

Zastosowanie zbrojenia kompozytowego w elementach płytowych

Application of composite reinforcement in slab elements

mgr inż. Jan Klimasara (ORCID: 0000-0001-7366-4957), Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku, Politechnika Białostocka

DOI: 10.5604/01.3001.0054.4889

Streszczenie: Zbrojenie niemetaliczne charakteryzuje się wysoką odpornością na korozję, wyjątkową wytrzymałością na rozciąganie i niskim ciężarem własnym, a jednocześnie porównywalną ceną w stosunku do stali zbrojeniowej. Mimo przeważających cech wytrzymałościowych i eksploatacyjnych jest zdecydowanie rzadziej stosowane w stosunku do zbrojenia stalowego. Celem rozważań jest przybliżenie zastosowań zbrojenia kompozytowego w elementach płytowych ze względu na jego dodatkowe zalety, m.in. obojętność elektromagnetyczną, bardzo niską przewodność cieplną oraz utrzymanie swoich właściwości w warunkach eksploatacji.

Słowa kluczowe: zbrojenie kompozytowe, elementy płytowe.

Abstract: Non-metallic reinforcement is characterized by high corrosion resistance, exceptional tensile strength and low self-weight, and at the same time comparable price in relation to reinforcing steel. Despite the prevailing strength and operational characteristics, it is much less frequently used in relation to steel reinforcement. The purpose of the considerations is to approximate the applications of composite reinforcement in slab elements due to its additional advantages, e.g. electromagnetic inertness, very low thermal conductivity and maintenance of its properties in operating conditions.

Keywords: composite reinforcement, slab elements

1. Wprowadzenie

Wraz z rozwojem technologii w budownictwie projektanci stosują coraz to nowsze i bardziej wysublimowane rozwiązania techniczne, które mają na celu optymalizację funkcji oraz kosztów. Jednym z takich rozwiązań w minionym wieku stały się materiały kompozytowe, których koncepcja zastosowania przez ostatnie kilkanaście lat jest bardzo dynamicznie rozwijana przez przemysł oraz naukowców. Kompozyty jako zbrojenie konstrukcyjne stosuje się już od trzech dekad. Sprężanie za pomocą niemetalicznych cięgien miało miejsce w 1991 r. w Japonii, natomiast 5 lat później zrealizowano kładkę dla pieszych w całości z wykorzystaniem zbrojenia FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). Natomiast w Polsce pierwszy most całkowicie zbrojony prętami FRP oddano do użytku na początku 2016 r. w Białej pod Rzeszowem (rys. 2) [5]. Należy wskazać, że określenie FRP jest zbiorem różnego typu prętów. Ze względu na stosowane włókna zbrojenie dzieli się na:

- aramidowe – *Aramid Fiber Reinforced Polymer* – AFRP,
- bazaltowe – *Basalt Fiber Reinforced Polymer* – BFRP,
- szklane – *Glass Fiber Reinforced Polymer* – GFRP,
- węglowe – *Carbon Fiber Reinforced Polymer* – CFRP.

Każdy z rodzajów zbrojenia kompozytowego należy poddawać analizie indywidualnie w zależności od potrzeb projektowych, gdyż ich właściwości wytrzymałościowe oraz charakterystyki pracy różnią się (rozszerzalność termiczna, granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie (tab. 1)) [3, 4].

Tabela 1. Właściwości mechaniczne zbrojenia kompozytowego i stali [9]

Właściwości	Typ zbrojenia				
	Stal	CFRP	AFRP	GFRP	BFRP
Granica plastyczności [MPa]	276 -517	-	-	-	-
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	483 -690	600 -3690	1720 -2540	483 -1600	1100
Moduł Younga [GPa]	200	120 -580	41 -125	35 -51	70
Odkształcenie plastyczne [%]	0,125 -0,14	-	-	-	-
Odkształcenie przy zerwaniu [%]	6,0-12,0	0,5-1,7	1,9-4,4	1,2-3,1	2,2

W opracowaniu przeanalizowano zbrojenie GFRP, które jest obecnie najtańsze i najbardziej rozpowszechnione na rynku.

2. Zalety i wady

Potencjał zbrojenia kompozytowego po latach badań został już dobrze określony i wykazano jego pozytywne cechy, dzięki którym może być zastosowane w budownictwie. Zbrojenie niemetaliczne charakteryzują się wyjątkową wysoką

Tabela 2. Porównanie ciężaru siatki stalowej i kompozytowej jako zamiennika [6]

Oznaczenie	Średnica pręta stalowego	Długość [mb]	Szerokość [mb]	Oczko siatki [mm]	Waga arkusza [kg]	Waga na m ² [kg/m ²]	Średnica pręta kompozytowego	Waga na m ² [kg/m ²]
	[mm]					stal	[mm]	kompozyt
Q131A	5	5	2,15	150x150	22,5	2,09	-	-
Q188 2,4x1,2	6	2,4	1,2	150x150	7,73	2,68	4	0,253
Q188 A	6	5	2,15	150x150	32,4	3,01	4	0,284
Q188 6x2,4	6	6	2,4	150x150	42,6	2,96	4	0,28
Q283	6	6	2,4	100x100	63,94	4,44	4	0,42
Q142	6	6	2,4	200x200	32	2,22	4	0,21
Q335A	8	5	2,15	150x150	57,7	5,37	6	0,707
Q335 6x2,4	8	6	2,4	150x150	75,84	5,27	6	0,693
Q503	8	6	2,4	100x100	113,8	7,9	6	1,039
Q252	8	6	2,4	200x200	56,9	3,95	6	0,52
Q523	10	5	2,15	150x150	90,05	8,38	7	0,991
Q785	10	6	2,4	100x100	172,5	11,98	7	1,416
Q523 6x2,4	10	6	2,4	150x150	118,46	8,23	7	0,973
Q754	12	6	2,4	150x150	170,5	11,84	8	1,4

wytrzymałością na rozciąganie [3, 4] i jednocześnie niskim ciężarem własnym. Na podstawie danych Konsorcjum Stali SA [6] opracowano tabelę porównawczą (tab. 2), w której pokazano różnice w ciężarze siatki stalowej i zamiennika kompozytowego na jednostkę powierzchni 1 m².

Przedstawione w tabeli wartości uzyskano, biorąc pod uwagę gęstość objętościową obu materiałów. W zależności od zastosowanego zamiennika różnica ciężaru waha się od 7 do 10 razy (tab. 3). Dodatkowo porównano wpływ zmiany szkieletu ze stalowego na kompozytowy na przykładzie prefabrykowanych płyt drogowych. Do obliczeń ciężaru betonu przyjęto gęstość objętościową o wartości 2200 kg/m³ oraz siatkę typu Q335 (tab. 2) 150x150 mm. Z analiz wynika, że zastosowanie alternatywnego szkieletu może zmniejszyć wagę jednego prefabrykatu o nawet 40 kg (tab. 4). Im gęstsza jest siatka, tym większa jest różnica ciężarów. Przykładowo dla siatki Q503 (tab. 2) 100x100 mm różnica może wynosić nawet 65 kg.

Pokazana różnica w ciężarze szkieletu zbrojonego jest istotna przy optymalizacji konstrukcji. Biorąc pod uwagę ceny stali i kompozytów za tonę – z ekonomicznego punktu widzenia zdecydowanie lepiej wypada zbrojenie FRP przy porównywalnym wpływie na nośność elementów.

Dodatkowym argumentem zachęcającym do stosowania zbrojenia FRP jest porównywalna cena w stosunku do stali zbrojeniowej, a także coraz większa jego dostępność, z uwagi na wprowadzenie nowych technologii produkcji, dzięki czemu stało się bardziej konkurencyjne. Oferta cenowa z lipca 2023 r. [7, 8] jednoznacznie określa zbrojenie kompozytowe (2,40 zł/mb – pręt 8 mm) jako tańsze

Tabela 3. Porównanie szczegółowe na przykładzie siatki 150x150 mm – Q335

Średnica [mm]	Materiał	Waga 1 mb [g/mb]	Stosunek wagowy stali do kompozytu
6	stal	222	10,58
4	kompozyt	21	
8	stal	395	7,6
6	kompozyt	52	
10	stal	617	8,46
7	kompozyt	73	
12	stal	888	9,07
8	kompozyt	98	

od stalowego (3,20 zł/mb – pręt 10 mm) – różnice cenowe wahają od 25 do 40% w zależności od średnic oraz producenta. Cena tego materiału jest znacznie stabilniejsza w porównaniu z ceną stali, której ogromny wzrost obserwowano w 2022 r. Na początku marca 2022 r. cena tony stali sięgała 9500 zł [7], podczas gdy cena kompozytów utrzymała się na stabilnym poziomie – poniżej 3000 zł za tonę. Inne typy zbrojenia FRP są obecnie droższe od stalowego w przeliczniku wagowym, ale ilość metrów bieżących, jaką można uzyskać przy tej samej wadze jest od 7 do 10 razy większa, co wpływa korzystnie na wybór zbrojenia alternatywnego (tab. 2). W rachunku ekonomicznym można

Tabela 4. Porównanie ciężaru prefabrykowanej płyty drogowej z siatką stalową oraz zamiennie kompozytową przy zastosowaniu siatki Q335 [6]

Długość elementu L_{slab}	Szerokość elementu B_{slab}	Grubość elementu h_{slab}	Ciężar elementu (beton) W_{concrete}	Waga na m (dobór siatki stalowej) W_{mesh}	Szacowana waga zbrojenia W_{steel}	Ciężar elementu (całkowity) $W_{\text{slab,s}}$	Waga na m ² (dobór siatki komp.) W_{mesh}	Szacowana waga zbrojenia $W_{\text{composite}}$	Ciężar elementu (całkowity) $W_{\text{slab,c}}$	różnica ciężaru $W_{\text{slab,s}} - W_{\text{slab,c}}$
[cm]	[cm]	[cm]	[kg]	[kg/m ²]	[kg]	[kg]	[kg/m ²]	[kg]	[kg]	[kg]
300	100	12,5	825	5,27	31,6	856,6	0,69	4,16	829,2	27,5
300	100	15	990	5,27	31,6	1021,6	0,69	4,16	994,2	27,5
300	100	18	1188	5,27	31,6	1219,6	0,69	4,16	1192,2	27,5
300	100	20	1320	5,27	31,6	1351,6	0,69	4,16	1324,2	27,5
300	125	12,5	1031	5,27	39,5	1070,8	0,69	5,2	1036,5	34,3
300	125	15	1238	5,27	39,5	1277	0,69	5,2	1242,7	34,3
300	125	18	1485	5,27	39,5	1524,5	0,69	5,2	1490,2	34,3
300	125	20	1650	5,27	39,5	1689,5	0,69	5,2	1655,2	34,3
300	130	12,5	1073	5,27	41,1	1113,6	0,69	5,41	1077,9	35,7
300	130	15	1287	5,27	41,1	1328,1	0,69	5,41	1292,4	35,7
300	130	18	1544	5,27	41,1	1585,5	0,69	5,41	1549,8	35,7
300	130	20	1716	5,27	41,1	1757,1	0,69	5,41	1721,4	35,7
300	150	12,5	1238	5,27	47,4	1284,9	0,69	6,24	1243,7	41,2
300	150	15	1485	5,27	47,4	1532,4	0,69	6,24	1491,2	41,2
300	150	18	1782	5,27	47,4	1829,4	0,69	6,24	1788,2	41,2
300	150	20	1980	5,27	47,4	2027,4	0,69	6,24	1986,2	41,2

jeszcze uwzględnić redukcję kosztów eksploatacji i napraw konstrukcji (np. działanie agresji chemicznej na elementy, co powoduje korozję zbrojenia) ze względu na 2–3-krotnie dłuższą trwałość zbrojenia kompozytowego.

Warto również zauważyć, że zastąpienie zbrojenia stalowego zbrojeniem FRP dobrze wpisuje się w ideę zrównoważonego rozwoju w budownictwie z uwagi na zmniejszenie zużycia surowców i emisji gazów cieplarnianych w procesie produkcji oraz dłuższą żywotność konstrukcji, która wiąże się z wysoką odpornością zbrojenia FRP na korozję. Przykładowo produkcja prętów GFRP generuje prawie 10-krotnie mniejszy ślad węglowy niż produkcja stali [1].

Zbrojenie kompozytowe nie zmienia swoich parametrów wytrzymałościowych i eksploatacyjnych, w zakresie temperatur od -70° do +65°C. Umożliwia to stosowanie materiału w skrajnie niekorzystnych warunkach środowiskowych (z pominięciem pożaru). Znikome przewodnictwo elektromagnetyczne pozwala na wykorzystanie zbrojenia niemetalicznego wszędzie, gdzie zakłócenia mogą mieć wpływ na działanie precyzyjnych urządzeń elektronicznych.

Nie jest to jednak materiał bez wad, zdecydowanym negatywem jest wrażliwość na wysokie temperatury ze względu na stosunkowo wysoką zawartość żywicy w strukturze pręta zbrojeniowego. Szczególnie w elementach płaskich, takich jak płyty i ściany, dla których przewidziana jest cieńsza otulina wyraźniej uwidacznia się efekt wysokich temperatur. Cieńsza warstwa otuliny betonowej stanowi słabszą ochronę, co powoduje szybszy wzrost temperatury zbrojenia. Zbrojenie kompozytowe w znacznym stopniu traci swoje właściwości, przy dużej redukcji modułu sprężystości, już w temperaturze zeszczenia (od 65° do 120°C) [9], podczas, gdy spadek właściwości mechanicznych stali w tych temperaturach jest znikomy, co jest istotne z uwagi na bezpieczeństwo konstrukcji w warunkach pożaru. Zbrojenie kompozytowe szybciej ulega degradacji i nie sygnalizuje możliwości zniszczenia konstrukcji tak dobrze jak zbrojenie stalowe. Niższa wartość modułu sprężystości podłużnej powoduje, że zdecydowanie trudniej jest uzyskać sztywność giętą porównywalną do konstrukcji zbrojonej stalą, co bezpośrednio przekłada się na zwiększenie ugięcia elementu konstrukcyjnego.

Wadą prętów kompozytowych jest również brak uplastycznienia przed zerwaniem. Z tego względu nie stosuje się takiego zbrojenia w elementach, w których może dochodzić do plastycznej redystrybucji momentów (np. belki ciągłe). Jeśli o nośności elementu zbrojonego prętami kompozytowymi decyduje strefa rozciągana, to stan przedawaryjny nie jest sygnalizowany nadmiernymi ugięciami.

3. Zastosowanie w konstrukcjach płytowych

Zbrojenie kompozytowe może mieć zastosowanie w konstrukcjach płytowych, zarówno w budownictwie kubaturowym, komunikacyjnym jak i przemysłowym.

3.1. Płyty podłogowe i stropowe

W konstrukcjach płytowych zbrojenie kompozytowe może być wykorzystane jako alternatywa lub uzupełnienie dla tradycyjnego zbrojenia stalowego, zwłaszcza w prefabrykacji. Dzięki temu można projektować cieńsze i lżejsze płyty podłogowe i stropowe, jednocześnie zachowując odpowiednią nośność. Zbrojenie kompozytowe może być również używane przy wzmacnianiu istniejących obiektów jak płyty żelbetowe narażone na uszkodzenia lub osłabienia. W takich przypadkach przywrócenie lub zwiększenie wytrzymałości konstrukcji może być osiągnięte poprzez naklejanie warstw zbrojenia kompozytowego (np. w formie taśm – rysunek 1 [10]) na powierzchnię w miejscu osłabienia.



Rys. 1. Miejscowe wzmocnienie stropu za pomocą taśm z włókna węglowego – CFRP [10]

3.2. Mosty i kładki

Zbrojenie kompozytowe znajduje zastosowanie w konstrukcjach mostowych, łącznie z płytami pomostowymi i elementami kładek (np. prefabrykowane kapy chodnikowe). Konstrukcje te przejmują obciążenia stałe i wielokrotne obciążenia dynamiczne. Zbrojenie kompozytowe znalazło zastosowanie w mostach i kładkach ze względu na wysoką wytrzymałość zmęczeniową (CFRP) [3, 4] oraz możliwość



Rys. 2. Pierwszy w Polsce most drogowy z kompozytów FRP – w Białej pod Rzeszowem [5]



Rys. 3. NAFTOPORT Gdańsk – zastosowanie prętów kompozytowych w budowie kanałów technologicznych [11]

redukcji masy konstrukcji, co jest szczególnie istotne w przypadku długich przęseł.

3.3. Zbiorniki, silosy, kanały, osadniki

W tym przypadku materiał FRP również znalazł zastosowanie ze względu na odporność chemiczną i korozyjną (jak w przypadku posadzek przemysłowych), aczkolwiek zamiast zbrojenia rozproszonego czy mieszanego, w ścianach i przekryciach zbiorników stosuje się kompozyt wyłącznie w formie prętów zbrojeniowych jako zamiennik stali (rys. 3) [11].

4. Zastosowanie specjalistyczne zbrojenia FRP

Obojętność elektromagnetyczna zbrojenia kompozytowego jest istotnym aspektem w kontekście urządzeń szpitalnych. W szpitalach korzysta się z wielu różnych urządzeń medycznych, a zakłócenia elektromagnetyczne mogą mieć poważne i niebezpieczne konsekwencje dla pacjentów, personelu medycznego i właściwego funkcjonowania tych urządzeń. W przypadku urządzeń diagnostycznych, takich jak rezonans magnetyczny (MRI), tomografia komputerowa (CT) czy ultrasonografia, obojętność elektromagnetyczna jest kluczowa dla uzyskania dokładnych obrazów i wyników. Zakłócenia elektromagnetyczne mogą wpłynąć na jakość

obrazu diagnostycznego lub doprowadzić do fałszywych wyników. Obecnie w szpitalnictwie wprowadza się tzw. hybrydowe sale operacyjne. Główną różnicą między zwykłą a hybrydową salą operacyjną jest obecność sprzętu do obrazowania. Tradycyjnie urządzenia do obrazowania, takie jak tomograf czy aparat RTG znajdują się w osobnych pomieszczeniach poza blokiem operacyjnym, tymczasem w środowiskach hybrydowych są one elementem wyposażenia sali operacyjnej. Umożliwia to przeprowadzanie minimalnie inwazyjnych zabiegów i przyspiesza diagnostykę, w efekcie skracając czas trwania operacji [12]. W celu analizy danych w czasie rzeczywistym stosowane są również systemy w formie paneli ściennych (rys. 4) [12].

Zbrojenie FRP z uwagi na obojętność elektromagnetyczną może mieć zastosowanie również w wielu innych specjalistycznych gałęziach:

- systemy wojskowe i obronne: radary, komunikacja radiowa,
- systemy komunikacji i telekomunikacji: stacje bazowe,
- systemy elektronicznego gromadzenia danych: serwerownie,
- zastosowania przemysłowe i laboratoryjne: w laboratoriach naukowych i przemyśle, gdzie korzysta się z precyzyjnych przyrządów pomiarowych, czujników oraz urządzeń kontrolujących,
- systemy sterowania przemysłowego: w zakładach produkcyjnych,
- urządzenia paliwowe i energetyczne: w przypadku instalacji paliwowych, elektrowni – systemy monitorowania, sterowania i bezpieczeństwa.

Optymalizowanie projektowania przy zastosowaniu zbrojenia FRP z pewnością redukuje możliwe negatywne wpływy fal elektromagnetycznych na urządzenia elektroniczne ze względu na swoją obojętność elektromagnetyczną.

5. Podsumowanie

Wytrzymałość na rozciąganie zbrojenia kompozytowego jest zdecydowanie wyższa od wytrzymałości stali. Z tego względu zbrojenie kompozytowe wykorzystuje się w strefie rozciąganej elementów zginanych jak: płyty, belki, fundamenty. Zbrojenie niemetaliczne ma wyjątkowe właściwości dielektryka, dzięki czemu może być z powodzeniem stosowane w wielu gałęziach przemysłu, gdzie występują urządzenia elektroniczne. Jego odporność na korozję, utrzymanie właściwości w temperaturach eksploatacji oraz wytrzymałość zmęczeniowa, pozwala na dłuższe użytkowanie obiektów przy mniejszych kosztach napraw.

Obecnie materiały FRP są badane w wielu aspektach wytrzymałościowych, również w celu tworzenia algorytmów do projektowania, aby zachęcić projektantów do szerszego stosowania jako alternatywy dla stali. Obecnie głównymi ograniczeniami zbrojenia niemetalicznego są: wrażliwość na wysoką temperaturę, słabsze parametry w zakresie ściskania, ścinania oraz



Rys. 4. Luksemburski Szpital Kardiologiczny – jedna z najnowocześniejszych hybrydowych sal operacyjnych na świecie [12]

niska wartość modułu Younga, co czyni większym wyzwaniem zapewnienie warunków stanów granicznych użytkowalności. Zbrojenie niemetaliczne może być z powodzeniem stosowane w budownictwie, jednak ze względu na jego zróżnicowanie (różne typy i właściwości włókien), jego użycie zawsze należy indywidualnie analizować w zależności od typu konstrukcji i jej przeznaczenia.

Finansowanie

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy WZ/WB-III/6/2023 w Politechnice Białostockiej i sfinansowane z subwencji badawczej przekazanej przez ministra właściwego do spraw nauki.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Jaśkiewicz T., Ślad węglowy a stosowanie zbrojeń kompozytowych, e-kompozyty.pl, <https://e-kompozyty.pl/Ślad-węglowy-a-stosowanie-zbrojen-kompozytowych-cabout-pol-52.html> (10.08.2023)
- [2] Górski M., Goldmann E., Czy zbrojenia niemetaliczne będą coraz popularniejsze? Inżynier Budownictwa, [https://inzynierbudownictwa.pl/czy-zbrojenia-niemetaliczne-beda-coraz-popularniejsze/\(10.08.2023\)](https://inzynierbudownictwa.pl/czy-zbrojenia-niemetaliczne-beda-coraz-popularniejsze/(10.08.2023))
- [3] Grygo R., Kosior-Kazberuk M., Zbrojenie konstrukcji betonowych niemetalicznymi prętami kompozytowymi FRP, Budownictwo i Inżynieria Środowiska 8/2017, str. 23–30
- [4] Rduch A., Rduch Ł., Walentyński R., Właściwości i zastosowanie kompozytowych prętów zbrojeniowych, Przegląd Budowlany 11/2017, str. 43–46
- [5] <https://www.mostostal.waw.pl/realizacje/infrastrukturalne/pierwszy-polski-most-drogowy-z-kompozytow> (10.08.2023)
- [6] <https://www.konsorcjumstali.pl/kategorie/siatki-zbrojeniowe-zgrzewane> (10.08.2023)
- [7] <https://www.muratorplus.pl/biznes/wiesci-z-rynku/ceny-stali-sierpien-2023-ile-kosztuje-stal-zbrojeniowa-sprawdz-aktualne-ceny-stali-w-polsce-wykres-puds-7-08-2023-aa-gSvH-Kpoq-vJGB.html> (10.08.2023)
- [8] <https://e-kompozyty.pl/product-pol-60272-Pret-kompozytowy-fi-8-mm.html> (10.08.2023)
- [9] Szumigala M., Pawłowski D., Zastosowanie kompozytowych prętów zbrojeniowych w konstrukcjach budowlanych, Przegląd Budowlany 3/2014, str. 47–50
- [10] <https://www.topbuilding.pl/wp-content/uploads/2022/11/wzmacnianie-stropu.webp> (10.08.2023)
- [11] [https://comrebars.eu/realizacje/\(10.08.2023\)](https://comrebars.eu/realizacje/(10.08.2023))
- [12] [https://www.eizo.pl/baza-wiedzy/hybrydowe-sale-operacyjne/\(10.08.2023\)](https://www.eizo.pl/baza-wiedzy/hybrydowe-sale-operacyjne/(10.08.2023))