

Jerzy Sobczak¹

Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

Stefan Wojciechowski²

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa

WSPÓŁCZESNE TENDENCJE PRAKTYCZNEGO ZASTOSOWANIA KOMPOZYTÓW METALOWYCH (ARTYKUŁ ZAMAWIANY)

THE CURRENT TRENDS IN THE PRACTICAL APPLICATION OF METAL MATRIX COMPOSITES

This paper is the literature review and presents the Authors' research results in the area of metal matrix composites (MMCs). The subject concentrates on two main problems. The first one deals with the selection of composite components depending on the functional indexes (Tab. 1), selection (Fig. 1) and classification (Fig. 2) charts and the designing of composites, according to the method proposed by M.F. Ashby. While this particular problem was being discussed, the identification of potential functionality areas of aluminum matrix composites was identified (Tab. 1). The second problem discussed in the paper concerns the presentation of current achievements in practical usage of MMCs. The examples of metal composites application in the air force and space industry (Figs 5-10), automotive industry (Figs 11-14), electronic, sport and recreation (Figs 15-16) were presented. In the conclusions the economic, legislative and technical barriers of metal matrix composites applications were discussed. It was noted that in order to achieve a technical and commercial success in the area of wider application of MMCs in the nearest future, the real and potential difficulties in four groups must be overcome. These problem groups are as follows: 1) materials, 2) production processes, 3) research and evaluation methods, analytical tools, 4) technical aspects. To each of the categories mentioned above the prerequisite of low cost should be assigned. The current competitors and substitutes of metal matrix composites are other high performance materials, mainly carbon-carbon and intermetallic matrix composites.

WPROWADZENIE

Ostatnie dziesięciolecie XX w. charakteryzowały się niezwykle szybkim rozwojem materiałów konstrukcyjnych - szybkim przyrostem wartości parametrów użytkowych tych materiałów. Współczesny inżynier staje przed problemem racjonalnego wykorzystania mnogości materiałów, które są nam dostępne lub też mogą być wytworzone. Warto zaznaczyć, że M.F. Ashby [1] ocenił rynek materiałów w 1992 r. (data wydania oryginału cytowanej książki) na 40 do 80 tysięcy gatunków, a obecnie jest ich z pewnością znacznie więcej. Bez wykorzystania wiedzy naukowej i zebranego doświadczenia wybór materiału najlepiej spełniającego stawiane wymagania byłby bardzo trudny. Potrzebne są więc systemy prawidłowej selekcji. Niektóre z nich już funkcjonują, ale dalszy ich rozwój staje się koniecznością.

Istnieje powszechnie akceptowany podział materiałów na cztery podstawowe rodzaje: metale, polimery (i elastomery), ceramikę i kompozyty. Kompozyty stanowią odpowiedź na rosnące zapotrzebowanie na materiały o lepszych wskaźnikach konstrukcyjnych i eksplo-

tacyjnych, a ponadto pozwalają na świadome kształtowanie pożądanych właściwości w stopniu niedostępnym w przypadku pozostałych rodzajów materiałów. Ze względu na rodzaj osnowy kompozyty mogą być polimerowe, metalowe lub ceramiczne. Współczesna technika korzysta w bardzo dużym stopniu z kompozytów polimerowych, natomiast kompozyty metalowe są nadal przedmiotem badań i sprawdzania eksploatacyjnego, ale stanowią już rodzaj materiału, który konstruktor musi brać pod uwagę przy racjonalizacji wyboru.

Często stosowany jest podział kompozytów metalowych ze względu na obszary zastosowań na dwie grupy [2]. Wyróżnia się taki obszar zastosowania, gdzie decydujące jest spełnienie funkcji użytecznych, a koszt materiału nie ma zasadniczego znaczenia (np. technika lotnicza i kosmiczna), oraz taki obszar, w którym oczekiwana jest uzasadniona relacja (kompromis) między właściwościami decydującymi o spełnieniu funkcji użytecznych i kosztem kompozytu (liczonym w sposób ciągły).

¹ dr hab. inż., ² prof. zw. dr hab. inż.

WYBÓR SKŁADNIKÓW KOMPOZYTU

Etapowe podejście metodologiczne, umożliwiające dobór składników (komponentów) kompozytu, zgodnie z wymogami projektu, zaproponował M.F. Ashby [3]: Aby zaprojektować i osiągnąć wymagany poziom zaawansowania kombinacji materiałowych typu zbrojenie-osnowa, należy sięgnąć do koncepcji postępowania, zawierającej następujące człony podstawowe:

Etap pierwszy polega na sprecyzowaniu tzw. wskaźników funkcjonalności (*performance indices*), pozwalających na wstępną selekcję kombinacji właściwości materiałów (wybranej osnowy z określoną populacją zbrojenia) w sposób optymalizujący prawidłowość wyboru.

Etap drugi polega na sporządzeniu wykresów doboru materiałów (*materials - selection charts*), na które nanosi się zarówno dane dotyczące wybranych właściwości materiałów, jak i wartości wskaźników funkcjonalności.

Etap trzeci to wyznaczanie ograniczeń (zakresu dolnego i górnego), stanowiących „pole okalające” właściwości dla konkretnego kompozytu (tzw. *properties envelope*).

Etap końcowy to projektowanie kompozytów, pozwalające na optymalizację wyboru ich komponentów dla realizacji funkcji celu.

Wskaźniki funkcjonalności

Wskaźnik funkcjonalności to wybrana właściwość lub grupa właściwości, która stanowi miarę efektywności materiału w zaspokojeniu oczekiwań, związanych z wypełnieniem zadanej funkcji materiału [1, 3]. Przykładowe wskaźniki funkcjonalności wymieniono w tabeli 1.

TABELA 1. Wybrane wskaźniki funkcjonalności
TABLE 1. Selected functional indices

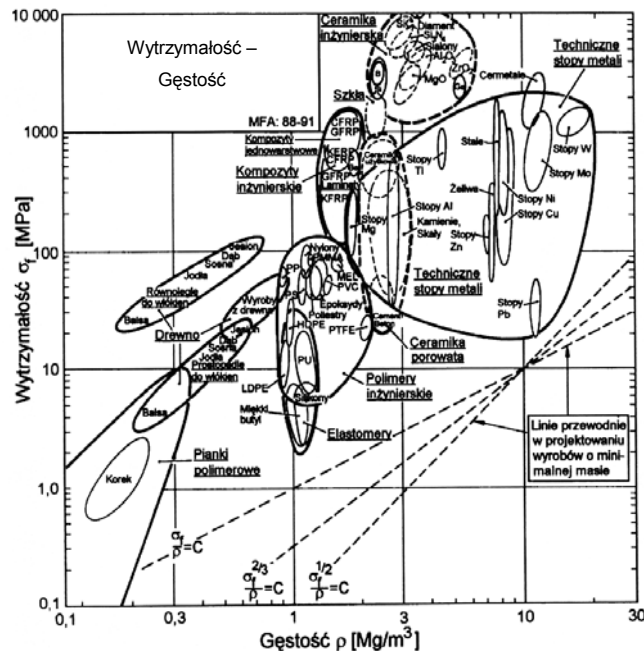
Wielkości przyjęte w założeniach projektowych	Wskaźnik funkcjonalności	Wielkości przyjęte w założeniach projektowych	Wskaźnik funkcjonalności
Szywność (w zależności od geometrii elementu konstrukcyjnego)	$M_1 = \frac{E}{\rho}$	Odporność na pękanie (wiązkość)	$M_7 = (E \cdot J_{1c})^{1/2}$
	$M_2 = \frac{1}{\rho} \frac{E^2}{E^2}$		$M_8 = \left(\frac{J_{1c}}{E}\right)^{1/2}$
	$M_3 = \frac{E^3}{\rho}$		$M_9 = J_{1c}$
Wytrzymałość	$M_4 = \frac{\sigma}{\rho}$	Odporność na odkształcenia cieplne	$M_{10} = \frac{\lambda}{\alpha}$
	$M_5 = \frac{\sigma^2}{\rho}$		
	$M_6 = \frac{\sigma^2}{\rho}$		

ρ - gęstość, Mg/m³, E - moduł Younga, GPa, σ - wytrzymałość, MPa (GPa), J_{1c} - całka J charakteryzująca odporność na kruche pękanie, kJ/m², λ - przewodność cieplna, W/m · K, α - dyfuzyjność cieplna, m²/s

Pierwsze trzy wskaźniki (M_1 , M_2 i M_3) charakteryzują funkcjonalność lekkiego, sztywnego komponentu (materiału). Im wyższe wartości tych wskaźników, tym mniejsza masa materiału przy zadanej sztywności. Wskaźniki M_4 , M_5 i M_6 charakteryzują funkcjonalność lekkiego komponentu o podwyższonej wytrzymałości. Trzy następne (M_7 , M_8 i M_9) odnoszą się do tolerancji materiału względem pękania (*toughness and fracture toughness*). Wreszcie wskaźnik M_{10} pozwala na oszacowanie odporności materiału na odkształcenia cieplne (*thermal distortion*).

Wykresy doboru materiałów

Wykresy doboru materiałów są dogodnym sposobem ilościowej prezentacji zakresów właściwości materiałów. Jeden z przykładów takiego wykresu - zależność wytrzymałości materiałów w funkcji ich gęstości - przedstawia rysunek 1. Wartości na osiach są wyrażone w skali logarytmicznej, aby umożliwić uwzględnienie praktycznie wszystkich istniejących materiałów. Dane dla określonego rodzaju materiału są zakreślone elipsycznymi liniami zamkniętymi. Na wykresach doboru materiałów nanoszone są proste, przedstawiające wybrane wskaźniki funkcjonalności o stałych wartościach.

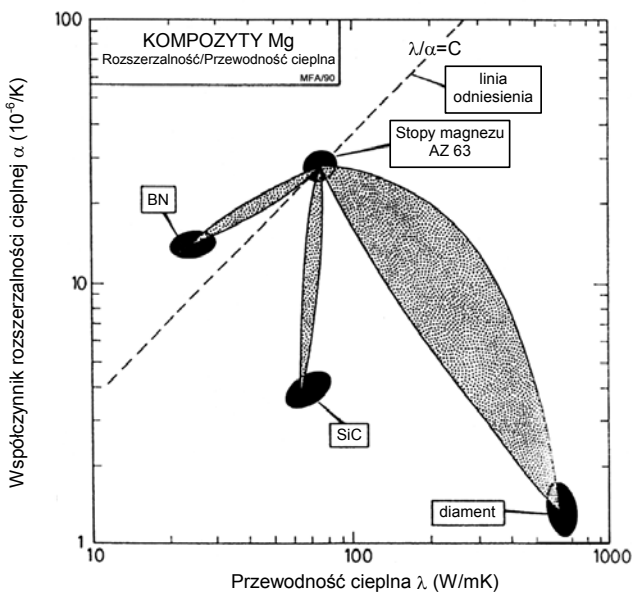


Rys. 1. Wykres doboru materiałów w układzie wytrzymałość-gęstość [1]

Fig. 1. The chart representing the selection of materials based on the strength-density relation [1]

Projektowanie kompozytów

Procedura projektowania kompozytów zilustrowana będzie przykładem klasyfikacji komponentów dla kompozytów magnezowych z minimalnym odkształceniem cieplnym, którego miarą funkcjonalności jest wskaźnik M_{10} . Rysunek 2 pokazuje zmiany współczynnika rozszerzalności cieplnej i przewodności cieplnej stopu magnezu AZ63, zbrojonego azotkiem boru BN, węglikiem krzemu SiC lub diamentem. Zbrojenie BN pogarsza funkcjonalność kompozytów magnezowych, zbrojenie diamentem jest jednym z praktycznie idealnych przypadków osiągnięcia maksymalnego stopnia funkcjonalności danej właściwości.



Rys. 2. Wykres klasyfikacyjny: współczynnik rozszerzalności cieplnej - przewodność cieplna dla kompozytów magnezowych o osnowie stopu AZ63 [3]

Fig. 2. Classification chart for AZ63 magnesium based composites representing the relation between coefficient of thermal expansion and thermal conductivity [3]

Identyfikacja potencjalnych obszarów zastosowań kompozytów

Ostatnia dekada przyniosła liczne przykłady nowych zastosowań kompozytów aluminiowych zbrojonych dyspersyjnie cząsteczkami SiC (Al/SiC_p). W celu identyfikacji ich potencjalnych zalet, a tym samym określenia nowych obszarów zastosowań, w tabeli 2 umieszczono wartości wybranych właściwości kompozytu 2124/20 obj. % SiC_p wraz z siedmioma wskaźnikami funkcjonalności i dla porównania umieszczono analogiczne parametry dla osnowy kompozytu (stopu 2124 - stop Al-Cu) oraz stopu aluminium, zawierającego lit (8090 - AlLi_{2,3}Cu_{0,9}Mg_{0,1}Zr_{0,13}). W nawiasach podano procentowe zmiany właściwości i wskaźników względem stopu 2124.

Wskaźniki M_1 - M_3 , charakteryzujące sztywność materiału, są znacznie wyższe dla kompozytu 2124/SiC_p w porównaniu z jego osnową, natomiast pozostają na podobnym poziomie wartości względem stopu Al-Li (8090). Podobnie jest dla pozostałych wskaźników charakteryzujących wytrzymałość, natomiast wskaźnik M_{10} dla kompozytu jest ponad 100% wyższy od pozostałych materiałów. Można sformułować dwa wnioski. Po pierwsze, kompozyty Al/SiC_p z powodzeniem mogą zastąpić często stosowane w ostatnim czasie stopy Al-Li, i po drugie, tak odczuwalny wzrost funkcjonalności kompozytu względem odkształcenia cieplnego sugeruje celowość jego zastosowania w konstrukcjach precyzyjnych, takich jak napędy dysku twardego, w żyroskopach, teleskopach bądź pochłaniających ciepło i energię obudowach urządzeń elektronicznych. Oczywiście kompozyt nie może być doborany tylko pod względem jednego kryterium, nawet dominującego. Pozostałe powinny również odpowiadać określonemu poziomowi. W projektowaniu aparatury przeznaczonej do pracy w atmosferze ziemskiej i przestrzeni kosmicznej od materiału wymaga się nie tylko lekkości i sztywności, ale również określonej wytrzymałości i odporności na pęknięcie, stosownych właściwości cieplnych, spośród których na czoło wysuwa się rozszerzalność cieplna. Kompozyty Al/SiC_p, jak dotychczas, bardzo dobrze spełniają stawiane im wymagania, chociaż dalszy rozwój projektowania kompozytów może przynieść jeszcze bardziej obiecujące rozwiązania materiałowe.

TABELA 2. Porównanie funkcjonalności wybranych materiałów na bazie aluminium [3]

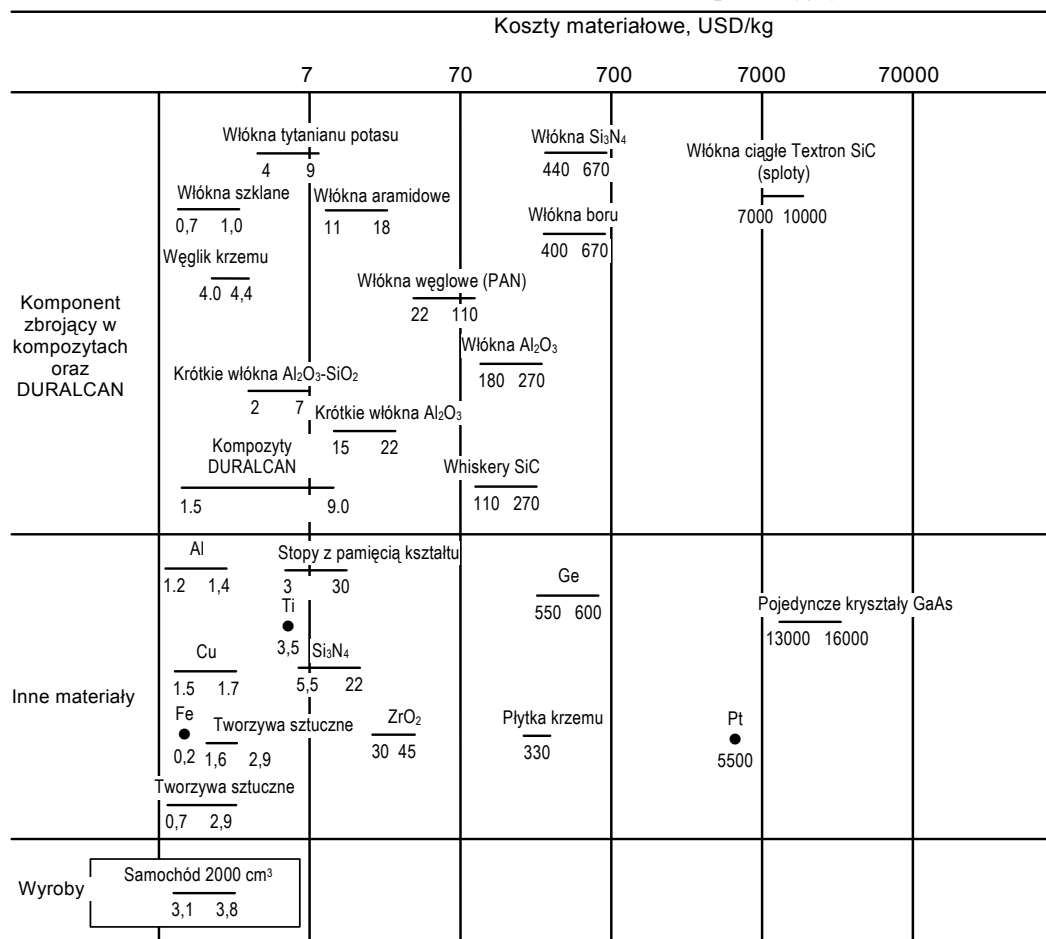
TABLE 2. Functionality comparison of selected aluminum based materials [3]

Właściwość/ parametr	Materiał	Stop 2124	Kompozyt 2124/20 obj. % SiC _p	Stop 8090
Gęstość ρ , g/cm ³		2,80	2,88 (+3%)	2,55 (-9%)
Moduł Younga E , GPa		73	100 (+37%)	70 (0%)
Wytrzymałość R_m , MPa		425	510 (+20%)	475 (+12%)
Współczynnik rozszerzalności cieplnej α , $\mu\text{m/mK}$		24	10 (-50%)	25 (+4%)
Przewodność cieplna λ , W/mK		150	130 (-13%)	144 (-4%)
M_1 , GPa/(Mg/m ³)		26,1	34,7 (+33%)	27,5 (+5%)
M_2 , GPa ^{1/2} /(Mg/m ³)		3,05	3,47 (+14%)	3,28 (+8%)
M_3 , GPa ^{1/3} /(Mg/m ³)		1,49	1,61 (+8%)	1,62 (+8%)
M_4 , MPa/(Mg/m ³)		151	177 (+17%)	186 (+23%)
M_5 , MPa ^{2/3} /(Mg/m ³)		20,2	22,1 (+10%)	23,9 (+18%)
M_6 , MPa ^{1/2} /(Mg/m ³)		7,36	7,84 (+7%)	8,55 (+16%)
M_{10} , 10 ⁶ W/m		6,25	13 (+108%)	5,76 (-8%)

PRZYKŁADY PRAKTYCZNYCH ZASTOSOWAŃ KOMPOZYTÓW

W przypadku kompozytów, podobnie jak i dla innych syntetyzowanych materiałów, aspekty ekonomiczne odgrywają niezmiernie istotną rolę, stanowiąc niejednokrotnie barierę limitującą ich szersze zastosowanie w praktyce, zwłaszcza w obszarze produkcji cywilnej, np. w wytwarzaniu samochodu. Dotyczy to przede wszystkim

większy od kosztu jednostkowego materiałów tradycyjnych). Wynika on nie tylko z kosztu komponentów (zbrojenie-osnowa), ale także z całkowitych kosztów wytwarzania. Jednakże stosowanie kompozytów daje korzyści wynikające z wysokiego poziomu właściwości użytecznych, zwłaszcza jeżeli odnosi się je do jednostki masy, co pozwala na zmniejszenie całkowitej masy wyrobu, zmniejszenie zapotrzebowania na energię w warunkach eksploatacyjnych, zwiększenie trwałości



Rys. 3. Koszty wytwarzania komponentu zbrojącego w zestawieniu z cenami wybranych materiałów i jednostkowego kosztu samochodu o pojemności silnika 2000 cm³ (opracowano na podstawie dostępnych materiałów źródłowych producentów amerykańskich w odniesieniu do poziomu cen lat 90. XX wieku)

Fig. 3. Relative reinforcement's costs compared to the costs of selected materials and to the const of a 2000 cm³ automobile (based on the available literature sources of the US producers depending on the price level in the 90s of twenty century)

kim kosztów zbrojenia włóknem ciągłym kompozytów metalowych (rys. 3).

Cena włókien ciągłych (np. borowych czy Si_3N_4) może sięgać nawet kilku tysięcy dolarów za kg, co w porównaniu z jednostkową ceną kilograma samochodu o pojemności 2000 cm³, wynoszącą 3,1÷3,8 USD/kg, wydaje się kwotą niebotyczną. W pobliżu poziomu kilku-kilkunastu dolarów za kilogram plasują się zakresy cenowe cząsteczek SiC (4,0÷4,4 USD/kg) i włókien krótkich (np. 15÷22 USD/kg dla Al_2O_3). Koszt jednostkowy nowoczesnego kompozytu jest znaczny (wg różnych źródeł literaturowych nawet o jeden lub dwa rzędy

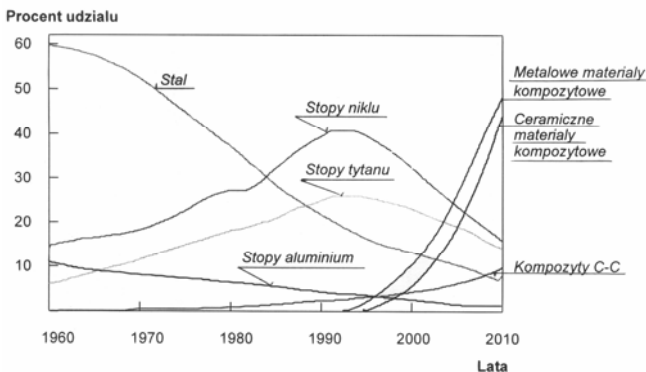
i inne. W tej sytuacji zestawienie kosztów, przedstawione na rysunku 3, ma na celu uświadomienie faktu, że wysokie koszty materiałowe w odniesieniu do kompozytów nie muszą być powodem rezygnowania ze stosowania tych materiałów, ponieważ, jak już wspomniano, uzyskiwane efekty eksploatacyjne, potwierdzone stosowną analizą techniczno-ekonomiczną, mogą w pełni uzasadnić celowość ich wykorzystania.

Kamieniami milowymi znaczącego niemilitarnego praktycznego wykorzystania kompozytów były następujące wydarzenia (lata 1990-1991):

- uruchomienie masowej produkcji tłoków i bloków cylindrowych zbrojonych lokalnie (*Toyota, Honda i Ebisawa*),
- opanowanie procesu naporowywania (*spray deposition*) w stopniu pozwalającym na przemysłową produkcję wlewków i wyrobów kształtowych przez firmę *ALCAN*,
- opracowanie przez firmę *Lanxide* metody bezpośredniego utleniania/azotowania i infiltracji quasi-grawitacyjnej (*pressureless infiltration*), umożliwiającej wytwarzanie kompozytów odpornych na ścieranie i obudów mikroukładów elektronicznych (*electronic packaging*),
- komercjalizacja kompozytów zbrojonych dyspersyjnie cząsteczkami węgla krzem i tlenku glinu, wytwarzanych metodami ciekło-fazowymi i metalurgią proszków (*DURALCAN, ALCAN, ALCOA, Hydro-Aluminum, BP*).

Lotnictwo i przemysł kosmiczny

Pod koniec lat sześćdziesiątych rozpoczęto prace wdrożeniowe nad zastosowaniem zaawansowanych kompozytów w konstrukcji samolotów. Początkowo były to żywice epoksydowe zbrojone włóknem węglowym, później stosowano włókna boru i grafitowe. W latach osiemdziesiątych zakres zastosowania kompozytów uległ znacznemu rozszerzeniu, zarówno w odniesieniu do poszycia kadłuba, jak i silnika oraz hamulców. Rozpoczęła się era polimerowych kompozytów wysokotemperaturowych, kompozytów metalowych, nadstopów, i kompozytów na bazie ceramiki, zwłaszcza kompozytów typu węgiel-węgiel (C-C). Wzrastające wymagania techniczne w odniesieniu do możliwości konstrukcji latających dodatkowo spowodowały konieczność poszukiwań nowych materiałów o unikalnych właściwościach. W odniesieniu do materiałowych rozwiązań w silnikach samolotowych oczekiwany jest gwałtowny wzrost udziału metalowych i ceramicznych materiałów kompozytowych, w tym kompozytów C-C (rys. 4) [7].

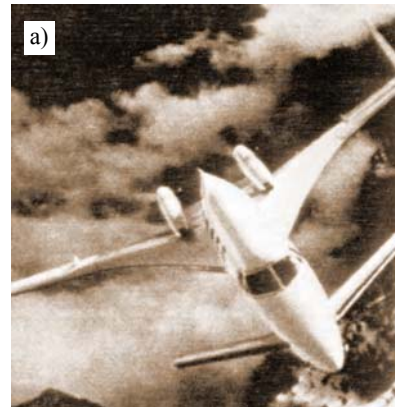


Rys. 4. Dotychczasowe zastosowanie i prognozy wzrostu udziału procentowego szeregu materiałów w konstrukcji silników samolotowych [8]

Fig. 4. Current and future (forecast) application of the percentage share growth for the range of constructional materials used in aircraft engines [8]

Aktualny stan techniki wytwarzania kompozytów pozwolił na wykonanie samolotu, składającego się w 100% z kompozytów polimerowych, ceramicznych i metalowych (rys. 5a).

Zalety kompozytów, przejawiające się w ich przełożonym wpływie na kształt konstrukcji lotniczych prezentuje rysunek 5b. Zastosowanie kompozytów ceramicznych, metalowych i z osnową z faz międzymetalicznych w czterech silnikach bombowca B-2 w połączeniu ze szczególnym systemem chłodzenia, wydobywającego się z dysz strumienia gazu, pozwala na obniżenie jego temperatury z typowej (ok. 800°C) do zaledwie 400°C, co wręcz uniemożliwia namierzenie samolotu wykrywaczami podczerwieni (na promieniowanie termiczne zaprogramowana jest większość rakiet do niszczenia samolotów).



Rys. 5. „Kompozytowy” samolot *Beech Starship* (a) i amerykański bombowiec B-2 (zwany „Duchem” lub „Latającym skrzydłem”) (b)

Fig. 5. The first all-composite aircraft, the *Beech Starship* (a) and the American bomber B-2 (known as „Ghost” or „Flying Wing”) (b)

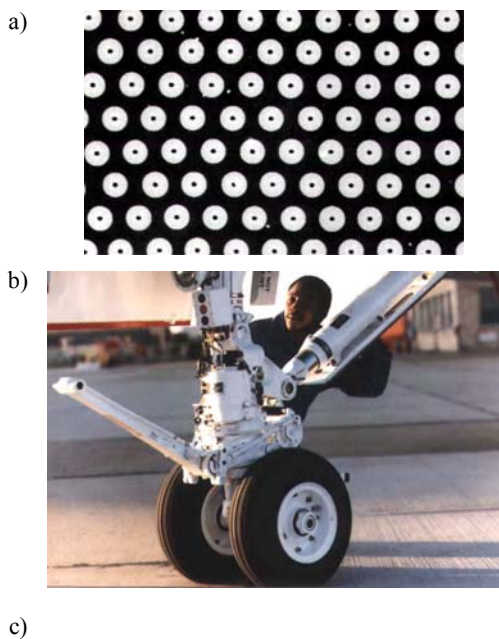
Kompozyty metalowe, stosowane w lotnictwie i aeronautyce powinny uwzględniać wymóg obniżonej gęstości, co praktycznie ogranicza zastosowanie jako ich osnów metali lekkich (Al, Mg, Ti i Be). W budowie myśliwca F-22, oprócz kompozytów polimerowych, wykonywanych techniką RTM (*resin transfer molding*), zastosowano zbrojone w sposób dyspersyjny i ciągły kompozyty na bazie stopów aluminium i tytanu, wyko-

ny- wane z kolei metodą AFP (*automated fiber placement*) (rys. 6). Firma 3M, specjalizująca się m.in. w wytwarzaniu części z kompozytów tytanowych, stosuje naparowywanie próżniowe (zwłaszcza naparowanie wiązką elektronów) do nanoszenia stopu TiAl6V4 na włókna ciągłe z SiC, uzyskując znakomite rozmieszczenie fazy zbrojącej w strukturze (rys. 7a). Zbrojone włóknami kompozyty Ti/SiC_n znalazły już zastosowanie w produkcji części podwozia i turbiny silnika nowej generacji (rys. 7b i c), robotów przemysłowych, podzespołów elektronicznych, sprzętu rekreacyjnego i medycznego.



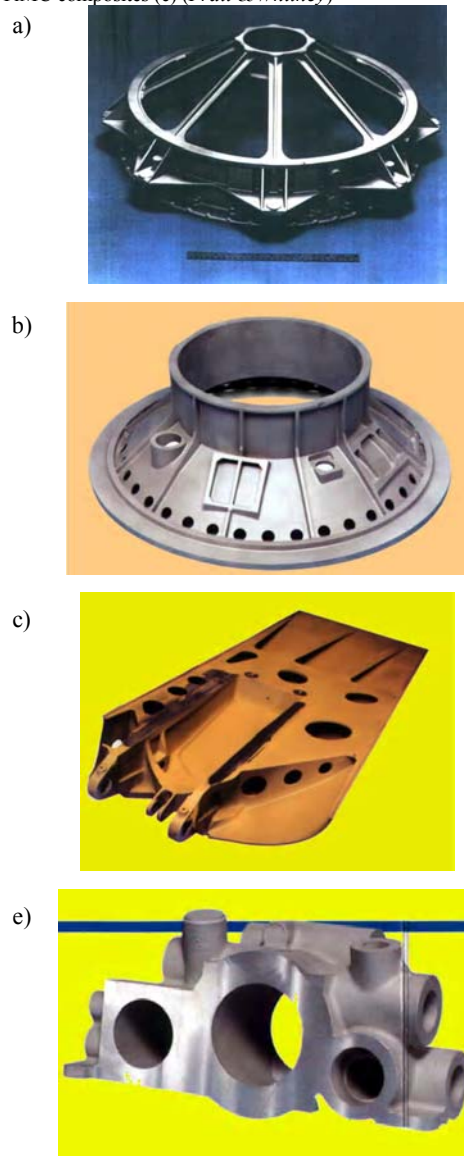
Rys. 6. Samoloty myśliwskie F-22 *Raptor* floty powietrznej USA w locie. Kompozyty metalowe zastosowano w nich w konstrukcji poszycia (w tym obramowania szkieletowego) i układu sterowania (*Lockheed Martin Aeronautical System, Marietta, Georgia*)

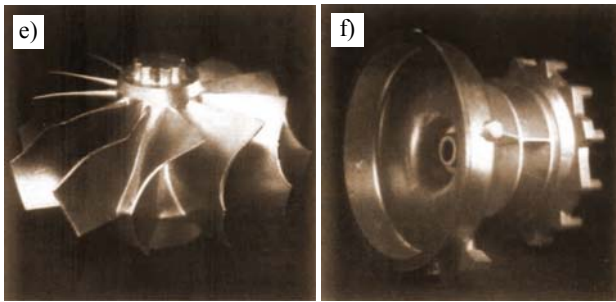
Fig. 6. Metal matrix composites were used in F-22 *Raptor* fighter aircrafts of U.S. aerial fleet for the skin, frames and control (*Lockheed Martin Aeronautical System, Marietta, Georgia*)



Rys. 7. Struktura kompozytu TiAl6V4/SiC_n (włókno ciągłe) (3M) (a), podwozie samolotu z częściami wykonanymi z kompozytów tytanowych (*Mc Donnell Douglas*) (b) oraz silnik samolotowy nowej generacji z łopatkami turbinowymi wykonanymi z kompozytu TiAl6V4/SiC_n (*Pratt & Whitney*) (c)

Fig. 7. The structure of 3M's company titanium based TiAl6V4/SiC_n (TiMC) composite (a), TiMC-reinforced landing gear (b) (*Mc Donnell Douglas*) and the next generation of turbine engines with TiMC composites (c) (*Pratt & Whitney*)





Rys. 8. Odlewy precyzyjne części do samolotu, wykonane w firmie DURALCAN: obudowa giroskopu z kompozytu F3B.20S (a), obudowa aparatu fotograficznego z kompozytu F3B.20S (b), część hamulca aerodynamicznego samolotu F16 (380x840x100 mm) z kompozytu A356/20 obj. % SiC_p, korpus pompy hydraulicznej samolotu myśliwskiego z kompozytu A356/20 obj. % SiC_p, pracującej w temperaturze 135°C (d), wirnik turbinki z kompozytu A356/20 obj. % SiC_p (e) i obudowa pomocniczego zespołu silnika również z kompozytu A356/20 obj. % SiC_p (f)

Fig. 8. Composite investment castings produced by DURALCAN: air-craft gimbal (F3B.20S) (a), aircraft camera mount (F3B.20S) (b), high performance F16 fighter aircraft speed brake (380x840x100 mm) (A356/20 vol. % SiC_p) (c), fighter aircraft hydraulic manifold cast from A356/20 vol. % SiC_p and proposed for operation at 135°C (d), a turbocharger impeller cast from A356/20 vol. % SiC_p (e) and auxiliary power-unit housing (A356/20 vol. % SiC_p) (f)

Firma DURALCAN od lat odlewa precyzyjnie części samolotowe ze stopów aluminium, zawierających 20 obj. % cząsteczek SiC_p (rys. 8).

Właściwości wybranych kompozytów magnezowych i aluminium już stosowanych w konstrukcjach latających przedstawia tabela 3 [8].



Rys. 9. Prototypowe samoloty: a) X-30, b) X-43A

Fig. 9. Prototype aircrafts X-30 (a) and X-43A (b)

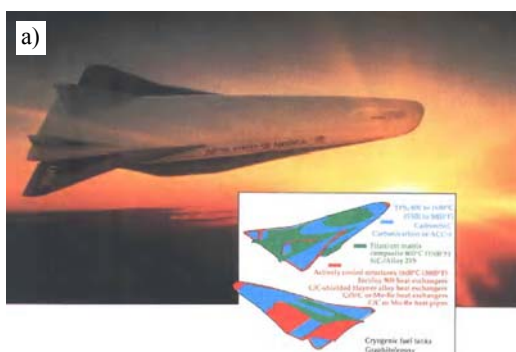
W programie amerykańskiej agencji *NASP (National AeroSpace Plane)* przewidziano konstrukcję prototypowego pojazdu hipersonicznego X-30 poruszającego się z prędkością ponad 5 Ma (ok. 6100 km/h), zdolnego osiągnąć orbitę ziemską wprost z pasa startowego (rys. 9a). Następnym krokiem była konstrukcja prototypowego pojazdu oznaczonego kryptonimem X-43A, który miał polecieć z prędkością 7 Ma (8570 km/h) (rys. 9b). W stosunku do materiałów konstrukcyjnych zgłoszono następujące wymagania: wysoką sztywność, wytrzymałość, plastyczność, odporność na kruche pęknięcie, zmęczenie i dużą udarność, stosowne charakterystyki pełzania, odpowiednią gęstość, przewodność cieplną i zachowanie założonego poziomu właściwości zarówno w wysokich temperaturach (temperatura poszycia ponad 1650°C przy szybkości pojazdu do 25 Ma, czyli do

TABELA 3. Podstawowe właściwości wytrzymałościowe wybranych kompozytów metalowych, stosowanych w konstrukcji samolotu

TABLE 3. Strength characteristics of the selected metal matrix composites used in the aircrafts

Kompozyt	Właściwość	Moduł Younga E GPa	Wytrzymałość na rozciąganie R_m MPa	Gęstość ρ g/cm ³	$\frac{E}{\rho} \cdot 10^8$ cm	$\frac{R_m}{\rho} \cdot 10^6$ cm	Wydłużenie (do zerwania) %
Mg/24 obj. % B ₄ C _p		86	418	1,92	4,5	2,2	0,78
Al/30 obj. % SiC _p		120	434	2,87	4,2	1,5	3,0
Al/60 obj. % Al ₂ O _{3n} (wzdłuż kierunku włókien)		262	690	3,45	7,6	1,5	0,3
Al/60 obj. % Al ₂ O _{3n} (w poprzek kierunku włókien)		152	185		4,4	0,5	0,6

p - cząsteczki, fl - włókna ciągłe s



30 600 km/h), jak i warunkach kriogenicznych, co nakłada dodatkowe wymagania ze względu na działanie warunków zewnętrznych w trakcie lotu [9-11].

Niezwykle wysokie wymagania dla samolotów hipersonicznych mogą spełnić kompozyty o osnowie tytanowej (TiMC) lub materiały kompozytowe z osnową faz międzymetalicznych (IMC). Jak wynika z przyjętych w USA planów badawczych, na kratownice i chłodnice struktur latających oraz części uzbrojenia z powodzeniem mogą być stosowane zbrojone w sposób ciągły lub nieciągły materiały kompozytowe na bazie aluminium (AlMC) lub magnezu (MgMC).

Jednym z ostatnich osiągnięć w zakresie stosowanych w atmosferze ziemskiej i przestrzeni kosmicznej kompozytów polimerowych są kompozyty „molekularne”, w których faza zbrojąca ma „średnicę” porównywalną z wymiarami struktur atomowych. Takie materiały charakteryzują się wysoką sztywnością, odpornością na podwyższone temperatury i agresywne środowiska chemicznie.

Kompozyty ceramiczne, zwłaszcza kompozyty typu C-C, znajdują coraz szersze zastosowanie w przestrzeni kosmicznej. Ich wadą jest kruchość, zaletą możliwość stosowania nawet do 2500°C.

Oprócz kompozytów zbrojonych dyspersyjnie grafitem i węglikiem krzemu, w przestrzeni kosmicznej szerokie zastosowanie znalazły kompozyty zbrojone w sposób ciągły (włóknami). Charakterystyczną cechą tych materiałów jest zminimalizowana rozszerzalność cieplna (a nawet ujemny współczynnik rozszerzalności), ale jednak niewysoki poziom wytrzymałości w kierunku poprzecznym do kierunku ułożenia włókien.

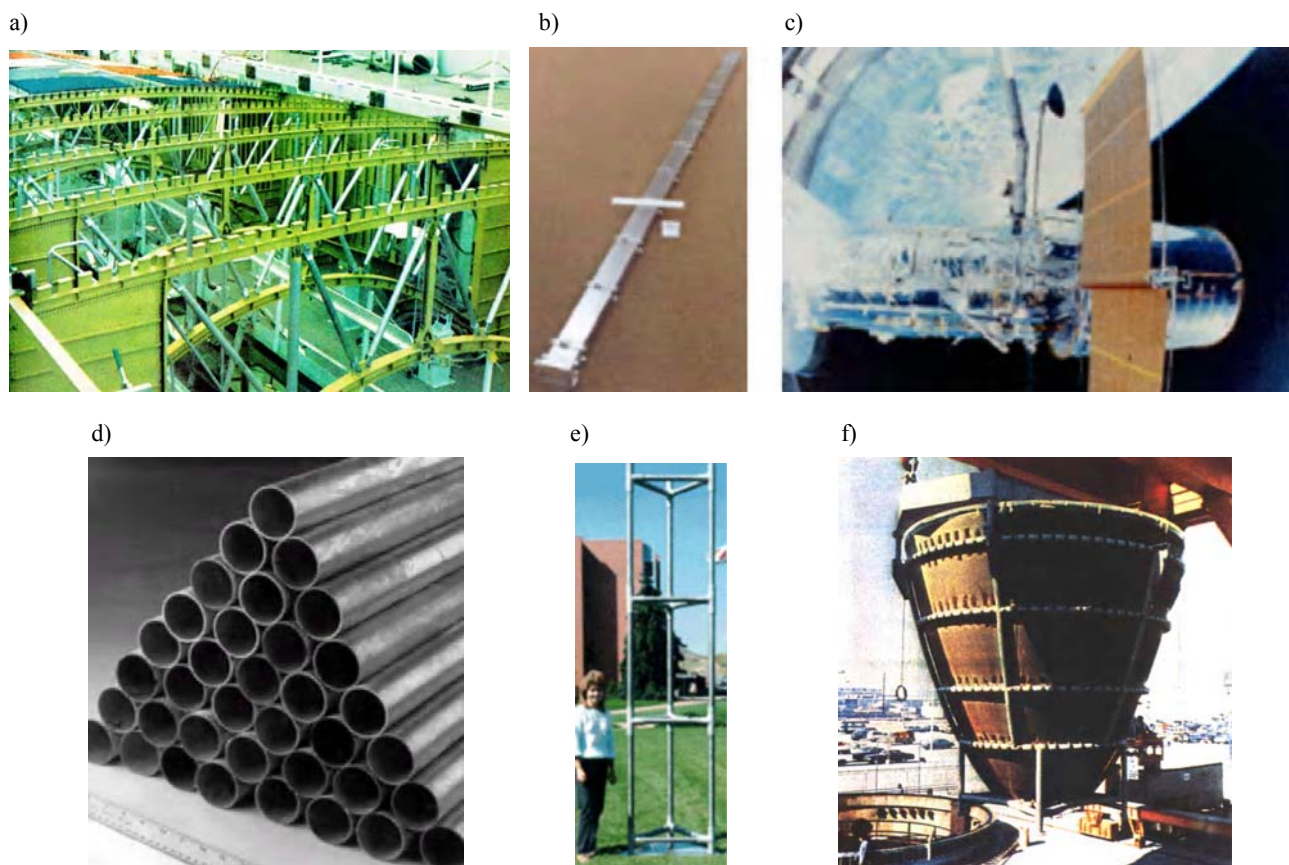
Zbrojone włóknami boru kompozyty aluminiowe znalazły zastosowanie jako materiały na cylindryczne rozpórki przegrody środkowej przestrzeni ładunkowej

kadłuba w wahadłowcu kosmicznym (rys. 10a). Przeznaczeniem kompozytów aluminiowych zbrojonych włóknami grafitowymi okazały się m.in. wysięgniki antenowe teleskopu Hubble’a (rys. 10b). W firmach *Lockheed Martin Space Systems* (Colorado) i *Fiber Materials* (Maine) opracowano próżniową technologię wytwarzania rur o długości 1,2 m i średnicy zewnętrznej 50 mm ze stopów magnezu, zbrojonego ciągłym włóknem grafitowym, przeznaczonych do wykonywania kratownic w kosmosie (rys. 10c).

Wyroby stosowane w lotnictwie i przestrzeni kosmicznej mogą charakteryzować się skomplikowanymi kształtami i dużymi gabarytami. Na rysunku 10f przedstawiono największą na świecie formę do wytwarzania wyrobów kompozytowych zbrojonych włóknami ciągłymi.

Przemysł motoryzacyjny

Podobnie jak w przemyśle lotniczym i kosmicznym, do głównych wymogów w odniesieniu do lądowych środków transportu należy maksymalizacja przenoszonego ładunku z jednoczesną minimalizacją masy ich



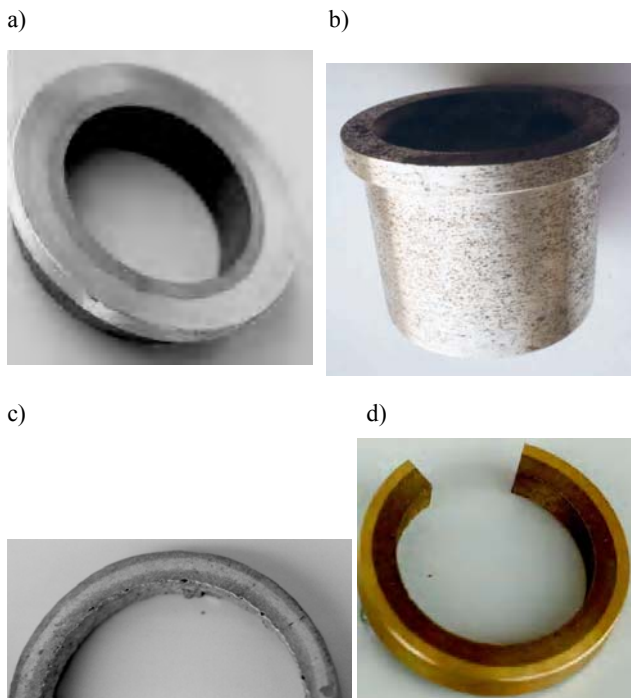
Rys. 10. Komora ładunkowa wahadłowca kosmicznego wykonana z rur aluminiowych zbrojonych borowym włóknem ciągłym (a), wysięgnik anteny teleskopu Hubble’a o długości 3,6 m, wykonany ze stopu aluminiowego zbrojonego włóknem grafitowym (A6061/P100_n) przed montażem (b) i po zamocowaniu w przestrzeni kosmicznej (c). Tolerancję wymiarową wysięgnika założono na poziomie $\pm 0,15$ mm na całej długości. Rury z kompozytu magnezowego zbrojonego włóknem grafitowym (AZ91C/P100_n) (d) i wykonana z nich konstrukcja kratowa (e) oraz największa na świecie forma do wytwarzania kompozytów, wykonana w firmie Hitco Gardena dla U.S Navy (f) (*U.S. Air Force/NASA, ICI/Fiberite*)

Fig. 10. Mid-fuselage structure of Space Shuttle Orbiter showing boron-aluminum tubes (a), the Al6061/P100 graphite long fibers high-gain antenna wave guides/boom for the Hubble Space Telescope (HST) shown (b) before integration in the HST, and (c) on the HST as it is deployed in low-earth orbit from the space shuttle orbiter, the MgAZ91C/P100 graphite long fibers tubes (d), and demonstration their truss structure (e), the world’s largest composite tool, fabricated by Hitco Gardena for the U.S Navy (f) (*Courtesy of U.S. Air Force/NASA and ICI/Fiberite*)

konstrukcji i uwzględnieniem minimalnych kosztów przewozu wraz z zachowaniem najwyższego poziomu niezawodności i bezpieczeństwa eksploatacji. Stąd też rozwój środków komunikacji sam wyznacza kierunki poszukiwań potencjalnych zastosowań nowych rozwiązań materiałowych.

Dla przykładu, ważną charakterystyką projektową dla **wał napędowego** jest prędkość krytyczna, tj. taka prędkość, przy której wał staje się dynamicznie niestabilny. W tym przypadku względny moduł sprężystości jest tą główną cechą materiałową, która określa geometryczne czynniki pracy wału, to znaczy jego długość i średnicę. Kompozyty zbrojone cząsteczkami SiC_p o osnowie stopów aluminium do przeróbki plastycznej mogą spełnić wysokie wymagania, stawiane przed materiałem na wysoko obciążone wały napędowe.

Łożyska ślizgowe wykonane z kompozytu na bazie tradycyjnych łożyskowych stopów aluminium, dodatkowo zawierających grafit, w porównaniu do istniejących rozwiązań będą charakteryzować się nie tylko znacznie podwyższoną odpornością na zużycie, ale również niskim współczynnikiem tarcia i istotnie zmniejszoną wrażliwością na utrudnione bądź uniemożliwione smarowanie. Dodatkowo kompozytowe łożyska będą lepiej tłumić drgania (rys. 11).

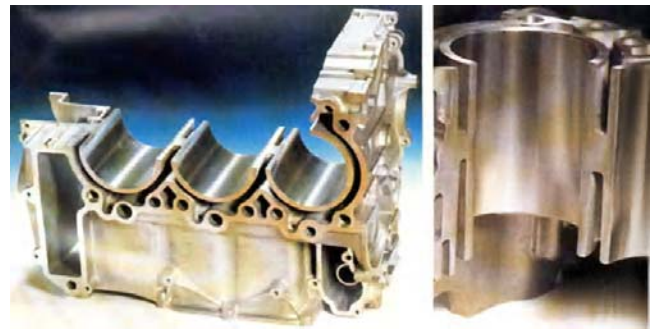


Rys. 11. Zbrojone dyspersyjnie AlSn7/5,7\% mas. grafitu prototypowe łożysko ślizgowe do wału głównego samochodu FIAT-bis, wytworzone metodą prasowania w stanie ciekłym (a) oraz łożysko ślizgowe na bazie stopów Al i Cu, otrzymane metodą odlewania odśrodkowego: z warstwą wewnętrzną wzbogaconą w grafit AlSi7Mg/5 obj. % grafitu (b), łożysko hybrydowe z dwiema warstwami wzbogaconymi w SiC (na zewnątrz) i w grafit (warstwa wewnętrzna) AlSi7Mg/15 obj. % SiC/5 obj. % grafitu (c) oraz łożysko CuSn8Zn4/7 obj. % grafitu (d). Powyższe odlewy otrzymano w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie

Fig. 11. Squeeze cast dispersed reinforced AlSn7/5.7\% mass. graphite particles prototype slide bearing for FIAT-bis automobile drive

shaft (a), centrifugally cast slide bearings: AlSi7Mg/5 vol. % graphite (b), hybrid AlSi7Mg/15 vol. % SiC/5 vol. % graphite (with two particles rich zones) (c) and CuSn8Zn4/7 vol. % graphite (d). Above castings have been produced by Foundry Research Institute, Krakow

Stosując odlewy **bloków silników**, otrzymywane specjalnymi sposobami odlewania w warunkach ciśnienia zewnętrznego i należące do kategorii odlewów quasi-precyzyjnych (*quasi-near net shape*), zbrojonych w obszarze tulei cylindrowych, można istotnie zmniejszyć ich masę, zastępując tradycyjnie stosowane żeliwo stopami aluminium. Dodatkową redukcję masy pojazdu (średnio $3,0 \div 4,5$ kg) można osiągnąć, stosując aluminiowe materiały kompozytowe, przy jednoczesnej poprawie sprawności i wydajności w wyniku zwiększenia przewodności cieplnej i zmniejszenia tarcia, wzrostu sztywności i stabilności wymiarowej bloku cylindrowego (rys. 12).



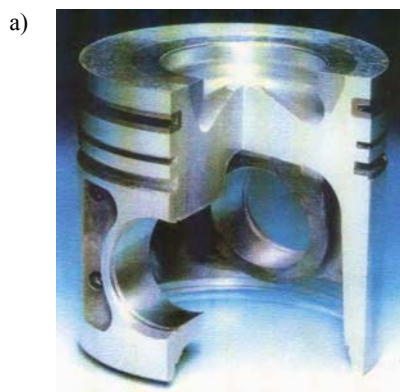
Rys. 12. Aluminiowe kompozytowe tuleje cylindrowe samochodu PORSCHE (ze zbiorów Instytutu Transportu Samochodowego)

Fig. 12. Locally reinforced aluminum PORSCHE-automobile cylinder blocks (Courtesy of Motor Transport Institute, Warsaw)

Lżejsze **korbowody** pomagają zmniejszyć obciążenia wtórne w silniku. Obciążenia te wywołuje głównie masa zespołu korbowód-tłok, będącego w ruchu posuwisto-zwrotnym. Następuje naruszenie pierwotnego wyważenia, prowadzące do pojawienia się niepożądanego zjawiska drgań wtórnych. Stosowanie metalowych materiałów kompozytowych pozwala na bezpieczny wzrost prędkości posuwów, co prowadzi do efektywniejszego wykorzystania paliwa i uzyskania wyższych osiągnięć (mocy) silnika. Zainteresowanie wielu zakładów przemysłu samochodowego budzą przede wszystkim kompozyty na bazie aluminium, zbrojone w sposób nieciągły (dyspersyjny) ze względu na relatywnie niskie koszty i względnie prostą technikę ich wytwarzania w porównaniu z kompozytami zbrojonymi w sposób ciągły. Duże koszty ciągłego zbrojenia metalu spowodowały poszukiwania zamienników drogich włókien ceramicznych (węglowych czy włókien z tlenku glinu). *Honda* rozpoczęła już produkcję korbowodów aluminiowych zbrojonych stalowymi włóknami ciągłymi.

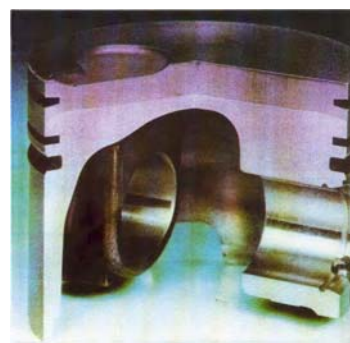
W przypadku **łoków** celem kompozytowego zbrojenia osnowy metalowej jest wzrost właściwości zwłaszcza tych stref tłoka, które pracują w ekstremalnych warunkach, najczęściej denka i płaszcza tłoka [12]. Nowe rozwiązanie materiałowe powinno wpływać równocześnie na zmniejszenie masy tłoka jako całości i tym samym zmniejszać uderowe siły bezwładności w trakcie jego pracy. Jeżeli np. denko tłoka do silnika wysokoprężnego zawiera określoną ilość fazy zbrojącej w postaci włókien krótkich z tlenku glinu (Al_2O_{3fs} - gdzie fs oznacza włókna krótkie), to wówczas komora spalania jest od jednej strony lepiej termicznie izolowana, intensywność wymiany ciepła w układzie tłok-cylinder zmniejsza się, a rozkład temperatury w tym obszarze sprzyja pełniejszemu spalaniu paliwa. Oprócz strefy komory spalania zbrojona bywa również górna część tłoka, znajdująca się pomiędzy denkiem a pierwszym pierścieniem uszczelniającym. Zalety materiału kompozytowego pozwalają na usytuowanie pierwszego pierścienia uszczelniającego bliżej denka i lepsze uszczelnienie zespołu tłok-cylinder. Okazało się, że

takie rozwiązanie konstrukcyjne również znacznie poprawia jakość spalania i przyczynia się do zmniejszenia hałasu i drgań silnika. Ponadto podniesienie pierścieni w koronie tłoka umożliwia zmniejszenie jego wysokości (mniejsza masa), co wraz z zastosowaniem lżejszych korbowodów i sworzni tłokowych spowoduje zmniejszenie masy wyrównowazającej na wale korbowym, a zatem zmniejszenie masy całego silnika. Oprócz firm japońskich (TOYOTA, NIIGATA) i amerykańskich, tłoki kompozytowe produkowane są w Europie, np. w zakładach KOLBENSCHMIDT (tłoki typu PERKINS, IVECO oraz tłok do lokomotywy spalinowej z zatopioną węzownicą chłodzącą - rys. 13).



b)

c)



Rys. 13. Kompozytowe tłoki typu PERKINS (a), IVECO (b) i tłok do silnika spalinowego lokomotywy (c), produkowane w zakładach KOLBENSCHMIDT

Fig. 13. Produced by KOLBENSCHMIDT locally reinforced aluminum composite pistons for PERKINS (a) and IVECO (b) automobiles and piston for Diesel railway engine (c)

Firma DWA produkuje tłoki kompozytowe typu Al/SiC_p . W odróżnieniu od tłoków zbrojonych lokalnie wytwarzanie tłoków zbrojonych dyspersyjnie jest prostsze i tańsze.

Firma TOYOTA zamieniła żeliwne **koło pasowe** wału korbowego w celu zmniejszenia masy i drgań silnika. W przypadku konwencjonalnych stopów aluminium pełzanie materiału stanowi istotny problem w wielu rozwiązaniach technicznych. Sytuacja zmienia się wyraźnie, jeżeli wykorzystać materiał kompozytowy. Stosując piastę koła wykonaną z kompozytów, zredukowano jej masę o 40% przy ogólnym zmniejszeniu masy całego układu o 20%. Poprawiła się charakterystyka pracy silnika, głównie dzięki możliwości wzrostu dopuszczalnej prędkości obrotowej wału.

a)



b)



Rys. 14. Kompozytowe tarcze hamulcowe wagonu kolejowego niemieckiego superekspresu ICE-2 (a), kompozytowe odlewy dla przemysłu samochodowego, produkowane przez Lanxide Co. metodą infiltracji quasi-grawitacyjnej (*pressurless infiltration*) (b) oraz aluminiowe kompozytowe korbowody zbrojone włóknem ciągłym (Nextel 610) do silnika samochodu Ferrari (Formuła 1) wykonane metodą gazowej infiltracji ciśnieniowej APIC™ (c). Dotychczas takie korbowody odkuwano ze stali. Korbowód stalowy miał masę 485 g, nowy korbowód kompozytowy - 190 g

Fig. 14. Composite brake rotors for German super-express ICE-2 wagons (a), composite castings for automotive industry produced by Lanxide Co. by *pressurless infiltration* (b) and long fiber Nextel 610 aluminum based composite Ferrari (Formula 1) connecting rod made by gas pressure infiltration APIC™ (c). Hitherto prevailing connecting rods have been made from steel (with 485 g mass); composite rods are much more lighter (190 g)

Do głównych zalet stosowania kompozytów jako materiału na **tarcze i bębny hamulcowe** należy zmniejszenie sił bezwładności, pozwalające zwiększyć przyspieszenie i skrócić drogę hamowania, jak również obniżyć poziom hałasu, zwiększyć odporność na zużycie i dodatkowo ujednorodnić sam mechanizm tarcia [13]. Dodatkową zaletą metalowych materiałów kompozytowych jest możliwość sterowania przewodnością cieplną przez dobór udziału objętościowego i rozmieszczenia zbrojenia. DURALCAN osiągnął 50% zmniejszenie masy w porównaniu z żeliwnymi tarczami hamulcowymi w połączeniu z 3-krotnym wzrostem efektywności wymiany cieplnej, zmniejszeniem poziomu hałasu i wibracji. Ostatnim komercyjnym osiągnięciem konstrukcyjno-materiałowym w Europie było zastosowanie przez *Knorr Bremse AG* kompozytów Al/SiC_p na tarczach hamulcowych wagonów kolejowych niemieckich pociągów ekspresowych ICE-2 (rys. 14a). Tradycyjne żeliwne tarcze hamulcowe miały masę 120 kg każda, zastosowanie kompozytów Al/SiC_p pozwoliło na zmniejszenie masy do poziomu 76 kg, a, biorąc pod uwagę fakt, że w każdym wagonie montowanych jest 8 tarcz, sumaryczna oszczędność masy nieresorowanej jest bardzo znaczna.

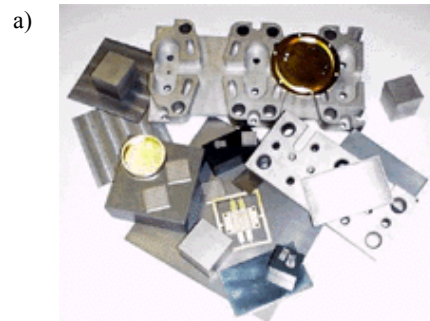
Firma *Lanxide Co.* produkuje duży asortyment odlewów kompozytowych, zawierających do 60÷70 obj. % fazy zbrojącej i mogących znaleźć zastosowanie w konstrukcji samochodu (rys. 14b), a do nowszych technik wytwarzania wysoko obciążonych części samochodowych zbrojonych włóknami należy udoskonalona infiltracja ciśnieniowa (APIC™ - *advanced pressure infiltration casting*) (rys. 14c) [14].

Elektronika, sport, rekreacja i inne dziedziny

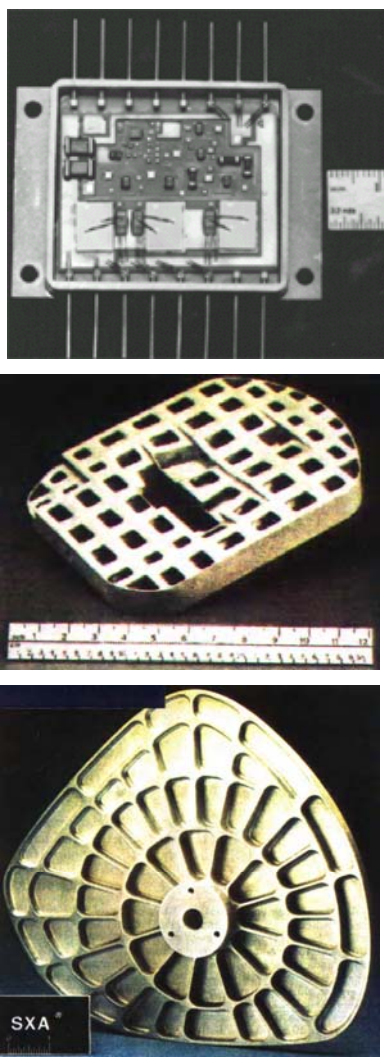
Aluminiowe kompozyty zbrojone SiC_p oraz proszkiem grafitu C_{gr} znajdują coraz szersze zastosowanie w konstrukcji zespołów mikroukładów elektronicznych, zwłaszcza ich obudów (*electronic packaging*) (np. w satelitach komunikacyjnych i stacjonarnych - *Global Positioning System*), czy w lustrach celowników czołgowych (rys. 15).

Oprócz sprzętu wyczynowego samochodowego i motocyklowego, w obszarach sportu zbliżonych do rekreacji, kompozyty metalowe znalazły także zastosowanie do wytwarzania kijów basebolowych, końcówek („główek”) kijów golfowych, a także części rowerów wyścigowych, wysokogórskich i turystycznych (rys. 16). Rury kompozytowe Al/SiC_p zastosowano w konstrukcji katamaranu „*Stars and Strips*”, a także w konstrukcji najlżejszego roweru świata, produkowanego przez *Kobe Steel Ltd.* [15]. Kompozyty metalowe mogą znaleźć znaczne zastosowanie w przemyśle nuklearnym i biotechnologii.

Obiecujące rezultaty uzyskano w próbach użycia kompozytów Ti/Y₂O₃ jako części reaktorów powielających na neutronach prędkich, ponieważ stwierdzono ich wysoką odporność na pelzanie i napromienianie neutronowe. Prowadzone są prace nad zbrojeniem dotychczas stosowanych stopów kobaltu, tytanu, tantalu i molibdenu, mające na celu uzyskanie jeszcze bardziej funkcjonalnych implantów, stosowanych w chirurgii kostnej i dentyście [16].

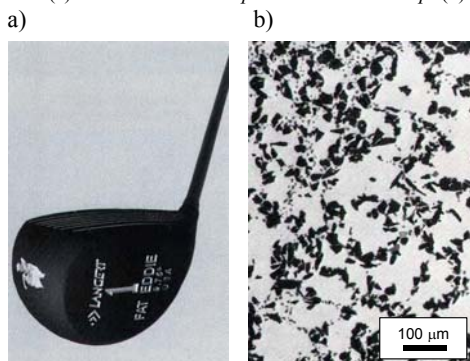


b)



Rys. 15. Przykłady zastosowań odlewanych kompozytów aluminiowych zbrojonych dyspersyjnie w zespołach mikroukładów elektronicznych: Al/C_{gr} (a) i (Al/SiC_p) (b). Kompozyt A357/20 obj. % SiC_p zastosowano jako materiał lustek kierowania ogniem celowników czołgowych (Nuclear Metals (c) i Advanced Composite Materials Corp. (d))

Fig. 15. Cast dispersed reinforced metal matrix composites for electronic packaging: Al/graphite (a) and Al/SiC (b). A battle tank fire-control mirror was cast from A357/20 vol. % SiC_p by Nuclear Metals (c) and Advanced Composite Materials Corp. (d)



c)



d)



Rys. 16. Końcówka kija golfowego z kompozytu F3S.20S (stop AlSi9Mg, zawierający 20 obj. % SiC_p), tzw. „Fat Eddie” (a) i jego struktura (b). Kompozycja przedstawiająca fotografię roweru górskiego M2 („StumpJumper”), którego rama wykonana została z kompozytu aluminiowego W6A.10A, zawierającego 10 obj. % Al₂O_{3p} (Technical Dynamics Aluminum Corp., Portland, Oregon), struktura tego kompozytu oraz prototyp wału napędowego, a także walcowane i ciągnięte kształtowniki kompozytowe (c). Wyroby DURALCAN, otrzymywane metodami odlewniczymi - widoczne m.in. koła przekładni rowerowej (po lewej u dołu), widelki (po prawej u dołu) i część przedniego zawieszenia samochodu (centralnie, u dołu) (d)

Fig. 16. „Fat Eddie” production golf-club head cast from F3S.20S (AlSi9Mg/20 vol. % SiC_p) (a) and its microstructure (b). „StumpJumper” M2 mountain bike with frame tubes extruded and fabricated from W6A.10A (aluminum wrought alloy containing 10 vol. % Al₂O_{3p}) (Technical Dynamics Aluminum Corp., Portland, Oregon), prototype of a seamless automotive drive-shaft tube, extruded and drawn from DURALCAN W6A.20A wrought composites (c). Cast products for bikes and automobiles made from DURALCAN composites (d)

PODSUMOWANIE

Wytwarzanie kompozytów z osnową metalową jest trudniejsze i bardziej kosztowne niż wytwarzanie kompozytów z osnową polimerową. Łączenie osnowy metalowej ze zbrojeniem (niezależnie od metody łączenia) jest związane z działaniem wysokich temperatur, co może wywoływać trudne do kontrolowania reakcje na granicy zbrojenia (włókno, cząstki) i osnowy. Reakcje te powodują tworzenie warstwek pośrednich, których grubość zależy od rodzaju materiałów łączonych oraz

temperatury i czasu jej działania (o ile zbrojenie nie jest odpowiednio zabezpieczone). Może to doprowadzić do znacznej degradacji zbrojenia (np. włókna). Występowanie mikropęknięć związanych z różnicą wartości współczynników rozszerzalności cieplnej komponentów kompozytu (istotne przy chłodzeniu do temperatury otoczenia) może znacznie zmniejszyć wytrzymałość kompozytu. Istnieje również prawdopodobieństwo zmian w składzie chemicznym i mikrostrukturze osnowy. Wszystkie te zjawiska silnie wpływają na użytkowe właściwości kompozytu i powodują konieczność starannej i kosztownej kontroli procesu wytwarzania. Ponadto zabiegi łączenia związane są z kosztem zużytej energii cieplnej i z kosztem urządzeń do łączenia komponentów, zdolnych do wielokrotnego powtarzania zabiegów w wysokiej temperaturze.

Opracowane w ostatnich latach metody otrzymywania kompozytów metalowych umożliwiają ich wytwarzanie na skalę przemysłową. O celowości zastosowania kompozytów metalowych decydują zarówno wskaźniki wytrzymałościowe, niejednokrotnie znacznie wyższe od tych wskaźników dla dostępnych stopów metali, jak i analiza ekonomiczna, uwzględniająca nie tylko koszt zakupu kompozytu lub wytworzenia z kompozytu wyrobu, ale także jego trwałość i dodatkowe (poza wytrzymałościowymi) właściwości, takie jak np. tłumienie drgań.

Ocena praktycznego wykorzystania (wynikająca m.in. z dokonanego w niniejszym artykule przeglądu) wskazuje, że kompozyty metalowe to przede wszystkim kompozyty konstrukcyjne lub kompozyty odporne na ścieranie. Ich główny obszar zastosowania to szeroko rozumiane środki transportu, dla których wytrzymałość właściwa (R_m/ρ) i sztywność (E/ρ) właściwa są ważnymi kryteriami doboru, niezależnie od bezwzględnych wartości R_m , E , odporności na pełzanie i zmęczenie, znacznej odporności na działanie podwyższonej temperatury, a także w niektórych przypadkach mniejszej ścieralności [17]. Obiecującym obszarem zastosowań jest również ich praca w warunkach zmiennych obciążeń cieplnych.

Niektóre szczególne właściwości kompozytów metalowych są lepsze od właściwości kompozytów polimerowych. Można tu wskazać lepsze właściwości poprzeczne w stosunku do kierunku ułożenia zbrojenia (R_m , E), większą odporność na ściskanie, brak pochłaniania wilgoci, niepalność, dobrą przewodność elektryczną i cieplną, odporność na większość rodzajów promieniowania. Ciekawym przykładem zrezygnowania z kompozytu polimerowego na rzecz kompozytu metalowego jest wysięgnik anteny teleskopu Hubble'a (rys. 10b), m.in. z uwagi na niebezpieczeństwo uderzeń przez gruz kosmiczny [2].

Warto zaznaczyć, że wstępny wybór właściwego kompozytu spośród różnych rodzajów materiałów umożliwia metoda Ashby'ego [1, 3].

Aby w nieodległej przyszłości można było odnieść sukces techniczny i komercyjny w zakresie szerszego wdrożenia kompozytów metalowych w przemyśle cywilnym, należy rozwiązać istniejące i potencjalne trudności, występujące w następujących grupach problemowych [18]:

1. Materiały.
2. Procesy wytwórcze.
3. Metody badań i oceny, narzędzia analityczne.
4. Aspekty techniczne.

Do każdej z wymienionych kategorii powinno się przypisać wymóg niskich kosztów.

Kategoria „materiały” dotyczy bezpośrednich kosztów materiałowych zbrojenia (szczególnie włókien ciągłych) i materiałów osnowy, udoskonalenia komponentu zbrojącego, nowocześniejszych materiałów osnowy i pokryć włókien. Przyczyni się to do podniesienia odporności na pełzanie i innych charakterystyk wytrzymałościowych bez znaczącej utraty odporności na kruche pękanie dla kompozytów spełniających wysokie wymagania eksploatacyjne. Nowe materiały osnowy, projektowane specjalnie z uwzględnieniem zasad mikromechaniki i podstaw współczesnej metalurgii, bezpieczne pod względem ochrony środowiska i superlekkie, zdolne do pracy w wysokiej temperaturze są niezbędne do uzyskania nowych generacji kompozytów metalowych. Do zagadnień, które powinny być poddane dodatkowym badaniom, należy problematyka pękania w kompozytach zbrojonych dyspersyjnie, wyjaśnienie wpływu kształtu cząsteczek, rozmieszczenia pierwiastków w osnowie, specyfiki strukturalnej w układzie ziarno-subziarno. Niekiedy obserwuje się tendencję do pogłębionych badań istniejących materiałów, a nie rozwoju nowych. Takie podejście jest o tyle racjonalne, że nie wymaga dodatkowych nakładów finansowych, wynikających z konieczności rozpoczynania badań materiałowych praktycznie od zera.

Pokonanie trudności, powstających w **procesach wytwórczych** jest prawdopodobnie kluczem do komercjalizacji kompozytów. Często wymienia się również efektywność ekonomiczną, niezawodność i elastyczność procesu produkcyjnego, w tym możliwości utylizacji i/lub regeneracji materiałów. Pod tym względem odlewnicze procesy wytwórcze z zastosowaniem ciśnienia zewnętrznego wymagają poprawy ich ekonomiczności, chociażby drogą optymalizacji procesów zwilżania i warunków infiltracji, doskonalszych metod wytwarzania preform ceramicznych oraz lepszego projektowania układów wlewowych, sterowania polem temperaturowym, sposobu podawania cieczy metalowej, wentylacji form itp.

W większości źródeł literaturowych można znaleźć potrzebę wprowadzania znormalizowanych **metod badań kontrolnych** w ciągu całego procesu wytwarzania materiałów kompozytowych. Wymienia się konieczność poszukiwań nowych i adaptacji istniejących metod ba-

dań zawartości wodoru w ciekłej zawieszynie i kompozycie w stanie stałym, określania rzeczywistego udziału objętościowego fazy zbrojącej i składu chemicznego materiału osnowy. Istotne jest znalezienie metod badań nieniszczących, pozwalających na wykrywanie ewentualnych źródeł uszkodzeń, zagrażających bezpieczeństwu przyszłej eksploatacji, zwłaszcza w przypadku kompozytów zaawansowanych, spełniających wysokie wymagania eksploatacyjne (*advanced and high performance*). Zaliczyć do nich można metody szybkiej analizy składu chemicznego i odpowiednie procedury sprawdzające zgodność wyrobów i części z istniejącymi normami.

Aspekty techniczne obejmują problemy projektowe i optymalizacji, badanie układów kompozytowych (faza zbrojąca, jej pokrycie, osnowa), zwłaszcza w przypadku osnowy kruchej, badanie nowych koncepcji strukturalnych, analizę doboru narzędzi i procesów technologicznych. Do bardziej praktycznych aspektów zaliczyć można badania procesów łączenia, montażu i naprawy, zwłaszcza dla kompozytów zbrojonych w sposób ciągły.

Głównymi konkurentami dla amerykańskiego przemysłu kompozytowego są Japonia i Wielka Brytania. W szczególności w Japonii podejmowane są zdecydowane wysiłki w kierunku aplikacji przemysłowych, niezawodnych metod wytwarzania i opłacalności procesów produkcyjnych kompozytów na bazie aluminium, zbrojonych wiskerami, cząsteczkami i włóknami. Aktualnie trwają prace nad materiałami kategorii *high performance*, głównie kompozytami typu węgiel-węgiel i o osnowie faz międzymetalowych (intermetalidów).

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować pracownikom Instytutu Transportu Samochodowego w Warszawie, zwłaszcza drowi inż. Andrzejowi Wojciechowskiemu za pomoc w wyborze materiału ilustracyjnego, a zwłaszcza za owocne dyskusje merytoryczne.

Pracę wykonano częściowo w ramach realizacji projektów badawczych 7 T08B 014 19 i T12C 012 18, finansowanych przez Komitet Badań Naukowych.

LITERATURA

[1] Ashby M.F., Dobór materiałów w projektowaniu inżynierskim, WNT, Warszawa 1998.

- [2] Materials Science and Technology, Wyd. R.W. Cahn, P. Haasen, E.J. Kramer, vol. 13, VCH, Weinheim 1993.
- [3] Ashby M.F., Criteria for Selecting the Components of Composites, *Acta Metall. Mater.* 1993, 41, 5, 1313-1335.
- [4] Gordon I.E., *Structure - or Why Things Don't Fall Down*, Decapo Paperback, London 1984.
- [5] Hull D., *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University Press, Cambridge 1981.
- [6] Rooney T.R., *Evolution of Aircraft/Aerospace Structures and Materials*, AIAA 1985, 8-1 - 8-6.
- [7] Allison J.E., Cole G.S., *Metal-Matrix Composites in the Automotive Industry: Opportunities and Challenges*, *Journal of Metals* 1993, Jan., 19-24.
- [8] Van der Voorde M.H., *Light Weight Materials for the 21st Century in Transport Industry 3rd Conference on Light Alloys and Composites*, Zakopane 1999 (referat niepublikowany).
- [9] Larsen J.M., Russ S.M., Jones J.W., *Possibilities and Pitfalls in Aerospace Applications of Titanium Matrix Composites*, NATO AGARD Conference on Characterization of Fibre Reinforced Titanium Metal Matrix Composites, Bordeaux, Sept. 1993.
- [10] Larsen J.M., et al., *Titanium Aluminides for Aerospace Applications*, (w:) *High Temperature Aluminides and Intermetallics*, eds. S.H. Whang et al., The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale 1990, 521-556.
- [11] Larsen J.M., Revelos W.C., Gambone M.L., *An Overview of Potential Titanium Aluminide Composites in Aerospace Applications*, MRS Symposium Proceedings 1997, 273, 3-16.
- [12] Rudnik D., Sobczak J., *Tłoki kompozytowe do silników spalinowych*, skrypt Instytutu Transportu Samochodowego, Warszawa 2001.
- [13] Wojciechowski A., Sobczak J., *Kompozytowe tarcze hamulcowe pojazdów drogowych*, skrypt Instytutu Transportu Samochodowego, Warszawa 2001.
- [14] Cornie J.A., *Advanced Pressure Infiltration Casting Technology Produces Near-Absolute Net-Shape Metal Matrix Composite Components Cost Competitively*, *Materials Technology* 1995, 10, 3/4, 43-48.
- [15] Suresh S., Mortensen A., Needleman A., *Fundamentals of Metal Matrix Composites*, Butterworth-Heinemann, Stoneham 1993.
- [16] Clyne T.W., Withers P.J., *An Introduction to Metal Matrix Composites*, Cambridge University Press, Cambridge 1993.
- [17] Boczkowska A., Kapuściński J., Puciłowski K., Wojciechowski S., *Kompozyty*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [18] Sobczak J., *Kompozyty metalowe*, Wydawnictwo Instytutu Odlewnictwa i Instytutu Transportu Samochodowego, Kraków-Warszawa 2001.