

prof. dr hab. inż. Roman Kinasz^{1)*}

ORCID: 0000-0001-6715-9583

dr inż. Andriy Mazurak²⁾

ORCID ID: 0000-0001-7367-774X

dr inż. Taras Osadchuk²⁾

ORCID: 0000-0002-8686-7056

dr inż. Taras Mazurak²⁾

ORCID: 0009-0000-8789-3224

DOI: 10.15199/33.2025.07.04

Abstract. Based on experimental studies, to evaluate the bond of reinforcing bars to shotcrete under static short-term loading on prismatic specimens. According to the results of the studies, the normal stresses in the reinforcement when loading the specimens showed different values depending on the method and angle of application. Experimental data were obtained on the bond of crescent-shaped reinforcement in shotcrete depending on the method and angle of application of the mixture to the reinforced surface.

Keywords: bond; sprayed concrete; shotcrete; concrete repair; construction strengthening.

The use of shotcrete technology is one of the most effective and reliable ways to apply protective coatings to concrete surfaces, repair defects in concrete, reinforce concrete and reinforced concrete structures (especially in the case of industrial and engineering structures, access to which is limited or significantly complicated), and manufacture thin-walled structures [1÷3].

The increase in the bearing capacity of reinforced concrete structures without changing the design scheme is mainly due to the increase in the cross-section of the reinforced element by an additional layer of concrete or shotcrete with the possible installation of additional reinforcement in the form of reinforcing rods or metal frames (photo 1).

A review of the literature on reinforcement bonding to concrete reveals the use of numerous, sometimes contradictory test methods and the use of different concrete samples. Today it is known that the length of reinforcement anchoring in concrete is affected by the stress-strain state of concrete, the thickness of the protective layer of concrete, the diameter and profile of the reinforcing rod, the strength of reinforcement and concrete, the presence of transverse reinforcement and its cross-sectional area, the type of aggregate in the concrete mix, etc. [4–8]. In addition to the same parameters as for concrete, the technology of applying shotcrete and the quality of work in reinforced structures have a significant impact on the reinforcement bonding in shotcrete [2, 9÷16].

Development of shotcrete mixtures and the use of efficient equipment have enabled significant improvements

Analysis of reinforcement bond in sprayed concrete

Analiza przyczepności zbrojenia w betonie natryskowym

Streszczenie. Na podstawie badań doświadczalnych oceniono przyczepność prętów zbrojeniowych do betonu natryskowego przy krótkotrwałym obciążeniu statycznym na próbkach prostopadłościennych. Zgodnie z wynikami badań, normalne naprężenia w prętach zbrojeniowych podczas obciążania próbek wykazywały różne wartości w zależności od metody i kąta natryskiwania mieszanki betonowej. Uzyskano dane doświadczalne dotyczące przyczepności zbrojenia żebrowanego do betonu natryskowego w zależności od metody i kąta nakładania mieszanki na wzmacnianą powierzchnię.

Słowa kluczowe: przyczepność; beton natryskowy; torkret; naprawa betonu; wzmacnianie konstrukcji.

Zastosowanie technologii torkretowania jest jednym z najbardziej skutecznych i niezawodnych sposobów nakładania powłok ochronnych na powierzchnie betonowe, naprawy wad betonu, wzmacniania konstrukcji żelbetowych (szczególnie w przypadku budowli przemysłowych i inżynierskich, do których istnieje ograniczony bądź znacznie utrudniony dostęp), wykonywania konstrukcji cienkościennych, a także obudowy tuneli [1÷3].

Zwiększenie nośności konstrukcji żelbetowych bez zmiany schematu statycznego wynika głównie ze zwiększenia przekroju poprzecznego elementu wzmacnianego o dodatkową warstwę betonu zwykłego lub torkretu z ewentualnym rozmieszczeniem dodatkowego zbrojenia w postaci prętów zbrojeniowych lub stalowych siatek (fotografia 1).

Przegląd literatury na temat przyczepności prętów zbrojeniowych do betonu pokazuje stosowanie wielu metod badań, niejednokrotnie sprzecznych, oraz wykorzystanie różnych betonowych elementów badawczych. Obecnie wiadomo, że długość



Photo 1. Spraying shotcrete during floor repair
Fot. 1. Natrysk torkretu podczas naprawy stropu

¹⁾ Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie im. Stanisława Staszica, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

²⁾ Uniwersytet Przyrodniczy we Lwowie (Ukraina), Wydział Budownictwa i Architektury

^{*)} Correspondence address: rkinash@agh.edu.pl

in shotcrete technology shotcrete technology, reducing the amount of rebound, increased layer thickness and quality of the sprayed surface. However, improving and optimizing the technology of applying shotcrete does not solve the problem of reinforcement adhesion in shotcrete (depending on the quality of the workmanship, defects such as cavities, loose areas, etc. may form behind the reinforcement). This is especially evident in densely reinforced structures, or when the conditions of execution complicate the process of applying the mixture.

Research on the factors affecting the bonding of reinforcement to concrete has been consistently developed over the past 50 years, which has led to significant modifications of standard design provisions in this area worldwide [4÷7, 17÷19]. Reinforcement bonding in shotcrete is an even more unexplored problem, since a much larger number of factors affect the bonding strength. The practice of use and experimental studies show that the joint operation of shotcrete and reinforcement is one of the main criteria for the bearing capacity of reinforcement, repair of concrete and reinforced concrete structures [1, 3, 20÷23].

The purpose of this paper is to evaluate the adhesion of reinforcing bars to sprayed concrete under short-term static loading. In addition, based on experimental tests, the influence of sprayed concrete around the reinforcing ribbed bars on the value of the adhesion stress was analyzed.

Program and methodology of experimental research

The research program included a number of tasks, the implementation of which required the manufacture of prototypes: concrete cubes, prisms, cylinders of short reinforcing bars, prismatic elements for their axial loading.

Performing a layer-by-layer application of shotcrete on the lower surface of the slab (photo 1.), in production conditions, shotcrete was simultaneously applied to the prepared molds for the manufacture of samples. Samples of cubes (100×100×100), prisms (100×100×400) were made in a mold for the manufacture of shotcrete slabs, with an open surface size of 600×600 mm. A monolithic shotcrete slab was made with a thickness of at least 100 mm, so the height of the formwork was 120–150 mm. In order to prevent the occurrence of heterogeneity in the structure of the shotcrete slab, at the beginning of the shotcrete operation, slots were made inside the formwork on its walls (Photo 2a).

The prismatic specimens with reinforcing rods were made in a mold with a widened upper open surface (wall slope up to 45°) to prevent edge effects and rebound accumulation (Photo 2b).

Polymer seals were placed in the pre-prepared formwork with appropriate holes for reinforcing bars, on which polymer seals were placed in the formwork array, leaving the surface of the reinforcement open, thereby providing the anchoring length $l = 80$ and 100 mm). The concrete mixture was laid in layers, compacting it on a vibrating table, or shotcrete was applied in layers, and samples with reinforcement releases on both sides

zakotwienia zbrojenia w betonie zależy od stanu naprężenia i odkształcenia i grubości otuliny betonu oraz średnicy i profilu pręta zbrojeniowego, wytrzymałości zbrojenia i betonu, obecności zbrojenia poprzecznego i jego pola przekroju, rodzaju kruszywa w mieszance betonowej itp. [4÷8]. Oprócz tych samych parametrów, jak w przypadku betonu zwykłego, technologia nakładania betonu natryskowego, jakość pracy w konstrukcjach zbrojonych i jakość wykonania mają znaczący wpływ na przyczepność zbrojenia w betonie natryskowym [2, 9÷16].

Rozwój mieszanek betonu natryskowego i korzystanie z wydajnego sprzętu umożliwiły znaczne ulepszenie technologii torkretowania, zmniejszenie ilości odbicia, zwiększenie grubości warstwy i jakości powierzchni natrysku. Ulepszenie i optymalizacja technologii nakładania betonu natryskowego nie rozwiązuje jednak problemu przyczepności zbrojenia w betonie natryskowym (w zależności od metody i jakości wykonania, za zbrojeniem mogą powstawać wady, takie jak pustki, zjawisko mniejszego zagęszczenia betonu itp.). Jest to spotykane szczególnie w gęsto zbrojonych konstrukcjach lub gdy warunki wykonania komplikują proces nakładania mieszanki betonowej.

Badania czynników wpływających na przyczepność zbrojenia w betonie rozwijały się sukcesywnie w ostatnich pięćdziesięciu latach, co powodowało na całym świecie znaczne modyfikacje normowych przepisów projektowych w tej dziedzinie [4÷7, 17÷19]. Przyczepność zbrojenia w betonie natryskowym jest niezbadana. Praktyka stosowania i badania doświadczalne pokazują, że współpraca betonu natryskowego i zbrojenia jest jednym z głównych kryteriów nośności wzmocnienia lub naprawy konstrukcji betonowych i żelbetowych [1, 3, 20÷23].

Celem artykułu jest ocena przyczepności prętów zbrojeniowych do betonu natryskowego pod krótkotrwałym obciążeniem statycznym. Ponadto na podstawie badań doświadczalnych przeprowadzono analizę wpływu betonu natryskowego wokół zbrojonych prętów żebrowanych na wartość naprężenia przyczepności.

Plan badania przyczepności i przygotowanie elementów

Program badawczy przewidywał wytworzenie próbek: betonowych kostek; prostopadłościanów; cylindrów; krótkich prętów zbrojeniowych; elementów prostopadłościennych do ich osiowego obciążania.

Wykonując na placu budowy narzucanie torkretu warstwą po warstwie na dolnej powierzchni płyty stropowej (fotografia 1), torkret był jednocześnie nakładany do form w celu przygotowania próbek. Próbkę w postaci kostki (100×100×100 mm) i prostopadłościanów (100×100×400 mm) zostały wykonane w formie do produkcji płyt torkretowych o wymiarach 600×600 mm. Monolityczna torkretowa płyta badawcza miała grubość co najmniej 100 mm, a więc wysokość szalunku wynosiła 120–150 mm. Chcąc zapobiec niejednorodności struktury płyty torkretowanej, na początku operacji torkretowania wykonano szczeliny wewnątrz szalunku na jego ścianach (fotografia 2a).

Próbki prostopadłościenną z prętami zbrojeniowymi żebrowanymi wykonano w formie z poszerzoną górną otwartą powierzchnią (nachylenie ścianki do 45°), aby zapobiec efektom brzegowym i ograniczyć zjawisko odbicia (fotografia 2 b).

were obtained to pinch and fix the indicators (Photo 3). After the shotcrete had matured, the samples were sawn into separate prismatic elements. The process of applying shotcrete to the slab (reinforced with a mesh $\varnothing = 10$ mm, with a step of 200×200 mm, see Photo 1), respectively, the manufacture of samples was carried out in a “dry” way using the ready-mixed polymer-cement mixture “KIMTEK (Kimtek)” (Photo 3). Practical experience in performing shotcrete works proves that the optimization of the shotcrete process by the “dry” method is achieved for: distance to the surface to be shotcrete $L = 0.5\text{--}0.8$ m; initial flow rate at the cut of the ring nozzle $100\text{--}120$ m/s; holding the nozzle perpendicular to the application surface, reinforced surfaces deviating from the normal to 15° (Figure 1) [9].



Photo 2. Mould for the preparation of: a) test cubes, sprayed concrete cubes; b) reinforced cuboid samples

Fot. 2. Forma do przygotowania: a) kostek testowych, sześciennych z betonu natryskowego; b) zbrojonych próbek prostokątnych

When applying shotcrete to the reinforcement grid of the floor slab with a reinforcement spacing of 200 mm, the operator applies the mixture perpendicular to the surface, making small deviations from the normal (Figure 1), which reach the range of $\pm 0\text{--}15^\circ$. In general, moving along the prepared reinforced slab, there are areas of application perpendicular to the surface of reinforcement, scheme I (deviation from the norm up to $\pm 5^\circ$), scheme II (deviation from the norm from $\pm 5^\circ$ to 10°) and scheme III (deviation from the norm reaches $\pm 15^\circ$). Modeling the process of execution on the site in production conditions, we prepared the appropriate molds (Photo 2) and made prototypes according to the described schemes (see Photo 3).

Given the difficulty of evaluating the performance of contact surfaces in a mass of concrete or shotcrete, we experimentally determine the deformations of the surface of the shotcrete element and the movement of the ends of the reinforcement. To solve the tasks set for the study of the prepared samples, tests are performed to pull out reinforcing bars of class A500C for various lengths of embedding (the ratio of the length of the anchoring of the bars to their diameters, concrete class C30/35, and rod diameters $f = 8$ and 10 mm) [8, 12]. For the test, prisms with a square cross-section of 100×100 mm were used. The area of adhesion of the reinforcing bar to the concrete or shotcrete is located on the side of the force application and has a length of $10f$, the height of the prism was 200 mm.

W przygotowanym wcześniej szalunku z odpowiednimi otworami na pręty zbrojeniowe umieszczono uszczelki polimerowe, pozostawiając otwartą powierzchnię zbrojenia i zapewniając w ten sposób długość zakotwienia $l = 80$ i 100 mm. Mieszanke betonową układano warstwami, zagęszczano na stole wibracyjnym lub torkretowano warstwami, a próbki z uwolnionym zbrojeniem po obu stronach uzyskiwano w celu zamocowania mikrowskaźników. Po okresie dojrzewania betonu natryskowego płyty badawcze zostały pocięte na elementy prostopadłościennie (fotografia 3). Proces nanoszenia torkretu na płytę zbrojoną siatką $\varnothing = 10$ mm o rozstawie 200×200 mm (fotografia 1) oraz produkcji próbek przeprowadzono metodą suchą przy użyciu gotowej mieszanki polimerowo-cementowej (fotografia 3). Praktyczne doświadczenie wykonywania robót torkretowych dowodzi, że

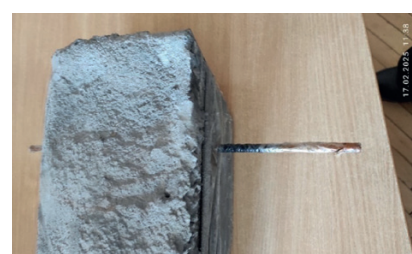


Photo 3. Sprayed concrete sample prepared for testing

Fot. 3. Próbkę z betonu natryskowego przygotowaną do badania

optymalizację procesu torkretowania metodą suchą uzyskuje się w przypadku: odległości od wylotu dyszy do torkretowanej powierzchni $L = 0.5\text{--}0.8$ m; początkowej prędkości przepływu mieszanki betonowej na wyjściu z dyszy pierścieniowej $100\text{--}120$ m/s; utrzymania dyszy prostopadle do powierzchni nanoszenia mieszanki, odchylenia od prostopadłej do powierzchni zbrojenia płyty stropu do 15° (rysunek 1) [9].

Podczas nakładania betonu natryskowego na siatkę wzmocnienia płyty stropowej, o rozstawie zbrojenia 200 mm, operator dyszy wylotowej nakłada mieszanke prostopadle do powierzchni płyty (rysunek 1), wykonując niewielkie odchylenia ($0 \pm 15^\circ$). Poruszając się wzdłuż przygotowanej powierzchni wzmocnionej płyty, istnieją obszary natryskiwania prostopadle do płaszczyzny zbrojenia, schemat I (odchylenie od prostopadłej do $\pm 5^\circ$), schemat II (odchylenie od prostopadłej od $\pm 5^\circ$ do $\pm 10^\circ$) i schemat III (odchylenie od prostopadłej osiąga $\pm 15^\circ$). Modelując proces wykonania na placu budowy w warunkach produkcyjnych, przygotowano odpowiednie formy (fotografia 2) i wykonano próbki do badań (fotografia 3).

Biorąc pod uwagę złożoność oceny powierzchni styku w masie betonu lub torkretu, doświadczalnie określono odkształcenia powierzchni elementu torkretowego oraz przemieszczenia końców prętów zbrojeniowych. W tym celu przeprowadzono badania przygotowanych próbek –

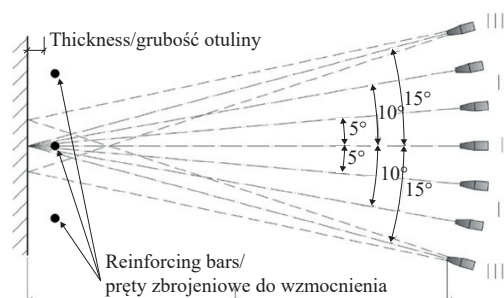


Fig. 1. Schematic of spray concrete application to a reinforced surface

Rys. 1. Schemat nakładania betonu natryskowego na wzmocnioną powierzchnię

The prism specimens were treated as fragments of centrally stretched elements. The loading was carried out in steps equal to 1/10 of the theoretically calculated bearing capacity; when approaching the rod displacement of 0.01 mm, smaller steps were taken to record the force indicator. After a 10-minute exposure at each load stage, readings were taken from the micro indicator of the tensile tester and the sequence of formation and development of normal cracks was monitored (Figure 2 and Photo 4) [10].

Research results and their analysis

Based on the analysis of literature sources [19], the practical use of shotcrete for the repair of concrete and reinforced concrete structures, and experimental studies, we considered the factors that affect the amount of reinforcement adhesion in shotcrete. To accomplish this task, samples were used in which the type of aggregate and class of concrete and shotcrete, reinforcement profile, reinforcement strength parameters, and protective layer were anomalous. The difference was in the use of two rod diameters ($\varnothing = 8$ and 10 mm), respectively, different anchoring lengths ($10\varnothing$) and the conditions of concreting and application of shotcrete in the manufacture of the samples (Photo 5 and Table 1).

The analysis of the results of the experimental studies conducted on the extraction of reinforcement from concrete and shotcrete samples shows significant differences in the stresses of sickle-shaped reinforcement with a diameter of 8 and 10 mm in concrete and shotcrete C30/35 in Tables 2 and 3.

Based on the comparative analysis of the research results, it was found that it is the conditions of concreting and application of shotcrete in the manufacture of samples that affect the normal stresses in the reinforcement during shear, thereby characterizing

the parameters of reinforcement adhesion in shotcrete. According to the research results, the normal stresses in the reinforcement at different stages of loading of the test specimens had a difference of 7–8% between concrete and shotcrete specimens, in which the shotcrete was applied to the reinforcement with a deviation from the norm of 10–15° (Scheme III). When the shotcrete was applied perpendicularly to the surface of the specimen, without de-

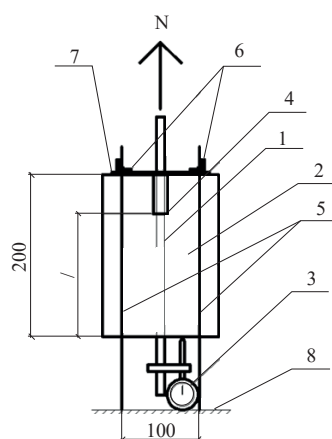


Fig. 2. Example of a testing scheme:

1 – rebar; 2 – test samples; 3 – micro gauge; 4 – polymer tube seal; 5 – steel anchors $\varnothing = 12$ mm; 6 – steel angles; 7 – steel plate; 8 – base plate
Rys. 2. Przykładowy schemat testowania: 1 – pręt zbrojeniowy; 2 – próbka testowa; 3 – mikrowskaźnik; 4 – poli-
merowa uszczelka z rury; 5 – stalowe kotwy $\varnothing = 12$ mm; 6 – stalowe kątowniki; 7 – stalowa płyta; 8 – płyta bazowa

wyrywanie żebrowanych prętów zbrojeniowych gatunku A500C $\varnothing = 8$ i 10 mm [8, 12] w przypadku różnych długości zakotwienia (stosunek długości zakotwienia prętów do ich średnicy) oraz klasy betonu C30/35. Badano próbki sześciennie o przekroju kwadratowym 100×100 mm. Obszar, w którym pręt zbrojeniowy przylega do betonu lub betonu natryskowego, znajduje się po stronie przyłożenia siły i ma długość $10\varnothing$, a wysokość sześcienu wynosiła 200 mm. Próbkę sześcienną traktowano jako fragmenty elementów rozciąganych centralnie. Obciążenie przeprowadzono w krokach równych 1/10 teoretycznie obliczonej nośności. Przy zbliżaniu się do przemieszczenia pręta wynoszącego 0,1 mm, kroki były zmniejszane w celu ustalenia wartości siły zniszczenia próbki. Po ekspozycji 10 min, na każdym etapie obciążenia dokonywano odczytów z mikrowskaźnika maszyny rozciągającej i monitorowano kolejność powstawania oraz rozwoju rys (rysunek 2, fotografia 4) [10].

Wyniki badań i ich analiza

Na podstawie analizy źródeł literaturowych [19], praktycznego zastosowania betonu natryskowego do napraw konstrukcji betonowych i żelbetowych oraz wyników przeprowadzonych badań doświadczalnych, zidentyfikowano czynniki wpływające na wartość przyczepności zbrojenia w betonie natryskowym. Do realizacji celu badań wykorzystano próbki, w których rodzaj kruszywa i klasa betonu zwykłego i betonu natryskowego, profil prętów zbrojeniowych, ich parametry wytrzymałościowe oraz grubość otuliny były podobne.

Rozbieżność polegała na zastosowaniu dwóch średnic prętów ($\varnothing = 8$ i 10 mm), odpowiednio różnych długości ich zakotwienia ($10\varnothing$) oraz warunków betonowania i nakładania torkretu podczas wykonywania próbek (fotografia 5, tabela 1).



Photo 4. Testing of a sprayed concrete sample

Fot. 4. Badanie próbki z betonu natryskowego

Wyniki badań wyrywania prętów zbrojeniowych z próbek betonu zwykłego i betonu natryskowego przedstawiono w tabeli 1.

Analiza wyników badań doświadczalnych wyciągania prętów zbrojeniowych z próbek betonu zwykłego i torkretu wykazała istotne różnice naprężeń w żebrowanych prętach zbrojeniowych o średnicy $\varnothing = 8$ i 10 mm w betonie zwykłym i torkrecie klasy C30/35 (tabela 2 i 3).

Na podstawie analizy porównawczej wyników badań stwierdzono, że wa-



Photo 5. Cross-section of damaged specimens made according to the shotcrete application scheme: a) scheme I (up to 5°); b) scheme II (5°–10°); c) scheme III (10°–15°)

Fot. 5. Przekrój zniszczonych próbek wykonanych zgodnie ze schematem nakładania torkretu: a) schemat I (do 5°); b) schemat II (5°–10°); c) schemat III (10°–15°)

Table 1. Experimental values of normal stresses in the reinforcement of plain and sprayed concrete specimens

Tabela 1. Doświadczalne wartości naprężeń normalnych w zbrojeniu próbek z betonu zwykłego i betonu natryskowego

Sample code/ Seria*	Type, class of concrete/ Typ, klasa betonu	Application method, application scheme/ Metoda układania, schemat nałożenia	Anchoring length/ Długość zakotwiczenia / [mm]	Experimental values of normal stresses in reinforcement/ Eksperymentalne wartości naprężeń normalnych w zbrojeniu, [MPa]	
				for a displacement of 0.1 mm/ w przypadku przemieszczenia 0,1 mm $\sigma_{S0,1,exp}$	maximum/maksimum $\sigma_{Smax,exp}$
P.8.80.1	concrete, C30/35/ beton zwykły, C30/35	Vibratory sealing/ wibrowanie	80	346,1	408,2
P.8.80.2				333,7	403,1
P.8.80.3				337,2	406,7
P.10.100.1			100	374,39	446,26
P.10.100.2				371,2	443,10
P.10.100.3				377,7	447,14
PSI.8.80.1	shotcrete C30/35/ beton natrys- kowy C30/35	Shotcrete, I / torkretowanie, I	80	189,3	220,8
PSI.8.80.2				188,2	218,2
PSI.8.80.3				207,5	234,8
PSI.10.100.1			100	195,6	233,9
PSI.10.100.2				198,8	238,6
PSI.10.100.3				208,9	249,3
PSII.8.80.1		Shotcrete, II / torkretowanie, II	80	256,88	310,44
PSII.8.80.2				258,66	311,06
PSII.8.80.3				265,36	316,3
PSII.10.100.1			100	259,95	312,95
PSII.10.100.2				278,16	330,25
PSII.10.100.3				308,19	372,6
PSIII.8.80.1		Shotcrete, III / torkretowanie, III	80	316,2	372,3
PSIII.8.80.2				315,8	373,6
PSIII.8.80.3				313,3	370,7
PSIII.10.100.1			100	340,1	401,4
PSIII.10.100.2				342,4	402,2
PSIII.10.100.3				351	422,5

* Symbols for prism specimens: P – prismatic concrete specimens, PS – prismatic shotcrete specimens, when applying shotcrete, the deviation from the normal in degrees: scheme I – up to 5°; scheme II – 5–10°; scheme III – 10–15°; the next number is the diameter of the rod in mm, the next number is the length of the rod embedding in concrete or shotcrete in mm; the last digit is the number of the twin specimen.

* Symbole próbek sześciennych: P – sześciennie próbki betonowe; PS – sześciennie próbki torkretowe, przy zastosowaniu torkretu odchylenie od prostopadłej w stopniach: schemat I do 5°; schemat II 5–10°; schemat III 10–15°; pierwsza cyfra arabska to średnica pręta [mm], kolejna cyfra – długość zakotwienia pręta w betonie lub torkrecie [mm]; ostatnia cyfra to numer próbki bliźniaczej

Table 2. Experimental averages of normal stresses in reinforcement for 0.1 mm displacement

Tabela 2. Średnie doświadczalne wartości naprężeń normalnych w zbrojeniu w przypadku przemieszczenia 0,1 mm

Brand of samples/ Seria	$\sigma_{S0,1,exp}$ [MPa]	Brand of samples/ Seria	$\sigma_{S0,1,exp}$ [MPa]	Brand of samples/ Seria	$\sigma_{S0,1,exp}$ [MPa]	Divergence of normal stresses in the reinforcement of the samples/ Różnica naprężeń normalnych w zbrojeniu próbek [%]	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(2) – (4)	(2) – (6)
P.8.80	339,0	PSIII.8.80	315,1	PSI.8.80	195,0	7	42
P.10.100	374,43	PSIII.10.100	344,5	PSI.10.100	201,1	8	46
PSIII.8.80	315,1	PSII.8.80	260,3	PSI.8.80	195,0	17	38
PSIII.10.100	344,5	PSII.10.100	282,1	PSI.10.100	201,1	18	42

Table 3. Experimental averages of maximum normal stresses in reinforcement during displacement

Tabela 3. Średnie doświadczalne wartości maksymalnych naprężeń normalnych w zbrojeniu w czasie przemieszczenia

Brand of samples/ Seria	$\sigma_{Smax,exp}$ [MPa]	Brand of samples/ Seria	$\sigma_{Smax,exp}$ [MPa]	Brand of samples/ Seria	$\sigma_{Smax,exp}$ [MPa]	Divergence of normal stresses in the reinforcement of the samples/ Różnica naprężeń normalnych w zbrojeniu próbek [%]	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(2) – (4)	(2) – (6)
P.8.80	406,0	PSIII.8.80	372,2	PSI.8.80	224,6	8	45
P.10.100	445,5	PSIII.10.100	408,7	PSI.10.100	240,6	8	46
PSIII.8.80	372,2	PSII.8.80	312,6	PSI.8.80	224,6	16	40
PSIII.10.100	408,7	PSII.10.100	338,6	PSI.10.100	240,6	17	41

violation from the norm (Scheme I), the difference in values reaches 42–46%. It should also be noted that a significant difference in the averaged values of the maximum normal stresses in the reinforcement during shear in the samples of shotcrete applied according to Scheme III (deviation from the norm 10–15° and Scheme II (deviation from the norm 5–10°) reaches 16–18%, and Schemes III and I – 38–42%. In the destroyed samples, cavities and leaks behind the reinforcement are clearly visible, i.e., the reinforcement is not tightly enveloped in concrete in all shotcrete samples (Figures 7 a, b). In many samples, 10–30% of the perimeter of the reinforcement surface have cavities, which led to a decrease in the adhesion of the reinforcement in shotcrete, which was confirmed in [2, 11, 18].

Conclusions

Experimental results were obtained on the adhesion of sickle-shaped reinforcement in shotcrete, depending on the method and angle of application of the concrete mixture to the reinforced surface. Analysis of the test results shows that, subject to appropriate shotcrete technology, the adhesion of reinforcement in shotcrete is 7–8% lower than in conventional concrete. A significant difference was also noted in the average values of the maximum normal stresses in the reinforcement during movement in shotcrete specimens:

runki betonowania i nakładania torkretu przy wykonaniu próbek wpływają na naprężenia normalne w prętach zbrojeniowych podczas ich przemieszczenia, charakteryzując tym samym parametry przyczepności zbrojenia w torkrecie. Zgodnie z wynikami badań, naprężenia normalne w prętach na różnych etapach obciążenia próbek testowych różniły się o 7–8% między próbkami betonowymi i torkretowymi, w których torkret został nałożony na zbrojenie z odchyleniem od prostopadłej 10–15° (schemat III). W przypadku gdy torkret został nałożony prostopadle do powierzchni próbki, bez odchylenia od prostopadłej (schemat I), różnica osiągnęła 42–46%. Należy również podkreślić, że istnieje znaczna różnica w uśrednionych wartościach maksymalnych naprężeń normalnych w prętach zbrojeniowych podczas przemieszczenia próbek torkretowanych, w przypadku zastosowania torkretu wg schematu III (odchylenie od prostopadłej 10–15°) i schematu II (odchylenie od prostopadłej 5–10°) wynosi ona 16–18%, a schematu III i I – 38–42% (tabele 2 i 3). W zniszczonych próbkach wyraźnie widoczne było zjawisko małego zagęszczenia betonu – pustki z tylnej strony (za prętem zbrojeniowym), znane jako efekt cienia betonu, tzn. pręty zbrojeniowe nie we wszystkich próbkach z betonu natryskowego były szczelnie otulone betonem (rysunek 7 a, b). W przypadku większości próbek na 10–30% powierzchni zbrojenia obecne są ubytki betonu (pustki), co doprowadziło do zmniejszenia przyczepności prętów zbrojeniowych w betonie natryskowym. Potwierdzono to w [2, 11, 18].

when using shotcrete with a deviation from the perpendicular of 10–15°, it reaches 16–18%, and with a deviation of up to 5° – 38–42%.

On the basis of experimental studies evaluated the effect of inhomogeneous concrete sprayed around the reinforcement bars on the value of the adhesion stress.

The results obtained should be taken into account when designing and performing shotcrete works.

It is also advisable to study the effect of: reinforcement diameter, grain composition and class of shotcrete on the adhesion of reinforcement to shotcrete.

Photos: A. Mazurak

Wnioski

Uzyskano wyniki badań doświadczalnych dotyczące przyczepności zbrojenia żebrowanego w betonie natryskowym, w zależności od metody i kąta nakładania mieszanki betonowej na wzmocnianą powierzchnię. Jak analiza pokazuje, przy zapewnieniu odpowiednich technik torkretowania, przyczepność zbrojenia w torkrecie jest mniejsza o 7–8% niż w betonie zwykłym. Znaczną różnicę odnotowano również w przypadku średnich wartości maksymalnych naprężeń normalnych w prętach zbrojeniowych podczas ich przemieszczania w próbkach torkretowych: przy nakładaniu torkretu z odchyleniem od prostopadłej 10–15°. Wynosiła ona 16–18%, a przy odchyleniu od prostopadłej do 5° – 38–42%.

Na podstawie badań doświadczalnych oceniono wpływ niejednorodnego betonu natryskowego wokół prętów zbrojeniowych na wartość naprężenia przyczepności.

Uzyskane wyniki powinny być brane pod uwagę przy projektowaniu i wykonywaniu robót torkretowania.

Wskazane jest również dalsze zbadanie wpływu średnicy zbrojenia, uziarnienia kruszywa i klasy betonu natryskowego na przyczepność zbrojenia do betonu.

Fotografie: A. Mazurak

Received: 03.03.2025

Revised: 29.04.2025

Published: 23.07.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 03.03.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 29.04.2025 r.

Opublikowano: 23.07.2025 r.

Literature

- [1] Davis B. Holcim New Zealand Cement Terminal, Shotcrete, V. 19, No. 1, Winter 2017, pp. 26–30.
- [2] Fischer M, Hofmann M. Reinforced shotcrete with bar diameters up to 32 mm, Crossrail learning legacy, 2015. 13 p.
- [3] Townsend FE. Northern Boulevard Crossing Tunnel CQ039, Shotcrete, V.18, No.1, Winter 2016. P. 34–36.
- [4] Babych EM, Babych VE, Polyanovska OE. Adhesion to concrete of a sickle-shaped profile and its anchoring in flexural reinforced concrete elements: monograph. Rivne: Volyn. Charms, 2017. 160 p.
- [5] Bilozir VV, Mazurak RA. Analysis of factors affecting the adhesion of sickle-shaped reinforcement with concrete and fiber concrete. Modern technologies and calculation methods in construction, 2020. Issue. 14. pp.47–54. <https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8> (18)-03.
- [6] Bilozir VV, Mazurak RA. Anchoring of bar reinforcement of class A500C in reinforced concrete. Bulletin of the Lviv National University of Nature Management. Ser. Architecture and construction. 2022. No. 23. pp.19–26. <https://doi.org/10.31734/apxirekrypa2022.23.019>.
- [7] Chapyuk O. Bonding of reinforcing bars of different diameters of class A500C with concrete. Bulletin of the Ternopil National Technical University: Ser. Mechanical engineering, production automation and machining processes. 2013. No. 2. pp. 156 – 163.
- [8] DSTU 3760: 2006 (ISO 6935-2:2019) Steel for the reinforcement of concrete. General technical conditions.
- [9] Mazurak A, Barabash V. Using torkret-concrete for strengthening concrete and reinforced concrete constructions. Dorigi i mosti [Roads and bridges]. Kyiv, 2008. 10. pp. 172–177.
- [10] Mazurak A, Luchko Y. Coupling of reinforcement in shotcrete. Visnyk architecture and construction. LNUP, No. 23. – Lviv. – 2022 – S. 60–65. <https://doi.org/10.31734/10.31734/architecture2022>.
- [11] Trujillo PB, Jolin M, Massicotte B, Bissonnette B. Bond strength of reinforcing bars with different encasement qualities – Guidelines for the development length of reinforcing bars in shotcrete. Bond in Concrete 2022. Bond, Anchorage Detailing Stuttgart 25th – 27th July 2022.
- [12] PN-EN 206-1. Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [13] PN-EN 14487-1:2023. Beton natryskowy. Część 1: Definicje, wymagania i zgodność.
- [14] PN-EN 14487-2:2007. Beton natryskowy. Część 2: Wykonanie.
- [15] PN-EN 14488-1:2008. Badanie betonu natryskowego. Cz. 1. Pobieranie próbek mieszanki betonowej i stwardniałego betonu.
- [16] CEB-FIP Model Code 2010. Committee Euro-International du Beton, Lausanne, Switzerland, 2010
- [17] Bandelt MJ, Billington SL. Bond behavior of steel reinforcement in high-performance fiber-reinforced cementitious composite flexural members. Materials and Structures, 2016. Vol. 49. pp. 71 – 86. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0475-4>.
- [18] Basso Trujillo P. Bond strength of reinforcing bars with different encasement qualities – Guidelines for the development length of reinforcing bars in shotcrete, Doctoral thesis dissertation, Université Laval, 2021.
- [19] Mossakowski P. 2008. Przyczepność prętów zbrojeniowych do betonu i metody jej badania. Materiały Budowlane 614 (11): 31–35.
- [20] ACI Committee 506, 506R-16, 2016. Guide to shotcrete, American Concrete Institute, 52 p.
- [21] ACI Committee 506, 506.6T-17, 2017. Visual shotcrete core quality evaluation technote, American Concrete Institute.
- [22] Panian L, Steyer M, Tipping S. Post-Tensioned Shotcrete Shearwalls, Concrete International, V. 29, No. 10, Oct. 2007, pp. 39–45.
- [23] Thomas A. Sprayed concrete lined tunnels. Boca Raton; London; New York: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2019. <https://doi.org/10.1201/9780429264566>.