

dr inż. Julita Krassowska^{1*)}

ORCID: 0000-0001-9209-1285

dr inż. Paweł Wolka²⁾

ORCID: 0000-0001-7921-720X

Wpływ metakaolinitu i zeolitu na przyczepność prętów BFRP i GFRP do betonu

Influence of metakaolinite and zeolite on the adhesion of BFRP and GFRP bars to concrete

DOI: 10.15199/33.2023.10.02

Streszczenie. Celem przeprowadzonych badań jest ustalenie, w jaki sposób obecność metakaolinitu i zeolitu wpływa na przyczepność prętów zbrojeniowych do betonu oraz na jego wybrane właściwości mechaniczne. Próbkę do badań przygotowano zgodnie z obowiązującą procedurą testu belkowego wg [1]. Otrzymane wyniki pozwoliły na analizę porównawczą próbek referencyjnych oraz zawierających metakaolinit i zeolit. Badania wykazały, że wprowadzenie do betonu aktywnego dodatku pucolanowego w postaci metakaolinitu i zeolitu powoduje zwiększenie wartości naprężeń przyczepności o ok. 20% w przypadku prętów szklanych GFRP i 15% bazaltowych BFRP, przede wszystkim w fazie zniszczenia.

Słowa kluczowe: pręty szklane; pręty bazaltowe; metakaolinit; zeolit.

Abstract. The aim of the conducted research is to determine how the presence of metakaolinite and zeolite affects the adhesion of reinforcing bars to concrete and selected mechanical properties. Test samples were prepared in accordance with the applicable beam test procedure according to [1]. The obtained results allowed for a comparative analysis of the reference samples and those with metakaolinite and zeolite. The research showed that the introduction of an active pozzolanic additive in the form of metakaolinite and zeolite into concrete leads to an improvement in adhesion stress values of approximately 20% for GFRP glass bars and 15% for BFRP basalt bars, especially during the failure phase.

Keywords: glass bars; basalt bars; metakaolinite; zeolite.

Na rynku wyrobów budowlanych zwiększa się zainteresowanie produkcją i stosowaniem prętów kompozytowych do zbrojenia elementów z betonu ze względu na ich liczne zalety, takie jak odporność korozyjna, brak przewodności elektrycznej, niewrażliwość na pole elektromagnetyczne, niewielka masa prętów. Przy produkcji prętów FRP (polimer zbrojony włóknami) stosowane są różne rodzaje wykończenia powierzchni: opłot z pasm włókien nasączonych żywicą; posypka kwarcowa; tekstura nadawana podczas produkcji. Metody produkcji nie gwarantują jednak przyczepności prętów FRP do betonu [2 – 4], dlatego też konieczne jest każdorazowo jej badanie.

Prawidłowa współpraca betonu i zbrojenia umożliwia przekazywanie naprężeń rozciągających lub ściskających powstających w betonie na pręty zbrojenio-we. Przyczepność to zjawisko, na które mają wpływ przede wszystkim: tarcie

między elementami; klasa betonu; wytrzymałość betonu na ściskanie i rozciąganie; ułożenie, zagęszczenie oraz pielęgnacja mieszanki betonowej; kształt, średnica i sposób rozmieszczenia prętów zbrojeniowych; adhezja materiałów [5]. Relatywnie prostym zabiegiem zwiększającym przyczepność prętów kompozytowych do betonu może być modyfikacja ich strefy kontaktowej przez zastosowanie aktywnych dodatków do betonu. Jednym z cenionych dodatków o właściwościach pucolanowych jest **metakaolinit**, który powstaje w wyniku prażenia naturalnej glinki kaolinu w temperaturze 700 – 900°C [6]. Wytwarzanie metakaolinitu jest procesem dużo mniej energochłonnym niż produkcja cementu, ponieważ zarówno temperatura, jak i czas wypalania są niższe. Zgodnie z [7] do wytworzenia tony metakaolinitu potrzeba ok. 80% mniej energii niż do wyprodukowania tony cementu. Przeprowadzone dotychczas badania dowodzą również, że wpływa on na poprawę parametrów mechanicznych oraz odporność betonu na agresję chemiczną [8 – 10], a zmieniając mikrostrukturę zaczynu w betonie, zwiększa jego trwałość [11].

Zeolity to glinokrzemiany o porowatej budowie zawierające duże ilości reaktywnych SiO₂ i Al₂O₃. Wstępne badania potwierdziły wpływ modyfikatora w postaci zeolitu na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie i zginanie, ale tylko przy udziale tego modyfikatora nieprzekraczającym 15% masy cementu. Ponadto dodatek zeolitu zwiększa trwałość konwencjonalnego betonu, nie tylko przez zmniejszenie przepuszczalności betonu, ale przede wszystkim przez zwiększenie odporności na reakcję z kruszywem alkalicznym [12].

Ze względu na brak w literaturze danych dotyczących modyfikacji betonu za pomocą dodatku metakaolinitu i zeolitu, jako częściowego zamiennika cementu, i ich wpływu na przyczepność zbrojenia, zbadaliśmy, jak obecność aktywnych dodatków pucolanowych wpływa na przyczepność prętów stalowych, bazaltowych i szklanych do betonu oraz na wybrane jego właściwości.

Badania

W badaniach stosowano beton cementowy oraz beton, w którym 10% masy cementu zastąpiono metakaolini-

¹⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

²⁾ Astra Technologia Betonu sp. z o.o.

^{*}) Adres do korespondencji:

j.krassowska@pb.edu.pl

tem lub zeolitem klinoptilolitowym. Przeanalizowano wpływ dodatku na przyczepność prętów stalowych, bazaltowych i szklanych do otaczającego je betonu. Badania przeprowadzono w dziewięciu seriach przedstawionych na rysunku 1.

Materiały użyte do badań. W skład mieszanki betonowej wchodził cement CEM I 42,5 w ilości 360 kg/m³, woda do uzyskania wskaźnika w/c = 0,45 oraz kruszywo o uziarnieniu 0 – 16 mm w ilości 1914 kg/m³. Zastosowano metakaolinit ASTRA MK-40 o właściwo-

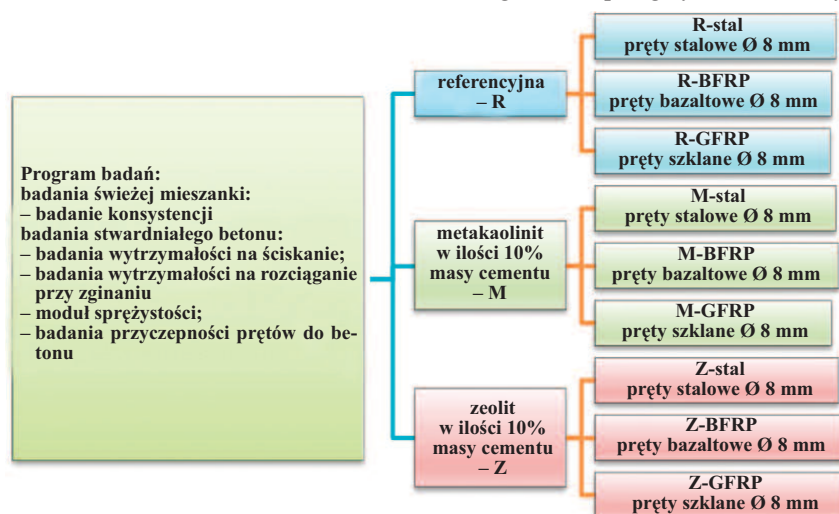
Mieszankę referencyjną zaprojektowano zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 206:2014 [13], a pozostałe mieszanki mineralne dobierano metodą krzywych granicznych optymalnego uziarnienia. Ponadto dobór ilości składników mieszanki betonowej projektowano metodą analityczno-doświadczalną wg PN-EN 206:2014.

Metody badań. Badania konsystencji mieszanki betonowej wykonano metodą opadu stożka wg normy PN-EN 12350-2 [N1]. Badania stwardniałego betonu polegały na badaniu wy-

do betonu wykorzystano badanie za pomocą testu belkowego wg normy [1].

Zestaw do badań zawiera dwie belki, każda z nich ma wymiary 100 x 180 x 375 mm. Badaniu przyczepności poddano pręty zbrojeniowe stalowe, bazaltowe i szklane o \varnothing 8. Zastosowano także pomocnicze zbrojenie (rysunek 2) w postaci siatek z prętów stalowych \varnothing 6 w obu belkach każdego elementu próbnego.

Stanowisko do badania za pomocą testu belkowego (fotografia 2) zawierało dwa obrotowe łożyska rolkowe umieszczone w odległości 650 mm od siebie. Próbkę obciążano była dwiema siłami punktowymi przyłożonymi symetrycznie do środka rozpiętości belki o długości całkowitej 810 mm. W trakcie badania, zadaniem przegubu stalowego jest przenoszenie naprężeń ze strefy ściskanej, dzięki czemu możliwe jest ugięcie bez naprężeń, które doprowadziłyby do zmiążdżenia betonu. Pręt w strefie rozciąganej jest wyrwany z betonu w czasie badania. Dokonuje się pomiarów zależności siła – poślizg pręta za pośrednictwem czujników umieszczonych na jego końcach z dokładnością odczytu 0,001 mm. Każdą próbkę obciążano, zwiększając naprężenia σ w przecie odpowiednio 0 – 80 – 160 – 240 MPa.

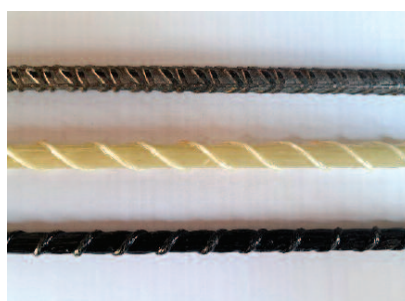


Rys. 1. Program badań

Fig. 1. Research program

ciach pucolanowych, który uzyskuje się w procesie kalcynacji kaolinitu, a następnie jego przemiału. Gęstość materiału wynosi 2,61 g/cm³, a powierzchnia właściwa określona metodą BET – 14,6 m²/g. Wskaźnik aktywności puculanowej, badany zgodnie z PN-EN 450-1:2012 po 28 dniach, był równy 115,7%, a po 90 dniach 114,3%. Ponadto użyto zeolitu naturalnego ASTRA Z-50, który klasyfikowany jest jako naturalna puculana. Dodatek charakteryzuje się drobnoziarnistą strukturą o powierzchni właściwej określonej testem BET równej 32,5 m²/g oraz gęstością 2,29 g/cm³. Wskaźnik aktywności puculanowej, badany zgodnie z PN-EN 450-1:2012 po 28 dniach, był równy 102,7%, a po 90 dniach 106,4%.

Jako wzmocnienie zastosowano pręty o średnicy 8 mm, w tym stalowe o granicy plastyczności 500 MPa, szklane o wytrzymałości na rozciąganie 880 MPa oraz bazaltowe o wytrzymałości na rozciąganie 750 MPa (fotografia 1).



Fot. 1. Pręty zbrojeniowe użyte do badań (od góry stalowe, szklane, bazaltowe)

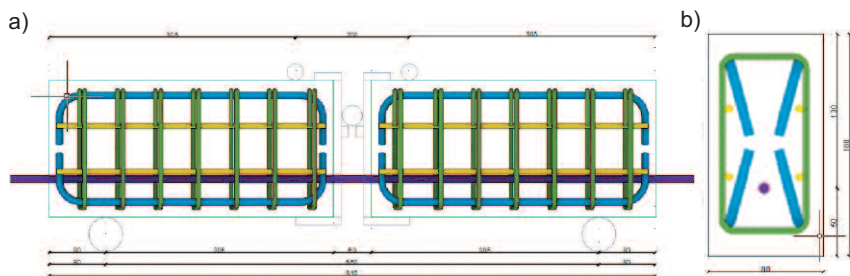
Photo 1. Reinforcing bars used for testing (from above steel, glass, basalt)

trzymałości betonu na ściskanie zgodnie z PN-EN 12390-3:2011 [14], wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wg PN-EN 12390-5:2011 [15], wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wg PN-EN 12390-6:2010 [16], a moduł sprężystości podłużnej oznaczono zgodnie z PN-EN 12390-13:2014 [17]. Do określenia przyczepności prętów stalowych, bazaltowych i szklanych

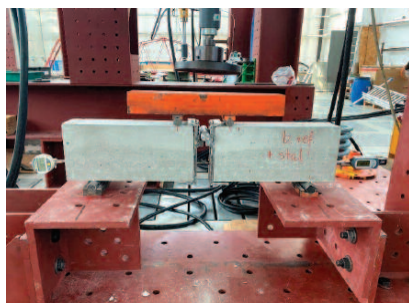
Wyniki badań i ich analiza

Analiza wyników badań stwardniałego betonu. W tabeli 1 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie, rozciąganie przy zginaniu oraz modułu sprężystości podłużnej. W przypadku próbek serii R zastosowano beton referencyjny, serii M – beton z dodatkiem 10% metakaolinitu, a serii Z – beton z dodatkiem 10% zeolitu. Wytrzymałość średnią wyliczono na podstawie średniej arytmetycznej z poszczególnych serii próbek.

Mieszanka bez metakaolinitu wykazała mniejszą wysokość opadu stożka niż próbka z tym dodatkiem, ale nie jest to znaczna różnica, co potwierdza wspólna klasa konstrukcji w przypadku obu próbek. Wyniki konsystencji mieszanki betonowej z zeolitem pokazują, że ciekłość mieszanki została zmniejszona z klasy S4 (160 – 210 mm) na klasę S1 (10 – 40 mm), co w przyszłości



Rys. 2. Zbrojenie pomocnicze belek do badań: a) rzut pionowy; b) przekrój [1]
 Fig. 2. Auxiliary reinforcement of beams for testing: a) vertical projection; b) cross-section [1]



Fot. 2. Stanowisko do testu belkowego badania przyczepności betonu do zbrojenia
 Photo 2. A beam test stand for testing the adhesion of concrete to reinforcement

należy uwzględnić, stosując większą ilość superplastyfikatora w celu uzyskania żądanej konsystencji.

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że beton z dodatkiem 10% metakaolinitu oraz beton zawierający 10% zeolitu ma wytrzymałość na ściskanie większą do 20% w porównaniu z betonem referencyjnym. Zauważono również korzystny wpływ dodatku metakaolinitu i zeolitu na wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (zwiększenie o 10%) oraz na moduł sprężystości podłużnej (zwiększenie o 5%).

Przyczepność prętów stalowych i kompozytowych FRP do betonu.

Rysunek 3 przedstawia wartości poślizgu podczas badania przyczepności.

Tabela 1. Średnie parametry badanego betonu μ , odchylenie standardowe σ i współczynnik zmienności ν
 Table 1. Average parameters of the tested concrete μ , standard deviation σ and coefficient of variability ν

Próbka	Seria R – beton referencyjny			Seria M – beton modyfikowany metakaolinitem			Seria Z – beton modyfikowany zeolitem		
	μ	σ	ν	μ	σ	ν	μ	σ	ν
Badanie konsystencji mieszanki betonowej – opad stożka [mm]	200	2,35	5,65	210	1,63	2,4	35	1,17	2,52
Wytrzymałości na ściskanie [MPa]	51,96	1,21	1,78	62,15	0,87	1,87	59,33	6,59	3,25
Wytrzymałości betonu na rozciąganie przy zginaniu [MPa]	3,55	0,27	5,68	3,84	0,65	9,87	3,79	0,10	0,01
Moduł sprężystości podłużnej [GPa]	29,33	1,57	1,01	30,55	1,35	2,55	33,25	0,99	0,98

zgu podczas badania przyczepności prętów do betonu w odniesieniu do przyłożonej siły. Wartość poślizgu była większa po stronie, w której doszło do utraty przyczepności. W początkowej fazie można zauważyć jednakowy przebieg wskazań na obu czujnikach. Oznacza to, że po obu stronach elementu badanego przyczepność i poślizg prętów w pierwszej fazie obciążenia były jednakowe.

Porównywano pręty GFRP i BFRP o uźebrowaniu w postaci oplotu z żebrowanymi prętami stalowymi o zbliżonej średnicy ekwiwalentnej. Docelowym kryterium zniszczenia w teście belkowym jest zerwanie prętów stalowych lub kompozytowych. W przypadku żadnej badanej belki nie osiągnięto całkowitego wyslizgnięcia się zbrojenia, co świadczy o bardzo dobrej przyczepności wszystkich badanych prętów.

Wykres zależności siła [kN] – przemieszczenie pręta [mm] wszystkich serii badanych prętów stalowych charakteryzował się jednakowym przebiegiem. W pierwszej fazie był liniowy, druga faza charakteryzowała się nieliniowym wzrostem do osiągnięcia wartości maksymalnej siły przyczepności aż do fazy zniszczenia. W serii z prętami stalowymi

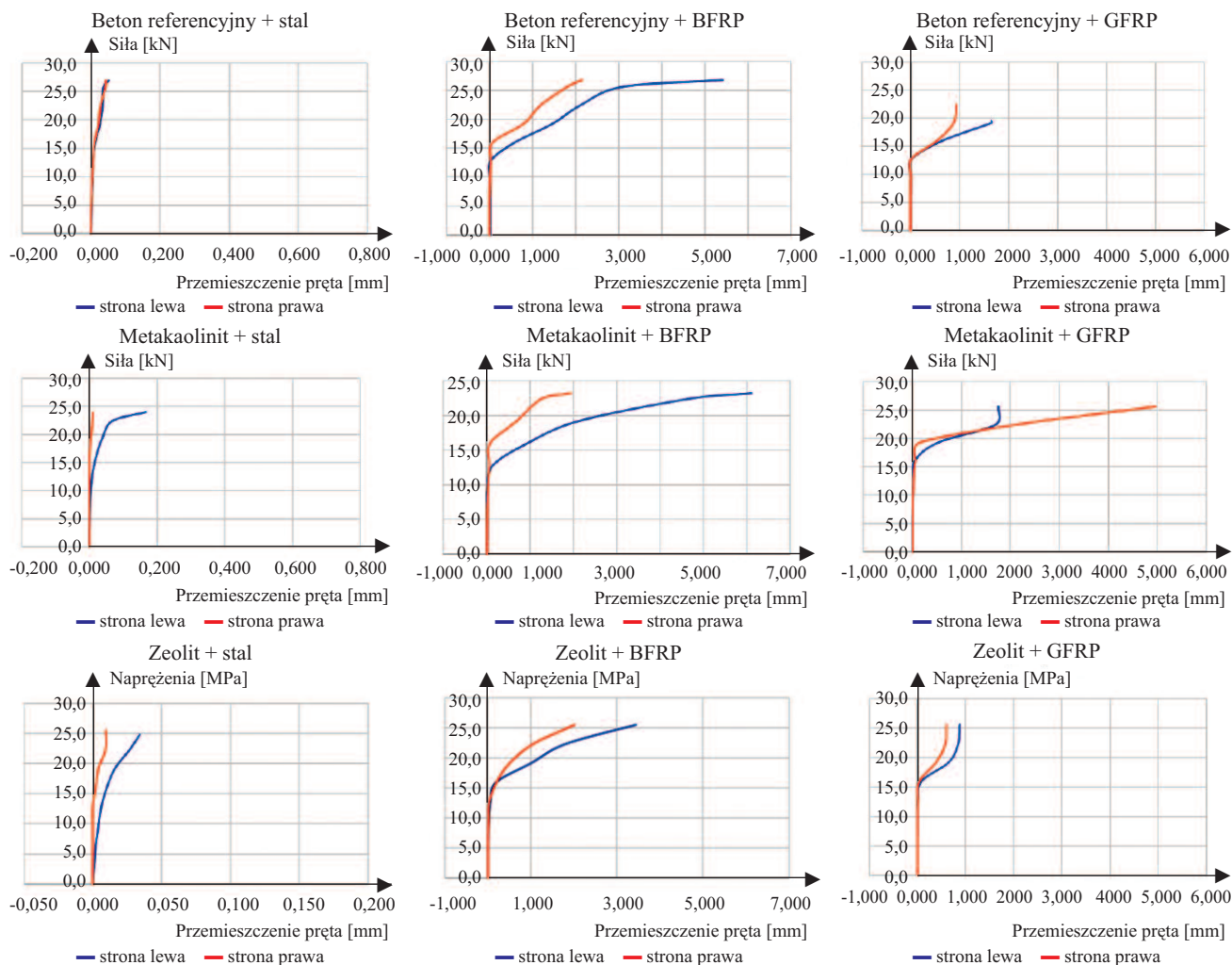
mi faza zniszczenia była krótka i nagła. Dodatek metakaolinitu i zeolitu do betonu z prętami stalowymi spowodował niewielki spadek wartości siły maksymalnej (6%).

W przypadku zbrojenia bazaltowego BFRP na wykresach wyróżnić można trzy fazy. Pierwsza do połowy wartości siły niszczonej – faza liniowa, następnie faza nieliniowa i trzecia faza zniszczenia. Dodatek metakaolinitu do betonu spowodował zwiększenie siły przyczepności o ok. 6%, a zeolitu o 11%.

Wykresy uzyskane w przypadku belek z prętami GFRP charakteryzowały się podobnym przebiegiem zależności siła – przemieszczenie do serii belek ze zbrojeniem BFRP. Związane jest to z charakterystyką materiału tych prętów zbliżoną do prętów bazaltowych BFRP. Natomiast maksymalna wartość siły w przypadku zastosowania betonu z dodatkiem metakaolinitu wyniosła 25,7 kN, a z zastosowaniem zeolitu 26,7 kN. W serii z prętami kompozytowymi zauważono już od drugiej fazy coraz większe pochYLENIE krzywej aż do zniszczenia. Powstała półka plastyczna, oznaczająca nieliniowy charakter wykresu, wskazuje na stopniowe uszkodzenie pręta. Przy znacznie mniejszych wartościach poślizgu dochodzi do wielokrotnej interakcji pomiędzy procesami adhezji chemicznej, tarcia i efektem zaklinowania.

Należy jednoznacznie potwierdzić **odmienne zachowanie się prętów stalowych, bazaltowych BFRP i szklanych GFRP pod obciążeniem.** W przeprowadzonych badaniach pręty kompozytowe ze względu na zawartość żywicy oraz rowingu szklanego i bazaltowego charakteryzują się odmienną adhezją pomiędzy betonem a prętami. Dodatek metakaolinitu spowodował zwiększenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie betonu, co również ma wpływ na przyczepność.

Jedną z przyczyn mniejszej przyczepności prętów kompozytowych niż stalowych jest zastosowane uźebrowanie (żebra wykonane ze sznurka nasączonego żywicą) w prętach bazaltowych i szklanych (im większe uźebrowanie, tym większa przyczepność). Spadek wartości sił przyczepności ze



Rys. 3. Zależność przemieszczenie – napężenie
Fig. 3. Displacement – stress relationship

względem na różnice w oplocie wynosił 9% w przypadku prętów bazaltowych BFRP oraz 12% w przypadku prętów szklanych GFRP. W tabeli 2 podano średnie wartości naprężeń przyczepności, określone przy poślizgu (przemieszczeniu pręta względem betonu) wynoszącym odpowiednio 0,01, 0,1 i 1,0 mm ze wzoru:

$$\tau = \sigma/40 \quad (1)$$

gdzie:

τ – napężenie przyczepności pręta kompozytowego [MPa];

σ – napężenie rozciągające w pręcie kompozytowym [MPa].

Zgodnie z EN2 załącznik C [18] i RILEM [19] naprężenia przyczepności powinny spełniać warunki:

$$\tau_m = 0,098(80 - 1,2 \varnothing) \quad (2)$$

$$\tau_r = 0,098(130 - 1,9 \varnothing) \quad (3)$$

gdzie:

\varnothing – średnica nominalna pręta [mm];

Tabela 2. Wyniki pomiarów naprężeń przyczepności w prętach
Table 2. Results of measurements of adhesion stresses in bars

Zestaw belkowy	Średnie naprężenie przyczepności [kN] przy poślizgu				$\tau_{0,01}/f_{ctm}$	Wymagana wartość normowa	
	$\tau_{0,01}$	$\tau_{0,1}$	τ_1	τ_{max}		τ_m	τ_r
R-stal	7,6	15,6	15,6	15,6	2,1	6,86	11,28
R-BFRP	7,2	11,4	11,4	12,4	2,0	6,89	11,31
R-GFRP	6,9	9,5	9,5	12,2	2,0	6,91	11,35
M-stal	7,9	13,3	14,2	14,8	2,1	6,86	11,29
M-BFRP	7,0	7,6	9,5	14,9	1,8	6,90	11,28
M-GFRP	7,4	11,4	11,4	15,3	1,9	6,91	11,32
Z-stal	9,5	13,3	11,4	14,7	2,5	6,87	11,28
Z-BFRP	9,5	9,5	11,4	16,3	2,5	6,86	11,31
Z-GFRP	11,4	9,5	11,4	16,5	3,0	6,90	11,35

τ_m – średnia wartość naprężenia przyczepności [MPa] przy poślizgu 0,01; 0,1 i 1,0 mm,
 τ_r – napężenie przyczepności w momencie zniszczenia przez poślizg.

Średnie naprężenia przyczepności we wszystkich seriach ze zbrojeniem kompozytowym charakteryzowały się mniejszą przyczepnością w porównaniu

z prętami stalowymi. Wprowadzenie do betonu aktywnego dodatku pucołanowego w postaci metakaolinitu i zeolitu powodowało poprawę wartości naprężeń przyczepności o ok. 20% w przypadku prętów szklanych GFRP i o ok. 15% w przypadku prętów bazaltowych

BFRP przede wszystkim w fazie zniszczenia.

Pręty bazaltowe BFRP i szklane GFRP charakteryzowały się również mniejszymi wartościami naprężeń rozciągających niż pręty stalowe. Porównując oba zastosowane typy zbrojenia kompozytowego, stwierdzono, że pręty szklane wykazywały większą wartość naprężeń rozciągających w przecie.

W przypadku prętów BFRP, mimo większego rozstawu oplotu w stosunku do żeber w przecie stalowym, ich przyczepność jest większa niż prętów stalowych. Utrata przyczepności w przypadku prętów GFRP i BFRP spowodowana była pełnym odkształceniem żeber oplotu. Uszkodzenia zostały zainicjowane u nasady oplotu, a następnie propagowały na zewnątrz. Ostatecznie, powierzchnia ścinania pojawiała się na styku betonu i oplotu zarówno prętów GFRP, jak i BFRP. Mechanizm przyczepności jest determinowany głównie przez mechaniczne ząbienie wywołane przez oplot prętów kompozytowych. W mechanizmie przyczepności, oprócz wpływu składu betonu, również ważną rolę odgrywa rodzaj deformacji oplotu.

We wszystkich badanych seriach próbek zaobserwowano utratę przyczepności prętów stalowych i kompozytowych w końcowej fazie obciążenia. Zgodnie z normą EN2 [18] i RILEM [19] we wszystkich badanych seriach spełnione zostały warunki przyczepności minimalnej (2) i (3). Wartość naprężeń przyczepności w prętach kompozytowych w fazie zniszczenia zwiększyła się o 10% w przypadku prętów bazaltowych i o 7% prętów szklanych. Natomiast dzięki zastosowaniu betonu z dodatkiem 10% metakaolinitu/zeolitu wzrost ten był dwukrotnie większy i wynosił odpowiednio w przypadku prętów bazaltowych 32% i prętów szklanych 35%.

Naprężenia przyczepności przy odległości 0,01 mm $\tau_{0,01}$ porównane do wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu betonu referencyjnego lub z dodatkiem metakaolinitu f_{ctm} wykazują większą przyczepność prętów szklanych GFRP niż prętów bazaltowych BFRP, a dodatek metakaolinitu skutkuje wzro-

stem naprężeń przyczepności w obu przypadkach, ponieważ wartość wytrzymałości na rozciąganie betonu jest większa.

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono, że:

- dodatek metakaolinitu i zeolitu pozytywnie wpłynął na poprawę przyczepności prętów zbrojeniowych do betonu;

- wartość siły maksymalnej osiągniętej podczas badania przyczepności prętów bazaltowych do betonu wynosiła odpowiednio w przypadku betonu referencyjnego 21,9 kN, betonu z dodatkiem metakaolinitu 25,4 kN i betonu z dodatkiem zeolitu 26,7 kN;

- belki z prętami GFRP charakteryzowały się podobnym przebiegiem wykresu zależności siła – przemieszczenie do serii belek ze zbrojeniem bazaltowym, natomiast wartość maksymalna siły w tym przypadku okazała się największa i wynosiła 26,7 kN;

- dzięki zastosowaniu dodatku metakaolinitu poprawie uległa przyczepność prętów bazaltowych BFRP o 8%, a prętów szklanych GFRP o 28%;

- dodatek zeolitu spowodował poprawę przyczepności prętów bazaltowych BFRP o 11% oraz prętów szklanych GFRP o 33%;

- wprowadzenie do betonu aktywnego dodatku pucolanowego w postaci metakaolinitu spowodował zwiększenie wartości naprężeń przyczepności τ_{max} w przypadku prętów szklanych o ok. 20%; prętów bazaltowych o ok. 15% przede wszystkim w fazie zniszczenia;

- we wszystkich badanych seriach próbek naprężenia przyczepności przy odległości spełniają warunki normowe.

Literatura

- [1] PN-EN 10080: 2007 Stal do zbrojenia betonu – Spajalna stal zbrojeniowa – Postanowienia ogólne.
- [2] Bywański C, Drzazga M, Kaźmierowski M, Kamiński M. Pręty kompozytowe FRP jako zbrojenie na ścinanie. *Materiały Budowlane*. 2016; DOI: 10.15199/33.2016.09.25.
- [3] Grygo R, Kosior-Kazberuk M. Zbrojenie konstrukcji betonowych niemetalicznymi prętami kompozytowymi FRP. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*. 2017. ISSN 2081-3279, t. 8, nr 1, s. 21 – 28.

- [4] Krassowska J, Kosior-Kazberuk M. Pręty kompozytowe BFRP jako zbrojenie w prefabrykowanych belkach betonowych. *Construction Materials*. 2022; DOI: 10.15199/33.2022.04.05.

- [5] Rajczyk M, Stachecki B. Eksperymentalne badania przyczepności kompozytowego zbrojenia bazaltowego (BFRP) do betonu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo*. 2018; DOI: 10.17512/znb.2018.1.48.

- [6] Kurdowski W. *Chemia cementu i betonu*. 2010. Dostęp: 5 maj 2023. [Online]. Dostępne na: <https://www.ksiegarniatechniczna.com.pl/chemia-cementu-i-betonu.html>.

- [7] San Nicolas R, Cyr M, Escadeillas G. Characteristics and applications of flash metakaolins. *Applied Clay Science*. 2013, DOI: 10.1016/j.clay.2013.08.036.

- [8] Konkol J, Musiał K. Wpływ wieku na wytrzymałość na ściskanie betonu modyfikowanego dodatkiem metakaolinitu. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury/Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. 2016; DOI: 10.7862/rb.2016.273.

- [9] J. Konkol J, Prokopski G. Optymalizacja składu betonów z dodatkiem metakaolinitu. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury/Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. 2016; DOI: 10.7862/rb.2016.274.

- [10] Żebrowski W, Wolka P, Zieliński A, Dąbrowski M. Ograniczenie korozji ASR w betonie za pomocą metakaolinitu MK-40 i tradycyjnych dodatków mineralnych. *Materiały Budowlane*. 2022, DOI: 10.15199/33.2022.03.09.

- [11] Zieliński A, Wolka P, Żebrowski W. Wpływ dodatku metakaolinitu na skurcz autogeniczny i całkowity materiałów o matrycy cementowej. *Materiały Budowlane*. 2022, DOI: 10.15199/33.2022.12.33.

- [12] Małaszkiwicz D, Świdarski M. Wpływ dodatku metakaolinitu na wybrane właściwości kompozytów cementowych. *Materiały Budowlane*. 2016, DOI: 10.15199/33.2016.10.08.

- [13] PN-EN 206+A1:2016-12 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.

- [14] PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.

- [15] PN-EN 12390-5:2011 Badania betonu – Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań.

- [16] PN-EN 12390-6:2010 Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badania.

- [17] PN-EN 12390-13:2014 Badania betonu – Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ścisnaniu.

- [18] Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. *Polski Komitet Normalizacji*, 2008.

- [19] RILEM TC 162 – TDF Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*. 2003; 36: 560 – 567.

Pracę wykonano na Politechnice Białostockiej w ramach projektu badawczego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego RP (projekt WZ/WB-III/6/2023).

Przyjęto do druku: 04.10.2023 r.