

Badania doświadczalne przyczepności prętów zbrojeniowych SAS 670/800 do betonu wysokiej wytrzymałości za pomocą próby pull-out

dr inż. Magda Kijania-Kontak, prof. dr hab. inż. Andrzej Winnicki, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

Współpracę betonu ze stalą zbrojeniową zapewnia zjawisko przyczepności. Jest to wzajemne przekazywanie sił między prętem zbrojeniowym a betonem. Znajomość tego zjawiska pozwala na precyzyjne określenie przebiegu odkształcenia stali i betonu, a tym samym na określenie przebiegu odkształcenia i zarysowania konstrukcji żelbetowej. Beton współpracuje ze stalą zbrojeniową wtedy, gdy odkształcenia obu materiałów są jednakowe. Spełnione jest wtedy równanie opisane wzorem (1):

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s \quad (1)$$

gdzie:

ε_c – odkształcenia betonu;

ε_s – odkształcenia stali.

W chwili pojawienia się rys w betonie powyższy warunek przestaje być prawdziwy i oba materiały zaczynają się różnie odkształcać. Maksymalny opór, jaki przeciwdziała wzajemnemu przesunięciu się stali w betonie, jest nazywany przyczepnością adhezyjną. W literaturze etap ten jest nazywany również przyczepnością pierwotną i występuje on do chwili zerwania więzi spowodowanych adhezją betonu i stali. Następnie występuje zjawisko przyczepności wtórnej spowodowanej klinowaniem się betonu [5]. Granicą pomiędzy przyczepnością pierwotną i wtórną jest początek przesuwu pręta względem betonu. W rzeczywistości dokładne określenie tej granicy oraz wyznaczenie zależności do obliczenia wartości naprężenia przyczepności pierwotnej jest bardzo trudne.

Istnieją trzy sposoby wyznaczenia granicznego naprężenia przyczepności. Pierwszy z nich to przeprowadzenie badań doświadczalnych [1, 2, 9, 12, 13, 16]. Drugi to metody analityczne opisane w różnego rodzaju pozycjach literaturowych [3, 4, 5, 6, 15], a ostatni to metody numeryczne [1, 9, 12, 14].

W artykule zaprezentowano wyniki badań doświadczalnych wyznaczania naprężenia przyczepności pomiędzy betonami wysokiej wytrzymałości C60/75 oraz C70/85 prętami o średnicy 18 mm ze stali wysokiej wytrzymałości SAS 670/800 i ze stali zwykłej oraz wyniki badań materiałowych.

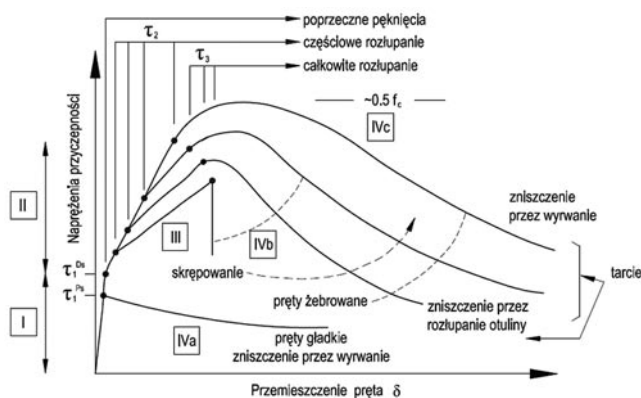
Otrzymane wyniki z badania pull-out porównano z założeniami dostępnymi w aktualnych normach i wytycznych, [3], [6] i [5].

2. Naprężenia przyczepności

Od samego początku istnienia konstrukcji żelbetowych zagadnienie przyczepności było przedmiotem licznych badań. Badano zarówno zjawisko przyczepności, jak i czynniki wywołujące przyczepność. Wyróżniamy trzy najistotniejsze czynniki:

- adhezja wywołana przyciąganiem międzycząsteczkowym dwóch materiałów;
- tarcie stali o beton wywołane naprężeniem dociskowym spowodowanym między innymi skurczem betonu przy wysychaniu;
- mechanizm ząbienia wywołany nierównomierną strukturą powierzchni stali.

W pracy [5] pokazano, że zjawisko przyczepności charakteryzują cztery etapy przebiegu wartości naprężenia przyczepności w zależności od przemieszczenia pręta (rys. 1). Etap I dotyczy elementu niezarysowanego, etap II to pojawienie się pierwszego zarysowania, a etap III to pierwsze kruszenie betonu. W etapie IV następuje zerwanie przyczepności (IVa pręt gładki, IVb pręt zbrojony nieskrępowany i IVc pręt zbrojony skrępowany).



Rys. 1. Rozkład naprężenia przyczepności w zależności od przemieszczenia pręta względem betonu [2, 5]

Z przeprowadzonych badań opublikowanych w [11] wynika, że schemat zniszczenia przez odłupanie otuliny betonowej występuje, gdy otulina pręta jest mniejsza niż trzy średnice tego pręta. Natomiast zniszczenie przez wyrwanie pręta następuje, gdy otulina jest większa niż trzy średnice pręta.

3. Badania doświadczalne

3.1. Opis badania

Najbardziej znaną metodą badania przyczepności jest metoda pull-out. Jest ona jedną z dwóch metod badań rekomendowanych przez [13]. Schemat stanowiska oraz wymiary próbek badawczych pokazano na rysunku 2. W badaniach tych zakłada się, że zmiany odkształcenia w stali po długości pręta mają rozkład liniowy (dla odcinka zakotwienia wynoszącego od trzech do pięciu średnic pręta rozkład naprężenia przyczepności jest stały), dlatego też wartość naprężenia przyczepności można wyliczyć z prostej zależności (2):

$$\tau = \frac{F}{\pi \phi l_d} \quad (2)$$

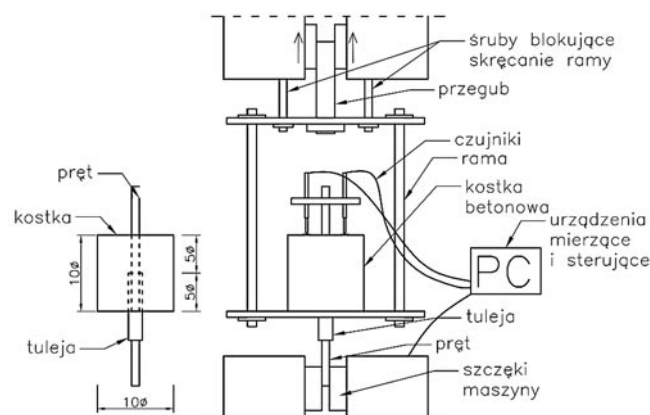
gdzie:

F – siła przekazywana na pręt zbrojeniowy;

ϕ – średnica pręta;

l_d – długość odcinka zakotwienia.

Jednak badania te nie odzwierciedlają w pełni rzeczywistej pracy konstrukcji. W badaniu tym beton jest ściskany, a pręt rozciągany. Natomiast w elementach zginanych zarówno pręt, jak i otaczający go beton są rozciągane. W celu lepszego odzwierciedlenia pracy konstrukcji próbkę badawczą z metody pull-out można wykonać, umieszczając pręt nie osiowo, a mimośrodowo [10]. Ponadto bardzo krótki odcinek przyczepności uniemożliwia powstanie rys wewnętrznych, co prowadzi do zawyżonych – w porównaniu z elementami w skali naturalnej, wartości naprężenia przyczepności wtórnej. Kolejną wadą opisanych badań to grubość otuliny, która jest większa niż 3ϕ . Zniszczenie elementu z tak dużą otuliną nastąpi przez wyrwanie pręta z betonu. W rzeczywistości otuliny elementów są znacznie cieńsze



Rys. 2. Schemat elementu badawczego próby pull-out oraz schemat stanowiska badawczego próby pull-out [13]

i dużo bardziej prawdopodobny jest rozwój rys prowadzących do zniszczenia otuliny wskutek jej rozłupania.

Metoda ta ma jednak kilka dość istotnych cech pozytywnych. Badania prowadzone na takich elementach są stosunkowo proste do zrealizowania, wymagają jedynie pomiaru wartości siły F i przemieszczenia pręta Δ . Prostota badań umożliwia prowadzenie ich na dużej liczbie próbek, w których zmiennymi mogą być inne parametry wpływające na przyczepność. Uzyskane wyniki w postaci funkcji τ , naprężenia przyczepności względem przemieszczenia pręta dość dobrze odpowiadają poszczególnym etapom działania naprężenia przyczepności i są stosunkowo łatwe do zastosowania w analizach numerycznych.

3.2. Plan badań przyczepności i przygotowanie elementów

Do badania przygotowano elementy z prętem o średnicy 18 mm. Wymiar próbki betonowej wyniósł $180 \times 180 \times 180$ mm. Wykonano trzy rodzaje próbek, dwa ze stalą SAS 670/800 oraz, dla porównania wyników, jeden ze stalą EPSTAL B500SP. Zastosowano standardową długość zakotwienia pręta równą 5ϕ oraz zmniejszoną długość zakotwienia równą $2,5\phi$. W elementach ze stalą zwykłą żebrowaną i betonem klasy BWW nie można zastosować prętów z odcinkiem zakotwienia równym 5ϕ , ponieważ w badaniu szybciej dochodzi do uplastycznienia stali niż do zerwania przyczepności. Dlatego w takich elementach odcinek zakotwienia musi być krótszy.

Odpowiednią długość zakotwienia zrealizowano za pomocą rur PVC i grubej, dwustronnej taśmy klejącej firmy Rollfix. Pręt owijany był taśmą w celu uniknięcia przedostania się betonu lub zaczynu do wnętrza rury PVC. Zastosowanie taśmy dwustronnej umożliwiło również centralne ułożenie pręta w tulejce.

Mieszanka betonowa do wszystkich form podawana była ręcznie. Zagęszczenie mieszanki w formach odbywało się za pomocą wibratorów wgłębnych. Powierzchnie górne wszystkich elementów zostały zatarte na gładko.

Następnie formy zostały szczelnie przykryte folią w celu uniknięcia odparowania wody z mieszanki. Rozformowanie elementów nastąpiło po 48 godzinach. Próbkę do badań materiałowych ułożono w wannach wypełnionych wodą, a próbki do badania przyczepności zostały ustawione na paletach, z zachowaniem odstępów pomiędzy każdą ze ścian. Następnie zostały szczelnie okryte geowłókniną i folią. Owinięcie próbek matą miało na celu zapewnienie stałej wilgotności próbek. Maty nasączano wodą co dwa dni przez pierwsze 26 dni od rozformowania (dwa dni próbki leżały w formach), co pozwoliło na pełną 28-dniową pielęgnację próbek.

4. Właściwości materiałów użytych do badania

4.1. Stal

Pręty gwintowane SAS produkowane w niemieckiej hucie SAH Stahlwerk Annahütte do stosowania jako pręty do zbrojenia

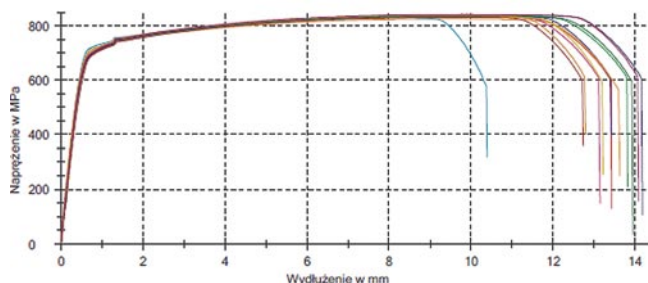
konstrukcji żelbetowych dostępne są w następujących czterech klasach wytrzymałości: SAS 450/520, 500/550, 550/620 oraz 670/800. W niniejszym artykule są opisane badania doświadczalne z wykorzystaniem stali SAS 670/800.

Do badań przyczepności zastosowano pręty o średnicy $\phi 18$ mm. Przygotowano 12 próbek o długości 800 mm i wykonano statyczną próbę rozciągania stali według metody B normy ISO 6892-1 [8]. Badania przeprowadzono w Laboratorium Materiałów L-18 na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej w maszynie Zwick--Roell Z1200.

Średnie wartości wyników z przeprowadzonych badań przedstawiono w tabeli 1, a wykresy naprężenie-wydłużenie dla badanych prętów – na rysunku 3. Symbolem \bar{x} oznaczona jest wartość średnia, s odchylenie standardowe oraz v współczynnik zmienności.

Tabela 1. Charakterystyki stali SAS 670/800 dla prętów średnicy $\phi 18$ mm

Właściwości materiału	Średnica $\phi 18$ mm		
	\bar{x}	s	v [%]
Moduł sprężystości E_s [GPa]	199	7	3,62
Umowna granica plastyczności f_{yk} [MPa]	707	8	1,10
Wytrzymałość na rozciąganie f_{tk} [MPa]	835	5	0,55
Maksymalna siła rozciągająca [kN]	212	1	0,55
Wydłużenie przy maksymalnej sile [%]	6,48	0,34	5,30



Rys. 3. Wykres naprężenie-wydłużenie dla badanych prętów $\phi 18$ mm

4.2. Beton

Gotowa mieszanka została dostarczona przez firmę CEMEX POLSKA do Laboratorium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych. Beton użyty do badania miał klasę C60/75

Tabela 2. Wyniki badań betonu

l.p.	Beton	C60/75		C70/85	
	Nazwa badania	28 dni	56 dni	28 dni	56 dni
1	Średnia wytrzymałość na ściskanie na walcach [MPa]	74,9	81,1	83,3	87,8
2	Moduł Younga na walcach [GPa]	40,9	43,2	41,8	43,1
3	Wytrzymałość na rozciąganie osiowe na walcach [MPa]	2,9	2,6	3,2	3,2

i C70/85. Główne składniki mieszanki to piasek, grys bazaltowy drobny, woda, cement oraz plastyfikatory.

Docelowe badania przyczepności przeprowadzono po 56 dniach. Właściwości materiałowe betonu zbadanego po 28 i 56 dniach zestawiono w tabeli 2.

5. Wyniki badań przyczepności

Na wykresach w dalszej części zostały zaprezentowane wyniki badań doświadczalnych przyczepności prętów SAS 670/800 oraz EPSTAL B500St do betonu wysokiej wytrzymałości C60/75 i C70/85. Rejestrowana była siła wyciągająca oraz mierzony był przesuw pręta względem kostki betonowej. Na pierwszych dwóch wykresach pokazano wyniki dla prętów SAS z odcinkiem długości zakotwienia równym 5ϕ , a na kolejnych wyniki dla prętów SAS i EPSTAL z odcinkiem zakotwienia $2,5\phi$.

Przed przystąpieniem do badania założono, że test zostanie przerwany w momencie spadku siły o 70% albo przesunięciu trawersy maszyny o 25mm.

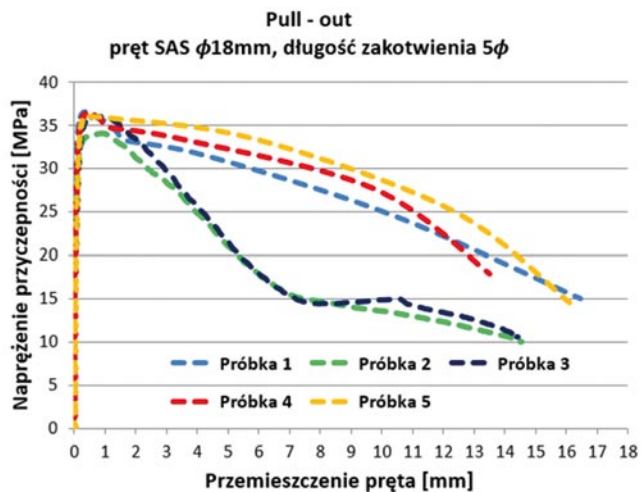
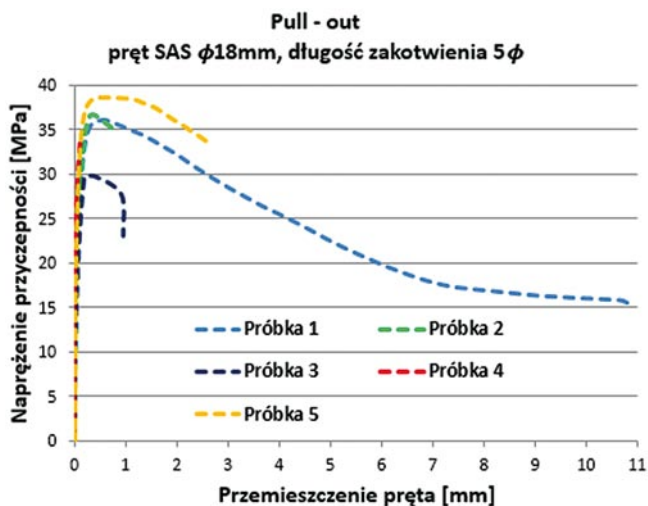
Wartości średnie wyników z badań zaprezentowano w tabeli 3.

Tabela 3. Średnie wartości naprężenia przyczepności

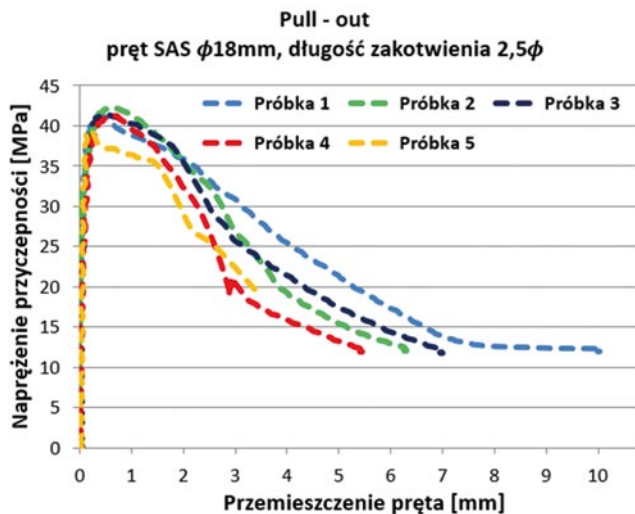
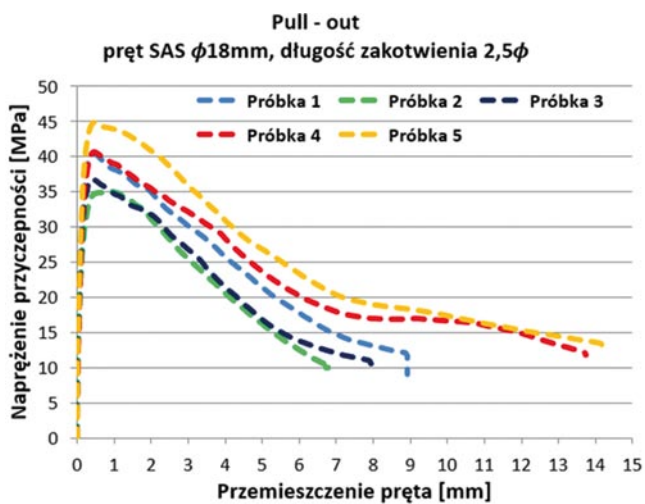
Rodzaj próbki	SAS $l_d = 5\phi$	SAS $l_d = 2,5\phi$	EPSTAL $l_d = 2,5\phi$
τ_{max} [MPa]			
C60/75	35,0	39,5	43,7
C70/85	35,9	41,1	48,4

Obserwacje z przeprowadzonych badań są przedstawiono poniżej.

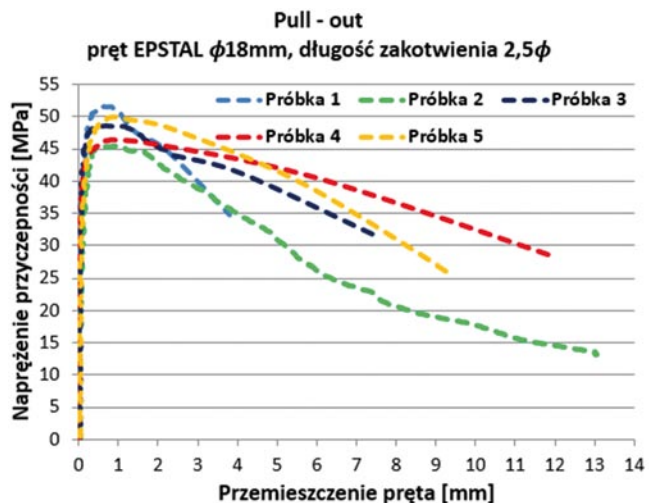
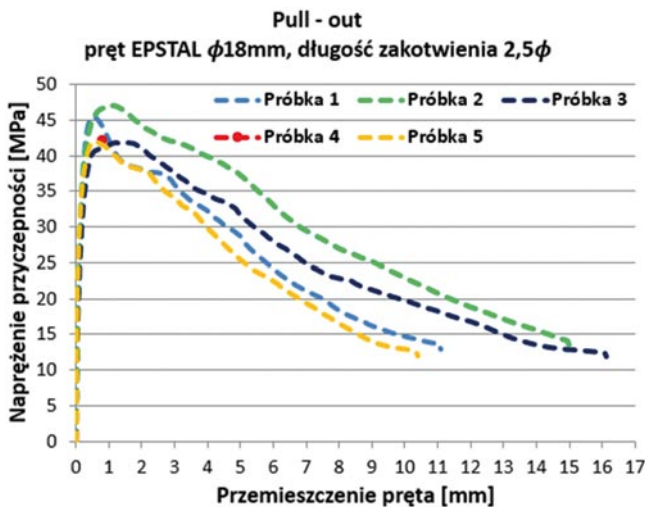
- Zastosowanie odcinka długości zakotwienia równego 5ϕ spowodowało, że tylko trzy próbki z dziesięciu zostały zniszczone przez wyrwanie pręta z kostki betonowej. Pozostałe próbki z tej serii zniszczyły się przez gwałtowne (wybuchowe) rozerwanie otuliny betonowej. Otulina w tych elementach była znacznie większa niż 3ϕ . Autorzy artykułu wnioskują, że jest to spowodowane tym, iż betony wysokiej wytrzymałości są znacznie bardziej kruche niż betony zwykłe.
- Próbki o odcinku zakotwienia równym $2,5\phi$ zostały zniszczone przez wyciągnięcie pręta z kostki betonowej. Po badaniu na powierzchni próbki nie było widocznych żadnych uszkodzeń w postaci rys i spękań. Również nie zaobserwowano żadnych uszkodzeń betonu w okolicy pręta.



Rys. 4. Wartość napężenia przyczepności w zależności od przemieszczenia pręta – element z prętem SAS o średnicy 18 mm i długości zakotwienia 5φ, beton C60/75 i C70/85



Rys. 5. Wartość napężenia przyczepności w zależności od przemieszczenia pręta – element z prętem SAS o średnicy 18 mm i długości zakotwienia 2,5φ, beton C60/75 i C70/85



Rys. 6. Wartość napężenia przyczepności w zależności od przemieszczenia pręta – element z prętem EPSTAL o średnicy 18 mm i długości zakotwienia 2,5φ, beton C60/75 i C70/85

- Na rysunkach 5 i 6 widać, iż nieco lepszą przyczepnością charakteryzują się próbki z prętami EPSTAL. Osiągnęły one średnią wartość naprężenia przyczepności równą 43,7 i 48,4 MPa. Próbki z prętami SAS osiągnęły średnią wartość naprężenia przyczepności równą 39,5 i 41,4 MPa.
- Na tych samych wykresach widać również, że próbki z betonu wyższej klasy C70/85 miały lepszą wartość naprężenia przyczepności względem próbek z betonem C60/75.
- Dla próbek z odcinkiem długości zakotwienia 5ϕ najprawdopodobniej nie została osiągnięta maksymalna wartość naprężenia przyczepności. Dla porównania próbki te zostały zniszczone w momencie, gdy naprężenie na poboczniczy pręt wynosiło od 30 do 44 MPa, podczas gdy próbki z krótszym odcinkiem zakotwienia osiągały wyższe wartości.

6. Metody analityczne wyznaczania wartości naprężenia przyczepności

Wartość naprężenia przyczepności można również wyznaczyć analitycznie. Norma [3] podaje, że wartość obliczeniowa naprężenia przyczepności f_{bd} dla prętów żebrowanych jest wyrażona wzorem (3):

$$f_{bd} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd} \quad (3)$$

gdzie:

η_1 – współczynnik zależny od jakości warunków przyczepności i pozycji pręta w trakcie betonowania;

η_2 – współczynnik zależny od średnicy pręta;

f_{ctd} – wartość obliczeniowa wytrzymałości betonu na rozciąganie osiowe.

W najnowszej normie [6] dokonano zmian. Uprzednio przyczepność wyznaczało się analogicznie, jak w [3]. Obecnie wartość ta zależna jest od średniej wytrzymałości betonu na ściskanie f_{cm} oraz od modelu zniszczenia – poprzez wyrywanie lub rozłupywanie. Maksymalna wartość naprężenia przyczepności wyrażona jest wzorem (4):

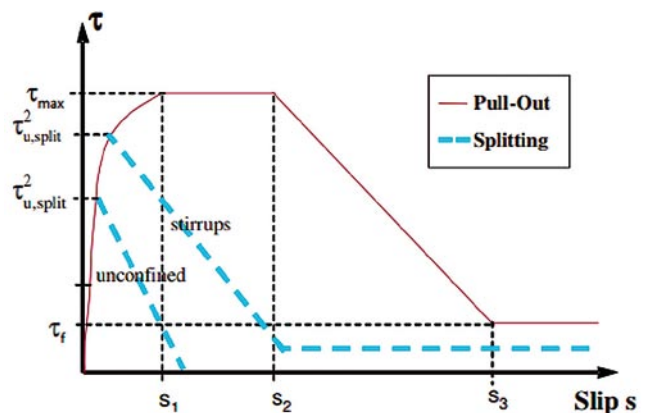
$$\tau_{b,max} = 2,5 \sqrt{f_{cm}} \quad (4)$$

W normie [6] rozróznilo wartości naprężenia przyczepności w zależności od modelu zniszczenia i od wielkości otuliny. Norma podaje, że zniszczenie przez wyrywanie pręta występuje w elementach, w których otulina pręta jest większa niż 5ϕ , natomiast zniszczenie przez rozłupywanie występuje w elementach, w których otulina jest mniejsza niż 5ϕ .

W zależności od mechanizmu zniszczenia, maksymalna wartość naprężenia przyczepności $\tau_{b,max}$ jest równa τ_{max} (wrywanie) lub $\tau_{u,split}$ (rozłupywanie). Schematyczny wykres zależności naprężenia przyczepności od przemieszczenia pręta przedstawiono na rysunku 7. Parametry do wyznaczania krzywej znajdują się w [6].

W [5] zaprezentowano podobny wykres i tabelę, ale dla elementów z betonu BWW. Zgodnie z informacjami z tabeli w biuletynie maksymalną wartość naprężenia przyczepności dla modelu zniszczenia poprzez wyrywanie można wyznaczyć ze wzoru (5):

$$\tau_{b,max} = 0,45 f_{cm} \quad (5)$$



Rys. 7. Schematyczny wykres zależności naprężenia przyczepności od przemieszczenia pręta [6] za [7]

Wyniki badań naprężenia przyczepności w porównaniu do wyników wartości naprężenia przyczepności obliczonych ze wzorów normowych zaprezentowano w tabeli 4.

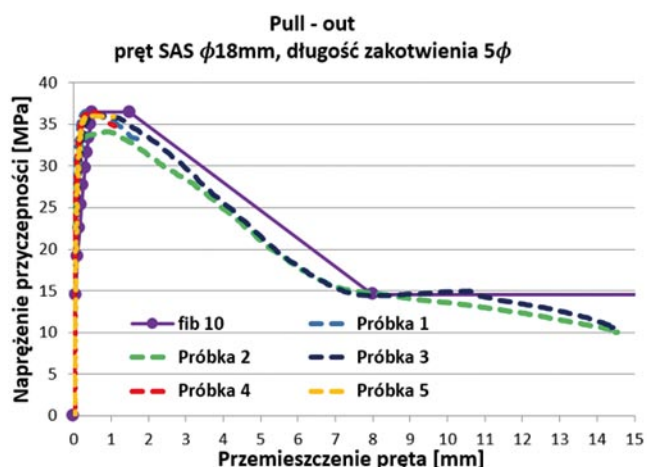
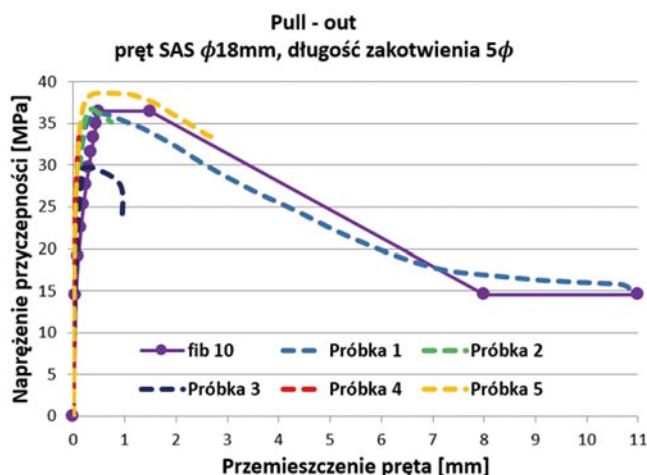
Analizując wyniki podane w tabeli, stwierdza się, że wzory z [3] i [6] podają wartości naprężenia przyczepności znacznie niższe od wartości uzyskanych z badań doświadczalnych. Najlepiej wyniki badań doświadczalnych odzwierciedla wzór z [5].

Porównanie wyników badań doświadczalnych w odniesieniu do zaproponowanego w [5] teoretycznego modelu pokazano również na rysunku 8.

Analizując rysunki, zauważymy, że wykres z [5] bardzo dobrze odzwierciedla wyniki badań doświadczalnych. Wszystkie charakterystyczne punkty wykresu s_1 , s_2 i s_3 oraz τ_{max} i τ_f bardzo dobrze zbiegają się z wynikami z badań doświadczalnych. Jedynie początkowa, krzywoliniowa część wykresu, nieco odbiega od wykresów z badań.

Tabela 4. Porównanie wyników badań doświadczalnych naprężenia przyczepności z wynikami otrzymanymi z obliczeń z wzorów

Rodzaj próbki		SAS $l_d = 5\phi$	SAS $l_d = 2,5\phi$	EPSTAL $l_d = 2,5\phi$	EC2	MC	fib 10
τ_{max} [MPa]	C60/75	35,0	39,5	43,7	10,5	22,5	36,2
	C70/85	35,9	41,1	48,4	10,8	24,0	39,5



Rys. 8. Porównanie wyników badań z teoretycznym wykresem wartości naprężenia przyczepności w zależności od przemieszczenia pręta – element z prętem SAS o średnicy 18 mm i długości zakotwienia 5ϕ , beton C60/75 i C70/85

Analizując oba modele zaproponowane w [5] i [6] oraz wykresy z badań doświadczalnych, można zauważyć, że na wykresach z badań (w przeciwieństwie do tego, co zakłada model na rysunku 1) nie pojawia się ścieżka pokrytyczna dla elementów zniszczonych przez rozłupywanie. Brak tego zjawiska zaobserwowano we wszystkich rodzajach próbek, które zniszczyły się przez rozłupanie.

Niemniej jednak można wnioskować, że model zaproponowany w [5] nadaje się do wyznaczania krzywych naprężenia przyczepności w zależności od przemieszczenia pręta w badaniu pull-out dla próbek z BWW zniszczonych według metody badawczej wyciągnięcia pręta z elementu betonowego.

7. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że dla odcinka zakotwienia długości 5ϕ (zgodnie z wytycznymi RILEM [13]) większość próbek zniszczyła się przez rozerwanie otuliny. W elementach o krótszym odcinku zakotwienia nastąpiło zniszczenie przez wyciągnięcie pręta. W próbkach tych nie zaobserwowano jakiegokolwiek zniszczenia elementu betonowego.

Lepszą przyczepność osiągnęły próbki z prętem EPSTAL. Zdaniem autorów badań stało się tak dlatego, iż pręty te mają mniejszą liczbę żeberek, ale za to mają one wyższą wysokość. Dzięki temu beton pomiędzy żeberkami lepiej się klinuje i elementy z tymi prętami osiągają wyższą wartość naprężenia przyczepności.

Analizując powyższe wyniki, należy pamiętać, że metoda pull-out nie odzwierciedla jednoznacznie pracy elementu zginanego. W badaniu tym beton jest ściskany, a stal rozciągana, natomiast w elementach zginanych, takich jak belki czy płyty, zarówno beton jak i stal są rozciągane. Dodatkowo krótki odcinek zakotwienia pręta uniemożliwia powstanie rys, co prowadzi do uzyskania zawyżonych wartości naprężeń przyczepności.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Dyba M., Wpływ parametrów technologicznych na przyczepność betonu wysokowartościowego do stalowych splotów sprężających, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, 2014
- [2] Dybeł P., Wpływ składu i właściwości betonów wysokowartościowych na przyczepność do stalowych prętów zbrojeniowych, Praca doktorska, Kraków, 2012
- [3] EN 1992-1-1: Design of concrete structures – General rules and rules for buildings, 2004
- [4] Esfahani M. R., Rangan B. V., Local Bond Strength of Reinforcing Bars in Normal Strength and High-Strength Concrete (HSC), ACI Structural Journal, tom 95, 2/1998, str. 96–106
- [5] fib bulletin 10 Bond of reinforcement in concrete, fédération internationale du béton/International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland, 2000
- [6] fib Model Code for Concrete Structures 2010, fédération internationale du béton/International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland, 2013
- [7] Huang Z., Engstrom B., Magnussen J., Experimental and analytical studies of the bond behavior of deformed bars in high strength concrete, 4th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete-BHP, 1996, str. 1115–1124, Paris
- [8] ISO 6892-1 Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature 2019
- [9] Kijania-Kontak M., Badania przyczepności między betonem wysokowartościowym a stalą wysokiej wytrzymałości, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, 2018
- [10] Matthias S., Hegger J., Hude F., Schoening J., Hochfeste Bewehrung im Stahlbetonbau – Identifizierung von Anwendungsmöglichkeiten, Entwicklung von Bemessungsgrundlagen und Ermittlung des wirtschaftlichen Einsparpotentials, 2013
- [11] Morita S., Kaku T., Splitting bond failures of large deformed reinforcing bars, ACI Journal Proceedings 76(1)1979, str. 93–110
- [12] Murcia-Delso J., Stavridis A., Shing B., Modeling the bond-slip behavior of confined large diameter reinforcing bars. In ECCOMAS Thematic Conference – COMPDYN 2011: 3rd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering: An IACM Special Interest Conference, Corfu, 2011
- [13] RILEM/CEB/FIP Technical recommendations for the testing and use of construction materials, E&FN Spon, U.K, 1983
- [14] Shafaie J., Hosseini A., Marefat M. S., 3D finite element modelling of bond-slip between rebar and concrete in pull-out test, The 3rd International Conference on Concrete and Development, Teheran 2009, str. 403-413
- [15] Vandewalle L., Theoretical Prediction of the Ultimate Bond Strength Between a Reinforcement Bar and Concrete, Bond in Concrete: from Research to Practice, Riga, 1992
- [16] Wałach D., Rozwarcie rys ukośnych w przypodporowej strefie belek wykonanych z betonu wysokowartościowego (BWW), Praca doktorska, Lublin, 2008