

mgr inż. Marcin Burdziński^{1)*}

ORCID: 0000-0001-5965-4349

dr hab. inż. Maciej Niedostatkiwicz, prof. PG¹⁾

ORCID: 0000-0002-6451-6220

Analiza doświadczalna wpływu średnicy pręta na przyczepność w teście pull-out

Experimental analysis of the effect of bar diameter on bond in pull-out test

DOI: 10.15199/33.2022.10.01

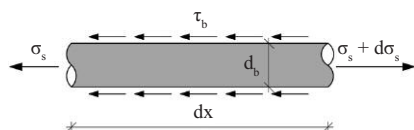
Streszczenie. W artykule zaprezentowano analizę doświadczalną przyczepności, która miała na celu ocenę wpływu średnicy pręta na przyczepność w próbie pull-out. Ponadto zweryfikowano wybrane modele analityczne wyznaczające wytrzymałość przyczepności w stosunku do otrzymanych rezultatów z testów. Z wykonanej analizy wynika, że średnica pręta istotnie wpływa na zachowanie przyczepności. Przytoczone modele w różnym stopniu zbieżności oszacowują wartości otrzymane z zaprezentowanych badań.

Słowa kluczowe: beton; przyczepność; test pull-out; żebrowany stalowy pręt zbrojeniowy.

Abstract. This paper presents an experimental analysis of bond to evaluate the effect of bar diameter on bond in pull-out test. In addition, selected analytical models determining bond strengths were verified against the obtained test results. The analysis shows that bar diameter significantly affects bond behavior. The mentioned models estimate the values obtained from the presented tests to varying degrees of convergence.

Keywords: bond; concrete; pull-out test; ribbed steel reinforcing bar.

Przyczepność odgrywa kluczową rolę w prawidłowej pracy elementu żelbetowego. Dzięki współpracy betonu i zbrojenia możliwe jest przenoszenie sił z prętów na otaczający je beton. Ma ona więc istotny wpływ na zagadnienia związane m.in. ze sztywnością oraz zarysowaniem w żelbecie i jest uwzględniana już na etapie projektowania konstrukcji, zarówno w Stanie Granicznym Nośności (SGN), jak i w Stanie Granicznym użytkowalności (SGU). Podstawową miarą wiązania betonu i zbrojenia są **naprężenia przyczepności** τ_b . Z warunku równowagi rozciąganego pręta (rysunek 1),



Rys. 1. Warunek równowagi pręta rozciąganego

Fig. 1. Equilibrium condition for a tensile bar

wynika, że naprężenia τ_b zależą od średnicy pręta d_b oraz od zmian naprężenia normalnego σ_s w przecię na rozważanym odcinku dx , co wyraża się wzorem:

$$\tau_b = (d_b/4) \cdot (d\sigma_s/dx) \quad (1)$$

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

^{*)} Adres do korespondencji: marcin.burdzinski@pg.edu.pl

Wpływ średnicy pręta na przyczepność został uwzględniony w Eurokodzie 2 (EC2) [1] i fib Model Code 2010 (MC2010) [2] przy określaniu wytrzymałości przyczepności niezbędnej do wyznaczenia długości zakotwienia czy długości zakładu prętów. Ponadto średnica pręta decyduje o minimalnym względnym polu powierzchni żeber zawartym w EC2 [1]. Natomiast w normie [3] od średnicy pręta uzależnione są parametry związane z geometrią jego żebrowania. W literaturze można znaleźć badania, w których sprawdzano wpływ średnicy pręta na zachowanie przyczepności w połączeniu z innymi czynnikami rzutującymi na współpracę betonu i zbrojenia [4 – 6]. Niestety zdarza się, że opisywane rezultaty są przeciwstawne, np. w [7] stwierdzono, że większa średnica pręta zwiększa jego przyczepność, natomiast w [8] podano, że wraz ze wzrostem średnicy pręta jego przyczepność maleje.

Jedną z metod analizy doświadczalnej przyczepności jest próba bezpośredniego wyciągania pręta z betonu powszechnie znana jako test pull-out (POT). Podczas testu mierzona jest siła wyciągająca pręt F oraz odpowiadająca jej poślizg s . Celem badania POT jest ocena wpływu wybranego czynnika/czynników na wiązanie, a głównymi

wynikami eksperymentu – maksymalne naprężenie przyczepności, a także krzywa relacji przyczepność-poślizg $\tau_b(s)$, na podstawie której można określić typ zniszczenia (wyrwanie pręta z betonu – pull-out lub rozłupanie betonu – splitting [9]) i przebieg mechanizmu przyczepności. Zwykle w tego typu badaniach długość odcinka przyczepności l_b , czyli długość styku beton-pręt, jest skojarzona ze średnicą wyciąganego pręta i przeważnie nie przekracza jego pięciokrotności, tzw. próbka krótka [3, 10 – 13]. Wówczas mówi się o „lokalnej” zależności przyczepność-poślizg, co oznacza, że na całej długości l_b występuje ten sam etap mechanizmu przyczepności [2, 9], a naprężenia przyczepności wyznacza się wg wzoru:

$$\tau_b = F/(\pi \cdot d_b \cdot l_b) \quad (2)$$

Inną formą analizy przyczepności, obok eksperymentów i symulacji numerycznych, jest **analiza teoretyczna** [14]. W przeszłości podjęto liczne próby oszacowywania maksymalnej wartości naprężenia przyczepności, jakie otrzymuje się z POT za pomocą modeli analitycznych [1, 2, 15 – 18]. Modele te przeważnie uwzględniają najważniejsze czynniki wpływające na zachowanie przyczepności, czyli wytrzymałość betonu, średnicę pręta, skrępowanie pręta

w betonie (długość zakotwienia, grubość betonowej otuliny), a także typ zniszczenia przyczepności.

Celem artykułu była ocena wpływu średnicy żebrowanego stalowego pręta zbrojeniowego na „lokalną” zależność przyczepność-poślizg pod obciążeniem monotonicznym metodą pull-out. Dodatkowo dokonano weryfikacji efektywności wybranych modeli analitycznych określających wartość maksymalnego naprężenia przyczepności w odniesieniu do rezultatów otrzymanych z doświadczeń. Przedstawione w artykule badania są jedynie fragmentem szerokiego programu badawczego obejmującego analizę doświadczalną i numeryczną przyczepności próbek na różnych poziomach obserwacji współpracy betonu i prętów zbrojeniowych [19, 20]. Program ten składa się z badań pull-out na próbkach o różnej długości zakotwienia pręta oraz z testów przeprowadzanych na elementach belkowych (tzw. beam test). Dzięki temu możliwa będzie analiza wpływu podstawowych czynników rzutujących na wiązanie, takich jak skrępowanie pręta w betonie czy stan naprężenia próbki. Celem tych badań jest m.in. opracowanie metody wykorzystania wyników testu wrywania na próbkach krótkich w praktycznych zastosowaniach inżynierskich, na które wpływa przyczepność.

Metody badań

Do elementów badawczych do testu pull-out użyto betonu klasy C35/45 wg normy [21] i prętów zbrojeniowych B500SP [22] o średnicy 10, 12 i 16 mm. Recepturę mieszanki betonowej, którą pokazano w tabeli 1, ustalono doświadczalnie za pomocą serii próbnych zarobów. W przypadku każdego zarobu wykonywano dodatkowe próbki, dzięki którym sprawdzono wytrzymałość betonu na ściskanie f_c i rozciąganie f_{ct} oraz moduł sprężystości E_c po 28 dniach (tabela 2). Na ich podstawie stwierdzono, że beton spełnia wymagania klasy C35/45 zgodnie z [21].

W przypadku prętów zbrojeniowych przeprowadzono badania określające granicę plastyczności f_y i wytrzymałości f_u , ciągliwość k i moduł sprężystości E_s . Testy przeprowadzono na prętach w stanie nieobrobionym mechanicznie. Zba-

Tabela 1. Receptura mieszanki betonowej

Table 1. Concrete mix composition

Kruszywo			Cement [kg/m ³]	Woda [kg/m ³]	Wskaźnik W/C [-]	Superplastyfikator [kg/m ³]
drobne 0 – 2 mm [kg/m ³]	grube 2 – 8 mm [kg/m ³]	grube 8-16 mm [kg/m ³]				
770	560	560	340	175	0,51	5,25

Tabela 2. Wyniki badań wybranych parametrów betonu

Table 2. Test results of selected parameters of concrete

Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie f_{cm} [MPa]	Charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie		Średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie f_{ctm} [MPa]	Średni moduł sprężystości E_{cm} [GPa]
	(na walcach) f_{ck} [MPa]	(na kostkach) $f_{ck,cube}$ [MPa]		
43,47	38,89	47,62	3,10	33,62

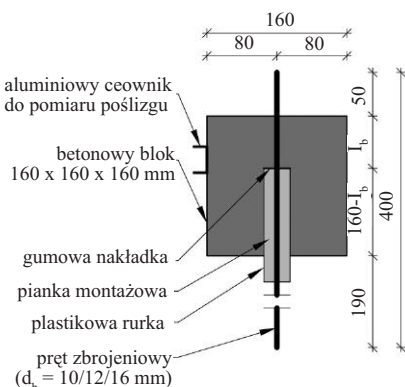
dano po 3 pręty każdej średnicy zgodnie z procedurą wg normy [23]. Rezultaty badania prętów zbrojeniowych pokazano w tabeli 3. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że parametry wytrzymałościowe spełniają wymagania dotyczące stali B500SP [22].

Tabela 3. Wyniki badań wybranych parametrów wytrzymałościowych stali zbrojeniowej

Table 3. Test results of selected strength parameters of reinforcing steel

Średnica pręta d_b [mm]	Charakterystyczna granica		Ciągliwość k	Moduł sprężystości stali E_s [GPa]
	plastyczności stali f_{yk} [MPa]	wytrzymałości stali f_{uk} [MPa]		
10	548	660	1,20	210
12	556	656	1,18	209
16	554	652	1,18	214

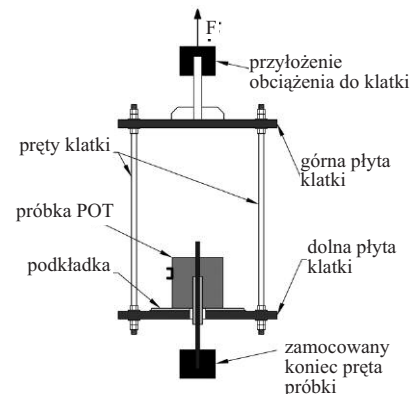
Próbka do testu pull-out (rysunek 2) składała się z pręta zbrojeniowego, betonowego sześciennego bloku o boku długości 160 mm oraz rurki z tworzywa sztucznego izolującej pręt od betonu. Przestrzeń między rurką a prętem została wypełniona pianką montażową, która zapewniała stałe położenie pręta pod-



Rys. 2. Schemat próbki do testu pull-out

Fig. 2. Scheme of the pull-out test specimen

czas betonowania. Dodatkowo koniec rurki znajdujący się w betonie był zabezpieczony gumową nakładką, która zapobiegała wplynięciu betonu do jej wnętrza i niekontrolowanemu zwiększeniu długości zakotwienia. Opisany element badawczy jest wynikiem przeprowadzonych serii próbnych POT, które miały na celu eliminację potencjalnych błędów wpływających na rezultaty eksperymentu. Próbki umieszczano w klatce stalowej, która była zainstalowana w maszynie wytrzymałościowej (rysunek 3). Aby zminimalizować tarcie na styku betonowy blok-stalowa płyta, zastosowano podkładkę składającą się z warstwy dolnej (guma o grubości 3 mm) i górnej (płyta polietylenowa o grubości 6 mm). Obciążenie było kontrolowane za pomocą stałego przyrostu przemieszczenia ruchomej trawersy maszyny, który wynosił 1 mm/min. Pozwoliło to, w przeciwieństwie do kontrolowania obciążenia przez stały przyrost siły, na prowadzenie badania po osiągnięciu maksymalnej siły wyciągającej. Poślizg, czyli w tym przypadku przemieszczenie betonowego bloku względem pręta, mierzono ekstensometrem podłączonym do maszyny wytrzymałościowej. Ruchome ramię ekstensometru było oparte na aluminiowym ceowniku przymocowanym do powierzch-



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego do testu pull-out

Fig. 3. Scheme of the pull-out test stand

ni bloku. Test kończył się wraz z osiągnięciem poślizgu 30 mm. Wszystkie badania pull-out przeprowadzono po 28 dniach od wykonania próbek.

Parametrem zmiennym eksperymentu była średnica pręta: 10, 12 i 16 mm. Długość odcinka przyczepności l_b była różna w każdej serii badania, ponieważ uzależniono ją od średnicy pręta d_b . Przyjęto, że l_b jest równe $5d_b$, co spełnia wymagania próbki krótkiej. Przeprowadzono trzy serie POT po jednej w przypadku każdej średnicy. Seria składała się z sześciu próbek. W tabeli 4 zestawiono charakterystykę wszystkich serii testu pull-out.

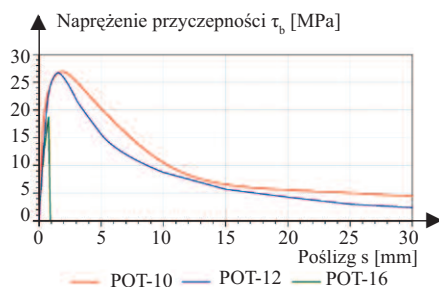
Tabela 4. Charakterystyka serii testu pull-out
Table 4. Pull-out test series characteristic

Nazwa serii	Średnica pręta d_b [mm]	Długość odcinka przyczepności l_b [mm]	Grubość otuliny betonowej c [mm]	Stosunek c/d_b	Liczba próbek w serii
POT-10	10	50	75	7,5	6
POT-12	12	60	74	6,2	6
POT-16	16	80	72	4,5	6

Analiza wyników

Na podstawie przeprowadzonych testów pull-out powstały krzywe „lokalnej” zależności przyczepność-poślizg. Na rysunku 4 pokazano reprezentatywne krzywe $\tau_b(s)$ z każdej serii badania, będące uśrednieniem krzywych uzyskanych z wszystkich próbek z serii, natomiast w tabeli 5 ekstremalne i średnie wartości szczytowych naprężeń przyczepności wraz z odpowiadającymi im współczynnikami zmienności, a także typy zniszczenia każdej serii POT.

Próbki z serii POT-10 i POT-12 uległy zniszczeniu przez wyrwanie pręta z betonu. Zgodnie z MC2010 [2], zniszczenie



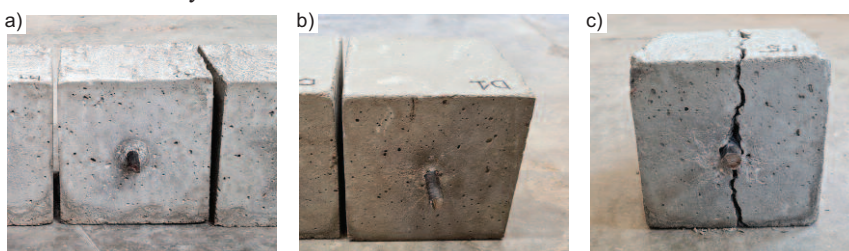
Rys. 4. Reprezentatywne krzywe $\tau_b(s)$ w przypadku serii POT

Fig. 4. Representative $\tau_b(s)$ curves for the POT series

Tabela 5. Wybrane rezultaty testów pull-out
Table 5. Selected results of pull-out tests

Nazwa serii	Szczytowe naprężenie przyczepności [MPa]			Współczynnik zmienności [%]	Typ zniszczenia przyczepności
	min	max	średnia		
POT-10	25,12	28,05	26,85	4,0	wyrwanie
POT-12	25,22	27,32	26,69	2,9	wyrwanie
POT-16	16,71	21,50	18,68	10,9	rozłupanie

zenie przez wyrwanie jest możliwe przy stosunku $c/d_b \geq 5$. Zapis ten znajduje potwierdzenie w przeprowadzonych doświadczeniach, ponieważ próbki serii POT-16 nie spełniły tego warunku i zniszczyły się przez rozłupanie (tabela 5). Potwierdzają to również kształty krzywych $\tau_b(s)$ pokazane na rysunku 4. Ich przebieg jest charakterystyczny w przypadku osiągniętych typów zniszczenia [2, 9]. Potwierdza to, że średnica pręta wpływa na mechanizm zniszczenia przyczepności w próbie pull-out w przypadku jednakowego wymiaru bloku betonowego. Na fotografii pokazano przykłady zniszczonych elementów badawczych.



Przykłady zniszczonych próbek serii: a) POT-10; b) POT-12; c) POT-16
Examples of damaged specimens from the series: a) POT-10; b) POT-12; c) POT-16)

Największe wartości szczytowych naprężeń przyczepności osiągnięto w seriach POT-10 i POT-12, co również jest charakterystyczne podczas zniszczenia typu pull-out. Naprężenia te są bardzo zbliżone, co wskazuje, że długość przyczepności zależna od średnicy pręta pozwala na uzyskanie podobnych maksymalnych naprężeń τ_b . Analogicznej obserwacji dokonano w [6]. Dzieje się tak tylko w przypadku jednakowego typu zniszczenia, gdyż w serii POT-16 naprężenia te stanowią ok. 70% wartości szczytowych z serii POT-10 i POT-12. Ponadto, maksymalne τ_b we wszystkich seriach cechuje się małym współczynnikiem zmienności, który nie przekracza 11%.

Jest to zadowalający rezultat, zwłaszcza na probabilistyczny charakter wytrzymałości betonu i przyczepności.

Inną możliwością, za pomocą której można oszacować wartość szczytowych naprężeń przyczepności, jest **skorzystanie z modeli analitycznych**. Istnieją modele, które uzależniają maksymalną wartość τ_b jedynie od wytrzymałości betonu. Przykładem tego jest propozycja Huanga i in. [15], w której wytrzymałość przyczepności $\tau_{b,max}$ uzależniono od średniej wytrzymałości betonu na ściskanie f_{cm} :

$$\tau_{b,max} = 0,45 \cdot f_{cm} \quad (3)$$

Harajli i in. [16] również zaproponowali prosty iloczyn zależny od f_{cm} :

$$\tau_{b,max} = 2,57 \cdot \sqrt{f_{cm}} \quad (4)$$

Wzory (3) i (4) dotyczą zniszczenia przez wyrwanie. Podobne podejście zastosowano w modelu przyczepności zawartym w MC2010 [2]. W przypadku zniszczenia typu pull-out i „dobrych warunków przyczepności” zalecano wzór:

$$\tau_{b,max} = 2,5 \cdot \sqrt{f_{cm}} \quad (5)$$

natomiast w przypadku zniszczenia typu splitting, „dobrych warunków przyczepności” oraz betonu bez strzemion formula jest następująca:

$$\tau_{bu,split} = 7,0 \cdot (f_{cm}/25)^{0,25} \quad (6)$$

Zgodnie z EC2 [1] obliczeniowa wartość naprężenia przyczepności prętów żebrowanych f_{bd} zależy od obliczeniowej nośności betonu na rozciąganie $f_{ct,d}$. Dodatkowo uwzględniono wpływ jakości warunków wiązania oraz pozycji pręta w czasie betonowania (η_1), a także wpływ średnicy pręta (η_2):

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ct,d} \quad (7)$$

W australijskiej normie AS [17], wytrzymałość przyczepności, oprócz wytrzymałości betonu na ściskanie, zależy również od grubości otulenia i średnicy pręta:

$$\tau_{b,max} = 0,3 \cdot (0,5 + c/d_b) \cdot \sqrt{f_{cm}} \quad (8)$$

Natomiast w amerykańskiej normie ACI [18], wytrzymałość przyczepności, w porównaniu z AS [17], zależy dodatkowo od długości zakotwienia:

$$\tau_{b,max} = 0,08 \cdot (1,2 + 3c/d_b + 50d_b/l_b) \cdot \sqrt{f_{cm}} \quad (9)$$

W tabeli 6 porównano wartości szczytowych naprężeń przyczepności otrzymane z badań doświadczalnych z wartościami obliczonymi za pomocą wzorów (3)-(9). We wzorze (7) przyjęto następujące wartości współczynników: $\eta_1 = 1,0$ („dobre warunki”), $\eta_2 = 1,0$ ($d_b \leq 32$ mm).

Tabela 6. Porównanie wartości szczytowych naprężeń przyczepności [MPa]

Table 6. Comparison of ultimate bond stresses [MPa]

Nazwa serii	Wartość z badania	Wzór (3)	Wzór (4)	Wzór (5)	Wzór (6)	Wzór (7)	Wzór (8)	Wzór (9)
POT-10	26,85	19,56	16,94	16,48	nd.	6,98	15,82	17,78
POT-12	26,69	19,56	16,94	16,48	nd.	6,98	13,25	15,72
POT-16	18,68	nd.	nd.	nd.	8,04	6,98	9,89	13,03

Naprężenie otrzymane ze wzoru (3) stanowi ok. 73% średniej wartości z badań, co daje najlepszą zgodność z wynikami doświadczalnymi w przypadku serii POT-10 i POT-12. Natomiast najbardziej zaniżone rezultaty daje wzór (7) – ok. 26% wartości z badań. Wartość najbliższą naprężeniu z badania próbek serii POT-16 wykazuje wzór (9), a najdalszą wzór (7), co stanowi kolejno ok. 70% i 37% wartości z doświadczeń.

Wnioski

Z przeprowadzonych badań doświadczalnych wynika, że średnica pręta zbrojeniowego wpływa na zachowanie przyczepności w teście pull-out. Po pierwsze zależy od niej typ zniszczenia przyczepności pręta zbrojeniowego w betonie. Dzieje się tak ze względu na stały rozmiar betonowych bloków, w których pręty były kotwione. Wówczas wraz ze wzrostem średnicy pręta d_b maleje jego skrępowanie przez betonową otulinę c (patrz: stosunek c/d_b w tabeli 4). Po drugie średnica pręta pośrednio wpływa na szczytowe wartości na-

prężenia przyczepności uzyskane w POT. Najczęściej w tego typu badaniach długość przyczepności l_b jest uzależniona od średnicy pręta, co przekłada się na otrzymywanie bardzo zbliżonych wartości maksymalnych τ_b w przypadku tego samego typu zniszczenia przyczepności, bez względu na średnicę d_b . Tak też było podczas prezentowanych badań.

Przywołane w artykule modele analityczne, służące do wyznaczania szczytowych wartości naprężeń przyczepności, w różnym stopniu zbieżności oszacowują wartości uzyskane w zaprezentowanych doświadczeniach. Największym problemem z określeniem wyrażenia skutecznie estymującego maksymalne naprężenie τ_b jest duża liczba czynników, które wpływają na wiązanie między betonem a prętem zbrojenio-

wym, co bardzo utrudnia opracowanie wzoru uniwersalnego i prostego do zastosowania. Często wzory dotyczą jedynie konkretnych eksperymentów, które składają się z zaledwie kilku próbek, co nie może prowadzić do formułowania ogólnych obserwacji i wniosków. Prowadzenie badań nad przyczepnością, w aspekcie udoskonalania istniejących modeli analitycznych wytrzymałości przyczepności, powinno więc być kontynuowane.

Literatura

[1] PN-EN 1992-1-1:2008, Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
 [2] CEB-FIP Model Code 2010, Final draft.
 [3] PN-EN 10080:2007, Stal do zbrojenia betonu – Spajalna stal zbrojeniowa – Postanowienia ogólne.
 [4] Carvalho EP, Ferreira EG, da Cunha JC, Rodrigues CS, Maia NS. Experimental Investigation of Steel-Concrete Bond for Thin Reinforcing Bars. LAJSS. 2017; DOI: 10.1590/1679-78254116.
 [5] Senthil K, Bawa S, Aswin CP. Influence of concrete strength and diameter of reinforcing bar on pull-out tests using finite element analysis. JSE-AM. 2018; DOI: 10.31462/jseam. 2018.03105116.

[6] Liang R, Huang Y, Xu Z. Experimental and Analytical Investigation of Bond Behavior of Deformed Steel Bar and Ultra-High Performance Concrete. Buildings. 2022; DOI: 10.3390/buildings12040460.

[7] Gambarova PG, Rosati G. Bond and splitting in reinforced concrete: Test results on bar pull-out. Mater. Struct. 1996, 29: 267 – 276.

[8] Tang CW, Cheng CK. Modeling Local Bond Stress-Slip Relationships of Reinforcing Bars Embedded in Concrete with Different Strengths. Materials. 2020; DOI: 10.3390/ma13173701.

[9] fib Bulletin 10. Bond of reinforcement in concrete (State-of-art report). International Federation for Structural Concrete; 2000.

[10] Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials RC6: Bond test for reinforcement steel – 2. Pull-out test. RILEM; 1983.

[11] Dybel P, Furtak K. The effect of ribbed reinforcing bars location on their bond with high-performance concrete. Arch. Civ. Mech. Eng. 2015; DOI: 10.1016/j.acme.2015.03.008.

[12] Kijania-Kontak M, Winnicki A. Badania doświadczalne przyczepności prętów zbrojeniowych SAS 670/800 do betonu wysokiej wytrzymałości za pomocą próby pull-out. Przegląd budowlany. 2022; 5 – 6: 136 – 141.

[13] Burdziński M, Niedostatkiewicz M. Analiza przyczepności prętów żebrowanych w betonie metodą pull-out na próbkach centrycznych i mimośrodowych. Przegląd Budowlany. 2022; 5 – 6: 93 – 98.

[14] Pędziwiatr J. Podstawowe zagadnienia przyczepności stali i betonów w elementach żelbetowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2007.

[15] Huang Z, Engström B, Magnusson J. Experimental Investigation of the Bond and Anchorage Behaviour of Deformed Bars in High Strength Concrete (Report 95: 4). Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1996.

[16] Harajli MH, Hout M, Jalkh W. Local bond stress-slip behaviour of reinforcing bars embedded in plain and fiber concrete. ACI Mater. J. 1995, 92: 4, 343 – 353.

[17] AS-3600, 2001, Standard Concrete Structures.

[18] ACI 318-11, 2011, Building Code Requirements for Structural Concrete, 2011.

[19] Burdziński M, Niedostatkiewicz M. Badania doświadczalne przyczepności. Builder. 2020, DOI: 10.5604/01.3001.0014.1401.

[20] Burdziński M, Niedostatkiewicz M. Tests of bond between concrete and steel bars – literature background and program of own research. Bud. Archit. 2020; DOI: 10.35784/bud-arch. 2149.

[21] PN-EN 206+A2:2021-08, Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność.

[22] PN-H-93220:2018-02, Stal do zbrojenia betonu – Spajalna stal zbrojeniowa B500SP – Pręty i walcówka żebrowana.

[23] PN-EN ISO 15630-1:2019-04, Stal do zbrojenia i sprzężania betonu – Metody badań – Część 1: Pręty, walcówka i drut do zbrojenia betonu.

Przyjęto do druku: 19.09.2022 r.