

STRUKTURA I WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH

Opracował: dr inż. Jarosław Bieniaś

1. Ogólna charakterystyka materiałów kompozytowych.

Kompozyty obejmują bardzo liczną i różnorodną grupę materiałów konstrukcyjnych. Określenie kompozyty oznacza materiał powstały przez ścisłe zespolenie co najmniej dwóch chemicznie różnych materiałów (faz – zbrojącej i osnowy) w taki sposób, aby mimo wyraźnej granicy rozdziału między nimi nastąpiło dobre i ciągłe połączenie składników oraz możliwie równomierne rozłożenie fazy zbrojącej w osnowie.

Klasyfikacja materiałów kompozytowych (MK) obejmuje głównie podział ze względu na osnowę i rodzaj fazy zbrojącej.

W zależności od rodzaju osnowy MK można podzielić na:

- kompozyty o osnowie metalowej,
- kompozyty o osnowie niemetalowej: ceramicznej, polimerowej.

Natomiast ze względu na rodzaj fazy zbrojącej wyróżniamy kompozyty:

- zbrojone włóknami: ciągłymi, krótkimi,
- zbrojone cząsteczkami,
- zbrojone dyspersyjnie.

2. Osnowa materiałów kompozytowych

Osnową materiałów kompozytowych mogą być metale, ceramika i tworzywa sztuczne. Rolą osnowy jest utrzymanie fazy zbrojącej w określonym miejscu w przestrzeni tworzywa oraz deformacja pod wpływem obciążeń, przenosząc naprężenia na składniki fazy zbrojącej.

Osnowa metalowa

Osnowę metalową kompozytów stanowi żelazo i jego stopy, stopy niklu, metale i stopy nieżelazne, głównie aluminium, magnez, miedź, srebro, cyna, ołów, tytan, intermetale (Ni_3Al , $NiAl$, Ti_3Al , $TiAl$, $MoSi_2$) oraz nadstopy.

Osnowami MK są powszechnie stosowane stopy seryjnej produkcji, gwarantujące z założenia odpowiednie właściwości wytrzymałościowe, technologiczne i eksploatacyjne.

Osnowa ceramiczna

Do osnowy ceramicznej w materiałach kompozytowych możemy zaliczyć ceramikę techniczną – głównie Al_2O_3 i azotek krzemu Si_3N_4 , szkła i tworzywa szklanoceramiczne (np. układ $LiO_2-Al_2O_3-SiO_2$) oraz węgiel.

Osnowa polimerowa

Na osnowę kompozytów polimerowych stosuje się:

- żywice termoutwardzalne: fenoplasty i aminoplasty,
- żywice chemoutwardzalne: poliestrowe, epoksydowe i silikonowe,
- tworzywa termoplastyczne: poliamidy, polipropylen, poliestry termoplastyczne i poliwęglan oraz w mniejszych ilościach polimery styrenowe.

3. Fazy zbrojące materiałów kompozytowych

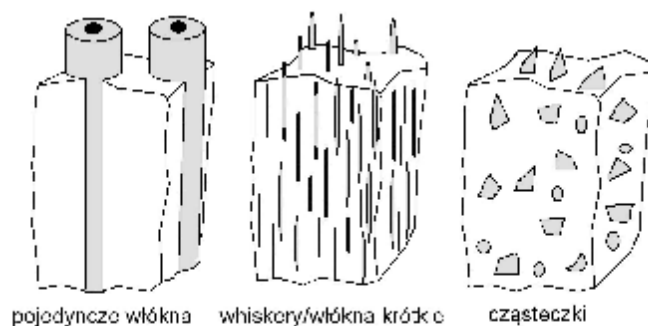
W materiałach kompozytowych fazę zbrojącą stanowią cząsteczki bądź włókna.

Cząsteczki zbrojące - związki chemiczne typu tlenków (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2), węglików (SiC , TiC), grafitu, miki oraz fly ash'u (popiół lotny).

Tabela 1. Właściwości wybranych cząsteczek ceramicznych stosowanych do zbrojenia

Materiał	Gęstość kg/m^3	Temp. top K	Ciepło właściwe $KJ/(kg \cdot K)$	Wsp. przew.ciep. $W/(m \cdot K)$	Mikrotwardość. GPa	Wsp. rozsz. ciep. $\alpha, 10^6, 1/K$
SiC	3200	-	1,8	45-450	21-37	3,8
Al_2O_3 (korund)	3970	2288	1,09	30,2	10-12	6,5-8,0
C (grafit)	2250	-	1,63	11,6-175	-	-

Wielkość stosowanych cząsteczek waha się w granicach od kilku do kilkuset mikrometrów. Udział objętościowy cząsteczek może przekraczać 25%, a dla niektórych układów dochodzi do 60%.



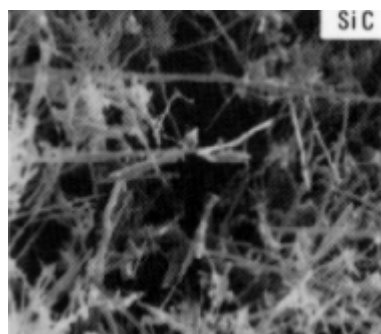
Rys. 1. Schematyczne przedstawienie typów zbrojenia w metalowych materiałach konstrukcyjnych.

Włókna - stosuje się włókna metalowe (stalowe ze stali chromowo-niklowej, wolframowe, molibdenowe berylowe, tytanowe), ceramiczne (włókna szklane, węglowe, borowe, włókna z węgliku krzemu oraz tlenku glinu), tworzyw sztucznych (włókna poliamidowe-kevlar, włókna polietylenowe oraz whiskery (włókna monokrystaliczne).

Tabela 2. Wybrane właściwości wysoko-wytrzymałych włókien zbrojących kompozyty.

Włókno Właściwość	PE wysokowytrzymały	Aramid	Włókna węglowe		Szkło E	Ceramika		
			wysoko wytrzymałe	wysoko modułowe		Al ₂ O ₃	SiC	Bor
Wytrzymałość R _m [10 ³ MPa]	3,0	3,0	3,4	2,3	2,1	1,5	2,5	3,5
Moduł Younga, E [10 ³ MPa]	130	124	240	400	75	400	200	450
Wytrz. na ścisk. [10 ³ MPa]	-	0,25	2,5	1,5	0,5	1,9	1,8	-
Gęstość [g/cm ³]	0,95	1,44	1,74	1,83	2,6	3,9	2,6	2,6
Temp. pracy [°C]	60	200	500	600	350	1000	1000	2000
Temp. top. [°C]	140	450 (rozpadu)	3600	3600	700 (mięknięcia)	2000	2700	2400

Włókna zbrojące kompozyty posiadają średnicę poniżej 100 μm i znaczną długość. Przyjmują formę rovingu, tkanin lub mat. Stanowią one do 60% udziału objętościowego w MK.



Rys. 2. Preformy ceramiczne zbrojące lokalnie kompozyty (tłok silnika) oraz mikrostruktura preformy z włókien SiC (b).

Wytwarza się również tzw. preformy (rys. 2) – odpowiednio ukształtowane z włókien krótkich a nawet cząsteczek, porowate wkładki o kształcie wyrobu w szczególności służące do lokalnego zbrojenia MK.

4. Technologie wytwarzania materiałów kompozytowych

4.1. Wytwarzanie materiałów kompozytowych o osnowie metalowej

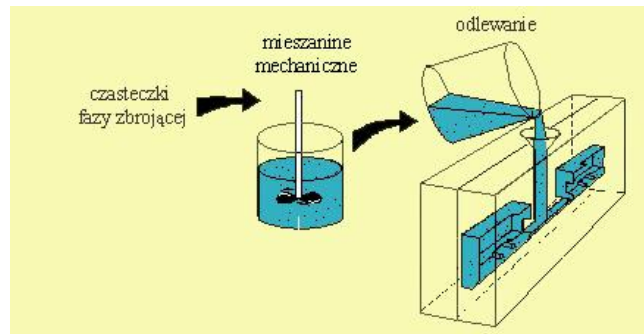
Kompozyty z osnową metalową wytwarzane są metodami bezpośrednimi i pośrednimi.

Metody bezpośrednie – najbardziej znaną metodą jest metoda kierunkowej krystalizacji stopów eutektycznych. Włóknistą strukturę kompozytu uzyskuje się w wyniku procesu krzepnięcia stopu z jednokierunkowym odprowadzeniem ciepła. W technologii tej wykorzystuje się fakt, że w procesie krzepnięcia stopu eutektycznego poszczególne fazy struktury kompozytowej powstają równocześnie ze stanu ciekłego.

Metody pośrednie – cykl technologiczny wytwarzania MK obejmuje etapy przygotowania zbrojenia, przygotowania osnowy i ich łączenia z wykorzystaniem technologii odlewniczych lub obróbki plastycznej.

? **Metody metalurgii proszków** - polegają na mieszaniu proszku osnowy ze zbrojeniem, prasowaniu na zimno, spiekaniu i doprasowaniu. Technologią metalurgii proszków wytwarza się kompozyty umacniane dyspersyjnie oraz kompozyty zbrojone cząsteczkami. Przykładem kompozytu umacnianego dyspersyjnie jest SAP (aluminium zbrojone cząsteczkami Al_2O_3 o wielkości $1\mu m$ w ilości do 20%).

? **Techniki odlewnicze** - obejmują odlewanie grawitacyjne, infiltrację ciśnieniową, prasowanie w stanie ciekłym, nasycanie swobodne oraz wymuszone. Technologiami odlewniczymi wytwarza się zarówno kompozyty zbrojone cząsteczkami jak i zbrojone włóknami. Najczęściej stosowaną techniką kształtowania kompozytów z cząsteczkami jest metoda mieszania z równoczesnym wprowadzeniem cząsteczek do ciekłego metalu (rys. 3). Natomiast do wytwarzania MK zbrojonych np. preformą szerokie zastosowanie znajduje metoda prasowania w stanie ciekłym (squeeze casting).



Rys. 3. Schemat wytwarzania kompozytów zbrojonych cząsteczkami metodą mieszania mechanicznego.

? **Technologia obróbki plastycznej** – obejmuje głównie metody walcowania, wyciskania i ciągnięcia umożliwiające otrzymywanie drutów kompozytowych (np. nadprzewodzące druty Cu-Nb₂Sn)

4.2. Metody wytwarzania kompozytów o osnowie ceramicznej

Metody te obejmują głównie:

- prasownie i spiekanie - kompozyty zbrojone cząsteczkami i whiskerami,
- techniki wykorzystujące gęstwę - kompozyty o osnowie szklanej i szklanoceramicznej.
- formowanie przetłoczeniowe - kompozyty o osnowie szklanej, szklanoceramicznej.
- osadzanie próżniowe metodami chemicznymi lub fizycznymi - najczęściej stosowany proces CVD.
- samorozwijającą się syntezę wysokotemperaturową.

4.3. Metody wytwarzania kompozytów o osnowie polimerowej

Kompozyty o osnowie termoplastów – wytwarza się je metodami wtrysku i wytłaczania. Metody znajdują zastosowanie do otrzymywania kompozytów zbrojonych włóknami krótkimi oraz cząsteczkami ceramicznymi.

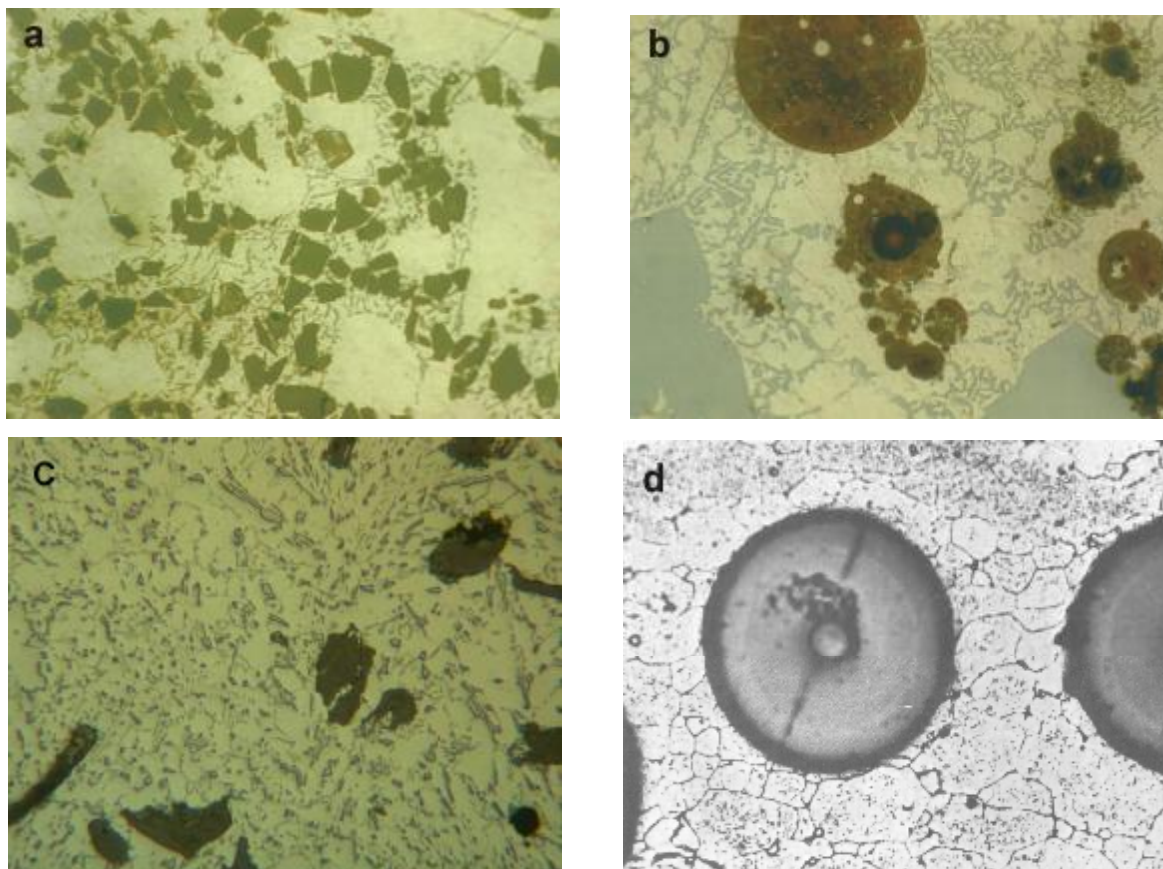
Kompozyty o osnowie tworzyw termoutwardzalnych – kompozyty tego rodzaju wytwarza się dwuetapowo. W pierwszej fazie wytwarza się tłoczywa (żywica z dodatkami) metodą moką lub suchą. W drugiej fazie metodą prasowania tłoczego, przetłoczonego lub płytowego, tłoczywa przetwarzają się na gotowe wyroby.

Kompozyty o osnowie żywic chemoutwardzalnych (laminaty) – proces wytwarzania laminatów obejmuje nałożenie na powierzchnie formy (zewnątrzna, wewnątrzna) warstwy rozdzielającej, warstwy licowej, tzw. żelkotu (specjalna żywica zawierająca barwnik i śro-

dek tiksotropowy, np. krzemionkę koloidalną), następnie warstwy zbrojenia i osnowy. MK o osnowie żywic chemoutwardzalnych wytwarza się metodami ręcznymi i maszynowymi. Zastosowanie znajdują metody: laminowania ręcznego, natryskowego, ciśnieniowego, prasowania na gorąco, formowania metodą nawijania oraz nasycania pasm rovingu w sycidle. Zbrojenie stanowią cząsteczki, włókna krótkie, tkaniny i włókna ciągłe.

5. Struktura i właściwości materiałów kompozytowych

Struktura materiałów kompozytowych jest uzależniona od technologii wytwarzania, właściwości materiału osnowy, właściwości, rodzaju i udziału fazy zbrojącej, od strefy połączenia osnowa-zbrojenie ale również od rozkładu fazy zbrojącej. Równomierny rozkład fazy zbrojącej jest cechą charakterystyczną prawidłowej struktury MK. Przykłady struktur wybranych materiałów kompozytowych przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Mikrostruktura kompozytów o osnowie Al.: stop AK9/20%obj. cząsteczek SiC (a), AK12/9%wag cząsteczek fly ash'u (b), stop AK7/5,7%wag. cząsteczek grafitu (c), Al/włókna boru (d).

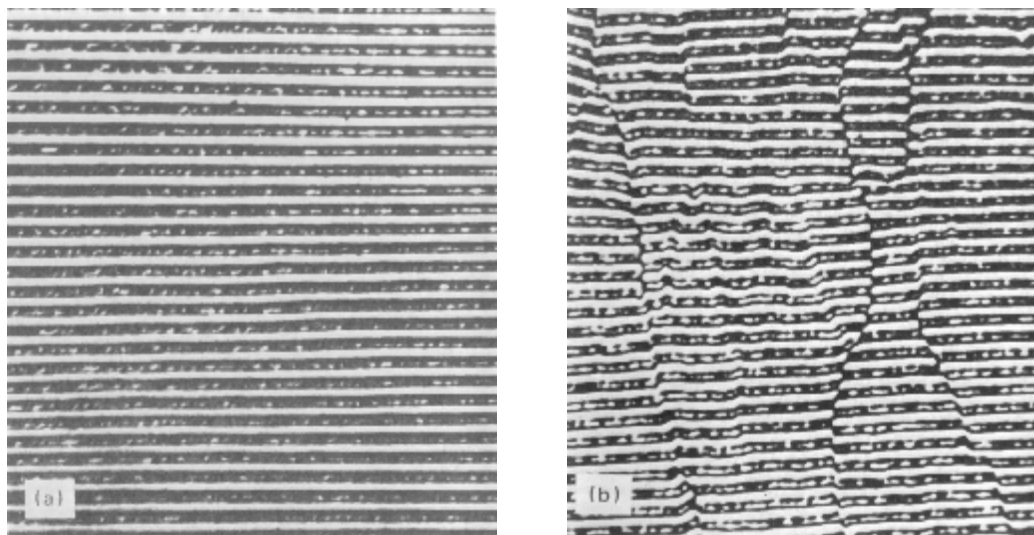
W zależności od postaci zbrojenia (cząsteczki, włókna) wytworzony materiał kompozytowy posiada strukturę (i właściwości) izotropową w przypadku zbrojenia cząsteczkami

równomiernie rozmieszczonymi w osnowie lub anizotropową dla kompozytów zbrojonych włóknami.

Właściwości kompozytów zależą też w dużej mierze od odległości międzycząsteczkowych lub międzywłóknowych. Zmiany tych odległości mogą powodować występowanie wysokich naprężeń lokalnych i stref naprężeń ściskających.

Powierzchnia rozdziału zbrojenie-osnowa jest prawdopodobnie najważniejszą charakterystyką kompozytu. Bezpośrednio wpływa na jakość połączenia fazy zbrojącej z osnową, tłumienie drgań, mechanizm pęknięcia kompozytu jako całości oraz pęknięć międzykrystalicznych samej osnowy. Skład chemiczny i fazowy powstałego połączenia pomiędzy komponentami jest istotny zarówno w aspekcie właściwościach mechanicznych, jak i odporności korozyjnej i może stanowić element struktury sprzyjający przedwczesnemu zniszczeniu materiału.

Struktura kompozytów *in situ*, powstaje w zasadzie przy zachowaniu warunków równowagi termodynamicznej i dlatego charakteryzuje się dużą trwałością przy wysokiej temperaturze. Istnieje pewna grupa kompozytów *in situ*, które w temperaturze rzędu $0,9T_t$ nie zmieniają swojej struktury.



Rys. 5. Płytkowa struktura kompozytu *in situ* Al-CuAl₂; przekrój poprzeczny (a) i wzdłużny (b).

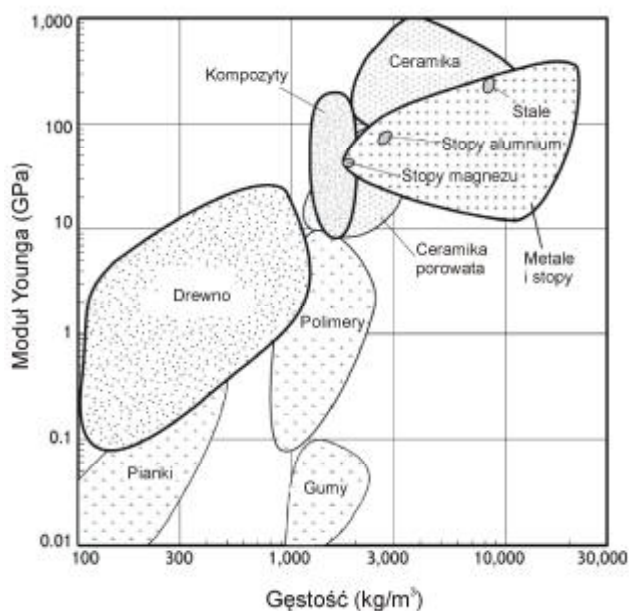
Struktura kompozytów *in situ* (rys. 5) ma postać równolegle zorientowanych włókien rozmieszczonych w osnowie stopu oraz idealnie z nią połączonych.

W trakcie procesu odlewania i krzepnięcia przy braku jednorodności rozkładu zbrojenia w mieszanej zawieszynie metalowej może zachodzić zjawisko „wypychania” cząsteczek rosnącymi dendrytami osnowy prowadząc do gromadzenia się cząsteczek w pobliżu ich granic tworząc aglomeracje.

Celem poprawy struktury kompozytu, poprawy zwilżalności pary osnowa-faza zbrojąca lub reaktywności ze zbrojeniem wprowadzane są do osnowy dodatki stopowe i modyfikujące strukturę, a faza zbrojąca jest z kolei pokrywana powłokami (np. niklowanie) bądź obrabiana roztworami solnymi.

6. Właściwości materiałów kompozytowych

Właściwości kompozytów praktycznie możemy kształtować i projektować w zależności od potrzeb. MK charakteryzują się właściwościami nieosiągalnymi dla konwencjonalnych monolitycznych materiałów. Wyróżniają je zwiększone: wytrzymałość, moduł Younga, charakterystyki zmęczeniowe, odporność na zużycie, charakterystyki ślizgowe, wysoka odporność na korozję, zarówno w temperaturze pokojowej jak i w podwyższonej.



Rys. 6. Zestawienie modułu Younga E i gęstości w różnych materiałach konstrukcyjnych.

Kompozyty *in situ* na bazie niklu i kobaltu charakteryzujące się wysokimi wskaźnikami żarowytrzymałościowymi i żaroodpornymi wykorzystywane są na elementy maszyn silnie obciążone w wysokich temperaturach, jak łopatki turbin gazowych. Niektóre z kompozytów *in situ* cechują się unikalnymi własnościami fizycznymi (efekt magnetoelektryczny)

Tabela 3. Właściwości kompozytów *in situ* uzyskanych z eutektycznych stopów Ni.

Stop α - β	V_w , %	T_t , °C	γ , g/cm ³	E, GPa	R_m , MPa	ϵ , %
Ni-Cr mikrostruktura płytkowa	23	1345	8,0	-	720	30
Ni-NbC	11	1328	8,8	-	890	9,5
NiAl-Cr	34	1450	6,4	182	1500	1,0
Ni ₃ Al-Ni ₃ Nb	44	1280	8,4	242	1240	0,8

Wśród metalowych materiałów kompozytowych na szczególną uwagę zasługują kompozyty o osnowie stopów aluminium.

Wprowadzenie cząsteczek ceramicznych typu tlenków (Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2), węglików (SiC, TiC) czy grafitu do stopów aluminium pozwala wytworzyć kompozyty ślizgowe, odporne na ścieranie, o podwyższonej wytrzymałości. Zbrojenie cząsteczkami ceramicznymi zapewnia ponadto podwyższenie temperatury pracy.

Dużą odporność na ścieranie kompozytów zapewniają cząsteczki tlenków i węglików o średnicy powyżej 100 μ m.

Tabela 4. Właściwości mechaniczne wybranych kompozytów Al-cząsteczki ceramiczne po odlewaniu i zabiegach obróbki plastycznej.

Kompozyt	R_m , MPa	R_e , MPa	A, %	E, GPa	warunki wytwarzania
7064+20% SiC (T4)	731	628	1	111	wyciskanie na gorąco
A356+20 SiC	332	315	1	102	odlewanie ciągle
2024+ 15% Al_2O_3	518	490	2,2	94	odlewanie ciągle
2014+20% Al_2O_3 (5 μ m)	345	249	3,4	-	kucie w stanie ciekłym

Kompozyty Al/grafit charakteryzują się obniżonym współczynnikiem tarcia (do zawartości 3% grafitu). Podobnie, jak dla kompozytów zbrojonych cząsteczkami SiC, Al_2O_3 , obniża się również znacznie stopień zużycia ściernego, np. przy zawartości 3% wag. grafitu zużycie ściernie kompozytu spada do poziomu 20% zużycia osnowy.

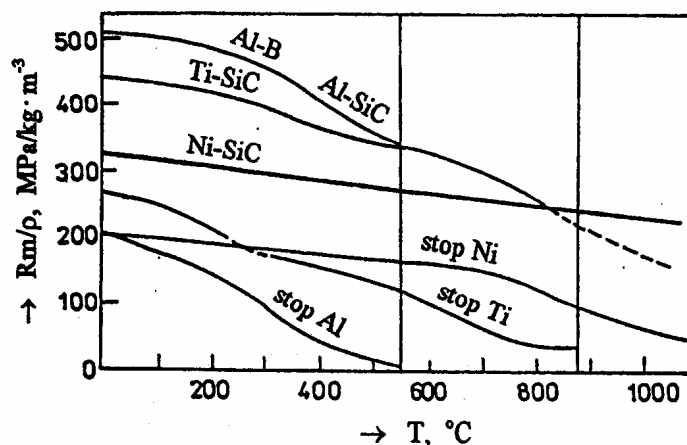
W odróżnieniu od kompozytów zbrojonych cząsteczkami, metalowe kompozyty włókniste mają bardzo wysokie właściwości wytrzymałościowe. Zbrojenie stopów metali włóknami ceramicznymi (węglowymi, SiC, włóknami borowymi) zapewnia wysoki poziom wytrzymałości doraźnej, wysoką wytrzymałość na pełzanie, jak i wysoką wytrzymałość w podwyższonej temperaturze. Większość tych materiałów może pracować przez krótki czas nawet w temperaturze bliskiej temperaturze topnienia osnowy. Zastosowanie np. włókien borowych do zbrojenia stopów aluminium pozwala uzyskać wytrzymałość kompo-

zytu w temperaturze 400°C około 1000 MPa (kompozyt 6061Al-48% włókna borowego). Natomiast wprowadzenie do aluminium 30-35% włókien SiC pozwala uzyskać materiał o wytrzymałości na rozciąganie na poziomie 600-800 MPa, a wytrzymałości na zmęczenie przy 10^7 cyklach 30 MPa.

Tabela 5. Właściwości kompozytów metalowych zbrojonych włóknami.

Włókno	Osnowa	V_w %	γ g/cm ³	R_{mII} , MPa	E, GPa	$R_{m\perp}$, MPa
Węglowe T50	201Al	30	2,38	646	172	50
Węglowe P100	6061Al	41	2,44	646	337	-
B ₄ C/B/W	Ti-6Al-4V	38	3,74	1541	237	358
α -Al ₂ O ₃	201Al	50	3,6	1224	222	-
SiC (W)	6061Al	50	2,93	1541	237	-
SiC (W)	Ti-6Al-4V	35	3,93	1255	272	535

Kompozyty o osnowie stopów tytanu zbrojone włóknami borowymi, berylowymi czy SiC charakteryzują się doskonałymi wskaźnikami właściwymi (wytrzymałością i sztywnością). W kompozytach z osnową stopu tytanu VT-6 (TiAl6V4) wytrzymałość wzdłuż włókien osiąga wartość rzędu 1000-1400 MPa. Kompozyty o osnowie nadstopów niklu zbrojone włóknami wolframowymi, korundowymi i grafitowymi mogą pracować aż do temperatury 1650°C.



Rys. 7. Stosunek wytrzymałości do gęstości w funkcji temperatury dla różnych materiałów inżynierskich.

Kompozyty umacniane dyspersyjnie odznaczają się również korzystnymi właściwościami w podwyższonej temperaturze. Kompozyt SAP niezależnie od ilości cząsteczek zbrojących (powyżej 7%) w temperaturze 327°C ma odkształcenie na poziomie 2-4%, a poziom naprężeń niszczących osiąga wartość 80-100 MPa, co czyni je materiałami żarowytrzymałymi do temperatury 550°C. Cechą charakterystyczną spiekanego aluminium jest

stabilność jego struktury w podwyższonych temperaturach, co zawdzięcza obecności drobno dyspersyjnej fazy tlenkowej. Natomiast aluminium zbrojone cząsteczkami Al_4C_3 charakteryzuje się wysoką odpornością na rekrytalizację, wysoką żarowytrzymałością w zakresie 300-500 °C oraz radiacyjną stabilnością.

Wśród kompozytów z osnową ceramiczną dobre właściwości wykazują kompozyty o osnowie Al_2O_3 zbrojone whiskerami SiC (25%) których właściwości mechaniczne znacznie wzrastają: E do 400 GPa, a umowna wytrzymałość na zginanie może wzrosnąć do 900 MPa. Wzrasta również odporność na pękanie i działanie szoków cieplnych.

Zbrojenie szkła borowo-krzemianowego włóknem Al_2O_3 (40% obj.) zwiększa wytrzymałość i odporność na pękanie 4-5 krotnie.

Kompozyty polimerowe wykazują przewagę nad najważniejszymi stopami technicznymi (Al, Ti, stal) w zakresie wskaźników wytrzymałości właściwej i sztywności właściwej. Przy wymaganiach najlepszych właściwości oraz najmniejszym ciężarze, kompozyty polimerowe z włóknami węglowymi dominują nad kompozytami z włóknami szklanymi, również przy obciążeniach cyklicznie zmiennych. Dominują one również podczas pracy w środowisku wilgotnym i w podwyższonej temperaturze. Kompozyty z włóknami szklanymi podczas rozciągania wykazują większe wartości wydłużenia oraz większą zdolność do pochłaniania energii przy działaniu sił statycznych i dynamicznych. Kompozyty o osnowie polimerowej zbrojone kevlarem ze względu na mniejsze wartości modułu sprężystości kevlaru są mniej sztywne od kompozytów z włóknami węglowymi, ale za to cechują się większą udarnością. Generalnie temperatura pracy ciągłej kompozytów polimerowych nie przekracza 400°C.

7. Zastosowanie kompozytów

Pierwszoplanowym obszarem zastosowań nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych jakimi są niewątpliwie kompozyty była i jest technika kosmiczna, przemysł militarny, komunikacyjny oraz produkcja np. sprzętu sportowego.

Od ponad 30 lat kompozyty są używane w przestrzeni kosmicznej jako elementy kratownic, wsporników, łączników, konstrukcji płyt półskorupowych, anten, parabolicznych reflektorów, satelitarnych stabilizatorów groskopowych, pierścieniowych zawieszek przegubowych, obudowy układów elektronicznych. Początkowo zastosowanie znajdowały kompozyty o osnowie żywic epoksydowych zbrojonych włóknami grafitu. Pierwszym zadawalającym wykorzystaniem metalowych materiałów kompozytowych wzmacnianych włóknem ciągłym było użycie kompozytu Al/B na: cylindryczne pręty ściskane w ramach, żebra kra-

townic oraz podwozie orbitalnego wahadłowca (*Space Shuttle Orbiter*) (Rys. 8) Dzięki wykorzystaniu rur z Al/B zmniejszono masę o 45% w stosunku do stosowanego poprzednio aluminium.



Rys. 8. Konstrukcja środkowej części kadłuba orbitalnego wahadłowca wykonana z rur Al/B – po lewej (Fot. U.S. Air Force/NASA). Wzmocnienie wysokiego wysięgnika anteny w Hubble Space Telescope (HST) wykonane z kompozytu P100/6061 Al, przed scaleniem z HST i zastosowane w HST z orbitalnym wahadłowcem na dolnej orbicie ziemskiej (po prawej).

Znaczące jest także wykorzystanie kompozytu Al/grafit do wytwarzania wysokich wysięgników anten (Rys. 8) w teleskopie Hubbl'a, wprowadzając włókna grafitu P100 do stopu aluminium 6061. Wysięgnik ten (3,6 m długości) charakteryzuje się sztywnością i niskim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej, co utrzymuje pozycję anteny w czasie manewrów w przestrzeni kosmicznej. Dzięki wysokiej stabilności wymiarowej materiału utrzymana jest wewnętrzna tolerancja wymiarowa do $\pm 0,15$ mm na całej długości wysięgnika.



Rys. 9. Zastosowanie kompozytów w technice wojskowej na podkadłowe stateczniki kierunkowe (po lewej) oraz kłapy paliwowe (po prawej) samolotu F-16 wykonane z kompozytu 6092/17,5% SiC.

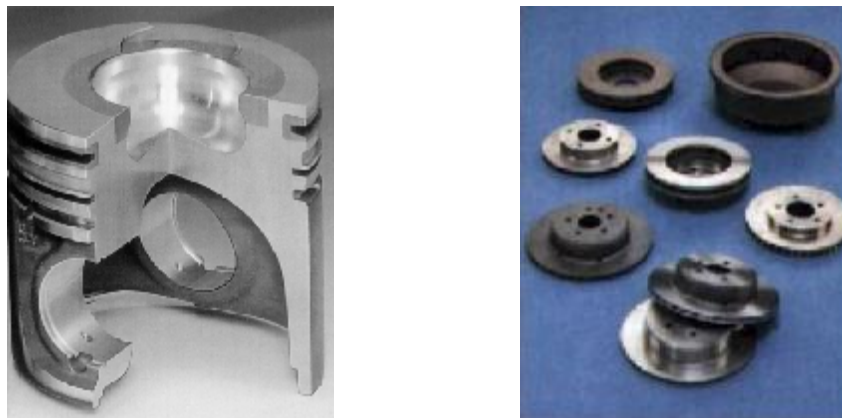
W środkach transportu MK znajdują zastosowanie głównie na elementy mechanizmu napędowego i silnika (korbowody, tuleje cylindrowe, tłoki, wały napędowe, zawory (rys.10) łożyska ślizgowe), zawieszania oraz układu hamulcowego.



Rys. 10. Tuleje cylindrowe wykonane z kompozytu $AlSi9Cu3$ / preforma z 25%Si (Porsche Boxter) oraz zawory kompozytowe o osnowie Ti (Toyota Altezza).

Zastosowanie kompozytów na tłoki silników (rys. 11) pozwala otrzymać wyższą twardość, sztywność, wyższą odporność na zmęczenie, mniejszy współczynnik rozszerzalności cieplnej, lepszą stabilność wymiarową w stosunku do monolitycznych siluminów tłokowych. Najczęściej tłoki zbrojone są preformami z włókien Al_2O_3 i SiC, głównie w obszarze rowków podpierścieniowych i w strefie komory spalania.

Łożyska ślizgowe wykonane z kompozytu aluminium-grafit charakteryzują się podwyższoną odpornością na zużycie, niskim współczynnikiem tarcia, zdolnością tłumienia drgań.



Rys. 11. Kompozytowy tłok zbrojony lokalnie preformą z Al_2O_3 (po lewej) oraz kompozytowe tarcze hamulcowe zbrojone SiC (po prawej).

Nowym rozwiązaniem materiałowo-konstrukcyjnym jest zastosowanie kompozytów o osnowie stopów aluminium zbrojonych cząsteczkami SiC lub preformami z Al_2O_3 na tarcze hamulcowe (rys. 11).

Do głównych zalet stosowania kompozytów na tarczach i bębny hamulcowe należy zmniejszenie sił bezwładności, co powoduje zmniejszenie masy efektywnej (rzeczywistej) o 50%, pozwalające zwiększyć przyspieszenie, skrócić drogę hamowania, obniżyć poziom hałasu, zwiększyć odporność na zużycie, oraz dodatkowo ujednorodnić sam mechanizm tarcia.

Firma Porsche wyposażała model 911 turbo w tarczach hamulcowych z kompozytów ceramicznych (kompozyt C-C). Charakteryzują się one odpornością na wysokie temperatury (do 2000°C), odpornością na korozję oraz stałym współczynnikiem tarcia w całym zakresie temperatur pracy.

Czołowe osiągnięcia w zakresie kompozytów polimerowych ma przemysł lotniczy. Wiele części płatowca i śmigłowca wykonywane jest aktualnie z tych materiałów. Wśród najczęściej wymienianych znajdują się: łopaty wirnika głównego i pomocniczego oraz elementy kadłuba i wyposażenia śmigłowców, elementy konstrukcji i poszycia. W całości, z kompozytów wykonywane są kadłuby szybowców np. szybowiec PW6 wykonany jest z kompozytu: żywica epoksydowa-włókno szklane.

W technice kosmicznej kompozyty polimerowe znalazły zastosowanie na płyty baterii słonecznych, anteny satelitów, zbiorniki ciśnieniowe.

W wykorzystaniu kompozytów polimerowych przoduje ze względów zrozumiałych lotnictwo wojskowe. Na przykład 25% masy brytyjskiego myśliwca pionowego startu Harrier MK II, po odłączeniu bloku napędowego i uzbrojenia, stanowią kompozyty polimerowe (podobny udział w samolocie F-22). Zastosowanie 30% kompozytów w myśliwcu GRIPEN zmniejszyło masę startową do 8-9 t (poprzednik SAAB Viggen: 17-20 t).



Rys. 12. Wybrane zastosowania MK w sporcie i rekreacji.

Materiały kompozytowe znajdują również zastosowanie w medycynie na implanty, płytki ustalające kości oraz jako materiały konstrukcyjne w sporcie i rekreacji (rys. 12)

Literatura uzupełniająca:

1. Śleżiona J.: Podstawy technologii kompozytów. Wyd. PŚI., Gliwice 1998
2. Romankiewicz F., i wsp.: Niekonwencjonalne materiały kompozytowe. Wyd. Pol. Zielonogórskiej, Zielona Góra 1996.
3. Hyla I.: Wybrane zagadnienia z inżynierii materiałów kompozytowych. PWN, Warszawa 1978.
4. Boczkowska A., Kapuściński J., Puciłkowski K., Wojciechowski S.: Kompozyty. Wyd. PW, Warszawa 2000.
5. Barbacki A. [red]: Materiały w budowie maszyn. Przewodnik do ćwiczeń laboratoryjnych. Wyd. Pol. Poznańskiej, wyd. 2, Poznań 2001.
6. Nowacki J.: Materiały kompozytowe. Wyd. PŁ, Łódź 1993.
7. Weroński A. [red]: Ćwiczenia laboratoryjne z inżynierii materiałowej. Wyd. PL, Lublin 1996

WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE

Opracowanie w całości ani we fragmentach nie może być powielane ani rozpowszechniane za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody autora.

© Copyright by Katedra Inżynierii Materiałowej, Lublin 2002 r.