

dr hab. Elżbieta Janowska-Renkas, Profesor Uczelni

Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych, Wydział Budownictwa i Architektury,
Politechnika Opolska

dr inż. Przemysław Jakiel

Katedra Mostów, Geotechniki i Procesów Budowlanych, Wydział Budownictwa i
Architektury, Politechnika Opolska

mgr inż. Krzysztof Seewald

Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych, Wydział Budownictwa i Architektury,
Politechnika Opolska

Analiza właściwości mechanicznych oraz przegląd wybranych kompozytów naturalnych i syntetycznych

Analysis of mechanical properties and review of some natural and synthetic
composites

Streszczenie

Kompozyty należą do materiałów składających się z co najmniej dwóch składników, a ich połączenie prowadzi do uzyskania materiału o korzystniejszych właściwościach w porównaniu z poszczególnymi składowymi. Z tego względu znajdują one coraz większe zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, w tym w budownictwie. W referacie przedstawiono przegląd materiałów kompozytowych pochodzenia naturalnego i syntetycznego, uwzględniając właściwości mechaniczne, a w szczególności moduł odkształcalności podłużnej. Przedstawiono pochodzenie kompozytów wraz z historycznymi i perspektywicznymi możliwościami zastosowań. Zestawienie modułów Younga umożliwiło porównanie ze sobą wybranych materiałów kompozytowych lub ich poszczególnych składników.

Abstract

Composites belong to the materials based on a combination of at least two components, which leads to obtaining a material with more advantageous properties compared to the individual constituents. For this reason, they are finding increasing application in many branches of industry, including construction. This paper presents an overview of composite materials of natural and synthetic origin, considering their mechanical properties, and in particular, the modulus of longitudinal elasticity (Young's modulus). The origin of composites is discussed, along with their historical and prospective application possibilities. A compilation of Young's moduli allowed for the comparison of selected composite materials or their individual components.

1. Wprowadzenie

Współczesne technologie w coraz większym stopniu opierają się na materiałach kompozytowych, które znajdują zastosowanie nie tylko w zaawansowanych rozwiązaniach inżynierskich, ale również w produktach codziennego użytku. Przykłady te obejmują powszechnie dostępne urządzenia AGD, sprzęt sportowy, środki transportu, a także aplikacje o charakterze militarnym. Pomimo, że użytkownicy często nie są tego świadomi, wiele z wymienionych przedmiotów w dużej mierze wykonanych jest z kompozytów. Ich charakterystyczna struktura jest zazwyczaj ukryta pod warstwami wierzchnimi, przez co dopiero dokładna analiza materiałowa pozwala zidentyfikować złożony skład i właściwości.

Kompozyty otrzymywane są w wyniku połączenia co najmniej dwóch składników o odmiennych właściwościach, których synergiczne działanie umożliwia uzyskanie materiału o cechach przewyższających właściwości poszczególnych komponentów. Obecnie najczęściej z tą nazwą kojarzone są nowoczesne materiały na bazie żywic polimerowych i włókien, określane jako polimery wzmacniane włóknami (FRP – *Fiber Reinforced Polymer*), które dzięki swojej wysokiej wytrzymałości, małej ciężarze i możliwości kształtowania dowolnych form znajdują zastosowania w wielu gałęziach przemysłu, np. w lotnictwie, branży samochodowej i budownictwie. Parametry mechaniczne tego typu materiałów uzależnione są, m.in. od zorientowania włókien względem kierunków obciążenia. Do kompozytów zaliczyć można również materiały pochodzenia naturalnego, stanowiące nierzadko pierwowzór kompozytów syntetycznych. Jednym z przykładów powiązanych ściśle z kompozytami naturalnymi jest papier [1], czy ogólnodostępny dziś jedwab, który tysiące lat temu należał do „tkanin luksusowych” [2].

Rozważając tematykę kompozytów nie sposób pominąć jednego z najbardziej popularnych materiałów, jakim jest beton. W 1824 r. J. Aspdin opatentował cement portlandzki, który w połączeniu z kruszywem i wodą pozwolił na wytworzenie betonu. Z czasem zastosowano w nim wzmocnienie stałą uzyskując żelbet, co przyczyniło się do dynamicznego rozwoju i popularyzacji tego materiału w wielu gałęziach gospodarki. Wprowadzenie cięgien sprężających do elementów żelbetowych stanowi kolejny etap ich optymalizacji, umożliwiający zwiększenie rozpiętości konstrukcji, redukcję zarysowań oraz poprawę nośności i trwałości elementów.

W przypadku kompozytów kluczowe znaczenie ma odpowiednio dobrany skład fazowy, determinujący wytrzymałość i właściwości użytkowe, co jest rezultatem synergicznego oddziaływania wszystkich składników. Podobnie, jak w przypadku elementów żelbetowych, odpowiedni dobór składników oraz zbrojenia ma duże znaczenie dla ich nośności i trwałości, tak w kompozytach włóknistych istotne jest właściwe zaprojektowanie udziału objętościowego włókien w osnowie polimerowej. Matryca ta pełni równocześnie funkcję medium przenoszącego naprężenia na włókna oraz chroniącego je przed czynnikami środowiskowymi [3]. W związku z rosnącym znaczeniem kompozytów w różnych gałęziach przemysłu, bardzo ważny jest odpowiedni dobór ich parametrów użytkowych. Wpływa to na uzyskanie coraz bardziej zaawansowanych materiałów.

Mając na uwadze powyższe, w referacie przedstawiono rys historyczny związany z pojawieniem się i doskonaleniem kompozytów naturalnych i syntetycznych, analizę porównawczą ich właściwości mechanicznych i użytkowych oraz wybrane przykłady praktycznych zastosowań tych materiałów.

2. Rys historyczny

Analiza pochodzenia kompozytów naturalnych i syntetycznych wskazuje, że znacznie łatwiej jest prześledzić historię materiałów syntetycznych, których powstanie i doskonalenie są dobrze udokumentowane. W przypadku kompozytów naturalnych określenie momentu ich pierwszego zastosowania, ze zrozumiałych względów jest znacznie trudniejsze, ponieważ ich początki sięgają czasów starożytnych, a nawet prehistorycznych. Co istotne, wiele z tych materiałów wykorzystywano powszechnie ze względu na ich właściwości użytkowe, choć nie były one wówczas klasyfikowane jako kompozyty.

Jednym z pierwszych udokumentowanych zastosowań naturalnych kompozytów były cegły formowane z gliny i wzmacniane włóknami organicznymi, np. suszone na słońcu, z dodatkiem słomy lub trawy. Włókna roślinne zwiększały ich wytrzymałość i ograniczały ryzyko pęknięcia w trakcie suszenia [1]. Spośród naturalnych materiałów kompozytowych szczególne miejsce zajmuje drewno, powszechnie stosowane od czasów starożytnych aż po dzień dzisiejszy. W starożytnej Grecji wykorzystywano różne gatunki drewna do budowy kadłubów łodzi, często łącząc je z naturalnymi żywicami pełniącymi funkcję uszczelniaczy. Drewno było również szeroko stosowane w budownictwie – samodzielnie lub w połączeniu z elementami murowanym [4]. Również w starożytnym Egipcie stosowano materiały kompozytowe – m.in. klejone drewno do wyrobu sarkofagów oraz papirus, który ze względu na strukturę warstwową uznaje się za formę laminatu, powszechnie stosowaną dziś metodę wytwarzania kompozytów [5].

W Imperium Rzymskim dokonano jednego z najważniejszych odkryć w dziedzinie materiałów kompozytowych – opracowano beton oparty na naturalnej puczolanie, czyli reaktywnych popiołach wulkanicznych. Ten innowacyjny materiał cechował się wyjątkową trwałością i odpornością na działanie czynników atmosferycznych oraz wody morskiej. Beton „puczolany” był wykorzystywany w wielu monumentalnych konstrukcjach inżynierskich, z których liczne zachowały się do dziś. Przykłady obejmują, m.in. Panteon w Rzymie – z największą na świecie niezbrojoną kopułą betonową o średnicy ponad 43 m, istniejącą nieprzerwanie od ok. 125 r. n.e., Akwedukt Aqua Claudia – zasilający starożytny Rzym w wodę, częściowo zachowany i nadal imponujący pod względem inżynierskim i inne (Rys. 1) [6].



Rys. 1. Widok na Panteon (Rzym) i akwedukt Klaudiusza (Aqua Claudia) [7]

W Chinach natomiast rozwinięto metody wytwarzania papieru z włókien roślinnych, m.in. z konopi i kory drzew, oraz opracowano produkcję jedwabiu – wspomnianego już materiału o charakterze kompozytowym. Z jedwabnych nici pozyskiwanych z kokonów jedwabników powstawały następnie tkaniny o unikalnych właściwościach

mechanicznych i estetycznych. Zarówno technologia produkcji papieru, jak i jedwabiu była przez wiele stuleci pilnie strzeżona [8].

Początek rozwoju współczesnych kompozytów syntetycznych datuje się na koniec lat 40. XX w., kiedy to technologie wykorzystywane wcześniej w przemyśle lotniczym (np. włókna szklane w żywicach poliestrowych) zaczęto adaptować do zastosowań cywilnych, m.in. w przemyśle motoryzacyjnym. Okres zimnej wojny przyniósł intensywne inwestycje w sektor kosmiczny i obronny, co przyczyniło się do dynamicznego rozwoju technologii kompozytowych. Powstały wówczas nowe techniki wytwarzania, takie jak pultruzja czy formowanie próżniowe. Przełomowym momentem było opracowanie w latach 60. XX w. włókien węglowych. Mimo znacznie wyższych kosztów w porównaniu z włóknami szklanymi, włókna węglowe cechowały się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi, co uczyniło je idealnym materiałem dla przemysłu lotniczego [9].

W latach 70. XX w. trwały intensywne prace nad udoskonaleniem metod wytwarzania i poprawą właściwości mechanicznych kompozytów. Pod koniec tej dekady rozpoczęto badania nad zastosowaniem kompozytowych prętów zbrojeniowych w konstrukcjach morskich i mostowych, narażonych na działanie agresywnego środowiska, w którym stalowe zbrojenie ulega degradacji [10].

W kolejnych dekadach intensywny rozwój technologii kompozytowych umożliwił ich szerokie zastosowanie w realizacjach komercyjnych, obejmujących, m.in. sprzęt sportowy, przemysł motoryzacyjny, budownictwo oraz infrastrukturę techniczną [11]. Nowoczesne włókna i żywice wykorzystywane są, np. do wzmacniania i naprawy konstrukcji budowlanych, umożliwiając szybką interwencję i wydłużenie ich okresu eksploatacji. Obecnie elementy kompozytowe, takie jak profile konstrukcyjne, fragmenty kadłubów samolotów, czy pręty z kompozytów włókniстых znajdują szerokie zastosowanie w wielu sektorach gospodarki – od przemysłu lotniczego i transportowego po nowoczesne budownictwo inżynieryjne.

Dobrym przykładem skutecznego wdrażania kompozytów w budownictwie może być powstanie w 1982 r. w Pekinie Miyun Bridge - pierwszego mostu drogowego, wykonanego całkowicie z FRP. Posiada on przęsło o rozpiętości 20,7 m i 6 dźwigarów warstwowych z włókien szklanych i poliestru. W tym samym czasie zbudowano Gintsi Highway Bridge (Bułgaria), pierwszy most hybrydowy, z wykorzystaniem FRP. W obydwu obiektach zastosowano pracochłonną metodę ręcznego laminowania dźwigarów.



Rys. 2. Mostowe obiekty kompozytowe: a) kładka Aberfeldy Footbridge w Wielkiej Brytanii oraz b) most kompozytowy w Nowej Wsi k/Rzeszowa [12, 13]

Na początku lat 90. XX w. nastąpił intensywny rozwój mostów wykonanych z kompozytów FRP, które powstały w Wielkiej Brytanii (kładka Aberfeldy Footbridge, 1992 (Rys. 2a), most Bonds Mill Lift Bridge, 1994), czy w USA (most No-Name Creek

Bridge, 1996). Materiały te zaczęto także stosować do wzmacniania istniejących konstrukcji mostów. [14]. W Polsce pierwszym obiektem wykonanym z laminatów szklanych i rdzenia z pianki PET jest przenośna kładka pieszo-rowerowa, która powstała na terenie kampusu Politechniki Gdańskiej w 2015 r. Rok później, w Błazowej i Nowej Wsi k/Rzeszowa (Rys. 2b) wykonano pierwsze drogowe mosty kompozytowe [12].

Klasyfikacja kompozytów obejmuje takie aspekty, jak pochodzenie, przeznaczenie, rodzaj osnowy i składnik zbrojący (Rys. 3). Szczególnie istotne ze względu na możliwość pozyskania jest naturalne i syntetyczne pochodzenie kompozytów.

Podział kompozytów ze względu na:			
Pochodzenie	Przeznaczenie	Rodzaj osnowy	Składnik zbrojący
Naturalne	Konstrukcyjne	Metaliczna	Umacniane dyspersyjne
Wytworzone w sposób sztuczny	O szczególnych właściwościach	Polimerowa	Zbrojone cząstkami
		Ceramiczna	Zbrojone włóknami
			Strukturalne

Rys. 3. Ogólna klasyfikacja kompozytów

3. Charakterystyka ogólna i właściwości mechaniczne wybranych materiałów kompozytowych

3.1 Kompozyty naturalne

Naturalne materiały od zawsze stanowiły przedmiot zainteresowania naukowców, ponieważ często inspirują do opracowywania materiałów syntetycznych o zbliżonych właściwościach. Wśród kompozytów naturalnych można wyróżnić przynajmniej kilka, które towarzyszą ludzkości. Jednym z nich jest skóra ludzka, która izoluje ciało. Ze względu na złożoną budowę warstwową, skóra wykazuje anizotropię mechaniczną, a jej model materiałowy można scharakteryzować jako trójfazowy układ obejmujący naskórek, skórę właściwą oraz tkankę podskórną. Oznacza to, że w początkowym etapie obciążenia, skóra jest bardzo podatna na odkształcenia, w drugiej fazie następuje wzrost sztywności wraz z ułożeniem włókien w kierunku obciążenia; ostatnia, trzecia faza charakteryzuje się liniowością, gdzie następuje bardzo szybki wzrost sztywności [15]. Przykładem zwierząt zdolnych do tworzenia materiałów kompozytowych bazujących na białkowych włóknach jedwabiu są stawonogi. Jednym z nich są jedwabniki morwowe tworzące kokony z włókien jedwabiu. W podobny sposób sieci tkają pająki wytwarzając je z różnych włókien kompozytowych jedwabiu. Część włókien jedwabiu charakteryzuje się dużą wytrzymałością na rozciąganie, porównywalną z włóknami aramidowymi lub stalą. Takie właściwości pozwoliły na wykorzystanie ich jako cięciwy łuków lub sieci rybackich, papieru, tekstyliów czy materiałów opatrunkowych [2, 16].

Kolejnym przykładem naturalnych kompozytów są kości ludzkie. Rozróżnia się w nich trzy elementy: okostna, tkanka kostna i szpik kostny. Stanowią one przykład

naturalnego materiału kompozytowego, zbudowanego z okostnej, tkanki kostnej i szpiku. Struktura ta łączy elementy o różnych właściwościach – od gęstej i odpornej mechanicznie tkanki zbitej po elastyczną i porowatą istotę gąbczastą – zapewniając jednocześnie wytrzymałość, elastyczność oraz zdolność regeneracji [17].

Do najbardziej znanych i rozpowszechnionych, naturalnych materiałów kompozytowych w różnych gałęziach przemysłu należy drewno. Liczący sobie wiele milionów lat materiał powstał z różnych składników, co pozwoliło na uzyskanie kompozytu o bardzo korzystnych właściwościach. Składa się ono głównie z włókien celulozy w osnowie ligniny. Rozważając strukturę drewna na poziomie mikroskopowym, jego właściwości fizyko-mechaniczne wynikają z układu komórek i właściwości mechanicznych ich ścianek [1]. Drewno jest surowcem odnawialnym i biodegradowalnym, a więc bardzo przyjazny dla środowiska, a wszechstronność jego zastosowań sprawia, że należy do jednych z najczęściej wykorzystywanych materiałów na konstrukcje.

3.2 Kompozyty syntetyczne

Jak już wspomniano, do najbardziej rozpowszechnionych materiałów kompozytowych stosowanych w budownictwie należy beton, powstający z połączenia osnowy w postaci zaczynu cementowego z wypełniającym go kruszywem. Wynalezienie cementu portlandzkiego, a następnie żelbetu pozwoliło na szerokie zastosowanie betonu jako materiału budowlanego i zrewolucjonizowanie budownictwa XX wieku. Przez wiele lat skład betonu pozostawał niezmienny, opierając się głównie na odpowiednich proporcjach cementu, wody i kruszywa. Obecnie technologia betonu jest nadal udoskonalana i np. dzięki aplikacji dodatków mineralnych (pyły krzemionkowe, popioły lotne, żużle wielkopieczowe) oraz syntezie domieszek chemicznych (superplastyfikatorów), które są nieustannie modyfikowane pod względem składu, a tym samym efektywności działania, uzyskuje się beton wysokiej wytrzymałości, powyżej 60 MPa i trwałości znacznie przekraczającej wytrzymałość tradycyjnych trójskładnikowych betonów [18, 19].

Wśród ogólnodostępnych prętów kompozytowych stosowanych do zbrojenia konstrukcji budowlanych wyróżnić można pręty z włókien szklanych, węglowych, aramidowych i bazaltowych, tzw. zbrojenie niemetaliczne (Rys. 4). Pręty wykonywane są z włókien ciągłych w osnowie żywicy termoutwardzalnej, z wykorzystaniem metody pultruzji. Stały się one popularne pod koniec XX w., natomiast pierwsze zastosowania w konstrukcjach budowlanych miały miejsce w latach 70. XX w. Pręty z kompozytów włóknistych wyróżniają się wysoką wytrzymałością na rozciąganie i całkowitą odpornością na korozję, co pozwala na stosowanie ich w elementach narażonych na działanie agresywnego środowiska, w którym pręty stalowe wymagałyby otuliny betonu o większej grubości [20].



Rys. 4. Przykład prętów GFRP (a) i CFRP (b) [21]

Kolejną grupę stanowią kompozyty z metaliczną osnową, obejmujące układy typu metal–metal, metal–ceramika oraz metal–polimer, łączące wysoką przewodność cieplną i wytrzymałość mechaniczną osnowy z właściwościami funkcjonalnymi fazy rozproszonej, co czyni je materiałami o dużym potencjale w zastosowaniach inżynierskich, zwłaszcza w warunkach podwyższonych obciążeń termicznych i mechanicznych [22]. W porównaniu do kompozytów z osnową polimerową mają one zasadniczą wadę - wymagają znacznie wyższych temperatur w procesie produkcji, jak i skomplikowanej metody aplikacji zastosowanych włókien. Wytwarzane są w uprzednio przygotowanych formach, wyposażonych we włókna lub siatki, do których wtryskuje się pod ciśnieniem płynny metal. Osnowa najczęściej wykonywana jest z glinu, który posiada małą gęstość i niską temperaturę topnienia. Kompozyty uzyskane w ten sposób posiadają niewielki współczynnik rozszerzalności cieplnej i jednocześnie większą wytrzymałość oraz moduł odkształcalności podłużnej. Pomimo wysokich kosztów produkcji i korozji galwanicznej, uzyskane właściwości pozwoliły na szerokie zastosowanie takich kompozytów w lekkich konstrukcjach oraz obudowach urządzeń elektronicznych. Kompozyty z osnową metaliczną, zwłaszcza aluminiową, charakteryzują się wysoką wytrzymałością mechaniczną, podwyższonym modułem Younga i małym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej, co czyni je odpornymi na deformacje pod wpływem obciążeń termicznych. Zastosowanie procesu infiltracji ciekłego metalu pod ciśnieniem umożliwia uzyskanie dobrej adhezji między włóknami a osnową, co przekłada się na skuteczniejsze przenoszenie naprężeń i zwiększoną odporność zmęczeniową [3].

Kompozyty drewna należą do rodzaju materiałów powstających z mieszanki mączki, włókien drzewnych lub materiałów pochodzących z recyklingu i odpadów przemysłowych oraz tworzywa sztucznego, np. płyty wiórowe lub OSB. Jako osnowę wykorzystuje się najczęściej HDPE – polietylen dużej gęstości, PVC – polichlorek winylu i PP – polipropylen. Są one wykonywane w formie odlewów lub tłoczenia, a ich zaletą jest duża odporność na absorpcję wody i na warunki atmosferyczne, co stwarza możliwość wyeliminowania impregnacji. Kompozyty drewna z osnową polimerową (WPC) charakteryzują się dobrą sztywnością, stabilnością wymiarową i odpornością na pękanie i działanie czynników atmosferycznych. Struktura włókno-polimerowa i proces tłoczenia lub odlewania zapewniają równomierne rozłożenie naprężeń, co wpływa na dużą wytrzymałość i małą podatność na odkształcenia pod wpływem wilgoci i temperatury [23]. Elementy wykonane z kompozytów drewna znalazły zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, a także w budownictwie, w zastosowaniach wewnątrz i na zewnątrz [24]. Kolejnym materiałem o innowacyjnych właściwościach jest drewno klejone warstwowo typu PSL (Parallel Strand Lumber) oraz LVL (Laminated Veneer Lumber). Te wysokowytrzymałe materiały inżynierskie powstają w wyniku klejenia pasm i fornirów drzewnych o równoległym układzie włókien. Charakteryzują się one dużą jednorodnością cech mechanicznych, np. w zakresie odkształceń i korzystnym stosunkiem wytrzymałości do masy, dzięki czemu stosowane są na elementy nośne w konstrukcjach budowlanych [25].

3.3 Właściwości mechaniczne

Materiały kompozytowe stosowane na konstrukcje powinny posiadać odpowiednie właściwości mechaniczne, ponieważ mają bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo, np. budowli. W związku z rosnącym zainteresowaniem wykorzystania kompozytów, np. w przemyśle kosmicznym lub chemicznym (wytwarzanie zbiorników ciśnieniowych)

stawiane są im wysokie wymagania wytrzymałościowe, odporności termicznej oraz jak najmniejszej gęstości.

Wytwarzanie kompozytów z materiałów o różnych właściwościach wpływa na uzyskiwanie znacznie korzystniejszych parametrów mechanicznych (np. wytrzymałości na ściskanie) w porównaniu z materiałami jednorodnymi, dlatego w wielu zastosowaniach są one niezastąpione. Właściwości kompozytów FRP można określić eksperymentalnie na jednym z czterech poziomów: (1) poziom włókien, np. pojedyncze włókno w warstwie pasa kształtownika szerokostopowego, (2) poziom laminy, np. jedna warstwa lub warstwy pasa takiego profilu, (3) poziom laminatu, np. pas tego profilu oraz (4) poziom pełnego przekroju. Do podstawowych parametrów mechanicznych decydujących o zastosowaniu takiego materiału należą wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości podłużnej [3]. Pierwszy z nich określa zdolność materiału do przenoszenia obciążeń, a drugi odpowiedzialny jest za sztywność. Z tego względu, na podstawie danych literaturowych porównano właściwości mechaniczne wybranych, naturalnych i syntetycznych materiałów kompozytowych oraz ich składników. Wartości modułów Younga i wytrzymałości na rozciąganie zestawiono w tablicy 1 [2, 3, 9, 15, 20, 26, 27]. Jednocześnie pominięto wpływ kierunku ułożenia włókien w prętach na parametry mechaniczne takiego kompozytu jako nieistotny dla elementów pracujących jednoosiowo.

Na rysunku 5 przedstawiono porównanie wytrzymałości na rozciąganie i modułu Younga materiałów kompozytowych zestawionych w tablicy 1, natomiast zależność naprężeń od odkształceń żywic i prętów kompozytowych znajdują się na rysunku 6. Wyniki analizy wskazują jednoznacznie, że najwyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie osiągają włókna bazaltowe (ok. 4840 MPa), włókna aramidowe (ok. 4200 MPa) oraz włókna węglowe (ok. 3700-4800 MPa), co czyni je materiałami szczególnie predysponowanymi do zastosowań w kompozytach o wysokiej odporności mechanicznej. Również pręty kompozytowe z tych włókien wykazują znaczną wytrzymałość, choć nieco mniejszą niż same włókna, co wynika z udziału matrycy i struktury kompozytu. Najmniejszą wytrzymałość posiada włókno szklane (średnio 2970 MPa). Największe odkształcenia zarejestrowano dla żywic (średnio 7%), a najmniejsze dla prętów kompozytowych, ponadto, włókna zbrojone charakteryzują się różnymi wytrzymałościami na rozciąganie oraz liniową zależnością $\sigma - \epsilon$ (Rys. 6).

Można zauważyć, że w przypadku włókien węglowych, największą wartością modułu sprężystości podłużnej charakteryzują się włókna o najniższej wytrzymałości na rozciąganie. Tego rodzaju prawidłowość nie występuje w przypadku włókien aramidowych i szklanych. Reasumując, kompozyty stosowane na zbrojenie w porównaniu z rozpowszechnioną stalą charakteryzują się ok. 2 razy większą wytrzymałością na rozciąganie, ale mniejszym, średnio o 50% w przypadku CFRP, modułem Younga (Tablica 1).

Z kolei w grupie materiałów naturalnych jedwab wyróżnia się wyjątkowo dużą wytrzymałością na rozciąganie (ok. 500 MPa), porównywalną z niektórymi włóknami szklanymi i kompozytami konstrukcyjnymi. Kość ludzka (ok. 130 MPa) oraz drewno sosnowe (12–131 MPa) osiągają umiarkowane wartości, uzależnione m.in. od kierunku obciążenia (anizotropia) i zawartości wody. Skóra, mimo niskiej wytrzymałości, cechuje się wyjątkowo dużą zdolnością do odkształceń, co jest korzystne w kontekście jej funkcji biologicznych.

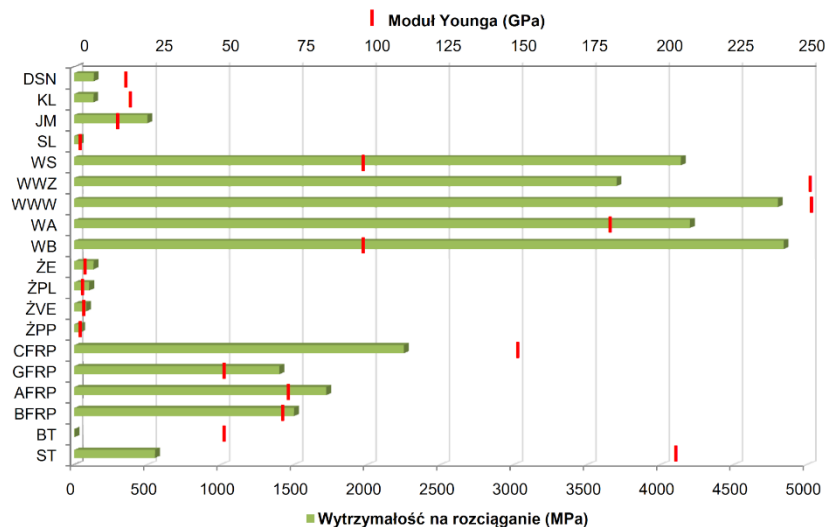
W kontekście budownictwa i inżynierii materiałowej właściwości, takie jak wytrzymałość na rozciąganie, moduł sprężystości oraz odporność na propagację

pęknąć mają fundamentalne znaczenie w procesie projektowania elementu. Beton, będący szeroko stosowanym materiałem konstrukcyjnym wykazuje jedną z najmniejszych wytrzymałości na rozciąganie (ok. 2–3,5 MPa), co uzasadnia konieczność jego zbrojenia w elementach narażonych na rozciąganie. Tak niska wytrzymałość wynika z jego kruchej, ziarnistej mikrostruktury i braku ciągłości materiałowej na poziomie mikroskopowym. Wada ta rekompensowana jest jednak dużą trwałością i odpornością na czynniki atmosferyczne, a także izolacyjnością cieplną oraz odpornością na ogień.

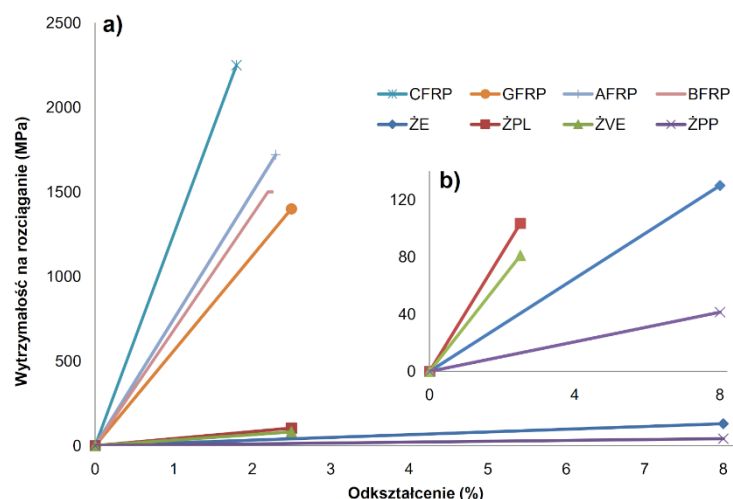
Tablica 1. Właściwości mechaniczne wybranych materiałów kompozytowych oraz ich składników [2, 3, 9, 15, 20, 26, 27]

Rodzaj kompozytu		Moduł Younga	Wytrzymałość na rozciąganie	Odkształcenie	Gęstość
		[GPa]	[MPa]	[%]	[g/cm ³]
Materiały naturalne					
Drewno sosnowe (DSN)		2,6-15,5	12-131		0,45
Kość ludzka (KL)		14-18	130	3	1,60
Jedwab morwowy (JM)		5-12	500	19	1,3
Skóra ludzka (SL)		0,01-0,15	5-32	2,5	
Materiały syntetyczne (sztuczne)					
Włókna	Włókna szklane (WS)	69-90	1800-4140	2,5	1,2-2,1
	Włókna węglowe zwykłe (WWZ)	250	3700	1,2	1,70
	Węglowe wysokiej wytrzymałości (WWW)	250	4800	1,4	1,80
	Aramidowe (WA)	83-179	2800-4200	2,4	1,44
	Bazaltowe (WB)	79,3-91,3	3000-4840		2,7
Żywice	Epoksydowa (ŻE)	2,75-4,1	55-130	8,0	1,2-1,4
	Poliestrowa (ŻPL)	2,10-3,45	34,50-103,50	2,5	1,1-1,4
	Winyloestrowa (ŻVE)	3,00-3,35	73-81	6,0	1,15-1,35
	Polipropylenowa (ŻPP)	0,995-1,78	26-41,4	8,0	0,89-0,92
Pręty komp.	Włókna węglowe (PWW) CFRP	100-147	1200-2250	1,8	1,7
	Włókna szklane (PWS)	30-46	520-1400	2,5	2,2
	Włókna aramidowe (PWA)	7-68	700-1720	2,3	2,0
	Włókna bazaltowi (PWB) BFRP	50-65	600-1500	2,2	2,0
Beton (BT)		25-45	3,0	-	2,4
Stal konstrukcyjna (ST)		210	340-700	-	7,85

Przedstawione w Tablicy 1 różnice w wytrzymałościach kompozytów syntetycznych wynikają zarówno ze struktury molekularnej (np. uporządkowaniem włókien w kewlarze, czy grafitowych warstwach węglowych), jak i z rodzaju wiązań międzycząsteczkowych oraz obecnością faz rozpraszających naprężenia.



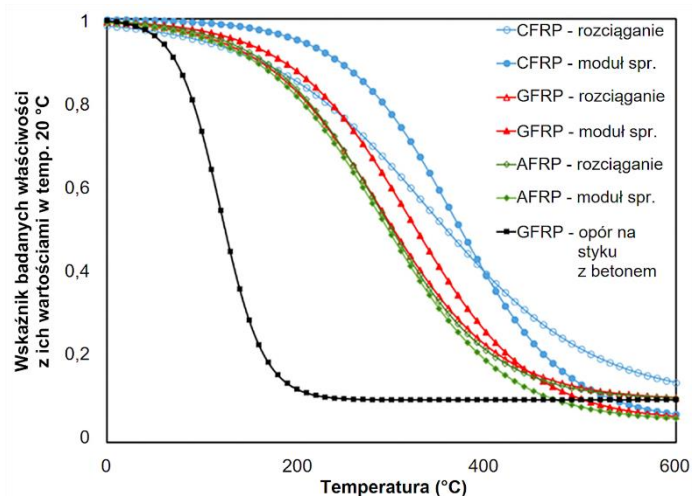
Rys. 5. Porównanie wytrzymałości na rozciąganie i modułu Younga wybranych materiałów jednorodnych i kompozytowych i stali (oznaczenia wg Tablicy 1)



Rys. 6. Zależność wytrzymałości na rozciąganie od odkształceń dla: a) żywicy i prętów kompozytowych oraz b) żywicy w układzie przeskalowanym (oznaczenia wg Tablicy 1)

Ważnym parametrem warunkującym stosowanie włókien jest ich podatność na temperaturę. Na rysunku 7 przedstawiono wykres zależności wytrzymałości na rozciąganie i modułu Younga od temperatury dla prętów z włókien węglowych, aramidowych i szklanych oraz betonu wzmocnionego taśmą CFRP. Materiały te wykazują podobne, quasi liniowe charakterystyki i znaczne obniżenie ww. parametrów, do ok. 10% ich pierwotnych wartości w zakresie temperatur 20-500C. Wyjątkiem jest krzywa odpowiadająca próbce betonu wzmocnionego taśmą CFRP, dla której obniżenie ww. parametrów nastąpiło w zakresie ponad 2-krotnie niższej temperatury (20-200C).

Kompozyty w porównaniu z betonem i stalą charakteryzują się stosunkowo niewielką gęstością, co stanowi ich dużą zaletę w zastosowaniach konstrukcyjnych. Najmniejszą gęstość o wartości 1,44 g/cm³ posiadają włókna aramidowe, a największą - 1,8 g/cm³ włókna węglowe.



Rys. 7. Zależności wytrzymałości na rozciąganie i modułu Younga od temperatury dla prętów CFRP, AFRP i GFRP oraz betonu wzmocnionego taśmą CFRP [28]

4. Kompozyty dziś i jutro - przykłady zastosowań

Obecnie trudno znaleźć dziedzinę, w której nie mają zastosowania materiały kompozytowe. W lotnictwie i kosmonautyce wykorzystuje się je do budowy lekkich i wytrzymałych konstrukcji, takich jak kadłuby i skrzydła samolotów. W motoryzacji służą do produkcji elementów karoserii i wnętrza pojazdów, co pozwala obniżyć ich masę i zużycie paliwa. W przemyśle energetycznym są stosowane w turbinach wiatrowych oraz jako izolatory i obudowy urządzeń. Kompozyty znajdują także zastosowanie w medycynie, sporcie i przemyśle morskim, dzięki czemu są uznawane za materiały przyszłości.

W obszarze energii odnawialnej coraz większe znaczenie ma wykorzystanie syntetycznych materiałów kompozytowych. Efektywność turbin wiatrowych jest w wysokim stopniu zależna od budowy poszczególnych elementów. Dzięki zastosowaniu włókien węglowych w łopatach wirnika zwiększono ich długość co ma bezpośrednie przełożenie na generowaną moc i efektywność pracy.

Dzięki całkowitej odporności antykorozyjnej, pręty z FRP znajdują coraz szersze zastosowania w konstrukcjach narażonych na agresywne działanie środowiska, gdzie zastosowanie tradycyjnej stali może mieć znaczny wpływ na trwałość konstrukcji. Wykorzystanie prętów kompozytowych w murach oporowych, będących w ciągłym kontakcie z wodą morską, znacznie wydłuża czas eksploatacji konstrukcji i redukuje koszty utrzymania.

Nowoczesne materiały kompozytowe stosowane w budownictwie, łączące jednocześnie funkcje konstrukcyjne i tzw. samoregeneracji, są obecnie przedmiotem ciągłego rozwoju. Właściwości typu "smart", polegające, np. na automonitoringu konstrukcji, zintegrowane z podstawowymi właściwościami mechanicznymi kompozytów pozwalają na rozszerzenie zakresu zastosowań nie tylko w budownictwie, ale i w pozostałych gałęziach przemysłu. Umożliwia to zastosowanie, m.in. grafenu, nanorurek węglowych, czy elektroprowadzących kompozytów cementowych. Interesującym kierunkiem badań jest ich zdolność do wykrywania uszkodzeń. Umożliwia to "wbudowany" w materiał pomiar rezystancji między cząsteczkami kompozytu, zmieniającymi swoje położenie pod obciążeniem.

Możliwość uzyskania tego rodzaju właściwości pozwala na szeroki wachlarz aplikacji nanomateriałów [29].

Prowadzone są również prace nad udoskonalaniem technologii wdrażania kompozytów w mostownictwie, z dodatkowym wykorzystaniem tworzyw pochodzących z recyklingu. Doskonałym tego przykładem może być wybudowany w 2011 r. 3-przęsłowy most Easter Dawyck Bridge w Peeblesshire (Szkocja), o długości 27,4 m, którego przęsła wykonano z 50 ton tworzyw sztucznych, pochodzących ze zużytych opakowań PET. W 2015 r. wykonano jak dotąd najdłuższą kładkę dla pieszych w technologii druku 3D. W podobny sposób powstała w 2015 r. kładka w Chengdu (Chiny) o rozpiętości 20 m. Obecnie kompozyty stosowane są do budowy kompletnych przęseł (głównie kładek dla pieszych) oraz elementów składowych, jak dźwigary, pomost, ciągną, w sporadycznych przypadkach pylony. Wykorzystywane są one również do wytwarzania elementów wyposażenia, niemniej nie ma jak dotąd mostów autostradowych oraz mostów kolejowych z zastosowaniem kompozytów. Bariere nadal stanowią ograniczenia technologiczne oraz brak zaufania zarządców do nowych materiałów, których skuteczność powinna być gruntownie zbadana.

Pomimo, że koszty kompozytów stosowanych na konstrukcje są 2-4 razy większe w porównaniu do tradycyjnych materiałów (beton, stal), należy zauważyć, że relacja ta nie uwzględnia kosztów cyklu ich życia [30]. Oczekuje się, że wskaźniki kosztu wytworzenia konstrukcji i kosztu cyklu jej życia w połączeniu z potencjalną szybkością montażu i trwałością zapewnią wystarczający impuls do przyjęcia w nadchodzących latach materiałów kompozytowych, jako normy w odniesieniu do budownictwa. Dużym wyzwaniem dla inżynierów są także działania mające na celu eliminację sporadycznie występujących awarii konstrukcji wykonanych z kompozytów.

5. Podsumowanie

Zastosowanie materiałów kompozytowych w budownictwie dynamicznie wzrasta, odpowiadając na rosnące wymagania dotyczące trwałości, lekkości, odporności na korozję oraz efektywności energetycznej konstrukcji. Jak zauważono powyżej, istnieje wiele przykładów znaczących konstrukcji, w których za konieczne uznano wdrożenie kompozytów, zwłaszcza w trudnych warunkach, a trend ten będzie w przyszłości narastał. W najbliższych latach przewiduje się intensywny rozwój kompozytów o właściwościach funkcjonalnych, takich jak zdolność do samonaprawy, inteligentne monitorowanie stanu technicznego (tzw. smart composites), czy odporność na ekstremalne warunki środowiskowe.

Szczególnie obiecujące są kompozyty włókniste (np. z włóknami bazaltowymi, szklanymi i węglowymi), które dzięki wysokiej wytrzymałości przy niskiej masie stanowią realną alternatywę dla tradycyjnych materiałów zbrojeniowych. Analiza wartości modułu Younga i wytrzymałości na rozciąganie włókien wykazała, że najwyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie mają włókna bazaltowe, aramidowe i węglowe. Dlatego są one stosowane do wytwarzania wysokowytrzymałych kompozytów przeznaczonych dla konstrukcji poddanych wysokim naprężeniom. Włókna aramidowe, w porównaniu z węglowymi posiadają także duży moduł Younga, przy ponad 2-krotnie mniejszej wytrzymałości na rozciąganie. Równocześnie rośnie znaczenie kompozytów ekologicznych, tworzonych z materiałów pochodzenia roślinnego oraz surowców wtórnych, wspierających ideę zrównoważonego budownictwa i gospodarki cyrkularnej. Nowe możliwości oferuje także druk 3D z

wykorzystaniem kompozytów budowlanych, umożliwiającą tworzenie zoptymalizowanych, lekkich struktur o złożonej geometrii.

Współczesna technologia betonu również podąża w kierunku innowacyjnych kompozytów. Wyznacznikiem jest matryca cementowa zintegrowana z włóknami (stalowymi, szklanymi, polimerowymi, bazaltowymi) w celu poprawy cech fizyko-mechanicznych, np. wytrzymałości, odporności na pękanie, trwałości eksploatacyjnej.

W chwili obecnej prowadzone są na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej prace nad nową generacją prętów z kompozytów włóknistych z przeznaczeniem do zbrojenia betonu. Celem autorów jest uzyskanie modelu materiałowego zbliżonego do prezentowanego przez tradycyjne pręty zbrojeniowe wykonane ze stali.

Przyszłość betonu jako kompozytu wiąże się z wdrażaniem inteligentnych, samonaprawiających się i przyjaznych środowisku rozwiązań, opartych na zrównoważonych surowcach i technologiach ograniczających ślad węglowy. Przedstawione kierunki rozwoju prowadzą do wniosku, że materiały kompozytowe – w tym zaawansowane formy betonu – będą odgrywać kluczową rolę w budownictwie XXI wieku, zarówno w konstrukcjach inżynierskich, jak i w obiektach mieszkalnych, czy specjalistycznych. Należy również mieć na uwadze korzyści, jakie może przynieść w tworzeniu innowacyjnych materiałów wzorowanie się na doskonałych rozwiązaniach, jakie przynosi naturalne otoczenie człowieka.

Literatura

- [1] Gibson R. F., Principles of composite material mechanics. Taylor & Francis Group, LLC, 2016.
- [2] Altman G. H. et. al., Silk-based biomaterials. Biomaterials 24, 2003, 401-416.
- [3] Chung D. D. L., Composite Materials - Science and Applications. Springer-Verlag London Limited, 2010.
- [4] Woods S., A History of Wood from the Stone Age to the 21st Century. EcoBuilding, The American Institute of Architects, 2016.
- [5] Shaw I., The Oxford history of ancient Egypt. Oxford University Press, 2003.
- [6] MacDonald W. L., The Architecture of the Roman Empire. An Introductory Study. Yale Publications in the History of Art, 1982.
- [7] <https://en.wikipedia.org>
- [8] Tsien, T.H., Needham J., Science and Civilisation in China: Volume 5, Chemistry and Chemical Technology; Part 1, Paper and Printing. Cambridge University Press, 1985.
- [9] Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. American Concrete Institute, ACI 440.1R-15, 2015.
- [10] Eamon Ch. D. et al., Design and Construction Guidelines for Strengthening Bridges using Fiber Reinforced Polymers (FRP). Michigan Department of Transportation. Final Report, 2014.
- [11] www.addcomposites.com
- [12] Siwowski T., Pierwsze polskie obiekty mostowe z kompozytów FRP. Drogownictwo 11, 2017.

- [13] Stratford, T., The Condition of the Aberfeldy Footbridge after 20 Years in Service. Paper presented at Structural Faults and Repair 2012, Edinburgh, United Kingdom, 3/07/12 - 5/07/12.
- [14] Qureshi J., A Review of Fibre Reinforced Polymer Bridges. *Fibers*, 2023, 11, 40.
- [15] Annaidh A. N. et al., Characterization of the anisotropic mechanical properties of excised human skin. *J. of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 5 (2012) 139-148.
- [16] Hardy, J. G., Scheibel, T. R. Composite materials based on silk proteins. *Progress in polymer science*, 35(9), 1093-1115, 2010.
- [17] Sanchez-Molinaa D. et al., Fractal dimension and mechanical properties of human cortical bone. *Medical Engineering & Physics* 35, 2013, 576-582.
- [18] Janowska-Renkas E., Jakiel P., Fabianowski D., Optimal Selection of High-Performance Concrete for Post-Tensioned Girder Bridge Using Advanced Hybrid MCDA Method. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 21, art. 6553.
- [19] Camões A., Ferreira R.M., Technological evolution of concrete: from ancient times to ultra high-performance concrete. *Engineering, Materials Science, History*, 2010.
- [20] Helbrych P., Jura J., Niemetaliczne zbrojenie FRP w kompozytach betonowych jako alternatywa dla prętów stalowych. *Przegląd budowlany* 11-12/2022.
- [21] www.indurotech.com
- [22] Konieczny M., Kształtowanie właściwości mechanicznych kompozytów warstwowych o osnowie metalowej z udziałem faz międzymetalicznych. Monografie, studia, rozprawy nr M41. Politechnika Świętokrzyska, 2013.
- [23] Murayama, K. et al., Mechanical properties of wood/plastic composites formed using wood flour produced by wet ball-milling under various milling times and drying methods. *J. of Wood Science*, 65, 1-9, 2019.
- [24] Martinez Lopez Y. et al., Comparative study of different technological processes on the physical-mechanical properties and flammability of wood plastic composite. *J. of Building Engineering* 52 (2022) 104391.
- [25] Larsen H.J., Thelandersson S., *Timber Engineering*. John Wiley & Sons, 2003
- [26] Newhook J. P., Svecova D., *Reinforcing Concrete Structures with Fibre-Reinforced Polymers*. ISIS Canada Corporation, Design Manual No. 3, 2007.
- [27] Kaw A. K., *Mechanics of Composite Materials*, Second edition. CRC Press, 2006.
- [28] Chataigner S. et al., Use of FRP rebars in reinforced concrete structures: an overview of the 2021 French guideline from AFGC. 11th Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering, Jul 2023, Rio de Janeiro, Brazil.
- [29] Rolemberg Prudentea I.N. et al., Graphene family (GFMs), carbon nanotubes (CNTs) and carbon black (CB) on smart materials for civil construction: Self-cleaning, self-sensing and self-heating. *J. of Building Engineering* 95 (2024) 110175.
- [30] Karbhari V.M., Zhao L., Use of composites for 21st century civil infrastructure. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 185, 2000, p. 433-454.