

mgr inż. Katarzyna Zdanowicz^{1*)}

ORCID: 0000-0003-3847-3631

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx¹⁾

Siatki tekstylne na bazie włókien szklanych i węglowych jako zbrojenie konstrukcji betonowych

Glass and carbon textile reinforcement for concrete structures

DOI: 10.15199/33.2019.06.09

Streszczenie. W artykule zaprezentowano siatki tekstylne z włókien węglowych i szklanych jako alternatywne zbrojenie elementów betonowych. Opisano ich strukturę i właściwości oraz charakterystykę jako produktu znajdującego się pomiędzy krótkimi włóknami do fibrobetonu a typowymi prętami zbrojeniowymi z materiałów kompozytowych FRP (*Fibre Reinforced Polymers*). Przedstawiono obszary zastosowania betonu ze zbrojeniem z siatek tekstylnych do: konstrukcji kładek pieszo-rowerowych i mostów; produkcji elementów fasadowych i wielowarstwowych paneli ściennych typu „sandwich” oraz do konstrukcji kopuł i elementów przekryć o skomplikowanej geometrii i zakrzywionej powierzchni. Opisano kierunki rozwoju betonu ze zbrojeniem tekstylnym, prowadzone badania i nowe obszary zastosowania. Wymieniono również dostępne w literaturze modele inżynierskie oraz wytyczne do wymiarowania konstrukcji ze zbrojeniem tekstylnym.

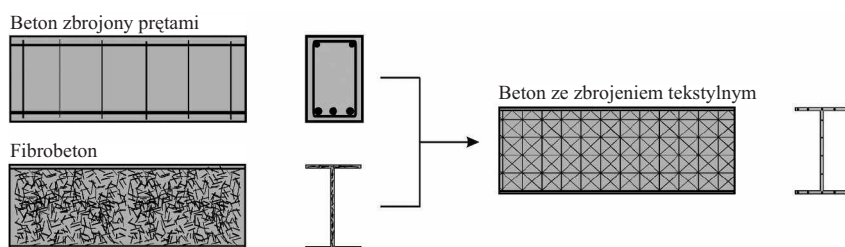
Słowa kluczowe: zbrojenie tekstylne; siatki z włókien węglowych; beton ze zbrojeniem tekstylnym; zbrojenie niemetaliczne.

Abstract. This review article presents textile grids made of carbon and glass fibres as an alternative reinforcement for concrete elements. The structure and properties of textile reinforcement and the characteristics of textile reinforced concrete as a material located between fiber reinforced concrete and concrete with reinforcement bars made of FRP (*Fibre Reinforced Polymers*) are described. The article presents main areas of application of concrete with textile reinforcement: for the construction of footbridges and bridges, for the production of façade elements and multilayer sandwich wall panels, and as reinforcement for the construction of domes and elements with complex geometry and curved surfaces. The directions of development of textile reinforced concrete, current research and possible further areas of application are briefly described. It also lists models available in the literature for the design of structures with textile reinforcement.

Keywords: textile reinforcement; carbon textiles; textile reinforced concrete; non-metallic reinforcement.

Siatki tekstylne na bazie włókien węglowych lub szklanych są wykorzystywane do zbrojenia cienkościennych elementów betonowych od lat dziewięćdziesiątych XX w. Zbrojenie tekstylne określa się często jako wariant pomiędzy tradycyjnym, dwukierunkowym zbrojeniem z prętów kompozytowych a krótkimi, losowo zorientowanymi włóknami stosowanymi w fibrobetonie (rysunek 1). Jedną z zalet betonu ze zbrojeniem tekstylnym jest to, że analogicznie do fibrobetonu wykazuje on większą odkształcalność graniczną niż elementy zbrojone klasycznymi prętami kompozytowymi (ang. *Fibre Reinforced Polymers*, *FRP*). Dzięki temu zniszczenie elementu jest wcześniej sygnalizowane.

Konstrukcje betonowe, w których siatki tekstylne są wykorzystywane jako zbrojenie główne lub dodatkowe, najczęściej określa się nazwą „beton



Rys. 1. Porównanie betonu zbrojonego prętami, fibrobetonu i betonu zbrojonego siatkami tekstylnymi (zaadaptowane z [20])

Fig. 1. Comparison of concrete with conventional reinforcement, fibre reinforced concrete (FRC) and textile reinforced concrete (TRC), adapted from [20]

tekstylny” (ang. *TRC*, *Textile Reinforced Concrete*, niem. *Textilbeton*). Ponadto w użyciu są określenia: Carbonbeton (z siatkami na bazie włókien węglowych, niem. *Carbonbeton*), Textile Reinforced Mortar (TRM) lub Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM, głównie w USA). Zbrojenie tekstylne jest stosowane przede wszystkim do wzmacniania istniejących konstrukcji. W tym obszarze można znaleźć wiele realizacji przede wszystkim w Stanach Zjednoczonych, Grecji czy Włoszech [15], ale coraz częściej jest również wykorzystywane w nowych elementach i prefabrykacji

(realizacje znajdują się przede wszystkim w Niemczech). Artykuł wypełnia lukę dotyczącą nowych konstrukcji ze zbrojeniem tekstylnym w polskim piśmiennictwie i przedstawia najczęściej stosowane materiały, budowę siatek tekstylnych oraz dotychczas zrealizowane prototypy i konstrukcje.

Siatki tekstylne z materiałów kompozytowych

Siatki tekstylne można klasyfikować ze względu na wykorzystane włókna, rodzaj ich połączenia (strukturę) oraz impregnację.

¹⁾ Leibniz Universität Hannover, Institut für Massivbau, Niemcy

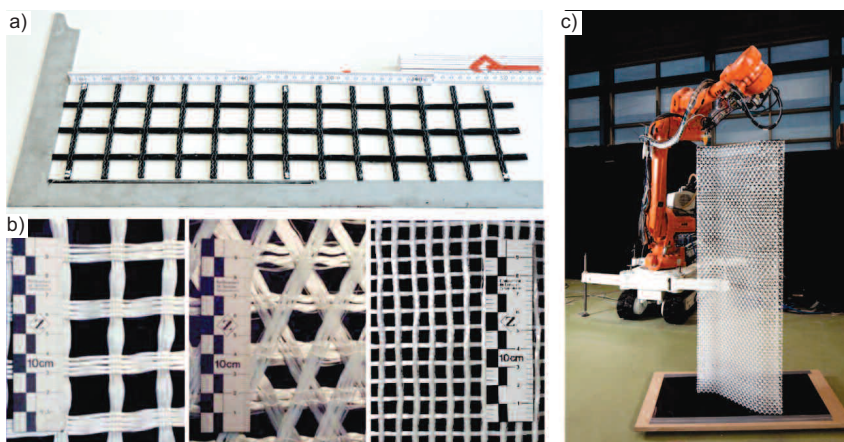
^{*)} Adres do korespondencji:

zdanowicz@ifma.uni-hannover.de

Włókna. Do produkcji siatek tekstylnych są wykorzystywane włókna sztuczne i naturalne. Wśród włókien sztucznych wyróżniamy przede wszystkim włókna węglowe, szklane (ze szkła AR odpornego na działanie środowiska alkalicznego), bazaltowe, aramidowe oraz polipropylenowe, a także warianty mieszane. Siatki tekstylne są produkowane także z włókien naturalnych, np. jutowych. Spośród włókien syntetycznych, obecnie największą uwagę przyciągają **siatki na bazie włókien węglowych**, charakteryzujące się bardzo dobrymi parametrami mechanicznymi (charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie $1700 \div 2200$ MPa; moduł sprężystości $170 \div 230$ GPa) oraz odpornością na korozję, agresywne oddziaływania chemiczne, a tym samym dużą trwałością. **Siatki z włókien szklanych typu AR** są ekonomiczną alternatywą dla włókien węglowych, ale ich sztywność, moduł sprężystości oraz odporność na działanie wysokiej temperatury i długotrwałych naprężeń są mniejsze niż węglowych.

Struktura. Ze względu na strukturę siatek wyróżnia się **zbrojenie płaskie (2D)** oraz **przestrzenne (3D)**. W siatkach tekstylnych pojedyncze włókna (o średnicy kilku do kilkudziesięciu mikrometrów) połączone są w tzw. filamenty, które układają się równolegle (ang. *rovings*) lub przez skręcenie (ang. *yarns*) [31]. O liczbie filamentów, które składają się na jedną wiązkę, decydują założone właściwości mechaniczne i geometryczne. Parametrem, którym często określa się siatki tekstylne, jest tzw. gęstość liniowa (masa na jednostkę długości) wyrażana w tex ($1 \text{ tex} = 1 \text{ g}/1000 \text{ m}$). Zależy ona od liczby filamentów, ich średnicy oraz gęstości. Ostatecznie wiązki filamentów są związkiwane dodatkowym włóknem, tkane lub splatane z zastosowaniem technologii znanych z przemysłu włókienniczego [28], a także robotyki i metody druku 3D [8]. Przykładowe struktury zbrojenia tekstylnego przedstawiono na fotografii 1.

Impregnacja. Wśród siatek tekstylnych wyróżniamy materiały impregnowane i nieimpregnowane. Impregnacja pozwala na połączenie poszczególnych



Fot. 1. Przykłady siatek tekstylnych: a) siatka z włókien węglowych impregnowanych żywicą epoksydową; b) siatki z nieimpregnowanych włókien szklanych [22]; c) struktury 3D wytwarzane za pomocą robota drukującego [8]

Photo 1. Examples of textile reinforcement grids: a) carbon textile grid impregnated with epoxy resin; b) non-impregnated glass textiles [22]; c) robotically fabricated 3D polymer structures [8]

włókien ze sobą i tym samym włączenie do współpracy pod obciążeniem rozciągającym również włókien położonych wewnątrz wiązek. Siatki zaimpregnowane są zdecydowanie sztywniejsze niż te bez impregnacji. Z drugiej strony siatki nieimpregnowane pozwalają na dowolne kształtowanie formy zbrojenia, co nie jest bez znaczenia w konstrukcjach o nietypowej krzywiznie. Proces produkcji i impregnacji jest tym, co odróżnia zbrojenie tekstylne od typowego zbrojenia kompozytowego FRP (*Fibre Reinforced Polymers*). Zbrojenie FRP powstaje w procesie pultruzji, w czasie którego włókna są zatapiane w matrycy (najczęściej z żywicy epoksydowej). W ten sposób pojedyncze włókna są łączone w gotowy produkt. W przypadku siatek tekstylnych poszczególne włókna i filamenty są łączone mechanicznie (przez związanie czy splatanie). Impregnuje się natomiast ewentualnie gotowy produkt – siatkę, zanurzając ją w wannie z płynnym impregnatem. Zbrojenie płaskie poddaje się następnie ścisnieniu pomiędzy dwoma walcami, aby wtłoczyć impregnat pomiędzy filamenty i usunąć jego nadmiar. Na koniec impregnat jest utwardzany przez poddanie działaniu podwyższonej temperatury. W przypadku zbrojenia przestrzennego 3D, wcześniej zaimpregnowane zbrojenie jest układane w zamykanej formie stalowej (aby zapobiec wyboczeniu) i następnie poddawane procesowi utwardzania. Do impregnowania siatek tekstylnych są

wykorzystywane najczęściej żywice epoksydowe, winyloestry lub styrol-butadien [19].

Produkcja elementów z betonu zbrojonego siatkami tekstylnymi. Elementy betonowe ze zbrojeniem tekstylnym mogą być produkowane:

1) w procesie tradycyjnego betonowania, gdzie beton jest wlewany do formy, w której znajduje się już zbrojenie. Pod uwagę trzeba wziąć zazwyczaj niewielki rozmiar oczka siatki (5 – 40 mm) i odpowiednio dopasować wielkość kruszywa betonu. Beton musi mieć również odpowiednio płynną konsystencję; często wykorzystywany jest beton samozagęszczalny. Istotne jest także zamocowanie siatek tekstylnych w szalunku lub zastosowanie elementów dystansowych po obu stronach, ponieważ ze względu na swój niewielki ciężar własny niezamocowane siatki unoszą się podczas betonowania. Przykładowe elementy dystansowe przedstawione zostały w [30];

2) przez tzw. laminowanie. Wówczas do formy wlewa się część betonu, rozwija zbrojenie tekstylne i wciska je na całą powierzchnię w wylany beton, a następnie wykonuje się kolejną warstwę betonu i zbrojenia aż do osiągnięcia zakładanej grubości elementu;

3) przez natryskiwanie betonu, wykorzystywane najczęściej przy konstrukcjach powłokowych. Zbrojenie układa się na szalunku, a następnie warstwę betonu natryskuje się metodą torkretowania.

Zastosowanie zbrojenia tekstylnego

Zbrojenie kompozytowe z siatek tekstylnych jest stosowane przede wszystkim:

- w elementach takich, jak płyty fasadowe, okładziny lub zewnętrzne warstwy paneli wielowarstwowych typu „sandwich” w celu zredukowania otuliny, ciężaru i grubości;

- w elementach o nietypowej geometrii, kopułach i konstrukcjach powłokowych;

- w konstrukcjach, w których wymagany jest dłuższy okres użytkowania (np. mosty lub kładki, budowle hydrotechniczne) w celu zminimalizowania kosztów utrzymania i napraw;

- w cienkościennych elementach betonowych, w tym np. słupach wirowanych;

- jako zbrojenie środków belek nośnych o przekrojach T lub I.

Mosty i kładki. Pierwsza na świecie kładka dla pieszych ze zbrojeniem tekstylnym powstała w 2010 r. w Albstadt-Lautlingen w Niemczech (fotografia 2). Poprzednia konstrukcja musiała zostać usunięta ze względu na znaczne uszkodzenia spowodowane korozją. Od nowego projektu wymagano odpowiedniej trwałości i smukłości (kładka jest oparta na słupach stalowych). Kładka o całkowitej długości 97 m składa się z sześciu przęseł od 11,8 m do 17,2 m. Konstrukcję nośną tworzy siedem monolitycznie połączonych belek o przekroju 12 x 31 cm oraz płyty o całkowitej grubości 12 cm. Każda z belek została sprężona czterema cięgnami o średnicy 15,7 mm. Dodatkowo zbrojenie pasywne wykonano z prętów GFRP. Płyta kładki jest zbrojona jedynie siatkami tekstylnymi z włókien szklanych, zaimpregnowanymi żywicą epoksydową. Impregnacja pozwoliła na ukształtowanie zbrojenia 3D wykorzystanego w środkach i kapach kładki. Wytrzymałość siatki tekstylnej



Fot. 2. Pierwsza kładka ze zbrojeniem tekstylnym w Albstadt-Lautlingen [9, 23]
Photo 2. First footbridge with textile reinforcement in Albstadt-Lautlingen [9, 23]

na rozciąganie wynosiła odpowiednio w obu kierunkach 1035 MPa oraz 1194 MPa, moduł sprężystości 64,8 GPa. Zastosowano beton z kruszywem o drobnym uziarnieniu (do 4 mm) i średniej wytrzymałości na ściskanie 87 MPa. Pod uwagę wzięto również wpływ środowiska alkalicznego na trwałość zbrojenia szklanego. W badaniach przyspieszonego starzenia utrata wytrzymałości na rozciąganie wynosiła do 60% w przypadku zbrojenia nieimpregnowanego oraz 20% – zaimpregnowanego. Dzięki zastosowaniu zbrojenia niemetalicznego, otulina betonowa została zredukowana do 15 mm [9, 10].

Kolejną konstrukcją, w której zastosowano zbrojenie tekstylne, jest **kładka zrealizowana w 2013 r. w Kempten-Allgau** (Niemcy) przedstawiona na fotografii 3. Jest to jednoprzęsłowa konstrukcja o całkowitej długości 16,74 m i szerokości 2,58 m. Kładka składa się z osiemnastu segmentów o szerokości ok. 1 m. Zbrojenie tekstylne na bazie włókien szklanych zostało ułożone w czterech warstwach, co pozwoliło na uzyskanie segmentów o grubości 3 cm. W kierunku podłużnym i poprzecznym kładkę usztywniono żebrami ze zbrojeniem ze stali nierdzewnej, natomiast cała konstrukcja została sprężona cięgnami bez przyczepności, dzięki czemu



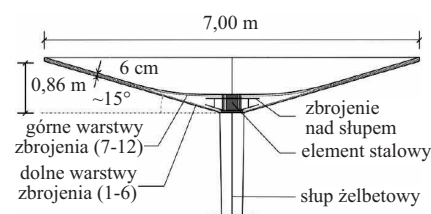
Fot. 3. Kładka ze zbrojeniem tekstylnym w Kempten-Allgau [18]
Photo 3. Footbridge with textile reinforcement in Kempten-Allgau [18]

w stykach między segmentami nie ma zbrojenia, a działające siły są przenoszone przez tarcie. Dodatkowo, poszczególne segmenty połączone ze sobą za pomocą kleju do betonu. Kładka została wykonana z betonu samozagęszczalnego. Dzięki relatywnie niewielkiej masie (13 t), kładkę po sklejeniu segmentów przetransportowano w całości i zamontowano za pomocą jednego dźwigu [18].

Po dwóch pierwszych pilotażowych konstrukcjach, **kolejna kładka pieszo-rowerowa** została wykonana w całości ze zbrojeniem tekstylnym na bazie włókien węglowych. Konstrukcja ma długość 15 m i szerokość 2,80 m, grubość płyty wynosi zaledwie 9 cm. Kładka została wykonana jako czternastotonowy element prefabrykowany, przy produkcji którego wykorzystano beton o klasie C70/85 i maksymalnym uziarnieniu 8 mm. Kładka została zaprojektowana na obciążenia ruchem pieszym i rowerowym. Zapewnia również możliwość przejazdu pięciotonowego pojazdu odsnieżającego. Została oddana do użytkowania w 2015 r. [12].

Kopuły i elementy powłokowe. Jedną z pierwszych konstrukcji powłokowych powstała przy Uniwersytecie RWTH Aachen w Niemczech i nawiązywała do **przekryć hiperboliczno-parabolidalnych** (tzw. hypar), rozpowszechnionych przez Felixa Candele [3]. W technologii żelbetu nie wykonuje się obecnie wielu takich konstrukcji, przede wszystkim ze względu na problemy z korozją oraz skomplikowane deskowanie i kształtowanie zbrojenia stalowego.

Pawilon wybudowany w Aachen składa się z czterech segmentów o wymiarach 7 x 7 m (rysunek 2, fotografia 4a). Płyta ma grubość 6 cm, natomiast w środku rozpiętości, nad czterometrowym słupem, grubość zwiększa się do 31 cm. W konstrukcji zastosowano 12 warstw nieimpregnowanej, gęstej siatki tekstylnej z włókien węglowych, o oczkach 7,7 – 8,3 mm, przez co osiągnięto wytrzymałość betonu na rozciąganie 24,1 MPa. Otulina betonowa wynosiła po obu stronach 7 mm. Beton zawierający kruszywo o maksymalnym uziarnieniu 0,8 mm miał w swoim składzie dodatkowo 0,5% krótkich włókien szklanych typu AR.



Rys. 2. Przekrycie typu hypar ze zbrojeniem tekstylnym [25]
Fig. 2. Hypar shell structure with textile reinforcement [25]

Kolejnym zastosowaniem betonu zbrojonego siatkami tekstylnymi są **zakrzywione przekrycia dachowe**. Pierwszy z przykładów to **pawilon w Kahla** (Niemcy) – konstrukcja powłokowa złożona z sześciu trójkątnych elementów o podwójnej krzywiznie (fotografia 4b). Elementy o wysokości 5 m i grubości 40 mm zostały wykonane przez wpompowanie betonu do zamkniętego szalunku. Jako zbrojenie zastosowano dwie warstwy siatki tekstylnej z włókien węglowych o gęstości liniowej 3300 tex [5]. Drugim przykładem jest przekrycie parkingu na rowery, które składa się z pięciu elementów o szerokości 2,14 m, długości 4,40 m i strzałce wygięcia 50 cm. Elementy mają grubość zaledwie 2 cm i są zbrojone sześcioma warstwami siatki na bazie włókien węglowych (rozmiar oczka 8,3 mm i 7,7 mm w obu kierunkach, gęstość liniowa 800 tex), co odpowiada stopniowi zbrojenia 1,6%. Konstrukcja powstała metodą natryskiwania. Zastosowano beton z kruszywem o maksymalnym uziarnieniu 0,4 mm [26].

Elementy fasadowe. Zalety betonu z zbrojeniem tekstylnym są często wykorzystywane w elementach fasadowych. Ze względu na odporność zbrojenia kompozytowego na korozję i dobrą przyczepność do betonu, znacznie zredukowana może zostać otulina betonowa. Na rynku są dostępne elementy fasadowe z betonu zbrojonego siatkami tekstylnymi o grubości od dwóch do kilku centymetrów.

Pierwsze płyty fasadowe ze zbrojeniem tekstylnym otrzymały dopuszczenie do użytkowania w Niemczech w 2008 r. Obecnie dopuszczone do użytkowania są trzy rodzaje płyt o grubości 20 mm, z pojedynczą warstwą zbrojenia szklanego (maksymalne wymiary 1,2 m x 0,6 m), o grubości 30 mm lub 40 mm, z pojedynczą warstwą zbrojenia węglowego (maksymalne wymia-

ry 2,4 m x 1,2 m) oraz o grubości 30 mm, z podwójną warstwą węglowego zbrojenia tekstylnego (maksymalna wysokość 3,6 m i powierzchnia 3,3 m²) [4]. W jednym z pilotażowych projektów, zrealizowanym w Aachen w 2009 r., płyty fasadowe miały wymiary 2,51 m x 4,88 m, przy grubości 30 mm. Zbrojone były siatkami z włókien szklanych o oczku siatki 16,8 mm. Płyty zamocowane zostały do dwóch pionowych słupów, rozmieszczonych tak, aby maksymalny moment zginający od oddziaływania wiatru był jednakowy w przęśle i w miejscu słupów. Dzięki takiemu schematowi statycznemu jednowarstwowe zbrojenie tekstylne mogło zostać umieszczone w środku grubości płyt [11]. Kolejne realizacje obejmowały m.in. fasadę budynku w Nimwegen w Niemczech (fotografia 5a). Dzięki wykorzystaniu płyt o grubości 20 mm ze zbrojeniem tekstylnym na bazie włókien szklanych, zaoszczędzono przeszło 80% materiału w porównaniu z typowymi elementami żelbetowymi [23]. Obecnie wielkoformatowe płyty fasadowe o nieco większej grubości (do 50 – 60 mm) obejmują elementy o powierzchni do 6,2 m² (wymiary 4,1 x 1,5 m). Płyty betonowe z hybrydowym zbrojeniem z siatek tekstylnych z włóknami szklanymi i węglowymi zastosowane zostały również w 2016 r. jako pokrycie pylonów mostu Yaviz-Sultan-Selim przez cieśninę Bosfor w Turcji. Były to elementy o grubości 30 mm i wymiarach 3,0 x 4,5 m z dodatkowymi, dziesięciocentymetrowymi żebrami usztywniającymi [27]. Innym przykładem realizacji są specjalne elementy fasadowe, częściowo o zakrzywionej geometrii, które zostały wykorzystane w 2015 r. przy budowie Messner Mountain Museum Coronas na górze Kronplatz we Włoszech (fotografia 5b).

Poziome panele osiągały wymiary do 2,70 m x 5,60 m przy grubości 30 mm, natomiast pionowe szerokość 2,30 m i wysokość do 8,20 m przy grubości 20 mm [2].



Fot. 5. Przykłady zastosowania płyt ze zbrojeniem tekstylnym: a) fasada budynku [23]; b) zakrzywiona fasada Messner Mountain Museum Coronas na górze Kronplatz we Włoszech [2]

Photo 5. Examples of application of textile reinforced panels: a) facade of building [23]; b) curved facades of Messner Mountain Museum Coronas on the Kronplatz, Italy [2]

Oprócz typowych płyt fasadowych z betonu zbrojonego siatkami tekstylnymi są realizowane również zewnętrzne warstwy paneli wielowarstwowych typu „sandwich”. Takie elementy są wykonywane w rozmiarach do 3,6 x 6,0 m przy grubości panelu 30 mm. Grubość materiału wypełniającego wynosi 12 – 25 cm, zbrojenie łączące warstwę nośną i zewnętrzną jest wykonane również jako trójwymiarowe zbrojenie tekstylne. Dzięki temu w panelach wielowarstwowych nie występują mostki termiczne.

W przypadku elementów fasadowych największe znaczenie ma duża redukcja ich ciężaru w porównaniu z płytami ze zbrojeniem stalowym, co wpływa istotnie na koszt transportu i montażu. Z tych powodów są one obecnie najczęstszym przykładem zastosowania betonu zbrojonego siatkami tekstylnymi w budownictwie. Dodatkowymi zaletami takich płyt jest również zwiększona trwałość, odporność na korozję



Fot. 4. Przykłady przekryć powłokowych: a) pawilon w Aachen [5]; b) pawilon w Kahla [5];
Photo 4. Examples of roofing structures: a) pavilion in Aachen [5]; b) pavilion in Kahla [5];

zbrojenia pomimo zmniejszonej grubości otuliny oraz możliwość dowolnego kształtowania geometrii płyt.

Inne zastosowanie. Zbrojenie tekstylne zaczyna być wykorzystywane również do produkcji innych betonowych elementów nośnych. Na Uniwersytecie w Wiedniu zaproponowano konstrukcję płytową złożoną z prefabrykowanych elementów zbrojonych jedynie siatkami tekstylnymi [16]. Całkowita planowana szerokość elementów płytowych wynosi 2,4 m, przy wysokości 30 cm i grubości dolnej oraz górnej półki 3 cm. Problemem w tych elementach określono zjawisko tzw. spallingu, czyli odrywania się otuliny od zbrojenia.

Beton tekstylny może być także stosowany jako szalunek tracony [23], np. belek, który jednocześnie pełni funkcję zbrojenia na ścinanie [29]. Siatki tekstylne ze zintegrowanymi czujnikami światłowodowymi zostały również zaproponowane jako sposób monitoringu konstrukcji [6, 7, 13]. Obecnie jest opracowywana również technologia sprężania elementów betonowych zbrojonych siatkami z włókien tekstylnych. Pierwsze próby podjęto na Uniwersytecie w Stuttgarcie w Niemczech w 2003 r. [22]. Płyty o wymiarach 1 x 1 x 10 mm zbrojone siatkami z włókien szklanych i węglowych sprężono dwukierunkowo przez zastosowanie czterdziestu siłowników. Pozytywny wpływ sprężenia na zarysowanie oraz zakres pracy sprężystej elementów został potwierdzony. Technologia okazała się jednak zbyt wymagająca, żeby mogła być stosowana w warunkach innych niż laboratoryjne. Od 2016 r. trwają prace nad tzw. chemicznym sprężaniem cienkich płyt betonowych, ze zbrojeniem z siatek węglowych, za pomocą ekspansywnych dodatków do betonu. Wykazano pozytywny wpływ takiego sprężenia na moment rysujący płyt (wzrost o 50%) oraz na ugięcie przy zarysowaniu (wzrost o przeszło 110%) [32], a także lepszą przyczepność zbrojenia do betonu w elementach chemicznie sprężonych [33]. W Polsce dotychczas nie stosowano zbrojenia tekstylnego w konstrukcjach, a jedyne badania dotyczące tej tematyki zrealizowano

na Politechnice Śląskiej, gdzie przebadano cienkie płyty betonowe zbrojone różnego rodzaju tekstyliami i ich zarysowanie pod obciążeniem powierzchniowym [14].

Normy i zalecenia dotyczące betonów tekstylnych

Poszerzenie obszaru zastosowania betonu ze zbrojeniem tekstylnym wiąże się z koniecznością opracowania norm i standardów, które pozwoliłyby inżynierom na projektowanie takich elementów. Międzynarodowe normy (USA, fib, Kanada, Szwajcaria) przeznaczone do projektowania zbrojenia kompozytowego FRP oraz fibrobetonu nie są w pełni odpowiednie do betonu tekstylnego ze względu na jego opisaną wcześniej charakterystykę geometryczną i materiałową.

Kilka modeli inżynierskich dotyczących betonu ze zbrojeniem tekstylnym zamieszczono w literaturze niemieckiej [17, 20]. Przykładową procedurę, z zastosowaniem tzw. modelu tension stiffening, opracowano w USA [19]. Komitet RILEM TC-232 zaproponował ujednoczoną metodę badania betonu tekstylnego w teście jednoosiowego rozciągania [24]. Nad wytycznymi pracuje również komitet 549 American Concrete Institute „Thin Reinforced Cementitious Products and Ferrocement” [1]. Opracowania dotyczące mechaniki betonu ze zbrojeniem tekstylnym można znaleźć w [21, 28]. Pomimo istnienia tych materiałów, brak ujednoczonych norm i wytycznych odczuwalny jest przez inżynierów we wszystkich krajach.

* * *

Beton zbrojony siatkami tekstylnymi charakteryzuje się niewielką grubością otuliny i dużą trwałością. W przypadku tego typu betonu wciąż prowadzone są szczegółowe badania, przede wszystkim dotyczące trwałości i zachowania się elementów w czasie.

Literatura

[1] A [1] ACI. n.d. „ACI 549. ZR: Guide for the Design of Thin Reinforced Cementitious Composites.” American Concrete Institute. W przygotowaniu.
[2] Beton.org. 2019. „Hauchdünne Schalen Aus Textilbeton: Messner Mountain Museum Coronas Auf Dem Kronplatz.” Dostęp 08.03.2019.

<https://www.beton.org/inspiration/architektur/objekt-details/messner-mountain-museum-corones-auf-dem-kronplatz/>.

- [3] Billington David, Maria Moreyra Garlock. 2010. „Structural Art and the Example of Félix Candela.” *ASCE Journal of Structural Engineering*. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0000144.
[4] Deutsches Institut für Bautechnik. 2017. „Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-71.3-39.”
[5] Ehlig Daniel, Frank Schladitz, Michael Frenzel, Manfred Curbach. 2012. „Textilbeton: Ausgeführte Projekte Im Überblick.” *Beton- und Stahlbetonbau* 107 (11): 777 – 85. DOI: 10.1002/best.201200034.
[6] Goldfeld Yiska, Oded Rabinovitch, Barak Fishbain, Till Quadflieg, Thomas Gries. 2015. „Sensory Carbon Fiber Based Textile-Reinforced Concrete for Smart Structures.” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. DOI: 10.1177/1045389X15571385.
[7] Górski Marcin, Rafał Krzywoń, Szymon Dawczyński, Leszek Szojda. 2016. „Laminat z włókna węglowego jakos ensortekstylne – badania zmian oporności.” *Materiały Budowlane* 1 (8): 146–47. DOI: 10.15199/33.2016.08.44.
[8] Hack Norman, Willi Lauer, Fabio Gramazio, Matthias Kohler. 2015. „Mesh Mould: Robotically Fabricated Metal Meshes as Concrete Formwork and Reinforcement.” *Ferro-11: Proceedings of the 11th International Symposium on Ferrocement, 1–13. Aachen, Germany. RILEM*.
[9] Hegger Josef, Claus Goralski, Christian Kulas. 2011. „Schlanke Fußgängerbrücke Aus Textilbeton.” *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2): 64–71. DOI: 10.1002/best.201000081.
[10] Hegger Josef, Christian Kulas, Michael Raupach, Till Büttner. 2011. „Tragverhalten Und Dauerhaftigkeit Einer Schlanke Textilbetonbrücke.” *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2): 72–80. DOI: 10.1002/best.201000082.
[11] Hegger Josef, Hartwig Schneider, Christian Kulas, Christian Schätzke. 2009. „Dünnwandige, Großformatige Fassadenelemente Aus Textilbeton.” *4th Colloquium on Textile Reinforced Structures*, 541–52.
[12] Helbig Thorsten, Sergej Rempel, Kay Unterer, Christian Kulas, Josef Hegger. 2016. „Fuß- Und Radwegbrücke Aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen.” *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (10): 676–85. DOI: 10.1002/best.201600058.
[13] Käseberg Stefan, M. Schaller, Klaus Holschemacher. 2012. „CFRP Systems with Embedded FBG for Structural Monitoring and Retrofitting.” *6th European Workshop on Structural Health Monitoring*.
[14] Kotala Bernard, Marek Węglorz. 2015. „Laboratory tests of thin-walled, textile reinforced concrete plates and re-columns strengthened with textile fabrics”. *Architecture Civil Engineering Environment* 2015 (2): 53 – 60.
[15] Koutas Lampros, Zoi Tetta, Dionysios Bournas, Thanasis Triantafyllou. 2019. „Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review.” *Journal of Composites for Construction* 23 (1): 1–20. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000882.



ARBOCEL® LIGNOCEL®

Idee prosto z natury

- Mniejszy spływ płytek (np. kleje)
- Wewnętrzne mikrobrojenie (np. tynki, farby)
- Mniejszy skurcz (np. szpachle)
- Redukcja kosztów formulacji (np. systemy dociepleń)
- Rozwiązania bezpyłowe (np. kleje do płytek)



RETENMAIER POLSKA
SP. Z O.O.



Włókna prosto
z natury
A Member of the IRS Group

www.jrs.pl

ul. Bitwy Warszawskiej 1920r. 7b, 02-366 Warszawa
tel. centrala: (22) 608 51 00, fax: (22) 608 51 51

[16] Kromoser Benjamin, Philipp Preinstorfer, Johann Kollegger. 2018. „Building Lightweight Structures with Carbon-Fiber-Reinforced Polymer-Reinforced Ultra-High-Performance Concrete: Research Approach, Construction Materials, and Conceptual Design of Three Building Components.” *Structural Concrete*, October 2017: 1–15. DOI: 10.1002/suco. 201700225.

[17] Kulas Christian. 2013. *Zum Tragverhalten Getränkter Textiler Bewehrungselemente Für Betonbauteile*. Aachen: Lehrstuhl und Institut für Massivbau.

[18] Michler Harald. 2013. „Segmentbrücke Aus Textilbewehrtem Beton – Rottachsteg Kempten Im Allgäu.” *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (5): 325–34. DOI:10.1002/best.201300023.

[19] Mobasher Barzin. 2011. „Development of Design Procedures for Flexural Applications of Textile Composite Systems Based on Tension Stiffening Models.” *6th Colloquium on Textile Reinforced Structures*.

[20] Molter Matthias. 2005. *Zum Tragverhalten von Textilbewehrtem Beton*. Aachen: Lehrstuhl und Institut für Massivbau.

[21] Peled Alva, Barzin Mobasher, Arnon Bentur. 2017. *Textile Reinforced Concrete*. CRC Press, Taylor & Francis Group.

[22] Reinhardt Hans, Markus Krüger, Christian Große. 2003. „Concrete Prestressed with Textile

Fabric.” *Journal of Advanced Concrete Technology* 1 (3): 231–39. DOI: 10.3151/jact.1.231.

[23] Rempel Sergej, Norbert Will, Josef Hegger, Patrick Beul. 2015. „Filigrane Bauwerke Aus Textilbeton: Leistungsfähigkeit Und Anwendungspotenzial Des Innovativen Verbundwerkstoffs.” *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (S1): 83–93. DOI: 10.1002/best.201400111.

[24] RILEM TC 232-TDT. 2016. „Recommendation of RILEM TC 232-TDT: Test Methods and Design of Textile Reinforced Concrete: Uniaxial-Tensile Test.” *Materials and Structures* 49 (12): 4923–27. DOI: 10.1617/s11527-016-0839-z.

[25] Scholzen Alexander, Rostislav Chudoba, Josef Hegger. 2015. „Thin-Walled Shell Structures Made of Textile-Reinforced Concrete: Part I: Structural Design and Construction.” *Structural Concrete* 16 (1): 106 – 14. DOI: 10.1002/suco.201300071.

[26] Scholzen Alexander, Rostislav Chudoba, Josef Hegger, Norbert Will. 2016. „Leichte Dachschalen Aus Carbonbeton: Fertigteilproduktion, Experimentelle Untersuchungen Und Anwendungspotenzial.” *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (10): 663–75. DOI: 10.1002/best. 201600030.

[27] Solidian GmbH. 2019b. „Verkleidung Der Brückenpylone in 320 m Höhe.” Dostęp 08.03.2019. <https://www.solidian.com/referenzen/details/bosporus-bruecke/>.

[28] Triantafyllou Thanasis. 2016. *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*. Woodhead Publishing.

[29] Verbruggen S., Remy O., Wastiels J., Tymsmans T. 2013. „Stay-in-Place Formwork of TRC Designed as Shear Reinforcement for Concrete Beams.” *Advances in Materials Science and Engineering*: 1–9. DOI: 10.1155/2013/648943.

[30] Walther Tobias, Frank Schladitz, Manfred Curbach. 2014. „Textilbetonherstellung Im Gießverfahren Mit Hilfe von Abstandhaltern.” *Beton- und Stahlbetonbau* 109 (3): 216–22. DOI:10.1002/best.201300080.

[31] Williams Portal Natalie. 2015. *Usability of Textile Reinforced Concrete: Structural Performance, Durability and Sustainability*. Gothenburg, Sweden: Division of Structural Engineering & Concrete Structures.

[32] Zdanowicz Katarzyna, Steffen Marx. 2018. „Thin Concrete Panels Prestressed with Carbon Textile Reinforcement: Flexural Testing.” *5th International Fib Congress „Smarter – Better – Stronger”*. Melbourne, Australia.

[33] Zdanowicz Katarzyna, Boso Schmidt, Hubert Naraniecki, Steffen Marx. 2019. „Bond Behaviour of Chemically Prestressed Textile Reinforced Concrete.” *IABSE Symposium 2019*. Guimaraes, Portugal.

Przyjęto do druku: 15.05.2019 r.