutnie substancji i ładunków emitujących energię cieplną.

Aktualnie poszukuje się takich substancji, które wytwarzałyby zasłonę chroniącą nie tylko przed obserwacją optyczną. Zasadniczym ograniczeniem skuteczności systemu jest krótkotrwałość zasłon dymnych lub działania celów pozornych. Istotną sprawą jest osiągnięcie właściwego powiązania poszczególnych urządzeń z systemem ostrzegania o zagrożeniu. Efektywność systemu zależy od czasu uzyskania informacji niezbędnych do wyboru właściwego momentu uruchomienia urządzeń maskujących. Wyrażane są opinie, że system ten będzie stanowił ważne ogniwo w ramach przedsięwzięć obrony przed bronią inteligentną.

W przypadku nowych materiałów stosowanych do budowy stanowisk dowodzenia szczególną wagę przywiązuje się do ich wielofunkcyjności. Zazwyczaj podstawową funkcją materiałów w większości zastosowań jest funkcja konstrukcyjna – przenoszenia obciążeń i zachowania zadanej geometrii elementu. Materiały wielofunkcyjne (zwłaszcza konstrukcyjne materiały wielofunkcyjne) dla wojska muszą ponadto spełniać co najmniej jedną dodatkową funkcję z szerokiego spektrum zadań, takich jak: określone zachowanie elektryczne (zapewnienie izolacji albo określonego stopnia przewodności), cieplne (kontrolowany przepływ ciepła), zmniejszenie wykrywalności (maskowanie, pochłanianie/ekranowanie emitowanych śladów promieniowania),

reakcja na zmianę położenia, kształtu lub obciążenia, monitorowanie niezawodności i żywotności („samoistne” generowanie danych o odkształceniu lub uszkodzeniu) oraz zdolność do samoregeneracji (poprzez wbudowane mechanizmy odtwarzania lokalnych ubytków i uszkodzeń). Rozwijane koncepcje materiałów wielofunkcyjnych dotyczą wszystkich klas materiałów, tj. metali, ceramiki i polimerów, ale szczególna sensowność takiego podejścia występuje w przypadku kompozytów. Wszystkie materiały „inteligentne” są jednocześnie materiałami wielofunkcyjnymi, a występujące w nich zjawiska fizyczne na poziomie mikroskopowym lub molekularnym są odpowiedzialne za ich makroskopową „reakcję” na impuls elektryczny, magnetyczny lub cieplny. Według źródeł amerykańskich<sup>6</sup> najbardziej obiecujące klasy materiałów wielofunkcyjnych do zastosowań w obiektach stanowisk dowodzenia to materiały inteligentne, kompozyty oraz kleje i materiały powłokowe.

W grupie efektywnych materiałów inteligentnych występują materiały o właściwościach piezoelektrycznych, stopy z pamięcią kształtu i aktywne polimery. Kierunkiem rozwoju w materiałach piezoelektrycznych jest przejście do formy monokrystalicznej, która zapewnia zdecydowanie większy zasięg kontrolowanych zmian wymiarowych pod wpływem zmian pola elektrycznego lub wartości generowanego sygnału elektrycznego pod wpływem zmiany obciążenia. Oczekiwane zastosowanie wojskowe tych materiałów to mikroczujniki i elementy wykonawcze „wbudowywane” w strukturę innych wielofunkcyjnych materiałów.

Stopy z pamięcią kształtu, w tym znany nitinol (NiTi), to materiały na miniaturowe elementy wykonawcze (aktuatory) generujące zdolność do zmiany kształtu i wykonania pracy mechanicznej pod wpływem zmiany temperatury. W perspektywie najbliższych 20 lat zakłada się uzyskanie efektu pamięci kształtu w materiałach o właściwościach magnetycznych, cienkich warstwach, strukturach porowatych i pianach oraz kompozytach zawierających wzmocnienie charakteryzujące się niską masą. Potencjalne (częściowo już obecne) aplikacje wojskowe materiałów z pamięcią kształtu to czujniki monitorujące „mapy” warunków eksploatacji konkretnych elementów, elementy o zdolności do samoregeneracji uszkodzeń (w formie pian lub kompozytów z pamięcią kształtu, m.in. w strukturze „inteligentnego” budynku lub pojazdu), elementy wykonawcze generujące przemieszczenie i siłę (w formie cienkich warstw)

6 Materials Research to Meet 21<sup>st</sup> Century Defence Needs – Structural and Multifunctional Materials, National Materials Advisory Board Seminar, 2003 Spring Meeting.



oraz elementy o kontrolowanych właściwościach magnetycznych. Szczególnie ważne są prace w zakresie cienkowarstwowych form stopów z pamięcią kształtu ze względu na możliwość zastosowania ich w konstrukcji systemów MEMS (*Micro Electronic-Mechanical Systems*) i NHMS (*Nono Eletronic-Mechanical Systems*). Tak złożone materiały, jak kompozytowe piany z pamięcią kształtu, dają szansę wytworzenia szczególnie pożądanego w aplikacjach wojskowych materiału ultralekkiego, odpornego na zniszczenie, a w skrajnym przypadku zdolnego do samoregeneracji powstałych uszkodzeń.

Polimery elektroaktywne lub polimerowo-metalowe kompozyty o zdolności wymiany jonów wykazują duże zmiany kształtu pod wpływem minimalnych zmian napięcia. Umożliwia to sterowanie przewodnością elektryczną (od poziomu typowego dla półprzewodników do tak wysokiego, jak przewodność miedzi) i zmianę koloru tych aktywnych materiałów pod wpływem stymulacji chemicznej lub elektrycznej, przez co polimery aktywne są badane jako materiał czujników światła lub zmian składu chemicznego środowiska, elementów wykonawczych (aktuatorów) wyzwalanych impulsem elektrycznym, świetlnym lub chemicznym, a także w roli materiału wielofunkcyjnego o zdolnościach do samoregeneracji (np. jako składnik „niekonstrukcyjny” pancerza inteligentnego).

W zakresie wielofunkcyjnych kompozytów (o osnowie polimerowej, metalowej i ceramicznej) już uzyskano rozwój poprzez zastosowanie optycznych czujników do monitorowania stanu lokalnych naprężeń w konstrukcji. Przewadzone są też prace w obszarze możliwości wbudowywania do struktury tych materiałów „inteligentnych” aktuatorów piezoelektrycznych lub z materiałów wykazujących pamięć kształtu. Jednak szanse na rewolucyjny rozwój tej grupy materiałów da zapewne dopiero szersze wprowadzenie metod wytwarzania z grupy nanotechnologii, upowszechnienie technologii bezprzewodowych sieci nanoczujników i pełne zastosowanie efektu samoregeneracji materiału. Nanotechnologia w odniesieniu do kompozytów to przede wszystkim nanometryczne rozmiary fazy wzmacniającej, występującej zazwyczaj pod postacią nanorurek lub innych nanocząstek. Zdolność kontroli udziału i „architektury” rozmieszczenia nanowzmocnienia w kompozytach (szczególnie polimerowych) ma m.in. przynieść regulowane właściwości mechaniczne, a ponadto możliwość monitorowania i nadzoru żywotności konstrukcji oraz zmiany poziomu „śladów” wpływających na wykrywalność obiektu. Szczególnie obiecującym kierunkiem poszukiwań są w tym zakresie badania dotyczące wzmocnienia kompozytów (zwłaszcza polimerowych) powlekanymi nanocząstkami

grafitu lub mikrowłóknami celulozy, ze względu na niski koszt i dostępność takiej formy wzmocnienia.

Stosunkowo proste w zamiarze, ale ze względu na wielkość obiektów złożone w realizacji, próby wbudowania w strukturę kompozytów polimerowych mechanizmu samoregeneracji polegają na wprowadzaniu do struktury kompozytu mikrokapsuł z chemicznym katalizatorem oraz odpowiednio z ciekłym nanomerem. Pod wpływem naruszenia spójności materiału w mikroobszarze dochodzi równoległe do uwolnienia zawartości mikrokapsuł i samoregeneracji uszkodzenia, co zapewnia powrót właściwości materiału do stanu przed odkształceniem. Problemem krytycznym pozostaje w tym przypadku czas niezbędny do samoregeneracji struktury materiału.

Ogólna koncepcja materiałów kompozytowych zakłada możliwość wytwarzania, przy zastosowaniu różnych kombinacji wielofunkcyjnej osnowy i wielofunkcyjnego wzmocnienia, tworzyw o różnym stopniu wielofunkcyjności. Przykłady potencjalnego wykorzystania takich materiałów, zwłaszcza dla potrzeb systemu dowodzenia, to:

- kompozyty z wbudowanymi mikrokapsułkami w osnowie, czułe na impuls cieplny, elektryczny lub poziom naprężeń i przez to zdolne do monitorowania stanu elementu konstrukcji i samonaprawy ewentualnych uszkodzeń;

- mikrokomórkowe piany konstrukcyjne użyte jako osnowa kompozytu mogą wykazywać zdolność: pochłaniania sygnału radaru, regulowania przewodności elektrycznej, emitowania światła, z kolei włókna wzmacniające mogą wykazywać czułość akustyczną;

- materiały o poprawionej zdolności maskującej (właściwe dla technologii *stealth*) są aktualnie wytwarzane jako wielowarstwowe, bardzo złożone układy, w których krytycznym problemem jest chropowatość i odporność na zużycie, technologia kompozytów ze specjalną rzeźbą powierzchni, kształtowaną w nanoskali umożliwia wytwarzanie monolitycznych makroelementów z wyeliminowaniem problemów typowych dla struktur wielowarstwowych.

Kleje i materiały powłokowe to ostatnia grupa tworzyw funkcjonalnych zaliczanych do perspektywicznych w nadchodzących 15–20 latach. Podkreśla się rolę klejów w upraszczaniu montażu, użyciu do zabezpieczania i izolowania stref powierzchni oraz litograficznym wytwarzaniu odpowiedniej faktury powierzchni elementów. Perspektywą w rozwoju klejów i technologii klejenia mają być m.in. szczegółowe (aż do poziomu budowy molekularnej) badania składu chemicznego i topografii łączonych powierzchni, zapewniające lepszą kontrolę procesów zwilżania i adhezji.

Ważnym aspektem rozwoju materiałów dla potrzeb obiektów dowodzenia są badania w zakresie materiałów używanych w podwyższonej i wysokiej temperaturze. Materiały użytkowane w wysokiej temperaturze, poza stosowaną w tych warunkach wytrzymałością i sztywnością, muszą cechować się wytrzymałością zmęczeniową oraz odpornością na utlenianie i korozję<sup>7</sup>.

## Wpływ nowych technologii na proces dowodzenia siłami powietrznymi

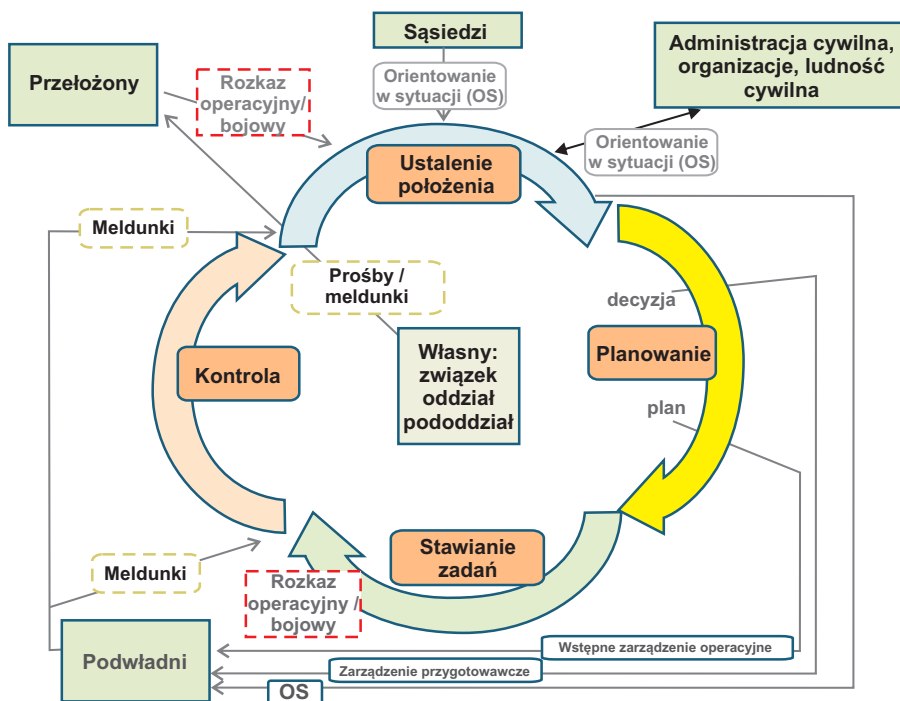
Z operacyjnego punktu widzenia proces dowodzenia traktuje się jako cykl decyzyjny typowy dla wszystkich szczebli dowodzenia, składający się z cyklicznie powtarzających się faz, etapów i czynności (rys. 22). Do tych faz zalicza się: ustalanie położenia, planowanie, stawianie zadań oraz kontrolę.

Kompetencje w zakresie realizacji wymienionych etapów procesu decyzyjnego można odnaleźć bez trudu w zadaniach poszczególnych organów dowodzenia. Przykładowy podział kompetencji i wzajemnych powiązań między dowódcą i sztabem zobrazowano na rysunku 22. Łatwo zauważyć po analizie zakresu odpowiedzialności dowódcy i sztabu, iż na realizację procesu decyzyjnego składają się dwa zasadnicze etapy: ocena jakościowa aktualnie dostępnych informacji oraz podjęcie decyzji operacyjnej określającej sposób działania.

Przetwarzanie informacji w systemach dowodzenia siłami powietrznymi uzależnione będzie od szczebla dowodzenia oraz funkcji, jakie ma spełniać określony organ dowodzenia. Główny wysiłek w pracach badawczo-rozwojowych skupiony jest na tworzeniu zautomatyzowanych systemów dowodzenia, które będą pozwalać na zmniejszanie wielkości obsad organów dowodzenia lotnictwem przy jednoczesnym zwiększaniu wielkości wysiłku lotniczego, dla jakiego możliwe będzie realizowanie funkcji dowodzenia związanych z planowaniem działań, stawianiem zadań, nadzorem nad ich realizacją oraz oceną rezultatów działań bojowych. Przykładem takich rozwiązań może być nатовski program systemu dowodzenia siłami powietrznymi (*NATO Air Command and Control System – ACCS*), w którego ramach tworzone jest zdolne do przerzutu centrum operacji powietrznych (*Deployable CAOC – DCAOC*).

7 A.T. Jackson, R.A. Eklund, J.A. Fink, *High – speed propulsion: Performance advantage of advanced materials*, J. Mat. Sc. 39, 19, 2004, s. 5905–5913.

Przy obsłudze 56 operatorów zautomatyzowane środki przetwarzania informacji DCAOC mają pozwalać na planowanie użycia lotnictwa z natężeniem do 1000 samolotolotów na dobę oraz stawianie zadań, nadzorowanie ich realizacji i ocenę rezultatów działania<sup>8</sup>.



Źródło: opracowanie własne na podstawie: J. Michnik, *Dowodzenie i łączność*, AON, Warszawa 2003, s. 47.

Rys. 22. Fazy procesu dowodzenia

Automatyzacja przetwarzania i obrazowania informacji wkracza w coraz szerszym stopniu do praktyki dowodzenia w siłach powietrznych na szczeblach taktycznych. Dynamicznie rozwijają się zautomatyzowane systemy wspomaganie planowania misji bojowych dla załóg lotnictwa uderzeniowego. W oparciu o bazy danych organów dowodzenia sił powietrznych oraz ustalenia zawarte w dokumentach rozkazodawczych systemy takie pozwalają organom dowodzenia jednostek lotnictwa oraz załogom lotniczym na zaplanowanie

<sup>8</sup> K. Nesbitt, *Deployable Operations Capability. The NATO Air Command and Control System*, „JAPCC Journal Edition” 2005, nr 2, s. 30.

sposobu wykonania zadania bojowego, użycia pokładowych środków rozpoznania oraz uzbrojenia. Rezultaty planowania są dostępne w formie danych cyfrowych wprowadzanych do pokładowych systemów nawigacyjno-celowniczych statku powietrznego. Możliwa jest także wizualizacja rezultatów planowania oraz ich wydruk.

Przykładem wśród najnowszych rozwiązań wykorzystywanych w systemie dowodzenia siłami powietrznymi przez organy dowodzenia szczebla taktycznego jest amerykański system JMPS (*Joint Mission Planning System*). Warty podkreślenia aspektem w rozwoju tego systemu jest dążenie do stworzenia w miarę uniwersalnego narzędzia dla dowodzenia w jednostkach lotnictwa wszystkich rodzajów sił zbrojnych, które może być dodatkowo konfigurowane dla określonych typów sprzętu poprzez rozbudowę oprogramowania (*Unique Planning Component* – UPC). System JMPS może być stosowany do przygotowania realizacji zadań bojowych przez samoloty i śmigłowce, bezzałogowe statki powietrzne, techniczne środki rozpoznania powietrznego, rakiety skrzydlate oraz precyzyjne lotnicze środki rażenia. System zapewnia niezbędne dla załóg lotniczych dane dotyczące sposobu realizacji zadań bojowych oraz dane do systemów nawigacyjno-celowniczych i systemów uzbrojenia wykorzystywanych do realizacji tych zadań.

W perspektywie najbliższych lat należy spodziewać się intensywnych prac nad szerszym, praktycznym wykorzystaniem w systemach automatyzacji procesów dowodzenia siłami powietrznymi tzw. sieci neuronowych. Sztuczne sieci neuronowe są tworem człowieka, ale działaniem naśladują to, co natura stworzyła i rozwijała przez miliony lat – strukturę nerwową potrafiącą odbierać docierające sygnały i efektywnie przetwarzać je na użyteczną informację. Wykorzystanie ich w procesie dowodzenia siłami powietrznymi w perspektywie kilkunastu najbliższych lat będzie wiązać się z dwoma czynnikami: umiejętnością generalizacji problemów i predykcji informacji oraz nieograniczoną dostępnością rozproszonych w sieciach systemu dowodzenia sił powietrznych komputerów o ogromnej mocy obliczeniowej.

Podstawową cechą różniącą sztuczne sieci neuronowe od programów realizujących algorytmiczne przetwarzanie informacji jest zdolność generalizacji, czyli uogólniania wiedzy dla nowych danych – nieznanych wcześniej, czyli takich, które nie były prezentowane w trakcie nauki. Określa się to także jako zdolność sztucznych sieci neuronowych do aproksymacji wartości funkcji wielu zmiennych w przeciwieństwie do interpolacji możliwej do otrzymania przy przetwarzaniu algorytmicznym. Sztuczne sieci neuronowe wymagają jednorazowego nauczania, przy czym wykazują tolerancję na nieciągłości,

przypadkowe zaburzenia, lub wręcz braki w zbiorze uczącym. Pozwala to na zastosowanie ich tam, gdzie nie da się rozwiązać danego problemu w żaden inny, efektywny sposób<sup>9</sup>. Dobrze zbudowany model matematyczny określonego zjawiska w ramach procesu dowodzenia siłami powietrznymi będzie pozwalał sprawnie rozwiązywać wiele związanych z nim zagadnień. Dlatego, jeśli tylko jest to możliwe, poszukuje się takich modeli różnych systemów, gdyż są one bardzo przydatne i efektywne. Jednak aby móc zbudować model matematyczny, potrzebna jest dobra znajomość struktury danego układu oraz wszelkich praw i zależności, jakie zachodzą wewnątrz niego. Posiadając taką wiedzę, dla wielu procesów i systemów zbudowano już bardzo dobre modele matematyczne. W tej sytuacji stosowanie sieci neuronowych mija się z celem, gdyż w takich przypadkach model matematyczny jest zawsze najlepszy. Jednak istnieją również liczne problemy w dowodzeniu siłami powietrznymi, których struktura i prawa działania nie zostały na tyle poznane, by móc budować efektywne modele. Co więcej, dla niektórych spośród nich nie znamy nawet do końca czynników, które determinują przebieg i rezultat ich działania. Zaletą sieci neuronowych jest właśnie to, że mogą być stosowane wszędzie tam, gdzie zachodzą problemy z tworzeniem modeli matematycznych. Twórca sieci nie musi z góry deklarować formy poszukiwanego modelu, a nawet nie musi być pewny, czy jakakolwiek zależność dająca się matematycznie modelować w ogóle występuje<sup>10</sup>.

W perspektywie kilkunastu najbliższych lat należy przewidywać pogłębienie się zarysowujących się obecnie trendów w wizualizacji informacji na potrzeby dowodzenia siłami powietrznymi. Nie tak dawno do zasadniczych środków zobrazowania informacji w dowodzeniu siłami powietrznymi zaliczono głównie dokumenty bojowe, w tym tradycyjne mapy, planszety, aparaturę zapisującą dźwięk, filmy, zdjęcia itp.<sup>11</sup>. Bez zastosowania nowych technologii środki te z pewnością pozostałyby w dotychczasowej, tradycyjnej formie. Ale osiągnięcia współczesnej informatyki przyczyniły się do rozwoju także tej grupy technicznych środków dowodzenia, co już obecnie wyraźnie uwidacznia się w praktyce dowodzenia siłami powietrznymi.

<sup>9</sup> [http://www.edward\\_ch.republika.pl/](http://www.edward_ch.republika.pl/) [dostęp: 19.11.2012].

<sup>10</sup> A. Michalak, *Sztuczne sieci neuronowe*, online – <http://www.bosko.pl/relaksik/?art=932> [dostęp: 19.06.2017].

<sup>11</sup> P. Sienkiewicz, M. Szczepaniak, W. Więckowski, *Dowodzenie z komputerem*, MON, Warszawa 1984.

Analiza literatury, doświadczenia zebrane podczas ćwiczeń pozwalają postawić tezę, iż tradycyjne „papierowe” dokumenty powszechnie będą zastępowane ich elektronicznymi odpowiednikami. Drukowane będą jednak przetworzone, dostosowane do potrzeb konkretnego użytkownika czy decydenta treści dokumentów, a nie ich całość. Obecnie rozwój tej formy zobrazowania informacji będzie zmierzał do opracowania bardziej nowoczesnych standardów ich opracowania i powszechnego wdrożenia do systemu dowodzenia sojuszu<sup>12</sup>. Rozwój elektronicznych form dokumentów zmierza w kierunku pełnej automatyzacji ich opracowywania<sup>13</sup>. Już obecnie istnieje oprogramowanie umożliwiające automatyzację opracowania niektórych dokumentów bojowych, czego przykładem może być m.in. pakiet aplikacji FAMA (*Flexible ADatP-3 Message Analyzer*) firmy Fibico<sup>14</sup>. Pakiet ten zaprojektowany został jako narzędzie przeznaczone do odbioru, gromadzenia, edycji, analizy i dystrybucji dokumentów w formatach ADatP-3 oraz MTF-XML. Oprogramowanie wspomaga pracę osób funkcyjnych tych elementów systemu dowodzenia i kierowania wojskami, dla których przyjmowanie i wytwarzanie dokumentów jest istotną częścią procesu planowania i kierowania działaniami. Pakiet aplikacji FAMA może być wykorzystywany w podsystemach dowodzenia, zarówno tych wyposażonych w zautomatyzowane systemy dowodzenia (umożliwiając pełną z nimi integrację), jak i w obiektach pozbawionych dedykowanych systemów teleinformatycznych, funkcjonując jako oprogramowanie samodzielnego terminala (jedno- lub wielostanowiskowego). Pakiet aplikacji FAMA wykorzystuje uniwersalne mechanizmy analizy składniowej, pozwalające na proste dostosowywanie do zmieniających się specyfikacji formatów sformalizowanych dokumentów bojowych. Wewnętrzna architektura podsystemu jest otwarta i rozszerzalna, umożliwiająca obsługę różnych standardów wiadomości tekstowych.

Programy tego typu, współpracując z cyfrowymi mapami terenu, umożliwiają automatyczne odwzorowanie sytuacji opisanej w dokumencie. W procesie przygotowywania map cyfrowych wykorzystywane są obrazowania ziemi w postaci zdjęć lotniczych i scen satelitarnych, poparte następnie zwiadem terenowym. Zdjęcia wykonywane są przy różnych parametrach spektralnych, gdyż będą wykorzystywane w różnych celach. Kolejnym krokiem jest

12 Obecnie stosuje się standard AdatP-3.

13 Informacja z firmy Fibico, szkolenie WLiOP, 07.11.2007.

14 Np. program FAMA umożliwiający automatyzację opracowania ACO.

przesłanie fotografii do obróbki cyfrowej, obejmującej m.in. korekcję radiometryczną i geometryczną. Korekcja radiometryczna usuwa efekty zakłóceń spowodowanych wadliwą pracą detektorów, wpływami atmosfery i topografii (zachmurzenie, różnice w oświetleniu wynikające z obecności obiektów terenowych, np. cień rzucany przez góry). Korekcja geometryczna eliminuje zniekształcenia obrazu wynikające z ruchu sensorów. Bardzo ważny w tym procesie jest wybór odpowiedniego odwzorowania kartograficznego i systemu odniesień przestrzennych. Niezbędna jest również tzw. ortorektyfikacja usuwająca zniekształcenia kształtów obiektów widocznych na obrazie spowodowane wpływem rzeźby terenu. Korekcja geometryczna zdjęć lotniczych i satelitarnych wymaga znajomości dokładnych współrzędnych wybranych punktów. Stopniowo mapy wzbogacane będą w elementy obrazowania trójwymiarowego<sup>15</sup>.

W minionych latach do zobrazowania informacji powszechnie stosowano różnego typu planszety ze szkła organicznego. Urządzenia te umożliwiały graficzne zobrazowanie sytuacji powietrznej i naziemnej. Obraz był ręcznie nanoszony na szkło organiczne przez operatorów (planszecistów). Pod koniec XX wieku możliwość powszechnego zastosowania osiągnięć informatyki pozwoliła na szerokie zastosowanie w systemach dowodzenia siłami powietrznymi tzw. zobrazowania wielkoformatowego. Rozwiązanie to było możliwe po opracowaniu rzutników komputerowych o wysokiej rozdzielczości i specjalistycznych programów graficznych oraz odpowiednio wydajnych procesorów. Informacja jest pokazywana w czasie rzeczywistym i przedstawiana przy użyciu umownych znaków graficznych oraz kolorów na tle cyfrowej mapy obszaru działań. Obecne systemy przedstawiają sytuację w dwóch wymiarach. W przypadku działań SP dobrze by było osiągnąć możliwość przedstawiania sytuacji również w trzecim wymiarze. W przyszłości być może będzie to możliwe dzięki rozwojowi holografii, która zajmuje się technikami uzyskiwania obrazów przestrzennych (trójwymiarowych) metodą rekonstrukcji fali (głównie światła, ale też np. fal akustycznych). Bardzo szeroko wykorzystywane będą na stanowiskach dowodzenia także ciekłe kryształy jako powszechnie stosowane w urządzeniach zobrazowania informacji. W chwili obecnej blisko 80% wszystkich wyświetlaczy to LCD. Ich podstawowe zalety to niskie napięcie sterujące, a zatem niski pobór mocy, korzystne parametry użytkowe

15 <http://www.ithink.pl/artykuly/technologia-i-nauka/laboratorium/w-jaki-sposob-tworzy-sie-mapy-nawigacji-gps/> [dostęp: 20.06.2017].



z punktu widzenia użytkownika, możliwość pracy w szerokim zakresie temperatur i trudnych warunkach zewnętrznych. Wydaje się, że płaskie wielofunkcyjne ekrany LCD jeszcze przez kilka lat nie będą miały realnej konkurencji. Wielofunkcyjne płaskie ekrany LCD są już wykorzystywane w naszej armii, m.in. w samolotach F-16.

Współczesne koncepcje rozwojowe przewidują obserwację pola walki z wykorzystaniem kamer wielospektralnych, na które można nakładać sytuację topograficzną i taktyczną, informację meteorologiczną i inne niezbędne dane. Rozwiązania wykorzystujące wielofunkcyjne płaskie ekrany będą powszechne w każdej platformie lądowej, morskiej i powietrznej, i co ważniejsze – na stanowiskach dowodzenia, gdzie szczególnie zastosowanie znajdują wielkoformatowe układy rzutowania informacji. Te ostatnie, w wersjach specjalizowanych, znajdują się w wyposażeniu samolotów i śmigłowców wszelkich typów dla ułatwienia pilotażu i szkolenia. Każdy pilot czy operator uzbrojenia powinien być wyposażony w hełm z systemem HUD (*Head-up Display*), umożliwiający pozyskiwanie informacji z wyższych szczebli dowodzenia oraz informacji o pracy własnego systemu (samolotu, pojazdu, wyrzutni itp.) i wyświetlenie ich na tle obserwowanego pola walki. Jednak pojedynczy żołnierz-panista będzie musiał mieć dostęp do informacji tekstowej, graficznej i wideo, przesyłanej przez przełożonych, jak również taką informację generować. Temu celowi służą mikrowyświetlacze, zazwyczaj umieszczone tuż przed okiem obserwatora, ale dysponujące pojemnością informacyjną ekranu i jednocześnie tylko nieznacznie ograniczające pole widzenia.

Nie do przecenienia jest zastosowanie ciekłych kryształów, które wykracza znacznie poza wspomniane zobrazowanie informacji. Możliwość sterowania ich właściwościami optycznymi za pomocą niskich napięć czyni z tych substancji idealny materiał dla urządzeń optycznych o kontrolowanych właściwościach, zwłaszcza dla torów laserów. Klasycznym przykładem są korelatory optyczne, których zadaniem jest optyczne porównanie obrazu bieżącego, rejestrowanego kamerą na odpowiedni zakres widmowy z bazą danych. Umożliwia to m.in. rozpoznanie celu kategorii „swój-obcy”, odpalenie pocisków „wystrzel i zapomnij” (*fire and forget*), ale także może służyć do wykrywania odcisków linii papilarnych lub obrazów siatkówki oka, czyli identyfikacji dostępu osób na stanowiskach dowodzenia. Organiczne diody świecące (OLED) mają dwa perspektywiczne zastosowania. Pierwsze z nich to zobrazowanie informacji. Płaskie wyświetlacze OLED są znane od kilku lat i stosowane m.in. w telefonach komórkowych oraz odbiornikach GPS. W roku 2007 pojawiły się pierwsze płaskie ekrany OLED o małych przekątnych. Największą

zaletą tych ekranów jest ich aktywność – to one generują światło, a zatem nie wymagają dodatkowego podświetlenia. Pobór mocy jest znacznie niższy niż w przypadku ekranów plazmowych, a spodziewane parametry użytkowe będą zapewne lepsze niż dla ekranów LCD. Drugi kierunek zastosowań to oświetlenie. W przypadku techniki wojskowej najważniejsza jest wydajność źródła – dla klasycznej żarówki wynosi 3–5%, a dla źródeł OLED przekracza 40%. Oznacza to, że dla porównywalnego natężenia oświetlenia wymagana jest niższa moc zasilania, a ponadto znacznie niższa jest emisja promieniowania cieplnego wykrywanego przez system detekcji podczerwieni potencjalnego przeciwnika. I wreszcie oświetlenie nie musi być punktowe – może być płaszczyznowe, co w wielu przypadkach, np. stanowisk dowodzenia, jest wielką zaletą. Poza oczywistym już dziś zastosowaniem w telekomunikacji światłowodowy, zwłaszcza fotoniczny, są perspektywnym materiałem dla sensorów. Układy światłowodowe mogą być stosowane w systemach ochrony obiektów – stanowisk dowodzenia, jako elementy inteligentnych konstrukcji.

## Wpływ nowych technologii na łączność w systemie dowodzenia sił powietrznych

Środkami łączności nazywamy różnego rodzaju urządzenia umożliwiające przekazywanie informacji na odległość. Do niedawna środki te były kojarzone głównie z telefonem i radiostacją. W dniu dzisiejszym można podzielić te środki na urządzenia łączności przewodowej, radiowej i radioliniowej.

W perspektywie najbliższych lat można z dużym prawdopodobieństwem założyć, iż rozwój wykorzystania tradycyjnych środków łączności przewodowej na potrzeby systemu dowodzenia siłami powietrznymi będzie zmierzał bardziej w kierunku zastosowań lokalnych. Natomiast trzeba się liczyć z gwałtownym rozwojem w wykorzystaniu do przesyłania informacji na potrzeby systemu dowodzenia siłami powietrznymi satelitarnych sieci telefonicznych należących do operatorów cywilnych, jak i typowo dedykowanych sieci militarnych. Skalę zjawiska można przedstawić na przykładzie rozwoju naziemnej sieci telefonii komórkowej. Powszechnie zauważalny jest fakt stopniowego wypierania tradycyjnych telefonów stacjonarnych przez telefony komórkowe. Współczesny telefon komórkowy czy satelitarny umożliwia przekazywanie informacji w formie dźwięku, tekstu, a nawet obrazu czy filmu. Można też przy pomocy takiego telefonu połączyć się z Internetem. Dlatego słuszną wydaje

się teza, że za kilka lat tradycyjne środki łączności przewodowej będą wykorzystywane jako środki o znaczeniu pomocniczym i do zapewnienia łączności lokalnej, np. do łączności wewnętrznej stanowiska dowodzenia.

W zakresie rozwoju środków łączności radiowej, jakie mogą znaleźć zastosowanie w przesyłaniu informacji na potrzeby systemu dowodzenia siłami powietrznymi w perspektywie najbliższych kilkunastu lat zauważalnym trendem jest rozszerzenie zakresu częstotliwości, miniaturyzacja urządzeń oraz ich mobilność. Obecnie wszystkie firmy przemysłowe proponują użytkownikowi radiostacje o zmienianym losowo zakresie częstotliwości. Radiostacje o stałych częstotliwościach będą miały raczej zastosowania cywilne. Coraz więcej firm proponuje sprzęgnięcie komputera osobistego i małej przenośnej radiostacji. Jeśli dysponujemy odpowiednim oprogramowaniem, to możemy przysyłać dowolne pliki lub teksty między komputerami, które połączone są z radiotelefonami wyposażonymi w odpowiednie moduły transmisji danych (MTD)<sup>16</sup>. Obecnie konstruktorzy nowych urządzeń przeznaczonych do łączności radiowej pracują nad zwiększeniem możliwości szybkiej transmisji danych, a wręcz mówi się o pakietowej transmisji danych. Współczesne i przyszłe radiostacje będą się same orientowały w terenie poprzez integralnie zabudowany GPS lub inne systemy. Tryb pracy multipleks (jednoczesna i bezkolizyjna transmisja mowy i danych) staje się w tych urządzeniach standardem. Przewiduje się też, że nowoczesne urządzenia tego typu muszą posiadać możliwość łatwego połączenia się z taktyczną siecią komputerową oraz zdalnego zarządzania radiostacją.

Rozwój systemów łączności, które mogą być wykorzystywane w perspektywie kilkunastu najbliższych lat do zabezpieczenia funkcjonowania systemu dowodzenia siłami powietrznymi, zmierza w kierunku integracji urządzeń różnych generacji. Różnorodność metod i środków przesyłu informacji stawia integratorom systemów łączności całkowicie nowe wymagania. Umiejętne połączenie wielu niezależnych rozwiązań sprawia, że systemy integrujące są najbardziej poszukiwanymi produktami na rynkach teleinformatycznych i telekomunikacyjnych. Dobrym tego przykładem jest wprowadzanie w polskich siłach powietrznych systemu DGT-MCS (*Multifunctional Communication System*)<sup>17</sup>. Podstawową funkcją DGT-MCS jest integracja cyfrowych oraz

16 [http://www.radmor.com.pl/index.php?m\\_id=191&lang=pl](http://www.radmor.com.pl/index.php?m_id=191&lang=pl) [dostęp: 15.06.2017].

17 M. Ząbek, *Kierunki rozwoju łączności lotniczej w polskich siłach powietrznych*, AON, Warszawa 2006, s. 20.

analogowych środków łączności przewodowej ze środkami łączności radiowej. System zapewnia dostęp do radiowych i przewodowych (analogowych i cyfrowych) środków łączności typowych dla sił powietrznych. Przeznaczony jest m.in. dla centrów operacji powietrznych, lotnisk oraz Straży Granicznej. Może być stosowany w systemach ratownictwa (CPR) oraz wszędzie tam, gdzie niezbędna jest synchronizacja działań przy wykorzystaniu łączności radiowej i/lub telefonicznej. Elastyczność oraz łatwość dostosowania do specyficznych wymagań sprawia, że produkt DGT może być bardzo szybko wdrożony i przystosowany do konkretnych wymagań. System umożliwia korzystanie z istniejących w danej lokalizacji zasobów telekomunikacyjnych, takich jak sieć resortowa, sieć operatorów publicznych, a także linie i łącza dzierżawione. Do najważniejszych cech systemu można zaliczyć skalowalną i modułową architekturę oraz zwiększoną niezawodność systemu osiągniętą przez: dublowanie dróg połączeniowych na trasie od stanowiska operatora aż do radiostacji, realizację głównych elementów systemu na kartach jednoportowych, modułową architekturę oprogramowania i konstrukcję bezpiecznych algorytmów sterowania. Zwiększenie funkcjonalności systemu ma być osiągnięte także poprzez: możliwość jednoczesnego prowadzenia przez operatora rozmowy radiowej, telefonicznej, interkomu i dwóch podsłuchów radiowych, możliwość konfiguracji i zarządzania wszystkimi elementami systemu (w tym radiostacjami) oraz możliwość jednoczesnej współpracy wielu systemów MCS różnych producentów. Ważnym elementem systemu DGT-MCS jest również implementacja funkcji BSS (*Best Signal Selection*) zapewniająca operatorowi automatyczne porównanie jakości sygnałów przychodzących z różnych radiostacji od tego samego pilota i włączanie toru akustycznego o najlepszych parametrach, rejestrację rozmów telefonicznych oraz korespondencji radiowych, zastosowanie procesorów RISC i DSP oraz układów FPGA, a także realizację całego systemu w wersji IP (DGT-MCS IP).

Kolejnym kierunkiem rozwoju jest tworzenie zintegrowanych systemów radiowych, które łączyłyby wiele urządzeń pracujących do tej pory niezależnie od siebie w jedno spełniające wiele funkcji. Jak już wcześniej stwierdzono, środkami łączności nazywamy różnego rodzaju urządzenia umożliwiające przekazywanie informacji na odległość. W dowodzeniu siłami powietrznymi, gdzie zasadniczym środkiem łączności są urządzenia radiowe, załoga samolotu bojowego miała tylko łączność foniczną z siłami własnymi. Informacje o sytuacji bojowej były przekazywane na pokład samolotu w postaci krótkich meldunków głosowych. Były czynione próby z przekazywaniem informacji w innej formie (np. obrazu), ale ograniczenia techniczne powodowały, że

informacja inna niż głosowa była przekazywana na pokład statku powietrznego z dużym opóźnieniem. Dopiero rozwój nowych technologii i opracowanie nowych standardów dystrybucji informacji, tzw. linków<sup>18</sup>, umożliwił jej wymianę pomiędzy elementami pola walki w czasie rzeczywistym lub zbliżonym do rzeczywistego. W perspektywie następnych lat należy oczekiwać pełnego wdrożenia systemów cyfrowej wymiany danych jako podstawowego środka łączności radiowej w dowodzeniu siłami powietrznymi.

Z punktu widzenia dowodzenia siłami powietrznymi ważnym krokiem do przodu jest wprowadzenie systemu cyfrowej wymiany danych Link-16. Kodowa nazwa Link-16 określa cyfrową sieć wymiany danych taktycznych TADIL-J (*Tactical Digital Information Link J*), służącą do zapewnienia samolotom lub okrętom walczącym w danym rejonie wielostronnego dostępu do rozporządzałnej informacji. Jest on obecnie standardowym taktycznym systemem danych wszystkich rodzajów broni państw NATO, i jako taki nosi oficjalnie nazwę Joint Tactical Information Distribution System (JTIDS). Jednostki realizujące dane zadanie taktyczne tworzą grupę NPG (*Network Participation Group*). Sieć TADIL-J jest zamkniętym systemem, obejmującym zarówno stacjonarne i ruchome urządzenia przetwarzania i transmisji danych, jak też specjalne techniki i środki łączności oraz format danych. Sieć TADIL przekazuje dane między systemem rozpoznania (powietrznego, naziemnego, nawodnego), naziemnymi i powietrznymi ośrodkami dowodzenia oraz jednostkami bojowymi (samolotami lub okrętami). Te ostatnie są zwykle jednocześnie źródłami informacji. Ośrodek dowodzenia szczebla taktycznego zapewnia także przekazywanie danych z TADIL-J do sieci informacyjnej dowództwa nadrzędnego.

Uczestnicy wymiany danych wprowadzają do systemu swoje informacje za pośrednictwem łącza radiowego VHF lub UHF. Dane z różnych źródeł tworzą obraz sytuacji taktycznej w konkretnym rejonie. Kompletna informacja, wzbogacona o decyzje organów dowodzenia, jest przekazywana drogą radiową zainteresowanym jednostkom. Możliwe jest także przekazywanie danych taktycznych bezpośrednio, np. między samolotami ugrupowania wykonującego zadanie.

**18** Link, inaczej hiperłącze – w technologiach komputerowych element nawigacyjny ułatwiający przemieszczanie się między dokumentami bądź różnymi miejscami w tym samym dokumencie (odnośnik do innego pliku).

W systemie TADIL-J komunikowanie się realizowane jest na jednym zakresie częstotliwości radiowej. Wszyscy uczestnicy nadają według ustalonej kolejności, na zasadzie „jeden nadaje, reszta słucha”. Kolejność dostępu jest narzucana przez stację zarządzającą DNCS (*Data Net Control Station*). W razie potrzeby każda ze stacji pokładowych może pełnić obowiązki stacji zarządzającej. Każdemu z uczestników wymiany danych jest przyporządkowany kod identyfikacyjny, według którego DNCS przydziela miejsce w kolejce do nadawania. Po zakończeniu nadawania przez każdą stację DNCS wysyła swoje dane i kod kolejnej stacji, która ma nadawać. W pojedynczym ogniwie TADIL-J (tzn. na kanale radiowym pod kontrolą jednego DNCS) może pracować do 524 stacji z prędkością do 1 Mb/s i mogą one przesyłać właściwie dowolne typy danych – dostępne są m.in. dwa kodowane kanały transmisji głosu. Ponadto stacje mogą pracować jako przekaźniki (*relay mode*) dla członków grupy, znajdujących się poza zasięgiem łączności bezpośredniej. Unikalne są dwa tryby pracy biernej, stosowane w przypadku działań skrytych. Tryb DS (*Data Silent*) blokuje nadawanie danych z wyjątkiem kanałów głosowych. Natomiast tryb LTTI (*Long Term Transmit Inhibit*) blokuje emisję dla danych. TADIL-J pracuje na częstotliwościach 960–1215 MHz. Dla zwiększenia odporności na zakłócenia przyjęto pracę szerokopasmową (tzw. *spread spectrum*). Pasma pojedynczej transmisji wynosi około 3 MHz, co daje 51 kanałów łączności. Szerokie pasmo transmisji pozwala na zastosowanie zmiennej mocy wyjściowej nadajników, dzięki czemu ogólny poziom emisji elektromagnetycznej samolotu jest mniejszy. W czasie transmisji stacje ciągle zmieniają kanał według powtarzalnego wzoru. Taka metoda zabezpieczenia transmisji znana jest jako przeplot częstotliwości (*frequency hopping*). Poszczególne NPG pracują z różnymi wzorami przeplotu.

Systemy typu TDL umożliwiają polepszenie tzw. świadomości sytuacyjnej (*Situation Awareness*) uczestników pola walki i stanowią jeden z filarów nowoczesnych koncepcji prowadzenia działań zbrojnych znanych jako walka sieciocentryczna (*Network Centric Warfare*). Można założyć z dużym prawdopodobieństwem, że systemy TDL będą dalej rozwijane w kierunku miniaturyzacji wykorzystywanych urządzeń i osiągnięcia jeszcze większych prędkości przepływu danych. Planowane do wprowadzenia w siłach powietrznych USA nowe generacje systemów wymiany danych – JTRS (*Joint Tactical Radio System*), mają charakteryzować się większym zakresem wykorzystywanych częstotliwości, zawierającym się w przedziale od 2 MHz do 2 GHz, który może

być rozszerzony do 55 GHz na potrzeby wymiany danych z systemami satelitarnymi<sup>19</sup>.

Zwiększające się systematycznie potrzeby informacyjne organów dowodzenia siłami powietrznymi będą wymuszać, podobnie jak ma to miejsce obecnie, wykorzystanie komercyjnych środków łączności w zabezpieczeniu łączności na potrzeby systemu dowodzenia sił powietrznych. W operacjach o charakterze ekspedycyjnym będą to prawdopodobnie przede wszystkim satelitarne systemy łączności. Powszechnie podkreślanym w literaturze przedmiotu faktem jest zwielokrotnienie potrzeb w zakresie szybkości transferu danych w sieciach systemów dowodzenia wojsk, w tym również w systemie dowodzenia siłami powietrznymi. Według ocen amerykańskich rutynowe potrzeby transmisji danych dla funkcjonowania amerykańskich sił zbrojnych miały w 2008 roku wynosić od około 9 do 13 gigabitów na sekundę, przy możliwościach wojskowych satelitów komunikacyjnych poniżej 4 gigabitów na sekundę. W tym samym czasie dostępne komercyjne kanały łączności satelitarnej zapewniały transmisję danych z szybkością w przedziale 200–250 gigabitów na sekundę<sup>20</sup>. Oceniając braki w możliwościach transmisji danych przez wojskowe systemy łączności satelitarnej, można stwierdzić, że nieuniknione będzie wykorzystanie cywilnych komercyjnych systemów łączności do transmisji części danych na potrzeby systemu dowodzenia siłami powietrznymi. Taka sytuacja wymuszać będzie jednak podejmowanie szerszych przedsięwzięć w zakresie ochrony informacji poprzez stosowanie narzędzi kryptograficznych.

W dalszej perspektywie czasu możliwe będzie stosowanie na potrzeby dowodzenia siłami powietrznymi nowych technicznych środków łączności, pozwalających na transmisję danych w niewykorzystywanych dotychczas pasmach spektrum elektromagnetycznego. Obecnie prowadzone są prace badawczo-rozwojowe nad systemami łączności laserowej. Mogłaby ona być stosowana w relacjach łączności powietrze–powietrze na wysokościach powyżej górnej granicy chmur – od około 12 000 m<sup>21</sup>. Łączność laserowa ma zapewnić transmisję danych z prędkościami rzędu 3 gigabitów na sekundę.

19 E. Ghashghai, *Communications Networks to Support Integrated Intelligence, Surveillance, Reconnaissance, and Strike Operations*, Project Air Force, RAND, Santa Monica 2004, s. 6.

20 T. Bonds i zespół, *Employing Satellite Communications: Wideband Investment Options for the Department of Defense*, RAND, Santa Monica 2000, s. 26–28.

21 E. Ghashghai, *Communications Networks to...*, op. cit., s. 30–31.

## Zakończenie

Na podstawie przeprowadzonych analiz obecnych i perspektywicznych zastosowań technologii w systemie dowodzenia można stwierdzić, że w następnych kilkunastu latach zakres ich wykorzystania ulegnie znaczącemu rozszerzeniu. Szczególnie duży wpływ będą one wywierały na człowieka, stanowisko dowodzenia, proces dowodzenia oraz łączność. Jak wskazują badania, celem rozwoju technologii informacyjnych jest wspieranie procesów osiągnięcia zdolności sieciocentrycznych w dowodzeniu. Procesy te obejmują tworzenie bezpiecznych i efektywnych sposobów pozyskiwania, analizy i współdzielenia informacji, tworzenia zasobów wiedzy oraz jej skutecznego wykorzystywania. Główne obszary technologiczne obejmują m.in.: teleinformatyczną infrastrukturę dla osiągnięcia zdolności sieciocentrycznych, bezpieczeństwo systemów teleinformatycznych, integrację systemów modelowania i symulacji działań bojowych, integrację systemów dowodzenia oraz urządzenia i systemy zabezpieczenia kryptograficznego. Wykorzystanie komputera i Internetu może wspomagać: rozwój intelektualny człowieka, rozszerzanie wiedzy specjalistycznej, uczenie się rozwiązywania problemów, wyrabianie nawyków samodzielnego i twórczego myślenia oraz rozwijanie samodzielności. Zastosowanie nowoczesnych technologii w obiekcie stanowiska dowodzenia może zapewnić ograniczenie możliwości rozpoznania go, ochronę i osłonę przed środkami rażenia, zabezpieczenie przed użyciem środków chemicznych oraz przed oddziaływaniem środowiska naturalnego. Należy także stwierdzić, iż nowoczesne technologie przyczynią się do przeprowadzenia sprawnego i efektywnego procesu decyzyjnego. Poprzez dostęp do wielu informacji w czasie rzeczywistym personel stanowiska dowodzenia będzie mógł właściwie dokonać analizy i oceny sytuacji oraz wyboru wariantu działania. Systemy informatyczne pozwolą przeprowadzić szereg symulacji dotyczących przewidywanych sposobów działania w odniesieniu do przeciwnika i wojsk własnych przy uwzględnieniu takich czynników, jak: stan potencjału bojowego, jego rozmieszczenie, taktyka działania, warunki pogodowe, środowisko walki, zabezpieczenie logistyczne itp. Systemy te pozwolą także wypracować dokumenty bojowe i przesłać je do wszystkich odbiorców. Z kolei wykorzystanie nowoczesnych technologii w środkach łączności może zapewnić: przesyłanie informacji fonicznych oraz wizualnych w czasie rzeczywistym, zachowanie bezpieczeństwa transmisji danych, zapewnienie alternatywnych kierunków połączeń, zachowanie żywotności i wysokiej mobilności systemów oraz integrację różnych systemów łączności (radiowe, kablowe, światłowodowe) różnych generacji i producentów.



## Bibliografia

- Bonds T. i zespół, *Employing Satellite Communications: Wideband Investment Options for the Department of Defense*, RAND, Santa Monica 2000.
- Doktryna systemu dowodzenia Sił Zbrojnych RP – DD/6.1, Szt. Gen. WP, Warszawa 2009.
- Ghashghai E., *Communications Networks to Support Integrated Intelligence, Surveillance, Reconnaissance, and Strike Operations, Project Air Force*, RAND, Santa Monica 2004.
- [http://pl.wikipedia.org/wiki/Sztuczna\\_inteligencja](http://pl.wikipedia.org/wiki/Sztuczna_inteligencja).
- [http://www.edward\\_ch.republika.pl/](http://www.edward_ch.republika.pl/).
- <http://www.ithink.pl/artykuly/technologia-i-nauka/laboratorium/w-jaki-sposob-tworzy-sie-mapy-nawigacji-gps/>.
- <http://www.radmor.com.pl>.
- Jackson A.T., Eklund R.A., Fink J.A., *High – speed propulsion: Performance advantage of advanced materials*, J. Mat. Sc. 39, 19, 2004.
- Kolarz M., *Znaczenie wiedzy i kapitału intelektualnego we współczesnej gospodarce i organizacji* [w:] *Kapitał ludzki w dobie integracji i globalizacji*, red. B. Kulusznik, Wydawnictwo UŚ, Katowice 2005.
- Materials Research to Meet 21<sup>st</sup> Century Defence Needs – Structural and Multifunctional Materials, National Materials Advisory Board Seminar, 2003 Spring Meeting.
- Michalak A., *Sztuczne sieci neuronowe*, online – <http://www.bosko.pl/relaksik/?art=932>.
- Michniak J., *Dowodzenie w teorii i praktyce wojsk*, AON, Warszawa 2003.
- Nesbitt K., *Deployable Operations Capability. The NATO Air Command and Control System*, „JAPCC Journal Edition” 2005, nr 2.
- Sepp E.M., *Deeply Buried Facilities: Implications for Military Operations*, Air University, Maxwell AFB 2000.
- Sienkiewicz P., Szczepaniak M., Więckowski W., *Dowodzenie z komputerem*, MON, Warszawa 1984.
- Ząbek M., *Kierunki rozwoju łączności lotniczej w polskich siłach powietrznych*, AON, Warszawa 2006.

# Bezpieczeństwo w porcie lotniczym – aspekty techniczne

## Streszczenie

Ustalone procedury ochrony i bezpieczeństwa lotnictwa cywilnego stały się podstawą do opracowania ich systemów i organizacji ochrony lotnictwa cywilnego. Transport lotniczy ze względu na swoją specyfikę oraz dynamizm rozwoju wymaga zapewnienia bardzo wysokiego poziomu bezpieczeństwa.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo, port lotniczy, ochrona, systemy techniczne.

## Wstęp

Bezpieczeństwo w lotnictwie to problem najwyższej wagi, decyduje bowiem o życiu wielu ludzi i wiąże ogromne środki materialne, obejmuje nie tylko to, co dzieje się w powietrzu, czyli bezpieczne wykonywanie lotów, ale również to, co dzieje się na ziemi, a więc bezpieczeństwo na polu naziemnego ruchu lotniczego, ratownictwo lotniskowe i ochronę przed aktami bezprawnej ingerencji.

Odpowiedzialność za bezpieczne i bezawaryjne wykonywanie lotów ponoszą załogi statków powietrznych, przewoźnicy, właściciele statków powietrznych oraz instytucje państwowe powołane do nadzoru nad lotnictwem cywilnym, w tym m.in. Urząd Lotnictwa Cywilnego, Polska Agencja Żeglugi Powietrznej oraz Państwowa Komisja Badania Wypadków Lotniczych.

Za bezpieczeństwo naziemnego ruchu lotniczego, ochronę lotniska przed aktami bezprawnej ingerencji oraz ratownictwo lotniskowe odpowiedzialność ponosi zarządzający lotniskiem.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa działalność portu lotniczego można rozpatrywać w dwóch obszarach:

- I obszar – związany z zabezpieczeniem operacji lotniczych – zabezpieczenie startu, lądowania, kołowania, postoju oraz obsługi naziemnej statków powietrznych;
- II obszar – związany z obsługą ruchu pasażerskiego i towarowego – odprawa biletowo-bagażowa i paszportowo-celna, kontrola bezpieczeństwa pasażera i bagażu, załadunek na pokład samolotu itd.

W każdym z tych obszarów występują zagrożenia innego typu. W I obszarze zagrożenia związane są z naziemnym ruchem lotniczym. Wypadek lotniczy (katastrofa) może wystąpić podczas startu, lądowania lub kołowania – na skutek błędu załogi lub obsługi naziemnej, niesprawności sprzętu albo wtargnięcia pojazdu, człowieka lub zwierzęcy na manewrową część lotniska (*runway incursion*). W II obszarze zagrożenia dotyczą aktów bezprawnej ingerencji (terror, sabotaż, uprowadzenia, zamachy bombowe itd.). W I obszarze działania zaradcze portu obejmują ratownictwo lotniskowe, a w II obszarze – ochronę przed aktami bezprawnej ingerencji.

Celem tego artykułu jest wskazanie aspektów technicznych zapewniających bezpieczeństwo portu lotniczego. Scharakteryzowano tu systemy ochrony lotniska. Zaprezentowano także przykłady rozwiązań infrastrukturalno-organizacyjnych w zakresie bezpieczeństwa portów lotniczych.

## Systemy ochrony lotniska

Systemy techniczne stanowią wsparcie dla zasobów ludzkich w działaniach skierowanych na ochronę portu lotniczego. Zasadniczą funkcją technicznych środków ochrony jest zapewnienie bezpiecznego otoczenia dla podmiotów działających w porcie lotniczym. Udzielanie dostępu na teren określonych stref portu lotniczego oraz prawidłowe działanie systemu przepustkowego – to realizacja wyżej wymienionej funkcji. Sprawne i efektywne działanie systemu ochrony jest gwarantowane dzięki odpowiedniemu wyposażeniu oraz właściwej organizacji stanowisk bezpieczeństwa personelu latającego i naziemnego oraz pasażerów, bagażu, poczty, przesyłek kurierskich, a także dostaw zaopatrzenia. W systemie ochrony wykorzystuje się następujące środki techniczne<sup>1</sup>:

<sup>1</sup> M. Szczelina, *Systemy bezpieczeństwa w lotnictwie cywilnym, metody i środki ochrony lotniska i podmiotów prowadzących działalność gospodarczą* [w:] *Zarządzanie bezpieczeństwem lotnictwa cywilnego*, red. J. Sztucki, M. Gąsior, G. Zajac, skrypt dydaktyczny, Wrocław 2012, s. 177.

- kontrola dostępu do określonych obiektów i rejonów portu lotniczego,
- kontrola bezpieczeństwa pasażerów, załóg i bagażu,
- kontrola bezpieczeństwa cargo, przesyłek kurierskich i poczty,
- kontrola bezpieczeństwa osób pracujących na terenie portu lotniczego,
- telewizja dozorowa CCTV (*Closed Circuit TeleVision*),
- system przepustkowy,
- systemy antywłamaniowe do pomieszczeń,
- systemy antynapadowe,
- ochrona bram wjazdowych,
- ochrona ogrodzenia zewnętrznego – ochrona perymetryczna,
- system wykrywania zagrożeń chemicznych, biologicznych i radiacyjnych,
- system zarządzania parkingami,
- system monitoringu pojazdów na lotnisku,
- system rejestracji bagażu współpracujący z systemem kontroli odlotów w celu szybkiej identyfikacji bagażu z pasażerem.

**Kontrola dostępu** na terenie lotniska to pierwszy element systemu ochrony lotniska. Występuje przeważnie przy wejściu na teren strefy zastrzeżonej lotniska. Jest poprzedzona procedurami związanymi z przyznawaniem przepustki pracownikowi, czy też innej osobie ubiegającej się o prawo wejścia na teren lotniska. Procedury te mają na celu sprawdzenie, czy dana osoba nie stanowi zagrożenia.

System kontroli dostępu oparty jest na technologii RFID (*Radio Frequency Identification*). Składa się on z centrali, często połączonej z komputerem PC, oraz rozlokowanych na terenie obiektu modułów wykonawczych – czytników kart zbliżeniowych (RFID), klawiatur do wprowadzania kodu, czytników biometrycznych połączonych z centralą za pomocą kabla albo – w nowszych systemach – bezprzewodowo, co może mieć wpływ na koszt instalacji systemu. Programowanie systemu odbywa się z poziomu komputera PC połączonego z centralą łączem RS-232 bądź USB. Osoba projektująca system punkt po punkcie określa, czy użytkownik danej kategorii ma prawo przejść przez odpowiedni punkt w systemie<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> A. Kwasiborska, *Bezpieczeństwo transportu lotniczego. Wybrane aspekty*, Wyd. Typografia, Pułtusk–Warszawa 2016, s. 96.

## System przepustkowy

Zgodnie z obowiązującą instrukcją przepustkową dla osób i pojazdów w danym porcie lotniczym każda osoba wykonująca obowiązki służbowe, świadcząca pracę na podstawie umowy o pracę lub umowy cywilnej, lub też wykonująca inne czynności związane z prowadzoną na lotnisku działalnością musi posiadać ważną przepustkę osobową, upoważniającą do przebywania w określonych strefach lotniska, a wszystkie pojazdy poruszające się po terenie części krytycznej strefy zastrzeżonej lotniska muszą posiadać ważną przepustkę samochodową. Wniosek o uzyskanie przepustki czasowej osobowej i samochodowej należy złożyć w formie pisemnej w odpowiednim porcie z wyprzedzeniem (np. 21-dniowym w Porcie Lotniczym Łódź), przed rozpoczęciem wykonywania obowiązków służbowych na terenie danego portu lotniczego. Do wniosku o uzyskanie przepustki czasowej osobowej należy dołączyć:

- aktualną fotografię,
- wniosek o udzielenie informacji o braku negatywnych przesłanek w kwestii dostępu do strefy zastrzeżonej lotniska,
- informacje o zatrudnieniu/kształceniu.

Złożony wniosek o wydanie przepustki osobowej przekazywany jest odpowiednim służbom ochrony w celu sprawdzenia, czy ubiegająca się osoba spełnia wymagania niezbędne do otrzymania dostępu do strefy zastrzeżonej lotniska, jak również sprawdzenia jej pięcioletniej przeszłości. Wniosek może zostać odrzucony w przypadku negatywnej opinii Straży Granicznej bądź braku podstaw do jej wydania.

Przepustki osobowe stałe wydaje się po przeszkoleniu wnioskodawcy w zakresie świadomości ochrony lotnictwa cywilnego oraz otrzymaniu stosownego certyfikatu.

## Kontrola wnoszonego bagażu osobistego

Kontrolowanie bagażu to drugi element systemu ochrony lotniska. W celu zapewnienia bezpieczeństwa operacji lotniczych kontroli musi być poddany zarówno pasażer, jak i jego bagaż<sup>3</sup>. Kontrola taka występuje wszędzie tam,

<sup>3</sup> Art. 4 załącznika do rozporządzenia Komisji (UE) nr 185/2010 z dnia 4 marca 2010 r.; załącznik I do rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 300/2008 z dnia 11 marca 2008 r.

gdzie istnieje możliwość dostania się w pobliże statku powietrznego stojącego na płycie postojowej, w hangarze czy kołującego po płycie lotniska. Ta część systemu składa się z urządzenia prześwietlającego wnoszony bagaż oraz bramki – wykrywacza metalu, przez którą przechodzi osoba wchodząca na teren portu lotniczego.

Kontrolę bezpieczeństwa przeprowadza się m.in. za pomocą<sup>4</sup>:

- kontroli manualnej,
- bramki do wykrywania metali (WTMD),
- psów wykrywających materiały wybuchowe,
- urządzeń do wykrywania śladowych ilości materiałów wybuchowych (ETD),
- ręcznych wykrywaczy metali (HHMD).

Rozszerzeniem systemów służących do inspekcji bagażu są systemy wykrywania urządzeń wybuchowych (EDDS) oraz systemy wykrywania materiałów wybuchowych (EDS). Zastosowane w nowoczesnych urządzeniach oprogramowanie automatycznie wyszukuje, a następnie wskazuje operatorowi potencjalnie niebezpieczne fragmenty bagażu.

SAT (*Screener Assist Technology*) to system wspomagający, wykorzystujący wbudowane algorytmy, służący do badania – według ustalonych przez użytkownika kryteriów – właściwości atomu widzianych na zdjęciu przedmiotów. HHMD (*Hand Held metal Detector*) jest odporny na działanie używanych na terenie lotniska środków komunikacji i telefonów komórkowych, podobnie jak stacjonarny wykrywacz metalu (WTMD), a także nie może ich zakłócać. Kompaktowe wykrywacze ręczne pozwalają na bardziej szczegółową inspekcję osoby przechodzącej przez punkt kontrolny. Mogą wykryć przedmioty nieżelazne i żelazne z odległości nie mniejszej niż 50 mm. Fakt ten sygnalizują wizualnie oraz dźwiękowo, z natężeniem zależnym od ilości wykrytego metalu. Innym środkiem są systemy telewizyjne CCTV (*Closed-Circuit Television*), które w dzisiejszych czasach są niedrogie i ogólnodostępne. Badania dowodzą, iż sama obecność kamer na danym terenie powoduje zmniejszenie przestępczości. Zatem CCTV staje się środkiem odstrasającym.

4 Rozporządzenie Komisji (UE) nr 185/2010..., op. cit., pkt 4.1.1.2.

## Zastosowanie metod biometrycznych do identyfikacji

W 2000 roku FBI uruchomiło zintegrowany system IAFIS (*Integrated Automated Fingerprint Identification System*), którego baza danych obejmuje obecnie już ponad 50 mln zestawów odcisków palców.

Producenci nie dzielą się szczegółami dotyczącymi działania urządzeń, ale można zakładać, że są zasadniczo podobne do tych dotyczących poprzednio omawianych technologii. Po pobraniu odcisków palców następuje wybór cech charakterystycznych, ich współrzędnych, następnie kodowanie informacji i zapis w bazie danych, albo też – przy pomocy innych algorytmów – ekstrakowanie układu żył i zakodowanie oraz zapisanie go w bazie danych.

## Ochrona perymetryczna

Ochrona perymetryczna rozumiana jest najczęściej jako system ochrony wzdłuż linii grodzienia, jednak coraz częściej zagrożenie może nadejść także z powietrza. Dodatkowo poza osiągnięciem wysokiej skuteczności całego systemu ważne jest także utrzymanie niskiego poziomu fałszywych alarmów.

Istnieje bardzo wiele systemów ochrony perymetrycznej, jednak kamery termowizyjne z zaawansowaną funkcją analizy obrazu są jednym z najszybciej rozwijających się rozwiązań na rynku. Główną zaletą kamer termowizyjnych jest możliwość ich skutecznej pracy w zupełnej ciemności, we mgle, a także w trakcie padającego deszczu lub śniegu. Dodatkowo analiza wideo działa znacznie lepiej na obrazie termowizyjnym w porównaniu do obrazu ze standardowych kamer wizyjnych. Jedna kamera termowizyjna pozwala skutecznie chronić długie ogrodzenie, co umożliwia redukcję rozwiązań stosowanych w całym systemie. Obecnie różnorodność dostępnych na rynku rozwiązań termowizyjnych jest tak szeroka, że do każdego projektu można precyzyjnie dopasować odpowiednią kamerę termowizyjną. Jednocześnie czynnikiem popularyzującym tę technologię z roku na rok jest znaczne obniżanie cen kamer termowizyjnych.

W systemach ochrony perymetrycznej często stosowane są systemy napłotowe oraz sejsmiczne, lub też wkopywane przewody sensoryczne. Jednak inteligentny system wideo, działający w oparciu o kamery termowizyjne i uzupełniony czujkami PIR, posiada znacznie więcej zalet. Szybkość detekcji zagrożenia jest zawsze bardzo istotna. Połączenie kamer z systemem inteligentnej detekcji zagrożeń oraz rejestracją pozwala wykryć intruza jeszcze

przed ogrodzeniem. Dodatkową zaletą takiego systemu jest nie tylko rejestracja samego zdarzenia, lecz także transmisja alarmu i możliwość weryfikacji wideo tego alarmu – sprawdzenie wielkości wykrytego obiektu, jego lokalizacji oraz charakteru zachowania. Odpowiednie rozpoznanie sytuacji pozwala na podjęcie właściwej decyzji na czas. Ciekawym rozwiązaniem w ochronie rozległych obszarów jest radar termowizyjny. Posiada on kamerę, która krokowo obserwuje chroniony teren i w momencie detekcji zagrożenia informuje o nim. Takie krokowe skanowanie pozwala na uzyskanie obrazu o bardzo wysokiej rozdzielczości, pokazującego cały chroniony teren.

Zabezpieczenie ogrodzenia chronionego obiektu to tylko jedno z zagadnień ochrony perymetrycznej. Coraz częściej problemem w przypadku ochrony infrastruktury krytycznej są przelatujące nad obiektem bezzałogowe statki powietrzne (BSP), zatem w tym wypadku zagrożenie może nadejść z powietrza. Na nic zda się w tym przypadku konwencjonalny system ochrony perymetrycznej. Zagrożenie pojawia się tutaj nad obiektem bardzo szybko i może nadlecieć praktycznie z dowolnego kierunku. Jednak i takie zagrożenia można skutecznie wykrywać i eliminować. Bardzo istotna jest tutaj szybkość i niezawodność działania, ponieważ w przypadku nadlatujących BSP bardzo istotny jest czas reakcji. Skuteczną ochroną przed takim zagrożeniem jest system AUDS. To połączenie radaru, kamery termowizyjnej oraz systemu zakłócania. Mechanizm działania całego systemu przebiega w trzech etapach. W pierwszym etapie radar pozwala na detekcję nadlatującego obiektu z dystansu do 8 km (radar wykrywa najmniejsze obiekty – o powierzchni od 0,01 m<sup>2</sup>). Kiedy BSP jest bliżej chronionej strefy, wówczas radar nakierowuje kamerę termowizyjną na odpowiednią pozycję. Jest to drugi etap wykrycia zagrożenia, podczas którego jest także przeprowadzana weryfikacja wykrytego obiektu. Algorytm wideo sprawdza, czy na pewno nadlatujący obiekt to statek bezzałogowy. Kiedy zagrożenie zostanie potwierdzone, wówczas w trzecim etapie uruchamiany jest system radiowego zakłócania, który powoduje, że platforma opada na ziemię<sup>5</sup>.

5 *Międzynarodowy salon przemysłu obronnego 2016*, Magazyn Linc Polska Sp. z o.o., Poznań 2016.



## System zarządzania parkingami

Zainstalowany system parkingowy posiada zazwyczaj interfejs do systemu rozpoznawania i identyfikacji tablic rejestracyjnych. Numer rejestracyjny jest drukowany na bilecie. Nowoczesny system parkingowy na lotnisku w Gdańsku zawiera także m.in. czytniki dalekiego zasięgu czy rozbudowane znaki wskazujące zajętość miejsc<sup>6</sup>. Podczas opracowywania projektu największym dylematem było zapewnienie optymalnego stopnia jego integracji, sprawności i jednolitości działań ochronnych. Najnowocześniejsze środki techniczne bazują na technikach, które wykorzystują: wielopoziomową kontrolę bagażu głównego, automatyczne przetwarzanie danych w obszarze analizy zagrożeń, indywidualne kodowanie oraz czytniki biometryczne do personalizacji przejść.

### Przykłady rozwiązań infrastrukturalno-organizacyjnych w zakresie bezpieczeństwa portów lotniczych

Port lotniczy i samolot jako środek transportu powietrznego skupiają na sobie prawie wszystkie cele i założenia terrorystów. W portach lotniczych przebywa zawsze duża ilość osób. Dostęp do stref ogólnodostępnych jest przeważnie niekontrolowany i powszechny. Ewentualne przeprowadzenie akcji terrorystycznej w takim miejscu z pewnością przyciągnie uwagę opinii publicznej. Wszystkie najważniejsze stacje telewizyjne i radiowe oraz serwisy prasowe i internetowe będą pokazywać bądź mówić o dokonanym zamachu. Będą również tacy, którzy powiedzą, że dokonano go z pewnych powodów, inni dodadzą, że gdyby rząd coś wykonał, to do tragedii by nie doszło. Wywołanie takich reakcji jest często celem terrorystów.

W zakresie infrastruktury portu lotniczego przepisy zarówno krajowe (ustawa Prawo lotnicze), jak i międzynarodowe (zalecenia ICAO<sup>7</sup> – aneks 14 i 17),

<sup>6</sup> <http://ewit.pl/europarking:news-1100.htm> [dostęp: 10.07.2017].

<sup>7</sup> ICAO (*International Civil Aviation Organisation*) – Międzynarodowa Organizacja Lotnictwa Cywilnego, jest wyspecjalizowaną jednostką Organizacji Narodów Zjednoczonych. ICAO została powołana do życia na mocy konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym podpisanej 7 grudnia 1944 r. w Chicago (zwana inaczej – konwencja ICAO lub konwencja chicagowska).

czy też regionalne (zalecenia: EASA<sup>8</sup>, ECAC<sup>9</sup> i JAA<sup>10</sup>) nakładają na inwestora obowiązek spełnienia szeregu wymogów. Projektanci muszą pogodzić koncepcje architektoniczne z wymogami w zakresie bezpieczeństwa (np. odpowiednie usytuowanie stref zastrzeżonych, miejsc kontroli, stref dostępu). Nie można także zapominać o typowym zabezpieczeniu fizycznym, np. okna czy drzwi nie mogą umożliwiać przedostania się w sposób niekontrolowany ze stref ogólnodostępnych do stref zastrzeżonych. Przy budowaniu płyt postojowych dla samolotów należy uwzględnić również miejsce, do którego w sytuacji kryzysowej zostanie skierowany samolot będący obiektem aktu bezprawnej ingerencji (realizacja tzw. procedury *Vera*). Miejsce to powinno być najkorzystniejsze z punktu widzenia działań siłowych, uniemożliwiające dostęp osób postronnych i mediów oraz niezagrażające innym obiektom. Powinno również zapewniać służbom ochrony oraz służbom ratowniczym możliwość szybkiego dotarcia, a jednostkom specjalnym „bezpiecznego podejścia”.

Każda konstrukcja wznoszona wewnątrz strefy ochronnej lotniska, nawet poza ogrodzeniem, musi być tak zaprojektowana i wykonana, aby w „konfrontacji” z samolotem „poddawa się” pierwsza. Dobrym przykładem są kratownicowe maszty świateł wyznaczających oś pasa startowego. Każdy lądujący samolot musi przelecieć dokładnie nad nimi. Jeśli awaryjne lub przymusowe podejście do lądowania odbywa się na krytycznie małej wysokości, prawdopodobieństwo zderzenia jest duże. Dlatego kratownice wykonuje się z lekkich materiałów, dodatkowo osłabionych w newralgicznych punktach. Wsporniki podtrzymujące belkę poziomą łączą się z pionową kratownicą za pomocą celowo podpiłowanych sworzni – dzięki temu konstrukcja wytrzymuje normalne obciążenia wywoływane przez wiatr albo gromadzenie się na niej śniegu

**8** EASA (*European Aviation Safety Agency*) – Europejska Agencja Bezpieczeństwa Lotniczego, jest podstawową agencją powołaną przez Unię Europejską w celu koordynacji i zabezpieczenia działań w zakresie bezpieczeństwa lotniczego. Agencja wspólnotowa jest organem podlegającym europejskiemu prawu publicznemu. Różni się ona od instytucji wspólnotowych (Rady, Parlamentu, Komisji itd.) oraz posiada własną osobowość prawną. Ustanowiona jest na mocy aktu prawa wtórnego w celu wykonywania bardzo konkretnych zadań technicznych, naukowych lub zarządczych w domenie wspólnotowej Unii Europejskiej (I filar UE).

**9** ECAC (*European Civil Aviation Conference*) – Europejska Organizacja Lotnictwa Cywilnego.

**10** JAA (*Joint Aviation Authorities*) – powstało na mocy porozumienia cypryjskiego w roku 1990 jako organ stowarzyszony ECAC, zrzeszający przedstawicieli władz lotniczych.

i lodu. Jednak kolizja z samolotem spowoduje natychmiastowe „złożenie się” masztu.

Jak już wskazywano, jednym z najtrudniejszych do ochrony elementów lotnisk, głównie ze względu na znaczne rozmiary i zróżnicowaną topografię chronionych obiektów, są ich granice. Jest to element szczególnie wrażliwy na ingerencję jako miejsce bezpośredniego styku lotniska z otoczeniem. Pierwszą linię ochrony stanowią ogrodzenia. Muszą one spełniać określone wymagania techniczne. Ogrodzenie powinno być wykonane z paneli drucianych, siatkowych lub rozciągniętych siatek drucianych o wysokości minimum 180 cm oraz umieszczonej nad nimi zwyżki wykonanej z co najmniej trzech rzędów drutu kolczastego lub taśmy tnącej, zamocowanej na stelażach w kształcie litery V lub uformowanej w walec wykonany z minimum jednego drutu kolczastego albo taśmy tnącej. Całkowita wysokość ogrodzenia powinna wynosić w każdym jego punkcie minimum 2,44 m łącznie ze zwyżkami z drutu kolczastego lub taśm tnących. Wokół ogrodzenia powinna być zapewniona całkowicie wolna przestrzeń o szerokości minimum 3 m po jego obu stronach – w celu zapewnienia możliwości skutecznego obserwowania (patrowania) tej strefy. Ponadto wzdłuż ogrodzenia, po jego wewnętrznej stronie, powinna być poprowadzona droga patrolowa pozwalająca na systematyczne dokonywanie jego oglądu z pojazdu samochodowego.

Dla właściwego nadzoru nad zabezpieczeniem terenu lotniska przed dostępem osób postronnych oraz bezpieczeństwem samolotów niezbędne jest prawidłowe i skuteczne oświetlenie. Musi być zainstalowana odpowiednia ilość punktów świetlnych w stosunku do wielkości lotniska i pasa startowego. Chodzi głównie o światła podejścia, progowe, skrzydłowe, osi centralnej i dróg kołowania. Również miejsca postoju samolotów powinny być odpowiednio oświetlone w określonej porze czasowej.

Strefa zastrzeżona jest chroniona przed dostępem osób postronnych przy zastosowaniu osobowych i technicznych środków ochrony. Strefę zastrzeżoną oddziela się od miejsc ogólnodostępnych za pomocą barier technicznych, które są kontrolowane przez służby ochrony. Dostęp do strefy zastrzeżonej jest kontrolowany przy wykorzystaniu urządzeń elektronicznych i zastosowaniu systemu kart identyfikacyjnych uprawniających do wejścia do określonej strefy. Osoby inne niż pasażerowie wraz z przenoszonymi przedmiotami poddawani są ciągłej wrywkowej kontroli bezpieczeństwa przy wejściu do stref zastrzeżonych w celu uniemożliwienia wniesienia do tych obszarów towarów zabronionych.

Zarządzający lotniskiem opracowuje instrukcję przepustkową i wydaje zatrudnionemu na lotnisku personelowi przepustki uprawniające do wejścia do ściśle określonych stref. Pracownik otrzymuje uprawnienia do przebywania w określonych strefach zastrzeżonych w zależności od rodzaju przypisanych mu zadań i obowiązków. Posiadacz przepustki w czasie przebywania na terenie lotniska w związku z wykonywaniem obowiązków służbowych nosi ją na widocznym miejscu. Zarządzający we współdziałaniu ze Strażą Graniczną i policją nadzoruje prawidłowość funkcjonowania systemu przepustkowego i ustala system patrolowania stref zastrzeżonych lotniska, ogrodzenia zewnętrznych i przyległych do niego terenów.

Za ochronę statku powietrznego w czasie krótkotrwałego postoju na płycie lotniska odpowiada przewoźnik. Zgodnie z procedurą po wyjściu pasażerów z samolotu załoga dokonuje sprawdzenia go pod kątem ewentualnego ujawnienia celowo pozostawionych pakunków lub przedmiotów. W czasie dłuższego postoju samolotu drzwi oraz zewnętrzne włazy są zamykane i plombowane lub oklejane tzw. stickerami. Przewoźnik prowadzi rejestr założonych plomb.

Płytę lotniska oświetla się w sposób zapewniający służbom ochrony właściwy nadzór nad statkiem powietrznym. Przed przygotowaniem do lotu przewoźnik lotniczy przeprowadza kontrolę samolotu, uwzględniającą weryfikację zgodności plomb z zapisami w kartach kontrolnych oraz dokonuje sprawdzenia statku powietrznego zgodnie z listami kontrolnymi. Niezależnie od tych kontroli funkcjonariusze Straży Granicznej dokonują przeszukania statku powietrznego przed rozpoczęciem lotu międzynarodowego (tzw. umiędzynarodowienie) i po jego zakończeniu (tzw. ukrajowienie). Wykonując te zadania, stosują przypisane im przepisami prawa różne formy kontroli: kontrola manualna oraz kontrola manualna przy wykorzystaniu urządzeń (testerów) do wykrywania śladowych ilości i par materiałów wybuchowych lub chemicznych, sprawdzenie przy wykorzystaniu innego sprzętu specjalistycznego (zestawy pirotechnika, endoskopy, wzierniki, skanery, lustra) oraz psów służbowych.

Zarządzający lotniskiem wyznacza na płycie lotniska miejsca postoju dla samolotów wykonujących przewozy tzw. statkami lotnictwa ogólnego, oddalone co najmniej 30 m od płyt postojowych dla statków powietrznych przeznaczonych do regularnego transportu lotniczego. Osoby podróżujące statkiem lotnictwa ogólnego po poddaniu się kontroli bezpieczeństwa przebywają w miejscu uniemożliwiającym kontaktowanie się z innymi pasażerami. Kontrola bezpieczeństwa i obsługa osób jest przeprowadzana w oddzielnym

terminalu. W przypadku gdy lotnisko nie posiada oddzielnego terminala, osoby te przechodzą wydzieloną częścią terminala pasażerskiego pod nadzorem służby ochrony i przy wejściu do strefy sterylnej poddawane są kontroli bezpieczeństwa.

## Zakończenie

Z jednej strony szczególny charakter i znaczenie portów lotniczych sprawiają, że zagadnienia ich ochrony znalazły odzwierciedlenie w wielu regulacjach prawych. Z drugiej strony mnogość tychże uregulowań oraz przede wszystkim realizujących je instytucji sprawia, że koordynacja działań w zakresie ochrony ze szczególnym uwzględnieniem lotniskowej infrastruktury krytycznej wymaga wielu wysiłków. Nie ułatwia tego również bardzo specyficzny charakter obiektu, jakim jest port lotniczy. Dlatego podczas realizacji zadań ochrony należy skupić się na korelacji wspomnianych działań, co leży w gestii zarządzającego portem lotniczym.

## Bibliografia

- <http://ewit.pl/europarking:news-1100.htm>.
- Kwasiborska A., *Bezpieczeństwo transportu lotniczego. Wybrane aspekty*, Wyd. Typografia, Pułtusk–Warszawa 2016.
- Międzynarodowy salon przemysłu obronnego 2016*, Magazyn Linc Polska Sp. z o.o., Poznań 2016.
- Rozporządzenie Komisji (UE) nr 185/2010 z dnia 4 marca 2010 r. ustanawiające szczegółowe środki w celu wprowadzenia w życie wspólnych podstawowych norm ochrony lotnictwa cywilnego.
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 300/2008 z dnia 11 marca 2008 r. w sprawie wspólnych zasad w dziedzinie ochrony lotnictwa cywilnego i uchylające rozporządzenie (WE) Nr 2320/2002.
- Szczelina M., *Systemy bezpieczeństwa w lotnictwie cywilnym, metody i środki ochrony lotniska i podmiotów prowadzących działalność gospodarczą* [w:] *Zarządzanie bezpieczeństwem lotnictwa cywilnego*, red. J. Sztucki, M. Gąsior, G. Zajac, skrypt dydaktyczny, Wyd. Naukowe Dolnośląskiej Szkoły Wyższej, Wrocław 2012.
- Zieliński M., *Ochrona infrastruktury krytycznej w porcie lotniczym*, Wyd. AMW, Gdynia 2010.

# Wykorzystanie symulatora lotniczego samolotu MiG-29 na potrzeby szkolenia do realizacji zadań w ramach misji „Baltic Air Policing”

## Streszczenie

Prezentowany artykuł dotyczy wykorzystania symulatora lotniczego samolotu MiG-29 na potrzeby szkolenia lotniczego do realizacji misji „Baltic Air Policing” poza granicami kraju. W pierwszej jego części opisano przeznaczenie i wymagania operacyjno-techniczne symulatora lotu, które zostały określone w postaci metodyki w taki sposób, aby odzwierciedlić jak najbardziej rzeczywiste warunki lotu oraz wykonywania przez personel zadań bojowych. W ramach tej części zdefiniowano pojęcie „symulator lotniczy” oraz określono jego miejsce w klasyfikacji symulatorów lotniczych. Dalej zdefiniowano typ zadań, które mogą być realizowane w oparciu o urządzenie (w szczególności zadania z wykorzystaniem środków bojowych samolotu). W kolejnej części artykułu opisano budowę symulatora i jego poszczególnych komponentów, a następnie systemy wizualizacji i generowania obrazu symulatora oraz systemy nawigacyjne. Istotną częścią w kontekście realizacji misji „Baltic Air Policing” są urządzenia symulatora związane z uzbrojeniem samolotu i ich przeznaczenie. W ramach tej części wyszczególniono środki bojowe przenoszone przez samolot, moduł broni symulatora oraz jego możliwości, a także wspomagający ten proces podsystem – generator wirtualnego pola walki.

**Słowa kluczowe:** symulator lotniczy, samolot bojowy MiG-29, misja „Baltic Air Policing”.

## Wstęp

„Baltic Air Policing” to kryptonim pierwszej operacji NATO realizowanej w ramach Sił Szybkiego Reagowania NATO, a polegającej na obronie przestrzeni powietrznej trzech krajów nadbałtyckich: Litwy, Łotwy i Estonii. Misja odbywa się od marca 2004 roku, czyli od momentu wstąpienia tych krajów do NATO. Ponieważ siły powietrzne tych krajów są niewystarczające do obrony ich

przestrzeni powietrznej (a co za tym idzie – przestrzeni powietrznej NATO), zadanie to powierzane jest zmieniającym się zasadniczo co trzy miesiące oddziałom z kolejnych krajów Sojuszu. Zazwyczaj kontyngent wysyłany na tę misję liczy cztery samoloty bojowe – dwa z nich pozostają w gotowości bojowej do szybkiego startu (zwykle w 15 minut), pozostałe dwa służą jako zapasowe.

Jednym z tego typu samolotów bojowych jest MiG-29. Jest to lekki myśliwiec taktyczny zdolny do wykonywania misji typu powietrze-powietrze na średnich i małych odległościach oraz atakowania celów naziemnych za pomocą nieprecyzyjnych środków rażenia z możliwością wykonywania zadań bojowych w warunkach zakłóceń elektronicznych, czyli pasywnej walki elektronicznej.

Przed wykonywaniem zadań bojowych piloci przechodzą różne etapy szkolenia. Jednym z nich jest szkolenie symulatorowe, realizowane za pomocą symulatorów lotniczych. Znajdują one zastosowanie w nauce podstawowego pilotażu na samolotach i śmigłowcach oraz w szkoleniu personelu pokładowego, treningu pilotów, jak też w trenowaniu przechwyceń i walk powietrznych, co na potrzeby misji typu „Baltic Air Policing” jest szczególnie istotne. Dla podniesienia standardów bezpieczeństwa szczególnego znaczenia nabierają nowe systemy symulatorów, pozwalające również na naukę i radzenie sobie z sytuacjami szczególnymi, np. ostrzałem. Symulatory te pozwalają na zapoznanie pilotów z sytuacjami ekstremalnymi, szczególnymi, które nie mogły być przeprowadzone w sposób realny podczas normalnych lotów szkolnych.

Celem artykułu jest przedstawienie budowy i możliwości zaawansowanego technologicznie symulatora lotniczego – SL MiG-29, znajdującego się w 23 Bazie Lotnictwa Taktycznego w Mińsku Mazowieckim. Oceny jego możliwości dokonano w kontekście misji typu „Baltic Air Policing”, które realizowane są przy pomocy samolotów bojowych MiG-29. Na potrzeby badań w artykule postawiono hipotezę roboczą: szkolenie na symulatorze SL MiG-29 ma decydujący wpływ na wyszkolenie personelu lotniczego realizującego misję „Baltic Air Policing”.

## **Przeznaczenie i wymagania operacyjno-techniczne symulatora lotu**

Symulatorem lotniczym nazywamy urządzenie wspomagające teoretyczne i praktyczne szkolenie lotnicze, które jest w stanie zasymulować, czyli stworzyć zbliżone do rzeczywistych warunki lotu oraz zachowanie się statku

powietrznego w stosunku do tych warunków<sup>1</sup>. Jako przykład można wskazać wojskowy symulator lotniczy FFS (*Full Flight Simulators*)/FMS (*Full Mission Simulators*), należący do najbardziej zaawansowanych technicznie rodzajów symulatorów lotniczych. Taki symulator stanowi kompletną i pełnowymiarową (w skali 1:1) replikę kokpitu danego typu statku powietrznego z uwzględnieniem jego rzeczywistego pierwowzoru<sup>2</sup>. Posiada możliwości odwzorowania warunków zarówno na ziemi (faza przedlotowa i polotowa), jak i w powietrzu.

Jednym z tego typu urządzeń (symulator FFS) jest SL MiG-29 (fot. 18). Wyprodukowania symulatora podjęło się konsorcjum – przedsiębiorstwo KenBIT Sp.j. we współdziałaniu ze słowacką firmą Virtual Reality Media<sup>3</sup>.



Źródło: zdjęcie autorskie.

*Fot. 18. Wnętrze kokpitu samolotu MiG-29 w symulatorze SL MiG-29*

- 1 Definicja autorska.
- 2 *JAR-FSTD A: Aeroplane flight simulation training devices*, EASA 2008, s. 1-B-1.
- 3 <http://www.kenbit.pl/simulator-mig-29/> [dostęp: 21.08.2017].



Urządzenie SL MiG-29 jest kompleksowym symulatorem lotniczym przeznaczonym do wszystkich rodzajów ćwiczeń, treningów i szkoleń pilotów dla samolotu myśliwskiego MiG-29. Jego pierwowzorem był jeden z samolotów eksploatowanych w 23 Bazie Lotnictwa Taktycznego w Mińsku Mazowieckim o numerze bocznym (burtowym) 89. Symulator zawiera kompletną funkcjonalną kabinę pilota, nowoczesny system wizualizacji, ergonomiczne stanowisko pracy instruktora o wysokim poziomie funkcjonalności użytkowej i technicznej, a także zaawansowany system audio.

Symulator zbudowany jest w oparciu o najnowsze osiągnięcia z dziedziny technologii symulacji. Jego działanie bazuje na rzeczywistości wirtualnej, co oznacza, że w sposób bardzo rzeczywisty zastępuje prawdziwy samolot. Jednakże w odróżnieniu od niego oferuje szereg dodatkowych funkcjonalności i możliwości, przede wszystkim możliwość trenowania podstawowych i zaawansowanych technik pilotażu bez ryzyka strat w ludziach czy mieniu, trening sytuacji niestandardowych i krytycznych, czy też trening lotu grupowego i manewrowania podczas pojedynku w powietrzu. Tworzy go kompleks wielu sprzętowych i programowych modułów logicznych, funkcjonalnych i wykonawczych.

Wymagania operacyjno-techniczne symulatora SL MiG-29 lotu opracowane zostały w postaci metodyki w ten sposób, aby odzwierciedlić jak najbardziej rzeczywiste warunki lotu oraz wykonywania przez personel zadań bojowych. Wymagania te zostały określone na podstawie badań technikami kontroli wizualnej oraz prób praktycznych (np. w przypadku sprawdzenia poprawności działania przyrządów i wskaźników w kabinie). W kontekście realizacji zadań w ramach misji „Air Policing” wydaje się to być szczególnie istotne.

Symulator lotu samolotu MiG-29 przeznaczony jest do wspomagania procesu szkolenia pilotów samolotów MiG-29 znajdujących się na wyposażeniu Sił Zbrojnych RP w zakresie nauki i treningu procedur użytkowania urządzeń pokładowych w kabinie przez personel latający. Algorytm symulowanego ruchu przestrzennego samolotu powinien uwzględniać efekty zmian istotnych czynników, takich jak: siły i momenty aerodynamiczne, przestrzenne położenie statku powietrznego, moc zespołów napędowych, opory aerodynamiczne, parametry lotu – prędkość oraz wysokość, temperatura zewnętrzna, masa samolotu, położenie jego środka ciężkości oraz konfiguracja uzbrojenia samolotu. Zmiana czynników powinna być identyczna jak dla rzeczywistego lotu

w zadanych przez instruktora warunkach, np.: loty typu VFR<sup>4</sup> i IFR<sup>5</sup> w dzień i w nocy, w zaprogramowanych warunkach pogodowych, w wykonywaniu lotów na zastosowanie bojowe (z użyciem uzbrojenia lotniczego), prowadzenia korespondencji radiowej oraz wyrabiania nawyków w czasie procedur awaryjnych (np. awaryjne opuszczanie statku powietrznego).

Symulator SL MiG-29 jest urządzeniem, które spełnia wymagania określone w normie<sup>6</sup> dla urządzeń klasyfikowanych według grupy urządzeń przeznaczonych do instalowania w naziemnych stacjonarnych pomieszczeniach i budowlach (urządzenie typu N.1) wykonanych dla klimatu umiarkowanego zimnego. Oprogramowanie symulatora powinno odwzorowywać rzeczywiste charakterystyki samolotu podczas wszystkich faz lotu oraz zapewnić pilotowi takie odczucia (w zakresie wymaganych rozwiązań konstrukcyjnych symulatora), jakie są odczuwane w rzeczywistym samolocie, w całym zakresie jego eksploatacji. Charakterystyki sił i przemieszczeń organów sterowania symulatora powinny odpowiadać siłom i przesunięciom organów sterowania symulowanego samolotu. Reakcje symulatora na ruchy organów sterowania powinny być takie same jak symulowanego samolotu w tych samych warunkach lotu.

Symulowane charakterystyki pracy instalacji i systemów pokładowych, systemów awionicznych oraz pokładowych i naziemnych systemów nawigacji powinny odpowiadać ich rzeczywistym charakterystykom w całym zakresie eksploatacyjnym samolotu, w tym również w przypadkach szczególnych (np. stany awaryjne), jakie mogą wystąpić podczas rzeczywistego lotu. Symulator zapewnia także realizację przez pilota pojedynczych procedur, takich jak: sprawdzenie przedlotowe, polotowe, sprawdzenie systemów łączności, uruchomienia silnika oraz odpowiednich dla samolotu operacji w warunkach normalnych, nienormalnych i w sytuacjach awaryjnych zgodnie z dokumentacją samolotu.

Oprogramowanie symulatora powinno zapewnić symulowaną realizację wszystkich zadań bojowych, pilotażowych i nawigacyjnych (VFR, IFR,

4 VFR (*Visual Flight Rules*) – lot z widocznością.

5 IFR (*Instrument Flight Rules*) – lot wykonywany według wskazań przyrządów pokładowych.

6 Norma obronna NO-06-A103:2005, *Uzbrojenie i sprzęt wojskowy – Ogólne wymagania techniczne, metody kontroli i badań – Wymagania środowiskowe*, MON, Warszawa 2005.

VMC<sup>7</sup>, IMC<sup>8</sup>), możliwych do realizowania na samolocie, z uwzględnieniem lotów w składzie formacji z generowanym wirtualnie obiektem. Symulator powinien być przygotowany do współpracy w trybie online z symulatorami zintegrowanymi we wspólnym środowisku sieciowym bazującym na architekturze HLA (*High Level Architecture*) zgodnie ze STANAG 4603<sup>9</sup>.

Oprogramowanie symulatora zapewnia symulowaną realizację zadań w sposób odwzorowujący rzeczywiste zachowanie samolotu wraz z wykorzystaniem uzbrojenia lotniczego. Należą do nich poniższe typy zadań:

1) zadania z użyciem uzbrojenia klasy powietrze-powietrze (p-p) za pomocą kierowanych pocisków raketowych R-27, R-60, R-73 oraz pokładowego działka lotniczego GSz-30-1 o kalibrze 30 mm;

2) wykonywanie zadań bojowych z użyciem lotniczych środków bojowych typu powietrze-ziemia (p-z) do celów powierzchniowych – naziemnych i nawodnych. Zadania bojowe realizuje się z użyciem uzbrojenia bombardierskiego: bomb lotniczych OFAB-500, OFAB-250, OFAB-100-120, niekierowanych pocisków raketowych klasy p-z (S-8 i S-24) oraz pokładowego 30 mm działka lotniczego GSz-30-1;

3) przechwycenie samolotu cywilnego wraz z możliwością zasymulowania przez niego różnych sytuacji, takich jak: uprowadzenie, awaria na pokładzie czy brak łączności radiowej, które realizowane są uprzednio poprzez emisję odpowiednich kodów transpondera<sup>10</sup>. Do przechwytywanych samolotów pasażerskich należą: Boeing B-787 PLL LOT, Boeing B-737 PLL LOT, Boeing B-767 PLL LOT, Airbus-340 Emirates, ATR 42 Lufthansa Regional;

4) wykonywanie zadań określonych w pkt. 1–3, w parze z symulowanym samolotem sterowanym ze stanowiska instruktora, lub też przeciwko symulowanemu statkowi powietrznemu, sterowanemu z tego stanowiska.

7 VMC (*Visual Meteorological Conditions*) – minimalne warunki atmosferyczne (MWA), które muszą być spełnione do wykonywania lotów VFR.

8 IMC (*Instrumental Meteorological Conditions*) – warunki pogodowe (zazwyczaj brak wystarczającej widoczności), w których nie jest możliwe wykonywanie lotów z widocznością (VFR).

9 *NATO standard AMSP-01 NATO modelling and simulation standards profile*, Edition C, Version 1, NATO Standardization Office (NSO), 2013, s. 3-3.

10 Emitowanie kodów transpondera (czterocyfrowy numer emitowany przez transponder na pokładzie statku, umożliwiający identyfikację danego statku i tym samym umożliwiającą sprawowanie radarowej kontroli ruchu lotniczego): HJ (*Hijack*) – porwanie: 7500, RF (*Communication Failure*) – brak łączności radiowej: 7600, EM (*Emergency*): 7700.

Obszar służący do wykonania zadań lotniczych oraz związana z nim baza danych zostały wykonane w dwóch poziomach szczegółowości:

1) obszar niskiej szczegółowości – obejmuje obszar Polski oraz akwen całego Morza Bałtyckiego (ważny z punktu widzenia realizacji misji typu „Air Policing” krajów nadbałtyckich) odwzorowany trójwymiarowo. Powinien on umożliwiać wykonywanie lotów symulowanych na wysokościach powyżej 500 m, według przyrządów pokładowych, z wykorzystaniem cywilnych środków i przyrządów radionawigacyjnych. Baza danych obszaru w tym stopniu szczegółowości powinna być sporządzona w oparciu o mapę w skali 1:500 000 i odwzorowana trójwymiarowo z dokładnością poziomą co najmniej 15 m;

2) obszar wysokiej szczegółowości – obejmuje co najmniej 10 dużych lotnisk oraz 3 poligony lotnicze. Baza danych obszaru w tym stopniu szczegółowości pozwala na wzrokową identyfikację obiektów i jest sporządzona w oparciu o mapę w skali 1:25 000, odwzorowaną trójwymiarowo z dokładnością poziomą co najmniej 0,6 m.

Baza danych terenu rzeczywistego zapewnia możliwość wstawienia przez instruktora tzw. dynamicznego lotniska wirtualnego wraz z infrastrukturą oraz elementami urbanistyki istotnymi dla wykonywania procedur startu i lądowania w dzień i w nocy. Operator powinien posiadać możliwość zmiany parametrów lotniska w zakresie położenia geograficznego, parametrów pasa startowego oraz systemów podejścia do lądowania.

Baza ruchomych (trójwymiarowych) obiektów zawiera:

1) wojskowe statki powietrzne (samoloty i śmigłowce) o charakterze pasywnym i aktywnym, w rzeczywistym malowaniu i oznakowaniu;

2) środki obrony przeciwlotniczej (OPL);

3) stacje rozpoznania i walki elektronicznej (WE);

4) uzbrojenie i sprzęt wojskowy (UiSW) wojsk lądowych w postaci: samochodów ciężarowych, transporterów opancerzonych, bojowych wozów piechoty, czołgów, stacji radiolokacyjnych, wyrzutni raketowych, środków obrony przeciwlotniczej i morskich (własnych oraz użytkowanych w NATO i państwach ościennych) o charakterze pasywnym i aktywnym;

5) UiSW marynarki wojennej – okręty oraz specjalistyczne pojazdy rozładowane na lotniskach i lądowiskach;

6) samoloty lotnictwa komunikacyjnego wraz z malowaniem przynależnym do odpowiednich linii lotniczych.

Szczegółową bazę ruchomych obiektów 3D, zaimplementowaną w symulatorze lotniczym SL MiG-29, zestawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Baza ruchomych obiektów 3D zaimplementowana w symulatorze lotniczym SL MiG-29

Nazwa sprzętu	Przynależność	Opis
<b>wojskowe statki powietrzne o charakterze pasywnym i aktywnym (w rzeczywistym malowaniu i oznakowaniu) – samoloty</b>		
F-16 , F-15, F-22	USAF	–
Mirage 2000	Francja	–
Typhoon	Niemcy	–
Gripen	Szwecja	–
F-18	Finlandia	–
Su-25, Su-27, MiG-31	Rosja	–
MiG-29	Białoruś	–
IŁ-20, TU-160, A-50	Rosja	–
E-3 A Sentry NATO	USA	samolot wczesnego ostrzegania i naprowadzania AWACS
<b>wojskowe statki powietrzne o charakterze pasywnym i aktywnym (w rzeczywistym malowaniu i oznakowaniu) – śmigłowce</b>		
Mi-24, Mi-26, Ka-50	Rosja	–
AH-64	USA	–
<b>samoloty pasażerskie (w rzeczywistym malowaniu i oznakowaniu)</b>		
Boeing B-787	PLL LOT	–
Boeing B-737	PLL LOT	–
Boeing B-767	PLL LOT	–
Airbus A-340	Emirates	–
ATR 42	Lufthansa Regional	–
<b>środki obrony przeciwlotniczej</b>		
S-300 (SA-10)	Rosja	rakietowy system przeciwlotniczy
PRWB OSA (SA-8)	Rosja	przeciwlotniczy rakietowy wóz bojowy
TUNGUSKA	Rosja	samobieżny artyleryjsko-rakietowy system przeciwlotniczy
KUB	Białoruś	przeciwlotniczy zestaw rakietowy
<b>stacje rozpoznania walki elektronicznej</b>		
SPN-40	Białoruś	stacja zakłóceń radiolokacyjnych
<b>uzbrojenie i sprzęt wojskowy wojsk lądowych</b>		
PT-91	Rosja	czołg
LEOPARD	Niemcy	czołg
BMP-3	Rosja	bojowy wóz piechoty
M1 ABRAMS	USA	czołg
<b>uzbrojenie i sprzęt wojskowy marynarki wojennej</b>		
ORP „Gen. K. Pułaski”	Polska	fregata rakietowa typu Oliver Hazard Perry
ORP „Sęp”	Polska	okręt podwodny typu Orzeł
„Admirał Uszakow”	Rosja	niszczyciel rakietowy typu Sowriemiennyj
„Drakon”	Rosja	okręt podwodny klasy Akula

Opracowanie własne.

## Budowa symulatora

Kabina symulatora, system wizualizacji oraz stanowisko pracy instruktora (*Instruktor Operation Station* – IOS) chronione są osłoną tworzącą zamkniętą przestrzeń, tzw. Doom. Konstrukcja nośna Doomu wykonana została w formie szkieletu składającego się z większej ilości opartych na ramach podgrup, które wyprodukowano ze spawanych aluminiowych profili zamkniętych. Obwód zewnętrzny poszczególnych ram obłożony jest z zewnątrz blachą aluminiową. Poszczególne ramy połączone są ze sobą śrubowo. W szkielecie utworzona jest rama z drzwiami wejściowymi. Rama przyśrubowana jest również do podłogi. W celu uzyskania lepszej sztywności i stabilności szkielet przyśrubowany jest również do konstrukcji systemu projekcyjnego.

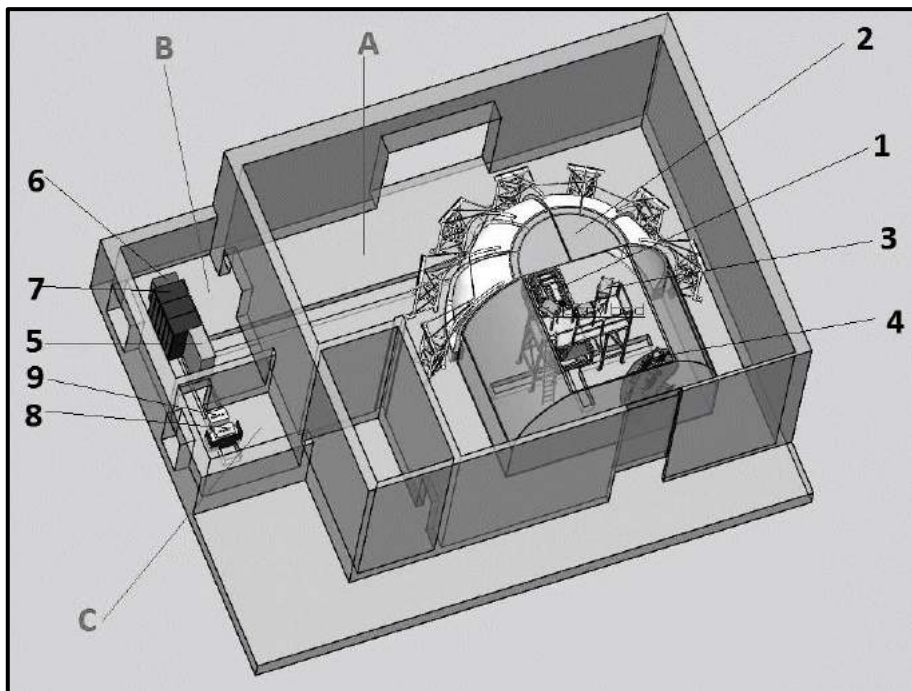
Kokpit symulatora zapewnia pilotowi wrażenie lotu rzeczywistym statkiem powietrznym. Wykonany został w taki sposób, by był on możliwie jak najbardziej zgodny z prawdziwym kokpitem samolotu MiG-29 i aby sterowanie oraz zachowywanie się wszystkich elementów było jak najwierniejsze.

Informacje z kabiny przekazywane są za pośrednictwem komputerów PC COCKPIT, PC CLS i PC AVIONICS poprzez sieć informatyczną do pozostałych komputerów, gdzie poddawane są dalszej obróbce.

Symulator znajduje się w 23 Bazie Lotnictwa Taktycznego Sił Powietrznych Rzeczypospolitej Polskiej w Mińsku Mazowieckim. Znajduje się on w budynku centrum symulacji, który przebudowany został zgodnie z wymogami producenta symulatora. Elementy symulatora rozmieszczone są w trzech pomieszczeniach: symulatora (A), technologicznym elektronicznych szaf rozdzielczych (B) oraz klimatyzacji (C). Do zasadniczych elementów symulatora należą: kabina symulatora (1), ekran projekcyjny (2), system wizualizacji (3), IOS (4), elektryczne szafy rozdzielcze (5), UPS (6), elektryczna szafa rozdzielcza generatora obrazu (7), sprężarka (8), klimatyzacja kabiny symulatora (9). Budowę komponentów symulatora przedstawia rysunek 23.

Podstawa wykonana jest ze spawanej konstrukcji zbudowanej z zamkniętych profili aluminiowych. W tylnej części podstawy umieszczono urządzenie dociąające, jak również system urządzenia zadymiającego. W przedniej części podstawy, na lewym i prawym boku umieszczone są nośniki kart I/O. W części czołowej podstawy zlokalizowana jest szafa teleinformatyczna z kartami elektronicznymi i wentylatorami odprowadzającymi ciepło. W tylnej części, na lewym i prawym boku umieszczony jest układ pneumatyczny niezbędny dla działania maski i kombinezonu przeciążeniowego pilota. Podstawa po całym obwodzie obudowana jest przykręcaną blachą (w części serwisowej blachy

są zdejmowalne – zastosowano wkręty szybkiego montażu). Z lewej strony podstawy kabiny umieszczone są wykonane poprzez spawanie konstrukcji aluminiowej schody o odpowiedniej sztywności, których masa umożliwia ewentualne ich przenoszenie.



Źródło: opracowanie własne na podstawie: *Instrukcja użytkownika (IU) symulatora lotu samolotu MiG-29, SL MiG-29 (IU.006.00.00.03)*, s.n., Warszawa 2015, s. 23.

*Rys. 23. Budowa komponentów symulatora SL MiG-29*

Rozmieszczenie przyrządów w kabinie jest takie samo jak w prawdziwym samolocie. Zastosowano makiety funkcyjne przyrządów, wykonane w oparciu o prawdziwe przyrządy, dostosowane do wykorzystywania w symulatorze, które można pogrupować:

- 1) przyrządy układu silnik-selsyn,
- 2) przyrządy układu silnik-potencjometr,
- 3) przyrządy silnika krokowego,
- 4) przyrządy układu magnetoelektrycznego.

**1 grupa przyrządów** – stanowią je oryginalne przyrządy, dostosowane do działania w symulatorze. Jako położeńiowe sprzężenie zwrotne wykorzystana została maszyna elektryczna – selsyn. Wskazówki przyrządów napędzane

są motorycznie. Ich sterowanie zapewnia komputer sterujący kabiny PC COCKPIT poprzez panele krokowego sterowania silników (KSD). Umieszczone są one w bloku regulatorów przyrządów znajdującym się w przedniej części ramy kokpitu. Panele KSD komunikują się z komputerem sterującym PC COCKPIT przez linię seryjną RS-422.

**2 grupa przyrządów** – to oryginalne przyrządy, dostosowane do działania w symulatorze. Jako położeniowe sprzężenie zwrotne wykorzystany został potencjometr. Wskazówki przyrządów napędzane są motorycznie. Ich sterowanie zapewnia komputer sterujący kabiny PC COCKPIT poprzez panele z regulacją silnika prądu zmiennego ze sprzężeniem zwrotnym (KPD). Umieszczone są one w bloku regulatorów przyrządów znajdującym się w przedniej części ramy kokpitu. Panele KPD komunikują się z komputerem sterującym PC COCKPIT przez linię seryjną RS-422.

**3 grupa przyrządów** – to oryginalne przyrządy, dostosowane do działania w symulatorze. Wskazówki przyrządów napędzane są motorycznie. Ich sterowanie zapewnia komputer sterujący kabiny PC COCKPIT poprzez panele sterowania. Umieszczone są one w lewej części ramy kokpitu. Panele sterowania komunikują się z komputerem sterującym kabiny PC COCKPIT przez linię seryjną RS-422.

**4 grupa przyrządów** – to oryginalne przyrządy, dostosowane do działania w symulatorze. Wskazówki przyrządów napędzane są za pomocą układów magnetoelektrycznych. Ich sterowanie zapewnia komputer sterujący kabiny PC COCKPIT poprzez przetworniki cyfrowo-analogowe woltomierzy (DAVO), które umieszczone są w lewej części ramy kokpitu. Panele DAVO komunikują się z komputerem sterującym kabiny PC COCKPIT przez linię seryjną RS-422.

Oprócz przyrządów z wymienionymi typami napędu w kokpicie zostały umieszczone również makiety przyrządów z wyświetlaczami, które mają wbudowane własne sterowanie.

Elementy sterujące obrazujące i sygnalizacyjne umieszczone są na panelu przyrządów oraz na panelach sterowania. Z punktu widzenia odczytu i sterowania można je podzielić na cyfrowe i analogowe. Elementy sterowane cyfrowo to łączniki, przełączniki, przyciski doprowadzone do paneli wejść cyfrowych umieszczonych z lewej i prawej strony ramy kokpitu. Stan poszczególnych wejść transmitowany jest protokołem 32-bitowym za pomocą linii seryjnej RS-422 do komputera sterującego kabiny PC COCKPIT. Wyjścia logiczne, np. okienka sygnalizacyjne i żarówki sygnałowe, sterowane są z paneli wyjść logicznych umieszczonych z lewej i prawej strony ramy kokpitu. Wszystkie



wyjścia logiczne są spinane lub rozpinane za pomocą przełączników, których stan kontrolowany jest protokołem 32-bitowym transmitowanym za pomocą linii seryjnej RS-422 z komputera sterującego kabiny PC COCKPIT.

Komputer sterujący kabiny PC COCKPIT znajduje się w szafie rozdzielczej. Bazuje on na systemie operacyjnym MS Windows 7. Z pozostałymi komputerami komunikuje się za pomocą sieci Ethernet. Dane z komputera opracowywane są za pomocą modeli matematycznych, które wysyłają odpowiedź z powrotem do komputera sterującego kabiny. Komputer sterujący kabiny przekształca przyjęte dane do odpowiedniego formatu, po czym wysyła je do paneli regulatorów przyrządów oraz paneli wejść i wyjść.

Komputer sterujący awioniki PC AVIONICS znajduje się w szafie rozdzielczej. Jego pracę zapewnia system operacyjny MS Windows 7 działający w sieci typu Ethernet. Komputer sterujący awioniki przekształca przyjęte dane do odpowiedniego formatu, po czym wysyła je do systemów awioniki w kabinie symulatora.

Do makiet przyrządów awioniki symulatora należą: radiostacja RT-8200, panel UFCP<sup>11</sup>, wskaźnik wielofunkcyjny oraz panel.

## System wizualizacji i generowania obrazu symulatora

W zastosowaniu bojowym oraz procesie przygotowania do misji bojowych ważnym aspektem jest system wizualizacji i generowania obrazu przez symulator. Odpowiednie (jak najbardziej rzeczywiste) odwzorowanie pozwala na wysoki poziom szkolenia, szczególnie w przypadku prowadzenia zadań bojowych.

Zadaniem systemu wizualizacji jest zobrazowanie generowanego komputerowo środowiska wirtualnego na powierzchnię sferycznego ekranu projekcyjnego, w centrum którego znajduje się kabina wraz z pilotem. System wizualizacji składa się z następujących części: generatora obrazu (*Image Generator* – IG), ekranu projekcyjnego, konstrukcji nośnej systemu projekcyjnego wraz z projektorami oraz okablowania. System projekcyjny tworzony jest przez sześć wysokowydajnych projektorów, które umożliwiają wyświetlanie na ekranie projekcyjnym obrazu o wysokiej rozdzielczości. Generator obrazu generuje dla powyższego systemu sześciu projektorów sześć części generowanej

**11** UFCP – panel z przyciskami, dzięki któremu bez odrywania wzroku od parametrów lotu można sterować systemami radiowymi, nawigacyjnymi i uzbrojenia. M. Adamski, *Analiza możliwości bojowych samolotów F-16 i MiG-29*, „Problemy Techniki Uzbrojenia” 2009, R. 38, z. 110, s. 45.

sceny (sześć kanałów), z których składa się środowisko. Generowanie obrazu zapewnia wydajny 6-kanałowy system graficzny IG IMMAX2015. Umiejscowiony jest on w pomieszczeniu technologicznym szafy rozdzielczej.

Sferyczny ekran projekcyjny wyprodukowany jest z sześciu segmentów laminatu o promieniu 3,6 m. Segmenty są wzajemnie ześrubowane i po finalnym osadzeniu przyśrubowane do podstawy nośnej. Podstawa jest następnie przyśrubowana do podłogi. Płótno projekcyjne tworzy część powierzchni sferycznej o promieniu 3,6 m. Dla ustawienia ekranu projekcyjnego i niezbędnego kształtu segmenty tegoż ekranu przymocowane są do stojaków za pomocą śrub regulacyjnych. Kabina z pilotem umieszczona jest w taki sposób, by punkt oczu znajdował się na środku ekranu projekcyjnego, co zapewnia pole widzenia w płaszczyźnie poziomej 180°, a w płaszczyźnie pionowej 80° (od -20° do +60°). Do wyświetlania obrazu wykorzystano wydajne projektory F-35 WQXGA VizSim Bright firmy Barco – Projection Design, po jednej sztuce na każdy wyświetlany kanał. Projektory zawieszono na konstrukcji nośnej systemu projekcyjnego.

Podsystem sterowania symulatora to grupa modułów programowych (tab. 8), które są sterowane i synchronizowane frameworkiem i komunikują się za pośrednictwem sieci komputerowej. Wszystkie moduły są niezależne, a każdy z nich może pracować jako aplikacja lokalna lub zdalna. W celu osiągnięcia optymalnej wydajności system zapewnia automatyczną konfigurację modułów. Jedynymi modułami odrębnymi są moduły generatora obrazu, które pracują na komputerach ze specjalnymi adapterami graficznymi.

*Tabela 8. Moduły programowe symulatora lotu SL MiG-29*

Nazwa modułu	Opis
MANAGER	główny moduł sterujący
MODEL	model matematyczny MiG-29
NAVIG	moduł nawigacyjny
AIMING	moduł broni
VOICE	komunikacja głosowa
HLA	podłączenie symulatorów przez HLA
CGF	siły generowane komputerowo
HW	moduł sprzętowy podłączenia kabiny
SOUND	moduł dźwiękowy
IOS	stanowisko pracy instruktora
INSTRUMENTS	widok przyrządów
RECORDING	zapis i odtwarzanie symulacji
POWERSION	IG stanowiska pracy instruktora
CLS	moduł urządzenia dociążającego
POWERSION	generator obrazu

Źródło: opracowanie własne na podstawie: *Instrukcja użytkownika (IU) symulatora...*, op. cit., s. 92.

## Systemy i możliwości symulatora w zakresie nawigacji

Za kwestie związane z nawigacją symulowanego lotu samolotu myśliwskiego MiG-29 realizowanego przez SL MiG-29 odpowiada moduł nawigacyjny (NAVIG). Umożliwia on treningi personelu latającego w oparciu o przyrządy nawigacyjne. Dzięki niemu możliwe jest wykonywanie takich zadań lotniczych, jak: lot nawigacyjny po zaprogramowanej trasie, lot nawigacyjny z użyciem pomocy radionawigacyjnych VOR/DME, TACAN, ADF, GPS; podejście do lądowania i lądowanie na lotnisku za pomocą systemu ILS, podejście do lądowania i lądowanie na lotnisku za pomocą systemu 2xNDB. Dzięki modułowi NAVIG możliwe jest wykonywanie lotów z użyciem takich systemów, jak: TACAN, VOR, GPS, DME, ILS, ADF, Gyro.

**TACAN** (*Tactical Air Navigation*) – to wojskowy system radionawigacji lotniczej bliskiego zasięgu, umożliwiający pomiar odległości i kierunku do radiolatarni systemu pracującej w pasmie częstotliwości 962–1213 MHz<sup>12</sup> przy zasięgu do 370 km. W symulatorze tryb TACAN oraz kanał jego częstotliwości ustawia się na panelu UFCP. Dane wynikowe wyświetlają się na wyświetlaczu cyfrowym MFCD (*Multi-Function Color Display*).

**VOR** (*VHF Omni-Directional Range*) – to rodzaj radiolatarni stosowanej w lotnictwie, wykorzystującej pasmo radiowe w zakresie 108–117,9 MHz. W emitowanym paśmie przenoszona jest informacja azymutalna. Daje to możliwość prezentacji w urządzeniach pokładowych takich informacji, jak: namiar magnetyczny statku powietrznego od radiolatarni, osiągnięcie żądanego namiaru do lub od radiolatarni, minięcie radiolatarni, identyfikator radiolatarni (trzy znaki zakodowane alfabetem Morse'a)<sup>13</sup>. W urządzeniu SL MiG-29 tryb VOR oraz jego częstotliwość ustawia się zasadniczo poprzez panel UFCP, a kurs wyświetlany jest na MFCD. Tryb VOR posiada także możliwość wyświetlania odchylenia od promienia (tzw. radialu).

**GPS-NAVSTAR** (*Global Positioning System – Navigation Signal Timing and Ranging*) – to system nawigacji satelitarnej obejmujący swoim zasięgiem całą kulę ziemską. Do wyznaczania pozycji wykorzystuje on układ 31 satelitów orbitujących wokół Ziemi na średniej orbicie okołoziemskiej. Krążące satelity wysyłają do stacji naziemnych informację o ich pozycjach w danym

<sup>12</sup> P. Czuj, *Analiza istniejących systemów nawigacji lotniczej. Obsługa metrologiczna testera TACAN AN/ARM-188*, „Biuletyn WAT” 2012, vol. LXI, nr 2, s. 352.

<sup>13</sup> Ibidem, s. 349.

czasie. Na tej podstawie możliwe jest określenie bardzo dokładnej długości i szerokości geograficznej oraz wysokości statku powietrznego. W symulatorze dane pochodzące z systemu nawigacji satelitarnej GPS zasadniczo zobrazowane są na panelu MFCD.

**ADF** (*Automatic Direction Finder*) – to lotniczy automatyczny radiolotnamiernik pokładowy pracujący w zakresie częstotliwości 220–1700 kHz. Umożliwia on namiar na radiolatarnię lub radiostację foniczną średniofalową po wybraniu przez pilota odpowiedniej częstotliwości. W urządzeniu SL MiG-29 dane ustawiane są na panelu typu ADF, a dane wyjściowe obrazowane są na wyświetlaczu segmentowym typu PNP.

**DME** (*Distance Measuring Equipment*) – to odległościomierz radiowy stanowiący standardowy system impulsowy do pomiaru odległości statku powietrznego. Pracuje on w paśmie częstotliwości w granicach 1025–1150 MHz. Wysyłane sygnały, które następnie odbierane są przez radiolatarnię naziemną systemu DME i retransmitowane po stałym opóźnieniu wynoszącym 50  $\mu$ s, wracają do statku powietrznego. Urządzenie pokładowe systemu automatycznie określa czas, który upłynął między nadaniem a odbiorem i na tej podstawie określa odległość w milach morskich (NM) lub kilometrach między statkiem powietrznym i radiolatarnią, obrazując ją na wskaźniku. W przypadku umieszczenia radiolatarni DME razem z radiolatarnią VOR powstaje system nawigacyjny krótkiego zasięgu typu VOR/DME, umożliwiający jednoczesny pomiar odległości i kierunku do radiolatarni – błąd pomiaru odległości w zasadzie nie przekracza 0,7 km przy odległościach od radiolatarni w zakresie 0–556 km<sup>14</sup>. W symulatorze częstotliwość DME nie jest zestrzajana niezależnie, ale powiązana jest z urządzeniami TACAN, VOR, ILS. Obliczona odległość wyświetla się na przyrządach PNP i na MFCD.

**ILS** (*Instrument Landing System*) – to system lądowania według wskazań przyrządów. Obecnie jest on najpowszechniej używanym (szczególnie w lotnictwie komunikacyjnym) systemem umożliwiającym lądowanie w najtrudniejszych warunkach atmosferycznych. Działanie systemu polega na tym, że wyposażenie pokładowe statku powietrznego odbiera sygnały z urządzeń naziemnych, umożliwiając pilotowi prowadzenie statku powietrznego zgodnie z określonym kursem po ścieżce schodzenia<sup>15</sup>. W zależności od dokładności

<sup>14</sup> *Słownik języka polskiego PWN*, online – <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/DME;3893121.html> [dostęp: 22.08.2017].

<sup>15</sup> M. Pasek, *Porty lotnicze. Systemy świetlnych pomocy nawigacyjnych*, Wyd. Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2006.

systemu wyróżnia się jego trzy kategorie: I, II oraz najdokładniejszą III (podkategorie – a, b, c). Na system ILS składają się z trzy naziemne zespoły urządzeń<sup>16</sup>:

- radiolatarnia kierunku VHF, promieniująca wiązką wyznaczającą kurs podejścia, a także radiolatarnia ścieżki schodzenia UHF, która wyznacza płaszczyznę schodzenia;

- markery: *outer marker* (OM), *middle marker* (MM), *inner marker* (IM), służące do określania odległości i wysokości statku powietrznego w stosunku do progu drogi startowej, które tworzą znaczniki odległości. Często instaluje się także radiodalmierz DME podający odległość od wybranego punktu drogi startowej. Uzupełnia on pracę markerów bądź może być zastosowany w ich miejsce;

- sygnały świetlne będące zalecanym uzupełnieniem każdego z systemów precyzyjnego lądowania.

W urządzeniu SL MiG-29 dane wynikowe wyświetlane są na przyrządzie PNP. Zestrajanie częstotliwości ILS odbywa się z panelu sterowania EP6 lub z UFCP.

Moduł **Gyro** symuluje systemy żyroskopowe samolotu MiG-29. Dane wynikowe wyświetlają się na przyrządach wyświetlaczach oraz panelu MFCD.

## Urządzenia symulatora związane z uzbrojeniem samolotu i ich przeznaczenie

Uzbrojenie samolotu MiG-29 stanowi lufowe działko lotnicze, uzbrojenie raketowe oraz bombardierskie – bomby o różnym wagomiarze. Do uzbrojenia lufowego zalicza się automatyczne działko pokładowe GSz-30-1 (oznaczane także jako 9A-4071K) o kalibrze 30 mm z zapasem amunicji wynoszącym 150 nabo i szybkostrzelnością 1500 strzałów na minutę<sup>17</sup>.

Do uzbrojenia raketowego zalicza się lotnicze kierowane pociski rakietowe klasy powietrze-powietrze, niekierowane pociski klasy powietrze-ziemia. Do pierwszego z nich należy R-27 (średniego zasięgu) naprowadzany na dwa sposoby: bezwładnościowym systemem nawigacyjnym korygowanym radiowo z samolotu-nosiela i półaktywnym systemem sterującym za pomocą sygnału

<sup>16</sup> M. Siergiejczyk, K. Krzykowska, R. Kruszyna, *Analiza porównawcza systemów precyzyjnego lądowania*, „Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej” 2014, z. 102 (*Transport*), s. 98–99.

<sup>17</sup> B. Grenda, R. Bielawski, *Rozwój lotniczych środków rażenia*, ASzWoj, Warszawa 2017, s. 58.

radiolokacyjnego. Kolejnymi środkami raketowymi są R-73 i R-60 przeznaczone do niszczenia celów powietrznych w bezpośredniej walce manewrowej ze względu na krótki zasięg. Ich naprowadzanie odbywało się przy użyciu głowicy reagującej na źródło ciepła emitowane przez cel. W skład niekierowanych pocisków raketowych klasy powietrze-ziemia wchodzi S-8 przenoszone w zasobnikach B-8M1 po 20 sztuk oraz pociski S-24 podwieszane pojedynczo<sup>18</sup>. Uzbrojenie bombardierskie samolotu MiG-29 stanowią bomby lotnicze o wagomiarach 100, 250 i 500 kg.

Za uzbrojenie samolotu w symulatorze lotu SL MiG-29 odpowiada moduł broni. Pełni on cztery podstawowe funkcje. Po pierwsze – jest on odpowiedzialny za logikę urządzeń celowniczych i urządzeń kierujących ogniem, po drugie – generuje trajektorie wystrzelonej amunicji (posiada model matematyczny broni). Trzecią jego funkcją jest możliwość wykrywania obiektów w środowisku wirtualnym. Ostatnią, czwartą funkcją modułu jest symulacja środków obronnych symulowanego samolotu.

We współpracy ze stanowiskiem pracy instruktora (IOS) obsługiwane jest uzbrojenie symulowanego obiektu w różne typy i różne ilości amunicji. Instruktor ma na swoim stanowisku pracy możliwość wyboru predefiniowanej kombinacji uzbrojenia lub ręcznego uzbrojenia każdego podwieszenia niezależnie od pozostałych. Z modułu odczytującego elementy sterujące kabiny symulatora do modułu broni przesyłane są informacje na temat poszczególnych elementów sterujących kabiny. Następnie w oparciu o te informacje moduł broni obsługuje działanie poszczególnych urządzeń celowniczych. Moduł posiada także informacje o amunicji – jaka amunicja znajduje się na podwieszeniach, i w oparciu o to określa także parametry i warunki ostrzału, jak również sterowanie i symulację systemu kierowania ogniem.

Ważną rolę modułu broni jest symulacja strzału, lotu i trafienia amunicji wystrzelonej przez symulowany obiekt. W zależności od spełnienia wszystkich warunków potrzebnych do rozpoczęcia ostrzału moduł ten generuje sygnał strzału z systemu kierowania ogniem (za pośrednictwem komunikacji z kabiną). W momencie strzału generuje on informacje o nim przekazywane do modułu dźwiękowego (efekt dźwiękowy wystrzału) oraz do modułu generatora obrazu (efekt wizualny). Od tego momentu oblicza trajektorię lotu wystrzelonej amunicji. Na obliczenie trajektorii w przestrzeni 3D wpływ mają

18 A. Radomska, *Zmiany w generacjach konstrukcji lotniczych samolotów bojowych*, ASzWoj, Warszawa 2017, s. 53–54.

następujące wielkości: położenie i orientacja obiektu strzelającego, prędkość i przyspieszenie obiektu strzelającego, obrót broni w stosunku do osi obiektu strzelającego, a także warunki atmosferyczne.

Przez cały czas lotu amunicji moduł broni oblicza jej aktualne położenie w przestrzeni 3D i położenie to przesyła do modułu generatora obrazu (wyświetlanie lecącej amunicji w scenerii), modułu map (wyświetlenie lecącej amunicji na mapie) i modułu dźwiękowego (efekty dźwiękowe związane z lotem amunicji). Obliczenie położenia lecącej amunicji zakończone jest w momencie, gdy kończy ona swoje istnienie (trafienie w inny obiekt, upadek lecącej amunicji na teren czy jej samozniszczenie).

W trakcie całego lotu pocisku kontrolowane są jego zderzenia ze wszystkimi pozostałymi obiektami znajdującymi się w symulacji, włącznie z terenem. Zadanie to jest ważne również z tego powodu, że obliczenie nie przebiega ciągle, ale wykonywane jest krokowo. Do stwierdzenia uderzenia używana jest metoda najmniejszej odległości – obliczanie w każdym kroku najmniejszej odległości pocisku od przeszkody, jaka może mieć miejsce w danym kroku. Na podstawie obliczonej w ten sposób odległości stwierdza się trafienie danego pocisku w atakowany obiekt.

W przypadku trafienia lub samozniszczenia lecącej amunicji obliczanie trajektorii zostaje zakończone. Generowane są informacje na temat uderzenia, wybuchu amunicji oraz o wybuchu trafionego obiektu dla modułu dźwiękowego (efekt dźwiękowy uderzenia, trafienia, samozniszczenia), modułu map (oznaczenie uderzenia, trafienia na mapie) i generatora obrazu (efekt wizualny uderzenia/trafienia, samozniszczenia). Moduł broni w trakcie ćwiczeń bojowych współpracuje ściśle z symulatorem taktycznym CGF (*Computer Generated Forces*). Jego głównym zadaniem jest zarządzanie wojskowymi, półwojskowymi oraz pozostałymi obiektami dynamicznymi, niezbędnymi do prowadzenia ćwiczenia bojowego załogi symulowanego samolotu. Dzięki takiej współpracy nie tylko otrzymuje on informacje o położeniu obiektów wirtualnych, ale również informacje o ich środkach celowniczych. W oparciu o te informacje moduł broni jest w stanie oszacować, który obiekt w ćwiczeniu jest symulowany oraz czy naświetlanie realizowane jest w trybie przerywanym (radiolokator śledzi symulowany samolot), czy też ciągłym (radiolokator wycelowany jest tylko w jeden obiekt i można spodziewać się ataku). Informacje te wyświetlają się na przyrządzie tak samo jak w prawdziwym samolocie i umożliwiają pilotowi planowanie z wyprzedzeniem strategii obronnej.

W przypadku gdy manewr uniku jest nieskuteczny, pilot ma możliwość wypuszczenia fałszywych celów, które powinny zmylić rakietę wystrzeloną

w kierunku jego samolotu przez agresora. Zatem moduł broni odpowiedzialny jest również za wypuszczenie fałszywych celów i naprowadzenie na nie rakiety. Wysyła jednocześnie polecenia wykonania efektów dźwiękowych i wizualnych.

Częścią oryginalnego samolotu MiG-29 są także urządzenia HUD (*Head Up Display*) oraz HDD (*Head Down Display*). W miejsce HDD w zmodernizowanym samolocie umieszczono wyświetlacz cyfrowy MFCDD. Funkcje realizowane poprzez wyświetlacz typu HUD zostały jednak zachowane i na MFCDD istnieje możliwość wyświetlenia również tego trybu. Na komputerze PC AVIONICS pracują wszystkie aplikacje, które związane są z wyświetlaczem cyfrowym MFCDD. Jedną z nich jest również aplikacja HUD, która renderuje się na generatorze obrazu PowerVision. HUD stworzony został jako wtyczka do środowiska generatora obrazu przy pomocy OpenGL. Aplikacja HUD używa tej samej wtyczki z takim samym zarządzaniem komunikacją, ale jako niezależną aplikację, co zapewnia takie samo wyświetlanie danych zarówno na HUD, jak i na HDD. Wtyczka zawiera również schematy, które nie wizualizują się na HUD, ale powinny być widoczne na HDD (np. aktualnie przeglądany wiersz radiolokatora). W przypadku gdy na wyświetlaczu cyfrowym MFCDD nie zostanie wybrany tryb, w ramach którego powinien być widoczny obraz z HDD, aplikacja HUD staje się oknem zlokalizowanym na samej górze systemu MS Windows i wyświetla żądane informacje.

W celu skonfigurowania uzbrojenia oraz wyświetlania informacji o aktualnym stanie amunicji strona zawiera pewną ilość elementów sterowania, które obrazują w sposób graficzny bieżący stan amunicji i jej podwieszenie na poszczególnych punktach podwieszenia samolotu. Informacja o amunicji obejmuje ikonę amunicji, informację o jej typie oraz o bieżącej liczbie środka bojowego. Oprócz informacji o aktualnym stanie amunicji użytkownik ma do dyspozycji również przycisk uzupełnienia jej oraz narzędzia do zmiany konfiguracji. Przy zmianie konfiguracji amunicja uzupełni się automatycznie.

Program stanowiska pracy instruktora zawiera informacje o predefiniowanych konfiguracjach amunicji, które przygotowane są zgodnie z dokumentacją symulowanego samolotu. Każda konfiguracja zawiera informację o typie podwieszanej amunicji oraz umiejscowieniu jej w punktach podwieszeń samolotu. Uzbrojenie lotnicze zaimplementowane w oprogramowaniu symulatora przedstawia tabela 9 (dopełnieniem wykazu w tabeli jest 30 mm działko lotnicze GSz-30-1).



*Tabela 9. Wykaz uzbrojenia lotniczego (pociski rakietowe oraz uzbrojenie bombardierskie) występującego w oprogramowaniu symulatora lotu*

Środek bojowy	Opis
R-27	kierowany pocisk rakietowy powietrze-powietrze
R-73	kierowany pocisk rakietowy powietrze-powietrze
R-60	kierowany pocisk rakietowy powietrze-powietrze
S-8	niekierowany pocisk rakietowy powietrze-ziemia
S-24	niekierowany pocisk rakietowy powietrze-ziemia
OFAB-100	bomba lotnicza
OFAB-250	bomba lotnicza
OFAB-500	bomba lotnicza

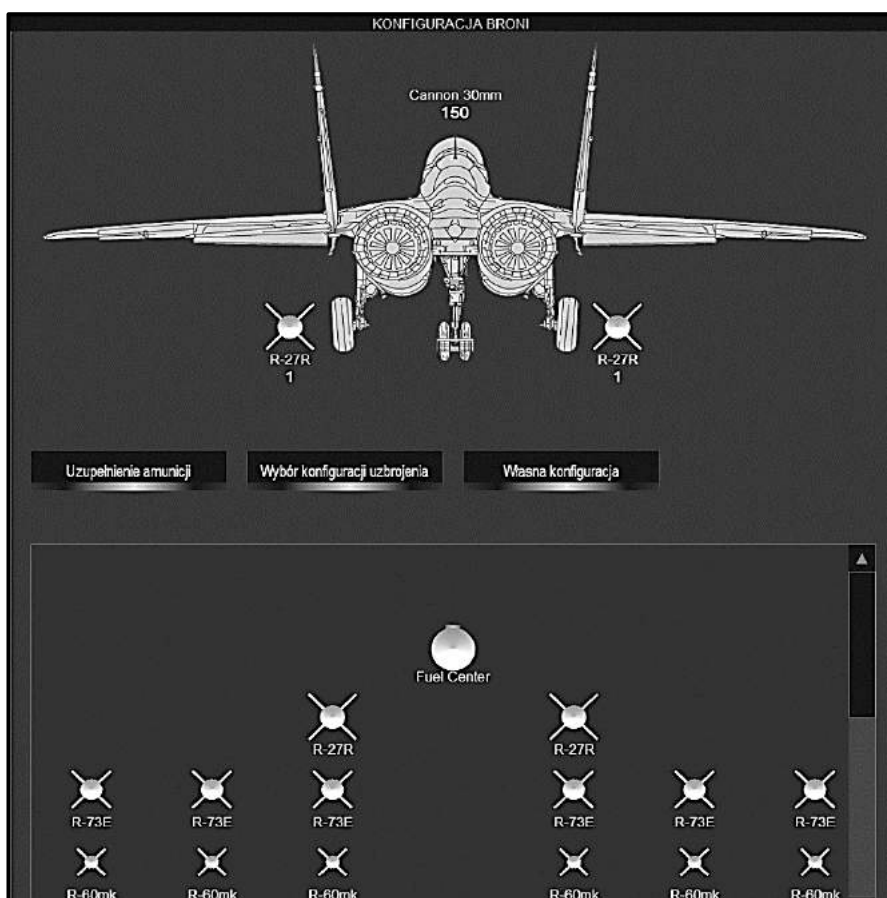
Opracowanie własne.

W razie potrzeby użytkownik może w prosty sposób wybrać żadaną konfigurację z listy konfiguracji (rys. 24). Listę konfiguracji można przewijać za pomocą przycisków lub myszy, klikając na prawy lub lewy skraj elementu sterowania z wyświetlaną konfiguracją. Do dyspozycji jest również rozwinięcie listy konfiguracji (konfiguracja widoczna będzie na środku okna konfiguracji).

Strona konfiguracji samolotu umożliwia również ustawienie własnej konfiguracji uzbrojenia. W takim przypadku użytkownik ustawia amunicję dla każdego punktu podwieszenia osobno. Ustawienie konfiguracji własnej umożliwia ustawianie niestandardowych konfiguracji uzbrojenia, jest jednak bardziej pracochłonne niż wybranie kompletnej konfiguracji z listy konfiguracji predefiniowanych. Możliwość podwieszenia poszczególnych typów amunicji na punkty podwieszenia odpowiada możliwościom symulowanego samolotu.

W zakresie uzbrojenia symulator lotu samolotu MiG-29 zawiera podsystem – generator wirtualnego pola walki. Stanowi on zespół kilku modułów programowych, które zarządzane są w czasie rzeczywistym przez główny moduł sterujący – MANAGER. Podsystem ten stanowi część centralną symulatora SL MiG-29. Jego głównym zadaniem jest stworzenie środowiska wirtualnego zbliżonego do rzeczywistego pola walki. Wirtualne pole walki tworzone jest z całego szeregu komponentów. Pierwszym z nich jest baza danych terenu określająca przestrzeń geograficzną, w której symulacja będzie miała miejsce. Kolejnym są symulowane obiekty utworzone w symulacji, np. czołgi, samoloty, amunicja. Każdy z tych obiektów jest w sposób jednoznaczny oznaczany numerem identyfikacyjnym. Symulowany obiekt może składać się z kilku części. Każdą część symulować może inny moduł (np. czołg może

składać się z silnika, podwozia, systemu uzbrojenia) – każdą z wymienionych części symuluje inny moduł. Wirtualne pole walki tworzą również obiekty z innych symulacji. Wszystkie tego typu obiekty generują efekty dźwiękowe i wizualne. Mogą także wzajemnie oddziaływać zarówno z bazą danych terenu (ruch po terenie, pomiar wysokości radiowej, strzał, tor lotu pocisku, trafienie w cel, upadek amunicji na teren), jak i między sobą (oddziaływanie na inny obiekt, trafienie obiektu). Na środowisko wirtualne oddziaływać można również innymi parametrami, które zmieniają jego właściwości, takimi jak: pora dnia czy roku, widoczność, temperatura, ciśnienie czy kierunek i siła wiatru.



Źródło: opracowanie własne na podstawie: *Instrukcja użytkownika (IU) symulatora...*, op. cit., s. 187.

Rys. 24. Konfiguracja dostępnego uzbrojenia lotniczego

Generator wirtualnego pola walki sprzężony jest także z modułem komunikacyjnym realizującym wymianę informacji między poszczególnymi pozostałymi modułami. W ten sposób stworzony jest system modułów programowych, który ma charakter systemu czasu rzeczywistego i stanowi rozbudowę systemu operacyjnego WINDOWS lub UNIX.

Poszczególne moduły programowe są niezależne – mogą pracować na jednej lub kilku stacjach roboczych. Oznacza to, że w zależności od stopnia komplikacji liczba komputerów obsługujących generator wirtualnego pola walki może się zmieniać, tak by zagwarantowana była optymalna wydajność. Wyjątek tworzą moduły programowe do generowania obrazu, które muszą pracować na komputerach wyposażonych w specjalne adaptory graficzne<sup>19</sup>.

## Zakończenie

W toku realizacji procesu badawczego postawiona na początku hipoteza robocza, wskazująca kierunek prowadzonych badań, została skonfirmowana. Wykazano zatem, że szkolenie na symulatorze SL MiG-29 ma decydujący wpływ na wyszkolenie personelu lotniczego realizującego misję „Baltic Air Policing”.

Podsumowując, w kontekście postawionej hipotezy roboczej należy podkreślić, że opisany w pracy symulator lotniczy SL MiG-29 jest urządzeniem zaawansowanym technologicznie, spełniającym wymogi symulatorów typu FFS i jest on zgodny z normami wojskowymi. Posiada możliwość wykorzystania wszystkich najnowocześniejszych systemów nawigacyjnych, takich jak TACAN, VOR/DME czy GPS. Ważną kwestią w kontekście wykonywania zadań bojowych jest moduł broni. Jego rolą jest symulacja strzału, lotu i trafienia amunicji wystrzelonej przez symulowany obiekt. Czynności te realizowane są z bardzo wysokim odzwierciedleniem rzeczywistych warunków lotu samolotem – są uzupełniane poprzez generator wirtualnego pola walki, który w czasie rzeczywistym jest w stanie zobrazować środowisko wirtualne zbliżone do rzeczywistego pola walki wraz z zasymulowaniem obiektów, takich jak sojusznicy i obce statki innych państw, obiekty nawodne i podwodne, środki OPL oraz inne obiekty.

<sup>19</sup> *Opis oprogramowania (OpOPR) symulatora lotu samolotu MiG-29 SL MIG-29 (OpOPR.006.00.00.09)*, s.n., Warszawa 2015, s. 9.

Można zatem skonstatować, że symulator lotniczy SL MiG-29 zdecydowanie przyczynia się do podniesienia poziomu wyszkolenia pilotów i jest szczególnie pomocny przy przygotowaniu personelu lotniczego do misji typu „Baltic Air Policing”.

### Bibliografia

- Czuj P., *Analiza istniejących systemów nawigacji lotniczej. Obsługa metrologiczna testera TACAN AN/ARM-188*, „Biuletyn WAT” 2012, vol. LXI, nr 2.
- Grenda B., Bielawski R., *Rozwój lotniczych środków rażenia*, ASzWoj, Warszawa 2017.  
<http://www.kenbit.pl/symulator-mig-29/>.
- JAR-FSTD A: Aeroplane flight simulation training devices*, EASA 2008.
- NATO Standard AMSP-01 NATO modelling and simulation standards profile*, Edition C, Version 1, NATO Standardization Office (NSO), 2013.
- Norma obronna NO-06-A103:2005, Uzbrojenie i sprzęt wojskowy – Ogólne wymagania techniczne, metody kontroli i badań – Wymagania środowiskowe*, MON, Warszawa 2005.
- Opis oprogramowania (OpOPR) symulatora lotu samolotu MiG-29 SL MIG-29 (OpOPR.006.00.00.09)*, s.n., Warszawa 2015.
- Pasek M., *Porty lotnicze. Systemy świetlnych pomocy nawigacyjnych*, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2006.
- Radomska A., *Zmiany w generacjach konstrukcji lotniczych samolotów bojowych*, ASzWoj, Warszawa 2017.
- Siergiejczyk M., Krzykowska K., Kruszyna R., *Analiza porównawcza systemów precyzyjnego lądowania*, „Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej” 2014, z. 102 (*Transport*).
- Słownik języka polskiego PWN*, online – <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/DME;3893121.html>.

# Zastosowanie przetworników piezoelektrycznych w konstrukcjach lotniczych

## Streszczenie

Efekt piezoelektryczny z uwagi na możliwości dwustronnej zamiany energii mechanicznej i elektrycznej ma wiele zastosowań w różnych dziedzinach techniki. W pracy przedstawiono różne rodzaje przetworników, w szczególności skupiając się na użyciu ich w lotnictwie. Obecnie użycie w statkach powietrznych tzw. materiałów inteligentnych stale rośnie i spodziewany jest dalszy rozwój tej dziedziny nauki. Układy piezoelektryczne z uwagi na swoje liczne zalety są zaliczane do tej grupy materiałów. W artykule przedstawiono czujniki ogólnego zastosowania, takie jak: akcelerometry, przetworniki siły, ciśnienia czy czujniki ultradźwiękowe oraz mierzące objętość. Dalej opisano systemy dedykowane dla lotnictwa, takie jak zasilacze układów pokładowych, czujniki fal powierzchniowych oraz specjalistyczne siłowniki. Wszystkie zaprezentowane urządzenia mają decydujący wpływ na zwiększenie poziomu bezpieczeństwa konstrukcji lotniczej.

**Słowa kluczowe:** efekt piezoelektryczny, materiały inteligentne, lotnictwo.

## Wstęp

Zjawisko piezoelektryczne zostało odkryte dość dawno, bo w roku 1880, przez dwóch fizyków – Jakuba i Piotra Curie. Przeprowadzili oni doświadczenie, w którym zaobserwowali, że asymetryczne kryształy kwarcu pocięte w plastry na skutek oddziaływania siły zewnętrznej powodują polaryzację elektryczną. Swoje odkrycie zgłosili 2 sierpnia 1880 roku do Francuskiej Akademii Nauk, a nazwa zjawiska powstała z połączenia greckiego słowa *piezo* – oznaczającego *ciśnienie*, ze słowem *elektryczność*, co jednoznacznie określa, jakie zjawiska są ze sobą sprzęgnięte. Badaczom nie chodziło o ustalenie wyników w sensie ilościowym, lecz byli zainteresowani samą odpowiedzią w sensie jakościowym.

Dokładne przygotowanie eksperymentu wskazuje, że odkrycie nie powstało w wyniku przypadku.

Celem prezentowanego artykułu jest przedstawienie współczesnych urządzeń – przetworników piezoelektrycznych, używanych w konstrukcjach lotniczych, których właściwe działanie wpływa znacząco na bezpieczeństwo statków powietrznych.

## Urządzenia wykorzystujące zjawisko piezoelektryczne w lotnictwie

**Przetworniki siły.** Zasadniczo przetworniki piezoelektryczne wykazują się bardzo małym odkształceniem na skutek przyłożenia siły, a wynika to z ich bardzo dużej sztywności. Skutkiem tego jest bardzo duża częstotliwość rezonansowa, co jest z kolei korzystne z punktu pomiaru sił dynamicznych. Co istotne, przy pomiarach dynamicznych cały łańcuch pomiarowy ma wpływ na uzyskiwane wyniki, np. same części montażowe mają swoją masę, która sumuje się z masą czujnika i wpływa na wartość częstotliwości odcięcia sensora. Ponadto wzmacniacze ładunków piezoelektrycznych mają przepustowość zależną od ładunku, czyli w praktyce od mierzonej siły. Duże siły wywołują większe ładunki, co z kolei wpływa na przepustowość. Najczęściej alternatywę stanowią czujniki oparte na tradycyjnych tensometrachoporowych. W przypadku tych przeznaczonych dla małych sił są to głównie miękkie elementy sprężyste, a ich częstotliwość rezonansowa jest z reguły niższa niż dla przetworników piezoelektrycznych. Nowoczesne tensometryczne przetworniki siły są bardzo dokładne, np. rezystancyjne mają błąd rzędu  $200 \cdot 10^{-6}$ , piezoelektryczne są nieznacznie mniej dokładne – przyjmuje się, że jest to 0,5% ich pełnej skali. Są także ograniczone przez „płynięcie” pomiarów w czasie. W grupie przetworników siły te oparte na materiałach piezoelektrycznych powinny być pierwszym wyborem, jeśli chodzi o pomiar małych sił dynamicznych<sup>1</sup>.

**Czujniki ciśnienia.** Piezoelektryczne czujniki ciśnienia praktycznie nie różnią się w budowie od opisanych powyżej czujników siły. Również najlepiej stosować je do rejestracji przebiegów szybkozmiennych. Są używane do pomiarów np. turbulencji, wybuchów, uderzeń. Również nie są polecane do

<sup>1</sup> <http://www.hbm.com/en/menu/tips-tricks/force-measurement/spoilt-for-choice-piezoelectric-or-strain-gauge-based-force-transducers/> [dostęp: 14.07.2017].

pomiarów statycznych z uwagi na spadek odczytywanego napięcia w funkcji czasu.

**Akcelerometry.** Następną grupą sensorów mogących działać w oparciu o materiały piezoelektryczne są akcelerometry. Na skutek efektu piezoelektrycznego prostego materiału, którym z reguły jest kryształ kwarcu, generuje ładunek elektryczny proporcjonalny do wartości przyspieszenia. Siła przyłożona do struktury krystalicznej kryształu kwarcu zmienia ustawienie jonów dodatnich i ujemnych, co powoduje nagromadzenie tych jonów na przeciwległych powierzchniach. W akcelerometrze za nacisk na kryształ piezoelektryczny odpowiada masa sejsmiczna. W dużym przybliżeniu zjawisko opisuje druga zasada dynamiki Newtona ( $F=m \cdot a$ ), wobec tego całkowita ilość zgromadzonego ładunku jest proporcjonalna do przyłożonej siły, która to jest z kolei proporcjonalna do przyspieszenia.

Akcelerometry dzielą się ze względu na rodzaj obciążenia, jakemu jest poddawany materiał piezoelektryczny. Najpopularniejszymi są te działające w trybie ścinania i zginania – są one spotykane częściej niż te działające w trybie ściskania. W trybie ścinania materiał piezoelektryczny znajduje się pomiędzy rdzeniem centralnym a masą sejsmiczną. Zewnętrzny pierścień uszczelniający stosuje się do nadania mu naciągu wstępnego, tak aby uzyskać jego sztywną i liniową strukturę. Dzięki odizolowaniu części pomiarowej od bazy i obudowy akcelerometry działające w tym trybie są niewrażliwe na efekty termiczne i zginanie podstawy, a kompaktowa obudowa i małe wymiary minimalizują oddziaływanie czujnika na badany obiekt.

Akcelerometry działające w trybie zginania mają jako element czynny piezoelektryki w formie belki. Na skutek działania przyspieszenia ulega ona wygięciu. Sama belka jest zamocowana do rdzenia w taki sposób, aby ugięcie było liniowo zależne od przyspieszenia. Taka konstrukcja pozwala na budowanie płaskich, lekkich, odpornych na czynniki temperaturowe i tanich sensorów. Istotną zaletą jest obojętność na przyspieszenia działające w innym kierunku. Tego typu akcelerometry stosuje się w szczególności w badaniach, gdzie częstotliwości i wartości przyspieszeń nie są duże, a czasem nawet w pomiarach statycznych.

**Detekcja ultradźwiękowa.** Ultradźwiękowe przetworniki piezoelektryczne mają szerokie zastosowanie w przemyśle oraz w medycynie. Jednym z głównych zastosowań jest pomiar grubości materiałów w wyniku ciągłej propagacji fal ultradźwiękowych. Na podstawie czasu, w jakim rozchodzi się fala mierzona, jest grubość badanej powłoki. Przykładem takich urządzeń są przenośne grubościomierze, używane przez mechaników samochodowych,

służące do określenia, czy dany pojazd przeszedł naprawy blacharskie bądź lakiernicze. Impulsowe systemy wytwarzania fal ultradźwiękowych, bazujące na elementach piezoelektrycznych, znajdują zastosowanie przemysłowe w defektoskopii metali. W tym systemie generator oraz odbiornik są wzbudzane naprzemiennie, co przy użyciu odpowiedniego osprzętu pozwala na wizualną identyfikację defektu materiałowego, takiego jak np. pęknięcie, niemetaliczne wtrącenie czy ubytek<sup>2</sup>.

**Czujniki poziomu i objętości.** Za pomocą piezoelektryków można też np. ocenić ilość materiału pozostałą w zbiorniku. Przetwornik z przyjętą częstotliwością wysyła falę dźwiękową w kierunku powierzchni materiału w zbiorniku, rejestrowane jest też odbicie tej fali. Znając prędkość fali dźwiękowej w powietrzu i czas jaki jest potrzebny na zarejestrowanie odbitej fali od momentu jej wygenerowania, można obliczyć odległość powierzchni materiału od czujnika. Mając za dane geometrię zbiornika można oszacować pozostałą ilość materiału. Istotną zaletą takiego pomiaru jest to, że czujnik może znajdować się w bezpiecznej odległości od badanego materiału, nie będąc narażonym na niekorzystne warunki jak środowiskowe zapylenie, wilgoć itp.<sup>3</sup>

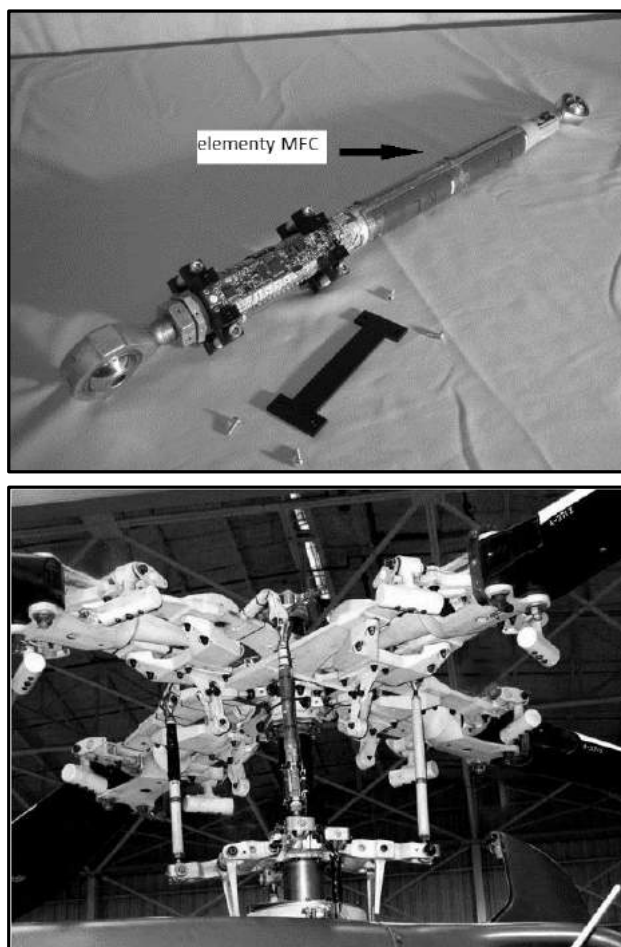
## Zastosowanie piezoelektryków w lotnictwie

**Zasilanie układów pokładowych.** Układy oparte o materiały piezoelektryczne mogą służyć jako element zasilający podzespoły samolotu, przy czym muszą to być systemy o niskim zapotrzebowaniu na energię elektryczną. Na skutek drgań oddziałujących na strukturę samolotu następuje polaryzacja elementów piezoelektrycznych w przetworniku. Takie ładunki elektryczne mogą być magazynowane w akumulatorach bądź kondensatorach i służyć jako źródło zasilania, np. mikrokontrolerów, czujników czy nadajników. Łatwo wyobrazić sobie zastosowanie takich systemów do budowy np. pozbawionych zasilania zewnętrznego systemów monitorowania struktury (*Structure Health Monitoring* – SHM). Przykładem takiego rozwiązania jest zaprezentowany na rysunku 25 system firmy Bell Helicopter Textron.

2 Patent US 3376438 A.

3 <https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/piezo-sensor-applications.html> [dostęp: 14.07.2017].



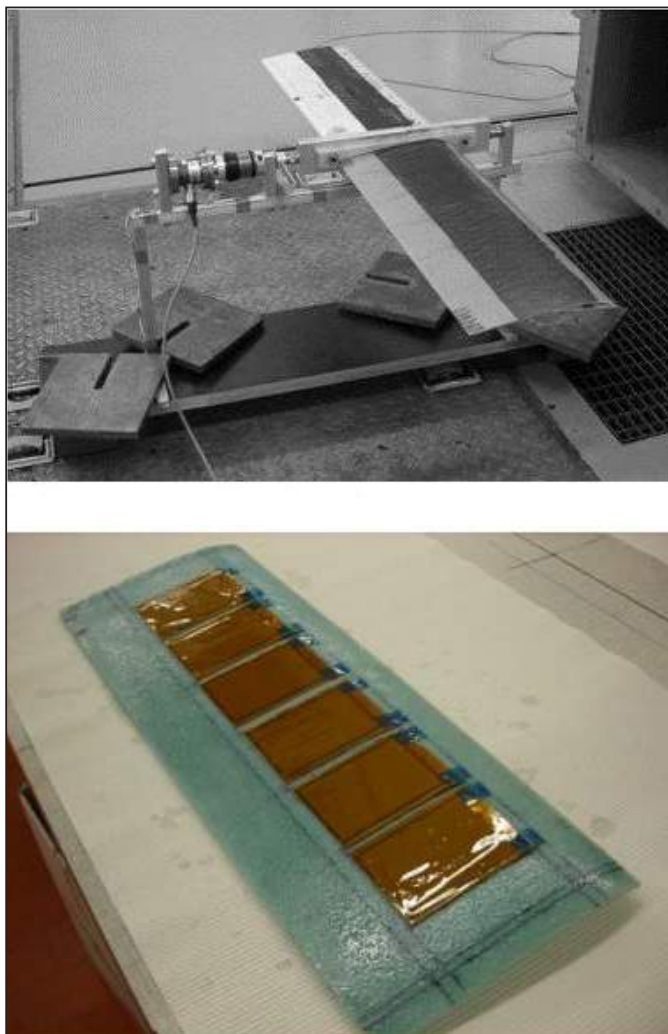


Źródło: S.W. Arms, *Tracking Pitch Link Dynamic Loads with Energy Harvesting Wireless Sensors*, Bell Helicopter, Virginia Beach 2007, s. 6–8.

*Rys. 25. Piezoelementy zamontowane na popychaczu układu napędowego śmigłowca*

Dotychczas przeprowadzono testy laboratoryjne, które wykazały, że istnieje możliwość fizycznego wykorzystania systemu w warunkach rzeczywistych na popychaczu sterującym kątem natarcia łopatek w śmigłowcu Bell M412. Przyjęte wartości odkształceń to  $\pm 35\text{e-}4\%$ , a częstotliwość pracy wynosi 5 Hz. Celowość użycia została potwierdzona w cyklu badań, w trakcie których wykazano, że zmianę parametrów oraz pomiar obciążeń można przeprowadzić z pokładu helikoptera, jak również z miejsca oddalonego nawet o 30 m. W cyklu założonych obciążeń system wytwarzał  $270\ \mu\text{W}$  energii, a zużywał  $100\ \mu\text{W}$  (próbki wynosiło 32 Hz), więc można przyjąć, że układ spełni swoje zadanie również w warunkach rzeczywistego lotu.

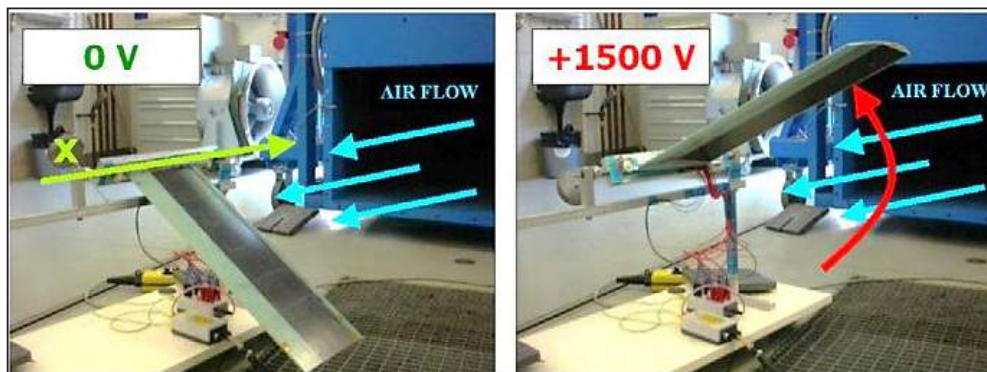
**Elementy wykonawcze (siłowniki).** Zbudowane w oparciu o piezoelektryki układy znajdują zastosowanie jako elementy wykonawcze, w szczególności jako bardzo płaskie siłowniki. Często stosowane są jako elementy wykonawcze aktywnych tłumików drgań. Przykładem może być aktywny tłumik drgań w bezzałogowym statku powietrznym (*Unmanned Aerial Vehicle – UAV*). Jego część wykonawczą opartą na elementach kompozytowych MFC (*Macro Fiber Composite*) zaprezentowano na fotografii 19, gdzie zobrazowano elementy piezoelektryczne w rdzeniu skrzydła.



Źródło: R. Paradies, P. Ciresa, *Active wing design with integrated flight control using piezoelectric macro fiber composites*, „Smart Materials and Structures” 2009, vol. 18, nr 3, s. 1–9.

Fot. 19. Przetworniki MFC w rdzeniu skrzydła bezzałogowego statku powietrznego

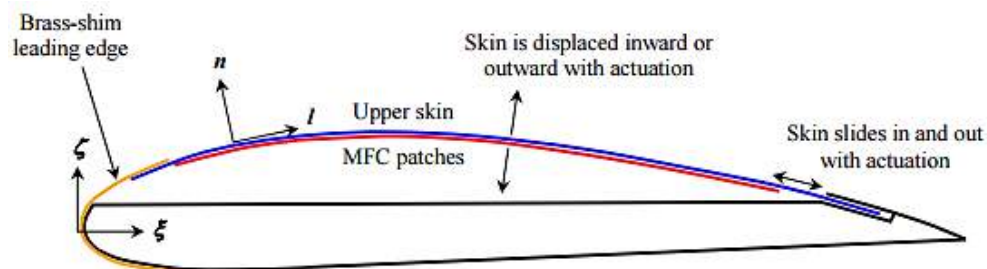
Wskutek zadanego wysokiego napięcia elektrycznego (1500 V) struktura może zmienić swój kształt i spowodować obrót skrzydła wokół swobodnej w eksperymencie osi X. Wyniki eksperymentu widać na zamieszczonym poniżej rysunku 26. Czubek skrzydła uniósł się o 4,3 mm, a uzyskany moment obrotu względem osi X wyniósł 0,17 Nm.



Źródło: ibidem.

*Rys. 26. Skrzydło na stanowisku pomiarowym z wyłączonymi i włączonymi elementami MFC*

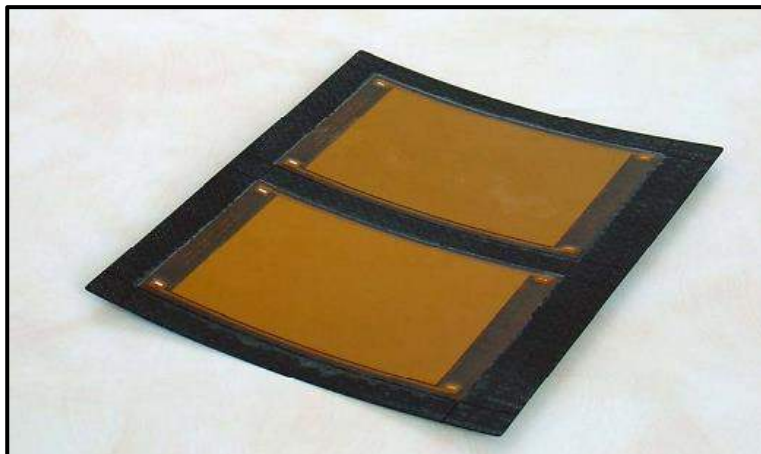
Podobne prace w 2013 roku przeprowadzili badacze z Singapuru. W swoim eksperymencie badali, jak zmieniają się wymiary profilu pod wpływem napięcia od -500 do 1500 V. Elementy piezoelektryczne zostały umieszczone pod górną powłoką poszycia, co schematycznie pokazano na rysunku 27.



Źródło: M. Debiasi, Ch.W. Leong, Y. Boureme, Y.Ch. Yen, *Application of Macro-Fiber-Composite Materials on UAV*, online – <http://www.marcodebiasi.net/MDresearch/MDpublications/2013ATS-Paper-MFCwingShaping.pdf> [dostęp: 16.03.2017].

*Rys. 27. Schemat profilu z elementami aktywnymi*

Użyte piezoelementy wraz z górną powłoką skrzydła, do której są przyklejone (fot. 20). Ciężarówka profilu  $c$  to 150 mm, jego rozpiętość  $s$  wynosi 158 mm, a grubość tkaniny na górnej powłoce 0,25 mm. Co ważne, górna powłoka nie jest trwale połączona z resztą skrzydła.

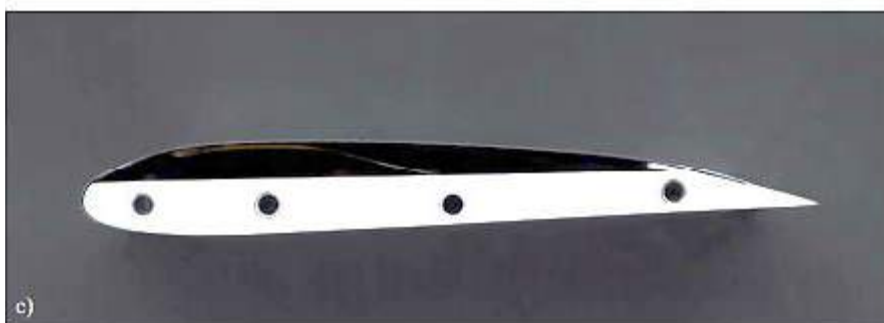
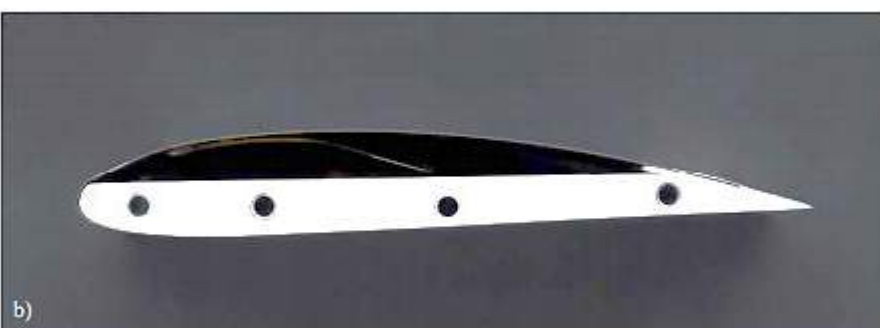
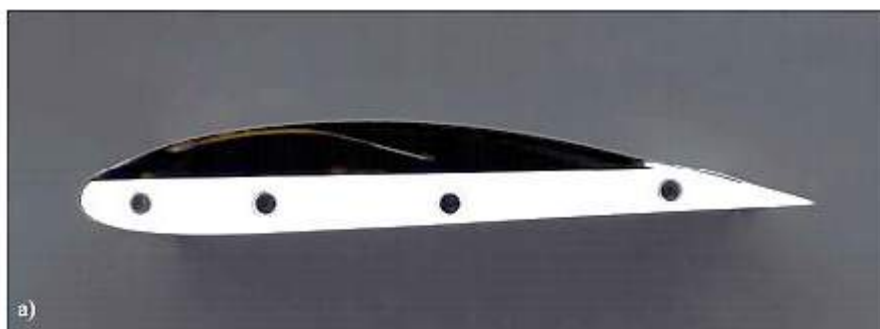


Źródło: ibidem.

*Fot. 20. Wewnętrzna strona górnego pokrycia profilu z elementami piezoelektrycznymi*

Uzyskane przemieszczenia mierzono sensorem laserowym o dokładności 5  $\mu\text{m}$  i rozdzielczości 50  $\mu\text{m}$ . Gdy przyłożone napięcie wynosi 500 V, profil ma kształt zbliżony do NACA 4415. Przy braku wymuszenia napięciowego profil przyjmuje kształt pokazany na rysunku 28 – następuje przemieszczenie górnej części powłoki do przodu o około 1,4 mm. Natomiast jeśli napięcie wynosi 1500 V, to przemieszczenie do tyłu wynosi około 3,1 mm.

Kolejnym ciekawym i zrealizowanym na rzeczywistym obiekcie przykładem jest zastosowanie piezoelektryków jako elementów zapobiegających drganiom poszycia. W 2009 roku badano możliwość redukcji drgań płetw podbrzuszných samolotu F-16 Block 15. Eksperymenty zostały zapoczątkowane w wyniku zaobserwowania uszkodzeń struktury płetw stabilizacyjnych w tym typie samolotów. Podejrzewano, że zniszczenia są spowodowane przez umieszczenie systemu nawigacyjno-celowniczego LANTIRN poza płaszczyznę symetrii samolotu, co prowadziło do zaburzenia w opływie powietrza i powodowało nieprzewidziane w trakcie projektowania konstrukcji drgania. Lokalizacja tych elementów jest przedstawiona na rysunku 29. Jako element mający tłumić te drgania badacze postanowili zastosować system oparty na elementach MFC.



Źródło: ibidem.

*Rys. 28. Odkształcenie górnego poszycia skrzydła w zależności od przyłożonego napięcia: a) -500 V, b) 0 V, c) 1500 V*



Źródło: J.S. Browning, R.G. Cobb, R.A. Canfield, S.K. Miller, *F-16 Ventral Fin Buffet Alleviation Using Piezoelectric Actuators*, 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Palm Springs 2009.

Rys. 29. Położenie systemu LANTIRN oraz płetw stabilizacyjnych w samolocie F-16

Zakres prac był bardzo szeroki – na początek przeprowadzono wstępne analizy MES. Na podstawie publikowanych wcześniej wartości pięciu pierwszych, najistotniejszych częstości drgań własnych płetw stabilizacyjnych ustalono lokalizacje, w których dochodzi do koncentracji naprężeń oraz określono wartości odkształceń i przemieszczeń. Mając te dane, zbudowano przekalkulowany model płetwy i przystąpiono do badań laboratoryjnych. W trakcie tych prac badano, jak względem konfiguracji bazowej zmieniają się amplitudy drgań płetwy, jeśli zostanie dodany układ sterowania z pętlą sprzężenia zwrotnego. Udało się uzyskać spadek amplitudy dla każdej z częstotliwości drgań własnych, a największy, bo aż o około 20 dB, dla częstotliwości drugiej. Mając pozytywne wyniki badań dla modelu laboratoryjnego z układem sterowania, postanowiono zamontować system na rzeczywistym obiekcie. Układ podzielono na dwie części – przednią i tylną (rys. 30).



Źródło: ibidem.

Rys. 30. Rozmieszczenie układu tłumiącego drgania

W trakcie rzeczywistych testów zostały, w dużej mierze, potwierdzone wyniki uzyskane laboratoryjnie. Amplituda drgań spadła, choć w minimalnie mniejszym stopniu, lecz wciąż jest to zmiana zauważalna. Zaprezentowano też badania nad użytecznością różnych algorytmów sterowania do układów aktywnego tłumienia drgań konstrukcji kompozytowej. Badania były przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych, a jako element wykonawczy użyte zostały przetworniki MFC, które pozwoliły na znaczną redukcję drgań, jak również maksymalnych odkształceń, jakim uległa struktura. Przedstawione wyniki udowadniają, że elementy piezoelektryczne z powodzeniem mogą być stosowane jako tzw. materiały inteligentne. Zastosowanie ich może znacznie zwiększyć bezpieczeństwo oraz poprawić parametry lotu, a co za tym idzie – obniżyć zużycie paliwa w samolocie.

**Czujnik fal powierzchniowych.** Podobnie jak w charakterze elementów zasilających dla układów pokładowych, korzystając z fizycznych właściwości efektu piezoelektrycznego prostego, można stosować te układy (oparte na materiałach piezoelektrycznych) jako czujniki. W przykładowej pracy badacze zamocowali na strukturze rozety z elementów MFC<sup>4</sup>. W takim układzie czujników możliwe jest nie tylko zidentyfikowanie samego uszkodzenia, ale także określenie jego położenia. W tym konkretnym przypadku elementy

4 H.M. Matt, *Structural Diagnostics of CFRP Composite Aircraft Components by Ultrasonic Guided Waves and Built-In Piezoelectric Transducers*, University of California, San Diego 2007.

piezoelektryczne służyły do badania fal powierzchniowych (*lamb waves*), które powstają w wyniku uszkodzenia powierzchni struktury.

Przeprowadzono inne, niezależne badania, w których wykorzystano rurki wykonane z mieszaniny cyrkonianu ołowiu i tytanianu ołowiu (*Lead Zirconate Titanate* – PZT) do badania nowej techniki wykrywania delaminacji w warstwowych materiałach kompozytowych. Podstawowym założeniem było twierdzenie, że fala rozchodzi się wolniej w momencie przejścia przez obszar uszkodzenia. W tych badaniach materiały piezoelektryczne stosowano zarówno do wzbudzania drgań, jak i ich rejestracji. Otrzymane wyniki są bardzo obiecujące, pozwalają na określenie miejsca uszkodzenia w wielowarstwowych kompozytach, a metoda jest niewrażliwa na zmiany temperatury próbki. Co ważne, w tej metodzie nie jest wymagana znajomość przebiegów dla próbki nieuszkodzonej, gdyż wyszukiwanie defektu polega na porównywaniu odpowiedzi z siatki elementów piezoelektrycznych<sup>5</sup>.

Bardzo ciekawe badania z wykorzystaniem płaskich przetworników piezoelektrycznych przeprowadzono w celu zweryfikowania ich przydatności jako właminowanych w strukturę kompozytu sensorów do monitorowania koncentracji odkształceń/naprężeń w krytycznych lokalizacjach. Wbudowany czujnik pełni trzy funkcje: pierwszą jest wykrycie wszystkich warunków obciążenia panujących w konstrukcji, drugą przewidywanie wystąpienia uszkodzenia w trakcie eksploatacji pod wpływem obciążeń dynamicznych, a trzecią monitorowanie wcześniej powstałych w strukturze kompozytu uszkodzeń, tak aby uniknąć ich rozrostu do wymiarów krytycznych. Badano przetworniki o kwadratowych przekrojach włókien MFC i o przekrojach okrągłych (*Active Fiber Composites* – AFC). Określono ich podstawowe właściwości, takie jak: funkcje sprzęgnięcia elektromechanicznego, nieliniowość, czułość, rozdzielczość, poziom szumów. Wrażliwość przetworników na zmiany częstotliwości obciążeń, jak i wartości odkształceń przebadano przy stałych, jak i sinusoidalnie zmiennych siłach zewnętrznych. Zaobserwowano wysoką czułość elementów piezo użytych jako czujniki. W porównaniu do tradycyjnych tensometrów można stwierdzić, że charakteryzują się lepszą czułością. Po przebadaniu podstawowych parametrów pracy badacze przystąpili do prób wykrycia delaminacji wewnątrz warstwowych materiałów kompozytowych.

5 C.M. Yeum, H. Sohn, J.B. Ihn, H.J. Lim, *Instantaneous delamination detection in a composite plate using a dual piezoelectric transducer network*, „Composite Structures” 2012, nr 94, s. 3490–3499.



Podobnie jak w poprzednio opisanych pracach, również tutaj zaobserwowano użyteczność czujników do monitorowania kondycji struktury. Ponadto za pomocą badań eksperymentalnych udowodniono liniową zależność pomiędzy wartością zadanego odkształcenia/naprężenia a wartością generowanego na przetworniku napięcia elektrycznego<sup>6</sup>.

## Zakończenie

Materiały inteligentne, w tym te oparte na piezoelektrykach, z pewnością będą rosnącą dziedziną przemysłu lotniczego w kontekście bezpieczeństwa lotniczego. Obecnie stawiane wymagania – redukcja kosztów eksploatacji, wydłużenie okresów międzyprzeglądowych, jak i ogólnego czasu eksploatacji statku powietrznego, wymuszają stosowanie coraz bardziej zaawansowanych podzespołów. Konieczność redukcji masy pociąga za sobą konieczność stałego analizowania parametrów bardzo wytężonych konstrukcji. Wszelkie uszkodzenia muszą być zdiagnozowane ze sporym wyprzedzeniem, tak aby uniknąć defektów, które mogą prowadzić do wypadku. Aby zrealizować te cele, badacze na całym świecie mają za zadanie dostarczenie przemysłowi lotniczemu nowych podzespołów opartych na inteligentnych materiałach.

## Bibliografia

- Arms S.W., *Tracking Pitch Link Dynamic Loads with Energy Harvesting Wireless Sensors*, Bell Helicopter, Virginia Beach 2007.
- Browning J.S., Cobb R.G., Canfield R.A., Miller S.K., *F-16 Ventral Fin Buffet Alleviation Using Piezoelectric Actuators*, 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Palm Springs 2009.
- Debiasi M., Leong Ch.W., Boureme Y., Yen Y.Ch., *Application of Macro-Fiber-Composite Materials on UAV*, online – <http://www.marcodebiasi.net/MDresearch/MDpublications/2013ATS-Paper-MFCwingShaping.pdf>.
- <http://www.hbm.com/en/menu/tips-tricks/force-measurement/spoilt-for-choice-piezoelectric-or-strain-gauge-based-force-transducers/>.
- <https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/piezo-sensor-applications.html>.
- Konka H.P., Wahab M., Lian K., *Piezoelectric fiber composite transducers for health monitoring in composite structures*, „Sensors and Actuators” 2012, A 194.
- Matt H.M., *Structural Diagnostics of CFRP Composite Aircraft Components by Ultrasonic Guided Waves and Built-In Piezoelectric Transducers*, University of California, San Diego 2007.

<sup>6</sup> H.P. Konka, M. Wahab, K. Lian, *Piezoelectric fiber composite transducers for health monitoring in composite structures*, „Sensors and Actuators” 2012, A 194, s. 84–94.

Paradies R., Ciresa P., *Active wing design with integrated flight control using piezoelectric macro fiber composites*, „Smart Materials and Structures” 2009, vol. 18, nr 3.

Patent US 3376438 A.

Yeum C.M., Sohn H., Ihn J.B., Lim H.J., *Instantaneous delamination detection in a composite plate using a dual piezoelectric transducer network*, „Composite Structures” 2012, nr 94.

# Wpływ zmiennych obciążeń cieplnych na bezpieczeństwo klejonych konstrukcji lotniczych

## Streszczenie

W artykule przedstawiono badania porównawcze wytrzymałości statycznej na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych wykonanych ze stali 316L przed i po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym. Badania miały charakter porównawczy i dotyczyły połączeń klejowych poddanych zmiennym obciążeniom cieplnym oraz połączeń niepoddanych takim szokom. Wykorzystano kleje na bazie żywic epoksydowych. Analizowano wyniki badań wytrzymałości statycznej na ścinanie, uzyskanej dla różnych sposobów przygotowania materiału do operacji klejenia. Uzyskane wyniki badań opracowano statystycznie z zachowaniem właściwych standardów naukowych. Zakres badań obejmował stosunkowo krótki cykl zmęczeniowy – wynosił on 200 cykli przy zakresie zmienności od  $-40$  do  $+60^{\circ}\text{C}$ . Celem głównym badań było sprawdzenie podatności połączeń na zmiany wytrzymałości pod wpływem zmęczenia cieplnego. Pracę zakończono wnioskami.

**Słowa kluczowe:** badania eksperymentalne, klejenie, bezpieczeństwo lotnicze.

## Wstęp

Połączenia klejowe są coraz częściej stosowanym sposobem łączenia w odpowiedzialnych maszynach i urządzeniach eksploatowanych w warunkach zmiennych obciążeń termomechanicznych. Jest to związane z wieloma zaletami klejów<sup>1</sup> i połączeń klejowych<sup>2</sup>. Jak wiadomo, dobre efekty klejenia zależą

1 J. Godzimirski, *Czynniki kształtujące wytrzymałość połączeń klejowych*, „Technologia i Automatyzacja Montażu” 1994, nr 4, s. 61–64.

2 J. Kuczmazewski, *Fundamentals of metal-metal adhesive joint design*, Politechnika Lubelska, Oddział PAN w Lublinie, Lublin 2006.

w dużym stopniu od zastosowanej technologii przygotowania powierzchni<sup>3</sup>, a właściwie warstwy wierzchniej łączonych materiałów<sup>4</sup>. Z reguły technologicie te mają za zadanie „rozwijać”<sup>5</sup> powierzchnię w znaczeniu geometrycznym, usuwać zanieczyszczenia oraz ukonstytuować odpowiedni stan energetyczny<sup>6</sup> warstwy wierzchniej<sup>7</sup>.

Trudno wyobrazić sobie obecnie nowoczesny przemysł bez połączeń klejowych. Wystarczy wspomnieć przemysł: lotniczy, kosmiczny, samochodowy, drzewny, papierniczy, budownictwo, przemysł opakowań oraz inne, aby uzmysłowić sobie znaczenie klejów i materiałów „adhezyjnych” we współczesnej gospodarce.

Wpływ cyklicznych obciążeń cieplnych na wytrzymałość doraźną i długotrwałą, zarówno statyczną, jak i dynamiczną, jest stosunkowo słabo poznany, zwłaszcza w aspekcie zmian mechanicznych zachodzących w strukturze kleju.

Celem pracy było sprawdzenie podatności połączeń klejowych na zmiany wytrzymałości pod wpływem zmęczenia cieplnego.

## Połączenia klejowe w przemyśle lotniczym

Klejanie materiałów jest technologią łączenia elementów, zwykle różnoimiennych, których właściwości mechaniczne bądź chemiczne nie pozwalają na ich spajanie. Według polskiej normy PN-EN 923:2008 *Kleje. Terminy i definicje*

3 M.P. Kwiatkowski, M. Kłonica, J. Kuczmaszewski, S. Satoh, *Comparative analysis of energetic properties of Ti6Al4V titanium and EN-AW-2017A(PA6) aluminum alloy surface layers for an adhesive bonding application*, „Ozone: Science & Engineering. The Journal of the International Ozone Association” 2013, nr 35, s. 220–228.

4 M. Kłonica, J. Kuczmaszewski, S. Samborski, *Effect of a notch on impact resistance of the epidian 57/Z1 epoxy material after “thermal shock”*, „Solid State Phenomena” 2016, vol. 240, s. 161–167.

5 M. Kłonica, J. Kuczmaszewski, *Badania porównawcze wytrzymałości na ścinanie klejowych połączeń zakładkowych stali 316L po „szokach termicznych”*, „Przetwórstwo Tworzyw” 2015, nr 2, s. 37–42.

6 H.B. Eral, D.J.C. Manette, *Contact angle hysteresis: a review of fundamentals and applications*, „Colloid and Polymer Science” 2013, vol. 291, s. 247–260.

7 M.S. Islam, L. Tong, P.J. Falzon, *Influence of metal surface preparation on its surface profile, contact angle, surface energy and adhesion with glass fibre prepreg*, „International Journal of Adhesion and Adhesives” 2014, nr 51, s. 32–41; M. Żenkiewicz, *Comparative study on the surface free energy of a solid calculated by different methods*, „Polymer Testing” 2007, nr 26, s. 14–19.

klejenie to technika łączenia materiałów przy użyciu substancji niemetalicznej przez zespolenie powierzchni (adhezja), przy zachowaniu odpowiedniej wytrzymałości wewnętrznej złącza (kohezja)<sup>8</sup>.

Jeżeli chcemy uzyskać połączenie klejowe, które będzie trwałe i funkcjonalne, niezbędnym jest do tego spełnienie dwóch warunków: adhezji, czyli odpowiedniego połączenia spoiny klejowej z elementem klejonym, oraz kohezji, czyli odpowiedniego związania w spoinie klejowej<sup>9</sup>.

Adhezja pochodzi od łacińskiego słowa *adhesio*, co oznacza szepianie, przyleganie. Jest to zjawisko, w którym warstwy wierzchnie dwóch ciał wiążą się ze sobą, tworząc połączenie nierozzerwalne, będące skutkiem powstania pola sił. Wytworzenie w warstwie wierzchniej przez ładunki atomów pól sił (oddziaływania sił van der Waalsa) jest możliwe tylko przy odpowiednim zbliżeniu elementów łączonych. Natomiast kohezja wywodzi się z łacińskiego słowa *cohaesio* i oznacza oddziaływanie międzycząsteczkowe wewnątrz ciała. Miarą jest iloraz pracy niezbędnej do rozłączenia określonego elementu na części i powierzchni powstającej pod wpływem tego rozdzielania.

Kohezja w klejach utwardzonych (tworzywach polimerowych) zależy od ich struktury (łańcuchowej, usieciowanej, rozgałęzionej) i budowy chemicznej. Dużą rolę odgrywa też stan skupienia, dlatego w ciałach stałych, gdzie cząsteczki są poukładane w bardzo bliskich odległościach od siebie, siły kohezji są większe. Aby siły kohezji były wystarczające dla wytrzymałości całego połączenia, należy eliminować powstawanie naprężeń własnych.

Przy omawianiu kohezji ważna jest również zwilżalność, czyli zdolność kleju do rozchodzenia się po materiale. Jest to zjawisko fizyczne, które pozwala na rozplýwanie się cieczy po powierzchni ciała stałego<sup>10</sup>. Dobra zwilżalność występuje wówczas, gdy oddziaływanie między podłożem (materiałem klejonym) a cząsteczkami kleju jest odpowiednio duże.

Ważnym zagadnieniem omawianym przy połączeniach klejowych jest ich wytrzymałość, czyli zdolność do przenoszenia obciążeń. Można tu wyróżnić wytrzymałość statyczną i długotrwałą. Wytrzymałość statyczna, zwana również doraźną lub krótkotrwałą, to wielkość, której definiowanie jest niezbędne

8 P. Jasiulek, *Łączenie tworzyw sztucznych metodami spawania, zgrzewania, klejenia i laminowania*, Wyd. KaBe, Krosno 2006.

9 Z. Mirski, T. Piwowarczyk, *Podstawy klejenia, kleje i ich własności*, „Przegląd Spawalnictwa” 2008, nr 8, s. 12–21.

10 A. Rudawska, J. Kuczmaszewski, *Klejenie blach ocynkowanych*, Wyd. Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005.

przy projektowaniu połączeń i ich eksploatacji. Wytrzymałość statyczna nie jest dokładnym obrazem funkcjonowania połączenia, dlatego istnieje druga wielkość – wytrzymałość długotrwała, która daje dużo więcej informacji, ale przeprowadzenie badań dla tej wytrzymałości jest czasochłonne i trudne.

Analizując wytrzymałość połączeń klejowych, zwykle rozpatruje się wytrzymałość statyczną. Aby połączenie klejowe mogło funkcjonować, niezbędne jest osiągnięcie zadanej wytrzymałości statycznej. Wśród czynników, które wpływają na wytrzymałość statyczną (doraźną), znajdują się czynniki technologiczne (odpowiednie przygotowanie powierzchni materiału klejonego, rodzaj kleju, sposób utwardzania spoiny klejowej) oraz konstrukcyjne (grubość materiałów klejonych, grubość spoiny klejowej, sposób obciążenia połączenia, wymiary połączenia, długość zakładki, sztywność).

Wytrzymałość długotrwała połączeń klejowych jest wyznaczana w zależności od czasu, podczas którego przenoszone są obciążenia statyczne o odpowiedniej wielkości. Czynniki, które decydują o wartości wytrzymałości długotrwałej, to przede wszystkim konstrukcja połączenia i czynniki zewnętrzne wpływające na połączenie klejowe.

Istnieje także wytrzymałość zmęczeniowa (największe naprężenie cykliczne dla konkretnego cyklu naprężeń, w którym połączenie nie zostanie zniszczone w ciągu liczby cykli równej podstawie próby zmęczeniowej), która występuje przy zmiennych naprężeniach w spoinach połączeń klejowych, a ich skutkiem jest uszkodzenie lub zniszczenie<sup>11</sup>.

Technika klejenia – dzięki postępowi w dziedzinie chemii materiałów adhezyjnych – ciągle się rozwija. Skuteczność klejenia zależy w dużym stopniu od doboru odpowiedniego kleju oraz zastosowania odpowiedniej technologii przygotowania powierzchni. Decyduje o tym wiele czynników, przede wszystkim zwiększenie efektywności klejenia dzięki nowoczesnym, szybko utwardzającym się klejom, łatwość projektowania klejów poprzez prostą i tanią modyfikację chemiczną bądź fizyczną, a także coraz większe zaufanie do tego sposobu łączenia. Zjawiska zachodzące na granicy faz materiału łączonego i kleju są jednak na tyle złożone, że nie można opracować jednakowo skutecznego kleju dla wszystkich materiałów.

11 J. Godzimirski, *Czynniki kształtujące wytrzymałość*, op. cit., s. 61–64.

## Metodyka badań

Próbki użyte do połączeń klejowych zostały wykonane ze stali 316L o wymiarach 25x100x1,5 mm. W celu rozwinięcia powierzchni geometrycznej oraz usunięcia warstwy fizysorpcyjnej część badanych próbek poddano obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 w czasie 30 sekund. Wszystkie próbki oczyszczono trzykrotnie, stosując środek odfuszczający Loctite 7061 oraz czyściwo. Po ostatnim użyciu środka Loctite 7061 powierzchnie próbek pozostawiono do odparowania. W tabeli 10 przedstawiono skład chemiczny stali 316L (tabelę opracowano na podstawie certyfikatu materiału).

*Tabela 10. Skład chemiczny stali 316L (wg certyfikatu materiału)*

Stal 316L									
Pierwiastek	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
Wartość [%]	0,011	0,54	1,03	0,040	0,001	10,18	16,71	2,05	0,020

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Material certificate 316L steel No.B11236A01.

W tabeli 11 przedstawiono wybrane właściwości stali 316L (opracowane na podstawie certyfikatu materiału).

*Tabela 11. Wybrane właściwości stali 316L (wg certyfikatu materiału)*

Stal 316L		
Wytrzymałość na rozciąganie Rm [MPa]	Umowna granica plastyczności Rp=0,2 [MPa]	Twardość [HV]
592	290	148

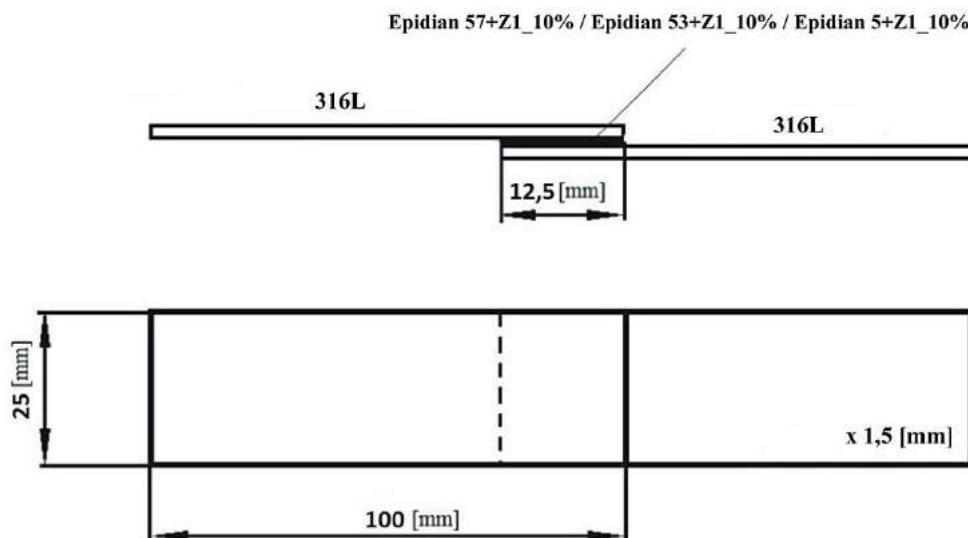
Źródło: ibidem.

Do pomiarów kąta zwilżania na badanych powierzchniach stali 316L oraz wyznaczenia wartości swobodnej energii powierzchniowej (SEP) zastosowano goniometr PGX. Ciecze użyte do pomiarów kąta zwilżania były наносzone na badaną powierzchnię w sposób automatyczny, w postaci kropli o stałej objętości 4  $\mu\text{l}$ , przez mechanizm goniometru. Pomiar kąta zwilżania zarówno wodą destylowaną, jak i diiodometanem był wykonany minimum dziesięć razy na każdej z badanych próbek. Pomiar odbywał się na płycie pomiarowej po uprzednim sprawdzeniu poziomu za pomocą poziomicy optycznej, w temperaturze otoczenia wynoszącej 19–23°C i wilgotności względnej 38–47%.

Pomiary wybranych parametrów chropowatości powierzchni prowadzono z wykorzystaniem profilografometru firmy Taylor Hobson Surtronic3+.

Długość odcinka elementarnego dobrano na podstawie literatury<sup>12</sup>. Profile opracowano w programie TalyProfile Lite. W celu obrazowania powierzchni stali 316L w badaniach wykorzystano mikroskop Keyence VHX-5000.

Ze stali 316L przygotowano jednozakładkowe połączenie klejowe o grubości warstwy kleju  $g_k=0,1$  mm. Schemat połączenia i wymiary przedstawiono na rysunku 31.



Opracowanie własne.

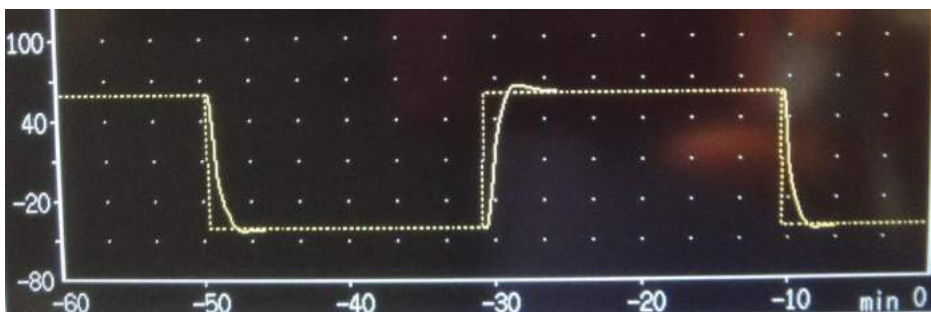
Rys. 31. Próbką jednozakładkowa – schemat połączenia klejowego

W badaniach wykorzystano kleje na bazie żywic epoksydowych (epidian 57, epidian 53 oraz epidian 5) z 10% dodatkiem utwardzacza Z1 (trietylenotetramina). Utwardzanie masy klejowej przebiegało w temperaturze otoczenia wynoszącej 20–23°C, przy wilgotności względnej 35–40%. Wartość ciśnienia jednostkowego wywieranego na powierzchni próbek w procesie klejenia wynosiła 0,2 MPa. Czas utwardzania ustalono na poziomie 120 godzin.

Na rysunku 32 przedstawiono cykl obciążenia cieplnego, jakiemu poddano wykonane próbki połączenia klejowego – zrealizowano 200 cykli (szoki termiczne). Minimalną temperaturę ustawiono na poziomie -40°C, a maksymalną równą 60°C. Czas kondycjonowania próbek w każdej temperaturze wynosił 15 minut, nie wliczając czasu stabilizacji temperatury.

<sup>12</sup> Z. Humienny (red.), *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – wykład dla uczelni technicznych*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2001.





Opracowanie własne.

Rys. 32. Cykl obciążenia cieplnego próbki

Badania wytrzymałościowe na ścinanie jednozakładkowych połączeń klejowych zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z 150, zgodnie z normą DIN EN 1465. Prędkość trawersy podczas próby niszczącej wynosiła 2 mm/min, a odległość uchwytów przy pozycji startowej wynosiła 85 mm.

Pierwszym etapem przeprowadzenia eksperymentu były badania wstępne. Na podstawie analizy rozrzutu i przyjętego poziomu istotności określono niezbędną liczbę pomiarów w badaniach zasadniczych<sup>13</sup>. Liczbę pomiarów oszacowano na podstawie wzoru:

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 \cdot s^2}{d^2} \leq n_0 \quad (1)$$

gdzie:

$n_0$  – liczebność próby wstępnej,

$t_{\alpha}$  – wartość zmiennej t-Studenta,

$s^2$  – wariancja z próby wstępnej,

$d$  – maksymalny błąd szacunku, równy maksymalnemu błędowi pomiarowemu.

Wariancję wyznaczono z zależności:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1} \quad (2)$$

gdzie:

$y_i$  – wartość czynnika wynikowego w  $i$ -tym pomiarze,

$\bar{y}$  – wartość średniej arytmetycznej,

$n$  – całkowita liczba pomiarów.

<sup>13</sup> M. Korzyński, *Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.

W badaniach eksperymentalnych najczęściej wykonujemy analizę porównawczą, tzn. dla przyjętego poziomu istotności stwierdzamy, czy uzyskane wartości średnie zmiennej zależnej w dwóch populacjach istotnie się różnią. Pierwszym etapem weryfikacji hipotezy o równości średniej jest sprawdzenie hipotezy o jednorodności wariancji. Hipoteza zerowa ma postać:

$$H_0 : \sigma_I^2 = \sigma_{II}^2 \quad (3)$$

Hipoteza alternatywna ma postać:

$$H_1 : \sigma_{II}^2 < \sigma_I^2 \quad (4)$$

Do weryfikacji hipotezy wykorzystano statystykę opartą na rozkładzie Fishera-Snedecora:

$$F = \frac{S_I^2}{S_{II}^2} \quad (5)$$

gdzie:

$S_I^2$  – wariancja o większej wartości,

$S_{II}^2$  – wariancja o mniejszej wartości.

Kolejnym etapem jest weryfikacja hipotezy o równości średnich.

Hipoteza zerowa ma postać:

$$H_0 : m_1 = m_2 \quad (6)$$

Hipoteza alternatywna ma postać:

$$H_1 : m_1 > m_2 \text{ lub } m_1 < m_2 \quad (7)$$

Jeżeli wariancje są równe, do weryfikacji wykorzystujemy test oparty na rozkładzie t-Studenta.

$$t = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (8)$$

Gdy test hipotezy o równości wariancji wykazał, że wariancje są różne, do weryfikacji stosujemy test oparty na rozkładzie Cochran-Coxa.

$$c = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2}{n_1 + n_2}}} \quad (9)$$

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej można formułować jednoznaczne wnioski o równości średniej, a więc istotności wpływu jakiegoś czynnika czy czynników przy założonym poziomie istotności.

## Wyniki badań

Uśrednione wyniki wartości swobodnej energii powierzchniowej (SEP) stali 316L przed i po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 wraz z obliczonym odchyleniem standardowym przedstawiono w tabeli 12. Przedstawiono również składowe SEP: składową polarną SEP oraz składową dyspersyjną SEP.

*Tabela 12. Uśrednione wartości swobodnej energii powierzchniowej (SEP) i jej składowe dla stali 316L, po przygotowaniu warstwy wierzchniej*

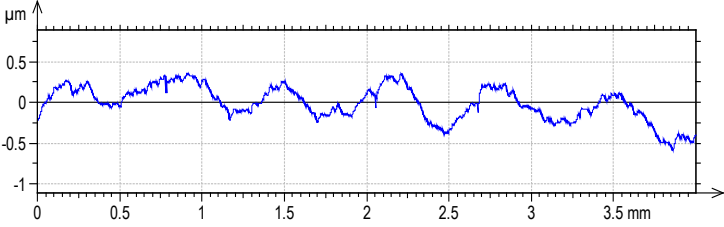
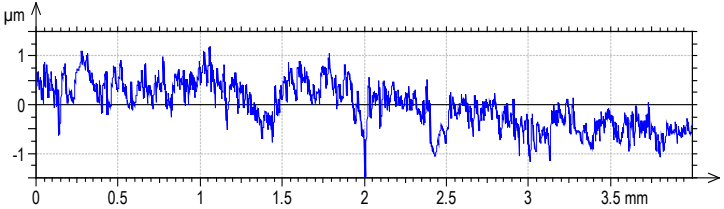
	Stal 316L przed obróbką mechaniczną			Stal 316L po obróbce mechanicznej		
	SEP [mJ/m <sup>2</sup> ]	składowa polarna SEP [mJ/m <sup>2</sup> ]	składowa dyspersyjna SEP [mJ/m <sup>2</sup> ]	SEP [mJ/m <sup>2</sup> ]	składowa polarna SEP [mJ/m <sup>2</sup> ]	składowa dyspersyjna SEP [mJ/m <sup>2</sup> ]
Wartość średnia	50,3	6,4	43,9	61,5	15,2	46,3
Odchylenie standardowe	1,2	1,6	1,5	1,0	1,1	1,4

Opracowanie własne.

Na szczególną uwagę zasługuje wzrost średniej wartości swobodnej energii powierzchniowej dla stali 316L po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 w stosunku do wartości SEP przed obróbką mechaniczną. Wzrost ten jest na poziomie około 20%. Wartość składowej dyspersyjnej SEP pozostaje na tym samym poziomie, natomiast składowa polarna SEP wzrasta ponad dwukrotnie po obróbce mechanicznej. Przyczyną tego wzrostu może być usunięcie warstwy wierzchniej powstałej na materiale w warunkach ekspozycji na czynniki środowiskowe (mogą to być warstewki tlenkowe i zaadsorbowane składniki otoczenia – zanieczyszczenie). Wyznaczenie wartości SEP wykonano po to, aby określić poprawność przygotowania powierzchni do klejenia. Przeprowadzono również pomiary wybranych parametrów chropowatości powierzchni stali 316L. W tabeli 13 zestawiono profile chropowatości powierzchni próbek ze stali 316L przed obróbką mechaniczną narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 oraz po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym. Przed wykonaniem pomiarów powierzchni próbek oczyszczono oraz odtłuszczono środkiem odtłuszczającym Loctite 7061. Warto zwrócić uwagę, obserwując profile nierówności, że

obróbka mechaniczna narzędziami nasypowymi skutecznie rozwija analizowaną powierzchnię.

*Tabela 13. Profile chropowatości powierzchni stali 316L*

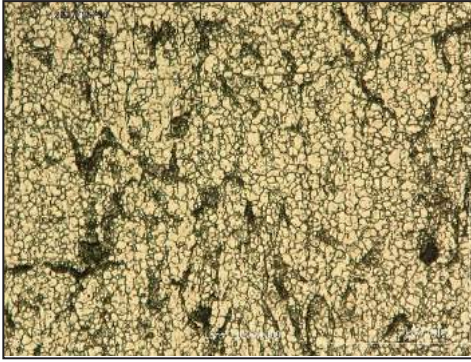
Materiał	Profil
Stal 316L przed obróbką mechaniczną	
Stal 316L po obróbce mechanicznej	

Opracowanie własne.

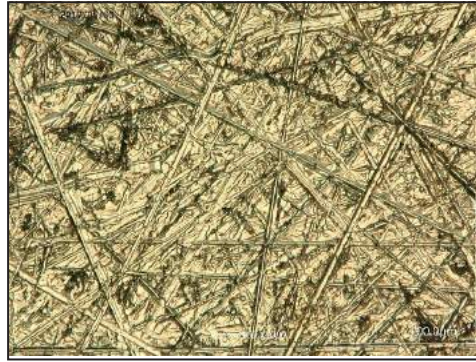
Dla próbek wykonanych ze stali 316L po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 zauważono charakterystyczne dla tego typu obróbki zagłębienia przedstawiające kinematyczno-geometryczne odwzorowanie narzędzia.

Na fotografii 21 przedstawiono powierzchnie próbek wykonanych ze stali 316L przed i po obróbce mechanicznej. Zdjęcia wykonano przy powiększeniu x1000.

Na rysunku 33 przedstawiono uśrednione wartości naprężeń ścinających w jednozakładkowych połączeniach klejowych, uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla stali 316L przed obróbką mechaniczną z zastosowaniem różnych klejów na bazie żywic epoksydowych.



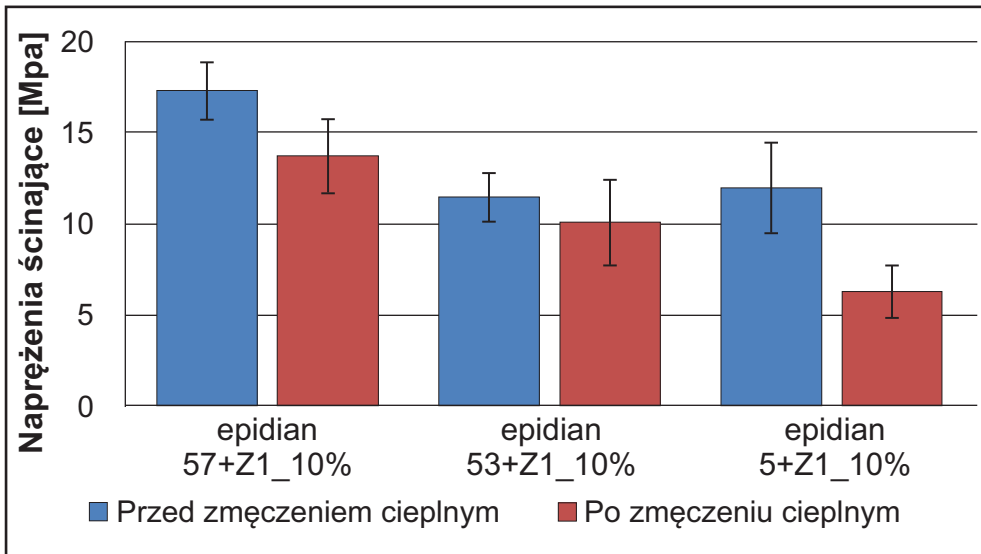
a)



b)

Opracowanie własne.

Fot. 21. Powierzchnie próbek ( $\times 1000$ ): a) przed obróbką mechaniczną, b) po obróbce mechanicznej

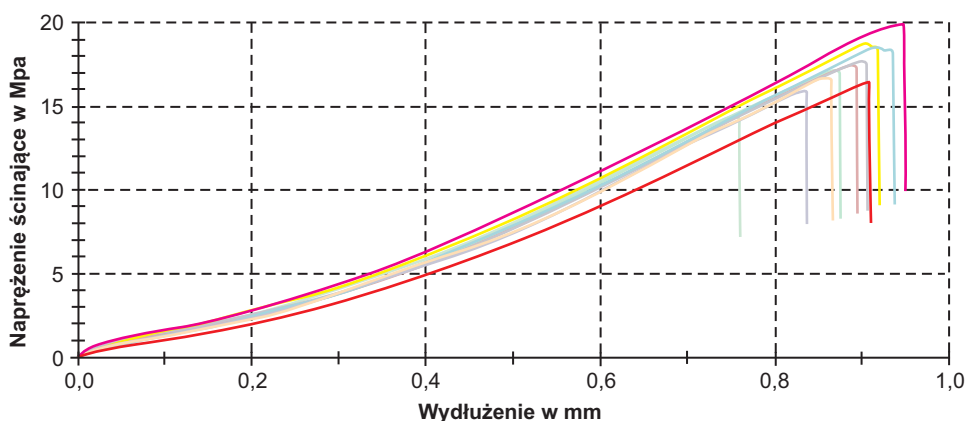


Źródło: M. Kłonica, *Comparative analysis of shear strength of single-lap adhesive joints after "thermal shock"*, Applied Mechanics and Materials, Theory and practice of industrial and production engineering, edited by A. Świć, A. Gola, „Trans Tech Publications” 2015, vol. 791, s. 224–231.

Rys. 33. Napężenie ścinające uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla próbek wykonanych ze stali 316L przed obróbką mechaniczną z użyciem różnych klejów

Jako miarę rozrzutu wartości średniej przyjęto odchylenie standardowe. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy stwierdzono, że obciążenie cieplne (szoki termiczne) jednozakładkowego połączenia klejowego dla stali 316L przed obróbką mechaniczną powoduje spadek naprężenia ścinającego w stosunku do próbek przed obciążeniem cieplnym. Największy spadek wartości naprężenia ścinającego po „szokach termicznych” zanotowano dla kleju na bazie żywicy epidian 5 – wynosił on 50% w stosunku do próbek przed „szokami termicznymi”. Dla kleju na bazie żywicy epidian 57 spadek ten wynosił 20%, natomiast dla kleju na bazie żywicy epidian 53 spadek wartości naprężenia ścinającego po obciążeniu cieplnym był na poziomie około 8% w stosunku do próbek przed obciążeniem cieplnym.

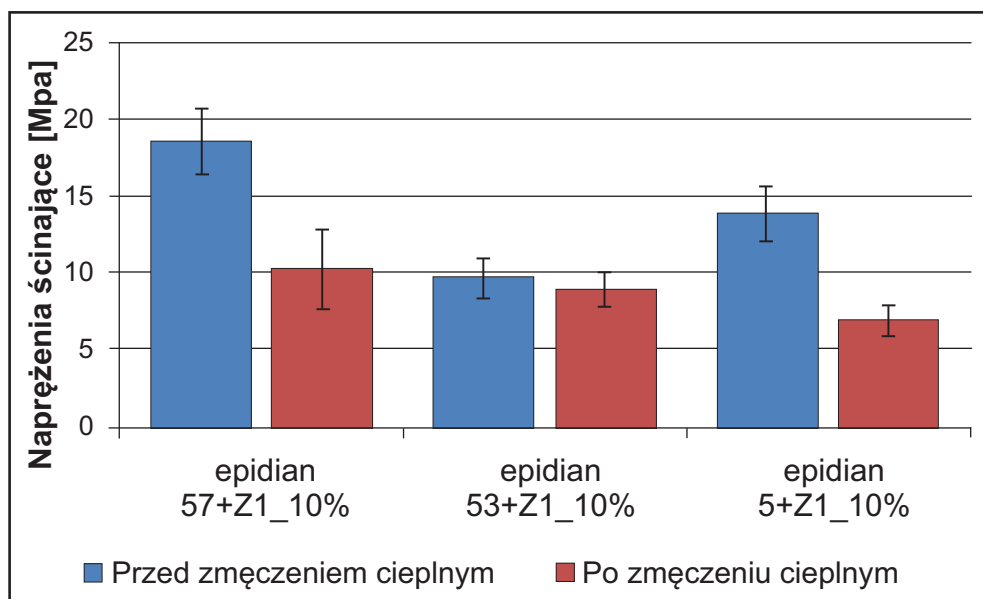
Na rysunku 34 przedstawiono przykładowe przebiegi naprężeń ścinających w jednozakładkowych połączeniach klejowych z wykorzystaniem kleju na bazie żywicy epidian 57 dla stali 316L przed obróbką mechaniczną oraz przed zmęczeniem cieplnym.



Opracowanie własne.

*Rys. 34. Przykładowe przebiegi naprężeń ścinających w jednozakładkowych połączeniach klejowych (klej na bazie żywicy epidian 57) dla stali 316L przed obróbką mechaniczną oraz przed szokami termicznymi*

Na rysunku 35 przedstawiono uśrednione wartości naprężeń ścinających w jednozakładkowych połączeniach klejowych, uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla stali 316L po obróbce mechanicznej z zastosowaniem różnych klejów.



Źródło: M. Kłonica, *Comparative analysis of...*, op. cit., s. 224–231.

*Rys. 35. Napężenie ścinające uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla próbek wykonanych ze stali 316L po obróbce mechanicznej z użyciem różnych klejów*

Również dla próbek wykonanych ze stali 316L po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym stwierdzono, że „szoki termiczne” dla niektórych klejów powodują spadek wartości napężenia ścinającego. Na podstawie wyników uzyskanych z badań stwierdzono 50% spadek wartości napężenia ścinającego dla kleju na bazie żywicy epidian 5 po „szokach termicznych” w stosunku do próbek przed „szokami termicznymi”. Dla kleju na bazie żywicy epidian 57 spadek wartości napężenia ścinającego po obciążeniu cieplnym wynosił 45% w stosunku do próbek przed obciążeniem cieplnym. Natomiast dla kleju epidian 53 z utwardzaczem Z1 nie stwierdzono istotnych różnic w wartościach napężenia ścinającego po obciążeniu cieplnym w stosunku do próbek przed odciążeniem cieplnym.

## Zakończenie

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące, istotne wnioski:

1. Stwierdzono wzrost wartości swobodnej energii powierzchniowej dla stali 316L po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 w stosunku do wartości SEP przed obróbką mechaniczną – wzrost ten wynosił około 20%.

2. Interesujący jest ponad dwukrotny wzrost składowej polarnej SEP po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 w stosunku do próbek przed obróbką mechaniczną.

3. Z obserwacji profili chropowatości powierzchni wynika, że obróbka mechaniczna narzędziami nasypowymi skutecznie poprawia jakość powierzchni.

4. Największy spadek wartości naprężenia ścinającego dla próbek wykonanych ze stali 316L, zarówno przed, jak i po obróbce mechanicznej, po „szokach termicznych” zanotowano dla kleju na bazie żywicy epidian 5 – wynosił on 50% w stosunku do próbek przed „szokami termicznymi”.

5. Najbardziej odpornym na działanie zmiennych obciążeń cieplnych okazał się klej na bazie żywicy epidian 53 z utwardzaczem Z1.

## Bibliografia

- Eral H.B., Mannetje D.J.C., *Contact angle hysteresis: a review of fundamentals and applications*, „Colloid and Polymer Science” 2013, vol. 291.
- Godzimirski J., *Czynniki kształtujące wytrzymałość połączeń klejowych*, „Technologia i Automatyka Montażu” 1994, nr 4.
- Humienny Z. (red.), *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – wykład dla uczelni technicznych*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2001.
- Islam M.S., Tong L., Falzon P.J., *Influence of metal surface preparation on its surface profile, contact angle, surface energy and adhesion with glass fibre prepreg*, „International Journal of Adhesion and Adhesives” 2014, nr 51.
- Jasiulek P., *Łączenie tworzyw sztucznych metodami spawania, zgrzewania, klejenia i laminowania*, Wyd. KaBe, Krosno 2006.
- Kłonica M., Kuczmaszewski J., Samborski S., *Effect of a notch on impact resistance of the epidian 57/Z1 epoxy material after “thermal shock”*, „Solid State Phenomena” 2016, vol. 240.
- Kłonica M., Kuczmaszewski J., *Badania porównawcze wytrzymałości na ścinanie klejowych połączeń zakładkowych stali 316L po „szokach termicznych”*, „Przetwórstwo Tworzyw” 2015, nr 2.
- Korzyński M., *Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.



- Kuczmaszewski J., *Fundamentals of metal-metal adhesive joint design*, Politechnika Lubelska, Oddział PAN w Lublinie, Lublin 2006.
- Kwiatkowski M.P., Kłonica M., Kuczmaszewski J., Satoh S., *Comparative analysis of energetic properties of Ti6Al4V titanium and EN-AW-2017A(PA6) aluminum alloy surface layers for an adhesive bonding application*, „Ozone: Science & Engineering. The Journal of the International Ozone Association” 2013, nr 35.
- Material certificate 316L steel No.B11236A01.
- Mirski Z., Piwowarczyk T., *Podstawy klejenia, kleje i ich własności*, „Przegląd Spawalnictwa” 2008, nr 8.
- Rudawska A., Kuczmaszewski J., *Klejenie blach ocynkowanych*, Wyd. Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005.
- Żenkiewicz M., *Comparative study on the surface free energy of a solid calculated by different methods*, „Polymer Testing” 2007, nr 26.

# Kierunki rozwoju bezzałogowych statków powietrznych

*Teraźniejszość jest czymś, co nas wiąże. Przyszłość tworzymy sobie w wyobraźni. Tylko przeszłość jest czystą rzeczywistością.*

Simone Weil

## Streszczenie

Obecne konflikty konwencjonalne, jak również od niedawna hybrydowe polegają na wykorzystaniu nowoczesnych technik uzbrojenia. Ilość wszystkich operacji, w których bierze udział czynnik ludzki, maleje, a co za tym idzie – wzrasta potrzeba ciągłego udoskonalania nowych konstrukcji. Rozwój uzbrojenia wymusił również na konstruktorach wprowadzanie odpowiednich procedur celem zmniejszenia strat wojsk własnych oraz użycia zmodernizowanego i udoskonalonego sprzętu lotniczego. W świecie bezzałogowych statków powietrznych, podobnie jak i w innej szybko rozwijającej się branży lotniczej, obowiązują pewne trendy. Najważniejsze to zdać sobie sprawę z tego, co ma bezpośredni wpływ na rozwój konstrukcji. Zdecydowanie będą to: dostępna technologia, dostępne oprogramowanie, prawo, rynek, finanse oraz – co najważniejsze – nieograniczona pomysłowość ludzka. Ewolucję, w szczególności technologiczną, goni trend wyznaczany przez nierzadko najlepszych konstruktorów w branży lotniczej.

**Słowa kluczowe:** bezzałogowy statek powietrzny (BSP), grafen, druk 3D, autonomia, komunikacja, modułowość.

## Wstęp

Bezzałogowe systemy powietrzne – BSP (*Unmanned Aerial Systems* – UAS), nazywane często statkami powietrznymi, wraz ze wszystkimi naziemnymi elementami odpowiedzialnymi za bezpieczne funkcjonowanie w przestrzeni powietrznej nabrały i nabierają coraz większego znaczenia w zastosowaniach militarnych, jak również cywilnych. Można stwierdzić, że od końca XX wieku

były one jedną z najbardziej dynamicznie rozwijających się gałęzi technologii we współczesnym świecie, dokonując niebywałego skoku technologicznego. Głównym argumentem użycia BSP do celów militarnych, jak również cywilnych, poza ich ponadprzeciętną skutecznością, jest minimalizowanie stopnia ryzyka podejmowanego przez czynnik ludzki na współczesnym polu walki oraz terenach zagrożonych np. przez skażenia, pożary lub trudno dostępnych miejscach. Innym bardzo ważnym czynnikiem rozwoju i szerszego zastosowania tego narzędzia jest fakt, iż znaczna większość zdarzeń lotniczych jest powodowana błędem człowieka, a rzadziej problemami technicznymi, technologicznymi czy informatycznymi. W chwili obecnej konstruktorzy i naukowcy widzą szerokie pole działań, w których z powodzeniem można zastosować BSP. Najnowsze osiągnięcia technologiczne pozwalają na coraz łatwiejsze operowanie bezzałogowym statkiem powietrznym i wykorzystanie go w zróżnicowanych celach. Pozwala to na zaoszczędzenie czasu, co w sytuacjach zagrożeń stanowi najważniejszy czynnik do ochrony bądź ratowania życia ludzkiego.

Uważa się, że bezzałogowe systemy powietrzne są w stanie zastąpić załogowe statki powietrzne, szczególnie wtedy, gdy istnieje ryzyko utraty zdrowia lub życia. Powszechne zastosowanie BSP przynosi i będzie przynosić znaczące korzyści ekonomiczne na obszarze rynku lotniczego. Uważne analizy trendów pozwalają wysnuć wniosek, iż obecne BSP są trzykrotnie tańsze od załogowych statków powietrznych, przede wszystkim ze względu na kosztowne i długotrwałe szkolenie personelu latającego oraz późniejsze podtrzymywanie nawyków lotniczych. Zużywają one także w stosunku do porównywalnych w swojej klasie załogowych statków powietrznych mniej paliwa, a tym samym emitują mniejsze ilości gazów cieplarnianych oraz hałasu w środowisku, w którym operują.

Celem niniejszego opracowania jest próba określenia kierunków rozwoju bezzałogowych statków powietrznych, jak również wszystkich wchodzących w ich skład modułów.

## Zmiany zachodzące w konstrukcjach BSP

Jak już wspomniano wcześniej, priorytetowymi zastosowaniami bezzałogowych statków powietrznych przez organy wojskowe i cywilne w najbliższej przyszłości będą prawdopodobnie podstawowe obowiązki w zakresie bezpieczeństwa, ochrony i utrzymywania porządku publicznego, zwłaszcza jeśli

chodzi o prowadzenie nadzoru i zbieranie informacji wywiadowczych po ostatnich spektakularnych atakach terrorystycznych w Europie i na świecie. Bezpośrednim tego skutkiem będzie ograniczenie liczby personelu niezbędnego do obsługi tego typu aparatów latających.

Szereg komercyjnych zastosowań bezzałogowych statków powietrznych nadal pozostaje do odkrycia. Jednak główne firmy dostawcze i logistyczne już badają, jak urządzenia te mogłyby poprawić skuteczność ich działania oraz rozszerzyć zakres oferowanych przez nie usług. W perspektywie krótkoterminowej spodziewany jest spadek kosztów technologii bezzałogowych statków powietrznych. Jednak wiąże się to prawdopodobnie z obniżeniem bezpieczeństwa, a także będzie miało poważne skutki, jeśli chodzi o prywatność społeczeństwa.

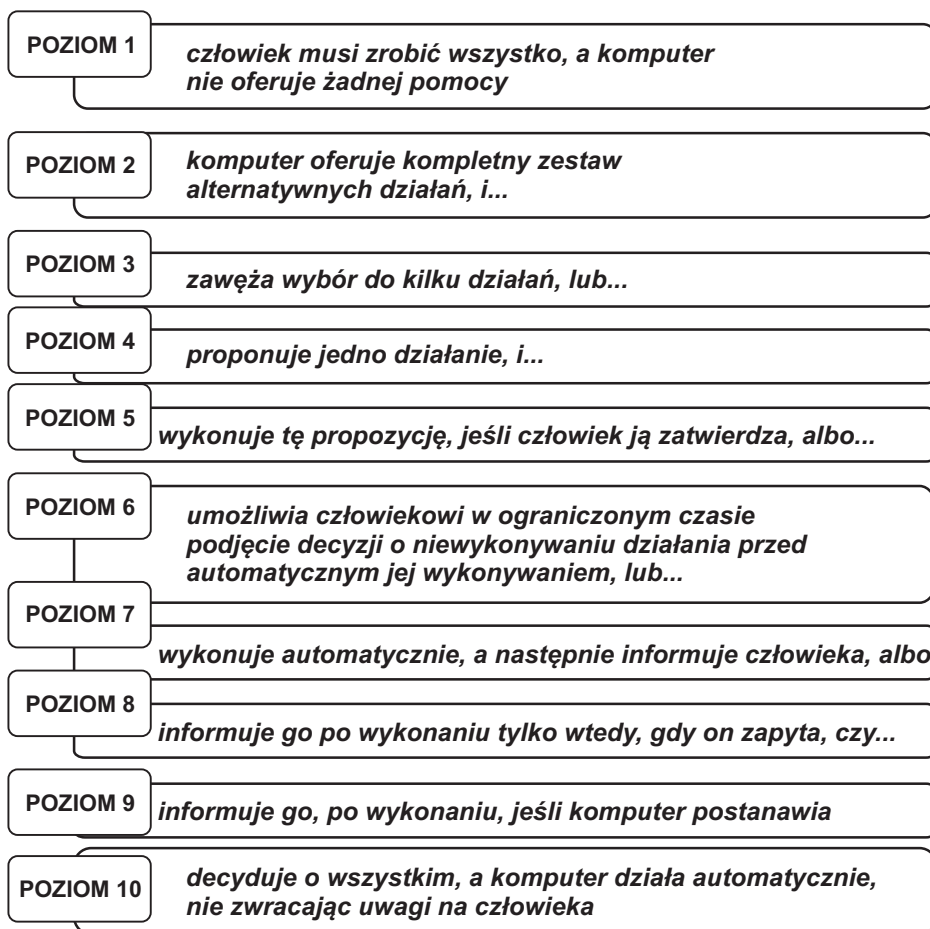
Przedmiotem zainteresowania w niniejszym artykule jest kierunek rozwoju bezzałogowych statków powietrznych i wspierających komponentów, które obejmują: ładunki (sensory), dystrybucję danych, autonomię, elementy kontroli, elementy wspierające miniaturyzację, konstrukcję oraz sposoby napędów. Poniżej poddano charakterystyce każdy z tych elementów oraz dokonano próby określenia kierunków rozwoju.

## Autonomia

Thomas B. Sheridan<sup>1</sup> zaproponował 10-poziomową skalę automatyczności (rys. 36). Na poziomie pierwszym człowiek podejmuje decyzje i sam je realizuje bez pomocy komputera. Poziomy od 2 do 4 są skoncentrowane na człowieku lub komputerze podejmującym decyzję. Poziomy od 5 do 9 skupiają się na sposobie wykonania tej decyzji. Poziom dziesiąty to pełna autonomia, w której komputer decyduje i wykonuje podjęte przez siebie decyzje.

Większa autonomia maszyn bezzałogowych sprawia, że ich możliwości rosną, a koszty eksploatacji maleją. Wyznacznikiem tego trendu jest chociażby amerykańska Agencja Zaawansowanych Projektów Badawczych w Obszarze Obronności DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*). W programie FLA (*Fast Lightweight Autonomy*) próbuje stworzyć oprogramowanie, dzięki któremu BSP będą mogły poruszać się autonomicznie niemal jak ptaki – głównie chodzi o lot w ograniczonych przestrzeniach, omijanie przeszkód itp. Dlatego wydaje się pewnym, że najnowsze BSP będą operować na poziomie 9–10, dokonując całkowitej analizy oraz podejmując samodzielnie decyzje.

1 Pracownik naukowy agencji kosmicznej NASA.

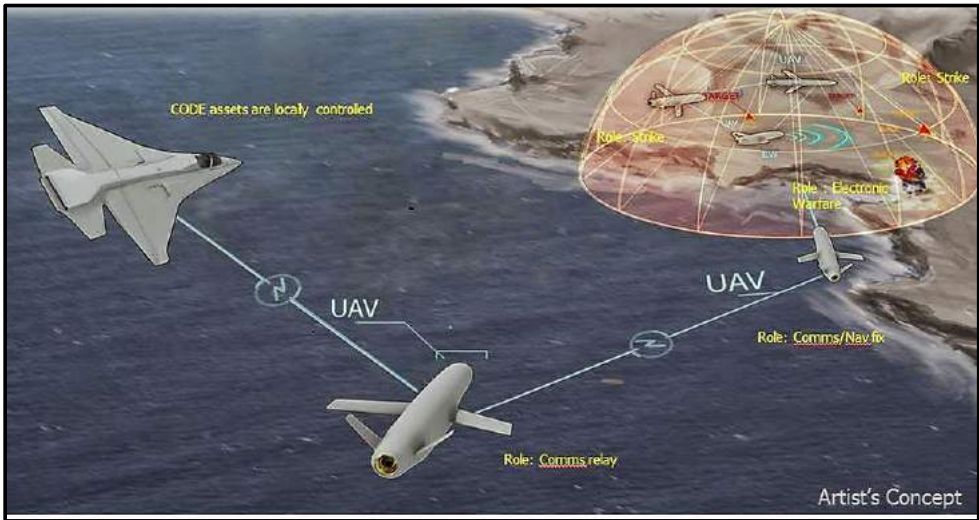


Opracowanie własne.

Rys. 36. Skala automatyczności według T.B. Sheridana

## Komunikacja

Podobnie jak wyżej opisana autonomia, istnieje zauważalna potrzeba rozwoju tego elementu w BSP zarówno cywilnych, jak i wojskowych. Powstaje obecnie coraz więcej modeli dronów, które mogą być sterowane w większej ilości jednocześnie przez tylko jednego operatora, a nawet bez operatora. Dzięki tym badaniom można stwierdzić, że dąży się do stworzenia takiego oprogramowania dla BSP, dzięki któremu będą one w stanie atakować w większych grupach, niczym rój owadów, przy jednoczesnej redukcji ilości operatorów do minimum. W chwili obecnej istnieje ryzyko, że po utracie sygnału sterującego bezzałogowce posiadające na pokładzie broń mogą atakować pojedyncze cele rojami.



Źródło: <http://www.c4isrnet.com/unmanned/uas/2015/01/22/darpa-project-to-develop-uav-teaming-system> [dostęp: 15.08.2017].

Rys. 37. Zasada działania CODE

Dzięki CODE<sup>2</sup> (rys. 37) ma się to zasadniczo zmienić. Jeśli cel zostanie zniszczony wcześniej przez innego „bezzałogowca”, pozostałe elementy systemu automatycznie zaktualizują cel misji na status „zniszczony” i skierują się na kolejny cel z listy priorytetowej. Założeniem opracowań CODE jest także komunikacja BSP z powietrznymi statkami załogowymi, jeśli takowe biorą udział w tej samej misji. Należy zauważyć, że w przypadku wojskowych BSP byłaby to nowość. Jednak w przypadku BSP cywilnych mamy już modele, które potrafią latać w roju, co więcej – samodzielnie, np. w trybie „follow me” (rój małych BSP automatycznie i równomiernie rozmieszcza się wokół osoby śledzącej lub odbywa lot w pomieszczeniu z przeszkodami). Bardzo ciekawie zapowiada się program CICADA<sup>3</sup>. Jest to projekt rozwijany przez US Naval Research Laboratory. Ma na celu skonstruowanie małego motoszybowca o bardzo prostej konstrukcji z płaskiego arkusza pianki Depron oraz opracowanie oprogramowania to tego BSP. Zasada wykorzystania tego wyposażenia ma polegać na koncepcji „inteligentnego roju”<sup>4</sup>. Te bardzo proste mikroszybowce mają być wyposażone jedynie w żyroskop, prosty układ GPS

2 Collaborative Operations in Denied Environment.

3 Close-in Covert Autonomous Disposable Aircraft.

4 T. Hypki, *Inteligentny rój*, „Raport WTO” 2012, nr 1, s. 18–22.

oraz przeznaczone do misji sensory czy inny ładunek (także wybuchowy). Zasada działania to lot w ogromnej liczbie, w postaci właśnie „inteligentnego roju”, który zrzucony z dużej wysokości miałby pokryć równomiernie jakąś przestrzeń (czy to trójwymiarową w powietrzu, czy już po opadnięciu na powierzchnię – jakiś obszar). W warunkach bojowych byłyby one zrzucane z samolotów transportowych, balonów stratosferycznych, małych raket czy pocisków artyleryjskich dużych kalibrów, wykonując zadania w sposób niezauważalny. Istnieje również pomysł drukowania gotowych BSP na pokładzie nosicieli.

Kolejnym pomysłem na wykorzystanie komunikacji pomiędzy stacją bazową a BSP jest tzw. amunicja krążąca (*loitering munition*)<sup>5</sup> – to bardzo ciekawe rozwinięcie koncepcji bezzałogowych statków powietrznych. W skrócie zasadę działania amunicji krążącej łatwo wyjaśnić na przykładzie izraelskiego BSP – IAI Harpy. Harpia jest uzbrojeniem przeciwradarowym. Po wystrzeleniu/wystartowaniu jednej lub kilku Harpii udają się one w wyznaczony im rejon patrolowania. Aktywacja jakiegokolwiek stacji radarowej (czyli zwykle – stanowiska baterii przeciwlotniczej) w rejonie patrolowania powoduje reakcję Harpii i atak przez samozniszczenie.

## Miniaturyzacja

W świetle analizy współczesnej literatury przedmiotu można przyjąć, że aktualny zakres zastosowań bezzałogowych systemów powietrznych wymusi na konstruktorach miniaturyzację całego systemu, co spowoduje zmniejszenie ilości zużywanego paliwa oraz – co za tym idzie – emisji spalin, a także zwiększenie zasięgu i czasu działania. Przykładem takich konstrukcji jest np. CrazyFly – o bardzo małych gabarytach. Co ciekawe, jest on mikro, ale nie jest najmniejszy na świecie. Wyścig w tym trendzie ciągle trwa. Inaczej jednak sprawy mikrokonstrukcji wyglądają w wojsku. Operacje, które wymagają dokładnego rozpoznania w terenie zurbanizowanym, wymuszają użycie mikro BSP, startujących np. z ręki operatora. Mikro BSP w wojsku wykorzystywane są m.in. na poziomie plutonu, na krótkich odcinkach. Przykładem takiego „bezzałogowca” jest Black Hornet Nano – to mikrośmigłowiec produkowany przez norweską firmę Prox Dynamics. Ma on zaledwie 10×2,5 cm przy masie całkowitej 16 gramów.

5 *Zielony Smok i Harpia – amunicja krążąca przeciwko radarom i do walk w mieście*, online – Defence24.pl [dostęp: 18.08.2017].

Może być sterowany bezpośrednio przez operatora lub lecieć po zadanej trasie zgodnie z koordynatami według systemu GPS. Porusza się z prędkością 35 km/h przy długości lotu do 30 minut i zasięgu około 1 kilometra. Jego systemy pokładowe dostarczają zdjęcia wysokiej jakości, lub też obraz z kamery w czasie rzeczywistym. Mikroskopijne wręcz wymiary Horneta i jego bardzo cicha praca czynią go bardzo trudnym do wykrycia.

## Modułowość

Jak wynika z przeprowadzonych badań, sensory i uzbrojenie instalowane na bezzałogowych systemach powietrznych powinny być wykonane z zastosowaniem osiągnięć technologicznych, szczególnie w zakresie utrudnienia lub uniemożliwienia wykrycia i identyfikacji (technologia *stealth*). Platformy te powinny umożliwić szybką wymianę poszczególnych modułów, uzależnioną rodzajem zadania. Wszystkie te moduły powinny mieć możliwość umieszczenia ich w kadłubie BSP, aby tym samym zmniejszyć ryzyko wykrywalności (BSP wojskowe). Moduły powinny również zapewniać efektywne wykrywanie celów powietrznych, co będzie potęgowane poprzez sieciocentryczną sieć informacyjną. Będą one wyposażone w środki rażenia o bardzo dużych odległościach rażenia. Coraz więcej powstaje „bezzałogowców” modułowych – z dostępnymi, całymi pakietami/głowicami do alternatywnego użycia. Modułowość to rozwiązanie przede wszystkim ekonomiczne, zwiększające pulę możliwości dla danego BSP przy jednoczesnych ograniczonych kosztach.

## Konstrukcja

W konstrukcji płatowców bezzałogowych statków powietrznych prawdopodobnie wykorzystywane będą przede wszystkim kompozyty węglowe, co skutkować będzie korzystniejszym stosunkiem masy płatowca do ogólnego ciężaru BSP. Można jednak przewidywać, że ze względu na trudność naprawy uszkodzeń płatowca wykonanego ze wspomnianych kompozytów węglowych oraz szybką propagację uszkodzeń na całą konstrukcję będą poszukiwane materiały, które będą mogły zastąpić te kompozyty w budowie płatowców BSP<sup>6</sup>. Na podstawie analizy dostępnej literatury można również stwierdzić z dużym

<sup>6</sup> B.J. Carlson, *Past UAV Program Failures and Implications for Current UAV Programs*, ACSC, Maxwell AFB, 2001, s. 29–30.



prawdopodobieństwem, że nastąpi udoskonalenie budowy płatowców BSP w postaci wprowadzenia kompozytów węglowych cechujących się zdolnością samoczynnego naprawienia drobnych uszkodzeń konstrukcji spowodowanych przez różnego rodzaju czynniki zewnętrzne<sup>7</sup>. Można również przewidywać, że do budowy płatowców wykorzystywany będzie grafen, który jest pierwszym dwuwymiarowym nanomateriałem wyprodukowanym przez naukowców. Jest wytwarzany z grafitu – materiału obficie występującego na Ziemi i mającego szeroki zakres zastosowań. Co więcej, oczekuje się, że w ciągu najbliższych dwóch lat koszt grafenu spadnie poniżej aktualnego kosztu krzemu. Powinien on umożliwić stworzenie potencjalnie ultralekkich i odpornych materiałów kompozytowych, które mogłyby ewentualnie zastąpić stal. Grafen ma również wysokie parametry przewodnictwa elektrycznego i cieplnego, jest rozciągliwy i praktycznie nie przepuszcza żadnych cząsteczek. Jest to powód do szerokiego wykorzystywania tego materiału do budowy płatowca BSP.

Z całą pewnością nie można wykluczyć, że w ciągu dekady możliwe będzie zastosowanie do budowy płatowców BSP dla lotnictwa biopolimerów transgenicznych<sup>8</sup>. Materiał ten jest około 25% lżejszy od kompozytów węglowych oraz cechuje się kilkukrotnie wyższą od powszechnie używanej stali odpornością na naprężenia, a ponadto jest bardzo elastyczny. W ocenach zawartych w dokumencie Departamentu Obrony USA *Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005–2030* można wnioskować, że dzięki powyższym właściwościom biopolimery transgeniczne znajdą szerokie zastosowanie w budowie płatowców, przyczyniając się w szczególności do zmniejszenia masy konstrukcji przy jednoczesnym wzroście wytrzymałości<sup>9</sup>.

Coraz częściej wykorzystywana jest również technologia druku 3D<sup>10</sup>, zwłaszcza w przypadku BSP mniejszych rozmiarów. Naukowcy opracowali w ostatnim czasie technologię druku elementów razem z elektroniką. Demonstratorem tejże technologii był oczywiście działający mały „bezzałogowiec”.

7 W pracach rozwojowych prowadzonych w USA testowane są obecnie materiały kompozytowe zawierające kapsułki płynnego kompozytu, który uwalnia się w przypadku kontaktu z powietrzem i wypełnia ubytek w płatowcu. Trwają również badania nad „samoleczącymi” się materiałami izomerycznymi, spełniającymi podobne funkcje. *Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005–2030*, Annex D: *Technologies*, UAS Roadmap 2005.

8 [http://www.senat.gov.pl/gfx/senat/userfiles/\\_public/k8/komisje/2012/kgm/prezentacje27pos/florjanczyk.pdf](http://www.senat.gov.pl/gfx/senat/userfiles/_public/k8/komisje/2012/kgm/prezentacje27pos/florjanczyk.pdf) [dostęp: 17.08.2017].

9 *Unmanned Aircraft Systems...*, op. cit.

10 Druk 3D jest tzw. przyrostową technologią produkcyjną służącą do wytwarzania trójwymiarowych przedmiotów o niemal dowolnym kształcie przy użyciu modelu cyfrowego.

## Zasilanie

W opracowaniu systemów zasilania zawsze chodzi o to samo – aby uzyskać jak największą wydajność baterii/paliwa w stosunku do masy startowej BSP. Tymczasem w rozwoju cywilnych konstrukcji napędowych najnowsze trendy wskazują, że liczy się także ekologia. Aby ograniczyć użycie toksycznych baterii (lub paliw w przypadku dronów spalinowych) oraz wydłużyć maksymalnie czas lotu „bezzałogowców”, coraz częściej używa się alternatywnych źródeł energii, głównie energii słonecznej. Znane są już konstrukcje latające częściowo na ogniwach słonecznych, np. Air Strato Explorer latający na wysokości stratosfery i napędzany dzięki bateriom słonecznym.

Obok tradycyjnych, dotychczas stosowanych do napędu bezzałogowych statków powietrznych silników tłokowych, turbinowych i turboodrzutowych wykorzystuje się w coraz szerszym stopniu napędy elektryczne, ogniwa paliwowe oraz baterie słoneczne, jak również ich kombinacje w ramach hybrydowego zespołu napędowego<sup>11</sup>. Przykładem rewolucyjnych możliwości w dziedzinie zasilania „bezzałogowców” są projekty Lockheed Martin i LaserMotive specjalizujących się w zdalnym przesyłaniu energii elektrycznej z wykorzystaniem promieni laserowych. Udoskonalony BSP ma możliwość ponad 48-godzinnego lotu<sup>12</sup>. Bezzałogowy statek powietrzny Stalker zasilany jest bezprzewodowo. Pierwszym zastosowaniem jest BSP przeznaczony dla sił specjalnych do skrytej obserwacji i wskazywania celów, którego autonomia sięgała 2 godzin, a po wprowadzeniu nowego technologicznego rozwiązania zyskał możliwość praktycznie nieograniczonego czasu operowania bojowego. Co najważniejsze, układ ma ponadto zasilać bezprzewodowo „bezzałogowca” operujący w promieniu wielu kilometrów. Wracając jednak do rozwiązań napędów spalinowych, należy wspomnieć, że analogicznie do tendencji rozwojowych w dziedzinie płatowców, także w odniesieniu do zespołów napędowych, inne będą wymagania w stosunku do napędu bezzałogowych statków powietrznych przeznaczonych np. do działań w głębi ugrupowania przeciwnika w warunkach silnego przeciwdziałania jego środków

**11** *USAF Scientific Advisory Board, Quick Look Study FY 2025, Persistence at “Near Space” Altitudes, Terms of Reference*, online – [http://www.sab.hq.af.mil/TORs/2005/NS\\_TOR%20FINAL.pdf](http://www.sab.hq.af.mil/TORs/2005/NS_TOR%20FINAL.pdf) [dostęp: 13.08.2017].

**12** *2 doby lotu dzięki laserowi*, online – [http://www.altair.com.pl/news/view?news\\_id=8132](http://www.altair.com.pl/news/view?news_id=8132) [dostęp: 21.08.2017].

przeciwlotniczych, a inne dla zespołów napędowych BSP operujących w relatywnie bezpiecznej przestrzeni powietrznej lub rozwiązaniach cywilnych<sup>13</sup>.

Doskonalenie technologii ogniw paliwowych opartych na ciekłym wodoro-  
rze<sup>14</sup> może w połączeniu z bateriami słonecznymi stworzyć system napędowy dla BSP przeznaczonych do realizacji długotrwałych zadań na bardzo dużych wysokościach. Można zatem przewidywać, że w najbliższych latach mogą pojawić się opisane powyżej hybrydowe zespoły napędowe, dzięki którym bezzałogowe statki powietrzne przewidziane do operowania w przestrzeni kosmicznej byłyby w stanie wykonywać lot przez kilka tygodni lub nawet dłużej przy założeniu, że będą wykorzystywać w dzień energię z baterii słonecznych, a w nocy z ogniw paliwowych. Jednak oceniając rozwój rynku napędów, należy zakładać, że bardziej prawdopodobnym rozwiązaniem będzie jednak uzupełnianie tradycyjnych turboodrzutowych, turbinowych i tłokowych jednostek napędowych bezzałogowych statków powietrznych przez ogniwa słoneczne i paliwowe generujące dodatkową energię na potrzeby ich pokładowych urządzeń elektronicznych<sup>15</sup>.

## Zakończenie

Biorąc pod uwagę szybki rozwój BSP, można z całą pewnością stwierdzić, że jednym z najistotniejszych aspektów rozwoju technicznego BSP w horyzoncie czasowym do 2030 roku będzie rozwój i doskonalenie systemów awionicznych, w tym przede wszystkim sensorów, oraz ich miniaturyzacja. Można również założyć, że nastąpi duże zapotrzebowanie na wysoką przepustowość transferu danych w sieciach łączności pomiędzy BSP, który jest niezbędny do zabezpieczenia użycia lotnictwa bezzałogowego. Jednym ze sposobów rozwiązania tego problemu może być wykorzystanie łączności laserowej w relacjach pomiędzy BSP wykonującymi loty na bardzo dużych wysokościach jako uzupełnianie tradycyjnej cyfrowej łączności radiowej w pozostałych relacjach.

Istnieje również kolejny aspekt, o którym należy wspomnieć, a mianowicie problem zapewnienia kontroli użycia uzbrojenia przez bezzałogowe statki

13 *Unmanned Aircraft Systems...*, op. cit.

14 *LEMV Airship Sold Back to Manufacturer for a Song, and Future Data*, Defense Industry Daily, 2013.

15 *UAV Systems: Global Perspective*, Yearbook 2006/2007, online – <http://www.uvs-international.org/pages/UAV%20INFO%20-%20Yearbook%202006.html>.

powietrzne o zwiększonej autonomiczności, jak również integracja lotnictwa bezzałogowego w ramach ruchu lotniczego w przestrzeni kontrolowanej. Współpracując z maszynami załogowymi, BSP są zdolne bezpiecznie i skutecznie przełamywać obronę przeciwlotniczą przeciwnika, stając się „bronią pierwszego dnia wojny”. Trzeba jednak bezwzględnie pamiętać, że „bezzałogowce” długo jeszcze będą jedynie uzupełnieniem i wsparciem sił uderzeniowych, ale nie zastąpią całkowicie maszyn załogowych. Decydującym o fascynującym technicznymi możliwościami systemów bezzałogowych łatwo wpaść w pułapkę koncepcji „armii robotów”, a do tego jeszcze bardzo daleko.

### Bibliografia

- 2 doby lotu dzięki laserowi*, online – [http://www.altair.com.pl/news/view?news\\_id=8132](http://www.altair.com.pl/news/view?news_id=8132).
- Carlson B.J., *Past UAV Program Failures and Implications for Current UAV Programs*, ACSC, Maxwell AFB 2001.
- <http://www.c4isrnet.com/unmanned/uas/2015/01/22/darpa-project-to-develop-uav-teaming-system>.
- [http://www.senat.gov.pl/gfx/senat/userfiles/\\_public/k8/komisje/2012/kgm/prezentacje-27pos/florjanczyk.pdf](http://www.senat.gov.pl/gfx/senat/userfiles/_public/k8/komisje/2012/kgm/prezentacje-27pos/florjanczyk.pdf).
- Hypki T., *Inteligentny rój*, „Raport WTO” 2012, nr 1.
- LEMV Airship Sold Back to Manufacturer for a Song, and Future Data*, Defense Industry Daily, 2013.
- UAV Systems: Global Perspective*, Yearbook 2006/2007, online – <http://www.uvs-international.org/pages/UAV%20INFO%20-%20Yearbook%202006.html>.
- Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005–2030*, Annex D: *Technologies*, UAS Roadmap 2005.
- USAF Scientific Advisory Board*, Quick Look Study FY 2025, Persistence at “Near Space” Altitudes, Terms of Reference, online – [http://www.sab.hq.af.mil/TORs/2005/NS\\_TOR%20FINAL.pdf](http://www.sab.hq.af.mil/TORs/2005/NS_TOR%20FINAL.pdf).
- Zielony Smok i Harpia – amunicja krążąca przeciwko radarom i do walk w mieście*, online – [Defence24.pl](http://Defence24.pl).

# Wykaz rysunków

1. Ogólna zasada działania materiałów inteligentnych .....	13
2. Rodzaje materiałów inteligentnych.....	14
3. Schemat kłapy w skrzydle samolotu .....	15
4. Rozmiar czujników MEMS.....	18
5. Wielofunkcyjny kurz.....	19
6. Skrzydło z pamięcią kształtu wykorzystujące materiały inteligentne firmy FlexSys Inc. ....	21
7. Model elastycznej końcówki szkieletu skrzydła.....	21
8. Miejsca montażu czujników mikroelektromechanicznych (MEMS) w strukturze statku powietrznego .....	27
9. Nanokompozytowe maty grzejne w strukturze kompozytowej oraz na krawędzi natarcia skrzydeł i kadłuba statku powietrznego.....	27
10. Statek powietrzny wykorzystujący czujniki MEMS oraz nanokompozyty polimerowe o właściwościach grzejnych zapobiegające zjawisku oblodzenia.....	27
11. Budowa statecznika pionowego bezzałogowego statku powietrznego z elementów kompozytowych laminowanych ręcznie (model statecznika pionowego – lewa strona; gotowy statecznik pionowy zamocowany do konstrukcji płatowca BSP – prawa strona).....	37
12. Schemat układu do formowania laminatów przy użyciu elastycznego worka.....	38
13. Schemat formowania wyrobów kompozytowych przy użyciu autoklawu.....	40
14. Masowy udział materiałów kompozytowych w budowie płatowców statków powietrznych w ostatnich latach .....	42
15. Udział materiałów kompozytowych w konstrukcji samolotu pasażerskiego Airbus A380 .....	43

16. Wersje konstrukcyjne układów lądowania samolotu F-35 Lightning II .....	55
17. Wizja uzbrojenia samolotu T-50 .....	60
18. Komórki TZKOP w strukturze dowodzenia w operacjach połączonych .....	87
19. Podstawowe wyposażenie personelu TZKOP .....	94
20. Zobrazowanie pracy zdalnego odbiornika ROVER.....	100
21. Funkcjonowanie BSP w formacji roju.....	109
22. Fazy procesu dowodzenia.....	131
23. Budowa komponentów symulatora SL MiG-29.....	166
24. Konfiguracja dostępnego uzbrojenia lotniczego .....	177
25. Piezoelementy zamontowane na popychaczu układu napędowego śmigłowca .....	184
26. Skrzydło na stanowisku pomiarowym z wyłączonymi i włączonymi elementami MFC .....	186
27. Schemat profilu z elementami aktywnymi .....	186
28. Odształcenie górnego poszycia skrzydła w zależności od przyłożonego napięcia: a) -500 V, b) 0 V, c) 1500 V .....	188
29. Położenie systemu LANTRIN oraz płetw stabilizacyjnych w samolocie F-16 .....	189
30. Rozmieszczenie układu tłumiącego drgania.....	190
31. Próbką jednozakładkowa – schemat połączenia klejowego .....	199
32. Cykl obciążenia cieplnego próbki.....	200
33. Naprężenie ścinające uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla próbek wykonanych ze stali 316L przed obróbką mechaniczną z użyciem różnych klejów.....	204
34. Przykładowe przebiegi naprężeń ścinających w jednozakładkowych połączeniach klejowych (klej na bazie żywicy epidian 57) dla stali 316L przed obróbką mechaniczną oraz przed szokami termicznymi .....	205
35. Naprężenie ścinające uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla próbek wykonanych ze stali 316L po obróbce mechanicznej z użyciem różnych klejów.....	206
36. Skala automatyczności według T.B. Sheridana.....	212
37. Zasada działania CODE.....	213

## Wykaz fotografii

1. Morphing Airplane – statek powietrzny zmieniający kształt w zależności od danych potrzeb podczas lotu..... 22
2. Obrazy ze skaningowego mikroskopu elektronowego modelu skóry rekina (po lewej) i farby odwzorowującej powierzchnię (po prawej) ..... 23
3. Łuski na powierzchni skrzydła motyla Morpho Menelaus ..... 23
4. Autoklaw do wytwarzania lotniczych wyrobów kompozytowych..... 40
5. Części kadłuba samolotu pasażerskiego Airbus A380 wykonane z kompozytu hybrydowego GLARE ..... 44
6. Jeden z etapów budowy kadłuba śmigłowca Boeing AH-64 wraz z elementami wykonanymi z kompozytu AFRP ..... 45
7. Samolot piątej generacji F-35B Lightning II z systemem STOVL F-35..... 52
8. Focke-Achgelis Fa 223 Drache w trakcie transportu działa ..... 76
9. Śmigłowiec Piasecki HUP-2 podejmujący rozbitka na Oceanie Atlantyckim w pobliżu lotniskowca eskortowego USS „Block Island” (CVE 106) ..... 77
10. Polski śmigłowiec Mil Mi-17 należący do 25 Brygady Kawalerii Powietrznej w trakcie wysadzania desantu za pomocą techniki tzw. grubej liny..... 80
11. Podgląd z kamery termowizyjnej podczas uderzenia na ugrupowanie bojowników Al-Kaidy..... 81
12. Symulatory Ośrodka Szkolenia Personelu TZKOP ARTMACS (a) oraz VBS 2 (b) ..... 90
13. Stanowisko kandydata na symulatorze ARTMACS..... 92
14. Stanowisko pilota na symulatorze ARTMACS..... 92
15. Naziemny system podświetlania celów GLTD II..... 97
16. Laptop do zobrazowania systemu ROVER w wersji standardowej (a); podręczna wersja z monitorem okularowym (b).....101

17. Mikro BSP Perdix .....	111
18. Wnętrze kokpitu samolotu MiG-29 w symulatorze SL MiG-29 .....	159
19. Przetworniki MFC w rdzeniu skrzydła bezzałogowego statku powietrznego.....	185
20. Wewnętrzna strona górnego pokrycia profilu z elementami piezoelektrycznymi.....	187
21. Powierzchnie próbek (x1000) a): przed obróbką mechaniczną, b) po obróbce mechanicznej.....	204



# Wykaz tabel

1. Wartości masowego stopnia wzmocnienia wyrobów kompozytowych uzyskanego w typowych lotniczych metodach wytwarzania laminatów.....	36
2. Charakterystyka wybranych samolotów myśliwskich piątej generacji .....	66
3. Kosztorys wyszkolenia i utrzymania uprawnień JTAC .....	89
4. Porównanie parametrów wskaźników podczernieni stosowanych przez JTAC.....	95
5. Klasyfikacja systemów bezzałogowych statków powietrznych w NATO .....	107
6. Charakterystyka mikro BSP Perdix .....	113
7. Baza ruchomych obiektów 3D zaimplementowana w symulatorze lotniczym SL MiG-29 .....	164
8. Moduły programowe symulatora lotu SL MiG-29.....	169
9. Wykaz uzbrojenia lotniczego (pociski raketowe oraz uzbrojenie bombardierskie) występującego w oprogramowaniu symulatora lotu.....	176
10. Skład chemiczny stali 316L (wg certyfikatu materiału) .....	198
11. Wybrane właściwości stali 316L (wg certyfikatu materiału) .....	198
12. Uśrednione wartości swobodnej energii powierzchniowej (SEP) i jej składowe dla stali 316L po przygotowaniu warstwy wierzchniej.....	202
13. Profile chropowatości powierzchni stali 316L.....	203