

Ocena przyczepności włókien stalowych do matrycy betonowej po ich obróbce mechanicznej

The evaluation of adhesion of steel fibers to concrete matrix after their mechanical treatment

DOI: 10.15199/33.2022.11.01

Streszczenie. W artykule podjęto próbę oceny przyczepności stalowych włókien do matrycy cementowej po ich obróbce mechanicznej, która polegała na rozwinięciu powierzchni poboczniczy przez obróbkę ścierną przy użyciu elektrokorundu. W pierwszym etapie badań dokonano oceny powierzchni włókien (przed i po obróbce ścierną) za pomocą technik metalografii. Wykonano, a następnie porównano obrazy powierzchni włókien w skali mikro, jak również określono chropowatość powierzchni włókien. Drugi etap badań dotyczył bezpośredniej oceny przyczepności włókien do matrycy betonowej metodą pull-out.

Słowa kluczowe: przyczepność; matryca betonowa; stalowe włókna; badanie pull-out.

Abstract. In the article was attempt to evaluate the adhesion of steel fibers to the concrete matrix after their mechanical treatment. The processing of the fibers consisted of developing on of their surface by an abrasive treatment with the use of electrocorundum. In the first stage of the research, the surface of the fibers was assessed (before and after abrasion treatment) using the selected metallographic techniques. A micro scale images of the fibers surface were made and compared, as well as the surface roughness of the fibers was determined. The second stage of the research concerned the direct evaluation of adhesion using the pull-out test.

Keywords: adhesion; concrete matrix; steel fibers; pull-out test.

Jak powszechnie wiadomo, beton to materiał kruchy, a więc jego wytrzymałość na rozciąganie jest niewielka. Jednym z możliwych sposobów niwelowania tej cechy jest stosowanie w betonie stalowych włókien, które mają za zadanie przejmować naprężenia rozciągające i minimalizować propagację powstających rys [1 – 2]. Efektywność włókien w matrycy cementowej zależy od wielu czynników [1 – 11], spośród których za najbardziej istotne można uznać ich długość, przekrój poprzeczny (rodzaj przekroju oraz jego pole powierzchni), kształt podłużny, zawartość w mieszance oraz ukięrowanie osi włókien w stosunku do działających naprężeń.

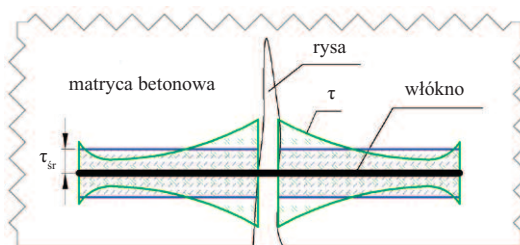
Pierwszą z wymienionych cech – długość włókien – badano i omawiano, m.in. w pracach [9, 10, 12], natomiast wpływ przekroju poprzecznego oraz kształtu podłużnego włókien na właściwości mechaniczne mieszanek fibro-betonowych był dokładnie analizowany w pracach [3 ÷ 10]. Na podstawie badań i analiz przyczepności prostego włókna

do matrycy betonowej stwierdzono, że rzeczywisty rozkład naprężeń ścinających τ na styku stali i betonu ma nieliniowy przebieg [9]. Poglądowo, rozkład tych naprężeń wzdłuż zbrojenia przedstawiono na rysunku 1 w postaci charakterystyki τ . Ze względu na trudności w dokładnym określeniu przebiegu nieliniowego rozkładu naprężeń, w analizie przyczepności stali do betonu wykorzystywane są rozkłady naprężeń w postaci funkcji stałej $\tau = \tau_{sr}$. Przyjmując uproszczony, stały rozkład naprężeń stycznych, można łatwo określić zależność (1), na podstawie której wyznacza się siłę P_{max} , powodującą oderwanie się włókna od matrycy:

$$P_{max} = \tau_{sr} \cdot A \quad (1)$$

gdzie:

A – pole poboczniczy włókna utwierdzonego w betonie.



Rys. 1. Naprężenia styczne w obrębie stalowego włókna
Fig. 1. Tangential stresses within the steel fiber

Zakładając, że średnica i długość włókna są stałe, zwiększenie efektywności zakotwienia można dokonać, modyfikując jego powierzchnię lub kształt przez odpowiednią obróbkę chemiczną i mechaniczną. Wykorzystanie chemicznych metod poprawy przyczepności włókien do betonu było badane i zostało omówione np. w [13 – 15]. Metody te obejmowały m.in. oczyszczanie powierzchni acetonem, cynkowanie, nakładanie powłoki nanokrzemionkowej, mosiężnej, jak również obróbkę fosforanem cynku.

Mechaniczne sposoby poprawy zakotwienia włókien w betonie polegają przede wszystkim na nadaniu im odpowiedniego kształtu. Modyfikacje te mogą dotyczyć profilu podłużnego całych włókien, fragmentu, bądź jedynie ich brzegów. Powstało na ten temat wiele prac badawczych, spośród których można wymienić m.in. [8, 11, 16 – 18]. Zwiększenie efektywności zakotwienia włókien w matrycy jest moim zdaniem również możliwe przez rozwinięcie ich powierzchni, tj. zwiększenie szorstkości powierzchni włó-

¹⁾ Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Ładowej, Środowiska i Geodezji; dorota.janikowska@tu.koszalin.pl

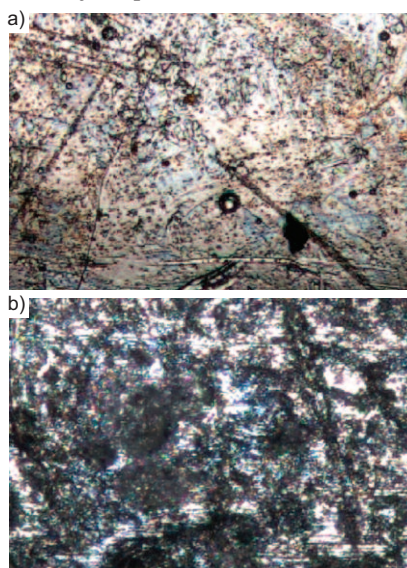
kien. Można tego dokonać, działając na powierzchnię włókien ostrokrawędziowym materiałem ściernym o odpowiedniej twardości. W efekcie powierzchnia włókien powinna się odznaczać większą chropowatością, a w konsekwencji większą przyczepnością do matrycy cementowej, niż w przypadku włókna o gładkiej powierzchni.

Badania metalograficzne

Ocenę skuteczności proponowanego w artykule sposobu poprawy zakotwienia włókien w betonie przeprowadzono, wykonując badania laboratoryjne. W pierwszej fazie analiz określono bezpośredni wpływ obróbki mechanicznej materiałem ściernym na powierzchnię włókien. Do badań wykorzystano stalowy drut o średnicy 1,3 mm, którego granicę plastyczności (350 MPa) oraz wytrzymałości (475 MPa) określono, zrywając włókna w maszynie wytrzymałościowej.

Spośród materiałów ściernych, które najczęściej stosowane są w obróbce strumieniowo-ścierniej, zdecydowano się na użycie elektrokorundu. Został on wybrany nieprzypadkowo, ponieważ jest to syntetycznie wytwarzana postać korundu, którego twardość sięga 9 w skali Mohsa. Ponadto jest ścierniwem, które w trakcie użytkowania ulega samoostrzeniu, dzięki czemu może być odzyskiwane i ponownie wykorzystywane. Obróbkę mechaniczną włókien przy użyciu elektrokorundu wykonano przez mieszanie stalowych włókien z drobnymi frakcjami (dobrano kombinację trzech frakcji o charakterystycznych wymiarach ziarna tego materiału ściernego 0,55 mm, 1,29 mm oraz 1,85 mm) w przygotowanym do tego celu urządzeniu. Następnie włókna (zarówno przed, jak i po obróbce ścierniej) oczyszczono z drobnych zanieczyszczeń w kąpieli wodnej, odtłuszczono i poddano badaniom metalograficznym. **Pierwsze badanie** polegało na uzyskaniu obrazu próbki o powiększeniu 200x w świetle odbitym od jej powierzchni przy użyciu mikroskopu metalograficznego Nikon MA 200, wyposażonego w oprogramowanie NIS Elements. Za pomocą tego badania możliwe było ujawnienie powierzchni w skali mikro oraz identyfikacja zmian

powierzchni wskutek obróbki mechanicznej, które są niewidoczne okiem nieuzbrojonym. Przykładowe obrazy uzyskane za pomocą mikroskopu przedstawiono na fotografii 1. Fotografia 1a pokazuje powierzchnię włókna przed obróbką. Jest ona dosyć gładka z drobnymi, nieregularnie rozmieszczonymi wgłębieniami („łezkami”). Natomiast fotografia 1b przedstawia powierzchnię włókna, która została rozwinięta. Odznacza się ona znacznie większą nieregularnością niż powierzchnia przed obróbką. W związku z tym, że całe włókna zostały poddane obróbce ścierniej, powstałe zarysowania rozmieszczone są w sposób losowy, na całej ich powierzchni.



Fot. 1. Powierzchnia włókna: a) przed obróbką mechaniczną; b) po obróbce mechanicznej

Photo 1. The surface of the fiber: a) before machining; b) after machinical treatment

Drugie badanie metalograficzne polegało na określeniu chropowatości powierzchni stalowych włókien. Wykorzystano w tym celu aparaturę Hommel-Etamic do stykowego pomiaru nierówności wyposażoną w program TurboWave V7.42. Stanowisko badawcze przedstawiono na fotografii 2. Badaniu poddano losowo wybrane trzy włókna, na powierzchni których pomiaru dokonano w pięciu różnych miejscach. Określono średnie arytmetyczne odchylenie od linii średniej Ra oraz największą wysokość chropowatości Rz. Badanie wykonano na odcinku pomiarowym wynoszącym 1,50 mm i przy zadanej pręd-



Fot. 2. Badanie chropowatości powierzchni stalowych włókien – stanowisko pomiarowe

Photo 2. Testing the surface roughness of steel fibers – the measuring station

kości posuwu końcówki pomiarowej 0,05 mm/s. W tabeli 1 zestawiono średnie wartości zanotowanych odczytów w przypadku włókien gładkich (seria A) oraz poddanych obróbce mechanicznej (seria B).

Porównując ze sobą zarówno prezentowane na zdjęciach powierzchnie, jak i wyniki pomiarów chropowatości stwierdzono, że włókna poddane obróbce ścierniej z użyciem elektrokorundu będą odznaczały się lepszą przyczepnością do betonu niż włókna, których nie poddano tego rodzaju obróbce.

Tabela 1. Średnie z pomiarów chropowatości

Table 1. Average roughness from measurements

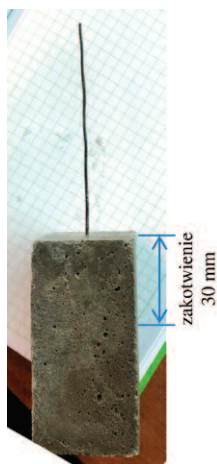
Parametry	Włókna z		Wzrost [%]
	gładką powierzchnią (seria A)	rozwiniętą powierzchnią (seria B)	
Ra [µm]	0,170	0,539	317
Rz [µm]	1,075	3,357	312

Badanie pull-out

W drugiej fazie badań laboratoryjnych określono wpływ zaproponowanej obróbki mechanicznej na efektywność zakotwienia włókien metodą pull-out. W przypadku odpowiednio określonej liczby próbek przeprowadzono eksperyment, który polega na wyciągnięciu pręta (włókna) o średnicy 1,3 mm, zakotwionego na głębokość 30 mm z betonowego bloczka o wymiarach 4 x 4 x 8 cm. Do wykonania próbek wykorzystano formy do przygotowywania beleczek cementowych o wymiarach 4 x 4 x 16 cm. Natomiast centrowanie osadzonych włókien wykonano, wykorzystując specjalnie przygotowane przekładki z nawierconymi otworami o średnicy rów-

nej średnicy włókna. Próbkę wykonano z normowej zaprawy cementowej, z użyciem cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, piasku normowego oraz wody w proporcjach odpowiednio 1: 3: 0,5. Podczas wykonywania próbek osadzono włókna stalowe, odpowiednio je zabezpieczając na czas dojrzewania betonu (fotografia 3). Następnie próbki uformowane w warunkach normowych poddano pielęgnacji na mokro przez 28 dni.

Po osiągnięciu dojrzałości próbki przebadano. Wykonano łącznie 26 prób: 13 z włóknami, których powierzchnię nie modyfikowano (seria A), i 13 z włóknami z powierzchnią rozwinętą (seria B). Podczas badania w maszynie wytrzymałościowej próbki umieszczano w specjalnie przygotowanym uchwycie montażowym, aby nie chwytać bezpośrednio elementu betonowego dolnymi szczękami maszyny i nie wywołać w nim dodatkowych naprężeń ściskających, które mogłyby zaburzyć pomiar bądź uszkodzić próbki (fotografia 4).



Fot. 3. Uformowana próbka
Photo 3. The formed sample

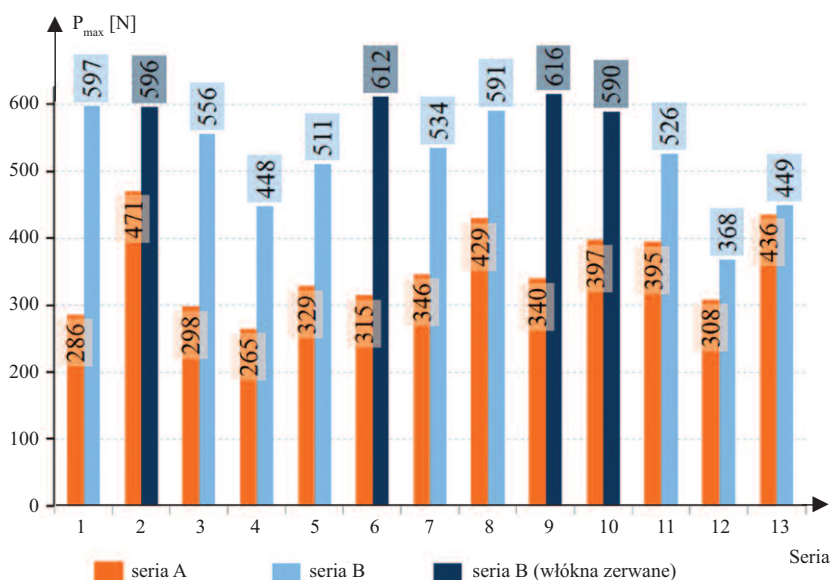
Do chwytania stalowych włókien zastosowano szczęki z drobnymi karambami. W trakcie wykonywania testu pull-out rejestrowano wartość siły P oraz odpowiadające jej przemieszczenie s wyciąganego włókna względem betonowego bloczka. Przyjęto stały przyrost siły wynoszący 10 N/s, a pomiary każdej próbki rejestrowano do momentu zaniku oporu wyciąganego włókna.

Podczas badań próbek serii A wyciągnięto wszystkie włókna (żadne ze stalowych włókien nie uległo zniszczeniu w jego przekroju), natomiast w przypadku serii B tylko 4 spośród 13 włókien uległy zerwaniu (osiągnięto pełne zamocowanie włókien w betonie). Nie odnotowano żadnego



Fot. 4. Stanowisko pomiarowe z umieszczoną próbką
Photo 4. The measuring station with the placed sample

poślizgu w górnych oraz dolnych szczękach maszyny wytrzymałościowej. Nie doszło również do zerwania włókien w górnych szczękach bądź bezpośrednio w ich sąsiedztwie. Można więc stwierdzić, że **próbki zostały prawidłowo umieszczone i przebadane w maszynie, a otrzymane dane są miarodajne**. Uzyskane w trakcie badania pull-out wartości maksymalnych sił w przypadku każdej próbki w obu seriach przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Siła maksymalna P_{max}
Fig. 2. The maximum force P_{max}

Analiza wyników

Przeprowadzono obszerną analizę wyników uzyskanych podczas badań. W pierwszym etapie oceniono reprezentatywność prób, przyjmując wartość tolerancji $v = 12\%$ oraz zakładając poziom istotności wynoszący $\alpha = 5\%$. Stwierdzono, że po 13 próbek w każdej z serii jest liczbą wystarczającą. Dodatkowo, przy użyciu metody Dixona dowiedziono, że nie ma podstaw do odrzucenia wartości ekstremalnych w obu seriach. Ponadto sprawdzono rozbieżności pomiędzy średnimi wartościami sił powodujących wyciągnięcie drutu z matrycy betonowej (wg rozkładu t – Studenta) w przypadku włókien z powierzchnią gładką oraz rozwinętą. Przy założonym poziomie istotności $\alpha = 5\%$ i liczbie stopni swobody $k = 24$, porównano teoretyczną wartość statystyki ($t_t = 2,0639$) z wartością empiryczną ($t_e = 6,603$) przy $t_t < t_e$. Można zatem uznać, że różnice pomiędzy rozpatrywanymi średnimi dwóch serii są na tyle istotne, że zbiory wyników maksymalnych sił należy traktować jak należące do różnych populacji. Określono średnie arytmetyczne wartości maksymalnych sił P_{max}^a obu zbiorów i zestawiono je w tabeli 2. Różnica pomiędzy obiema seriami jest znaczna i wynosi 52% (tabela 2). W ramach analizy statystycznej określono również dolne szacowanie wartości siły powodującej oderwanie włókna od betonu z prawdopodobieństwem $p = 0,95$,

Tabela 2. Maksymalna arytmetyczna wartość sił P_{max}^a obu serii

Table 2. Maximum arithmetic force values P_{max}^a for both series

Parametry	Seria A	Seria B	Wzrost
Średnia arytmetyczna na wartości maksymalnych siły P_{max}^a [N]	355	538	52%

przy założeniu normalnego rozkładu wg zależności (2):

$$P_{min} = P_{max}^a \cdot (1 - t \cdot v) \quad (2)$$

gdzie:

$t = 2,179$ jest wartością odciętej odczytanej z rozkładu normalnego przy prawdopodobieństwie 95% dla rozkładu t – Studenta, a v – wskaźnikiem zmienności. Wyniki zestawiono w tabeli 3.

Analizując otrzymane wartości, stwierdzono, że wskaźnik zmienności jest mniejszy w przypadku włókien z powierzchnią rozwiniętą. Można więc z większym prawdopodobieństwem przewidzieć charakter zachowania się tego typu włókien w interakcji z matrycą betonową. Porównano także średnie

Tabela 3. Szacunkowe dolne wartości sił powodujące oderwanie włókna z betonu

Table 3. Estimated lower values of the forces causing the fiber to peel off the concrete

Parametry	Seria A	Seria B
Wskaźnik zmienności v [%]	18,14	14,20
Wartość siły P_{min} [N]	214,68	371,53

wartości sił w przypadku obu serii przy przemieszczeniu s o wartościach podanych w tabeli 4. Wyraźnie widać, że próbki o powierzchni rozwiniętej charakteryzują się większym oporem wyciągania włókien niż próbki o powierzchni gładkiej. Średnio wzrost tego oporu wynosi ok. 45%.

Tabela 4. Średnia arytmetyczna wartość sił P^a

Table 4. Arithmetic mean values of the P^a forces

Oznaczenia	Przemieszczenie s [mm]					
	2	4	6	8	10	12
Seria A	Średnia wartość siły P^a [N]					
	207,95	212,93	196,16	164,81	133,23	107,37
Seria B	368,64	280,34	275,35	240,10	171,78	155,44
	77% ↑	32% ↑	40% ↑	46% ↑	29% ↑	45% ↑

Ponadto, na podstawie otrzymanych wyników badań, określono przebieg charakterystyk siła-przemieszczenie ($P - s$) każdego pojedynczego włókna w obu seriach oraz uśrednioną charakterystykę $P(s)$. W tym celu przedmiotowe zbiory danych aproksymowano zależnością funkcyjną (3) [19], stosując metodę najmniejszych różnic kwadratów:

$$P(s) = P'_{max} \cdot \frac{\alpha \cdot \left(\frac{s}{s'}\right)}{\alpha - 1 + \left(\frac{s}{s'}\right)^\alpha} \quad (3)$$

gdzie:

α – współczynnik dopasowania funkcji;

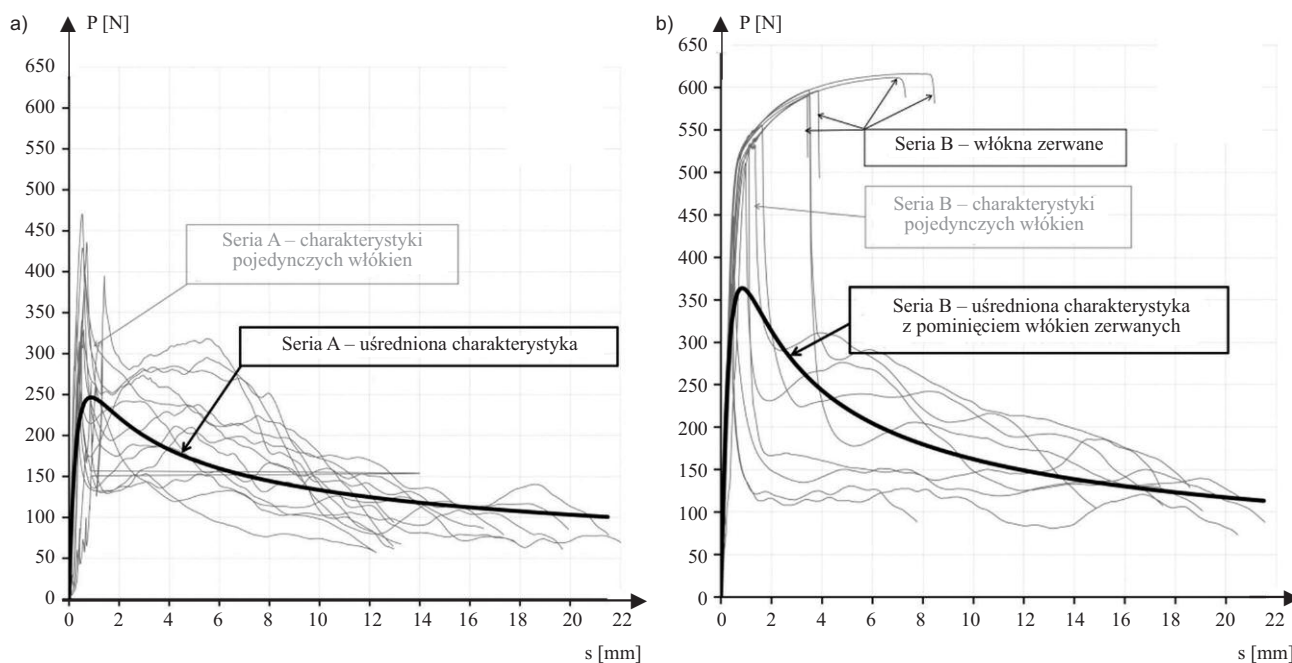
P'_{max} – maksymalna wartość siły;

s'_{max} – przemieszczenie odpowiadające wartości P'_{max} .

W przypadku serii B aproksymacja obejmowała zbiór danych dotyczących włókien, które wysnuły się z matrycy betonowej (nie uległy zerwaniu). Określone na drodze aproksymacji parametry liczbowe obu serii zestawiono w tabeli 2, natomiast wykresy funkcji $P(s)$ obu zbiorów danych przedstawiono na tle charakterystyk $P - s$ (rysunki 3a i 3b). W celu sprawdzenia poziomu dopasowania zbioru danych do funkcji aproksymującej (3) wyznaczono współczynnik korelacji R (tabela 5). W obu seriach jego wartość jest zbliżona do jedności, co oznacza silną korelację zbioru danych z funkcją. Ponadto określono energię E potrzebną do wyciągnięcia drutu z matrycy zgodnie z zależnością (4) jako obszar pod wykresem charakterystyki $P(s)$:

$$E(s) = \int_0^s P(s) ds \quad (4)$$

Wyznaczone średnie wartości energii w przypadku przemieszczeń wynoszących kolejno 2, 4, 6, 8, 10 i 12 mm (tabela 6). W przypadku serii B pominięto w określeniu wartości energii te próbki, w których doszło do zerwania drutu. Widać wyraźnie, że energia po-



Rys. 3. Charakterystyka siła – przemieszczenie $P - s$: a) seria A – włókna o gładkiej powierzchni; b) seria B – włókna poddane modyfikacji
Fig. 3. Characteristic force displacement $P - s$: a) series A – fibers with a smooth surface; b) series B – modified fibers

Tabela 5. Stałe wartości liczbowe funkcji P(s)

Table 5. Constant numerical values of the function P(s)

Oznaczenia	α	s' [mm]	P'_{\max} [N]	Współczynnik korelacji R
Seria A	1,38	0,88	246	0,942
Seria B	1,48	0,84	364	0,979

Tabela 6. Średnie wartości energii E

Table 6. Average energy values

Oznaczenia	Przemieszczenie s_k [mm]					
	2	4	6	8	10	12
	średnia wartość energii E [J]					
Seria A	0,41	0,83	1,24	1,61	1,91	2,15
Seria B	0,64	1,15	1,56	2,05	2,42	2,74
	36% ↑	28% ↑	21% ↑	21% ↑	21% ↑	22% ↑

trzebna do wyciągnięcia drutu z betonu jest większa w przypadku włókien poddanych modyfikacji mechanicznej.

Na podstawie analizy otrzymanych wyników stwierdzono, że proponowany sposób modyfikacji powierzchni włókien w istotny sposób poprawia efektywność ich zamocowania w matrycy betonowej. Dowodem tego jest większa siła zakotwienia oraz energia wyciągnięcia włókien poddanych obróbce mechanicznej.

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono autorską propozycję poprawy efektywności zbrojenia rozproszonego przez obróbkę ścierną z użyciem elektrokorundu. Wpływ obróbki ścierniej na powierzchnię stalowych włókien określono za pomocą badań przy użyciu mikroskopu metalograficznego oraz aparatury do pomiaru chropowatości. Natomiast wpływ rozwinięcia powierzchni z zastosowaniem elektrokorundu na efektywność zakotwienia włókien w betonie określono bezpośrednio, wykonując badanie pull-out.

Na podstawie zebranych i opracowanych wyników wyciągnięto następujące wnioski:

- wykonane zdjęcia powierzchni stalowych włókien w powiększeniu 200x przedstawiają wyraźną różnicę pomiędzy stanem powierzchni przed oraz po obróbce;

- zaobserwowane podczas pomiaru chropowatości różnice pomiędzy próbkami należącymi do dwóch różnych se-

rii świadczą o znacznym rozwinięciu ich powierzchni oraz zwiększeniu szorstkości;

- na podstawie analizy badań pull-out wykazano, że włókna z rozwiniętą powierzchnią odznaczają się lepszą przyczepnością do betonu niż włókna „gładkie”. Otrzymane wyniki wyraźnie wskazują na to, że zarówno maksymalna siła wyrwywająca, jak i praca wyrwywania włókien z betonu są znacznie większe w przypadku włókien poddanych obróbce ścierniej. Ponadto, rezultaty badań współpracy betonu z włóknami o rozwiniętej powierzchni charakteryzują się mniejszym rozrzutem wyników;

- zaproponowany sposób poprawy współpracy stalowych włókien z betonem jest ekonomiczny, ponieważ koszty materiału ściernego, możliwość jego wielokrotnego użycia, jak również sam proces obróbki włókien (mieszanie stalowych włókien ze ścierniwem) nie wymaga znacznych nakładów finansowych.

Na podstawie wyników badań można przypuszczać, że zaproponowany sposób obróbki powierzchni włókien ma korzystny wpływ na efektywność ich zakotwienia w betonie. Sprawdzenie tego przypuszczenia jest przedmiotem kolejnych badań doświadczalnych.

Literatura

- [1] Beglarigale A, Yazici H. Pull-out behavior of steel fiber embedded in flowable RPC and ordinary mortar. *Construction and Building Materials*. 2015; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.
- [2] Alwan JM, Naaman AE, Hansen W. Pull-Out Work of Steel Fibers From Cementitious Composites: Analytical Investigation. *Cement & Concrete Composites*. 1991; 13: 247 – 255.
- [3] Kim DJ, Park SH, Ryu GS, Koh KT. Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers. *Construction and Building Materials*. 2011; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.
- [4] Soulioti DV, Barkoula NM, Paipetis A, Matikas TE. Effects of Fibre Geometry and Volume Fraction on the Flexural Behaviour of Steel-Fibre Reinforced Concrete. *Strain*. 2011; DOI: 10.1111/j.1475-1305.2009.00652.x.
- [5] Nataraja MC, Dhang N, Gupta A. P. Toughness characterization of steel fiber-reinforced concrete by JSCE approach. *Cement and Concrete Research*. 2000; DOI: 10.1016/s0008-8846(00)00212-x.

- [6] Kater J, Domski J. Quality and mechanical properties of engineered steel fibres used as reinforcement for concrete. *Construction and Building Materials*. 2012; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.

- [7] Abdallah S, Fan M, Zhou M, Le Geyt S. Anchorage Effects of Various Steel Fibre Architectures for Concrete Reinforcement. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2016; DOI: 10.1007/s40069-016-0148-5.

- [8] Zile E, Zile O. Effect of the fiber geometry on the pullout response of mechanically deformed steel fibers. *Cement and Concrete Research*. 2013; DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.10.014.

- [9] Cunha VMCF, Barros JAO, Sena-Cruz JM. Bond-Slip Mechanisms of Hooked-End Steel Fibers in Self-Compacting Concrete. *Materials Science Forum*. 2008; DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.587-588.877.

- [10] Abdallah S, Fan M, Zhou X. Effect of Hooked-End Steel Fibres Geometry on Pull-Out Behaviour of Ultra-High Performance Concrete. *Construction and Architectural Engineering*. 2016; 10 (12): 1594 – 1599.

- [11] Won J.-P, Hong B.-T, Lee S.-J, Choi SJ. Bonding properties of amorphous micro-steel fibre-reinforced cementitious composites. *Composite Structures*. 2013; DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.02.015.

- [12] Markovic I. High-Performance Hybrid-Fibre Concrete. *Netherlands: DUP Science*; 2006.

- [13] Wiemer N, Wetzel A, Schleiting M, Krooß P, Vollmer M, Niendorf T, Böhm S, Middendorf B. Effect of Fibre Material and Fibre Roughness on the Pullout Behaviour of Metallic Micro Fibres Embedded in UHPC. *Materials*. 2020; DOI: 10.3390/ma13143128.

- [14] Zhu Y, Zhang Y, Qu S, Kumar A. Flexural and Tensile Strength of Ultra-High-Performance Concrete with ZnPh-Treated Steel Fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020; DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003372.

- [15] Oh T, You I, Banthia N, Yoo D.-Y. Deposition of nanosilica particles on fiber surface for improving interfacial bond and tensile performances of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Composites Part B*. 2021; DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109030.

- [16] Chun B, Yoo D.-Y, Banthia N. Achieving slip-hardening behavior of sanded straight steel fibers in ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2020; DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103669.

- [17] Yoo D.-Y, Chun B, Kim J.-J. Bond performance of abraded arch-type steel fibers in ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2020; DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103538.

- [18] Domski J, Kater J, Zakrzewski M, Ponikiewski T. Comparison of the mechanical characteristics of engineered and waste steel fiber used as reinforcement for concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2017; DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.04.165.

- [19] Carreira JD, Chu K.-H. Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression. *American Concrete Institute Journal*. 1985; 82: 797 – 804.

Przyjęto do druku: 06.09.2022 r.