

prof. dr hab. inż. Anna Siemińska-Lewandowska
prof. dr hab. inż. Elżbieta Szmigiera
prof. dr hab. inż. Piotr Woyciechowski
Politechnika Warszawska

Beton ze zbrojeniem rozproszonym jako materiał konstrukcyjny segmentów obudowy tunelu metra

Fiber reinforced concrete (FRC) as a structural material for segmental TBMs tunnel linings

Streszczenie

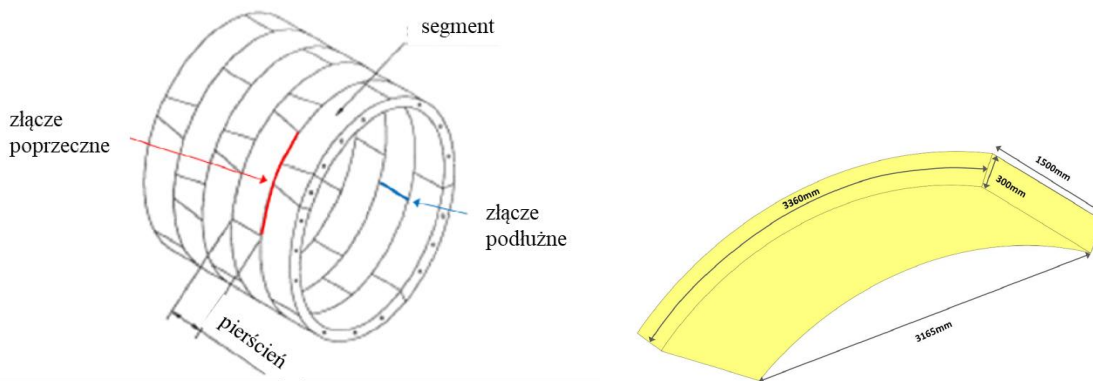
Fibrobeton ze zbrojeniem rozproszonym stalowym lub hybrydowym (stalowym i polipropylenowym) od dawna jest stosowany na świecie do produkcji prefabrykowanych segmentów obudowy tuneli, w tym tuneli metra, obejmując także rozwiązania, w których włókna w pełni zastępują zbrojenie ciągłe. Celem niniejszego artykułu jest ukazanie zalet i uwarunkowań formalnych, które uzasadniają zastosowanie takiego rozwiązania w realizacji kolejnych etapów rozbudowy sieci warszawskiego metra i podobnych inwestycji tunelowych w Polsce. Rozważania oparte są na własnych doświadczeniach autorów z badań laboratoryjnych, badań w skali technicznej i kilkudziesięcioletniej działalności eksperckiej związanej z powstawaniem obiektów metra warszawskiego.

Abstract

Steel or hybrid fiber reinforced concrete has been used in the world for a long time in the production of precast segments of tunnel linings, including metro tunnels, also in cases when fibers fully replaced continuous reinforcement. The aim of this article is to show the advantages and formal conditions that justify the use of such a solution in subsequent stages of the development of the Warsaw metro network and similar tunnels investments in Poland. The considerations are based on the authors' own experience from laboratory tests, technical scale tests and several decades of expert activity related to the construction of Warsaw metro facilities.

1. Prefabrykowane segmenty obudowy tunelu metra – charakterystyka ogólna

W przypadku tuneli drążonych tarczami zmechanizowanymi tzw. TBM, obudowę tunelu stanowią prefabrykowane segmenty tworzące w miarę postępu drążenia kolejne pierścienie obudowy stałej tunelu – rys. 1



Rys.1. Schemat segmentowej, żelbetowej obudowy tunelu szlakowego II linii metra w Warszawie [1]

Technologia drążenia tuneli wynika z typu zastosowanej tarczy. W realiach Polski, w tym na II linii metra stosuje się obecnie tarcze zmechanizowane typu EPB, czyli wyrównywanych ciśnień gruntowych. Tunel powstaje w kolejno powtarzających się fazach – urabianie gruntu głowicą skrawającą, przesuw tarczy – siłowniki hydrauliczne odpychają się od już ułożonej segmentowej obudowy tunelu, układanie kolejnego pierścienia obudowy składającej się z segmentów, za pomocą urządzenia nazywanego erektorem, iniekcja uszczelniająca pustki za obudową. W tym rodzaju tarcz stateczność przodka tj. zrównoważenie zewnętrznego parcia gruntu i ciśnienia wody gruntowej zapewnia urobiony przez głowicę skrawającą grunt, wypełniający komorę roboczą. Jest ona oddzielona od reszty tarczy i tunelu bardzo masywną ścianą ciśnieniową. W niej osadzony jest przenośnik ślimakowy z cylindryczną, szczelną obudową. Za pomocą tego przenośnika urobiony grunt jest usuwany z komory roboczej i zrzucany na kołowe lub szynowe środki transportu albo na przenośnik taśmowy, którymi ewakuowany jest z tunelu.

Rozwiązanie klasyczne konstrukcji obudowy, stosowane m.in. na I i II linii metra w Warszawie, zakłada wykonanie segmentów w konstrukcji żelbetowej. Przykładowe dane geometryczne i materiałowe dla jednego z tuneli metra warszawskiego o średnicy zewnętrznej pierścienia obudowy 6,0 m, i średnicy tarczy TBM 6,3 m, składającego się z 5 segmentów i klucza, są następujące:

- grubość segmentu $d=300$ mm;
- długość segmentu $b=1500$ mm;
- promień zewnętrzny $R_e= 3000$ mm;
- promień wewnętrzny $R_i= 2700$ mm;
- beton klasy C40/50 użytkowany w klasach ekspozycji XC (ewentualnie innych zależnie od specyfiki warunków gruntowych);
- wytrzymałość rozformowania związana ze specyfiką produkcji prefabrykatu - 12 MPa;

- właściwości mieszanki betonowej: $w/c = 0,4$; maksymalna średnica ziaren kruszywa 16 mm; konsystencja mieszanki betonowej wg metody opadu stożka S4;
- zbrojenie prętami żebrowanymi ze stali B500B o średnicach od 8 do 32 mm.

W składzie betonu przewiduje się zazwyczaj także obecność włókien polipropylenowych, w ilości wystarczającej do pełnienia funkcji antyśpalinowej, na przykład - 1,5 kg/m³.

W projekcie żelbetowej obudowy segmentowej rozpatruje się następujące fazy jej pracy:

- podczas produkcji - wyjęcie gotowego segmentu z formy, ułożenie na płaskim podłożu, składowanie tymczasowe i długoterminowe oraz transport na miejsce wbudowania;
- podczas drażenia tunelu - instalacja poszczególnych segmentów w pierścieniu obudowy, przesuw tarczy – nacisk dźwigników hydraulicznych na obudowę segmentową w kierunku podłużnym, wykonanie iniekcji uszczelniającej za obudową;
- po wykonaniu obudowy i podczas eksploatacji - obciążenie obudowy parciem gruntu i wody.

Alternatywą wobec rozwiązania klasycznego – żelbetowego, jest zastosowanie SFRC (Steel Fibre Reinforced Concrete), polegające na częściowym lub całkowitym zastąpieniu zbrojenia ciągłego segmentów – zbrojeniem rozproszonym, najczęściej w formie hybrydowej, tj. włókna stalowe konstrukcyjne i włókna z tworzywa sztucznego poprawiające bezpieczeństwo pożarowe obiektu i redukujące wczesny skurcz betonu.

2. Stosowanie SFRC w realizacjach tuneli na świecie

Beton zbrojony włóknami stalowymi (SFRC) stosowany jest do produkcji segmentowej obudowy stałej tuneli drażonych tarczą TBM od ponad 20 lat [2]. Pierwsze wykorzystanie SFRC to lata 80-te i 90-te we Włoszech i w Wielkiej Brytanii. W Londynie już w 1993r wybudowano tunel kolejowy o średnicy 5,7 m, zastępując w segmentach żelbetowych o grubości 0,22 m zbrojenie tradycyjne włóknami stalowymi, dozując 30 kg włókien stalowych na 1 m³ betonu. Podobnie we Włoszech, w Neapolu, w tunelu metra o średnicy 5,8 m i grubości obudowy 0,30 m, segmenty wykonano w technologii SFRC, stosując 40 kg włókien stalowych na 1 m³ betonu [3].

Dynamiczny rozwój tej technologii w zastosowaniu do obudowy segmentowej rozpoczął się w latach 2007 - 2010 i trwa do chwili obecnej. W raporcie Grupy Roboczej Nr 2 ITA-AITES [2] można znaleźć przykłady 73 wykonanych już tuneli, w których tradycyjne zbrojenie częściowo lub całkowicie zastąpiono włóknami stalowymi. Są to tak duże obiekty, jak tunele metra w Barcelonie, Londynie, Madrycie, Singapurze oraz na czterech liniach metra w Doha w Katarze. Inne prestiżowe realizacje to tunele kolejowe, w tym brytyjskie: Channel Tunnel Rail Link (CTRL) czy Crossrail oraz projektowany obecnie Brenner Base Tunnel (najdłuższy tunel na świecie o długości 64 km). Średnice tych tuneli wynoszą od 2,7 m (tunele wodociągowe) do 13,4 m (tunel kolejowy w Japonii).

Pośród 73 zrealizowanych tuneli, w 71% z nich zastosowano tylko zbrojenie z włókien stalowych. Dominują wśród nich tunele o średnicach 4 ÷ 8 m (51%). Tunele o średnicach poniżej 4 m stanowią 36%, natomiast tunele o średnicach powyżej 8 m – 13%. W opracowaniu [2] wskazano, że w realizacji obudów 16 tuneli całkowicie wyeliminowano zbrojenie z prętów, wykorzystując elementy jedynie ze zbrojeniem rozproszonym.

Obudowa segmentowa wykonana w technologii betonu z włóknami stalowymi, w porównaniu z tradycyjną technologią żelbetową, ma wiele zalet, z których najważniejsze to:

- Zdolność do absorpcji energii i plastycznej deformacji bez nagłego pęknięcia;
- Korzystne zachowanie przekroju po zarysowaniu, rozumiane jako zachowanie znaczącej sztywności przekroju mimo zarysowania. Jest to wynikiem zdolności włókien stalowych do mostkowania rys i prowadzi do ograniczenia zniszczenia, m.in. ze względu na uderzenie. Ograniczenie zarysowania poprawia szczelność obciążonego betonu, co zwiększa trwałość elementu;
- Zwiększenie wytrzymałości na obciążenia dynamiczne;
- Łatwiejsza i szybsza produkcja segmentów, ze względu na wyeliminowanie czasu potrzebnego do wykonania i montażu prętów zakrzywionych w planie; potrzebna powierzchnia magazynowania jest mniejsza ze względu na brak konieczności składowania gotowych szkieletów zbrojeniowych;
- Rozkład włókien stalowych jest równomierny w przestrzeni segmentu. Brak prętów eliminuje otulinę, która w tradycyjnym rozwiązaniu musi być stosunkowo gruba, aby spełnić wymagania ochrony przeciwpożarowej prętów, a jako strefa niezbrojona często ulega zarysowaniu;
- Poprawa trwałości segmentu ze względu na ograniczenie znaczenia zjawiska korozji, która w przypadku tradycyjnego zbrojenia jest problemem;
- Ograniczenie zjawiska spallingu i poprawa wytrzymałości ogniowej obudowy segmentowej tunelu;
- Rozwiązanie problemu prądów błędzących.

3. Koncepcja wykorzystania SFRC w Metrze Warszawskim

Rozwiązania techniczne, w tym materiałowe stosowane w budowie tuneli metra w Polsce, podlegają wymogom sformułowanym w *Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 16 maja 2023 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane metra i ich usytuowanie* [4] w §2 p. 30. W dokumencie tym podano określenie tunelu jako budowli „...między stacjami metra, stanowiącej szlak metra lub część szlaku metra obudowanego całkowicie lub częściowo, jeżeli suma powierzchni otworów nie przekracza 20% całkowitej powierzchni obudowy”. W Dziale III Rozporządzenia podane są Ogólne wymagania techniczne dla obiektów budowlanych metra. Paragraf 6.1 oraz przywołane w nim załączniki zawierają wymagania jakie powinny spełniać obiekty budowlane metra, w tym tunele, w zakresie, między innymi drgań, prądów błędzących, materiałów, w tym prętów zbrojeniowych, betonów cementowych, grubości otuliny zbrojenia głównego, technologii układania betonu, odlewów żeliwnych. W Paragrafie 7.1 stwierdza się, że „Konstrukcje obiektów budowlanych metra projektuje się i buduje z materiałów trwałych i w niewielkim stopniu ulegających korozji, takich jak beton lub żeliwo, z uwzględnieniem następujących wymagań: w elementach żelbetowych stosuje się zbrojenie z uwzględnieniem aktualnego poziomu wiedzy i techniki, w tym wymagania norm PN-EN 1992-2 [5,6], PN-EN 14889-1 i PN-EN 14889-2 [8]...”

Natomiast w Załączniku nr 1 do Rozporządzenia, zawarte są wymagania w zakresie zapewnienia bezpieczeństwa pożarowego obiektów budowlanych metra. Oprócz zapisanych w załączniku ogólnych wymagań, dotyczących warunków jakie powinny spełniać tunele w przypadku wystąpienia pożaru, sformułowane są również wymagania szczegółowe, w tym m.in.: „...tunele i stacje metra w stanie surowym

wykonuje się z materiałów klasy reakcji na ogień A1; klasa odporności ogniowej konstrukcji tunelu i podziemnych stacji metra, z uwagi na kryterium nośności ogniowej, jest nie niższa niż R 120.”

Z powyższych przepisów wynika, że beton ze zbrojeniem rozproszonym może być rozważany jako materiał konstrukcyjny do obudowy tuneli metra.

4. Uwarunkowania normowe projektowania i produkcji obudowy tunelu z fibrobetonu

W dotychczasowych regulacjach normowych z zakresu projektowania konstrukcji z betonu nie było zaleceń dotyczących specyfiki fibrobetonu, jako materiału konstrukcyjnego. Alternatywą w tym zakresie mógł być w pewnym stopniu Model Code [9]. Najnowsza generacja Eurokodów uwzględnia pewne rodzaje stosowanych od dawna materiałów konstrukcyjnych, takich jak beton ze zbrojeniem niemetalicznym FRP, czy właśnie fibrobeton.

Konstrukcjom wykonanym z betonu zbrojonego włóknami stalowymi poświęcony jest Załącznik L w nowej edycji EC2 [5]. Zalecenia obejmują konstrukcje wykonane z fibrobetonu, zarówno bez dodatkowego zbrojenia prętami stalowymi, jak i z dodatkowym zbrojeniem. Kluczową właściwością włóknobetonu jest jego resztkowa wytrzymałość po zarysowaniu. Ta cecha, zapewniona przez zbrojenie z włókien, stanowi podstawę projektowania konstrukcji z fibrobetonu według Stanu Granicznego Nośności i Stanu Granicznego Użytkowości. Sklasyfikowanie wytrzymałości włóknobetonu po zarysowaniu wymaga określenia wartości charakterystycznych resztkowej wytrzymałości na zginanie f_{R1k} , istotnej w SGU oraz f_{R3k} , niezbędnej przy ocenie SGN. Reasumując, zgodnie z punktem L.5.1 w [5], klasy wytrzymałości SC (Strenght Classes), określa się na podstawie dwóch parametrów: f_{R1k} ($f_{R1k} \geq SC$) oraz klas ciągliwości (Ductility Classes), oznaczonych literami od a do e, wyrażającymi stosunek f_{R3k} / f_{R1k} , w odpowiednich granicach wartości (tab. L.2 w [5]). Zarówno klasa wytrzymałości SC, jak i stosunek f_{R3k} / f_{R1k} wymaga sprecyzowania w procesie projektowania konstrukcji.

Właściwości sprężyste i wytrzymałość na ściskanie betonu ze stalowym zbrojeniem rozproszonym nie różnią się znacząco, w stosunku do betonu bez włókien. Zależności te mogą natomiast ulec zmianie, w przypadku wysokiego udziału włókien. W Załączniku L. do [5] rekomenduje się przyjęcie wartości modułu sprężystości, współczynnika Poissona oraz współczynnika rozszerzalności cieplnej, jak dla betonu bez włókien, zaznaczając jednocześnie, że w przypadku określania tych cech fibrobetonu, można uzyskać znacznie większy zakres zmienności.

W przypadku projektowania konstrukcji wykonanych z fibrobetonu, określenie wielkości otuliny ze względu na trwałość $c_{min,dur}$ jest wymagane tylko wtedy, gdy w elemencie znajduje się także zbrojenia zwykłe. W celu uniknięcia koncentracji włókien, zaleca się, by minimalna otulina prętów zbrojenia wynosiła $c_{min} = 20$ mm. Klasy ekspozycji betonu segmentów wykonanych z fibrobetonu są ustalane tak samo jak w przypadku elementów żelbetowych.

W tablicy 1 zamieszczono przykładowe sformułowanie wymagań co do betonu konstrukcyjnego ze zbrojeniem rozproszonym, zastosowane w analizach projektowych, produkcji testowej i badaniach segmentów obudowy tunelu metra w Warszawie.

Tab. 1 Przykładowe założone właściwości fibrobetonu do segmentów obudowy

Charakterystyka materiałowa	Zależność wg EC2 i MC 2010	28 dni [MPa]	7 dni [MPa]
Charakterystyczna wytrzymałość na ściskanie	f_{ck}	50	31
Obliczeniowa wytrzymałość na ściskanie, ULS	$f_{cd} = f_{ck} \alpha_{cc} / \gamma_c$	28.3	20.6
Obliczeniowa wytrzymałość na ściskanie, ALS		35.4	25.8
Charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie osiowe (5% kwantyl)	$f_{ctk,0.05} = 0.7 f_{ctm}$	2.9	1.9
Charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu	$f_{ct,sp} = f_{ctk,0.05} / 0.9$	3.2	2.75
Obliczeniowa wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu	$f_{ctd,sp} = f_{ctk,0.05} / \gamma_c$	1.93	1.83
Wytrzymałość resztkowa wg CMOD ₁	f_{R1k}	5.0	2.5
Wytrzymałość resztkowa wg CMOD ₃	f_{R3k}	5.5	2.5
Wytrzymałość resztkowa w SGU	$f_{Fts} = 0.45 f_{R1}$	2.25	1.12
Obliczeniowa wytrzymałość resztkowa w SGN	$f_{Ftu} = f_{R3k} / 3 \gamma_c$	1.2	0.5

Biorąc pod uwagę powyższe wymagania oraz technologię produkcji segmentów, w praktyce projektowej formułowane są zazwyczaj dodatkowe wymagania materiałowe, na przykład takie, jak poniżej:

- maksymalne ziarno kruszywa D_{max} - 16mm;
- klasa zawartości chlorków - Cl 0.10;
- rodzaj cementu – wynikający z klas ekspozycji, tradycyjnie - CEM I 42,5, ale inne rodzaje także są możliwe;
- rodzaj kruszywa – kruszywo łamane, na przykład grys granitowy, z uwagi na wysoką wymaganą wytrzymałość na ściskanie;
- rodzaj włókien – stalowe, na przykład 80/0.60 i polipropylenowe, na przykład o długości 12 mm;
- konsystencja - opad stożka S2, z uwagi na zapobieganie segregacji włókien.

Zawartość włókien stalowych w betonie SFRC segmentów wynika przede wszystkim z konieczności spełnienia założonych wartości wytrzymałości resztkowych i najczęściej są to zawartości 40-60kg/m³. Zawartość włókien polipropylenowych wynika z ich funkcji poprawy bezpieczeństwa pożarowego, związanej z ograniczeniem zjawiska spallingu i wynosi co najmniej 1,5kg/m³. Warto zauważyć, że z praktyki wiadomo, iż w przypadku rozproszonego zbrojenia hybrydowego (włókna stalowe i polipropylenowe) do skutecznego działania antyspallingowego wystarczają mniejsze dozowania włókien PP, niż w przypadku elementów żelbetowych lub niezbrojonych. Wynika to ze wspomagającej włókna PP w tym zakresie roli włókien stalowych.

Technologia produkcji prefabrykowanych segmentów jest najczęściej zorganizowana w sposób typowy dla linii przedmiotowo-potokowych. Formy przemieszczają się w określonym rytmie przez kolejne stanowiska przygotowania formy, zbrojenia i betonowania oraz zagęszczania. Z reguły, w produkcji stosowane jest dojrzewanie przyspieszone w warunkach obróbki cieplnej w tunelu potokowym lub w stacjonarnej komorze. Kluczowym wyróżnikiem tej produkcji są specjalistyczne formy o wyjątkowo wysokich wymaganiach w zakresie tolerancji wymiarowych prefabrykatu oraz stanowisko zagęszczania, z wykorzystaniem wibrowania objętościowego, umożliwiające zachowanie jednorodnego rozmieszczenia włókien w betonowej

matrycy. Ważnym elementem technologii produkcji jest odpowiednie zorganizowanie dostaw mieszanki betonowej z uwzględnieniem zachowania wymaganej konsystencji w okresie transportu, betonowania i zagęszczania. Jest to o tyle kłopotliwe, że wysoka zawartość rozproszonego zbrojenia hybrydowego pogarsza urabialność mieszanki i sprzyja szybszej utracie konsystencji. Koniecznym elementem kontroli dostaw, oprócz rutynowego pobierania próbek do kontroli cech mechanicznych, jest także kontrola jednorodności mieszanki z włóknami, w tym pomiar zawartości włókien w porcjach mieszanki pobranych na różnych etapach procesu technologicznego, który jednak dotyczy tylko włókien stalowych, z uwagi na możliwości techniczne metod kontrolnych. Zastąpienie prętów zbrojeniowych hybrydowym zbrojeniem rozproszonym okazuje się być także zasadne ekonomicznie, jak dowodzi zestawienie wyników przeprowadzonej przez autorów analizy kosztów jednego segmentu obudowy, w wariacie żelbetowym i fibrobetonowym (tab. 2), według cen na rok 2020. Łączny koszt segmentu fibrobetonowego w analizowanym przypadku jest o ok. 11% niższy niż żelbetowego.

Tab. 2 Koszty jednego segmentu obudowy w wariacie żelbetowym i fibrobetonowym

Składowe kosztów	Wariant żelbetowy	Wariant ze zbrojeniem rozproszonym
Koszt zbrojenia	3448,53 zł	2655,37 zł
Koszt mieszanki betonowej	2254,00 zł	2415,00 zł
Łączny koszt	5702,53 zł	5070,37 zł

W tym kontekście warto także zauważyć, że zamiana zbrojenia tradycyjnego na stalowe zbrojenie rozproszone powoduje zmniejszenie sumarycznego śladu węglowego materiałów do wytworzenia obudowy, które dla analizowanego w tab. 2 przypadku oszacowano również na ok. 11%.

5. Właściwości SFRC do wytwarzania segmentów – badania własne i analizy

Analiza literatury przedmiotu wskazuje, że w kontekście stosowania SFRC jako materiału konstrukcyjnego segmentów obudowy tunelu metra, pojawiają się pewne wątpliwości i problemy, które wynikają z faktu, że elementy SFRC, jakkolwiek stosowane od dziesięcioleci, nie są dostatecznie dobrze znane w środowisku inżynierskim. Do głównych zagadnień budzących pytania i wątpliwości należą:

- urabialność – weryfikacja i zachowanie w czasie, odporność na segregację mieszanki betonowej z włóknami,
- cechy mechaniczne fibrobetonu – wpływ włókien na moduł sprężystości, relacje wytrzymałości kostka/walec (różnice między betonem zwykłym i SFRC),
- odporność ogniowa fibrobetonu,
- aspekty trwałościowe - odporność włókien na korozję,
- podatność fibrobetonu na przewodzenie prądów błądzących.

Autorzy, w większości z tych zagadnień mają doświadczenia wynikające zarówno z własnych badań laboratoryjnych, jak i z badań, obserwacji i analiz w skali technicznej, wykorzystane w przedstawionych poniżej rozważaniach.

Urabialność

Autorzy artykułu uczestniczyli w badaniach nad urabialnością mieszanki z włóknami bezpośrednio na linii produkcji segmentów. Kontroli urabialności (konsystencji)

i zawartości włókien stalowych poddawano porcje mieszanki pobierane bezpośrednio z betonowozu, podczas formowania elementów, tj. po około 20 minutach od dodania wody do mieszanki betonowej w wytwórni betonu towarowego.

W tabeli 3 zestawiono wyniki normowych pomiarów opadu stożka i masowej zawartości włókien stalowych (włókna o długości 80mm i średnicy 0,6 mm) w mieszance z kolejnych dostaw (betonowozów) z kilku wybranych dni produkcji i porównano z wymaganiami.

Tabela 3 Wyniki oceny urabialności i odporności na segregację betonu z włóknami

Badana cecha	Wyniki badań	Wymaganie	Ocena wyników
Mieszanka betonowa z włóknami 80/60			
Opad stożka, mm	60; 70; 40; 40; 30; 40; 30; 40	S2 tj. 50-90 +/-20	zgodne z wymaganiami
Zawartość włókien stalowych, kg/m ³	44; 41, 44; 43	40	zgodne z wymaganiami

Można zauważyć, że zawartość włókien zbadana w pobranych próbkach jest zgodna z wymaganiem, z nieznacznym (do 10%) przekroczeniem zawartości deklarowanej. W założonym czasie transportu urabialność jest utrzymywana w dolnych granicach wartości, wymaganej z uwzględnieniem dopuszczalnej zmienności wyników badania. Jest to efekt korzystny, z uwagi na odporność mieszanki na segregację na stanowisku zagęszczania wibracyjnego. Przeprowadzone badania potwierdzają, że mieszanka betonowa z włóknami może być wytwarzana i transportowana w standardowych warunkach produkcji betonu towarowego, zachowując wymagane cechy technologiczne. Kluczowym czynnikiem w tym wypadku jest czas transportu, który powinien być relatywnie krótki, zbliżony do założonego w przeprowadzonych badaniach, tj. ok. 20-25 minut.

Cechy mechaniczne

Na podstawie wyników badań, publikowanych w literaturze światowej należałoby przyjąć, że moduł sprężystości betonu z włóknami stalowymi nie odbiega znacząco od wartości dla betonu zwykłego. Jednakże, zdaniem autorów, zawartość włókien a także zastosowanie dwóch rodzajów włókien (stalowych i polipropylenowych) w mieszance, może w jakimś stopniu zaburzyć powyższe założenie. Autorzy podjęli się sprawdzenia tych wątpliwości, wykonując pilotażowe badania w Laboratorium Instytutu Inżynierii Budowlanej PW betonu, z różną zawartością włókien stalowych oraz z włóknami propylenowymi i hybrydowymi. Celem badań była weryfikacja cech mechanicznych fibrobetonów, w odniesieniu do betonu zwykłego. Wstępne wyniki badań potwierdziły wpływ dodatku włókien na wartość modułu sprężystości. W stosunku do betonu referencyjnego, bez dodatku włókien, największą wartość modułu otrzymano, w przypadku fibrobetonu z włóknami stalowymi i hybrydowymi (odpowiednio, wzrost wyniósł 13% i 16%). Spadek natomiast, zanotowano po dodaniu samych włókien polipropylenowych (około 3%), a także po trzykrotnym zwiększeniu zawartości włókien stalowych (około 1%). W drugim przypadku, powodem zmniejszenia modułu sprężystości było zapewne pogorszenie warunków urabialności mieszanki betonowej. Uzyskane wyniki badań pozwoliły także na ustalenie zależności wytrzymałości na ściskanie betonu, określonej na walcach i na kostkach. Na podstawie zawartych w tablicy 3.1, w [6] wartości obu wytrzymałości na ściskanie, można przyjąć, że relacja

wytrzymałości walcowej do kostkowej wynosi 0,8. Badania własne wykazały, że stosunek ten, w przypadku fibrobetonu różni się nieco, oscylując wokół wartości 0,85. Najniższą wartość (wynoszącą ok. 0,7) uzyskano, gdy trzykrotnie zwiększono zawartość włókien stalowych, w stosunku do składu z zawartością około 25 kg/m³. Należy jednak dodać, że również w przypadku betonu referencyjnego, stosunek dwóch analizowanych wytrzymałości, wyznaczony w badaniach, wyniósł 0,85.

Oczywiście, podane zależności uzyskano dla konkretnych składów mieszanki betonowej. Należy przypuszczać, że powyższe relacje mogą się różnić w innych przypadkach. Stąd wydaje się, że prowadząc analizy zachowania konstrukcji, wykonanych z fibrobetonu, wskazane byłoby, w miarę możliwości, wykonywanie własnych badań cech mechanicznych betonu ze zbrojeniem rozproszonym.

Odporność ogniowa

W rozdz. 3 podano wymagania związane z bezpieczeństwem pożarowym tuneli metra, z których wynika obowiązek stosowania materiałów klasy reakcji na ogień A1 i wykonania konstrukcji spełniającej kryterium nośności ogniowej nie niższej niż R 120. Autorzy uczestniczyli w badaniach ogniowych elementów wielkoskalowych z fibrobetonu przeznaczonego do wykonania segmentów obudowy tunelu, potwierdzających uzyskanie przez nie klasy odporności ogniowej R120. Ponadto, zgodnie z zapisem w PN-EN 206 [10], beton z włóknami, zgodnymi z tą normą, należy do klasy reakcji na ogień A1, bez potrzeby badań potwierdzających.

Trwałość i odporność na prądy błądzące

Zjawisko prądów błądzących występujące w podziemnych obiektach metra, związane jest głównie z funkcjonowaniem sieci trakcyjnej. Zagrożenie trwałości elementów konstrukcyjnych obudowy tunelu w wyniku oddziaływania prądów błądzących, polega na ryzyku wystąpienia korozji stali, tzn. prętów zbrojeniowych lub włókien stalowych. Generalnie, na podstawie dostępnej literatury [10,11], należy uznać, że zastąpienie zbrojenia ciągłego zbrojeniem rozproszonym jest korzystne, z punktu widzenia ochrony konstrukcji przed skutkami wystąpienia prądów błądzących. Składają się na to następujące uwarunkowania natury mechanicznej, fizycznej i chemicznej: przerwanie ciągłości zbrojenia w fibrobetonie, wyższa odporność fibrobetonu na korozję chlorkową, podobna wartość rezystancji żelbetu i fibrobetonu. Rezystancja skrośna segmentów z fibrobetonu jest nieco niższa, niż w przypadku elementów żelbetowych, ale jej wartość nie spada poniżej 250 Ω. Oznacza to, że konstrukcja z fibrobetonu spełni wymagania izolowania elektrycznego wnętrza konstrukcji od zewnętrznych pól elektrycznych – źródeł prądów błądzących.

Badania publikowane w literaturze (np. w [11]) dowodzą, że wystąpienie korozji wżerowej włókien jest obserwowane przy wyższych stężeniach chlorków (4% NaCl w stosunku do masy cementu), niż w przypadku zbrojenia z prętów stalowych (0,15-0,6% wg ACI 318 – 08 [13]). Można zatem wnioskować, że odporność fibrobetonu na korozję chemiczną jest lepsza niż żelbetu.

Trwałość korozyjna segmentów zależy w znacznym stopniu od stanu zarysowania. W przypadku braku rys w elemencie żelbetowym, inicjacja korozji zbrojenia związana jest z dotarciem frontu agresji chemicznej do powierzchni pręta. Natomiast w przypadku elementu fibrobetonowego, w którym stalowe elementy rozmieszczone są w sposób zrandomizowany, korozji najwcześniej ulegają włókna znajdujące się blisko powierzchni elementu. Proces ten jest ograniczony do płytkiej strefy przypowierzchniowej, o głębokości 1-5 mm, co nie wpływa na nośność przekroju i stanowi co najwyżej defekt estetyczny. Elementy żelbetowe zwykle pracują jako

zarysowane, co wpływa zarówno na sztywność przekroju, jak i podatność na korozję prętów. W przypadku segmentów fibrobetonowych struktura materiału, zapewniająca mostkowanie tworzących się rys przez włókna, pozwala na łatwiejszą kontrolę szerokości i propagacji rys.

6. Podsumowanie

Reasumując, zastosowanie stalowego zbrojenia rozproszonego SFRC do produkcji segmentowej obudowy tuneli drążonych tarczą zmechanizowaną ma wiele zalet i przynosi liczne korzyści, z których najistotniejsze to:

- ograniczenie zarysowania i w efekcie zwiększenie szczelności obudowy oraz poprawa trwałości,
- brak problemów z zachowaniem odpowiedniej otuliny zbrojenia tradycyjnego,
- zwiększenie wytrzymałości na obciążenia dynamiczne,
- poprawa bezpieczeństwa pożarowego obudowy, w tym eliminacja zjawiska spallingu,
- ograniczenie oddziaływania prądów błędzących.

Ponadto obecnie są krajowe regulacje prawne – norma PN-EN 1992-1-1:2024-05, która zawiera rekomendacje dotyczące projektowania konstrukcji żelbetowych ze zbrojeniem rozproszonym, w tym prefabrykatów, takich jak segmentowa obudowa tuneli tarczowych.

7. Literatura

- [1] Siemińska-Lewandowska A, Szmigiera E., Woyciechowski P., Opinia dotycząca zastosowania żelbetowych segmentów obudowy tuneli wykonanych z betonu zbrojonego włóknami stalowymi (SFRC) na budowie II linii metra w Warszawie, Politechnika Warszawska 2019 (raport niepublikowany)
- [2] Twenty Years of FRC Tunnel Segments Practice: Lessons Learnt and Proposed design Principles, ITA WG2 Report N° 16/2016 <https://about.ita-aite.org/publications/wg-publications/content/7/working-group-2-research>
- [3] Fib No. 83. Precast tunnel segments in fiber-reinforced concrete. State of the art report (162 p., ISBN 978-2-88394-123-6, October 2017)
- [4] Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 16 maja 2023 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane metra i ich usytuowanie
- [5] PN-EN 1992-1-1:2024-05 Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures
- [6] PN-EN 1992-1-1:2008 Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [7] PN-EN 1992-1-2, Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-2: Reguły ogólne - Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe
- [8] PN-EN 14889-1:2007, PN-EN 14889-2:2007 Włókna do betonu – cz. 1 i cz. 2
- [9] Model Code 2010
- [10] PN-EN 206:2014 Beton -- Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [11] Tang, Kangkang, Stray current induced corrosion of steel fiber reinforced concrete. Cement and Concrete Research. 100(10), 2017, 445-456
- [12] Sokółski W., Ochrona katodowa stali w betonie w świetle norm międzynarodowych, Przegląd Budowlany 6/2012
- [13] ACI 318-08 Building Code Requirements for Structural Concrete