

Optymalizacja zbrojenia płyt torowych włóknami stalowymi

W ostatnich dekadach dynamicznie zmienia się podejście do projektowania i realizacji konstrukcji betonowych. Coraz większą rolę odgrywają innowacyjne materiały oraz technologie. Ponadto mierzymy się z ciągłym brakiem siły roboczej, w tym wykwalifikowanej. Reakcją na to jest dążenie do ograniczania robót koniecznych do wykonania na placu budowy na rzecz używania gotowych produktów materiałowych.

Jednym z takich rozwiązań jest stosowanie zbrojenia włóknami stalowymi – SFRC (ang. steel fiber reinforced concrete), które umożliwia poprawę właściwości mechanicznych betonu, a zwłaszcza jego wytrzymałości na rozciąganie po zarysowaniu. Z tego powodu SFRC jest wykorzystywane w elementach narażonych na duże obciążenia dynamiczne oraz zmęczeniowe, a także w prefabrykacji i budownictwie inżynierskim. W wielu przypadkach włókna stalowe pozwalają na zmniejszenie ilości tradycyjnego zbrojenia prętowego. Spotyka się również rozwiązania polegające na całkowitym zastąpieniu zbrojenia konwencjonalnego (za pomocą prętów zbrojeniowych) zbrojeniem z włókien stalowych.

Pomimo tych zalet wykorzystanie włókien jako głównego zbrojenia wiąże się z licznymi wyzwaniami, obejmującymi



dr inż. Kamila Owczarska



mgr inż. Tomasz Kowal

spełnieniem wytycznych normowych i technologicznych. W niniejszym artykule kompleksowo opisano rodzaje włókien stalowych, technologie ich stosowania, aktualne problemy i ograniczenia oraz przykłady wdrożeń w praktyce inżynierskiej. Ponadto przeanalizowano możliwości optymalizacji rodzaju oraz ilości zbrojenia konwencjonalnego z wykorzy-

staniem włókien stalowych w elementach płyt torowych.

ZBROJENIE WŁÓKNAMI STALOWYMI W KONSTRUKCJACH BETONOWYCH – CHARAKTERYSTYKA I TECHNOLOGIA

Zbrojenie włóknami stalowymi jest formą zbrojenia rozproszonego, w którym włókna o określonych parametrach geometrycznych i mechanicznych są rozproszone w masie betonu [1–3]. Takie rozwiązanie pozwala na efektywne kontrolowanie rozwoju rys i zwiększa wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu, co przekłada się na wzrost odporności zmęczeniowej i udarowości elementów. Ponadto zbrojenie włóknami umożliwia redukcję konwencjonalnego zbrojenia, a w wybranych zastosowaniach pozwala na jego całkowite zastąpienie, co istotnie przyspiesza proces wykonawczy.

Zalety stosowania włókien stalowych w betonie:

- zwiększenie odporności na rysy oraz mikropęknięcia,
- obniżenie skurczu masy betonowej,
- lepsze reagowanie na wpływy dynamiczne i zmęczeniowe (np. w przypadku posadzek przemysłowych i nawierzchni),
- podwyższenie wytrzymałości na rozciąganie betonu przy zginaniu,
- przyspieszenie prac budowlanych – brak konieczności układania prętów,
- większa jednorodność zbrojenia – zbrojenie jest obecne w każdej części betonu,
- możliwość redukcji grubości elementów (np. cieńsze płyty).

Rodzaje włókien stalowych

Włókna stalowe stosowane w betonie różnią się pod względem kształtu, wymiarów, materiału oraz właściwości mechanicznych. Podstawowe typy włókien stalowych obejmują (tab. 1):

- **włókna proste (ang. smooth fibers)** – najczęściej o długości od 10 do 30 mm i średnicy ok. 0,2–0,4 mm; charakteryzują się gładką powierzchnią, co może ograniczać ich przyczepność do matrycy betonowej;
- **włókna faliste (ang. crimped fibers)** – mają charakterystyczny falisty kształt, który zwiększa ich przyczepność do betonu;
- **włókna hakowe (ang. hooked-end fibers)** – zakończone zagięciami, które poprawiają zakotwienie włókna w betonie i znacząco podnoszą wytrzymałość resztkową po powstaniu rys;
- **włókna spiralne i skręcone** – wykorzystywane w specjalistycznych przypadkach, oferują dodatkowe właściwości mechaniczne, np. zwiększoną wytrzymałość na rozciąganie.

Podstawowe parametry włókien stalowych:

- ciężar właściwy: 7850 kg/m³,
- granica wytrzymałości: 500–1500 MPa,
- moduł sprężystości: ok. 200 000 MPa.

Stosowana zazwyczaj zawartość włókien w betonie wynosi średnio 15–60 kg/m³. Na podstawie norm [7] i [8] badana jest wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu. Wyniki w funkcji ilości i rodzaju

włókien oraz klasy betonu podawane są w formie tabelarycznej. Parametry te stanowią podstawę projektowania elementów konstrukcyjnych.

Technologia stosowania włókien stalowych w betonie

Produkcja betonu z włóknami stalowymi wymaga wdrożenia określonej technologii, aby zapewnić ich jednorodne rozproszenie i odpowiednią jakość mieszanki. Kluczowe aspekty to:

- **dodawanie włókien** – powinno się odbywać stopniowo podczas mieszania, aby zapobiec ich aglomeracji i uszkodzeniu [7];
- **mieszanie** – optymalne jest użycie mieszalników planetarnych lub specjalistycznych urządzeń, które zapewniają równomierne rozproszanie włókien;
- **transport i układanie** – mieszankę betonową należy układać z zachowaniem zasad zapobiegania segregacji włókien i ich osiadaniu, a wibracja musi być kontrolowana, by nie powodować migracji włókien [5];
- **kontrola jakości** – obejmuje m.in. ocenę rozproszenia włókien metodami obrazowania oraz badania właściwości mechanicznych, takie jak testy zginania i wytrzymałości na rozciąganie.

WYZWANIA I PROBLEMY W STOSOWANIU WŁÓKNIEN STALOWYCH JAKO GŁÓWNEGO ZBROJENIA

Wprowadzenie włókien do mieszanki betonowej wymaga precyzyjnego doboru dawki oraz techniki mieszania, aby zapewnić ich równomierne rozproszenie i uniknąć ich aglomeracji. Proces ten zaczyna się od dodania włókien do suchej mieszanki cementowo-kruszywowej lub bezpośrednio do mieszanki betonowej podczas mieszania [9]. Istotne jest zapewnienie od-

powiedniej płynności mieszanki, często wspomaganej domieszkami plastyfikującymi, co umożliwia właściwe ułożenie betonu i efektywne otoczenie włókien matrycą cementową [5].

Głównym problemem wydaje się brak jednolitych norm projektowych. Norma [10] nie obejmuje pełnego procesu projektowania betonu zbrojonego wyłącznie włóknami, traktuje je bowiem jako materiał wspomagający. Pod względem kosztów wykonania konstrukcja z użyciem zbrojenia rozproszonego wydaje się bardziej korzystna od zbrojenia konwencjonalnego, także z uwagi na krótszy czas wykonania elementu. Z drugiej jednak strony zbrojenie jedynie włóknami rozproszonymi charakteryzuje się wielokrotnie mniejszą nośnością od zbrojenia tradycyjnego, dlatego stosuje się je w przypadku elementów o mniejszym wyężeniu. Z tego powodu często, zwłaszcza w posadzkach, wybiera się rozwiązania hybrydowe: zbrojenie rozproszone umożliwia zapewnienie wytrzymałości dla większości powierzchni elementu konstrukcyjnego, a lokalnie, np. pod dużymi siłami skupionymi lub przy krawędziach, stosuje się do zbrojenie tradycyjne.

Kolejnym zagadnieniem jest odporność ogniowa elementu, która z uwagi na możliwe ułożenie włókien blisko powierzchni, jest trudna do oszacowania.

WYKAZ NORM I WYTTCZYNYCH PRZYDATNYCH W PROJEKTOWANIU BETONU ZBROJONEGO WŁÓKNAMI STALOWYMI

Normy europejskie i międzynarodowe:

- **PN-EN 14651** – Metoda badania odporności betonu zbrojonego włóknami stalowymi na zginanie [7],

Tab. 1. Podstawowe parametry włókien stalowych stosowanych w SFRC [4]

Typ włókna	Długość [mm]	Średnica [mm]	Kształt	Zastosowanie
Proste	10–30	0,2–0,4	gładkie	elementy nienośne, podłogi
Faliste	30–60	0,3–1,0	faliste	elementy narażone na ścieranie
Hakowe	30–60	0,3–1,0	hakowate	elementy nośne, konstrukcje mostowe

- **PN-EN 14845-2:2007** – Metody badań włókien w betonie – Część 2: Efekt oddziaływania na beton [8],
- **fib Model Code 2010** [11],
- **DAfStb-Richtlinie** – wytyczne niemieckie do stosowania betonu z włóknami stalowymi w elementach konstrukcyjnych [12],
- **TR63 – Concrete Society (UK)** – szczegółowe wytyczne do projektowania posadzek z włóknami [13],
- **ACI 544 (USA)** – wytyczne American Concrete Institute: seria raportów dotyczących betonu zbrojonego włóknami (różnego rodzaju: stalowymi, szklanymi, polimerowymi) [14].

Z uwagi na wymienione ograniczenia najpopularniejsze zastosowania betonu zbrojonego włóknami obejmują:

- posadzki przemysłowe (najczęstsze),
- nawierzchnie drogowe i parkingowe,
- ściany oporowe prefabrykowane,

- rury i zbiorniki betonowe,
- tunelowe segmenty obudowy (TBM),
- belki prefabrykowane (np. nadproża, elementy LTT).

Nie spotyka się zbrojenia elementów nośnych budynków wyłącznie włóknami stalowymi. Można jednak potraktować takie rozwiązanie jako formę optymalizacji ilości i rodzaju zbrojenia konwencjonalnego. Zabieg taki pozwala na kompatybilność, czyli połączenie zalet obu metod. W literaturze jest on określany jako zastosowanie hybrydowe zbrojenia konwencjonalnego i z włókien stalowych.

ANALIZA MOŻLIWOŚCI OPTYMALIZACJI ZBROJENIA KONWENCjonalNEGO NA PRZYKŁADZIE PŁYTY TOROWEJ

Opisana tu analiza miała na celu sprawdzenie możliwości zastąpienia całego lub istotnej części zbrojenia tradycyjnego

zbrojeniem rozproszonym. Została ona przeprowadzona dla dwóch rozwiązań:

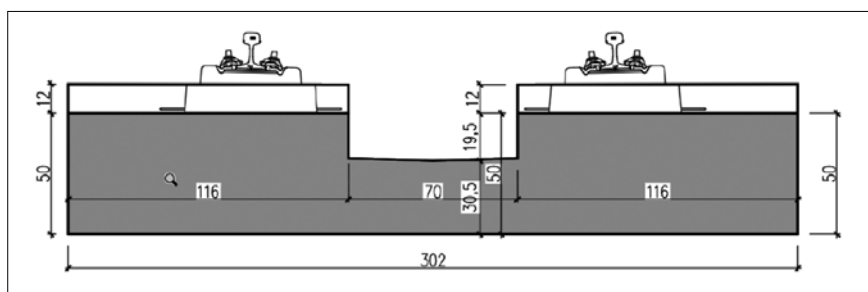
- możliwości zastosowania zbrojenia włóknami stalowymi wraz ze zbrojeniem siatką na górze i na dole – rozwiązanie hybrydowe,
- możliwości zastosowania jedynie zbrojenia włóknami stalowymi.

Przypadki zastosowania zbrojenia rozproszonego konsultowano z projektantami wybranych producentów włókien stalowych.

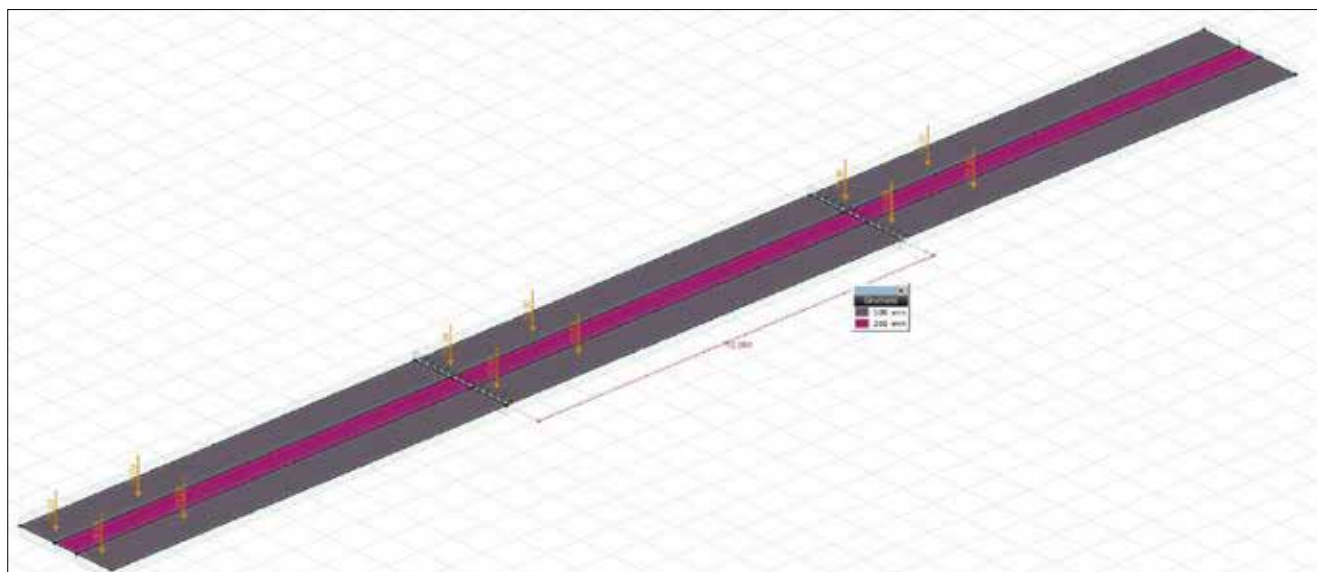
Analizowanym elementem była płyta pod torowiska, projektowana dotychczas z betonu C25/30 i zbrojona tradycyjnym zbrojeniem wiotkim w ilości ok. 75–85 kg/m³. Podstawowa grubość płyty wynosi blisko 0,6 m, a szerokość – ok. 3,1 m. W miejscu kanału odwadniającego płyta ma niemal 0,3 m grubości (rys. 1).

Model statyczny uwzględnił 3 moduły płyt ($l = 12$ m) oparte na podłożu sprężystym według Winklera o wartości 0,003 N/mm³ wynikającej z obecności mat wibroizolacyjnych. Położenie kompletu sił zadano w odstępach 1 m w schematach wykluczających się. Kierunek Y był równoległy do długości płyty (12 m), kierunek X – równoległy do szerokości płyty.

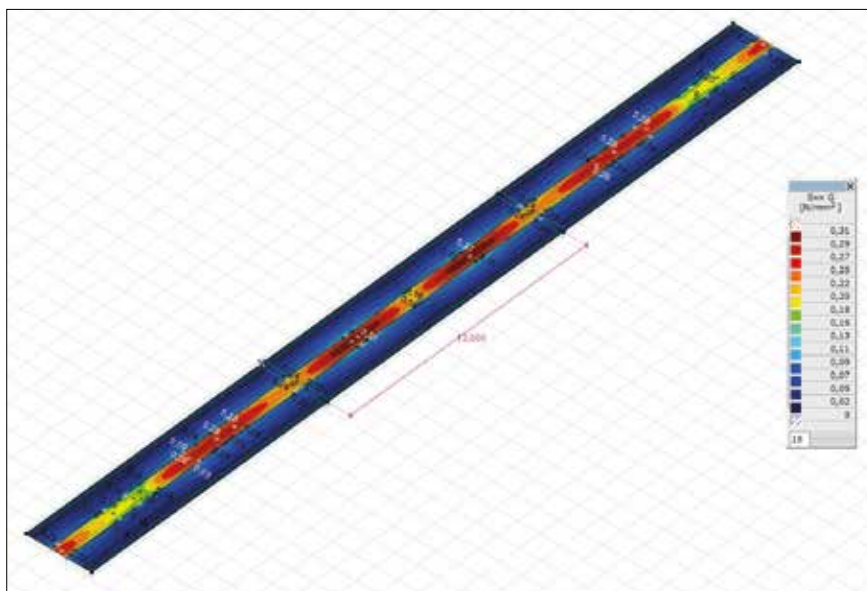
Na podstawie analizy statycznej i mapy naprężeń rozciągających (rys. 2–6)



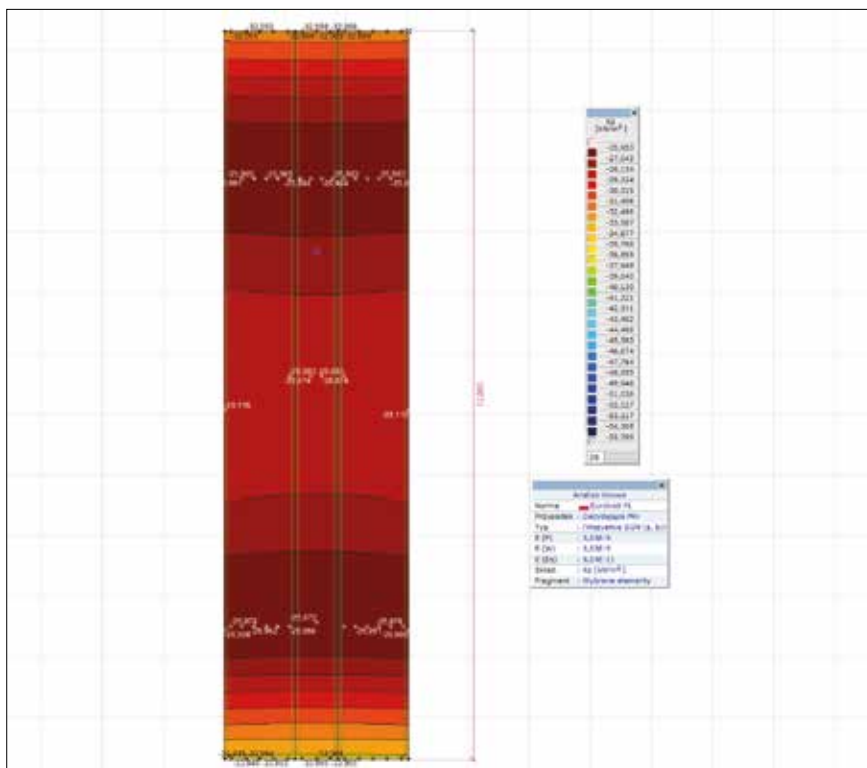
Rys. 1. Geometria przekroju płyty pod torami – na szaro zaznaczono grubość betonu uwzględnioną w analizie



Rys. 2. Schemat statyczny płyty torowiska



Rys. 5. Wartości naprężeń rozciągających XX



Rys. 6. Naprężenia podpory powierzchniowej

rozproszonym na poziomie 30 kg/m^3 i zbrojeniem wiotkim górnym w kierunku równoległym do osi podłużnej torowiska – w ilości ok. 20 kg/m^3 . Co ważne, jako uzupełnienie zbrojenia konieczne jest dodanie zbrojenia montażowego (kobyłki) i technologicznego dla oparcia bloków torów.

Należy zwrócić uwagę, że zastosowanie zbrojenia rozproszonego dla płyt podtorzy to rozwiązanie nowatorskie i dotychczas niesprawdzone. Obciążenia podtorzy mają charakter dynamiczny, trudno więc w sposób jednoznaczny przewidzieć zachowanie tak zbrojonych płyt. Użycie tego typu elementów

powinno być uzupełnione niezbędnymi badaniami.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

We współczesnym budownictwie zachodzą dynamiczne zmiany obejmujące podejście do wyboru materiałów i technologii konstrukcyjnych. Pojawiają się kolejne metody zbrojenia betonu bazujące obecnie głównie na prętach stalowych. W ostatnich latach coraz większą uwagę inżynierów i projektantów przyciąga technologia zbrojenia włóknami stalowymi, która stanowi alternatywę lub uzupełnienie dla konwencjonalnych metod.

W artykule przeanalizowano możliwości optymalizacji ilości i rodzaju zbrojenia konwencjonalnego poprzez uzupełnienie go zbrojeniem włóknami stalowymi na przykładzie płyt pod torowiska. Badania obejmowały sprawdzenie możliwości całkowitego zastąpienia zbrojenia konwencjonalnego zbrojeniem włóknami stalowymi. Wykonane analizy wykazały teoretycznie taką możliwość, ale zaproponowane przez poszczególnych dostawców zbrojenia rozproszonego rozwiązania mają wiele wad. Mimo korzyści związanych z parametrami samego betonu stosowanie włókien stalowych jako jedynej formy zbrojenia nośnego w konstrukcjach betonowych okazuje się trudne do zrealizowania i możliwe jedynie w przypadku elementów o stosunkowo niskim wyężeniu. Dla większych wyężzeń nadal bezkonkurencyjne pozostaje zbrojenie tradycyjne wiotkie. Obiecująca jest jednak propozycja hybrydowa, czyli użycie zarówno zbrojenia włóknami stalowymi, jak i zbrojenia konwencjonalnego w najbardziej wyężonych fragmentach konstrukcji. Ten kierunek wydaje się optymalny.

Zbrojenie włóknami stalowymi w betonie to nowoczesne rozwiązanie o dużym potencjale, które może znacząco poprawić właściwości mechaniczne i trwałość konstrukcji betonowych. Pomimo licznych zalet pełne zastąpienie tradycyjnego zbrojenia włóknami wymaga dalszych badań oraz ujednolicenia norm i wytycznych projektowych. Dodatkową przeszkodą jest stosunkowo mały



Fot. © selcukbulbul – stock.adobe.com

wybór oprogramowania pozwalającego na projektowanie elementów wzmacnianych włóknami stalowymi. Większość oprogramowania dotyczy projektowania posadzek i opiera się na wzorach analitycznych otrzymanych z teorii m.in. Westergaarda, Meyerhofs-Losberga. ■

Literatura

1. A. Brandt, J. Kasperkiewicz, M. Glinicki, *Podstawy stosowania fibrobetonów z włóknami stalowymi*, PAN, Warszawa 1996.
2. A. Brandt, J. Kasperkiewicz, M. Glinicki, *Instrukcja do badań atestacyjnych włókien metalowych do fibrobetonów*, IBDiM, Warszawa 1996.
3. Z. Jamroży, *Drutobeton*, Politechnika Krakowska, Kraków 1985.
4. A. Bentur, S. Mindess, *Fiber Reinforced Cementitious Composites*, wyd. 2, Taylor & Francis Group, New York 2007.
5. Fédération internationale du béton (fib), *Prefabricated Fibre Reinforced Concrete Tunnel Segments – Structural Design and Detailing Guidelines*, „fib Bulletin” nr 83/2017.
6. P. Hajduk, *Projektowanie podłóg przemysłowych*, Wydawnictwo PWN, Warszawa 2018.
7. PN-EN 14651+A1:2007 Metoda badania odporności betonu zbrojonego włóknami stalowymi na zginanie.
8. PN-EN 14845-2:2007 Metody badań włókien w betonie – Część 2: Efekt oddziaływania na beton.
9. PN-EN 14845-1:2008 Metody badań włókien w betonie – Część 1: Betony wzorcowe.
10. EC2, PN-EN 1992-1-1:2008: Projektowanie konstrukcji z betonu.
11. *Fib Model Code for Concrete Structures* 2010, 2013.
12. DAfStb-Richtlinie, *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. – Richtlinien*.
13. *Technical Report no 63. Guidance for the design of steel-fibre-reinforced concrete*, Concrete Society.
14. ACI PRC-544.1R-96: *Report on Fiber Reinforced Concrete*.