

# DUROPLASTY ORAZ TERMOPLASTY WYSOKOTEMPERATUROWE W PREPREGACH JAKO OSNOWY KOMPOZYTÓW WĘGLOWYCH DO WYTWARZANIA STRUKTUR LOTNICZYCH

BARTŁOMIEJ WAŚNIEWSKI

Centrum Technologii Kompozytowych, Instytut Lotnictwa, Al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa,  
[bartlomiej.wasniewski@ilot.edu.pl](mailto:bartlomiej.wasniewski@ilot.edu.pl)

## Streszczenie

W artykule przedstawiono różne typy polimerów wykorzystywanych jako osnowy kompozytów polimerowych wzmacnianych włóknem węglowym (*Carbon Fibre Reinforced Polymers*, CFRP), mających zastosowanie do wytwarzania wyrobów lotniczych. Przedstawiono budowę polimerów stosowanych na osnowy kompozytów CFRP, w tym duroplasty oraz termoplasty. Przedstawiono ich temperatury charakterystyczne oraz wybrane właściwości fizyczno-mechaniczne. Wskazano ich wady i zalety z uwzględnieniem parametrów krytycznych w procesach technologicznych. Opisano technologie produkcji wyrobów lotniczych z zastosowaniem kompozytów CFRP. Przedstawiono aspekty ekonomiczne i środowiskowe stosowania prepregów, w których użyto wysokotemperaturowych termoplastów (WTP) jako osnowy włókien węglowych w porównaniu z duroplastami.

Słowa kluczowe: prepreg, duroplasty, termoplasty, CFRP, PEEK, PPS.

## 1. WPROWADZENIE

Od przeszło 25 lat termoplasty zdobywają rynek technologiczny w zakresie komercyjnych zastosowań w konstrukcjach zarówno cywilnych, jak i wojskowych ze szczególnym uwzględnieniem statków powietrznych. Powszechnie stosowanymi termoplastami w wielu gałęziach przemysłu są, między innymi, należące do grupy polimerów amorficznych – Polistyren (PS), Polichlorek Winyłu (PCW) oraz częściowo krystaliczne – Polietylen o niskiej (LDPE) lub wysokiej (HDPE) gęstości cząsteczkowej. Maksymalne temperatury pracy tych materiałów nie przekraczają 100°C. Pomimo nienagannych właściwości mechanicznych ich odporność termiczna oraz chemiczna jest zbyt mała, aby stosować je jako osnowy do preimpregnatów węglowych używanych w produkcji konstrukcji lotniczych. Spośród polimerów termoplastycznych używanych jako osnowy prepregów, najpopularniejszymi są PEEK (*PoliEteroEteroKeton*), PEKK (*PoliEtero-KetonoKeton*), oraz PPS (*Polisiarczek Fenylenu*, ang. *PolyPhenylene Sulfone*).

Współczesne konstrukcje, w tym również lotnicze, są w coraz większej części wytwarzane z kompozytów węglowych CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymers*), które ustępują miejsca kompozytom z zastosowaniem, na przykład włókien szklanych GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymers*). Czołowi producenci prepregów (TOHO, TENCATE) [1,2] posiadają w swojej ofercie prepregi na osnowie z wysokotemperaturowych termoplastów (odpowiednio Tenax® TPUD PEEK-HTS45 oraz TenCateCetex®TC1200), które z powodzeniem są stosowane przez czołowych producentów z branży lotniczej, takich jak Boeing lub Airbus. Termoplasty stanowią odpowiedź na rosnące zapotrzebowanie na nowe materiały mogące mieć zastosowanie w konstrukcjach lotniczych o obniżonej masie całkowitej z zachowaniem wysokich właściwości mechanicznych. Ponadto pomimo wysokiej ceny samych termoplastów, takich jak PEK, PEEK oraz PPS, całkowity koszt wytworzenia części jest znacznie niższy w wyniku znacznego skrócenia czasu produkcji oraz braku konieczności stosowania innych drogich technologii.

Instytut lotnictwa pozostając w zgodzie ze swoją misją zdefiniowaną w pierwszej dekadzie XXI w., stara się być konkurencyjnym na międzynarodowym rynku badawczo – rozwojowym sięgając po nowe wyzwania aby sprostać konkurencji w zakresie oferowanych technologii [3]. Stąd podjęcie tematu wytwarzania kompozytów o osnowie termoplastycznej będących obiecującą alternatywą dla obecnie stosowanych kompozytów termo oraz chemoutwardzalnych. O atrakcyjności kompozytów termoplastycznych w stosunku do tych drugich stanowi ich wysoka odporność na obciążenia dynamiczne, wysoka odporność chemiczna, hydrofobowość, jak również możliwość pracy w szerokim zakresie temperatur. Niski współczynnik pochłaniania wilgoci zapewnia wyższą odporność na oddziaływanie zmiennych warunków atmosferycznych.

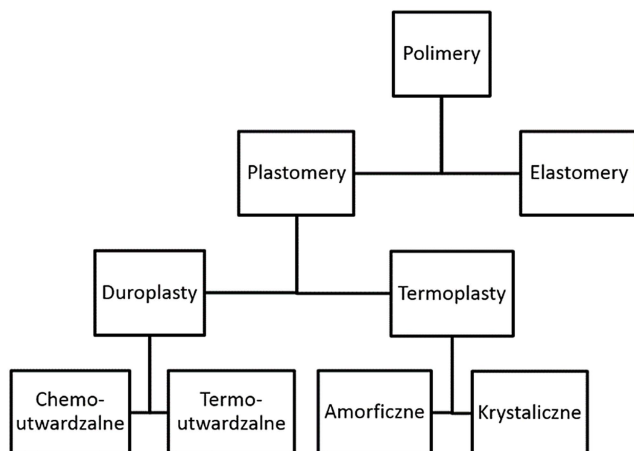
## 2. OSNOWY KOMPOZYTÓW CFRP

W przypadku kompozytów CFRP powszechnie stosowanymi osnowami są żywice epoksydowe lub fenolowe, należące do termo- i chemoutwardzalnych duroplastów. Zastosowanie tego typu materiałów jako osnowy, daje szerokie możliwości w zakresie wytwarzania skomplikowanych konstrukcji, zarówno z użyciem technologii autoklawowej, jak i bez autoklawowej (OOA). Prefabrykaty, z których wytwarza się konstrukcje lotnicze noszą nazwę prepregów i są tkaninami lub jednokierunkowymi taśmami włókien węglowych przesyconych żywicą. Produkcja konstrukcji lotniczych z prepregów z zastosowaniem technologii autoklawowej w znaczny sposób podnosi jakość wytwarzanych struktur, a zatem poprawia ich właściwości fizyczno-mechaniczne. Kompozyty, w których wykorzystywane są prepregi CFRP, można wytwarzać również bez użycia drogich autoklawów, co pomimo nieco niższej jakości wyrobu w stosunku do poprzedniej metody jest dużo tańsze.

### 2.1. Plastomery

Polimery wytwarzane przez człowieka, popularnie nazywane tworzywami sztucznymi, można klasyfikować ze względu na budowę fizyczną, zachowanie pod wpływem obciążenia, temperatury (Rys. 1).

Analizując strukturę polimerów wyróżnia się polimery liniowe oraz usieciowane. Te pierwsze zbudowane są z długich łańcuchów, w których atomy powiązane są ze sobą przez bardzo silne wiązania



Rys. 1. Ogólny schemat podziału polimerów [opracowanie własne, 2015]

kowalencyjne, lecz między łańcuchami występują słabe wiązania drugorzędowe (vander Waalsa). Cechą charakterystyczną polimerów usieciowanych jest występowanie pomiędzy łańcuchami silnych poprzecznych wiązań kowalencyjnych, dzięki którym powstaje przestrzenna struktura polimeru.

## DUROPLASTY

Duroplasty należą do grupy plastomerów, które w podwyższonej temperaturze lub pod wpływem czynnika chemicznego utwardzają się (sieciują), przekształcając się w nietopliwy i nierozpuszczalny produkt o strukturze przestrzennie usieciowanej. Duroplasty są bardziej wytrzymałe od termoplastów, natomiast nie ma możliwości ich przetwórstwa.

## TERMOPLASTY

W przeciwieństwie do żywic epoksydowych lub fenolowych będących polimerami termo- lub chemoutwardzalnymi z grupy duroplastów, termoplasty nie tworzą przestrzennie usieciowanej struktury po procesie utwardzania. Są polimerami o wysokiej masie cząsteczkowej, które dzięki swojej budowie mogą przechodzić wielokrotnie w stan plastyczny, a po ochłodzeniu twardnieją. Dzięki temu można je wielokrotnie formować bez obawy o zmianę właściwości fizyczno-mechanicznych. W klasycznych polimerach termoplastycznych, długie łańcuchy makrocząsteczek tworzą atomy połączone wiązaniami kowalencyjnymi. Łańcuchy te natomiast są między sobą splecione, a niejednokrotnie połączone słabymi wiązaniami drugorzędowymi. Sposób reakcji łańcuchów termoplastów na działanie sił zewnętrznych zależy w dużej mierze od ich struktury, a także temperatury, w jakiej się znajdują. Wyróżnia się trzy charakterystyczne temperatury, mające istotny wpływ na zachowanie się łańcuchów polimeru:

1. temperatura zeszklenia  $T_g$ , poniżej tej temperatury termoplast przechodzi w stan amorficzny i staje się kruchy;
2. temperatura topnienia  $T_m$ , powyżej tej temperatury zanika faza krystaliczna odpowiedzialna za sztywność polimeru;
3. temperatura płynięcia  $T_p$ , powyżej tej temperatury wiązania między łańcuchami są bardzo słabe i polimer płynie (bez odkształceń sprężystych).

Po przekroczeniu temperatury degradacji  $T_d$ , wiązania kowalencyjne w termoplaście zostają rozerwane i polimer ulega rozpadowi termicznemu. Jest to proces nieodwracalny. Dodatkowo należy pamiętać, że zawartość fazy krystalicznej w polimerach termoplastycznych wpływa zasadniczo na ich właściwości fizyczno-mechaniczne. W tabeli 1. zestawiono temperatury charakterystyczne dla typowych termoplastów.

Tab. 1. Charakterystyczne temperatury popularnych termoplastów [opracowanie własne na podstawie 3]

Polimer	Temperatura płynięcia, $T_p$ , °C	Temperatura topnienia, $T_t$ , °C	Temperatura zeszklenia, $T_g$ , °C
Polietylen niskiej gęstości (LDPE)	-	110	-120
Polistyren (PS)	165	-	100
Polichlorek winylu (PCW)	212	-	87
Poliwęglan (PC)	225	-	145
Poliamid (PA)	-	265	50

## 2.2. Termoplastyczne polimery wysokotemperaturowe

Poza popularnymi, łatwo dostępnymi i relatywnie tanimi termoplastami, na rynku znajdują się termoplasty wysokotemperaturowe, do których zaliczmy między innymi, PEEK lub PPS, które są polimerami częściowo krystalicznymi.

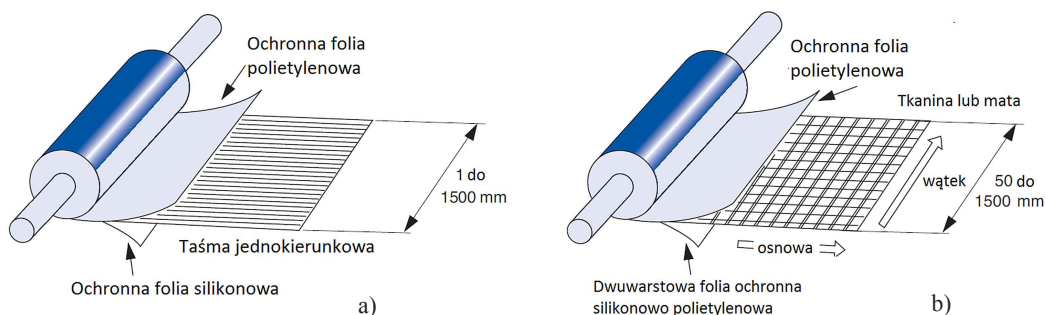
Zawartość fazy krystalicznej znacząco wpływa na sztywność, sprężystość oraz wytrzymałość mechaniczną i chemiczną. W przypadku w/w termoplastów zawartość fazy krystalicznej wynosi <90%. Im niższy jest udział fazy krystalicznej – uporządkowanej (a co za tym idzie – wyższy fazy amorficznej – nieuporządkowanej), tym lepsze są właściwości związane z absorpcją energii. Zawartością fazy krystalicznej można sterować poprzez procesy technologiczne. Krytycznym parametrem w tym przypadku jest tempo chłodzenia termoplastu podczas przejścia ze stanu lepkiego do stałego. Wyżej wymienione termoplasty mają wysoką temperaturę topnienia oraz zeszklenia. PEEK jest polimerem o wysokiej odporności na działanie czynników chemicznych, promieniowanie UV oraz utlenianie termiczne. PPS jest wysoce niepalny oraz stabilny termicznie. W tabeli 2 zestawiono przykładowe wartości wymienionych parametrów dla PPS i PEEK.

Tab. 2. Temperatury zeszklenia, płynięcia oraz udział fazy krystalicznej termoplastów wysokotemperaturowych [opracowanie własne na podstawie 4, 2015]

Polimer	Temperatura zeszklenia, $T_g$ , °C	Temperatura topnienia, $T_p$ , °C	Zawartość fazy krystalicznej, %
PEEK	143	343	0÷40
PPS	89	307	0÷65

### 3. WYTWARZANIE KOMPOZYTÓW CFRP

Klasyczną metodą wytwarzania warstwowych kompozytów włóknistych, stosowaną do dzisiaj, jest tzw. metoda na mokro. Polega ona na układaniu poszczególnych warstw suchych taśm, tkanin lub mat, które następnie są ręcznie przesycające systemem żywicznym. W związku z generowaniem dużej ilości szkodliwych oparów podczas wprowadzania polimerowej osnowy, niezbędne jest stosowanie zabezpieczeń w postaci masek lub okularów ochronnych. Dodatkowym ryzykiem jest stosowanie rozdzielnego systemu żywicznego (żywica + utwardzacz), gdyż w przypadku niewłaściwego stosunku wspomnianych reagentów (zbyt dużej ilości utwardzacza) może dojść do gwałtownej reakcji egzotermicznej, stanowiącej poważne zagrożenie zdrowia lub życia. Niedomiar utwardzacza spowoduje wytworzenie materiału nieusieciowanego o słabych właściwościach fizyczno-mechanicznych. Celem wyeliminowania w/w zdarzeń opracowano system wstępnej impregnacji mat, tkanin lub taśm jednokierunkowych systemami żywicznymi, zawierającymi częściowo przereagowaną żywicę ze środkiem sieciującym (utwardzacz + katalizator). Takie systemy zaimpregnowanych włókien, tkanin lub taśm noszą nazwę prepregów. Na rysunku 2 przedstawiono schematy dwóch rodzajów prepregów: z użyciem taśmy jednokierunkowej (Rys. 2a), oraz z użyciem tkaniny lub maty (Rys. 2b.)



Rys. 2. Schemat wytwarzania prepregów z zastosowaniem a) taśmy jednokierunkowej, b) maty lub tkaniny [5]

W przypadku prepregów osnowę mogą stanowić, zarówno systemy żywic termoutwardzalnych, jak również polimery termoplastyczne z uwzględnieniem układów wysokotemperaturowych. W tabeli 3 zestawiono rodzaje prepregów z uwzględnieniem rodzaju wzmocnienia, ich zalet i zastosowania.

Biorąc pod uwagę systemy żywic termoutwardzalnych wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje [5]:

1. Epoksydowe – o wysokiej odporności na działanie czynników środowiskowych, wysokiej wytrzymałości oraz łatwej obróbce ze względu na niską lepkość;
2. Fenolowe – o dobrej odporności termicznej, o niewielkim dymieniu w przypadku wystąpienia pożaru oraz krótkim czasie sieciowania;
3. Poliimidowe – o bardzo wysokiej odporności temperaturowej (możliwość pracy nawet w temperaturze 260°C), wysokiej wytrzymałości na działanie czynników chemicznych, jak również dobrych właściwościach mechanicznych.

Tab. 3. Zestawienie prepegów pod kątem rodzaju wzmocnienia jego zalet i zastosowania [5]

Rodzaj wzmocnienia	Zalety	Zastosowanie
Taśmy jednokierunkowe	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Wysoka sztywność i wytrzymałość w określonym kierunku;</li> <li>2. Możliwość stosowania systemów nawijających;</li> <li>3. Wykorzystanie technologii AFP (<i>Automatic Fibre Placement</i>) oraz ATL (<i>Automatic Tape Laying</i>);</li> <li>4. Możliwość wytwarzania struktur o skomplikowanych kształtach;</li> <li>5. Możliwość uzyskania struktur anizotropowych poprzez sterowanie kierunkowością warstw.</li> </ol>	Lotnicze struktury pierwszorzędowe, struktury nośne, technologie wiatrowe
Tkaniny	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Wysoka sztywność i wytrzymałość w dwóch kierunkach;</li> <li>2. Możliwość zastosowania różnych rodzajów włókien w jednej tkaninie;</li> <li>3. Niski poziom zmienności kształtu (wichrowania)</li> </ol>	Przemysł lotniczy – struktury pierwszo i drugorzędowe, sport
Maty	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Wielokierunkowa sztywność i wytrzymałość;</li> <li>2. Brak wpływu kierunku poszczególnych warstw na właściwości mechaniczne kompozytu;</li> <li>3. Obniżone koszty produkcji;</li> <li>4. Brak występowania potencjalnych wad produkcyjnych w postaci szczelin między włóknami lub warstwami.</li> </ol>	Łopaty turbin wiatrowych, przemysł samochodowy

Każdy z w/w systemów ma zastosowanie w różnych aplikacjach. Podstawową wadą prepegów, w których stosuje się systemy żywic termoutwardzalnych (PTU), jest konieczność stosowania skomplikowanego procesu utwardzania wytwarzanych struktur z uwzględnieniem rygoru jakości procesu technologicznego. Niewielkie zmiany temperatury w procesie utwardzania oraz dotwardzania mogą skutkować krytyczną zmianą parametrów wytrzymałościowych wytworzonej struktury. Dodatkowo trwałość PTU jest ograniczona ze względu na częściowo rozpoczęty proces sieciowania impregnatu. Przechowywanie PTU odbywa się w niskich temperaturach (około 20°C), a trwałość takiego materiału nie przekracza zwykle jednego roku. W związku z powyższym nie ma możliwości kupowania takich systemów „na zapas”. Jeżeli potencjalny producent nie wykorzysta zakupionego prepegu w ciągu okresu jego ważności, może narazić swoich klientów na straty spowodowane stosowaniem kompozytów o znacznie obniżonych właściwościach. Pomimo tego w lotnictwie nadal podstawową grupą materiałów konstrukcyjnych z obszaru prepegów są te wykorzystujące żywice termoutwardzalne. W latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku wraz z odkryciem włókien węglowych rozpoczęła się era kompozytów węglowych, które dzisiaj stanowią podstawę kompozytów konstrukcyjnych. O ile na początku drugiej połowy lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku kompozyty stanowiły zaledwie 5% masy całkowitej statków powietrznych, dzisiaj w samolocie Airbus A350 kompozyty stanowią około 50% całkowitej masy tego samolotu.

W przypadku zastosowania termoplastycznej osnowy w prepegach węglowych uzyskuje się prefabrykat o niemalże nieskończonym terminie przydatności z zachowaniem właściwości mechanicznych i przetwórczych. Dodatkową zaletą prepegów, w których zastosowano

termoplastyczną osnowę jest możliwość ich wielokrotnego przetwarzania, jak również recykling [6,7]. W przypadku termoutwardzalnej duroplastycznej osnowy proces ten jest niemożliwy ze względu na nieodwracalny proces sieciowania. Jednocześnie stosując termoplasty istnieje możliwość naprawy uszkodzonego kompozytu w przypadku utraty ciągłości osnowy lub jej plastycznego odkształcenia poprzez zastosowanie podwyższonej temperatury. Dzięki takiemu zabiegowi można doprowadzić do relaksacji osnowy i uzyskania jej pierwotnej formy wraz zachowaniem właściwości mechanicznych [8]. W tabeli 4 zestawiono niektóre właściwości mechaniczne zarówno termoutwardzalnych żywic, jak również termoplastów stosowanych jako impregnaty włókien węglowych.

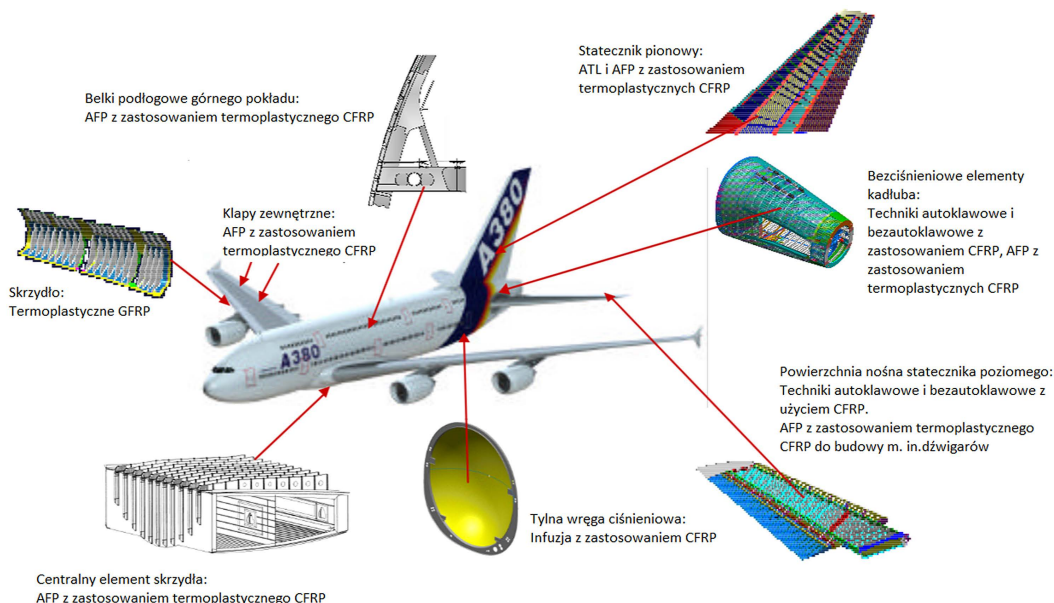
Tab. 4. Właściwości mechaniczne duroplastów i termoplastów stosowanych na osnowy preimpregnatów węglowych w temperaturze pokojowej [opracowanie własne na podstawie 9,10]

Rodzaj osnowy	Skrót	Gęstość, g/m <sup>3</sup>	Moduł Younga, GPa	Wytrzymałość na zerwanie, MPa	Odkształcenie do zniszczenia, %
<b>Duroplasty</b>					
poliester	UP	1,10 ÷ 1,23	3,1 ÷ 4,6	50 ÷ 75	1,0 ÷ 6,5
epoksyd	EP	1,10 ÷ 1,20	2,6 ÷ 3,8	60 ÷ 85	1,5 ÷ 8,0
fenol	-	1,00 ÷ 1,25	3,0 ÷ 4,0	60 ÷ 80	1,8
winyloester	VE	1,12 ÷ 1,13	3,1 ÷ 3,3	70 ÷ 81	3,0 ÷ 8,0
bismaleimid	BMI	1,20 ÷ 1,32	3,2 ÷ 5,0	48 ÷ 110	1,5 ÷ 3,3
<b>Termoplasty</b>					
polipropylen	PP	0,90	1,1 ÷ 1,6	31 ÷ 42	100 ÷ 600
poliamid 6	PA6	1,10	2,0	70 ÷ 84	150 ÷ 300
polisarczek fenylenu	PPS	1,36	3,3	84	40
polieteroeteroketon	PEEK	1,26 ÷ 1,32	3,2	93	50
polieteroimid	PEI	1,27	3,0	105	60

Istotną różnicą pomiędzy osnowami duroplastycznymi i termoplastycznymi są parametry procesu przetwarzania i czas konsolidacji poszczególnych warstw kompozytu. W przypadku duroplastycznej osnowy czas utwardzania może trwać od kilku do kilkunastu godzin, podczas gdy wytworzenie kompozytu z prepregu węglowego o termoplastycznej osnowie może odbywać się *in situ*. W przypadku duroplastów parametry utwardzania kompozytu nie przekraczają odpowiednio w przypadku temperatury 200°C i ciśnienia 10 bar. W przypadku termoplastycznej wysokotemperaturowej osnowy niezbędne jest stosowanie wysokich temperatur i ciśnień. Na przykład, dla PEEK wartości te wynoszą odpowiednio 400°C oraz 14 bar. Jednakże pomimo wysokich parametrów technologicznych niezbędnych w przypadku użycia wysokotemperaturowych termoplastów jako osnowy prepregów węglowych, zainteresowanie tymi materiałami wśród głównych producentów z branży lotniczej rośnie, głównie ze względu na wysoką odporność tych materiałów na temperaturę, wytrzymałość, krótki czas konsolidacji oraz możliwość recyklingu.

#### 4. TERMOPLASTY W LOTNICTWIE

Istnieje wiele obszarów zastosowań termoplastów w konstrukcjach lotniczych. Przykładem może być jeden z dużych producentów z branży lotniczej, który dążąc do zmniejszenia masy foteli zastąpił wiele elementów ze stopu aluminium, kompozytowymi, wytworzonymi z prepregów węglowych z osnową z PPS. Masa tych elementów, w tym oparcia i siedziska, podłokietnika, osłony ekranów wideo, została zmniejszona o 40÷50%. Spośród różnych polimerów wybrano tworzywo Fortron dostarczane przez firmę Ticona [11]. Materiał ten jest samoistnie trudnopalny, cechuje go niski wskaźnik dymienia i wysoki wskaźnik tlenowy. Innym przykładem zastosowania prepregów z termoplastyczną osnową jest oparcie lędźwiowe u podstawy tylnej części fotela. Część ta, o wymiarach 160x300 cm, jest wykonana z PPS o masie około 150 g, a wykonana ze stopu aluminium ma masę 280 g, co daje różnicę 130 g. Biorąc pod uwagę, że Airbus A380 w wersji standardowej ma 555 foteli, redukcja masy w jednym samolocie wynosi 72 kg. Postęp, który dokonał się w technologiach materiałów kompozytowych, spowodował, że projektantom A380 (największy na świecie samolot pasażerski) nie brakowało materiałów do wyboru. Z kolei PoliEteroEteroKeton (PEEK), zbrojony włóknem węglowym (CFRP), stanowi poważną konkurencję dla lekkich stopów aluminium stosowanych w strukturach pierwszorzędowych. Dzięki zastosowaniu w/w materiału w konstrukcji „central wing box”, projektanci AIRBUS’a A380 odciążyli ten element struktury o półtony [12]. Ponadto, belki podłogowe górnego pokładu i tylna wręga ciśnieniowa również zostały wykonane z zastosowaniem wspomnianego CFRP. Na rysunku 3 przedstawiono elementy, do wytworzenia których zastosowano między innymi termoplastyczne CFRP.

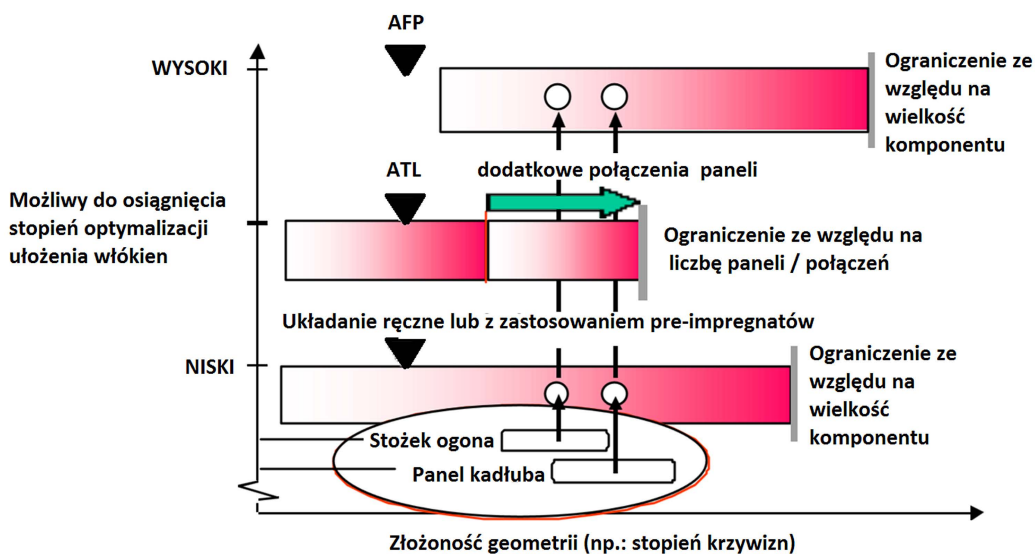


Rys. 3. Główne zastosowania duroplastycznych i termoplastycznych prepregów w konstrukcji samolotu Airbus A380 [12]



Preimpregnaty węglowe na termoplastycznej osnowie w postaci taśm jednokierunkowych są wykorzystywane przez producentów z branży lotniczej w technikach AFP oraz ATL pozwalając na wytwarzanie skomplikowanych struktur *in situ*. [14– 19]. Wykorzystanie w/w technologii w produkcji elementów z zastosowaniem materiałów termoplastycznych redukuje koszty i nakłady czasowe. Jest to rozwiązanie bardzo wygodne do budowy kilku różnych części, bez potrzeby wytwarzania kosztownych form ogrzewanych, przeznaczonych do każdej pojedynczej części. Technologia ta jest najbardziej efektywna z punktu widzenia kosztów i czasu wprowadzania kompozytów termoplastycznych. Szybkie uaktualnianie ustawień pozwala na poprawę kształtu, sprawiając, że ta technologia jest idealna do prób produkcyjnych. Zgodnie z informacjami producentów systemów ATL i AFP popartymi wieloletnimi testami, wprowadzenie w/w technologii umożliwia redukcję całkowitych kosztów produkcji gotowych elementów o nawet 40%. Co prawda koszty termoplastów w odniesieniu do tradycyjnie stosowanych systemów termoutwardzalnych są wyższe o około 30%, jednak stanowią one w ogólnym rozrachunku niewielki udział w całym procesie produkcyjnym. Wspomniane wyżej technologie stanowią niewątpliwą konkurencję dla klasycznych metod wykorzystujących ręczne metody układania poszczególnych warstw kompozytu. Należy jednocześnie wskazać na różnice między technologiami ATL oraz AFP. Rozwój tych dwóch technologii postępuje równolegle, jednakże w przypadku bardziej skomplikowanych kształtów można zauważyć przewagę AFP. Technologia Automated Tape Laying umożliwia układanie taśm o szerokościach 80÷300 mm, podczas gdy z użyciem technologii AFP można ułożyć wstęgę szerokości 150 mm korzystając z 32 pojedynczych pasm termoplastycznego CFRP. Zastosowanie cyfrowo sterowanej głowicy robota w systemie AFP (wyposażonej w system uplastyczniający w postaci lasera oraz układ noży umożliwiający precyzyjne dozowanie włókien) pozwala na uzyskanie jednorodnych warstw z minimalnymi potencjalnymi wadami produkcyjnymi.

Zastosowanie urządzeń wykorzystujących technologię AFP wraz z oprogramowaniem do analiz i optymalizacji, pozwala w powtarzalny sposób wytwarzać elementy wysokiej jakości. Na rysunku 4 porównano różne techniki wytwarzania z zastosowaniem CFRP i termoplastycznych CFRP.



Rys. 4. Porównanie różnych technologii wytwarzania z zastosowaniem CFRP oraz termoplastycznych CFRP [12]

Rekomendowanym materiałem termoplastycznym, sprawdzonym z użyciem robota AFP, jest Cytec APC2, zdolny do pracy w temperaturze 120°C (ok. 250 F), która jest znacznie wyższa niż temperatura wymagana dla konstrukcji lotniczych.

Tabela 5 zawiera porównanie między jednokierunkowymi taśmami wykonanymi z termoplastycznego APC2 PEEK oraz z termoutwardzalnych materiałów stosowanych z użyciem autoklawu CYCOM®997 and HEXPLY®8552.

Tabela 5. Porównanie wytrzymałości na ściskanie próbki z otworem (OHC) oraz wytrzymałości na ściskanie po uderzeniu (CAI) dla różnych materiałów wykorzystywanych w technologii AFP [12]

L.p.	Materiał	CAI ksi, (MPa)	OHC ksi (MPa)
1	Cytec®APC2	47 (324)	49 (339)
2	CYCOM®997	26 (179)	34 (234)
3	Hexply®8552	35 (241)	48 (330)

Ponadto okazuje się, iż materiały termoplastyczne wykazują wyższą tolerancję zniszczenia (*damage tolerance*) zgodnie wymogami, które zostały jasno zdefiniowane w ramach certyfikacji dla CS 23 i CS 25.

## 5. WNIOSKI

Szybkie tempo rozwoju technologii materiałowych i rosnące zapotrzebowanie przemysłu lotniczego [19 – 25] na nowe materiały pozwala sformułować stwierdzenie, że:

1. WTP wykorzystywane jako osnowy kompozytów CFRP są niewątpliwą przyszłością dla przemysłu lotniczego i zastosowanie materiałów termoplastycznych w przypadku konstrukcji lotniczych jest uzasadnione ze względu na ich właściwości mechaniczne:

- wytrzymałość na rozciąganie dla WTP jest o 20% większa niż w przypadku użycia epoksydów;
- odkształcenia dla WTP w momencie zerwania są o 400% większe od odkształceń w momencie zerwania osiąganych w konstrukcjach z użyciem epoksydów.

W przypadku odkształceń jest to bardzo istotne ze względu na zachowanie ciągłości struktury nawet w przypadku odkształceń plastycznych.

2. Czas wytwarzania konstrukcji lotniczych z wykorzystaniem materiałów termoplastycznych może być nawet 24 razy krótszy, a naprawy tych konstrukcji są łatwiejsze niż w przypadku materiałów termoutwardzalnych, co ma istotny wpływ na koszty procesów naprawczych.

Korzyści z zastosowania termoplastów są następujące:

1. wysoka tolerancja na zniszczenie (*damage tolerance*);
2. nieskończony czas żywotności prepregów na termoplastycznej osnowie w temperaturze pokojowej (dla prepregów z epoksydową osnową czas ten wynosi 12 miesięcy w temperaturze -18°C);
3. w przypadku konstrukcji wytworzonych z CFRP z osnową WTP możliwa jest korekcja kształtu po procesie wytwarzania, co nie jest możliwe w przypadku kompozytów CFRP z duroplastyczną osnową.

4. omimo relatywnie wysokiej ceny termoplastów oraz wysokich parametrów procesu technologicznego (temperatury oraz ciśnienia) w porównaniu z duroplastami, całkowity koszt tego procesu można obniżyć nawet o 40%.
5. stosowanie oporowych i ultradźwiękowych technologii łączenia, które nie mają zastosowania w przypadku innych kompozytów węglowych pozwala na pozbycie się dodatkowych elementów łączących w postaci dużej liczby śrub lub nitów, stanowiących, dodatkową masę, której redukcja jest tak istotna w przypadku konstrukcji statków powietrznych;
6. wysoka odporność chemiczna i trudnopalność wysokotemperaturowych materiałów termoplastycznych jest istotna ze względu na bezpieczeństwo ich użytkowania.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] [http://www.tohotenax-eu.com/uploads/media/2012-03\\_Gilliot\\_CFRTP.PDF](http://www.tohotenax-eu.com/uploads/media/2012-03_Gilliot_CFRTP.PDF).
- [2] Mondo, J., Wijskamp, S., Lenferink, R., 2012, Overview of Thermoplastic Composite ATL and AFP Technologies, *ITHEC 2012, Messe Bremen*.
- [3] Wiśniowski, W., 2011, „Instytut Lotnictwa – niestandardowa droga do sukcesu”, *Prace Instytutu Lotnictwa*, 214, str. 24 -27.
- [4] [http://www.pluscomposites.eu/sites/default/files/technical-articles-chapter6-English\\_0.pdf](http://www.pluscomposites.eu/sites/default/files/technical-articles-chapter6-English_0.pdf).
- [5] [http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Prepreg\\_Technology.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Prepreg_Technology.pdf).
- [6] Erber, A., Spitko, S., 2014, “Expanded role for thermoplastic composites”, *Reinforced Plastics*, **58**(4), pp. 29 – 33.
- [7] Stewart R., 2011, “Thermoplastic composites – recyclable and fast to process”, *Reinforced Plastics*, **55**(3), pp. 22 – 28.
- [8] Haanappel, S.P., ten Thije, R.H.W., Sachs, U., Rietman, B., Akkerman, R., 2014, “Formability analyses of uni-directional and textile reinforced thermoplastics”, *Composites: Part A*, 56, pp. 80–92.
- [9] Klein, R., 2011, *Laser welding of Plastics*, first edition Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [10] Beland, S., 1990, *High performance thermoplastic resin and their composites*, Noyes Data Corporation, USA.
- [11] [http://www.celanese.com/-/media/Engineered%20Materials/Files/Presentations/PPS-014\\_Fortron\\_ThermoplasticCompositesPPT\\_AM\\_1013.pdf](http://www.celanese.com/-/media/Engineered%20Materials/Files/Presentations/PPS-014_Fortron_ThermoplasticCompositesPPT_AM_1013.pdf).
- [12] Pora, J., 2001, “Composite Materials in the Airbus A380 – From History to Future”, *13<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials – ICCM 13 Beijing*, 1695.
- [13] Qureshi, Z., Swait, T., Scaife, R., El-Dessouky, H.M., 2014, “In situ consolidation of thermoplastic prepreg tape using automated tape placement technology: Potential and possibilities”, *Composites: Part B*, 66, pp. 255 – 267.
- [14] Lukaszewicz, D., Ward, C., Potter K.D., 2012, “The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future”, *Composites: Part B*, 43, pp. 997 – 1009.
- [15] Mass, D., 2015, “Progress in automated ply inspection of AFP layups”, *Reinforced Plastics*, **59**(5), pp. 242–245.
- [16] Maurer, D., Mitschang, P., 2015, “Laser-powered tape placement process – simulation and optimization”, *Adv. Manuf.: Polym. Compos. Sci.*, 00, 1-9.

- [17] Ray, D., Comer, A.J., Lyons, J., Obande, W.O., Jones, D., Higgins, R.M.O, McCarthy, M.A., 2014, "Fracture toughness of carbon fiber/polyether ether ketone composites manufactured by autoclave and laser-assisted automated tape placement", *Journal of Applied Polymer Science*, **132**(11).
- [18] Comer, A.J., Ray, D., Obande, W.O., Jones, D., Lyons, J., Rosca, R.M. Higgins, R.M.O, McCarthy, M.A., 2015, "Mechanical characterisation of carbon fibre-PEEK manufactured by laser-assisted automated-tape-placement and autoclave", *Composites: Part A* 69, pp. 10–20.
- [19] Lindbäck, J.E., Björnsson, A., Johansen, K., 2012, "New Automated Composite Manufacturing Process: Is it possible to find a cost effective manufacturing method with the use of robotic equipment?", *5th International Swedish Production Symposium*, pp. 523 – 531.
- [20] Stoeffler, K., Andjelic, S., Legros, N., Roberge, J., Schougaard, S.B., 2013, "Polyphenylene sulfide (PPS) composites reinforced with recycled carbon fiber", *Composites Science and Technology*, 84, pp. 65–71.
- [21] Django, M., 2015, Leading the way in thermoplastic composites, *10.1016/j.repl.2015.08.067*.
- [22] Marsh, G., 2014, "Composites flying high", *Reinforced Plastics*, **58**(3), pp. 14 – 18.
- [23] Deng, S., Djukic, L., Paton, R., Ye, L., 2015, "Thermoplastic-epoxy interactions and their potential applications in joining composite structures – A review", *Composites: Part A*, 68, pp. 121 – 132.
- [24] Sardiwal, S.K., , Sami, Md. A., Sai, Anoop B.V., Susmita, G., Vooturi, L., Uddin, S.A., 2014, "Advanced Composite Materials in Typical Aerospace Applications", *Global Journal of Researches in Engineering: D Chemical Engineering*, **14**(1), pp. 5 – 10.
- [25] Vijaya Kumar, K., Safiulla, M., Khaleel Ahmed, A.N., 2013, "An experimental evaluation of fiber reinforced polypropylene thermoplastics for aerospace applications", *Journal of Mechanical Engineering*, **43**(2), pp. 92 – 97.

## **HIGH TEMPERTAURE THERMOPLASTS IN PREPREGS AS A MATRIX OF CARBON FIBRE COMPOSITES USED IN AEROSTRUCTURES**

### **Abstract**

In the article different types of polymers used as a matrix of CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymers) applicable in the production of aircraft structures are discussed. Polymers structure used as a GFRP matrix includes thermoplastics and thermosets. The characteristic temperatures and their physical and mechanical properties are shown. Advantages and disadvantages of those materials are explained in terms of the critical technological parameters. The technology of aero structures manufacturing are presented with used of CFRP prepregs. Additionally the economic and the environmental aspects of use of the CFRP thermoplastic prepregs in comparison with thermoset prepregs are shown.

Keywords: prepregs, duroplastics, thermoplastics, CFRP, PEEK, PPS.