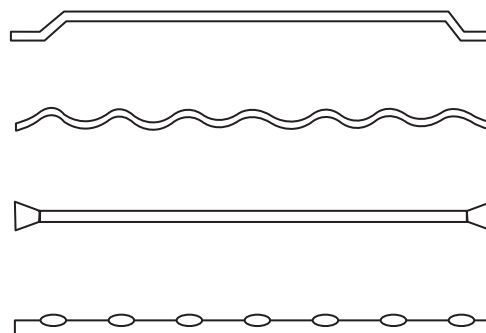


Włókna stalowe stosowane do modyfikacji betonu

Betony modyfikowane włóknami stalowymi, nazywane w polskiej literaturze fachowej fibrobetonami, drutobetonami, włóknobetonami, betonami o zbrojeniu rozproszonym lub SFRC (Steel Fibre Reinforced Concrete), są coraz szerzej oraz coraz chętniej stosowane w budownictwie tak na świecie, jak i w kraju.

Długi proces powstawania nowoczesnych kompozytów zbrojonych włóknami stalowymi rozpoczął się w 1874 roku, kiedy to A. Bernard z Kalifornii opatentował pomysł wzmocnienia betonu za pomocą dodatku opiłków stalowych. Minęło kolejne 36 lat, zanim w 1910 roku Porter wspomniał o możliwości stosowania do betonu krótkich drutów, które miałyby poprawić „jednorodność betonu zbrojonego tylko grubymi prętami”. H. Alfsen w 1918 roku opatentował we Francji modyfikowanie betonu długimi włóknami stalowymi, co miało według niego zwiększyć wytrzymałość betonu na rozciąganie. Alfsen jako pierwszy wspominał o wpływie chropowatości powierzchni włókien na ich przyczepność do matrycy oraz zwrócił uwagę na problem zakotwienia włókien.

Szerokie stosowanie kompozytów fibrobetonowych w budownictwie zostało na długi czas wyhamowane przez brak wiarygodnych metod ich badania, a przede wszystkim przez gwałtowny rozwój tradycyjnego zbrojenia prętowego. Do lat sześćdziesiątych XX wieku miały miejsce tylko nieliczne nieśmiałe próby badań kompozytów typu SFRC, które właściwie nie dały żadnych praktycznych rozwiązań. Poważnie i na szeroką skalę zajęli się zagadnieniem modyfikacji betonu włóknami stalowymi dopiero Romualdi i Baston, którzy w 1963 roku przedstawili pierwszą teorię betonów typu SFRC. Postawili oni tezę, że krótkie włókna



Rys. 1. Najczęściej spotykane kształty włókien stalowych do modyfikacji betonu (od góry: włókno zakończone hakiem, faliste, ze spłaszczeniami na końcach oraz nagniatane)

stalowe utrudniając zapoczątkowanie powstawania rys i hamując ich propagację przynoszą poprawę właściwości stwardniałego betonu. Opracowanie podstaw teoretycznych pracy fibrobetonów pociągnięto za sobą pierwsze poważne inwestycje budowlane z ich użyciem. Technologię tego betonu opatentowano pod nazwą „Wirand”, stosując do niego włókna stalowe o długości 25 mm i kruszywo drobnoziarniste.

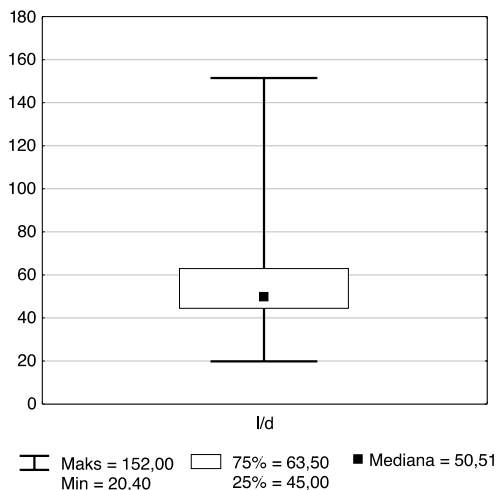
Obecnie na świecie funkcjonuje około 30 producentów włókien stalowych do modyfikacji betonu oferujących ponad 100 typów włókien. Włókna stalowe do modyfikacji betonu są oczywiście produkowane nie tylko w Europie i USA, ale również w tak odległych krajach, jak Republika Południowej Afryki, Australia czy Korea Południowa. W tab. 1 zestawiono wybranych producentów włókien stalowych na świecie.

Najstarszym i jednocześnie najbardziej podstawowym typem włókien stalowych są włókna proste, cięte z gładkiego drutu, które nie zapewniają niestety pełnego wykorzystania wytrzymałości stali przez brak odpowiedniego zakotwienia w matrycy betonowej. Ponad 90% obecnie produkowanych włókien to włókna kształtowane, a kształt geometryczny jest tak dobierany, aby wpływał na zwiększenie siły zakotwienia włókien w betonie. Na przestrzeni ostatnich 40 lat produkowano włókna o przekroju kołowym, kwadratowym i prostokątnym, gładkie lub lekko skręcone, o chropowatej powierzchni wywołanej prowokowaną korozją lub przez wyżarzanie, karbowane przez nałożenie innego materiału, karbowane przez nagniatanie, faliste o niejednorodnym przekroju i kształcie, uzyskiwane przez rozbrzyż żeliwa lub przez struganie bloków stalowych, zakończone obustronnie haczykami, zgrubieniami, spłaszczeniami lub falami. Każdy z wymienionych typów był dodatkowo różnicowany średnicą i długością. Czasami do modyfikacji betonu zamiast produkowanych włókien stosowano tak zwane włókna stalowe odpadowe, zagospodarowując w ten sposób pozostałości po skrawaniu, toczeniu lub innej obróbce elementów metalowych.

Kilkadziesiąt lat prowadzenia badań oraz zbierania doświadczeń zaowocowało tym, że obecnie asorty-

Tab. 1. Zestawienie wybranych producentów włókien stalowych

Producent	Kraj macierzysty	Rodzaje produkowanych włókien				
		Proste	Zakończone hakiem	Faliste	Nagniatane	Inne zakończenie
Drumet	Polska	+	+			
Baumix	Niemcy	+	+			
Dramix	Belgia		+			
Ekomet	Polska		+			
Flex-Ten	USA			+		
Hot Fibre	Korea		+		+	
Korodur	Niemcy		+			
Metalurgia Radomsko	Polska			+		
Novocon	USA			+	+	+
Qubix	Australia	+	+			
Radmix	USA	+				
Ribbon Technology	USA			+		
Silidur	Belgia			+		+
VTI	Niemcy	+	+			
Węglobudex	Polska					+



Rys. 2. Wykres ramkowy smukłości włókien stalowych

ment produkowanych włókien stalowych zawężił się do pięciu najbardziej efektywnych typów, które są produkowane na całym świecie. Efektywność produkowanych współcześnie włókien polega zarówno na ich wysokosprawnej pracy w matrycy betonowej, jak i na łatwości ich produkcji, co ma decydujący wpływ na cenę wyrobu. Są to oprócz tradycyjnego włókna prostego włókna zakończone hakiem, faliste, zakończone spłaszczeniami lub kulkami oraz nagniatane. Geometrię wymienionych tutaj rodzajów włókien zobrazowano na rys. 1. Inne typy włókien są spotykane bardzo rzadko oraz prawie zawsze produkowane tylko i wyłącznie na specjalne zamówienie klienta.

Analiza statystyczna asortymentu produkowanych na świecie włókien pozwala stwierdzić, że 67,1% oferowanych przez producentów typów włókien to włókna zakończone hakiem, 9,1% to włókna proste, 9,1% to włókna nagniatane, 7,9% to włókna faliste, a 6,6% to włókna o innym zakończeniu, realizowanym najczęściej poprzez spłaszczenie lub uformowanie kulki.

Skuteczność zbrojenia rozproszonego zależy od wielu czynników, z których najważniejszym jest smukłość stosowanych włókien wpływająca na łatwość zmieszania włókien z innymi składnikami betonu oraz ich równomierne rozmieszczenie w całej mieszance betonowej. Ze względu na urabialność mieszanki betonowej smukłość włókien powinna wynosić do 150. Statystyczna analiza smukłości oferowanych przez producentów włókien została zobrazowana na rys. 3 za pomocą wykresu ramkowego. Smukłość dostępnych na rynku ogólnoswiatowym włókien waha się od 20,4 aż do 152, co oznaczono na rys. 3 za pomocą wąsów. W celu syntetycznego opisu częstości występowania poszczególnych smukłości włókien na rys. 2 wykreślono ramkę obrazującą rozstęp pomiędzy dolnym kwartylem (wielkość, poniżej której leży 25% danych), a górnym kwartylem (wielkość, poniżej której leży 75% danych), która jest bardzo wąska i obejmuje smukłości od 45 do 63,5. Oznacza to, że włókna o smukłościach od 45 do 63,5 stanowią 50% populacji wszystkich oferowanych przez producentów typów włókien stalowych do modyfikacji betonu.

Statystyczny parametr „mediana”, nazywany czasami wartością elementu środkowego, bądź drugim kwartylem, należący do grupy charakterystyk nazywanych miarami położenia, to wielkość w uporządkowanym ciągu obserwacji, poniżej której leży 50% danych. Me-



Przekrój betonu z włóknami

diana smukłości analizowanych włókien stalowych wynosi 50,51 i jest położona w dolnej części ramki kwartylowej zobrazowanej na rys. 2. Odmienne niż w przypadku średniej mediana nie ulega łatwo wpływom wartości skrajnych, co ma olbrzymie znaczenie przy analizowaniu populacji danych o tak dużej rozpiętości, jak smukłość produkowanych włókien stalowych. Na podstawie przeprowadzonych powyżej analiz można się pokusić o stwierdzenie, że przeciętnie na świecie do modyfikacji betonu stosuje się włókna stalowe zakończone hakiem o smukłości 50. Dotychczasowe doświadczenia w zakresie stosowania fibrobetonu zamiast betonu zwykłego pozwalają na określenie pięciu podstawowych zalet, jakie uzyskujemy przy takiej zamianie, które w umowny sposób przedstawiono na rys. 3. Używając fibrobeton zamiast tradycyjnej matrycy betonowej w konstrukcjach tak betonowych, jak i żelbetonowych możemy wyeliminować część zbrojenia tradycyjnego (pręty + strzemiona) oraz uzyskujemy element o większej trwałości dzięki podwyższonej odporności na ścieranie, większej wodoszczelności oraz mrozoodporności. Poza tym możemy zmniejszyć wymiary liniowe samego projektowanego przekroju, ograniczając jednocześnie ilość powstających rys oraz ich szerokość, uzyskując jednocześnie element o generalnie większej nośności. Włókna stalowe, które od 125 lat usiłują znaleźć swoje stałe miejsce w budownictwie w dobie drożęcej robocizny oraz rosnących wymagań stawianych konstrukcjom betonowym coraz śміalej wkraczają w światowe budownictwo. Najnowsze kompozyty fibrobetonowe, jak SIFCON (Slurry Infiltrated Concrete) i SIMCON (Slurry Infiltrated Mat Concrete), są przykładami dużych możliwości dalszego rozwoju betonów modyfikowanych włóknami stalowymi.

Rys. 3. Umowny schemat zalet zastosowania fibrobetonu zamiast betonu zwykłego

dr inż. Jacek Katzer
Politechnika Koszalińska

