

Zastosowanie betonu zbrojonego włóknami szklanymi do tworzenia elementów konstrukcyjnych oraz form architektonicznych

mgr inż. Julia Blazy, prof. dr hab. inż. Łukasz Drobiec, Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, dr hab. inż. arch. Rafał Blazy, prof. uczelni, Katedra Planowania Przestrzennego, Projektowania Urbanistycznego i Ruralistycznego, Wydział Architektury, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

Główna przewaga mechaniczna fibrobetonów z włóknami szklanymi nad betonami bez włókien wynika z faktu, że wytrzymałość na rozciąganie wzrasta zwykle do 50%, co pozwala na wytwarzanie elementów o mniejszych przekrojach. Dodatkowo obecność włókien w matrycy betonu pozwala na zmniejszenie szerokości rys i powierzchni pęknięć, co sprawia, że elementy fibrobetonowe są lepiej chronione przed wnikaniem szkodliwych czynników i działaniem niesprzyjających warunków atmosferycznych niż zwykły beton. Ponadto obniżona przewodność cieplna pozwala uzyskać lepszą wydajność energetyczną budynku. Skutkuje to tańszymi konstrukcjami zarówno w produkcji, jak i utrzymaniu. Z drugiej strony zwiększona ciągliwość, a także większa odporność na ścieranie, wodę, mróz, ogień i uderzenia sprawia, że elementy są trwalsze, bezpieczniejsze i bardziej odporne na akty wandalizmu.

2. Włókna szklane

Włókna szklane (ang. *glass fibers* – GF) zaczęto stosować około 1931 r. jako wzmocnienie zapraw i betonów [1]. Uzyskuje się je dzięki przeciąganiu roztopionej masy szklanej poprzez okrągłe otwory, łącznie około 200–240 pojedynczych włókien złączonych w pasmie [2]. Następnie pasma te tną się na mniejsze odcinki [3]. Włókna szklane charakteryzuje ich długość, średnica i smukłość. Należy również wspomnieć, że rodzaj i geometria włókna ma wpływ na wytrzymałość mechaniczną, zarysowania, trwałość i porowatość betonu [4]. Można wyróżnić różne typy GF w zależności od ich składu chemicznego, właściwości i zastosowania.

Ze względu na alkaliczne środowisko matrycy cementowej włókna wykonywane są ze szkła cyrkonowego, które cechuje odporność zarówno na działanie zasad, jak i kwasów. W związku z tym beton zawiera zazwyczaj włókna ze szkła typu E i AR. Ciężar GF wynosi około 2,5–2,7 g/cm³. Włókna szklane charakteryzują się wysoką wytrzymałością na rozciąganie od 1200 do nawet 4800 MPa. Ponadto GF mają znacznie większy moduł sprężystości niż włókna syntetyczne, jednak mniejszy niż włókna stalowe i węglowe. Włókna szklane są odporne na wysoką temperaturę i zaczynają mięknąć w temperaturze ok. 700–900°C [5]. Wadą włókien szklanych jest ich wysoka wrażliwość na wodę [6]. W związku z tym GF są chronione przed negatywnym wpływem wilgoci w środowisku poprzez proces silanizacji [7]. Jeśli chodzi o proces produkcji fibrobetonów z włóknami szklanymi (ang. *glass fiber reinforced concrete* – GFRC) to istnieją trzy techniki. Pierwsza z nich nazywana jest metodą natrysku ręcznego i stosowana jest w przypadku większości ozdobnych prefabrykatów i architektonicznych paneli elewacyjnych z GFRC. Mieszanki te mają zwykle wyższą procentową zawartość włókien między 4 a 6%, a ich produkcja i proces betonowania wymaga specjalnego sprzętu i doświadczonych pracowników. Następną możliwością jest odlewanie wibracyjne, które jest znacznie prostszą metodą, gdzie gotowa mieszanka GFRC jest wibrowana w formie, aż do osiągnięcia konsolidacji. W tym przypadku wymagane są jednak wodoszczelne formy. Wreszcie metoda natryskowa gotowej mieszanki fibrobetonowej nie wymaga tak rygorystycznej kontroli jakości jak ręczna metoda natryskowa i możliwe jest uzyskanie wytrzymałości wyższych niż w przypadku odlewania wibracyjnego [8]. Dodatkowo zastosowanie GFRC jest jednym



Rys. 1. Elementy z GFRC: nadproże [18] (a), schody [19] (b), pergola [20] (c), altana [21] (d)

z rozwiązań wpisujących się w koncepcję zrównoważonego rozwoju, na który obecnie kładzie się tak duży nacisk. Elementy z GFRC spełniają wymagania ekologicznej oraz ekonomicznej produkcji. Warto również zaznaczyć, że istnieje możliwość tworzenia nie tylko elementów konstrukcyjnych z GFRC przeznaczonych głównie do przenoszenia obciążeń, ale także struktur towarzyszących procesom budowlanym oraz form małej architektury, które uatrakcyjniają przestrzenie publiczne i sprawiają, że są one wytrzymalsze, trwałe, bezpieczniejsze oraz nowocześniejsze.

3. Zastosowanie fibrobetonu z włóknami szklanymi

Fibrobeton jest coraz bardziej popularnym i szerzej stosowanym materiałem [9, 10, 11]. Obecnie beton z włóknami szklanymi wykorzystuje się do tworzenia elementów konstrukcyjnych, takich jak belki, nadproża, posadzki, schody i słupy budynków mieszkalnych i użytkowych, ale również pergoli oraz altan (rys. 1). Konstrukcje te mają większą wytrzymałość na rozciąganie, lepszą ciągliwość, udarność, zwiększoną odporność na ścieranie oraz takie czynniki jak mróz i ogień [12]. Mogą być również zlokalizowane na nadbrzeżach, gdzie mają kontakt z wodą, gdyż są odporne na korozję, mają mniejszą nasiąkliwość i przepuszczalność oraz są odporne na niekorzystne warunki atmosferyczne

[13, 14, 15]. Dodatkowo włókna mostkując zarysowania, ograniczają pęknięcie elementów fibrobetonowych: szerokość rys oraz ich całkowitą powierzchnię [16]. Ponadto obniżona przewodność cieplna pozwala uzyskać lepszą wydajność energetyczną budynku [17]. To wszystko pozwala na wytwarzanie wytrzymalszych i trwalszych elementów o mniejszych przekrojach oraz kosztach produkcji i utrzymania.

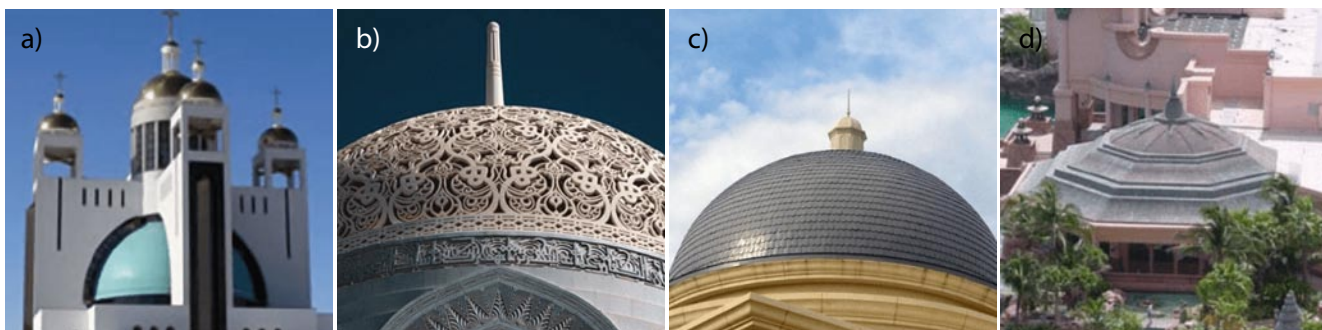
GFRC służy również do tworzenia prefabrykowanych paneli elewacyjnych budynków mieszkalnych i kulturalnych, lotnisk, stadionów, muzeów i galerii (rys. 2). Charakteryzują się one nie tylko wyższą wytrzymałością niż zwykłe elewacje żelbetowe, ale również podwyższoną odpornością na zmiany temperatury, działania UV, zanieczyszczenia i korozję. Panele elewacyjne GFRC może również charakteryzować wandaloodporność i graffiti-odporność, ze względu na ich podwyższoną wytrzymałość i udarność, czyli odporność na uderzenia. Jest to ważny aspekt, zwłaszcza na terenach miejskich obszarów publicznych, gdzie istnieje zwiększone ryzyko uszkodzeń i wandalizmu. Dodatkowo panele GFRC są bardzo popularne, gdy wymagana jest większa swoboda projektowa, a więc gdy bryła budynku jest bardziej skomplikowana, ma nowoczesny bądź nietypowy kształt. Elementy elewacyjne GFRC na „Two New Ludgate” w Londynie pozwoliły na uzyskanie opływowego i dynamicznego kształtu budynku (rys. 2a). GFRC został również wykorzystany



Rys. 2. „Two New Ludgate”, Londyn, Wielka Brytania [22] (a), „1000 Museum”, Miami, Stany Zjednoczone [22] (b), „Aarhus”, Aarhus, Dania [22] (c), „Youth Olympic Conference Center”, Nankin, Chiny [22] (d)

do budowy egzoszkieletu „1000 Museum” w Miami (rys. 2b). Te nietypowe rozwiązania konstrukcyjne zostały zastosowane w celu zmaksymalizowania powierzchni użytkowej w budynku, gdyż pozwoliło na eliminację niektórych słupów i zmniejszenie grubości wybranych ścian. Innym przykładem może być budynek „Aarhus” w Danii, gdzie okładziny elewacyjne GFRC pozwoliły wyrazić zamiar architektów, aby ukształtować go jako dwa „A” nawiązujące do nazwy miasta (rys. 2c). Ponadto w przypadku „Youth Olympic Conference Center” w Nankinie, w Chinach, panele GFRC zostały pokryte specjalną nieorganiczną,

GFRC można nanosić metodą natryskową jako torcret, co ułatwia jego aplikację. Bardzo często w przypadku kopuł jest wymagane również wysokiej jakości wykończenie w celu umożliwienia dekoracyjnego malowania, jak to było w katedrze Zmartwychwstania Jezusa Chrystusa w Kijowie, w Ukrainie (rys. 3a). Czasami segmenty kopuły i innych sklepień GFRC muszą zapewnić wymaganą gładkość do zamocowania projektowanego pokrycia, czyli np. płytek ceramicznych na jednej z kopuł pałacu prezydenckiego w Abu Dhabi, gdzie tolerancja wynosiła 2 mm. Wreszcie betonowanie sklepień oraz kopuł z GFRC pozwala nie



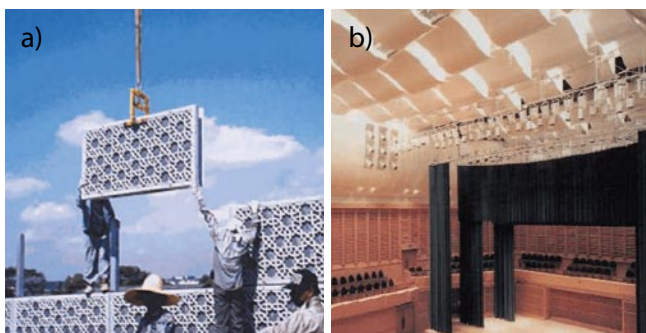
Rys. 3. Kopuła z GFRC katedry Zmartwychwstania Jezusa Chrystusa, Kijów, Ukraina [23] (a), kopuła z GFRC meczetu Mohammed'a Al-Ameen'a, Maskat, Oman [24] (b), kopuła z GFRC pokryta płytkami [25] (c), nowoczesna, ośmiokątna kopuła z GFRC [26] (d)

hybrydową emulsją silikonowo-akrylanową zapewniającą właściwości hydrofobowe (rys. 2d).

Kolejnym elementem, do produkcji którego wykorzystuje się GFRC, są kopuły i nowoczesne sklepienia, występujące m.in. w pałacach, centrach handlowych, teatrach, stadionach, na uniwersytetach (rys. 3). Wysokie właściwości mechaniczne fibrobetonu są porównywalne z betonem zbrojonym tradycyjnie, co pozwala na budowę kopuł nawet wtedy, gdy ich średnica jest większa niż 20 m. Należy również wspomnieć, że kształt kopuł oraz niektórych nowoczesnych sklepień utrudnia układanie i gięcie prętów zbrojeniowych, dlatego mieszanka ze zbrojeniem rozproszonym jest rozwiązaniem wygodniejszym. Ponadto

tylko na tworzenie gładkich, ale także wzorzystych powierzchni, takich jak kopuła meczetu Mohammeda Al-Ameen'a w Maskacie, w Omanie (rys. 3b). Podsumowując, podwyższona wytrzymałość, plastyczność, lekkość i możliwość barwienia, pozwala na tworzenie z GFRC nowoczesnych i niepowtarzalnych projektów sklepień dających konstruktorom oraz architektom większe możliwości twórcze. Ponadto dzięki zwiększonej trwałości elementów z dodatkiem włókien szklanych spełnione są wymogi zrównoważonego rozwoju, poprzez przedłużenie żywotności i redukcję kosztów utrzymania tego typu konstrukcji.

Biorąc pod uwagę wygłuszające właściwości betonu z włóknami szklanymi, panele akustyczne z GFRC są chętnie stosowane w pobliżu dróg i torów, a więc gdzie uciążliwe są hałasy pochodzące od samochodów, tramwajów i pociągów (rys. 4a). Badania wykazały, że panele z dodatkiem włókien szklanych skuteczniej pochłaniają hałas niż te wykonane z perforowanego aluminium. Wspomniana wcześniej plastyczność tego materiału i swoboda kształtowania sprawia, że dźwiękoszczelne panele GFRC nie tylko zwiększają komfort życia, ale także atrakcyjność sąsiednich terenów. Nowoczesne i estetyczne wizualnie ekrany dźwiękochłonne z GFRC mogą być zarówno funkcjonalnymi, jak i dekoracyjnymi elementami miasta uzupełniającymi



Rys. 4. Panele akustyczne z GFRC zewnętrzne [28] (a), wewnętrzne [29] (b)



Rys. 5. Panele z GFRK dla tuneli [30] (a), panele z GFRK dla kanalizacji miejskich [31] (b), panele z GFRK dla systemów melioracyjnych [32] (c), kanały z GFRK do ochrony rur elektrycznych [33] (d)

krajobraz [27]. Ekrany akustyczne nie są jednak używane tylko na zewnątrz, ale są również bardzo popularne w tworzeniu pomieszczeń, w których akustyka odgrywa ważną rolę, takich jak kina, teatry oraz sale koncertowe (rys. 4b). Na przykład w „Kilden Performing Arts Centre” w Odderøya, w Kristiansand, w Norwegii zastosowano wewnętrzne panele akustyczne ze względu na ich właściwości dźwiękoszczelne, ale także lekkość, która umożliwiła ich podnoszenie za pomocą dostępnych na miejscu dźwigów wspornikowych. Dodatkowo zaprojektowane rozwiązanie pozwalające na łatwe mocowanie paneli pozwoliło przyspieszyć proces montażu, a najwyższa jakość wykończenia umożliwiła osiągnięcie złożonej geometrii.

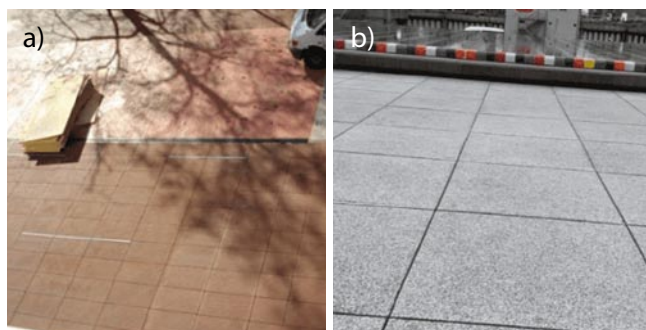
Ponadto GFRK jest niezwykle cenionym materiałem w infrastrukturze. Przede wszystkim ze względu na wysoką wytrzymałość, trwałość, lekkość, łatwość i szybkość wykonania oraz montażu elementów. Zalety wynikające z odporności ogniowej i korozyjnej oraz wysokich tolerancji na niesprzyjające warunki atmosferyczne sprawiają, że GFRK jest odpowiednim materiałem do budowy mostów, wiaduktów, tuneli, murów oporowych i kanałów ochronnych dla kabli i rur elektrycznych (rys. 5). Dodatkowo skuteczne ograniczanie zarysowań dzięki zwiększonej wytrzymałości na rozciąganie i zjawisku mostkowania pęknięć przez włókna pozwala na zastosowanie GFRK do produkcji wszelkich elementów wymagających wodo- i mrozoodporności, takich jak kanały melioracyjne i odwodniające, a także kanalizacje miejskie (rys. 5). W Anglii, Holandii i Francji kanały ściekowe, wykonane pierwotnie z cegieł, w celu renowacji wyłożono szalunkami z GFRK, a następnie zabetonowano. To rozwiązanie miało również dodatkową zaletę, gdyż zapewniało gładką powierzchnię, umożliwiającą lepszą wydajność hydrauliczną. Ponadto GFRK używane jest do budowy fontann, gdzie zmniejszona absorpcja wody i jej ograniczona przepuszczalność stanowi dużą zaletę (rys. 6).

Należy również wspomnieć, że nawierzchnie, które są narażone na ścieranie, uderzenia, opady, sole drogowe, spaliny, kurz i zmiany pogody, warto wykonywać z dodatkiem włókien szklanych. GFRK jest bowiem materiałem o dobrej odporności na ścieranie, uderzenia, wodę,

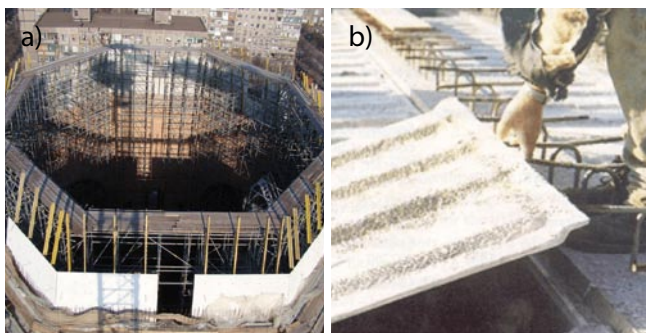


Rys. 6. Fontanna z GFRK [34] (a), [35] (b)

mróz, ogień i chemikalia, a więc idealnie nadaje się do produkcji płyt drogowych i chodnikowych (rys. 7). Ponadto płyty z GFRK są chętnie wykorzystywane do tworzenia nawierzchni i innych elementów nabrzeżnych oraz w środowiskach morskich, ponieważ mają zwiększoną trwałość i odporność na korozję. Brak tradycyjnego zbrojenia w formie prętów stalowych eliminuje również niebezpieczeństwo skałeczenia się i potknięcia o wystające części prętów. Odsłonięcie prętów może bowiem nastąpić w wyniku korozji i odpadania otuliny.



Rys. 7. Płyty chodnikowe z GFRK [36] (a), płyty chodnikowe z GFRK na ulicy „La Défense”, Paryż, Francja [37] (b)



Rys. 8. Deskowanie tracone z GFRC: a) kopuła kościoła, Mariupol, Ukraina [38], b) strop [39]

Beton z GF służy również do wykonywania szalunków traconych (rys. 8). Są to szalunki, które pozostają na swoim miejscu i pełnią funkcję dodatkowego stabilizatora, wzmocnienia oraz ochrony: przed wodą, ogniem, korozją, chemikaliami oraz niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi. Są bardzo popularne w procesie betonowania wspomnianych już wcześniej konstrukcji transportujących lub magazynujących wodę, tuneli, silosów, a także kopuł i sklepień łukowych. Co więcej, bardzo często znajdują zastosowanie w projektach, gdzie betonowane są elementy, do których dostęp jest utrudniony. Dodatkowo budowa elementów z szalunkami traconymi z GFRC jest szybsza, łatwiejsza, a montaż bezpieczniejszy dla pracowników.

Na uwagę zasługuje fakt, że dzięki wysokiej wytrzymałości, plastyczności i lekkości z GFRC można uzyskać elementy o zmniejszonym przekroju oraz prawie dowolnym kształcie, tworząc bardzo oryginalne

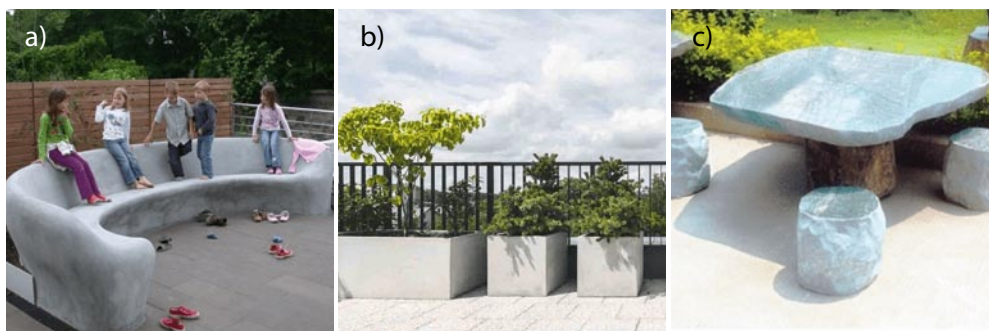
i niepowtarzalne projekty. GFRC stosuje się bowiem do produkcji elementów dekoracyjnych: rzeźb (rys. 9), płaskorzeźb, gzymsów, obramowań okien i drzwi, kapiteli oraz elementów funkcjonalnych, takich jak: stoły, ławki, ogrodzenia, balustrady i donice (rys. 10). W „Confluence Park” w Denver znajduje się rzeźba wykonana z GFRC o nazwie „Sing and Glide” składająca się kilku kul i pokryta mozaiką (rys. 9a). Zaprojektował ją Jeanne Quinn. Podobnie podstawa rzeźby „I Too Know The Eagle” w Cherry Creek North, w Denver jest wykonana z betonu z dodatkiem włókien szklanych (rys. 9b). Należy wspomnieć, że GFRC można barwić tlenkami, co zwiększa jego atrakcyjność w tworzeniu elementów użyteczności publicznej.

Obecnie jednym z głównych nurtów zastosowań GFRC jest kształtowanie krajobrazów i tworzenie naturalnie wyglądających wodospadów, plaż, formacji skalnych i klifów. Pomysł ten został wykorzystany przy budowie wodospadu w parku w Owasso, w stanie Oklahoma, fontanny na ulicach w South Glenn, w Centennial oraz aranżacji skalnych w „Johnson Habitat Park” w Denver, w stanie Kolorado. Co więcej, w „Mehaffey Park”, aby nawiązać do charakteru krajobrazu Kolorado, ściana skalna, lądowisko zjeżdźalni, małe elementy skalne i powalone kłody zostały wyprodukowane z GFRC (rys. 11a). Takie przestrzenie do zabawy pozwalają dzieciom rozwijać równowagę, koordynację oraz zdolności motoryczne. Innym przykładem jest plac zabaw w „Center Park” w Westminster, w stanie Kolorado, który ma kształt pirackiej łodzi,

Rys. 9. Rzeźba z GFRC pokryta mozaiką „Sing and Glide” w „Confluence Park”, Denver, Stany Zjednoczone [40] (a), podstawa rzeźby z GFRC „I Too Know The Eagle” w Cherry Creek North, Denver, Stany Zjednoczone [40] (b), rzeźba anioła z GFRC [41] (c)



Rys. 10. Elementy z GFRC: ławka [42] (a), donice [43] (b), stół [44] (c)





Rys. 11. Plac zabaw z GFRP w „Mehaffey Park”, Loveland, Kolorado, Stany Zjednoczone [45] (a), plac zabaw z GFRP w „Center Park”, Westminster, Kolorado, Stany Zjednoczone [46] (b), element do wspinaczki z GFRP w „Children’s Museum of the Treasure Coast”, Jensen Beach, Floryda, Stany Zjednoczone [47] (c), figura zwierzęcia z GFRP [48] (d)

a zjeżdżalnia, dziury i kłody są wykonane z betonu z dodatkiem GF (rys. 11b).

Wspomniane dotychczas miejsca zastosowania GFRP związane były z budową nowych elementów. Trzeba jednak wspomnieć, że beton z włóknami szklanymi stosuje się również do rekonstrukcji uszkodzonych elementów zabytków i detali architektonicznych. GFRP jest odpowiednim materiałem, dzięki któremu można odtworzyć oryginalny wygląd elementów, gdyż ma szerokie możliwości kształtowania i barwienia.

4. Podsumowanie

Zastosowanie fibrobetonu powoduje, że wykonane elementy są tańsze zarówno w produkcji, jak i utrzymaniu. Zwiększona ciągliwość, a także większa odporność na ścieranie, wodę, mróz, ogień i uderzenia sprawia, że elementy te są trwalsze, bezpieczniejsze i bardziej odporne na akty wandalizmu. Fibrobeton z włóknem szklanym wykorzystuje się do tworzenia nie tylko elementów konstrukcyjnych przeznaczonych do przenoszenia obciążeń, ale również struktur towarzyszących procesom budowlanym oraz form architektonicznych, które uatrakcyjniają oraz tworzą wytrzymalsze, trwalsze i bezpieczniejsze przestrzenie publiczne. Jest to ciekawy punkt widzenia, ponieważ do tej pory wskazywano przede wszystkim tylko na strukturalny charakter fibrobetonu. Dzięki większej swobodzie projektowej i lekkości elementów z włóknami szklanymi możliwe jest tworzenie elementów o nowocześniejszej i bardziej skomplikowanej geometrii. GFRP wykorzystywany jest do produkcji:

- belek, nadproży, posadzek, schodów i słupów,
- pergoli oraz altan,
- paneli elewacyjnych,
- nowoczesnych sklepień i kopuł,

- zewnętrznych i wewnętrznych paneli akustycznych,
- paneli tuneli, mostów, wiaduktów i murów oporowych,
- kanałów ochronnych kabli i rur elektrycznych,
- systemów melioracyjnych, kanałów i kanalizacji komunalnych,
- płyt drogowych i chodnikowych,
- szalunków traconych,
- rzeźb, płaskorzeźb, gzymsów, portali okiennych i drzwiowych oraz kapiteli,
- elementów funkcjonalnych, takich jak: stoły, ławki, ogrodzenia, balustrady i donice,
- fontann, wodospadów, plaż, formacji skalnych i kłofów w procesie kształtowania krajobrazu i tworzenia naturalnie wyglądających elementów.

GFRP używany jest również podczas prac remontowych i rekonstrukcyjnych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Górski M., Kotala B., Białożor R., Rodzaje i właściwości zbrojeń niemetalicznych, [w:] XXXIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, 2018, str. 45–90
- [2] Zych T., Współczesny fibrobeton – możliwość kształtowania elementów konstrukcyjnych i form architektonicznych, *Architektura Czasopismo Techniczne*, tom 18, 2010, str. 371–386
- [3] Drobiec Ł., Blazy J., Współczesne niemetaliczne zbrojenie rozproszone stosowane w konstrukcjach betonowych, *Izolacje*, tom 61, 5/2020, str. 70–84
- [4] Wang L. i in., The influence of fiber type and length on the cracking resistance, durability and pore structure of face slab concrete, *Construction and Building Materials*, tom 282, 2021, str. 122706, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122706
- [5] Mayer P., Kaczmar J. W., Właściwości i zastosowania włókien węglowych i szklanych, *Tworzywa Sztuczne i Chemia*, 6/2008, str. 52–56
- [6] Mohajerani A. i in., Amazing types, properties, and applications of fibres in construction materials, *Materials*, tom 12, 16/2019, str. 2513, doi: 10.3390/ma12162513
- [7] Lin J., Huang C., Liu C., Chen C., Lin Z., Lou C., Polypropylene/Short Glass Fibers Composites: Effects of Coupling Agents on Mechanical Properties, Thermal Behaviors, and Morphology, *Materials*, tom 8, 2015, str. 8279–8291, doi: 10.3390/ma8125451
- [8] Concrete Network. Manufacturing GFRP pieces, Concrete Network, <https://www.concretenetwork.com/glass-fiber-reinforced-concrete/precast-pieces.html> (udostępniono cze. 18, 2020)

- [9] Blazy J, Blazy R., Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces, *Case Studies in Construction Materials*, tom 14, 2021, str. e00549, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00549
- [10] Blazy J., Drobiec Ł., Wolka P., Flexural tensile strength of concrete with synthetic fibers, *Materials*, tom 14, 16/2021, sierpień, str. 4428, doi: 10.3390/ma14164428
- [11] Singh N. K., Rai B., A Review of Fiber Synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete, *Journal of Applied Engineering Sciences*, tom 8, 2/2018, grudzień, str. 41–50, doi: 10.2478/jaes-2018-0017
- [12] Blazy J., Blazy R., Drobiec Ł., Glass Fiber Reinforced Concrete as a Durable and Enhanced Material for Structural and Architectural Elements in Smart City – A Review, *Materials*, tom 15, nr 2754, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15082754>
- [13] Yuan Z., Jia Y., Mechanical properties and microstructure of glass fiber and polypropylene fiber reinforced concrete: An experimental study, *Construction and Building Materials*, tom 266, 2021, str. 121048, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121048
- [14] Ruben N., Venkatesh C., Durga C. S. S., Chand M. S. R., Comprehensive study on performance of glass fibers-based concrete, *Innovative Infrastructure Solutions*, tom 6, nr 112, 2021, str. 1–11, doi: 10.1007/s41062-021-00490-4
- [15] Moghadam M. A., Izadifard R. A., Effects of steel and glass fibers on mechanical and durability properties of concrete exposed to high temperatures, *Fire Safety Journal*, t. 113, 3/2020, str. 102978, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.102978
- [16] Rahmani T., Kiani B., Bakhshi M., Shekarchizadeh M., Application of Different Fibers to Reduce Plastic Shrinkage Cracking of Concrete, [w:] 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, Dordrecht: Springer Netherlands, 2012, str. 635–642
- [17] Nagy B., Nehme S. G., Szagri D., Thermal properties and modeling of fiber reinforced concretes, *Energy Procedia*, tom 78, 2015, str. 2742–2747, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.616
- [18] Stromberg. Products. Lintels. Pictures, Stromberg, <https://www.strombergarchitectural.com/products/lintels/pic/20/3> (udostępniono kwi. 14, 2022)
- [19] Stromberg. Products. Staircases. Pictures, Stromberg, <https://www.strombergarchitectural.com/products/staircases/pic/48/0> (udostępniono kwi. 14, 2022)
- [20] Stromberg. Products. Pergolas. Pictures, Stromberg, <https://www.strombergarchitectural.com/products/pergolas/pic/34/1> (udostępniono kwi. 14, 2022)
- [21] GFRC Products. Gazebos – GFRC, GFRC Products, <https://www.gfrc-products.com/gazebos-gfrc/> (udostępniono kwi. 14, 2022)
- [22] GRCA International. Case studies, GRCA International, <https://www.grca.online/case-studies> (udostępniono luty 22, 2022)
- [23] GRCA International. Case Studies. Cathedral of the Resurrection of Jesus Christ, Kyiv, GRCA International, <https://www.grca.online/case-studies/cathedral-of-the-resurrection-of-jesus-christ-kiev> (udostępniono luty 22, 2022)
- [24] GRCA International. Case Studies. Mohammed Al-Ameen Mosque, Muscat, GRCA International, <https://www.grca.online/case-studies/moham-med-al-ameen-mosque-muscat> (udostępniono luty 22, 2022)
- [25] Stromberg. Products. Domes. Pictures. Dome with cupola, Stromberg, <https://www.strombergarchitectural.com/products/domes/pic/12/0> (udostępniono kwi. 14, 2022)
- [26] Stromberg. Products. Domes. Pictures. Octagonal dome, Stromberg, <https://www.strombergarchitectural.com/products/domes/pic/12/7> (udostępniono kwi. 14, 2022)
- [27] GRC Concrete. Applications of GRC. Infrastructure. Road and railway noise barriers, GRC Concrete, <https://grcbeton.co.uk/applications-of-grc/infrastructure/road-and-railway-noise-barriers/> (udostępniono luty 22, 2022)
- [28] GRC Delhi NCR. Products. GRC Screens, GRC Delhi NCR, <http://grcdelhinc.com/grc-screens.html> (udostępniono kwi. 14, 2022)
- [29] GRC Concrete. Application of GRC. Acoustics and interiors, GRC Concrete, <https://grcbeton.co.uk/applications-of-grc/acoustics-and-interiors/> (udostępniono luty 22, 2022)
- [30] Heathrow Central Railway Station looking towards London, Sunil060902, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Heathrow_Central_platform.JPG (udostępniono kwi. 14, 2022).
- [31] GRC Concrete. Applications of GRC. Infrastructure. Municipal sewerage modernization of old channels – not opencast, GRC Concrete, <https://grcbeton.co.uk/applications-of-grc/infrastructure/municipal-sewerage-modernization-of-old-channels-not-opencast/> (udostępniono luty 22, 2022)
- [32] GRC Concrete. Applications of GRC. Infrastructure. Melioration and drainage systems, GRC Concrete, <https://grcbeton.co.uk/applications-of-grc/infrastructure/melioration-and-drainage-systems/> (udostępniono luty 22, 2022)
- [33] GRC Concrete. Applications of GRC. Infrastructure. Canals and curtain channels for electrical wires, GRC Concrete, <https://grcbeton.co.uk/applications-of-grc/infrastructure/canals-and-curtain-channels-for-electrical-wires/> (udostępniono luty 22, 2022)
- [34] Stromberg. Products. Lion fountain, Stromberg, <https://www.strombergarchitectural.com/products/fountains-and-rings/pic/15/0> (udostępniono kwi. 14, 2022)
- [35] Stromberg. Products. Jet fountain with basin, Stromberg, <https://www.strombergarchitectural.com/products/fountains-and-rings/pic/15/15> (udostępniono kwi. 14, 2022)
- [36] GRC Concrete. Applications of GRC. Pavement and paving slabs, GRC Concrete, <https://grcbeton.co.uk/applications-of-grc/pavement-and-paving-slabs/> (udostępniono luty 22, 2022)
- [37] Generale Prefabbricati. Completed works. La Défence District, Paris, Generale Prefabbricati, <https://www.generaleprefabbricatispa.com/en/completed-works/place-agam-la-defense-paris-france/> (udostępniono mar. 04, 2022)
- [38] GFRC Ukraine. Projects. Church in Mariupol, GFRC Ukraine, https://sfb.com.ua/eng/page/hram_v_mariupole.aspx (udostępniono luty 22, 2022)
- [39] GRCA International. Uses of GRC. GRC in Engineering. Permanent formwork, GRCA International, <https://www.grca.online/uses-of-grc/grc-in-engineering/permanent-formwork> (udostępniono kwi. 14, 2022)
- [40] Colorado Hardscapes. Concrete in public art, Colorado Hardscapes, <https://www.coloradohardscapes.com/concrete-in-public-art/> (udostępniono luty 22, 2022)
- [41] Stromberg. Products. Sculpture. Pictures. Angel, Stromberg, <https://www.strombergarchitectural.com/products/sculpture/pic/30/3> (udostępniono kwi. 14, 2022)
- [42] GRC Concrete. Applications of GRC. Landscape architecture and sculpture, GRC Concrete, <https://grcbeton.co.uk/applications-of-grc/landscape-architecture-and-sculpture/> (udostępniono kwi. 14, 2022)
- [43] Donice z włókna szklanego w czym tkwi ich fenomen, Home and Life, <https://homeandlife.pl/donice-z-wlokn-a-szklanego-w-czym-tkwi-ich-fenomen/> (udostępniono kwi. 14, 2022)
- [44] Stromberg. Products. Tables, Stromberg, <https://www.strombergarchitectural.com/products/tables/pic/31/0> (udostępniono kwi. 14, 2022)
- [45] Colorado Hardscapes. GFRC rocks. Mehaffey Park, Colorado Hardscapes, <https://www.coloradohardscapes.com/job-profile/mehaffey-park/> (udostępniono luty 22, 2022)
- [46] Colorado Hardscapes. How to create iconic playgrounds with concrete – part 1: artisan rocks, Colorado Hardscapes, <https://www.coloradohardscapes.com/how-use-decorative-concrete-to-create-iconic-playgrounds-part-1-artisan-rocks/> (udostępniono luty 22, 2022)
- [47] Strickland N., The4kids. Children's museum of the treasure coast. Jensen Beach, Florida, <https://www.google.com/maps/uv?pb=!1s0x88de-e76b91fb3559%3A0x14d5b53037213446!3m1!7e115!4shhttps%3A-%2F%2Fih5.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipOXJf0IJKwhy-VZbL8XxEfUkoqfyfrYPXoFob5i%3Dw260-h175-n-k-no!5sJensenBeach%2CFLMuseum%27sInteractiveGarden-Szu> (udostępniono kwi. 14, 2022)
- [48] Stromberg. Products. Animals, Stromberg, <https://www.strombergarchitectural.com/products/animals/pic/1/0> (udostępniono kwi. 14, 2022)