



Eksperymentalne badania przyczepności kompozytowego zbrojenia bazaltowego (BFRP) do betonu

Marlena Rajczyk¹, Bartłomiej Stachecki²

STRESZCZENIE:

W artykule zaprezentowano nowatorskie badania dla określenia przyczepności kompozytowego zbrojenia bazaltowego (BFRP) do betonu. Na wstępie sformułowano założenia współpracy materiałów w konstrukcjach żelbetonowych oraz obecnie obowiązującą metodykę przy badaniach przyczepności dla prętów i drutów stalowych. Kolejny rozdział poświęcono w całości badaniom eksperymentalnym. Opisano sposób przygotowania próbek do badania oraz zaplanowaną ilość serii, wskazując na różnice występujące między nimi. Dużą uwagę poświęcono problemowi właściwego sposobu montażu próbek w płycie betonowej. Wyniki z badań ujęto w formie tabelarycznej z komentarzem wskazującym na najistotniejsze zagadnienia. Artykuł kończą wnioski i uwagi związane z badaniami, jednocześnie wskazano na potrzebę dalszego ich rozwijania oraz poszerzenia.

SŁOWA KLUCZOWE:

zbrojenie bazaltowe; BFRP; przyczepność do betonu

1. Wprowadzenie

Właściwa współpraca betonu i stali tworzy podstawy pracy konstrukcji żelbetonowych. Umożliwia ona prawidłowe przekazywanie naprężeń rozciągających (lub bardzo dużych naprężeń ściskających) powstających w betonie na pręty zbrojeniowe. Współpraca ta zapewniona jest przede wszystkim dzięki zachodzącemu zjawisku przyczepności pomiędzy materiałami, na co wpływ mają głównie:

- tarcie między elementami;
- ścinanie betonu między uźebrowaniem pręta;
- adhezja materiałów;
- klasa betonu;
- średnica, kształt, rozmieszczenie i zakończenie zbrojenia;
- ułożenie, zagęszczenie i pielęgnacja betonu.

2. Badania przyczepności w ujęciu obowiązującej normy

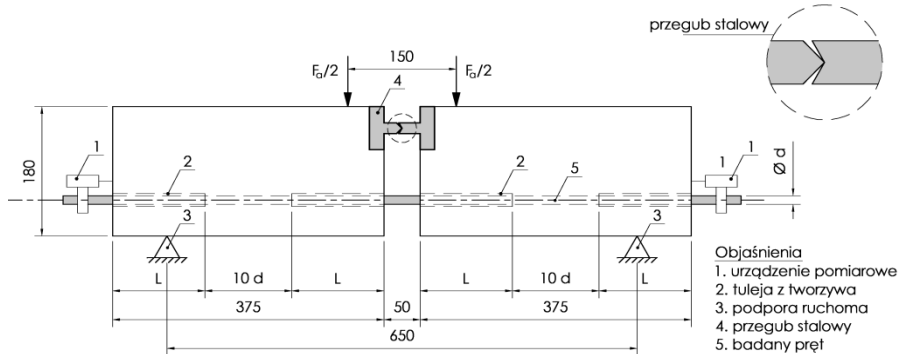
Przyczepność stalowych prętów zbrojeniowych do betonu jest szeroko opisana w literaturze [1–3] oraz normach [4, 5]. W załącznikach "C" i "D" normy [5] opisano bardzo dokładnie sposób przeprowadzania badania przyczepności dla prętów, odpowiednio metodą "belki" oraz "wyciągania". Badania zasadniczo różnią się między sobą, co częściowo uniemożliwia korelację wyników,

¹ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 3, 42–218 Częstochowa, e-mail: mrajczyk@bud.pcz.pl, orcid id: 0000-0002-4893-0931

² Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 3, 42–218 Częstochowa, e-mail: b_stachecki@o2.pl, orcid id: 0000-0003-1504-9061

jednakże służą one jako podstawa do porównania prętów między sobą, tj. o podobnej średnicy, ale o innej konfiguracji powierzchni.

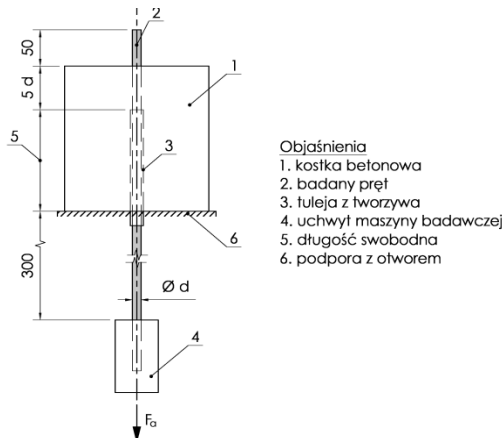
W badaniu przyczepności metodą "belki" dwa równoległocienne bloki żelbetowe ze specjalnie wykonanym zbrojeniem połączone są ze sobą za pomocą centralnie usytuowanego pręta w części dolnej. W górnej części modeluje się na całej szerokości belki specjalny przegub stalowy, mający liniowy styk (rys. 1). Pręt w pojedynczym bloku zakotwiony jest tylko w części środkowej na długości "10×d" (symetrycznie).



Rys. 1. Stanowisko do badania przyczepności zbrojenia metodą "belki" (typ A), według załącznika "C" normy [5]

Konstrukcja w badaniu jest poddana czteropunktowemu zginaniu, dopóki nie nastąpi całkowita utrata przyczepności zbrojenia w blokach lub zerwanie stali. W czasie obciążania przegub stalowy przenosi naprężenia za strefy ściskanej, umożliwiając ugięcie bez naprężeń powodujących zmiażdżenie belki, a zbrojenie umiejscowione w strefie rozciąganej jest wrywane z otaczającego je betonu. W badaniu rejestruje się zależność siła-poślizg (pręta), tworząc wykres, na podstawie którego dokonuje się oceny przyczepności. Pracochłonność przygotowania pojedynczej belki jest bardzo duża, samo zaś badanie należy wykonać dla 25 próbek [5].

Badanie przyczepności metodą "wyciągania" polega na obciążeniu siłą rozciągającą jednego (dłuższego) końca pręta, zamocowanego na określonej długości "5×d", w górnej części sześcienniej kostki betonowej (rys. 2).



Rys. 2. Stanowisko do badania przyczepności zbrojenia metodą "wyciągania", według załącznika "D" normy [5]

Próbkę ustawia się na stałej podporze z centralnie wyciętym otworem umożliwiającym pracę siły wrywającej pręt. Siła jest zwiększana jednostajnie aż do zniszczenia próbki lub do

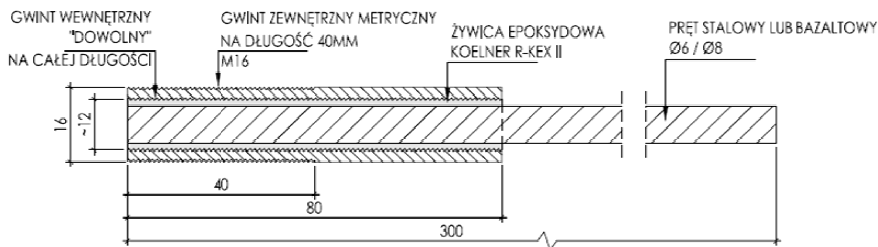
zerwania pręta. W czasie badania rejestrowana jest zależność pomiędzy siłą rozciągającą i przemieszczeniem (wydłużeniem pręta), która służy do stworzenia wykresu, będącego podstawą do wydania opinii o przyczepności prętów. Badanie wykonuje się dla 25 reprezentatywnych próbek, w dwóch podzielonych seriach (12 i 13 sztuk).

Obecnie brak jest dokumentów normatywnych dla określenia przyczepności prętów innych niż stalowe. Znane są w literaturze badania dla prętów kompozytowych uwzględniające metodykę przedstawioną powyżej [6–8]. Na podstawie analizy stanu wiedzy zaplanowano i przeprowadzono nowatorskie badanie połowe prętów stalowych oraz kompozytowych (bazaltowo–epoksydowych), polegające na wrywaniu próbek z betonowej płyty.

3. Badania połowe

3.1. Próbki do badań

Do badania przyczepności prętów użyto specjalnie przygotowanych próbek (rys. 3), w których badany pręt zamocowany jest w stalowej tulei o długości 80 mm oraz średnicy wewnętrznej większej niż badany pręt. Przestrzeń pomiędzy prętem a tuleją wypełniona jest dwuskładnikową żywicą epoksydową Koelner R-KEX II. Gwintowanie wewnętrzne tulei znacząco zwiększa przyczepność pręta. Średnica zewnętrzna tulei z gwintem metrycznym M16 umożliwia montaż w maszynie wrywającej.



Rys. 3. Próbka do badania przyczepności

Próbki przygotowano z trzech rodzajów prętów (rys. 4):

- pręt stalowy żebrowany (średnice $\phi 6$, $\phi 8$).
- pręt bazaltowy bez żebrowania (średnica $\phi 7$)
- pręt bazaltowy żebrowany (nawój z włókna bazaltowego – średnice $\phi 6$, $\phi 8$)



Rys. 4. Rodzaje prętów do badania przyczepności (od góry – pręt stalowy żebrowany, pręt bazaltowy bez żebrowania, pręt bazaltowy żebrowany)

Różnicowanie typów i średnic prętów umożliwia poszerzenie zakresu badań. Dodatkowo dla części prętów wykonano zabiegi mające w zamyśle zwiększyć przyczepność prętów do betonu. Zabieg nr I polegał na lekkim oszlifowaniu warstwy zewnętrznej żywicy epoksydowej z pręta i uzyskaniu w ten sposób powierzchni o podwyższonej szorstkości (pręty w procesie

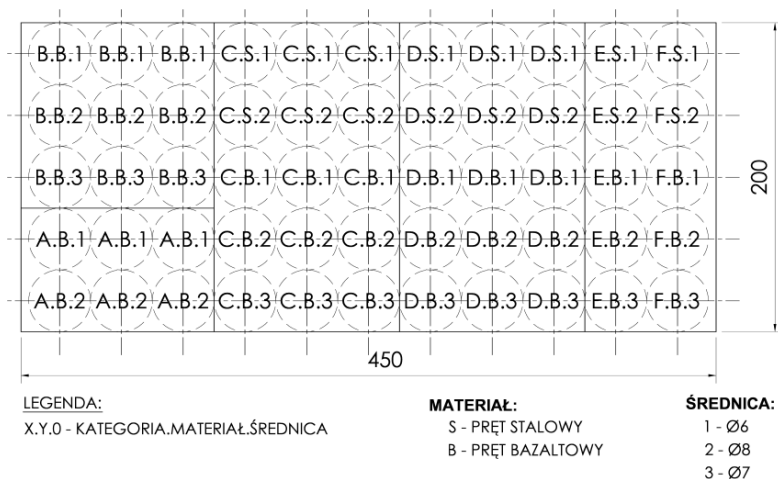
produkcji w badaniu organoleptycznym wykazują bardzo niską chropowatość). Dla zabiegu nr II część prętów w próbkach została pokryta klejem i posypana normowym piaskiem kwarcowym służącym do wykonywania badań laboratoryjnych wytrzymałości cementów.

3.2. Płyta badawcza

Próbki do badań kotwiono na specjalnie przygotowanym polu badawczym o rozmiarze 2,00x4,50 m i głębokości 0,30 m. Zaplanowano rozmieszczenie 55 próbek w 11 rzędach co ok. 40 cm (rys. 3). Próbki podzielone były na 6 kategorii (serii):

- kategoria (A) - pręty zakotwione w betonie na głębokość 4 cm z wykonanym zabiegiem poprawy przyczepności nr I;
- kategoria (B) - pręty zakotwione w betonie na głębokości 4 cm z wykonanym zabiegiem poprawy przyczepności nr II;
- kategoria (C) - pręty zakotwione w betonie na głębokość 4 cm (bez zabiegu poprawy przyczepności) - kategoria bazowa;
- kategoria (D) - pręty zakotwione w betonie na głębokość 7 cm (bez zabiegu poprawy przyczepności);
- kategoria (E) - pręty wklejone na żywicę epoksydową na głębokość 4 cm, na dobę przed wykonaniem badania (bez zabiegu poprawy przyczepności);
- kategoria (F) - pręty wklejone na żywicę epoksydową na głębokość 7 cm, na dobę przed wykonaniem badania (bez zabiegu poprawy przyczepności);

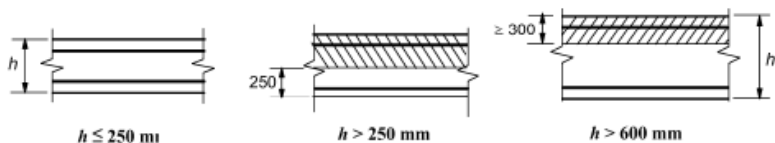
Rozmieszczenie, ilość oraz średnice próbek na polu badawczym wskazano na rysunku 5. Odstęp między próbkami były na tyle duże, aby wyeliminować wpływ zakotwienia pojedynczej próbki, na próbki sąsiadujące w czasie wyrywania (głównie powstające naprężenia oraz odkształcenia w betonie).



Rys. 5. Rozmieszczenie próbek na polu badawczym

3.3. Sposób zakotwienia próbek

W punkcie 8.4.2 normy [4] zwraca się uwagę na graniczne naprężenie przyczepności (f_{bd}), aby uniemożliwić zniszczenie konstrukcji na skutek jej utraty. Jednocześnie wzór obliczeniowy do wyznaczenia naprężenia opiera się m.in. na współczynniku η_1 , który definiuje "jakość" warunków przyczepności. Dla elementów o grubości powyżej 250 mm rozdziela się strefę "dobrych" i "słabych" warunków przyczepności (rys. 6).



Rys. 6. Warunki przyczepności prętów w betonie według [1]; strefa niezakreskowana o warunkach "dobrych" i zakreskowana o warunkach "słabych"

Próbki zakotwione w płycie badawczej o grubości 300 mm należało więc zakotwić w betonie poniżej pierwszych 50 mm grubości, mierząc od wierzchu płyty. W tym celu wykorzystano tuleje elastyczne z PCV (wężyki) umożliwiające dokładne określenie długości zakotwienia oraz dystansujące miejsce styku próbki z betonem. Użyte tuleje szczelnie przylegały do pręta w próbce, uniemożliwiając dostanie się mieszanki betonowej w styk pomiędzy prętem a wewnętrzną stroną tulei (rys. 7).



Rys. 7. Próbką z tuleją dystansującą z PCV; po lewej odkryta część pręta o długości równej długości zakotwienia

Podczas zakładania tulei mierzono jedynie "odkrytą" część pręta, pozostawiając wymaganą programem badań długość zakotwienia (40 lub 70 mm). Taki sposób dystansowania długości zakotwienia dodatkowo eliminuje problem poziomowania między sobą użytych próbek w trakcie umieszczenia w mieszance betonowej. Dodatkowo do minimum redukuje się zachowanie reżimu pomiaru długości dla małych wartości zakotwień, co w warunkach pracy polowej przy konstrukcji monolitycznej jest praktycznie nie do osiągnięcia. Zakotwienie na większej głębokości lepiej stabilizowało próbki w okresie pomiędzy ułożeniem mieszanki a wykonaniem badań (min. 28 dni).



Rys. 8. Próbką do badań przyczepności zakotwione w płycie badawczej

Próbki przed zakotwieniem w mieszance betonowej zamontowano na belce drewnianej za pomocą dwóch nakrętek stabilizujących. Otwory w belce o średnicy zgodnej ze stalową tuleją próbek wykonano prostopadle do powierzchni. Próbki na belce drewnianej (5 sztuk) wciskano w ułożony i wstępnie zawibrowany beton z zachowaniem poziomu belki. Przestrzeń wokół pręta dodatkowo zagęszczano poprzez sztychowanie. Belki drewniane zdjęto z próbek po 7 dniach umiejscowienia w mieszance (rys. 8).

3.4. Wyniki badań

Wyciąganie próbek przeprowadzono za pomocą przenośnej wyciągarki Hydrojaws 2008 o nośności do 145 kN, rejestrującej pomiar siły wrywającej. Uśrednione wyniki siły w poszczególnych kategoriach (seriach) zawarto w tabeli 1.

Tabela 1

Wyniki sił wrywających dla próbek przyczepności prętów do betonu

Kategoria (seria)		Nr i typ		ϕ [mm]	S _{Ha} * [kN]	Uwagi
A	kotwienie 4 cm (zabieg szlifowania powierzchni)	A.B.1	bazaltowa	8	7,6	–
		A.B.3	bazaltowa	7	6,3	próbka zerwana przez ukłucie
B	kotwienie 4 cm (zabieg szlifowania powierzchni + piasek kwarcowy)	B.B.1	bazaltowa	6	3,3	zerwanie stalowej tulei
		B.B.2	bazaltowa	8	5,2	–
		B.B.3	bazaltowa	7	4,6	–
C	kotwienie 4 cm	C.S.1	stalowa	6	3,7	–
		C.S.2	stalowa	8	4,8	–
		C.B.1	bazaltowa	6	2,9	–
		C.B.2	bazaltowa	8	4,1	–
		C.B.3	bazaltowa	7	3,9	–
D	kotwienie 7 cm	D.S.1	stalowa	6	4,7	–
		D.S.2	stalowa	8	6,5	–
		D.B.1	bazaltowa	6	4,4	–
		D.B.2	bazaltowa	8	7,3	–
		D.B.3	bazaltowa	7	6,5	–
E	wklejenie 4 cm	F.S.1	stalowa	8	5,1	–
		F.S.2	stalowa	6	6,4	wyrwanie stożka betonu
		F.B.1	bazaltowa	8	5,8	–
		F.B.2	bazaltowa	6	15,0	–
		F.B.3	bazaltowa	7	8,4	wyrwanie stożka betonu
F	wklejenie 7 cm	E.S.1	stalowa	6	9	–
		E.S.2	stalowa	8	16,4	–
		E.B.1	bazaltowa	6	11,0	wyrwanie stożka betonu
		E.B.2	bazaltowa	8	25,4	–
		E.B.3	bazaltowa	7	25,0	–

* dla kategorii A – D wartości średnie wyznaczone na podstawie wyników dla trzech próbek; dla kategorii E i F badanie wykonano wyłącznie dla jednej próbki

Bazowa wartość siły wrywającej (seria C) dla próbki z pręta bazaltowego wynosi 2,9 kN ($\phi 6$), 4,1 kN ($\phi 8$) oraz 3,9 kN ($\phi 7$); wartość porównawcza otrzymana dla prętów stalowych jest nieznacznie większa – 3,7 kN ($\phi 6$), 4,3 kN ($\phi 8$). Po zabiegu szlifowania powierzchni prętów bazaltowych (seria A) wartość siły wrywającej zauważalnie wzrosła, co oznacza, że zmatowiona powierzchnia pręta odznacza się lepszą przyczepnością w betonie. Przy drugim zabiegu poprawy przyczepności (seria B) nie osiągnięto tak wysokich wyników, choć może mieć na to wpływ jakość użytego kleju (zaobserwowano jego miejscowe odspojenie).

Głębsze kotwienie próbek (seria D) zwiększa wartość siły wrywającej, ale dalej wartości dla prętów stalowych są większe, pomimo mniejszego uzębrowania prętów (decydujący wpływ

większej chropowatości powierzchni prętów stalowych). Największe wartości siły wrywającej uzyskano w serii E oraz serii F. Żywica epoksydowa użyta do wklejenia próbek odznacza się wysoką gęstością oraz lepkością [9], dokładnie otula pręty i mniejsze znaczenia ma chropowatość powierzchni, większe zaś uźebrowanie, którego rozmiar wpływa na zwiększenie tarcia między elementami. Po czasie wiązania odznacza się wyższą wytrzymałością niż otaczający beton, o czym świadczy miejscowe wrywanie stożka betonu (rys. 9).



Rys. 9. Prawidłowy sposób zniszczenia próbki dla wklejonego pręta bazaltowego

4. Wnioski

Pręty bazaltowe (bazaltowo-epoksydowe – BFRP) wykorzystane w badaniu polowym odznaczają się mniejszą przyczepnością niż porównywalne stalowe, jednak nie są to wartości znacząco niższe. Zwiększenie szorstkości powierzchni pręta powoduje polepszenie przyczepności w betonie i dla użytych w badaniu rodzajów pręta ma większe znaczenie niż jego uźebrowanie. Niezwykle ważne dla badań okazały się wyniki dla prętów wklejonych, gdzie wartości siły wrywającej są większe niż dla prętów stalowych, co rodzi zupełnie nowe możliwości użycia w budownictwie (zwłaszcza w konstrukcjach wzmacnianych [10, 11]). Seria badań dla prętów wklejonych nie jest całkowicie miarodajna i opiniodawcza ze względu na ilość wykonanych prób, ale powoduje potrzebę dalszych prac nad wspomnianym zagadnieniem. Przy kolejnych badaniach należy dążyć do zwiększenia ilości próbek dla konkretnej serii.

Sposób mocowania prętów w stalowej tulei, pomimo obaw o wytrzymałość połączenia, był wystarczający dla założonych średnic i tylko w jednym przypadku uległ zniszczeniu. Użyte tuleje (wężyki) dystansujące z PCV oddylały część pręta od mieszanki, nie powodując dodatkowego tarcia dla siły wrywającej (w czasie badania pozostały w płycie).

Obecnie rynek materiałów budowlanych oferuje znacznie większy wybór prętów bazaltowych niż jeszcze kilka lat temu. Dostępne są pręty o zróżnicowanym uzwojeniu i charakterystykach, spełniających wymagania normowe i dopuszczone do obrotu oraz użycia w budownictwie [8]. Przedstawione wyniki i wnioski odnoszą się wyłącznie do prętów użytych w badaniu i nie mogą być jednoznacznie porównane z badaniem normowym.

Podziękowania

Składamy podziękowania Panu Sebastianowi Czekanowi, doradcy technicznemu firmy Koelner Polska Sp. z o.o., za możliwość sprowadzenia niezbędnego sprzętu i nieocenioną pomoc przy wrywaniu próbek, oraz Panu Romanowi Skowrońskiemu za udostępnienie niezbędnego terenu pod badania polowe.

Literatura

- [1] Smarzewski P., Stolarski A., Badanie i wyznaczanie naprężeń przyczepności betonu do stali zbrojeniowej, *Biuletyn WAT* 2007, LVI, 1, 7–24.
- [2] Pędziwiatr J., Podstawowe zagadnienia przyczepności stali i betonów w elementach żelbetowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007.
- [3] Kijania M., Metody wyznaczania wartości naprężenia przyczepności pomiędzy betonem a stalą zbrojoniową, *Przegląd Budowlany* 2015, 6, 38–42.
- [4] PN-EN 1992-1-1:2008/NA:2010 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [5] PN-EN 10080:2007 Stal do zbrojenia betonu. Spajana stal zbrojeniowa. Postanowienia ogólne.
- [6] Łapko A., Urbański M., Problemy badania betonowych elementów zginanych zbrojonych prętami bazaltowymi, *Materiały Budowlane* 2013, 3, 40–41.
- [7] Szymczak P., Badanie przyczepności prętów kompozytowych GFRP oraz BFRP do betonu, *Przegląd Budowlany* 2018, 2, 36–39.
- [8] Raport z badań nr LZK00-01683/17/Z00NZK dla Trokotex Polymer Group Sp. z o.o., Zakład Konstrukcji Budowlanych, Geotechniki i Betonu Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 2018.
- [9] Kwiatkowski T., Kotwy chemiczne – zalety, rodzaje i obszar zastosowania, *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej* 2015, seria Budownictwo 21, 177–182.
- [10] Rajczyk M., Stachecki B., Przyczyny uszkodzeń i sposoby wzmocnienia fundamentów budynku jednorodzinego, *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej* 2014, seria Budownictwo 20, 232–238.
- [11] Rajczyk M., Jończyk D., Wzmocnianie konstrukcji betonowych kompozytami włóknistymi FRP, *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej* 2015, seria Budownictwo 21, 261–266.

Experimental studies of adhesion of composite basalt reinforcement (BFRP) to concrete**ABSTRACT:**

The article presents innovative experimental research to determine the adhesion of composite basalt reinforcement (BFRP) to concrete. At the outset, the assumptions for the cooperation of materials in reinforced concrete structures and the currently applicable methodology for testing adhesion for steel bars and wires were formulated. The next chapter was entirely devoted to experimental research. The method of preparation of samples for the study and the planned number of research series are described indicating the differences between them. Great attention was paid to the proper method of assembly of samples on the board. The results of the research were included in a tabular form with a comment indicating the most important issues. The last chapter presents conclusions from research and observations related to research, at the same time indicating the need to further develop them.

KEYWORDS:

basalt reinforcement; BFRP; adhesion to concrete