

MERKISZ Jerzy¹
BAJERLEIN Maciej²

MATERIAŁY KOMPOZYTOWE STOSOWANE WE WSPÓŁCZESNYCH STATKACH POWIETRZNYCH

W artykule omówiono zagadnienia materiałów kompozytowych stosowanych we współczesnych konstrukcjach lotniczych. W pracy skupiono się nad zastosowaniami tych zaawansowanych materiałów w najnowszych samolotach B-787 Dreamliner oraz A-380.

Praca ta obejmuje analizę własności wybranych materiałów kompozytowych, a także korzyści wynikających z ich stosowania, jakimi m. in. są: obniżenie masy własnej samolotu, redukcja kosztów, zwiększenie efektywności spalania paliwa, skrócenie czasu składania maszyny oraz większa odporność na korozję. W podsumowaniu przedstawiono korzyści oraz ewentualne zagrożenia wynikające ze stosowania materiałów kompozytowych..

COMPOSITE MATERIALS USED CONTEMPORARY OF THE EC AIRCRAFT CONSTRUCTION

The article discusses the application of composite materials used in modern aircraft construction. This paper focuses on the applications of these advanced materials in the latest aircrafts B-787 and A-380. This work includes the analysis of selected properties of composite materials as well as the benefits arising from their use which are: reduction in weight of the aircraft, cost-cuts, fuel efficiency increase, shorter time of the aircraft assembly and greater resistance to corrosion. The summary presents the benefits and possible risks from the use of composite materials.

1. WSTĘP

Wśród wszystkich gałęzi transportu, transport lotniczy jest jednocześnie najmłodszą i najbardziej dynamicznie rozwijającą się dziedziną. Dynamika ta wynika z coraz szerszego zapotrzebowania na usługi transportu lotniczego, co dotyczy zarówno transportu pasażerskiego, jak i towarowego. Najistotniejszymi wymaganiami, jakie muszą zostać spełnione przez najnowsze konstrukcje statków powietrznych, są: bezpieczeństwo,

¹Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu; 60-965 Poznań; ul. Piotrowo 3.

Tel: + 48 61 665-22-07, Fax: + 48 61 665-22-04, E-mail: jerzy.merkisz@put.poznan.pl

²Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu; 60-965 Poznań; ul. Piotrowo 3.

Tel: + 48 61 665-27-91, Fax: + 48 61 665-22-04, E-mail: maciej.bajerlein@put.poznan.pl

efektywność i relatywnie niskie zużycie paliwa oraz zasięg. Konieczność spełnienia bardzo restrykcyjnych wymagań przez statki powietrzne generuje potrzebę opracowywania nowoczesnych konstrukcji, a co za tym idzie również stosowania w nich nowoczesnych materiałów. Przedmiotem niniejszej pracy jest identyfikacja i analiza materiałów kompozytowych wykorzystywanych w strukturach (ze szczególnym uwzględnieniem materiałów, jakie zastosowano w najnowszych samolotach pasażerskich – Airbusie *A-380* oraz Boeingu *B-787*), a także analiza korzyści wynikających ze stosowania kompozytów, ewentualnych zagrożeń oraz możliwości zastosowania innych nowoczesnych materiałów.

2. MATERIAŁY KOMPOZYTOWE

2.1 Charakterystyka materiałów kompozytowych

Kompozyty są tworzywami składającymi się z co najmniej dwóch komponentów, z tymże każdy z komponentów spełnia inną rolę [1]. Komponenty te są odmiennymi chemicznie fazami, między którymi granice są ściśle określone. Kompozyty wykonuje się sztucznie, a ich podstawową zaletą jest fakt, iż ich strukturę projektuje się w sposób umożliwiający uzyskanie pożądaných właściwości. Elementy kompozytowe mogą mieć formę laminatów, konstrukcji przekładkowych oraz konstrukcji hybrydowych. Właściwości kompozytów mogą być sumą właściwości poszczególnych komponentów (oddziaływanie addytywne) lub mogą być wynikiem oddziaływania synergicznego. Zazwyczaj jeden z komponentów stanowi lepszycze (spoiwo, osnowę), które gwarantuje jego spójność, twardość, elastyczność i odporność na ściskanie, natomiast drugi (faza wzmacniająca, wypełniacz, zbrojenie) zapewnia większość pozostałych właściwości mechanicznych kompozytu (podwyższenie wytrzymałości, sztywności, żarowytrzymałości i odporności na ścieranie). Materiały kompozytowe możemy również podzielić ze względu na budowę wewnętrzną, w związku z czym wyróżniamy [4]:

- kompozyty wzmacniane włóknami,
- kompozyty wzmacniane cząsteczkami,
- kompozyty warstwowe.

2.2 Kompozyty wzmacniane włóknami

Kompozyty wzmacniane włóknami są najważniejszą grupą kompozytów. Same włókna są obiektami podłużnymi (długość znacznie większa niż średnica, $\Phi < 250 \mu\text{m}$). Ich cechą charakterystyczną jest wzrost wytrzymałości przy jednoczesnym zmniejszaniu się średnicy. Wytrzymałość jest również zależna od długości. Do wzmacniania materiałów kompozytowych najczęściej stosuje się włókna szklane, węglowe i grafitowe, borowe, kevlarowe (aramidowe), z węgla krzemu, z tlenków aluminium, a także metalowe [4]. Włókna szklane wytwarzane są przez topienie szkła i odpowiednie formowanie. Charakteryzują się one wysoką wytrzymałością na rozciąganie, przy jednoczesnym stosunkowo niskim module Younga oraz wysokim module sprężystości przy ścinaniu. Są również odporne chemicznie i termicznie, mają wysoką oporność elektryczną oraz niski współczynnik rozszerzalności cieplnej. Ich ogromną zaletą jest niska cena.

Włókna węglowe wytwarza się poprzez pirolizę polimerów organicznych naturalnych oraz syntetycznych. Włókna te zbudowane są ze wstęgowych pasm grafitu. Średnia długość pasma może sięgać kilkuset nanometrów, a średnia grubość kilku nanometrów [7]. W

atmosferze otoczenia włókna te mogą pracować w temperaturach do 400°C, natomiast w atmosferze obojętnej nawet do 1800°C.

2.3 Kompozyty wzmacniane cząsteczkami

Kompozyty mogą być wzmacniane cząsteczkami, których średnica jest większa niż 1µm. Cząsteczkami tymi są z reguły typowe składniki materiałów ceramicznych (tlenki, węgliki, krzemiany, azotki, borki), które charakteryzuje wysoka odporność na ścieranie, żarowytrzymałość, ale też niestety kruchość. Kompozyty o osnowie metalicznej, które wzmacniane są cząsteczkami ceramicznymi, nazywane są cermetami. W produkcji samolotów zastosowanie znalazły kompozyty SAP (Sinter-Aluminium-Pulwer), są to kompozyty na osnowie aluminium wzmacniane cząsteczkami tlenku aluminium Al_2O_3 (o zawartości 5-25%). Wykorzystuje się je na pokrycia samolotów latających z dużymi prędkościami, mogą być również stosowane na łopatki sprężarek silników turbinowych oraz tłoki silników spalinowych.

2.4 Kompozyty warstwowe

Materiały kompozytowe warstwowe stanowią grupę najczęściej stosowanych konstrukcyjnych materiałów kompozytowych. Składają się one z kilku lub wielu warstw połączonych ze sobą dwuwymiarowymi panelami lub płytami, które charakteryzują się wysokimi izotropowymi właściwościami, uprzywilejowanymi w każdej z płyt w jednym kierunku. Konkretnie warstwy ułożone są w stos i połączone wzajemnie ze sobą w taki sposób, że pomiędzy orientacjami uprzywilejowanych kierunków, dla których są najlepsze własności wytrzymałościowe w poszczególnych warstwach, występuje odpowiedni kąt, który zapewnia najkorzystniejsze własności w różnych kierunkach płaszczyzny uzyskanego materiału warstwowego.

Wśród kompozytów warstwowych możemy wyróżnić: laminaty, bimetale, platery, grube warstwy ochronne oraz bardzo cienkie pokrycia [2]. Odrębną grupę materiałów kompozytowych wykorzystywanych w przemyśle lotniczym stanowią kompozyty przekładkowe typu „sandwich” z rdzeniem w kształcie plastra miodu (rys. 1) lub z pianek polimerowych, ceramicznych lub metalowych.



Rys.1. Struktura przekładkowa typu „sandwich” z rdzeniem w kształcie plastra miodu[8].

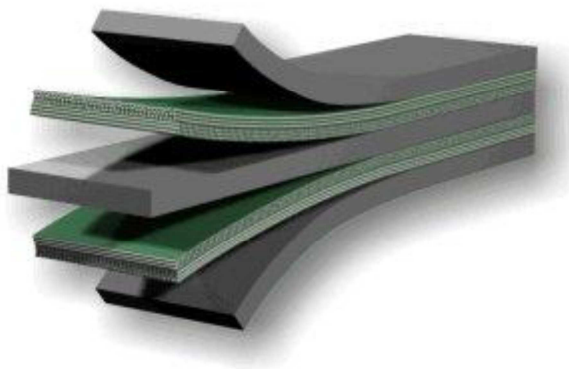
3. ZASTOSOWANIE KOMPOZYTÓW WE WSPÓŁCZESNYCH SAMOLOTACH

3.1 Airbus A-320

Samolot A-380-800 (nazywany potocznie *SuperJumbo*) jest maszyną dwupoziomową, czterosiłnikową. Jest to obecnie największy samolot pasażerski świata, który może pomieścić (w zależności od konfiguracji) nawet do 853 pasażerów [9].

W A-380 zastosowano najnowsze osiągnięcia w zakresie materiałów. Samolot ma konstrukcję półskorupową, duralowo-kompozytową. Skrzydła i kadłub samolotu wykonane są głównie z najnowocześniejszych stopów aluminium (stanowią one około 50% łącznej masy elementów konstrukcyjnych). Niezwykle szerokie zastosowanie w samolocie znalazły materiały kompozytowe – stanowią one 25% masy całego samolotu, z czego 22% to różnego rodzaju kompozyty włókniste z osnową z żywicy epoksydowej, natomiast pozostałe 3% masy struktury podstawowej samolotu wykonano z laminatu szklano-węglowego GLARE (Glass Fibre Reinforced Aluminium Laminates) [6]. Wśród kompozytów włóknistych z osnową z żywicy epoksydowej, „najmocniejszą” grupę stanowią kompozyty polimerowe wzmacniane włóknem węglowym CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer). Kompozyt typu GLARE należy do laminatów stopów aluminium i włókna szklanego. Warto zauważyć, iż zastosowanie GLARE w A-380 jest pierwszym zastosowaniem tego materiału w samolocie cywilnym. Materiał ten został opatentowany w 1987 roku i otrzymał certyfikaty umożliwiające wykorzystanie go w przemyśle lotniczym.

Omawiany materiał składa się z warstw folii ze stopu aluminium (o grubości 0,3-0,5 mm) ułożonych naprzemiennie z arkuszami preimpregnatu szklanego (0,2-0,3 mm) przesyconego żywicą. Żywica pełni rolę spoiwa zarówno włókien szklanych, jak i łączonych warstw. W samolocie A380-800 laminat GLARE stanowi 3% struktury podstawowej maszyny, składa się on z naprzemiennie ułożonych warstw duraluminium (o składzie 4,5% Cu, 1,5% Mg, 0,6 % Mn) i jednokierunkowego włókna szklanego [4].



Rys.2. Schemat GLARE uwidaczniający warstwowość materiału [9].

W zależności od grubości prepragu oraz orientacji jego włókien, opracowanych zostało sześć standardowych klas kompozytu GLARE (niektóre również z podtypami; 1, 2, 3, 4, 4a, 4b, 5, 6a, 6b), które różnią się nieco odmiennymi właściwościami wytrzymałościowymi. Właściwości kompozytu GLARE są zależne od właściwości fizycznych duraluminium, właściwości włókien szklanych i ich ułożenia.

Połączenie arkusza metalu i jednokierunkowo ułożonego włókna szklanego pozwala na uzyskanie znacznej poprawy właściwości zmęczeniowych uzyskiwanego materiału, gdyż daje możliwość wykorzystania odmiennych cech każdego ze składników. W rezultacie uzyskuje się materiał łączący najlepsze właściwości komponentów. Jako najważniejsze wśród wspomnianych właściwości można wskazać:

- dla aluminium: dużą udarność, łatwość obróbki, a także zapewnienie włóknom szklanym ochrony przed promieniowaniem ultrafioletowym i wilgocią,
- dla włókien szklanych: wysoką wartość naprężeń niszczących.

W wyniku połączenia GLARE można poddawać walcowaniu, nitowaniu, jak również można wierceć otwory w elementach z niego wykonanych [4]. Gęstość włókien szklanych wynosi $1,97 \text{ g/cm}^3$, natomiast stopu aluminium $2,77 \text{ g/cm}^3$. Zastosowanie włókna szklanego jako komponentu, pozwoliło więc na obniżenie gęstości materiału. Szacuje się, iż przybliżone wartości uzyskanych „oszczędności” to 10% objętości materiału oraz 20-30% masy projektowanej struktury.

Poza tym można wymienić szereg innych korzyści, jakie zyskuje się poprzez stosowanie GLARE w zamian za aluminium. Są to przede wszystkim:

- wyższa wytrzymałość właściwa,
- możliwość zwiększania liczby otworów pod nity, wynikająca z faktu, iż nie wpływają one na wytrzymałość zmęczeniową materiału, w wyniku czego warstwy włókien zapobiegają rozprzestrzenianiu się pęknięć,
- różna orientacja włókien szklanych, dzięki której uzyskuje się właściwości mechaniczne odpowiednie dla danego elementu konstrukcyjnego,
- zwiększona odporność na ogień (włókna szklane działają jak izolacja ablacyjna),
- zwiększona wytrzymałość na uderzenie (włókna tworzą wtórną drogę przenoszenia obciążenia),
- wyższa w porównaniu z duraluminium odporność na korozję.

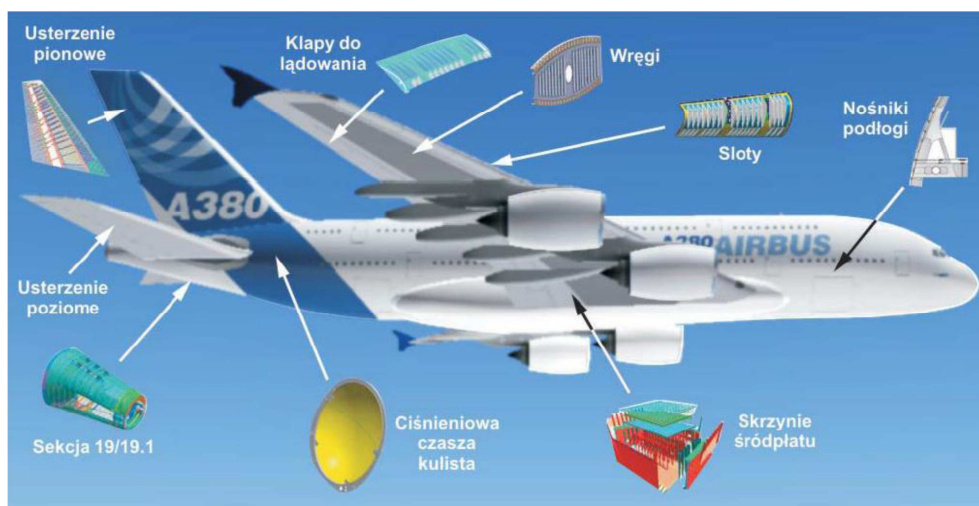
Największą grupą kompozytów włóknistych z osnową z żywicy epoksydowej w masie struktury A-380 są kompozyty CFRP (stanowiące 22%). Na wybór tej grupy materiałów wpłynęły przede wszystkim właściwości zastosowanych włókien węglowych, które charakteryzują się wysoką sztywnością, sięgającą 935 GPa (dla porównania: aluminium 70 GPa). Dodatkowo gęstość kompozytów wzmacnianych włóknem węglowym stanowi 60% gęstości aluminium. Oznacza to, iż zastosowanie CFRP pozwala na zaoszczędzenie nawet 40% masy w stosunku do konstrukcji aluminiowych [10].

Warto zauważyć, iż kompozyty polimerowe wzmacniane włóknami są podatne technologicznie – kształtowanie z nich części o skomplikowanych kształtach jest relatywnie łatwe.

Włókna węglowe stosowane w CFRP charakteryzują się dobrą odpornością cieplną i chemiczną – ich właściwości nie zmieniają się w atmosferze nieutleniającej aż do temperatury 2000°C, co wyraźnie wskazuje na ich przewagę.

Podstawowymi zaletami przemawiającymi za stosowaniem włókien węglowych do materiałów o osnowie polimerowej jest ich mała gęstość, dobra przewodność cieplna i elektryczna, zdolność do tłumienia drgań, a także niska absorpcja promieniowania rentgenowskiego [5].

Zastosowanie nowoczesnych materiałów, w tym 25% udział materiałów kompozytowych w samolocie A-380 dało szereg korzyści. Korzyści te dotyczą przede wszystkim konstrukcji maszyny. Prócz wspomnianego wcześniej zmniejszenia masy o około 40%, dzięki zastosowaniu kompozytów CFRP, lekkie materiały konstrukcyjne pozwoliły na zwiększenie udźwigu samolotu o 15000 kg, co dało możliwość zabrania na pokład około 150 dodatkowych pasażerów. Wybrane zastosowania materiałów CFRP na samolocie A-380 przedstawiono na rysunku 3.

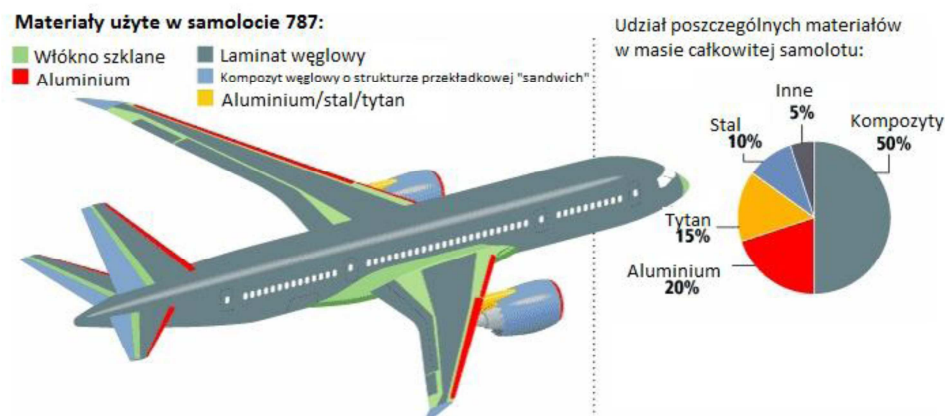


Rys.3. Przykłady różnych zastosowań w ramach 22% udziału CFRP w budowie samolotu Airbus A-380 [6].

Zastosowanie materiałów kompozytowych (a także nowoczesny kształt skrzydeł) pozwoliło również zwiększyć wydajność samolotu. W porównaniu z innymi samolotami zmniejszona jest również emisja CO₂ – aż do 75g/km/pasażera. Nowoczesna konstrukcja oraz materiały (kompozyty oraz nowoczesne stopy aluminium) pozwoliły na zmniejszenie bezpośrednich kosztów operacyjnych przypadających na 1 pasażera o około 15%.

3.2 Airbus A-320

W porównaniu do opisanych powyżej eksploatowanych już nowoczesnych konstrukcji samolotów pasażerskich, prawdziwą rewolucją wydaje się być najnowszy samolot firmy Boeing – B-787 Dreamliner. Maszyna ta jest wykonana z materiałów kompozytowych z blisko 50% ich udziałem w łącznej masie, co przekłada się na około 80% udziału objętości samolotu [9]. Pozostałe materiały użyte w B-787 to: aluminium (20% masy), tytan (15% masy), stal (10% masy) i inne (5% masy) [11].



Rys.4. Udział i rozmieszczenie poszczególnych materiałów w samolocie B-787 [8].

Z materiałów kompozytowych wykonana jest większość głównych struktur płatowca, tj. skrzydła, ogon oraz kadłub. *B-787* ze względu na materiały z których jest wykonany został nazwany „pierwszym samolotem pasażerskim z tworzyw sztucznych”. Materiały kompozytowe użyte w *B-787* są jednocześnie wytrzymalsze, lżejsze i bardziej odporne na korozję niż aluminium, a niższa masa samolotu oznacza możliwość zabrania większej liczby pasażerów, a także zwiększenie zasięgu. Wykorzystanie kompozytów pozwoliło również na uzyskanie korzystnych zmian w przepływie laminarnym, dzięki czemu poprawiono aerodynamikę samolotu.

Warto zauważyć, iż ze względu na to, że tworzywo sztuczne nie podlega procesowi utleniania chemicznego, istnieje możliwość utrzymania wyższej wilgotności w kabinie samolotu, co gwarantuje większy komfort. Brak spoin oraz nitów obniża koszty, a superlekka konstrukcja umożliwia znaczne zmniejszenie zużycia paliwa.

Jednym z materiałów zastosowanych w *Dreamlinerze* jest kompozyt węglowy o strukturze typu „Sandwich”. Carbon-Sandwich (rys. 1) stanowi specjalną klasę materiałów kompozytowych, które wytwarzane są przez połączenie dwóch cienkich, ale sztywnych plastrów z lekkim, ale grubszym rdzeniem przypominającym plaster miodu. Struktura taka pozwala na osiągnięcie wysokiej sztywności materiału, przy zachowaniu niskiej gęstości.

Laminat węglowy jest konstrukcją zespoloną, która składa się z warstw włókien węglowych nasyconych polimerem. Na samolocie *B-787* struktury laminatów węglowych składają się z łańcuchów węgla uformowanych w taśmę, która jest przesiąknięta żywicą. Warstwy te układane w sposób umożliwiający uzyskanie odpowiedniej grubości oraz odpowiedniego kształtu struktury. Każda kolejna warstwa materiału nakładana jest tak, że włókna węglowe umiejscowione są w odpowiednim kierunku, co zazwyczaj określane jest jako warstwa orientacji. Po ułożeniu wszystkich warstw w danej części, cały zespół utwardza się w autoklawie. Proces ten trwa około kilku godzin. Po utwardzeniu gotowa struktura staje się częścią samolotu. Pozostałe kompozyty użyte przy produkcji *Dreamlinera*, składają się z różnych materiałów, które połączone razem tworzą materiały o zaawansowanych właściwościach.

Technologia zastosowana do wytworzenia kompozytów wzmocnionych włóknem ciągłym, jest nazywana technologią nawijania włókna („filament winding”). Technologia ta jest droższa od tradycyjnych, zapewnia jednak dużo wyższą wytrzymałość kompozytu, a także powtarzalność parametrów podczas produkcji seryjnej.

Reasumując, dzięki zastosowaniu kompozytów w samolocie *B-787* uzyskano przede wszystkim znaczną redukcję masy samolotu, wysoką odporność na korozję, większą wytrzymałość na uderzenia oraz zmniejszenie ogólnych kosztów eksploatacji, łatwiejszą produkcję skomplikowanych kształtów, minimalizację liczby elementów (w porównaniu z wcześniejszymi, aluminiowymi konstrukcjami), a także zmniejszenie czasu montażu samolotu w stosunku do wcześniejszych, konwencjonalnych konstrukcji. Szacuje się, iż zużycie paliwa w stosunku do innych samolotów w tej klasie jest około 20% mniejsze, z czego 1/3 przyrostu wydajności wynika z różnego rodzaju udoskonaleń aerodynamicznych oraz zastosowania omawianych materiałów kompozytowych.

Zastosowanie kompozytów w tak dużej skali daje również znaczne ułatwienie oględzin samolotu oraz ewentualnych napraw.

Nie należy również zapominać, iż pomimo ogromu zalet stosowania materiałów kompozytowych, istnieją również wady. Pierwsza z nich związana jest z ewentualnymi uszkodzeniami konstrukcji samolotu wywołanymi uderzeniem pioruna – będzie one większe, niż w przypadku tradycyjnej konstrukcji aluminiowej. Poza tym, materiały kompozytowe mają właściwości porowate i w przypadku wchłaniania wilgoci ulegają rozszerzeniu – mogą w nich powstawać długookresowe uszkodzenia konstrukcji. Istnieje również problem bezpieczeństwa pasażerów w przypadku zaistnienia pożaru. Niezwykle istotną wadą jest fakt, iż zastosowanie kompozytów na tak wielką skalę wymagało powstania nowych miejsc i sposobów produkcji oraz montażu urządzeń, co znacznie zwiększyło koszty produkcji.

4. WNIOSKI

Transport lotniczy wykazuje coraz większe zapotrzebowanie na nowoczesne środki transportu, zapewniające nie tylko bezpieczeństwo, ale również niskie koszty eksploatacji. Obserwowany w ostatnich latach wzrastający udział kompozytów w konstrukcjach statków powietrznych świadczy o tym, iż materiały te pozwalają obecnie w dużej mierze sprostać stawianym wymaganiom. Prowadzone są liczne badania nad udoskonalaniem materiałów kompozytowych. Jednocześnie analiza struktury najnowocześniejszych płatowców pasażerskich wykazała, iż kompozyty mają znaczny udział procentowy w masie samolotu, a nawet stanowią większość.

Dodatkowo ze względu na znaczny wzrost liczby pasażerów oraz transportowanych ładunków drogą lotniczą, a także prognozowane dalsze wzrosty w tym zakresie – wzrasta zapotrzebowanie na nowe statki powietrzne. Wszystko to sprawia, iż w ciągu najbliższych lat produkcja materiałów kompozytowych oraz liczba samolotów wykonanych w dużej części z tych materiałów znacznie wzrosną. Materiały kompozytowe charakteryzują się przede wszystkim niską gęstością, przy jednoczesnej wysokiej wytrzymałości, odporności na temperaturę czy wytrzymałości zmęczeniowej. Poszczególne kompozyty znacznie różnią się tymi cechami między sobą, biorąc jednak pod uwagę całą grupę materiałów można stwierdzić, iż zastosowany w danym elemencie kompozyt zawsze charakteryzuje się właściwościami znacznie lepszymi, niż jego „tradycyjny” odpowiednik, a dodatkowo pozwala zaoszczędzić masę. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie niższych kosztów

eksploatacji, do których m. in. możemy zaliczyć koszty paliwa. Z kolei zmniejszone zużycie paliwa oznacza niższą emisję gazów cieplarnianych oraz substancji szkodliwych, co jest kolejną korzyścią wynikającą z zastosowania kompozytów.

Jak udowodniono, korzyści stosowania materiałów kompozytowych w konstrukcjach lotniczych są ogromne. Nie należy jednak zapominać o negatywnych stronach stosowania tych materiałów.

Po pierwsze stosowanie materiałów kompozytowych na dużą skalę zmusiło do tworzenia specjalnych miejsc, które pozwoliłyby na ich wytwarzanie. Długo również mierzono się z problemem kosztów wytwarzania kompozytów – często były one większe niż możliwe korzyści. Dodatkowo kompozyty są materiałami bardzo trudnymi do recyklingu, a ich rozkład trwa bardzo długo, co powoduje znaczne obciążenie środowiska.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Chodorowski J., Ciszewski A., Radomski T.: *Materiałoznawstwo lotnicze*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1996.
- [2] Dobrzański L.A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego*. Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa, 1996.
- [3] Dziejic T.: *Raport Rynek Lotniczy Air Transport Market 2009*. Wiadomości Turystyczne. Instytut Turystyki, Warszawa, 2009.
- [4] Godzimirski J.: *Lotnicze materiały konstrukcyjne*. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2008.
- [5] Kaczmar J. W., Mayer P.: *Właściwości i zastosowania włókien węglowych i szklanych*, Warszawa 2007.
- [6] Oczóś K. E.: *Kompozyty włókniste – właściwości, zastosowanie, obróbka ubytkowa*, *Mechanik* 7/2008.
- [7] Owsiak Z.: *Materiały Kompozytowe, Wybrane zagadnienia*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Kielce, 2006.
- [8] <http://siag.project.ifi.uio.no/problems/grandine/>
- [9] <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family>
- [10] <http://www.fmlc.nl/en/researchdevelopment/resultscases>
- [11] http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/users_guide/eng