

EFEKTYWNOŚĆ ZBROJENIA BETONU OCZYSZCZONYMI WŁÓKNAMI Z RECYKLINGU OPON

STRESZCZENIE

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest ocena efektywności zbrojenia betonu włóknami pochodzącymi z recyklingu opon samochodowych, które zostały dodatkowo oczyszczone z zanieczyszczeń gumowych i tekstylnych. Efektywność włókien sformułowano jako skuteczne zbrojenie betonu przez włókna, tj. wzmocnienie kruchej matrycy cementowej poprzez wzrost właściwości związanych z rozciąganiem betonu oraz wzrost pracy zniszczenia. Paca wpisuje się w tematykę zrównoważonego budownictwa poprzez proponowane rozwiązanie wykorzystania włókien z recyklingu do betonu, a także oszczędność surowców naturalnych do produkcji komercyjnych włókien stalowych. Produkcja stali stanowi jedną z gałęzi przemysłu, która w największym stopniu przyczynia się do wzrostu śladu węglowego. Z drugiej strony dynamiczny rozwój infrastruktury komunikacyjnej powoduje zwiększanie produkcji opon gumowych, które po zużyciu zanieczyszczają środowisko. Wyodrębniona z opony stal, w procesie recyklingu materiałowego i odpowiednio przygotowana może stanowić potencjał w zastosowaniu jako zbrojenie rozproszone do betonu. W rozprawie sformułowano następującą tezę: Oczyszczone włókna stalowe z recyklingu opon samochodowych mogą pełnić rolę efektywnego zbrojenia rozproszonego do betonu, a niektóre właściwości betonów z ich dodatkiem są równoważne a nawet lepsze niż właściwości betonów z dodatkiem komercyjnych włókien stalowych. W części teoretycznej przedstawiono zwięzły opis następujących tematów: zrównoważone budownictwo i ślad węglowy; recykling opon samochodowych, technologia fibrobetonów wraz z rodzajem włókien i metodyką badawczą fibrobetonów; elementy mechaniki pęknięcia oraz analizę literatury z zakresu wykorzystania włókien do betonu. Część badawczą podzielono na trzy części: badania wstępne, badania główne i badania aplikacyjne. Badania wstępne miały na celu wybór odpowiednich włókien z recyklingu opon do badań głównych oraz badania identyfikacyjne wybranych włókien z opon. W badaniach głównych oceniono efektywność zbrojenia betonu włóknami stalowymi. Badania wykonano porównawczo, dla betonów z dodatkiem oczyszczonych włókien z opon oraz dla betonów z taką samą ilością komercyjnych włókien stalowych haczykowatych, powszechnie stosowanych jako zbrojenie rozproszone do betonu. Włókna z opon oraz komercyjne dozowano w takiej samej ilości do betonu tj. 10 kg/m³, 20 kg/m³, 30 kg/m³, 40 kg/m³. Efektywność zbrojenia betonu włóknami została oceniona wieloma metodami: wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu belek z nacięciem, praca zniszczenia, wskaźniki odporności na pęknięcie, przyczepność włókien do matrycy cementowej, analizę strefy kontaktowej włókno-zaczyn, dystrybucja włókien metodą tomografii komputerowej. Ponad to dla szerszego porównania, kluczowe badania do oceny efektywności przeprowadzono dla dodatkowych dwóch rodzajów włókien komercyjnych różniących się średnicą i kształtem. W części aplikacyjnej wykonano badania właściwości użytkowych betonów posadzkowych z

włóknami z recyklingu opon i włóknami komercyjnymi, tj. m.in. konsystencja, gęstość, wytrzymałość na ściskanie, zginanie, rozłupywanie, ścieralność, moduł sprężystości, odporność na uderzenie. Przeprowadzono również analizę możliwości wprowadzenia włókien z recyklingu opon do obrotu drogą Krajowej Oceny Technicznej. Zakończeniem pracy są badania wdrożeniowe w skali rzeczywistej, w celu potwierdzenia możliwości dozowania włókien z opon na wytwórni betonu towarowego. Aspektem innowacyjnym w niniejszej pracy jest określenie pracy zniszczenia jako miarę odporności na kruche pękanie i efektywności zbrojenia betonu przez włókna z recyklingu opon. Analizując literaturę nie znaleziono wcześniejszych prac, prezentujących takie podejście. Również badanie przyczepności drutów z opon przedstawione w niniejszej pracy stanowią nowość. W dotychczas opublikowanych pracach badano kompozyty cementowe z dodatkiem jedynie krótkich włókien z opon, a nie drutów pozyskanych z opon. Badania wykazały, że oczyszczone włókna stalowe z recyklingu opon mogą pełnić rolę efektywnego zbrojenia do betonu. Oczyszczone włókna z opon o odpowiedniej długości wzmacniają kruchą matrycę cementową, mostkują pęknięcia powodując ich rozprzestrzenianie się oraz ograniczają powstawanie nowych pęknięć. Niektóre właściwości betonów z odpowiednio wysoką zawartością włókien z recyklingu opon, to jest: wytrzymałość resztkowa, wskaźniki odporności na pękanie, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, na ściskanie, na rozłupywanie, moduł sprężystości, ścieralność, odporność na uderzenia są nawet wyższe niż betonów z taką samą ilością włókien stalowych komercyjnych. Oczyszczone włókna z opon mają chropowatą powierzchnię, spowodowaną procesem recyklingu i oczyszczania, przez co osiągają bardzo dobrą przyczepność do zaczynu cementowego. W niniejszej pracy należy podkreślić trzy główne aspekty wynikające ze stosowania oczyszczonych włókien stalowych z recyklingu opon samochodowych jako zbrojenie rozproszone do betonu: wytrzymałość betonu z dodatkiem włókien z recyklingu (oczyszczone włókna z recyklingu opon mogą pełnić rolę efektywnego zbrojenia rozproszonego do betonu i skutecznie wzmacniać kruchą matrycę cementową); wpływ na środowisko (zmniejszenie śladu węglowego poprzez zastąpienie wysokoemisyjnej produkcji stali włóknami z recyklingu, oszczędność zasobów naturalnych, zagospodarowanie odpadów); korzyści ekonomiczne (koszt włókien z recyklingu opon jest niższy niż włókien stalowych komercyjnych). Aby włókna z recyklingu opon mogły pełnić rolę zbrojenia do betonu muszą być spełnione następujące warunki: włókna muszą być oczyszczone, tj. poddane specjalnej obróbce technologicznej, po której poziom zanieczyszczeń gumowych i tekstylnych wyniesie do 0,2%; włókna muszą być pozbawione włókien znacznie odstających długościami i średnicami; należy tak dozować włókna do mieszanki, aby zapewnić ich jednorodne rozmieszczenie, bez tworzenia miejscowych skupisk włókien; oczyszczone włókna muszą być dozowane w odpowiedniej ilości do betonu ($> 30 \text{ kg/m}^3$).

Słowa kluczowe:

włókna z recyklingu opon, włókna stalowe, beton zbrojony włóknem, wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu, wskaźniki odporności na pękanie, praca zniszczenia, zrównoważone budownictwo

Agnieszka Michalik

EFFECTIVENESS OF CONCRETE REINFORCEMENT WITH PURIFIED RECYCLED TYRE STEEL FIBRES

SUMMARY

The subject of the PhD Thesis is the assessment of the effectiveness of reinforcing concrete with recycled tyre steel fibres, which have been additionally purified of rubber and textile impurities. Fibres efficiency was formulated as the effective reinforcement of concrete by fibres, i.e. the strengthening of the brittle cement matrix by increasing the tensile properties of concrete and increasing the work of fracture. The work is consistent with the topic of sustainable construction through the proposed solution of using recycled tyre steel fibres for concrete, as well as saving natural resources for the production of manufactured steel fibres. Steel production is one of the industries that contributes most to the increase in the carbon footprint. On the other hand, the dynamic development of communication infrastructure results in an increase in the production of rubber tyres, which pollute the environment when worn out. Steel fibres extracted from the tyre, in the material recycling process and properly prepared, may have potential for use as dispersed reinforcement for concrete. The following thesis was formulated in the PhD Thesis: purified recycled tyre steel fibres can act as effective dispersed reinforcement for concrete, and some properties of concretes with their addition are equivalent or even better than the properties of concretes with the addition of manufactured steel fibres. The theoretical part presents a concise description of the following topics: sustainable construction and carbon footprint; recycling of car tyres, fibre concrete technology with the type of fibres and fibre concrete research methodology; elements of fracture mechanics, from which the main research methods and literature analysis on the use of fibres in concrete were used. The research part was divided into three parts: preliminary research, main research and application research. The preliminary tests were aimed at selecting appropriate fibres from recycled tyres for the main tests and at identifying selected tyre fibres. The main tests assessed the effectiveness of reinforcing concrete with steel fibres. The tests were carried out comparatively for concrete with the addition of purified recycled tyre steel fibres and for concrete with the same amount of manufactured hook-shaped steel fibres, commonly used as dispersed reinforcement for concrete. Recycled tyre steel fibres and manufactured tyre fibres were dosed in the same amount into the concrete, i.e. 10 kg/m³, 20 kg/m³, 30 kg/m³, 40 kg/m³. The effectiveness of fiber reinforcement of concrete was assessed by many methods: bending tensile strength of notched beams, work of fracture, toughness indexes, fiber adhesion to the cement matrix, analysis of the fiber-cement interfacial transition zone, fibres distribution by computed tomography. Moreover, for a broader comparison, key tests to assess the effectiveness were conducted for two additional types of commercial fibres differing in diameter and shape. In the application part, tests of the functional properties of flooring concretes with recycled tyre fibres and commercial fibres were carried out, i.e. consistency, density, compressive strength, bending, splitting, abrasion, modulus of elasticity, impact resistance. An analysis of the possibility of introducing recycled tyre steel fibres to the market through the National Technical Assessment was also carried

out. The work ends with implementation tests on a real scale to confirm the possibility of dosing fibres from tires at a ready-mix concrete plant. The innovative aspect of this work is the determination of the work of destruction as a measure of the resistance to brittle fracture and the effectiveness of concrete reinforcement with recycled tire fibres. Analyzing the literature, no previous works presenting this approach were found. The adhesion testing of tire wires presented in this work is also new. In the works published so far, cement composites with the addition of only short recycled fibres, and not wires obtained from tires, were tested. Research has shown that purified recycled tyre steel fibres can act as effective reinforcement for concrete. Purified recycled tyre steel fibres of appropriate length strengthen the brittle cement matrix, bridge cracks, causing them to spread, and limit the formation of new cracks. Some properties of concretes with a sufficiently high content of recycled tire fibres, i.e.: residual strength, toughness indexes, tensile strength when bending, compressive strength, splitting strength, modulus of elasticity, abrasion, impact resistance are even higher than those of concretes with such same amount of commercial steel fibres. Purified recycled tyre steel fibres have a rough surface caused by the recycling and cleaning process, which allows them to achieve very good adhesion to the cement grout. In this work, three main aspects should be highlighted resulting from the use of purified steel fibres from recycled car tires as dispersed reinforcement for concrete: strength of concrete with the addition of recycled fibres (purified recycled tyre fibres can act as effective dispersed reinforcement for concrete and effectively strengthen the brittle cement matrix) ; environmental impact (reducing the carbon footprint by replacing high-emission steel production with recycled fibres, saving natural resources, waste management); economic benefits (the cost of recycled tire fibres is lower than commercial steel fibres). In order for fibres from recycled tires to act as concrete reinforcement, the following conditions must be met: the fibres must be purified, i.e. subjected to special technological treatment, after which the level of rubber and textile impurities will be up to 0.2%; the fibres must be free of fibres that differ significantly in length and diameter; fibres should be dosed into the mixture in such a way as to ensure their uniform distribution, without creating local fiber clusters; cleaned fibres must be dosed in the appropriate amount into the concrete (> 30 kg/m³).

Key words:

recycled tyre steel fibres, steel fibres, fibre-reinforced concrete, residual flexural tensile strength, work of fracture, toughness index, sustainable construction