

# Zastosowanie włókien z recyklingu opon w technologii betonu

## Application of recycled tyre steel fibres in concrete technology

mgr inż. Agnieszka Michalik (ORCID: 0000-0003-3586-9585), mgr inż. Piotr Kupisz (ORCID: 0000-0002-3816-8250), inż. Łukasz Zacharski (ORCID: 0000-0002-6748-843X), Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie, dr hab. inż. Waldemar Pichór, prof. AGH (ORCID: 0000-0001-7749-3286), Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

DOI: 10.5604/01.3001.0054.6391

**Streszczenie:** Zastosowanie włókien z recyklingu opon samochodowych jest przedmiotem wielu prac naukowo-badawczych z powodu korzystnych właściwości betonów z ich dodatkiem. Wyróżnić można trzy aspekty stosowania włókien z recyklingu opon: środowiskowy (zagospodarowanie odpadów, redukcja śladu węglowego, który ma bardzo wysokie wartości dla produkcji komercyjnej stali), ekonomiczny (włókna z recyklingu opon są tańsze niż włókna stalowe komercyjne) oraz aspekt wytrzymałościowy (wykazano dobrą skuteczność zbrojenia betonu włóknami z opon). Aby jednak zastosować włókna z opon do betonu, muszą być poddane odpowiedniej obróbce technologicznej. W pracy przedstawiono wyniki badań betonów z zastosowaniem oczyszczonych włókien z recyklingu opon, w porównaniu z włóknami przemysłowymi.

**Słowa kluczowe:** włókna stalowe z recyklingu opon, włókna stalowe przemysłowe, beton, beton zbrojony włóknem, badania wytrzymałościowe betonu.

**Abstract:** Application of recycled tyre fibres is the subject of many scientific and research works due to the beneficial properties of concretes with their addition. Three aspects of the use of recycled tyre steel fibres can be distinguished: environmental (waste management, reduction of the carbon footprint, which has very high values for the production of commercial steel), economic (recycled tire fibers are cheaper than commercial steel fibres) and durability (shown good concrete reinforcement with tire fibers). However, in order to use tyre fibres for concrete, they must be subjected to appropriate technological treatment. The paper presents the results of testing concretes with the use of purified recycled tyre steel fibers in comparison with manufactured fibers.

**Keywords:** recycled tyre steel fibres, manufactured steel fibres, concrete, fiber reinforced concrete, concrete strength tests.

## 1. Wprowadzenie

Produkcja stali stanowi jedną z gałęzi przemysłu, która w największym stopniu przyczynia się do wzrostu śladu węglowego, ślad węglowy produkcji stali wynosi ok. 1900 kg eCO<sub>2</sub>/t [1, 2]. W obecnych czasach kryzysu klimatycznego i środowiskowego [4] oraz ze względu na wysokie koszty produkcji i negatywny wpływ na środowisko, w ciągu ostatnich lat wzrosło zainteresowanie poszukiwaniem nowych rozwiązań w tym zastosowaniem różnego rodzaju włókien z recyklingu, w tym z recyklingu opon samochodowych [5–10].

Z drugiej strony utylizacja opon jest globalnym problemem środowiskowym. Rocznie na całym świecie produkuje się około 1,5 mld opon [11, 12]. Zużyta opona samochodowa zawiera, oprócz gumy, kord tekstylny i stalowy. Stal stanowi około 13–27% [13] i odgrywa rolę szkieletu konstrukcyjnego opony, na który działają wszystkie obciążenia, a wydobyta z opony może stanowić cenny składnik betonu, z powodu wysokich właściwości wytrzymałościowych.

W niniejszym artykule włókna stalowe komercyjne identyfikowane są symbolem MSF (*Manufactured Steel Fibres*), a włókna stalowe z recyklingu opon samochodowym symbolem RTSF (*Recycled Tyre Steel Fibres*).

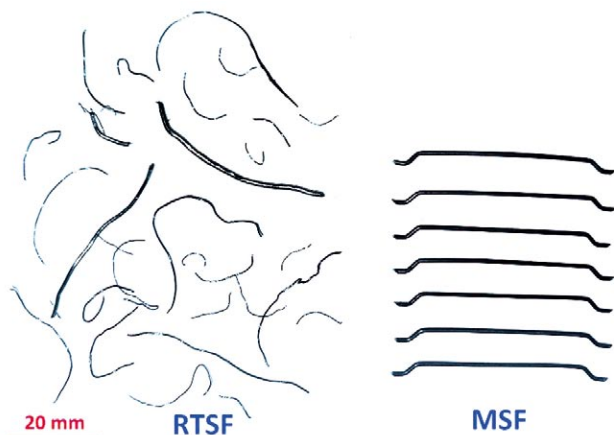
Dodatkowym aspektem stosowania włókien z recyklingu opon jest aspekt ekologiczny. W pracach [14, 15] wykazano, że potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP) dla włókien stalowych komercyjnych MSF wynosi 2,15–2,68 kg eCO<sub>2</sub>/kg, natomiast dla włókien z recyklingu opon RTSF GWP wynosi 0,083–0,500 kg eCO<sub>2</sub>/kg, czyli jest ok. 77–97% niższy. Również istotny jest aspekt ekonomiczny. Zgodnie z [14] włókna z recyklingu opon są o około 37% tańsze niż włókna komercyjne, natomiast w pracy [15] szacuje się, że koszt włókien z opon jest około 70% niższy od kosztu z włókien komercyjnych.

## 2. Materiały

### 2.1. Włókna stalowe

W badaniach wykorzystano dwa rodzaje włókien: włókna stalowe komercyjne MSF oraz oczyszczone włókna stalowe

z recyklingu opon RTSF. Włókna MSF są typowymi włóknami stosowanymi jako zbrojenie rozproszone do betonu, zgodne z normą PN-EN 14889-1 [16]. Mają przekrój okrągły, kształt haczykowany, średnicę 1 mm i długość 50 mm. Włókna RTSF pochodzą z recyklingu opon i zostały poddane obróbce technologicznej, polegającej na dodatkowym oczyszczaniu i selekcji włókien. Są to włókna o zróżnicowanej długości i średnicy, jednak przeważają włókna o długości ok. 40 mm i średnicy ok. 0,23 mm. Rodzaje włókien przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Włókna z recyklingu opon RTSF i włókna stalowe komercyjne MSF

### 2.2. Receptura betonu

Badania wykonano na betonie o składzie przedstawionym w tabeli 1, do którego dodawano włókna MSF i RTSF w ilości 30 i 40 kg/m<sup>3</sup>. Ilość dodawanych włókien wynika z wcześniej przeprowadzonych badań [5–8], z których wynika, że jest to minimalna ilość, przy której włókna RTSF wpływają korzystnie na właściwości betonu. Betony z dodatkiem 30 kg/m<sup>3</sup> zostały oznaczone jako MSF-30 i RTSF-30 i odpowiednio betony z dodatkiem 40 kg/m<sup>3</sup> oznaczono MSF-40 i RTSF-40.

Tabela 1. Receptura betonu

Składnik betonu		Zawartość [kg/m <sup>3</sup> ]
Cement portlandzki CEM II/B-S 32,5R		300
Woda wodociągowa		159
Kruszywo	Piasek wiślany płukany 0/2 mm	695
	Żwir naturalny 2/16 mm	1271
Domieszka, plastyfikator		1% m.c.

### 3. Metody badań

Wykonano następujące badania betonów z włóknami:

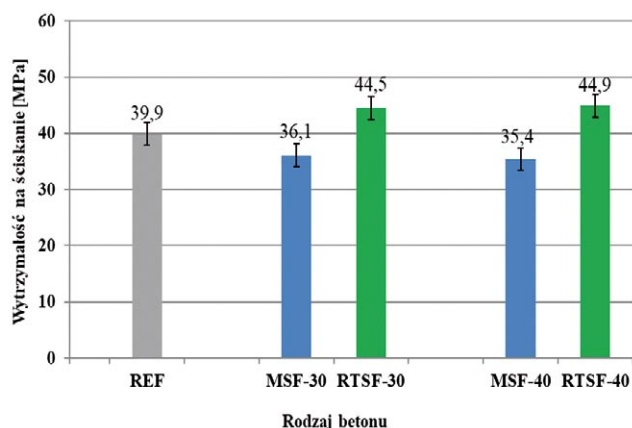
- wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach wg PN-EN 12390-3 [17],
- wytrzymałość na zginanie po 28 dniach wg PN-EN 12390-5 [18],

- wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach PN-EN 12390-6 [19],
- moduł sprężystości betonu wg PN-EN 12390-3 [20],
- ścieralność betonu metodą tarczy Boehmego wg PN-EN 13892-3 [21].

## 4. Wyniki badań

### 4.1. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach

Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach betonów REF (bez włókien) oraz MSF i RTSF z dodatkiem 30 i 40 kg/m<sup>3</sup> włókien przedstawiono na rysunku 2.

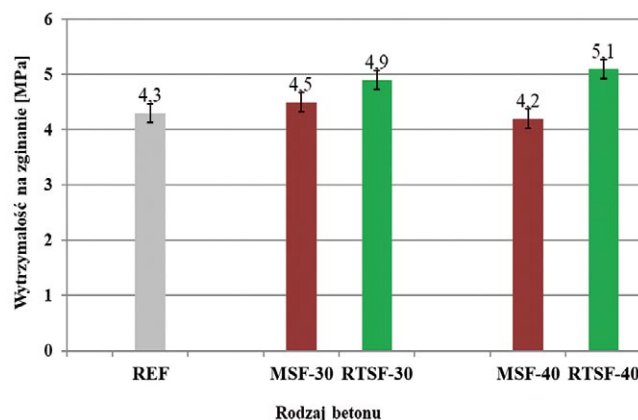


Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach

Wyniki badań wskazują, że beton z dodatkiem oczyszczonych włókien z recyklingu opon RTSF ma o ok. 25% większą wytrzymałość na ściskanie niż beton z taką samą ilością włókien MSF.

### 4.2. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu po 28 dniach

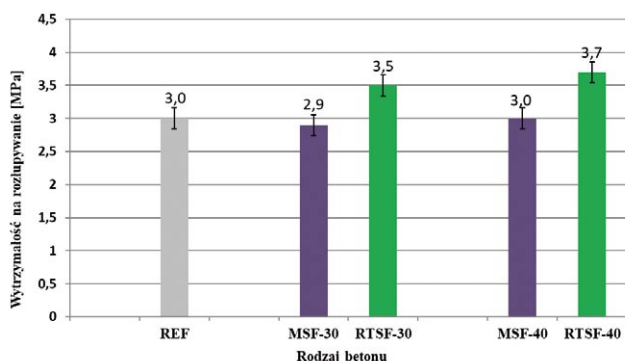
Wyniki badania wytrzymałości na zginanie po 28 dniach przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Wytrzymałość na zginanie po 28 dniach

Uzyskane wyniki badań wskazują, że betony z dodatkiem włókien RTSF osiągają większe wytrzymałości na zginanie niż betony z włóknami MSF.

### 4.3. Wytrzymałość na rozciąganie po rozłupywaniu po 28 dniach



Rys. 4. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

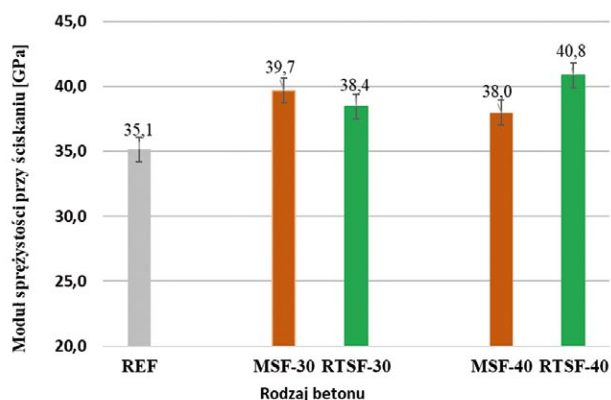
Wyniki badań wytrzymałościowych wskazują, że betony z dodatkiem włókien RTSF w ilości 30 i 40 kg/m<sup>3</sup> wykazują wyższe wytrzymałości na rozłupywanie jak betony z taką samą ilością włókien komercyjnych MSF.

Na tak dobre wyniki wytrzymałościowe betonów RTSF wpływa bardzo dobra przyczepność włókien z recyklingu opon, znacznie większa niż włókien MSF, co przedstawiono w artykule [8]. Powierzchnia włókien RTSF po procesie recyklingu jest chropowata i bardziej rozwinięta niż powierzchnia włókien komercyjnych, tworzą się na niej produkty hydratacji cementu wpływając na wzrost wytrzymałości betonów [8]. Również niejednorodny kształt włókien RTSF oraz niska obecność zanieczyszczeń gumowych przyczyniają się do poprawy właściwości wytrzymałościowych i dobre ich zakotwienie w matrycy cementowej [7, 11, 12, 22–24]. Badania wskazują, że w celu wykorzystania włókien z recyklingu opon do betonu konieczne jest ich dalsze przetwarzanie, aby zminimalizować zawartość zanieczyszczeń do poziomu ok. 0,5% masy [7, 25]. Dopiero po oczyszczeniu i posortowaniu RTSF może być stosowany w betonie jako zbrojenie rozproszone.

### 4.4. Moduł sprężystości

Wyniki badań modułu sprężystości przy ścisnieniu po 28 dniach przedstawiono na rysunku 5.

Wyniki badań wskazują, że włókna stalowe wpływają na wzrost modułu sprężystości betonu w porównaniu do betonu

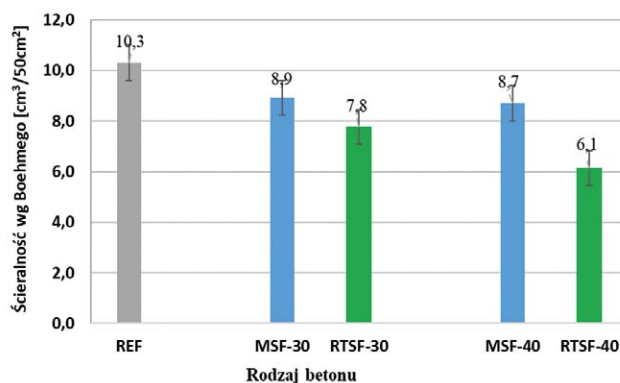


Rys. 5. Moduł sprężystości przy ścisnieniu po 28 dniach

referencyjnego bez włókien od 8 do 16%. Dla betonów z dodatkiem 30 kg/m<sup>3</sup> włókien moduł sprężystości jest porównywalny dla betonów z włóknami RTSF i MSF. Natomiast dla dozowania 40 kg/m<sup>3</sup> betony z dodatkiem włókien RTSF wykazały o ok. 7,4% większy moduł sprężystości w porównaniu z betonami z dodatkiem włókien MSF.

### 4.5. Ścieralność

Wyniki badania ścieralności przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Ścieralność betonu wg Boehmego

Wyniki badań wskazują, że włókna stalowe wpływają na obniżenie ścieralności betonu. Niska ścieralność oznacza, że mniej materiału zostało startego podczas badania, co jest korzystne dla betonów, zwłaszcza posadzkowych, podatnych na czynniki ścierne, takich jak pojazdy, wózki widłowe i inne. Betony z dodatkiem włókien z recyklingu opon RTSF wykazują niższą ścieralność niż betony z dodatkiem włókien komercyjnych MSF. Dla dozowania 40 kg/m<sup>3</sup> beton z RTSF wykazuje niższą o 30% ścieralność niż dla betonu z MSF. Na obniżenie ścieralności betonów z RTSF ma wpływ bardzo dobra przyczepność włókien RTSF do matrycy cementowej i skuteczne zbrojenie kruchej zaczynu cementowego.

## 5. Podsumowanie

Badania wykazały, że oczyszczone włókna stalowe z recyklingu opon mogą pełnić funkcję efektywnego zbrojenia rozproszonego do betonu, zwłaszcza przy odpowiedniej ich ilości (30–40 kg/m<sup>3</sup>). Przedstawione wyniki badań wskazują, że wyniki betonów z włóknami RTSF są równoważne, a w niektórych przypadkach nawet lepsze jak dla betonów z włóknami MSF. Oczyszczone włókna z opon o odpowiedniej długości wzmacniają kruchą matrycę cementową, mostkują pęknięcia powodując ich rozprzestrzenianie się oraz ograniczają powstawanie nowych pęknięć.

Aby włókna z recyklingu opon mogły pełnić funkcję zbrojenia do betonu, muszą być spełnione następujące warunki [5, 7, 8]:

- 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 odstawających długościami i średnicami, mieszanina musi być jednorodna, (szczególnie należy usunąć włókna zbyt krótkie < 9mm),
- ilość włókien z recyklingu opon musi być odpowiednio duża, ilość włókien należy ustalić w badaniach wstępnych,
- należy tak dozować włókna do mieszanki, aby zapewnić ich jednorodne rozmieszczenie, bez tworzenia miejscowych skupisk włókien.

Technologia oczyszczania i selekcji pierwotnie pozyskanych włókien z recyklingu opon przyczynia się do ich lepszej skuteczności wzmocnienia betonu. Dobra skuteczność zbrojenia oczyszczonych włókien z opon spowodowana jest bardzo dobrą przyczepnością do matrycy cementowej [8]. Powierzchnia włókien RTSF jest chropowata, niejednorodna oraz pokryta produktami hydratacji cementu co dobrze zespala włókna z zaczynem cementowym [7].

Również właściwości geometryczne włókien RTSF wpływają na dobrą efektywność zbrojenia. Nieregularny, powyginany i pofalowany kształt włókien oraz mieszanina długości i średnic ograniczają powstawanie i rozprzestrzenianie pęknięć w różnych płaszczyznach matrycy cementowej, dzięki czemu efekt mostkowania pęknięć jest skuteczniejszy niż w przypadku jednorodnych włókien. Wysokie właściwości wytrzymałościowe drutów w oponie sprawiają, że nawet po procesie recyklingu opon włókna nie tracą swych właściwości mechanicznych. Zastosowanie włókien z recyklingu opon musi być poprzedzone obszernymi badaniami wstępnymi, w celu dobrania odpowiedniej ich ilości.

Podsumowując, należy podkreślić trzy główne kierunki i korzyści wynikające ze stosowania oczyszczonych włókien stalowych z recyklingu opon samochodowych jako zbrojenie rozproszone do betonu:

- wytrzymałościowy – oczyszczone włókna RTSF mogą pełnić funkcję efektywnego zbrojenia rozproszonego do betonu i skutecznie wzmocnić kruchą matrycę cementową,
- środowiskowy – zmniejszenie śladu węglowego poprzez zastąpienie wysokoemisyjnej produkcji stali włóknami z recyklingu, oszczędność zasobów naturalnych, zagospodarowanie odpadów,
- ekonomiczny – koszt włókien z recyklingu opon jest niższy niż włókien stalowych komercyjnych.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Załęgowski K., Jackiewicz-Rek W., Garbacz A., Luc C., Ślad węglowy betonu, *Materiały Budowlane* 12/2013, str. 34–36
- [2] Kundak M., Lazić L., Črnko J., CO2 emissions in the steel industry, *Metallurgija*, tom 48, 3/2009, str. 193–197
- [3] Masson-Delmotte J. S., Zhai V. P., Pörtner H.-O., Roberts D., Skea J., Shukla P. R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews J.B.R., Chen Y., Zhou X., Gomis M.I., and T. W. (eds. Maycock T., Tignor M., IPCC, Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate c, 2018
- [4] Official Journal of the European Union, P9\_TA(2020)0382 EU strategy on adaptation to climate change European Parliament resolution of 17 December 2020 on the EU strategy on adaptation to climate change (2020/2532(RSP)) (2021/C 445/19) 29.10.2021, Online, 2021, Available: Official Journal of the European Union
- [5] Michalik A., Kupisz P., Piekarczyk A., Ocena możliwości zastosowania odpadowych włókien z opon jako zbrojenie betonu w aspekcie wymagań normy PN-EN 14889-1, in XI Konferencja Dni Betonu 2021, *Monografie Technologii Betonu*, 2021, str. 223–238
- [6] Michalik A., Chyliński F., Kupisz P., Zacharski Ł., Pichór W., Wpływ włókien stalowych z recyklingu opon na cechy wytrzymałościowe betonu, *Inżynieria i Budownictwo* 9–10/2022, str. 397–399
- [7] Michalik A., Chyliński F., Bobrowicz J., Pichór W., Effectiveness of Concrete Reinforcement with Recycled Tyre Steel Fibres, *Materials (Basel)*, tom 15, 2022, 2444, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15072444>
- [8] Michalik A., Chyliński F., Piekarczyk A., Pichór W., Evaluation of recycled tyre steel fibres adhesion to cement matrix, *Journal of Building Engineering*, tom 68, 2/2023, str. 1–16, 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.106146
- [9] Pawelska-Mazur M., Kaszyńska M., Properties of concrete with fibres from recycled tyres, in International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference: Section Green Buildings Technologies and Materials, 2018, str. 303–310, doi: DOI:10.5593/sgem2018/6.3/526.040
- [10] Pawelska-Mazur M., Kaszyńska M., Mechanical performance and environmental assessment of sustainable concrete reinforced with recycled end-of-life tyre fibres, *Materials (Basel)* tom 14, 2/2021, str. 1–20, doi: 10.3390/ma14020256
- [11] Senesavath S., Salem A., Kashkash S., The effect of recycled tyre steel fibers on the properties of concrete, *Pollack Periodica* 1/2021, str. 1–7, doi: 10.1556/606.2021.00388
- [12] Chen M., Si H., Fan X., Xuan Y., Zhang M., Dynamic compressive behaviour of recycled tyre steel fibre reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, tom 316, 10/2021, str. 125896, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125896
- [13] Ramarad S., Khalid M., Ratnam C. T., Chuah A. L., Rashmi W., Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future, Elsevier Ltd, *Progress in Materials Science*, tom 72, 3/2015, str. 100–140, doi: 10.1016/j.pmatsci.2015.02.004
- [14] Mastali M., Dalvand A., Sattarifard A. R., Illikainen M., Development of eco-efficient and cost-effective reinforced self-consolidation concretes with hybrid industrial/recycled steel fibers, *Construction and Building Materials*, tom 166, 2018, str. 214–226, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.147
- [15] Isa M. N., Pilakoutas K., Guadagnini M., Angelakopoulos H., Mechanical performance of affordable and eco-efficient ultra-high performance concrete (UHPC) containing recycled tyre steel fibres, *Construction and Building Materials*, tom 255, 2020, str. 119272, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119272
- [16] PN-EN 14889-1:2007:Włókna do betonu – Część 1:Włókna stalowe – Definicje, wymagania i zgodność, 2007
- [17] PN-EN 12390-3:2019-07: Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań, 2019
- [18] PN-EN 12390-5:2019-08: Badania betonu – Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań, 2019
- [19] PN-EN 12390-6:2011: Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań, 2011
- [20] PN-EN 12390-13:2021-12: Badania betonu – Część 13: Wyznaczenie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu, 2021
- [21] PN-EN 13892-3:2015-02: Metody badania materiałów na podkłady podłogowe – Część 3: Oznaczenie odporności na ścieranie według Bohmege, 2015
- [22] Zhang Y., Gao L., Influence of Tire-Recycled Steel Fibers on Strength and Flexural Behavior of Reinforced Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, doi: 10.1155/2020/6363105
- [23] Zhong H., Zhang M., Experimental study on engineering properties of concrete reinforced with hybrid recycled tyre steel and polypropylene fibres, *Journal of Cleaner Production*, tom 259, 2020, str. 120914, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120914
- [24] Akhtar T. et al., Experimental investigation of eco-friendly high strength fiber-reinforced concrete developed with combined incorporation of tyre-steel fiber and fly ash, *Construction and Building Materials*, tom 314, PA, 2022, str. 125626, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125626
- [25] Hu H., Papastergiou P., Angelakopoulos H., Guadagnini M., Pilakoutas K., Mechanical properties of SFRC using blended manufactured and recycled tyre steel fibres, *Construction and Building Materials*, tom 163, 2018, str. 376–389, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.116