

Zastosowanie stopów metali lekkich w bezzałogowych statkach powietrznych

TOMASZ MUSZYŃSKI, MAŁGORZATA KMIOTEK, ADRIAN KORDOS, DANIEL FICEK *

W ostatnich latach obserwuje się znaczny wzrost użycia bezzałogowych statków powietrznych (BSP) w licznych zastosowaniach komercyjnych, a także wojskowych. Obecnie szacuje się, że na świecie istnieje przeszło 10 mln tego typu obiektów, wykorzystywanych od celów od hobbystycznych po profesjonalne, których wartość przekracza wiele milionów dolarów. BSP, zwane powszechnie dronami muszą cechować się małą masą i dużą sprawnością układu napędowego i zasilania, które pozwalają na długi czas nieprzerwanej pracy w powietrzu zwiększając obszar potencjalnych zastosowań. Jest to szczególnie istotne w przypadku obiektów latających używanych w zastosowaniach profesjonalnych. W zależności od zastosowania i liczności serii, do ich budowy wykorzystuje się wiele różnych materiałów w szczególności kompozytów. Jednakże bezzałogowe aparaty latające używane do celów militarnych, a także komercyjnych, np. w transporcie i rolnictwie muszą dodatkowo cechować się wytrzymałą i stabilną konstrukcją pozwalającą na przenoszenie dużych obciążeń. Z tej przyczyny coraz częściej do budowy BSP używa się stopów metali lekkich w szczególności aluminium, magnezu i tytanu. Ważnym argumentem przemawiającym za używaniem stopów metali lekkich są również względy ekologiczne gdyż niedostatecznie jeszcze są rozwinięta procesy recyklingu materiałów kompozytowych.

Wprowadzenie

Bezzałogowe statki powietrzne (BSP) (ang. *Unmanned Aerial Vehicle*, UAV) to konstrukcje latające, które w czasie lotu nie wymagają pilota na pokładzie – są pilotowane zdalnie lub wykonują lot autonomicznie. Rynek bezzałogowych statków powietrznych, to jeden z najszybciej rozwijających się sektorów światowej gospodarki. Polska należy do światowych liderów projektujących i produkujących BSP. Według niezależnych źródeł [2] pod względem wartości obrotów w tym sektorze gospodarki jesteśmy na trzecim miejscu na świecie. W Polsce działa około 4 tys. firm, produkujących całe systemy bądź ich komponenty. Z prognoz Komisji Europejskiej wynika, że cywilne pojazdy bezzałogowe, już za dziesięć lat będą sta-

nowić 10% światowego rynku lotniczego [20, 21].

Bezzałogowy statek powietrzny, niezależnie od typu, składa się z platformy nośnej, która wyposażona bywa w różnego rodzaju sensory pozyskiwania danych lub systemy broni, systemu kontroli lotu Flight Control System (system inercyjny INS (IMU), systemów awioniki do zdalnego lub autonomicznego sterowania lotem, systemów transmisji danych zarejestrowanych sensorami umieszczonymi na platformie oraz naziemnej stacji kontrolnej, której zadaniem jest zdalne sterowanie i kontrola trasy lotu bezzałogowego statku powietrznego [4, 11].

Specyfika bezzałogowych statków powietrznych jest tak rozbudowana, iż nie stworzono jednolitej klasyfikacji. Istnieje wiele kryteriów, według których klasy-

fikuje się bezzałogowe statki powietrzne. Związane jest to ze stałym rozwojem konstrukcji, możliwości i przeznaczenia. Poniżej zaprezentowano przykładowe klasyfikacje dla bezzałogowych statków powietrznych, które stworzono w oparciu o aktualne przepisy, wytyczne oraz analizę literatury.

Według polskiego prawa bezzałogowe statki powietrzne klasyfikuje się w oparciu o masę, typ konstrukcji i przeznaczenie. W przypadku masy, wyróżnia się BSP:

- bardzo lekkie (0–5 kg),
- lekkie (5–50 kg),
- średnie (50–200 kg),
- ciężkie (200–2000 kg),
- bardzo ciężkie (powyżej 2000 kg).

* Dr inż. Tomasz Muszyński – Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Chełmie, dr inż. Małgorzata Kmiotek, dr Adrian Kordos, mgr inż. Daniel Ficek – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej.

Ze względu na typ konstrukcji wyróżnia się:

- samoloty bezzałogowe (A),
- sterowice bezzałogowe (AS),
- wielowirnikowce bezzałogowe (MR),
- śmigłowce bezzałogowe (H),
- inne bezzałogowe statki powietrzne (O).

Ze względu na przeznaczenie lub rodzaj wykonywanej operacji BSP dzieli się na

- modele latające, czyli bezzałogowe statki powietrzne o masie startowej nie większej niż 150 kg, używane wyłącznie w operacjach o zasięgu widoczności

sokość lotu); zasięg; czas lotu; typ konstrukcji, rodzaj napędu (silnik spalinowy, elektryczny lub hybrydowy); klasa przestrzeni powietrznej, w której ma być wykonana operacja; zastosowanie, przeznaczenie, rodzaj wykonywanej operacji [4, 6, 8, 18, 21].

Innym podziałem, powszechnie używanym, jest klasyfikacja BSP opracowana w 2006 r. przez Petera van Blyenburgha, prezydenta Unmanned Vehicle Systems International. Podział ze względu na zasięg działania, czas lotu i pułap został zamieszczony w tabeli 1 (wskazane wartości w tabeli 1 są wartościami maksymalnymi) [12].

Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych

Projekty bezzałogowych statków powietrznych i materiały użyte do ich budowy są ściśle uwarunkowane ich zastosowaniem. Ekspansja BSP w ostatnich latach jest spowodowana rozwojem technologii, funkcjonalności i osiągnięć, w szczególności zasięgu i czasu lotu.

Ostatnio obserwuje się powszechne wykorzystanie BSP w zastosowaniach hobbystycznych. Obiekty te produkowane w dużych seriach, cechują się prostą i lekką konstrukcją, przy projektowaniu, których głównym wyznacznikiem jest cena, stąd zastosowanie jako głównego materiału tworzyw termoplastycznych kształtowanych przez wtryskiwanie i tłoczenie w formach [1, 5].

W bardziej profesjonalnych zastosowaniach BSP np. fotografia i film, pomiary, w których wymagana jest większa trwałość i sztywność konstrukcji przy małej masie, do ich budowy wykorzystywane są głównie kompozyty epoksydowo-węglowe i epoksydowo-kewlarowe oraz stopy aluminium [1].

Ponieważ BSP nie wymagają obecności człowieka na pokładzie zwiększa to zdecydowanie ich potencjalne zastosowanie o misje niebezpieczne dla zdrowia i życia ludzkiego, np. misje ratunkowe, wojskowe (np. Global HAWK – Rys.1, cena 39 mln dolarów), badawcze w niebezpiecznych warunkach – Rys. 2. Możliwość autonomicznego sterowania jest szcze-

Tabela 1. Klasyfikacja według UVSI (Unmanned Vehicles Systems International)[4]

Klasa	Zasięg	Czas lotu	Pułap
NANO	1 km	10 min	100 m
MIKRO	10 km	1 h	150 m
MINI	10 kg	2 h	300 m
CLOSE RANGE (CR) bliskiego zasięgu	30 km	4 h	3000 m
SHORT RANGE (SR) krótkiego zasięgu	70 km	6 h	3000 m
MEDIUM RANGE (MR) średniego zasięgu	200 km	10 h	5000 m
MEDIUM ALTITUDE LONG ENDURANCE (MALE) średniego pułapu i dużej długotrwałości lotu	> 500 kg	24 h	13 000 m
MEDIUM ALTITUDE LONG ENDURANCE (MALE) średniego pułapu i dużej długotrwałości lotu	> 2000 kg	> 20 h	20 000 m

wzrokowej w celach rekreacyjnych lub sportowych,

- bezzałogowe statki powietrzne o masie startowej nie większej niż 150 kg używane wyłącznie w operacjach o zasięgu widoczności wzrokowej w celach innych niż rekreacyjne lub sportowe.

Stosuje się również inne klasyfikacje bezzałogowych statków powietrznych opartych o następujące kryteria: wykorzystanie (cywilne, wojskowe), sposobu sterowania (automatyczne, manualne, półautomatyczne), sposób startu (pionowego startu, z rozbiegu, z wyrzutni), sposób zasilania (akumulator, energia słoneczna, wodór, benzyna, naziemne źródło, brak zasilania) lub pułap (wy-



Rys. 1. Bezzałogowy samolot NASA's Global Hawk [22]



Rys. 2. Dron do wykrywania i monitorowania pożarów lasów w Australii, DJI Matrice 600 Pro [23]

Drony – jako urządzenia do robienia zdjęć czy filmów z lotu ptaka są obiektem zainteresowania fotografów i filmowców, także amatorów. Drony profesjonalne mające znacznie większy potencjał wykorzystywane są między innymi przez wojsko i policję, np. do monitoringu terenu, monitoringu natężenia ruchu itp.

Wyróżniającym się na krajowym rynku bezałogowcem jest BSP Aquila (Rys. 7) produkowana przez firmę UAVS Poland Sp. z o.o.

Aquila jest bezałogowcem w układzie śmigłowca, ważącym 32 kg, posiadającym udźwig 10kg, jest w pełni autonomiczny wykonujący samodzielne pionowy start, lot po zdefiniowanej trasie i pionowe lądowanie. Autorski system „antenna-tracker” umożliwia utrzymywanie komunikacji z dronem w odległości nawet kilkudziesięciu kilometrów. Głównym wyposażeniem Aquila jest głowica obserwacyjna z termowizyjną kamerą, kamerą klasyczną dzienną oraz laserowym dalmierzem.

Bardzo ciekawą jest również konstrukcja pionowego startu i lądowania opracowana przez firmę FlyTech UAV, założoną przez absolwentów Politechniki Rzeszowskiej. Kolejnym produktem tej firmy, opracowanym przede wszystkim z myślą o fotogrametrii jest BIRDIE – dron na bazie płatowca z tylnym silnikiem pchającym – Rys. 8.



Rys. 3. Dron Amazona do dostarczania przesyłek [24]



Rys. 4. Dron DHL do dostarczania przesyłek [25]

gólnie użyteczna w zastosowaniach transportowych (Rys. 3, Rys. 4) i rolniczych (Rys. 5, Rys. 6), umożliwiając wykonywanie żmudnych prac bez udziału człowieka. Ze względu na przeznaczenie obiekty te muszą przenosić duże obciążenia i pracować w trudnych warunkach, w ich budowie oprócz wspomnianych wyżej materiałów stosuje się również stopy magnezu i tytanu [1, 5].

BSP na rynku krajowym

Duży potencjał rozwojowy w Polsce posiadają bezałogowe statki powietrzne stosowane do transportu towarowego. Drony do przewozu trzykilogramowych paczek buduje firma Ritex z Dolnego Śląska. Tym samym staje ona w wyścigu o wprowadzenie dronów do usług kurierskich z DHL czy szwajcarską pocztą.

W Polsce opracowano również nową koncepcję hoverbike'a. W roku 2016 firma Skynamo Aerospace z Wojnicza (pow. tarnowski) zaprezentowała pojazd Hoverbike Raptor – Rys. 9. Jako napęd główny został wykorzystany silnik spalinowy o mocy 380 KM, zapożyczony od motocykla torowego Suzuki Hayabusa. Obiektem zainteresowanych jest wiele firm, w tym wojsko.



Trwają prace nad koncepcją nowego zastosowania BSP, tj. holownika szybowców – Rys. 10, opracowywanego przez pracowników Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Chełmie. Istotą rozwiązania jest specjalnie zaprojektowany mechanizm wykorzystujący zaczep holowniczy szybowca normalnie wykorzystywany do holowania go za samolotem. BSP holownik posiada dodatkowy system sterowania umieszczony i zsynchronizowany z szybowcem, co umożliwi przemieszczanie połączonych BSP i szybowca na ziemi oraz ich lot silnikowy. Rozwiązanie obejmuje BSP-holownik, naziemną stację kontroli lotu i dodatkowy system sterowania umieszczony w szybowcu.

Wady i zalety kompozytów stosowanych do budowy BSP

Kompozyty wydają się być idealnym materiałem do zastosowań lotniczych. Należą do materiałów, które zmniejszają masę, maksymalizują efektywne zużycie paliwa i doskonale odwzorowują złożone kształty aerodynamiczne obiektów latających. Kompozyty są coraz bardziej wytrzymałe, coraz lżejsze, łatwo się formują i są odporne na wysokie temperatury, spełniają więc kluczowe wymagania stawiane przez projektantów lotniczych w zakresie wyboru materiałów [3, 7].

Niektóre kompozyty przetwarzają się łatwiej i taniej niż stopy metali lekkich, które wymagają znacznie większej liczby etapów podczas obróbki. Istotną wadą kompozytów są aspekty ekologiczne i problemy z ich recyklingiem. Zużyte elementy wykonane z kompozytów oraz odpady powstające w procesie produkcji generują dużą masę bardzo trudnych do przetworzenia „śmieci”. Obecnie tylko w niewielkiej części poddawane są one



Rys. 5. Dron do zastosowań rolniczych Agras 20 [26]

recyklingowi, ponad 90% tych elementów jest składowanych – Rys 11. Do tego strumienia odpadów kompozytowych niedługo dołączą następne, a wśród nich jest stale rosnąca liczba łopat turbin wiatrowych, których obecnie na świecie są już setki tysięcy. European Composites Industry Association (EuCIA) szacuje, że masa materiałów kompozytowych dotychczas użytych do produkcji turbin

wiatrowych przekroczyła już 2,5 mln ton. Przewiduje się, że w ciągu najbliższych pięciu lat co najmniej 12 tys. turbin trzeba będzie wymienić lub zmodernizować [3]. Efektywny recykling kompozytów staje się głównym technologicznym zadaniem dla przemysłu materiałów kompozytowych i powiąza-



Rys. 6. Dron do zastosowań rolniczych, Precision Hawk Lancaster Hawkeye III [27]



Rys. 7. Dron Aquila firmy UAVS Poland Sp. z o.o.[3]



Rys. 8. BIRDIE – dron opracowany przez Flytech UAV [28]

nego z nim przemysłu chemicznego. Szacuje się, że w skali światowej ilość samych odpadów kompozytów węglowych przekroczyła 24 000 Mg, a w 2021 roku prognozuje się, że ich ilość wyniesie 32 000 Mg [3].

Należy zauważyć, że tylko 1/3 masy odpadów to włókna ze zużytych części, pozostałe 2/3 wszystkich odpadów włókien to odpady z produkcji. W przypadku kompozytów węglowych recyklingowi poddaje się obecnie mniej niż 1000 Mg. Jeszcze trudniejsza jest sytuacja w stosunku do kompozytów ze zbrojeniem włóknem szklanym. W tym przypadku cena włókna nowego jest wielokrotnie mniejsza niż włókna pochodzącego z recyklingu, które ponadto ma wyraźnie gorsze parametry wytrzymałościowe niż włókno nowe. Znacznie tańszym roz-

wiązaniem jest składowanie takich elementów, aniżeli prowadzenie ich utylizacji. W związku z tymi technologicznymi problemami rośnie zagrożenie niespełnienia unijnych wymagań dotyczących ilości materiałów poddawanych recyklingowi [3, 7].

Na dzisiaj racjonalną alternatywą dla materiałów kompozytowych pod względem ekologicznym wydają się być stopy metali lekkich.

Stopy metali lekkich stosowane do budowy bezzałogowych statków powietrznych

Do najpowszechniej stosowanych stopów metali lekkich do produkcji bezzałogowych statków powietrznych należą stopy aluminium, tytanu i magnezu.

Stopy aluminium

Stopy aluminium należą do jednych najważniejszych materiałów konstrukcyjnych, stosowanych w przemyśle lotniczym. Głównymi składnikami stopów aluminium w lotnictwie są: miedź, krzem, mangan, magnez i cynk. Dodatkami w ilościach małoprocentowych są: nikiel, żelazo, tytan, chrom, beryl oraz inne. Ze stopów aluminium wykonuje się różne elementy konstrukcji w tym, np. dźwigary, uźebrowania, wręgi, poszycia, wsporniki konstrukcji płatów. Dużą rolę odgrywają również elementy łączące – nity (nitonakrętki) stosowane w skrzydłach statków powietrznych [1, 2, 19].

W procesie obróbki mechanicznej aluminium stosuje się narzędzia wykonane z następujących materiałów:

- do obróbki powierzchni aluminiowych: AlMg1, Al99,5, AlCuMg1, AlCuBiPb, AlMgSi1, AlMgSiPb.
- do stopów aluminium o małej zawartości krzemu (Si < 12,2%) i stopów magnezu: GAISCu4, GDAISi10Mg,
- do powierzchni ze stopów aluminium o małej zawartości krzemu i stopów magnezu z zawartością krzemu Si > 12.2%: G-ALSi12, G-ALSi17Cu4, G-ALSi21CuNiMg,
- powierzenie na bazie miedzi, mosiądzu i cynku obrabia się narzędziami wykonanymi z np.: CuZn40, Ms60, G-CuSn5ZnPb, CuZn37, CuSi3Mn [15].

Przy łączeniu aluminium i jego stopów za pomocą złączy spawanych napotyka się pewne trudności: duże powinowactwo



Rys. 9. Polski Hoverbike Raptor [29]



Rys. 10. Model zespołu szybowiec i BSP-holownika – wersja 2 z obniżoną wieżyczką silnika i podwoziem z tylnym punktem podparcia

aluminium do tlenu i powstawania trudnotopliwego tlenku, dużej przewodności cieplnej oraz dużej rozszerzalności. Innym trudnościami towarzyszącymi procesowi spawania są: duże spadki wytrzymałości w temperaturach spawania oraz utrata pierwiastków stopowych, takich jak magnez, cynk czy lit. Proces spawania aluminium wykonuje się przeważnie w otoczeniu gazu ochronnego (argon, hel z argonem, inne). W duraluminium (stopy aluminium z Cu i Mg) zwiększenie stężenia Cu oraz Mg powoduje poprawę własności wytrzymałościowych i pogorszenie własności plastycznych oraz podatności na obróbkę plastyczną. Duraluminium poddaje się obróbce cieplnej – wyżarzaniu ujednorodniającemu, rekrytalizacji i przede wszystkim utwardzaniu wyciekowemu. Przesycanie odbywa się w wodzie po wygrzewaniu w temperaturze ok. 490÷510°C przez 4÷6 h [2].

Wieloskładnikowe stopy Al z Cu, które zawierają – oprócz Mg, Si i Mn – także Fe, Ni, Ti, Zr lub Li powstałe przez starzenie samorzutne przy temperaturze pokojowej przez kilka dni, lub sztuczne przy temperaturze 170÷190°C przez kilka do kilkudziesięciu godzin, zależnie od stężenia Cu i Mg, cechują się dobrymi własnościami mechanicznymi przy temperaturze pokojowej i większej. Duża ich żarowytrzymałość jest związana z tworzeniem się faz bogatych w Fe, Mn

lub Ti, praktycznie nierozpuszczających się w roztworze stałym. Dodatek Ti sprzyja powstawaniu drobnoziarnistej struktury stopu, natomiast Mn ułatwia rekrytalizację [17].

Durale cynkowe są wieloskładnikowymi stopami aluminium z cynkiem, np. czteroskładnikowe stopy Al z Zn, zawierają także Mg i Mn. Charakteryzują się one najlepszymi własnościami wytrzymałościowymi spośród wszystkich stopów aluminium. Po utwardzeniu wyciekowym osiągają wytrzymałość na rozciąganie 700 MPa, granicę plastyczności $R_{m0,2}$ ok. 600 MPa. Ich wadą jest mała odporność na korozję, szczególnie naprężeniową, której zapobiega się poprzez platerowanie czystym aluminium lub stopem Al-Zn. Elementy z tych stopów są najczęściej wytwarzane w formie blach, kształtowników, prętów i odkuwek [17].

Stopy tytanu

Tytan to pierwiastek metaliczny, znany ze swojej dużej wytrzymałości mechanicznej w stosunku do ciężaru właściwego. Jest metalem bardzo lekkim (gęstość 4,5 g/cm³). Tytan charakteryzuje się wysoką temperaturą topnienia wynoszącą 1668°C. Handlowy tytan o czystości 99,2% jest lżejszy od stali o ok. 45%, a cięższy od aluminium o 60%. Posiada bardzo dobre właściwości chemiczne.

Cechuje się doskonałą odpornością na korozję, porównywalną do odporności platyny. Należy do grupy paramagnetyków, przez co wykazuje małą przewodność cieplną oraz elektryczną [2, 5].

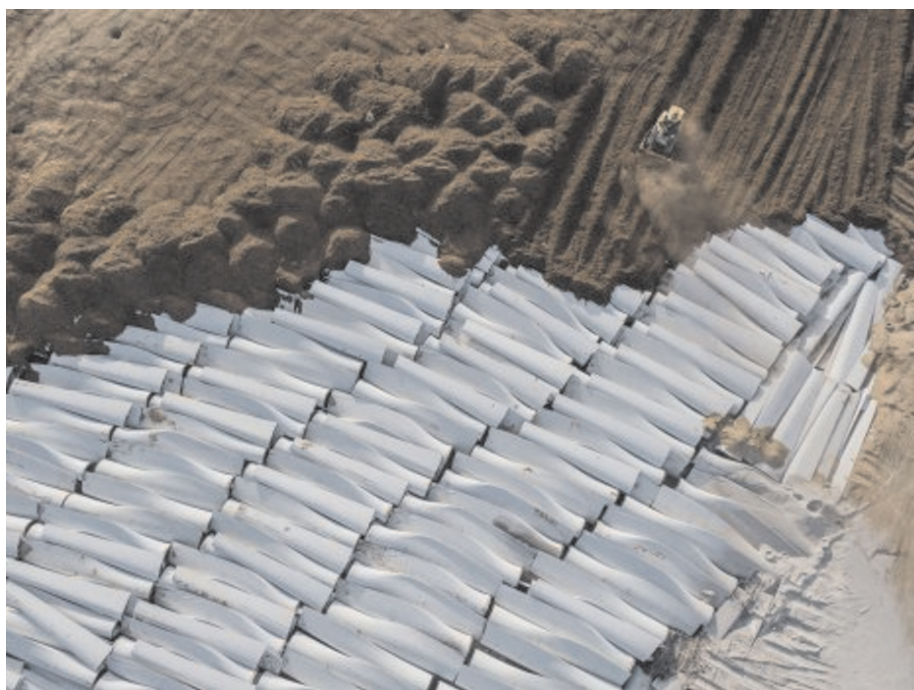
Stopy tytanu wyróżniają się dużą granicą plastyczności na rozciąganie wynoszącą powyżej 1150 MPa, dla stopów Ti-(α + β) i Ti- β przy jednocześnie małej gęstości, ok. 4,6 g/cm³. Dla porównania stale stopowe o dużej wytrzymałości charakteryzują się gęstością ok. 7,8 g/cm³ przy granicy plastyczności na rozciąganie wynoszącej około 1000 MPa [9].

Odmiana alotropowa tytanu jest jedną z właściwości metalurgicznych stopów tytanu wpływającą na moduł Younga, wytrzymałość na rozciąganie, granicę plastyczności. Odmiany alotropowe tytanu mające największe zastosowanie w lotnictwie to odmiana α oraz odmiana β . Różna struktura krystaliczna materiału warunkuje właściwości mechaniczne poszczególnych odmian alotropowych. Tytan- α posiada strukturę heksagonalną, gęsto upakowaną (hcp) i krystalizuje w temperaturze do 882,5°C. Tytan- β krystalizuje w temperaturze 1662°C [9].

Zastosowanie stopów tytanu pozwala na zwiększenie wytrzymałości konstrukcji, przy jednoczesnym zmniejszeniu jej masy. Jest to możliwe dzięki blisko 1,7-krotnie mniejszej gęstości stopów tytanu w porównaniu ze stalami o dużej wytrzymałości [9].

Dzięki tym właściwościom tytan i jego stopy znalazły zastosowanie w lotnictwie w tym BSP oraz przemyśle kosmicznym. Wykorzystywanie tytanu i jego stopów wprowadziło nowe jakościowo konstrukcje lotnicze, czyli nowoczesne silniki i płatowce, których główną cechą jest zmniejszona masa. Pozwoliło to na zwiększenie osiągnięć statków powietrznych, co jest szczególnie istotne w przypadku bezałogowców. W nowoczesnych konstrukcjach, z tytanu i jego stopów wykonuje się między innymi elementy siłowe, elementy łączące (nity, śruby, sworznie itp.) oraz konstrukcje nośne. Udział wagowy tytanu w tworzeniu BSP do zastosowań profesjonalnych jest znaczący [2, 5].

Tytan słynie z trudności, jakie stwarza podczas obróbki. Sam proces wytwarzania tytanu jest obciążony wieloma niedogodnościami. Otrzymuje się go przez redukcję dwutlenku tytanu, a wykorzystywana do tego metoda (metoda



Rys. 11. Składowane łopaty elektrowni wiatrowych [30]

Krolla) jest bardzo kosztowna. Dużym problemem jest proces topnienia tytanu, ze względu na wytwarzanie się wysokiej temperatury. Poza tym tytan w temperaturze topnienia wykazuje aktywność chemiczną. Możliwości skrawania tego materiału uznawane są za niewielkie i w takim przypadku konieczne jest wzięcie pod uwagę także innych czynników poza samym narzędziem, m.in. ciśnienie i ilość chłodziwa, techniki programowania, wymagania dotyczące obrabiarki oraz narzędzia wraz z ich mocowaniem [14, 13]. Odzysk metalu ze złomu i wiórów jest procesem uciążliwym technologicznie. Stosuje się często techniki bezwiórowe, lecz są one ściśle związane z modyfikacją jego składu, i co się z tym wiąże – właściwości mechanicznych [2, 5]. Stopy tytanu i stopy aluminium używane do produkcji części konstrukcyjnych samolotów, w 90 % przypadków wymagają szlifowania przed ukończeniem części [16].

Stopy magnezu

W ostatnich latach daje się zauważyć zwiększone zastosowanie magnezu do budowy statków latających. Związane jest to z opanowaniem technologii zabezpieczania antykorozyjnego tego materiału. Korozja była główną przyczyną ograniczającą jego zastosowanie w lotnictwie. Samoloty wojskowe i helikoptery budowane w latach 50-ych XX wieku zawierały setki kilogramów produktów magnezowych. Samolotem w którym zastosowano największą ilość magnezu w zachodnim przemyśle lotniczym stanowi *Convair B-36 Peacemaker*. Waga elementów składających się z magnezu wynosiła w tym samolocie 8600 kilogramów [10].

Magnez jest najlżejszym ze wszystkich metali konstrukcyjnych i z tego powodu jest doskonałym wyborem do zastosowań lotniczych, w których waga jest krytycznym elementem projektu. Jest metalem o dużej wytrzymałości, dobrze odprowadza ciepło, dobrze tłumi drgania i jest łatwo dostępny. Jego właściwości mechaniczne sprawiają, że jest łatwo obrabialny mechanicznie, możliwe jest jego spawanie, kucie i odlewanie. Dość łatwo łączy się z innymi metalami, dzięki czemu otrzymuje się stopy o pożądanym, bardziej korzystnym dla konkretnych zastosowań własnościach. Czysty magnez stosowany jest rzadko ze względu na jego łatwopalność w wy-

sokich temperaturach i słabą odporność na korozję w wilgotnym środowisku.

Zaletą stopów magnezu, wykorzystywanych w zastosowaniach lotniczych jest ich niewielki ciężar, duży stosunek sztywności do masy, lejność, skrawalność i świetne tłumienie drgań. Stopy magnezu są wykorzystywane w projektowaniu inżynierijnym głównie ze względu na ich duży stosunek wytrzymałości do masy, doskonałą obrabialność i stosunkowo niewielki koszt jednostkowy. Ciężar właściwy magnezu wynosi 1,74, co czyni go najlżejszym metalem konstrukcyjnym. Stopy magnezu ważą około 1,75 do 1,85 grama na centymetr sześcienny. Jest to bardzo korzystna cecha w szczególności w porównaniu z około 2,5 do 3,0 gramów na centymetr sześcienny dla stopów aluminium i 7,8 grama na centymetr sześcienny dla stali [10].

Korzyści ze stosowania wysokowydajnych stopów magnezu obejmują zmniejszenie masy konstrukcji BSP, wyposażenia i ram silników. Specjalne stopy magnezu – dobrze skrawalne, są również wykorzystywane do produkcji przekładni, pokryw i komponentów, obudów elektroniki, układów sterowania lotem i kół. W przypadku zastosowań wojskowych i komercyjnych rozwijane są zaawansowane, wysokotemperaturowe stopy magnezu, które dodatkowo są również odporne na korozję [10].

Dzięki selektywnemu stosowaniu lekkich stopów magnezu zamiast cięższych materiałów konstrukcyjnych możliwe jest zmniejszenie całkowitej masy bezałogowych statków powietrznych wydłużając czas pracy w powietrzu i zwiększając masę zabieranego ładunku.

Ponadto, ceny magnezu mogą w przyszłości znacznie zmniejszyć się w rezultacie wzrostu światowej produkcji. Obecnie firmy odkryły wiele źródeł magnezu. Tani magnez prawdopodobnie przyczyniłby się w niektórych przypadkach do produkcji tańszych stopów magnezu. Wzrost dostępności i różnorodności stopów magnezu zwiększa możliwości projektowe i poszerza zakres stosowalności do wytwarzania dronów.

Podsumowanie

Wbrew powszechnej opinii na temat kompozytów – jako idealnego materiału konstrukcyjnego dla samolotów i szybowców, wiele europejskich firm

lotniczych prowadzi badania nad stopami materiałów lekkich. Rozwijane są zarówno nowe stopy metali lekkich o dużej wytrzymałości, ale także zaawansowane technologie ich kształtowania i obróbki ich powierzchni. Prawidłowe zrozumienie i kompleksowe podejście do całego cyklu eksploatacyjnego BSP, wraz z uwzględnieniem recyklingu pozwala przypuszczać, że udział procentowy metali lekkich i ich stopów w konstrukcji będzie rósł szybciej niż średnia ogólna w lotnictwie. Nie bez znaczenia jest tu fakt, że cykl eksploatacyjny BSP jest znacznie krótszy niż w przypadku większości załogowych konstrukcji lotniczych i duże koszty recyklingu materiałów kompozytowych będą musiały być uwzględnione w cenie wyrobu. Dlatego stopy metali lekkich w szczególności aluminium, tytanu i magnezu stosowane obecnie w BSP do zastosowań profesjonalnych ze względu na swoje korzystne własności, będą także zwiększać swój udział w BSP do zastosowań amatorskich z przyczyn ekologicznych.

Literatura

1. Adams D.F.: *Airframe Structural Materials for Drone Applications*, Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1971. <https://www.rand.org/pubs/reports/R0581z4.html>.
2. Bielawski R.: *Wybrane zagadnienia z konstrukcji statków powietrznych*. Wydawnictwo Akademii Obrony Narodowej, Warszawa 2015.
3. Błędzki A.K., Gorący K., Urbaniak M., Scheibe M.: *Problematyka utylizacji wyrobów i odpadów z kompozytów polimerowych Cz. I. Wielkość produkcji, utylizacja kompozytów z włóknami węglowymi, aspekty legislacyjne, recykling przemysłowy*. *Polimery*, 2019, Vol. 64, nr 11-12.
4. Borkowski R., Łach A., Zwierzyna J.: *Wykorzystanie bezałogowych statków powietrznych w ratownictwie wodnym*. *Bezpieczeństwo. Teoria i Praktyka*, Vol. 2, 2018, s. 115-131.
5. Froes F., Qian M., Niinomi M.: *Titanium for Consumer Applications, Real World Use of Titanium*. Elsevier, 2019.
6. Giernacki W.: *Drony i bezałogowe statki powietrzne (UAV): ku lotom autonomicznym grup latających robotów*



wielowirnikowych operujących w otoczeniu bliskim człowiekowi. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2018.

7. Merksz J., Bajerlein M., Daszkiewicz P.: Recykling cywilnych statków powietrznych, *Logistyka*, Vol.6, 2011.

8. Mięsiak P. (red.): Praca zbiorowa: Aspekty prawne oraz certyfikacyjne bezzałogowych statków powietrznych w świetle wybranych regulacji międzynarodowych, Katowice 2019.

9. Motyka M., Kubiak K., Sieniawski J., Ziaja W.: Hot Plasticity of Alpha Beta Alloys. in: Nurul Amin A.K.M. (Ed.): Titanium Alloys – Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications. In Tech, cap. 5, Rijeka 2012.

10. Saternus M.: Magnez – technologia, produkcja, perspektywy. *Rudy i metale nieżelazne*, nr 6, 2008.

11. Sawicki P.: Bezzałogowe aparaty latające UAV w fotogrametrii i teledetekcji – stan obecny i kierunki rozwoju. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 23, 2012.

12. Valavanis K., Vachtsevanos G.J.: *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer 2015.

13. <https://docplayer.pl/13218040-Rozwiazania-do-tytanu.html>, Sandvik Coromant. Wręgi lotnicze. Rozwiązania do tytanu dla zapewnienia skutecznej obróbki.

14. <http://koledzyprofachu.pl/index.php/toczenie-supersto-pow-zaroodpornych-oraz-tytanu/>

15. <https://linkindustrialtools.com/pl-pl/cataloghi/catalogo-link-pl/>.

16. <https://meetyoucarbide.com/pl/10-useful-tips-for-titanium-milling/>.

17. <http://metale24.pl/Wiadomo%C5%9Bci/Stopy-aluminium-do-zastosowa%C5%84-w-lotnictwie-15967.html>.

18. <http://personal.mecheng.adelaide.edu.au/maziar.arjomandi/aeronauticalengineeringprojects/2006/group9.pdf>.

19. <http://tworzywa.com.pl/Wiadomo%C5%9Bci/Kompozyty-w-przemy%C5%9Ble-lotniczym-20966.html>.

20. https://ulc.gov.pl/_download/publikacje_UAV_raport_ULC_2013.pdf.

21. https://ulc.gov.pl/_download/Drony/3_wdro%C5%BCenie_przepio%C3%B3w_unijnych_PSzymanski.pdf.

22. http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_2362.html.

23. <https://dronedj.com/2020/02/14/drones-monitor-australia-bushfire-detection/>.

24. <https://www.businessinsider.com/amazon-works-with-caa-on-high-speed-drone-delivery-in-the-uk-2019-5?IR=T>.

25. <https://www.welkinuav.com/dhl-provides-drone-delivery-service/>.

26. <https://ag.dji.com/?site=brandsite&from=homepage>.

27. <https://www.precisionhawk.com/>.

28. <https://www.flytechuav.pl/#produkty>.

29. <https://wataha.no/2018/06/06/polski-latajacy-motor-poznaj-hoverbike-raptor/>.

30. <https://www.cire.pl/item,193451,13,0,0,0,0,0,lopaty-turbin-wiatrowych-najtrudniejsze-do-recyklingu.html>. ■