



Temat specjalny

# WYKORZYSTANIE KOMPOZYTÓW W BUDOWNICTWIE

tekst: **MARIAN KOWACKI**, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne

Inżynierowie budownictwa lądowego i wodnego dążą obecnie do projektowania i wykonywania takich konstrukcji, które nie tylko spełniałyby wymagania nowoczesnej architektury, ale także gwarantowały ograniczenie kosztów związanych z ich projektowaniem, realizacją i utrzymaniem. Wszystkie te warunki spełniają materiały kompozytowe – do niedawna stosowane w branży budowlanej jedynie do wzmacniania istniejących struktur, a dziś wykazujące swoje ponadprzeciętne właściwości w całości nowych konstrukcjach.



Przekrój mieszanki betonowej, w której zastosowano zbrojenie kompozytowe EasyBet, fot. Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o.

Zainteresowanie elementami kompozytowymi w budownictwie stale wzrasta, co jest całkowicie uzasadnione, zważywszy na wielość atrakcyjnych dla budownictwa cech, którymi się charakteryzują. Wystarczy spośród nich wymienić dużą wytrzymałość przy niewielkim ciężarze, odporność na korozję i na działanie czynników zewnętrznych, łatwość formowania i uzyskiwania różnorodnych kształtów, a także stosunkowo prosty sposób łączenia elementów [1].

### Właściwości kompozytów

Kompozyty powstały dzięki poszukiwaniom materiałów o coraz większej wytrzymałości i sztywności, przy jednocześnie możliwie małej gęstości. Jeśli chodzi o tę grupę materiałów, to stanowi ona jedno z najbardziej spektakularnych osiągnięć inżynierii materiałowej. Choć niektórzy badacze za materiały kompozytowe uznają jedynie te zaprojektowane i wytworzone przez człowieka, z drugiej strony trzeba przyznać, że nie dorównują one tym, których przykłady dostarcza natura, by wymienić chociażby drewno czy kości. Odkąd człowiek w połowie XX w. nauczył się wytwarzać kompozyty syntetyczne, zainteresowanie ich zastosowaniem gwałtownie wzrosło. Badano i opracowywano coraz to lepsze materiały. Na początku lat 60. ubiegłego wieku opracowano technologię włókien węglowych i borowych o wyjątkowo dużym module sprężystości. Kolejnym krokiem było opracowanie wysoko wytrzymałych włókien SiC oraz  $Al_2O_3$ , charakteryzujących się dużą stabilnością termiczną [2].

Słowo kompozyt ma swoje źródło w języku łacińskim – pochodzi od *compono*, co znaczy składam, układam, lub *compositio* – złożenie, zestawienie. Definicja encyklopedyczna określa kompozyty jako tworzywo złożone z co najmniej dwóch składników (zwanymi komponentami, fazami) o różnych właściwościach, których połączenie sprawia, że ma ono właściwości lepsze i (lub) nowe (dodatkowe) w porównaniu z właściwościami poszczególnych składników lub w porównaniu z sumą właściwości tych składników. W literaturze brak jest jednoznacznej definicji kompozytów. Wiele z nich oddaje w sposób ogólny cel wytwa-



### Czy materiały kompozytowe zyskały już jakąś popularność na polskim rynku budowlanym?

Nowoczesne kompozyty, takie jak EasyBet, obecnie wkraczają na rynek materiałów budowlanych w Polsce. Tradycyjne podejście do metod projektowania konstrukcji stanowi pewną barierę w szerszym ich stosowaniu. Korzyści związane z aplikacją tego rodzaju materiałów, takie jak oszczędność czasu, pieniędzy oraz poprawa trwałości wykonywanych konstrukcji, coraz częściej przemawiają jednak do inwestorów i projektantów. Połączenie betonu oraz specjalnie zaprojektowanych włókien polipropylenowych umożliwia w wielu przypadkach eliminację tradycyjnego zbrojenia stalowego, a więc również ograniczenie nakładów pracy ludzkiej. Wykonanie prostych ław fundamentowych pod dom jednorodzinny sprowadza się do zabudowy mieszanki bezpośrednio w wykopie przez dwóch pracowników w ciągu ok. 45–60 minut. Na uwagę zasługuje również fakt, że polimerowe zbrojenie rozproszone, w odróżnieniu od stali, jest odporne na niekorzystne oddziaływanie środowiska, co wydatnie wydłuża okres użytkowania konstrukcji.

**Artur Golda,**

członek zarządu, zastępca dyrektora ds. technologii betonu,  
Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o.

rzania kompozytu oraz jest na tyle pojemnych, by uwzględnić liczne materiały złożone, które są uważane za kompozyty. Jedną z najczęściej przytaczanych jest czterocłonowa definicja kompozytu według Lawrence'a J. Broutmana i Richarda H. Krocka. Zgodnie z nią, kompozyt jest materiałem wytworzonym przez człowieka. Musi się składać z co najmniej dwóch różnych (pod względem chemicznym) materiałów, z wyraźnie zaznaczonymi granicami rozdziału między tymi komponentami (fazami). Komponenty kompozytu tworzą go przez udział w całej objętości, zaś kompozyt powinien posiadać różne od nich

Przykład zastosowania zbrojenia kompozytowego EasyBet w mieszance betonowej wykorzystanej do fundamentów domu jednorodzinnego, fot. Górażdże Beton Sp. z o.o.





### Jak rozbudzić zainteresowanie materiałami kompozytowymi w Polsce? Czy Mostostal SA ma doświadczenia z ich stosowaniem?

Docenianie zalet kompozytów postępuje wraz z upowszechnianiem się wiedzy o możliwościach ich stosowania w budownictwie jako materiału konstrukcyjnego.

Trzeba przyznać, że dla dużej grupy inżynierów zalety te nadal pozostają nieodkryte. O ile stosowanie taśm wzmacniających czy prętów zbrojeniowych do betonu nie jest obecnie postrzegane jako nowość, o tyle fakt budowy przez Mostostal Warszawa SA pierwszego w Polsce mostu drogowego o dźwigarach wykonanych całkowicie z materiałów kompozytowych jest dla wielu zaskoczeniem. Gdy przedstawiamy jego cechy, takie jak odporność na korozję oraz lekkość pozwalającą na szybki montaż, spotyka się to z uznaniem jego zalet.

**Juliusz Żach,**

kierownik Działu Badań i Rozwoju, Mostostal Warszawa SA

właściwości – lepsze lub zupełnie nowe w stosunku do użytych komponentów bądź też wynikających z prostego sumowania tych właściwości. Broutman i Krock wykluczają tzw. kompozyty naturalne oraz materiały warstwowe i platerowane. Z kolei Aurel I. Berghezan określa kompozytami materiały złożone, różniące się od stopów tym, że poszczególne komponenty zachowują swoje właściwości i są tak dobrane i połączone, aby mogły być wykorzystane ich zalety, a nie ujawniały się ich potencjalne wady (głównie z uwagi na planowaną funkcję wyrobu). Uważa się, że w zasadzie każdy rodzaj dwóch lub więcej materiałów może być połączony w kompozyt, zarówno metale, materiały ceramiczne, jak i materiały organiczne (polimery, elastomery i szkło) [3].

### Klasyfikacja kompozytów

Przyjmując definicję za Berghezanem, który nazywa kompozytem materiał niejednorodny, wytworzony przez połączenie w pojedynczą strukturę składników o zupełnie różnych właściwościach, które po połączeniu uzupełniają się wzajemnie, dając materiał złożony (kompozyt) o dodatkowych i (lub) znacznie lepszych właściwościach niż każdy ze składników osobno lub ich mieszanina, można ją także zapisać w postaci ogólnego

równania:  $A + B = K$ , które, choć sprzeczne z zasadami matematyki, można interpretować jako  $2 + 2 = 6$  [2].

Projektowanie kompozytu rozpoczyna się od sformułowania funkcji celu – określenia zadania, jakie ma spełniać kompozyt. Jeśli ma być elementem konstrukcyjnym, którego zadaniem jest np. przenoszenie określonych obciążeń mechanicznych, to jeden ze składników powinien być wytrzymały, a drugi będzie mu przekazywał obciążenia. Dobór tych parametrów nie jest skomplikowany i może być zrealizowany za pomocą komputera. Inaczej jest w przypadku konieczności spełnienia wielu innych wymagań, takich jak:

- kompatybilność, która oznacza, że składniki muszą być zgodne pod względem chemicznym, fizycznym, mechanicznym itd., aby umożliwić harmonijną pracę nawet w ekstremalnych warunkach;
- właściwa geometria i orientacja, zapewniające spełnienie przez składniki określonej funkcji. W tym przypadku składnik wzmacniający może mieć postać włókien lub cząstek, zaś zadaniem drugiego, stanowiącego osnowę, jest łączenie elementów wzmacniających w monostrukturę;
- zachowanie odrębności struktury i właściwości komponentów, co wynika z definicji kompozytu (żaden ze składników kompozytu zasadniczo nie powinien podlegać modyfikacji);
- połączenie zapewniające maksymalne wykorzystanie zalet składników kompozytu, co jest związane z efektem synergizmu, które jest możliwe tylko w wypadku poprawnego wytworzenia kompozytu.

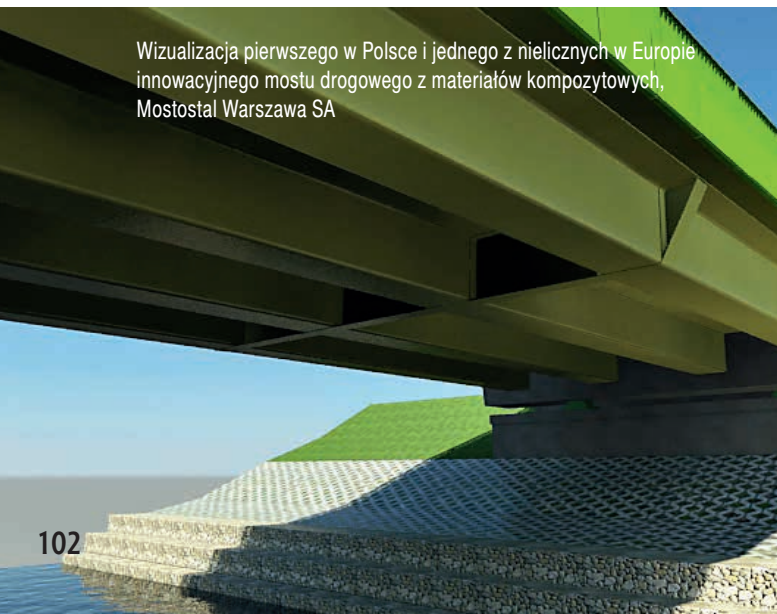
Dopiero spełnienie tych licznych wymagań, a zwłaszcza właściwy dobór składników kompozytów, pozwala uzyskać materiały konstrukcyjne o unikatowych właściwościach.

Najprostszy kompozyt składa się z dwóch składników, z których jeden, zwykle o większym udziale objętościowym, pełni rolę osnowy, a drugi – zbrojenia wzmacniającego tę osnowę. To właśnie ze względu na rodzaj osnowy można dokonać podziału na kompozyty o osnowie polimerowej PMCs (*polymer matrix composites*), ceramicznej CMCs (*ceramic matrix composites*) i metalowej MMCs (*metal matrix composites*) [2].

### Szerokie spektrum zastosowania

Kompozyty są stosowane w różnych gałęziach przemysłu – od motoryzacyjnego przez budowlany po kosmiczny. Pierwszy most z kompozytów FRP (kompozytu włóknistego o osnowie polimerowej) wybudowano w 1982 r. w Chinach [4]. Jeśli chodzi o pionierską realizację w Polsce, jest nią kładka na terenie Grupowej Oczyszczalni Ścieków w Łodzi, oddana do użytku w 1999 r. [5]. Drugim obiektem jest kładka dla pieszych nad drogą S11 w Gądkach koło Poznania, zbudowana w 2008 r. [6]. Obecnie realizowany jest Projekt Com-bridge – innowacyjny most z kompozytów FRP, w ramach którego powstaje pierwszy w Polsce most drogowy z kompozytów włóknistych o osnowie polimerowej. Całość przedsięwzięcia, obejmująca badania przemysłowe, prace rozwojowe i prace w zakresie wytworzenia instalacji demonstracyjnej, zaczęła się w listopadzie 2013 r., a zakończy w marcu 2016 r. Istniejący od 1958 r. most drogowy w ciągu ul. Pułaskiego w Błazowej to obiekt stalowo-drewniany, który nie spełnia współczesnych wymogów. Ze względu na zły stan mostu jego nośność została ograniczona do 15 t. Konstrukcja nowego obiektu dzięki wykorzystaniu materiałów kompozytowych FRP będzie lżejsza i wytrzymalsza. To wła-

Wizualizacja pierwszego w Polsce i jednego z nielicznych w Europie innowacyjnego mostu drogowego z materiałów kompozytowych, Mostostal Warszawa SA





Zastosowanie kompozytów w geotechnice, fot. SIREG ITALY

nie dzięki doskonałym parametrom mechanicznym, trwałości i odporności na korozję kompozyty są od lat wykorzystywane w przemyśle lotniczym, samochodowym i stoczniowym, a od ok. 30 lat także coraz częściej w budownictwie. W Polsce materiały kompozytowe stosowano dotychczas głównie jako elementy wzmacniające w postaci mat i taśm. Projekt *Com-bridge* będzie więc pierwszą w Polsce próbą zbudowania mostu drogowego z kompozytów FRP [7].

W USA pierwszy most drogowy z kompozytów powstał w 1996 r. w Kansas. W ciągu kolejnych ośmiu lat wybudowano tam lub zmodernizowano przy wykorzystaniu materiałów FRP ponad 100 tego typu obiektów [8]. Doświadczenia inwestorów, projektantów oraz wykonawców mostów z kompozytów włóknistych o osnowie polimerowej z całego świata zachęcają do zajęcia się szerzej tą tematyką.

Kompozyty są także doskonałym materiałem do konstruowania elementów cienkościennych, których grubość ścianki jest znacznie mniejsza od pozostałych wymiarów charakterystycznych. Do tych elementów stosowanych w budownictwie należą rury, zbiorniki na wodę i ścieki o różnym charakterze, studzienki kanalizacyjne itp. Za zastosowaniem kompozytów przemawiają ich liczne zalety. Jedną z nich jest bezproblemowe dostosowanie funkcji, wymiarów, kolorystyki, a zwłaszcza własności wytrzymałościowych i odpornościowych (np. na działanie mediów chemicznie agresywnych) do indywidualnych potrzeb klienta. Dzięki nowoczesnym procesom fabrykacji kompozytów wieloma parametrami produkcyjnymi można w dość prosty sposób w szerokim zakresie sterować zmiennością danego parametru. To z kolei pozwala na optymalizowanie pod względem nakładów finansowych procesu realizacji wielu inwestycji, co jest szczególnie opłacalne w obiektach o dużej kapitałochłonności, z dużą liczbą instalacji przemysłowych i technologicznych. Kolejną zaletą jest bardzo niski ciężar konstrukcji kompozytowych, który dla porównywalnych elementów stanowi tylko ok. 10% ciężaru konstrukcji żelbetonowej, ok. 20% ciężaru konstrukcji stalowej i ok. 25% ciężaru konstrukcji z żeliwa ciągliwego. Ten aspekt laminatów umożliwia w dużym stopniu rezygnację z używania ciężkiego sprzętu np. do układania rurociągów czy transportu gotowych elementów, co z kolei redukuje koszty inwestycji. Za stosowaniem kompozytów do elementów cienkościennych przemawiają także ich duża trwałość i niezawodność, przejawiająca się m.in. odpornością na korozję oraz tzw. starzenie. Jak dowiodły badania trwałości czasowej laminatów prowadzone w laboratoriach amerykańskich i skandynawskich, żywotność kompozytów wynosi nie mniej niż 50 lat, a wytrzymałość po 50 latach stanowi co najmniej 80% wytrzymałości początkowej. Podobne wartości uzyskuje się dla żeliwa i betonu. Za dużą trwałością czasową laminatów idzie niski koszt eksploatacji, nakładów na przeglądy, konserwację i naprawy [9].

Rolę kompozytu może również pełnić beton zbrojony (prętami, drutami lub siatkami), celowo wzmocniony stalą, by zwiększyć możliwości naprężeń rozciągających. Obecnie pręty kompozytowe wykorzystuje się w zastępstwie prętów stalowych w zbrojeniu betonu. Pręty są kompozytami złożonymi z ultracienkich włókien bazaltowych, szklanych lub węglowych i matrycy żywicznej lub epoksydowej. Wytwarza się je w technologii pultruzji, która zapewnia ciągłość parametrów fizykomechanicznych i gwarancję jakości. Cechują się bardzo wysoką odpornością na rozciąganie i ścisnienie – nawet do trzech razy większą od stali. Kolejną zaletą jest ich niska waga – są nawet cztery razy lżejsze od identycznych prętów stalowych. W przeciwieństwie do stali nie ulegają korozji, a okres ich eksploatacji wynosi ponad 100 lat z zachowaniem pierwotnych parametrów. Co warte odnotowania, pręty posiadają znakomitą adhezję z betonem. Biorąc pod uwagę te liczne zalety, można z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, że ten typ zbrojenia zastąpi w przyszłości zbrojenia stalowe, szczególnie w sytuacjach, w których są one narażone na przyspieszoną korozję (np. tunele,



### **W jakim stopniu materiały kompozytowe wykorzystuje się w pracach geotechnicznych w Polsce?**

Rozpatrując zagadnienie kompozytów w specjalistycznym budownictwie, jakim jest geotechnika, można stwierdzić, że brak jest w naszym kraju wiedzy na temat ich projektowania i stosowania. Pomimo do-

stępności na rynku materiałów kompozytowych znanych z wielu realizacji zagranicą (np. marki Sireg), ich stosowanie w polskim budownictwie geotechnicznym jest znikome. Materiały kompozytowe można za to odnaleźć w projektach „przychodzących” do nas z Europy Zachodniej lub USA, np. zbrojenie ścian szczelinowych przy budowie metra czy tunelu pod Martwą Wisłą. Innym częstym zastosowaniem w Europie jest gwoździowanie skarp w sąsiedztwie trakcji kolejowych – znika tu bowiem problem trwałości ze względu na prądy błędzące. Świetnym zastosowaniem kotew tymczasowych z włókna szklanego jest kotwienie ścian wykopów na terenach zurbanizowanych. Kotew z włókna szklanego pozostawiona w gruncie w przyszłości nie będzie przeszkodą w pracach ziemnych (koparka z łatwością łamie ciężną takiej kotwy). Brak krajowych wytycznych do projektowania (np. zbrojenia ściany szczelinowej) zmusza projektantów do korzystania z norm amerykańskich czy włoskich. Reasumując, potrzebny jest w naszym kraju pionier wykonawca oraz projektant, który dostrzeże wyżej wymienione oraz wiele innych zalet kompozytów i następnie wprowadzi je do powszechnego stosowania w Polsce, a nie tylko poszerzy wiedzę o ich istnieniu.

**Alan Rajchel,**

kierownik Działu Geotechniki i Górnictwa, ATM Sp. z o.o.



**Czy w Polsce należy doceniać się niewątpliwe zalety materiałów kompozytowych, szeroko stosowanych w budownictwie na świecie?**

Jednymi z najczęściej stosowanych komponentów konstrukcyjnych są wytrzymałe włókna szklane, kevlarowe czy węglowe. Do najczęściej stosowanych lepiszczy w kompozytach zaliczają się żywice syntetyczne oparte na poliestrach, epoksydach, poliuretanach czy żywicach silikonowych. W budownictwie kompozyty występują w postaci taśm i mat z włókien węglowych albo siatek z włókien szklanych lub aramidowych. Przy czym należy pamiętać, że kompozytem jest również beton, którego składnikami są odpowiednio: cement (spoiwo), wypełniacz (kruszywo), ewentualnie domieszki i dodatki, w tym włókna stalowe i (lub) polipropylene, bądź żelbet stanowiący połączenie betonu i stalowych prętów zbrojeniowych.

Trudno natomiast ocenić skalę stosowania mniej popularnych w Polsce kompozytów, czyli wyrobów z włókien węglowych, szklanych lub aramidowych. Nie ma bowiem dostępnych statystyk szacujących wielkość rynku napraw czy wzmocnień konstrukcji, obiektów budowlanych i budowli – bo w tym obszarze należy upatrywać największych możliwości aplikacji systemów kompozytowych. O powszechności stosowania w większości przypadków decyduje wciąż jeszcze istotny aspekt finansowy. W dalszym ciągu bardziej uzasadnione ekonomicznie jest wyburzenie mostu czy wiaduktu i zbudowanie nowego, o wyższych parametrach pod względem nośności, jak i trwałości niż wzmocnianie istniejącego obiektu z zastosowaniem materiałów kompozytowych. Tym niemniej jednak coraz więcej zagadnień inżynierskich rozwiązywanych jest za pomocą systemów wzmocniania konstrukcji żelbetonowych taśmami i matami z włókien węglowych czy konstrukcji murowanych siatkami z włókien szklanych klejonych w zaprawy mineralne. Niejednokrotnie są to jedyne możliwe i dostępne środki, zwłaszcza w przypadku obiektów zabytkowych. Znany przykład wzmocniania nowych, dopiero co oddanych do eksploatacji obiektów inżynierii komunikacyjnej, gdzie jedynym rozsądnym rozwiązaniem było właśnie wzmocnienie obiektów przez zastosowanie taśm z włókien węglowych. Oczywiście jest także zastosowanie kompozytów do podniesienia nośności elementów konstrukcyjnych, chociażby przy zmianie sposobu użytkowania obiektu. W sytuacji, gdy projektuje się czy już wznosi ważny obiekt użyteczności publicznej, gdzie bezpieczeństwo dużej grupy użytkowników jest kluczowe, stosuje się wzmocnienie siatkami z włókien aramidowych, dzięki czemu podnosi się bezpieczeństwo budynku w sytuacji zagrożenia wybuchem na skutek ataku terrorystycznego (lotniska, dworce autobusowe, stacje kolejowe). Ale takich aplikacji, z wiadomych względów, nie nagłaśnia się.

**Dr inż. Krzysztof Pogan**

porty i mosty), tam gdzie ważną rolę odgrywa obniżenie masy całej konstrukcji, a także przy budowie obiektów, gdzie wymagana jest transparentność dla fal magnetycznych, np. lotnisk [10].

Dzięki znakomitej odporności antykorozyjnej materiały kompozytowe nadają się także świetnie do wykonywania zabezpieczeń stateczności nasypów drogowych jako gwoździe i kotwy gruntowe. Z kolei tymczasowe użycie kompozytowych kotew i gwoździ gruntowych w konstrukcjach geotechnicznych o okresie użytkowania krótszym niż dwa, trzy lata jest możliwe dzięki innej właściwości kompozytów, jaką jest łatwość ich usuwania (niszczenia) przez lekkie maszyny. Ta cecha kompozytów jest szczególnie przydatna przy wykonywaniu tuneli [11].

W Polsce często jeszcze duży sceptycyzm w środowisku konstruktorów i projektantów połączony z brakiem przykładów zastosowania w kraju powoduje, że rynek rozwiązań konstrukcyjnych jest dopiero w fazie rozwoju. Krajami dominującymi pod względem nowoczesnych rozwiązań są Stany Zjednoczone, Kanada, Japonia, Chiny i Francja. Jednak wciąż rosnące wymagania w stosunku do bardzo obciążonych konstrukcji, zwłaszcza w budownictwie, wymuszają stosowanie materiałów cechujących się jednocześnie lekkością, wytrzymałością i niezawodnością [12]. Wszystkie te zalety łączą w sobie materiały kompozytowe.

**Literatura**

[1] Nurzyński J.: *Właściwości akustyczne paneli kompozytowych oraz perspektywa ich zastosowania w budownictwie ogólnym*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska” 2012, nr 283, z. 59, s. 139–146.  
 [2] Kaczorowski M., Krzyńska A.: *Konstrukcyjne materiały metalowe, ceramiczne i kompozytowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2008.

[3] *Odlewnictwo współczesne. Poradnik odlewnika*. T. 1. *Materiały*. Red. J.J. Sobczak. Stowarzyszenie Techniczne Odlewników Polskich. Kraków 2013.  
 [4] Zobel H., Karwowski W.: *Kompozyty polimerowe w mostownictwie – pomosty wielowarstwowe*. „Geoinżynieria. Drogi, Mosty, Tunele” 2006, nr 2, s. 42–49.  
 [5] Zobel H., Karwowski W., Wróbel M.: *Kładka z kompozytu polimerowego zbrojonego włóknem szklanym*. „Inżynieria i Budownictwo” 2003, nr 2, s. 107–108.  
 [6] Grotte B., Karwowski W., Mossakowski P., Wróbel W., Zobel H., Żółtowski P.: *Stalowa, łukowa kładka dla pieszych z podwieszonym pomostem z kompozytów polimerowych nad drogą S-11 pod Kórnikiem*. „Inżynieria i Budownictwo” 2009, nr 1–2, s. 69–73.  
 [7] „Polski Przemysł. Nowatorski magazyn przemysłowy” [online]. Dostępny w Internecie: [www.polskiprzemysl.com.pl](http://www.polskiprzemysl.com.pl).  
 [8] Własak L., Jurczuk J.: *Nowe koncepcje kompozytowych pomostów drogowych*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska” 2012, nr 283, z. 59, s. 155–162.  
 [9] German J.: *Materiały kompozytowe w budownictwie*. „Kalejdoskop Budowlany” 2000, nr 9, s. 18–21.  
 [10] Rajczyk M., Stachecki B.: *Współczesne materiały kompozytowe – wybrane kierunki rozwoju nowych technologii*. „Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym” 2011, nr 8, s. 202–211.  
 [11] Balconi G., Badawika G.: *Materiały kompozytowe w geotechnice*. „Geoinżynieria. Drogi, Mosty, Tunele” 2009, nr 2, s. 88–91.  
 [12] Burczyński G., Marcinowski J.: *Numeryczne modelowanie zniszczenia belki żelbetonowej wzmocnionej taśmą kompozytową*. W: *Kompozyty, konstrukcje warstwowe. Referaty*. Red. S. Krocak. Polskie Towarzystwo Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, oddział we Wrocławiu. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław–Karpacz 2006, s. 25–32.