mgr inż. Radosław Walendziak[1)]
ORCID 0000-0001-8333-2366
dr inż. Łukasz Krawczyk[1)*)]
ORCID 0000-0002-0406-7750
prof. dr hab. inż. Marcin Koniorczyk[1)]
ORCID 0000-0002-6887-4324

Laboratory testing of GFRP bars

Badania laboratoryjne prętów GFRP

DOI: 10.15199/33.2026.10.20

Abstract. The article presents the experience gained during laboratory investigations of GFRP bars, conducted at the Research Laboratory of Building Materials and Structures of the Department of Concrete Structures, Lodz University of Technology. The research methods used to determine the basic parameters of GFRP bars applied in civil engineering are presented: determination of specimen dimensions, testing of tensile, compressive and shear strength, as well as the bond strength between the bar and concrete. The results obtained for various types of bars are described, such as ribbed bars, smooth bars, sand-coated bars, with diameters most commonly used in construction practice. The paper also presents the many years of experience gained by the laboratory's research team.
Keywords: composite rods; tensile testing; concrete reinforcement; FRP materials

Streszczenie. W artykule zaprezentowano rezultaty badań laboratoryjnych prętów GFRP, przeprowadzonych w Laboratorium Badawczym Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Katedry Budownictwa Betonowego, Politechniki Łódzkiej. Przedstawiono metody badań stosowane do oznaczenia podstawowych parametrów prętów kompozytowych, stosowanych w inżynierii lądowej, tj wyznaczanie wymiarów próbki, oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie, ściskanie i ścinanie oraz przyczepności pręta do betonu. Opisano wyniki otrzymane w przypadku różnych rodzajów prętów: żebrowanych; gładkich; z posypką piaskową o średnicy najczęściej stosowanej w budownictwie. Przedstawiono również wieloletnie doświadczenia zdobyte przez zespół badawczy laboratorium.
Słowa kluczowe: pręty kompozytowe; rozciąganie; zbrojenie betonu; materiały FRP

In recent decades, the use of composite materials in construction has expanded rapidly, particularly in the form of bars used as an alternative to steel reinforcement in concrete. The growing interest in composite bars stems from their favourable properties, primarily low density, high tensile strength and corrosion resistance. These materials are particularly suitable for structures exposed to aggressive environmental conditions and applications in which long-term durability is essential.

The most widely used type of composite reinforcement is glass fibre-reinforced polymer (GFRP) bars, manufactured primarily using pultrusion. This process enables the production of elements with consistent geometric and mechanical properties while maintaining high production efficiency. Carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) and aramid fibre-reinforced polymer (AFRP) composites are also used in specialised applications.

The global market for composite reinforcing bars is growing rapidly. Its value was estimated at USD 800 million in 2016, while forecasts for 2026 exceed USD 1.4 billion. Glass fibre production had already exceeded 1.1 million tonnes in 2018, while basalt fibres are experiencing annual growth rates of approximately 12%, driven by demand from the construction and infrastructure sectors [1]. The FRP reinforcing bar market accounts for approximately 1% of the value of the steel market, which is estimated at USD 150–300 billion annually [2]. Notably, the composite market is growing considerably faster than the steel market.

FRP composites also have certain technological and in-service limitations [3÷9]. The most significant include a low modulus of elasticity, limited resistance to high temperatures, brittleness that restricts load redistribution at failure, and susceptibility to creep rupture. Additionally, the lack of standardised design procedures and long-term performance data may limit their widespread adoption in structural applications.

W ostatnich dekadach obserwuje się dynamiczny rozwój zastosowania materiałów kompozytowych w budownictwie, przede wszystkim prętów stosowanych jako alternatywne zbrojenie betonu. Zwiększające się zainteresowanie prętami kompozytowymi wynika z ich korzystnych właściwości użytkowych, obejmujących przede wszystkim niewielką gęstość, dużą wytrzymałość na rozciąganie oraz odporność na korozję. Materiały te znajdują zastosowanie szczególnie w konstrukcjach narażonych na agresywne oddziaływania środowiskowe oraz tam, gdzie istotna jest trwałość eksploatacyjna konstrukcji. Najczęściej stosowanym rodzajem zbrojenia kompozytowego są pręty GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) wytwarzane przede wszystkim z wykorzystaniem technologii pultruzji. Proces ten umożliwia uzyskanie elementów o powtarzalnych parametrach geometrycznych i mechanicznych przy dużej efektywności produkcyjnej. W zastosowaniach specjalistycznych stosowane są również kompozyty z włókien węglowych CFRP oraz aramidowych AFRP. Globalny rynek prętów kompozytowych rozwija się bardzo dynamicznie. W 2016 r. jego wartość szacowano na 800 mln USD, a prognozy na 2026 r. mówią już o ponad 1,4 mld USD. Produkcja włókien szklanych (GFRP) osiągnęła ponad 1,1 mln ton już w 2018 r., a włókna bazaltowe (BFRP) notują wzrosty rzędu 12% rocznie, napędzane zapotrzebowaniem sektora budowlanego i infrastrukturalnego [1]. W porównaniu z rynkiem stali, który szacowany jest na 150–300 mld USD rocznie, rynek prętów GFRP stanowi ok. 1% jego wartości [2]. Należy podkreślić, że dynamika wzrostu rynku kompozytów jest znacznie większa niż rynku stali. Kompozyty FRP mają także pewne ograniczenia technologiczne i eksploatacyjne [3÷9]. Do najważniejszych należą: niewielki moduł sprężystości; ograniczona odporność na działanie wysokiej temperatury; kruchość, która ogranicza redystrybucję obciążeń w fazie zniszczenia oraz podatność na

[1)] Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
[*)] Adress for correspondence: lukasz.krawczyk@p.lodz.pl

tibility to long-term rheological processes, particularly creep [10÷15]. Consequently, the design of structures reinforced with composite bars requires particular attention to serviceability limit states and long-term deformation.

Composite materials, including reinforcing bars, may also contain various manufacturing defects that affect their mechanical properties and long-term durability. The influence of these defects on the properties of the finished product depends primarily on their type, size and location within the bar cross-section. The most common defects include insufficient impregnation of the fibres with resin, resulting in bubbles and air voids; fibre misalignment; non-uniform fibre content along the length of the bar; insufficient resin curing; surface defects in the helical wrapping or sand coating; and variations in the cross-section along the length of the element. These defects generally reduce tensile strength and the modulus of elasticity and impair the durability of the product.

The surface finish of the bars is important for their bond to concrete. Owing to its ease of manufacture, fibre wrapping is the most common surface treatment, consisting of either a single helical wrap or a double cross-helical wrap. Sand coating is less common (Photo 1). The main difference lies in the mechanism by which the bar is anchored within the concrete.

The wrapped surface provides reasonably good mechanical interlock, similar to that of ribbed reinforcing bars, depending on the height and pitch of the wrapping. Sand coating generates friction over the entire surface of the bar, thereby enhancing its bond to concrete. The production of sand-coated composite bars is more complex in terms of equipment and processing than the production of bars with fibre wrapping alone. In the standard manufacturing process, the fibres are impregnated with resin, shaped and cured. For wrapped bars, an additional fibre strand is wound around the bar before it enters the curing oven. For sand-coated bars, the production line must include an additional system for applying aggregate with a tightly controlled particle size range, ensuring uniform coverage of the still-tacky bar. The sand must be applied at the appropriate stage of production, neither too early nor too late.

In Poland, the requirements for testing FRP composite bars are set out in the principal normative documents: ISO 10406-1:2015 [16], ACI 440.3R-04 [17] and EAD 260023-00-0301 [18], which cover the assessment of mechanical properties, durability and fire resistance. The growing importance of composite materials in construction has increased the demand for specialised laboratory testing to assess the performance characteristics of FRP bars.

The use of composites in construction is a key research interest of the staff of the Department of Concrete Structures at Lodz University of Technology (KBB PŁ).

długotrwałe procesy reologiczne, szczególnie pełzanie [10÷15]. Z tego względu projektowanie konstrukcji zbrojonych prętami kompozytowymi wymaga szczególnej kontroli stanów użytkowalności oraz odkształceń długotrwałych. W materiałach kompozytowych, w tym w prętach, mogą również występować różnego rodzaju wady produkcyjne wpływające na ich właściwości mechaniczne oraz trwałość eksploatacyjną. Wpływ tych nieprawidłowości na parametry gotowego wyrobu zależy przede wszystkim od ich rodzaju, wielkości oraz lokalizacji w przekroju pręta. Do najczęściej spotykanych wad należą: niedostateczne nasycenie włókien żywicą, prowadzące do powstawania pęcherzy i pustek powietrznych; niewspółosiowość włókien; niejednorodny udział włókien na długości pręta; niedostateczne utwardzenie żywicy; wady powierzchniowe oplotu lub posypki oraz nieregularność przekroju na długości elementu. Wady te z reguły powodują zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości, a także pogorszenie trwałości wyrobu.

Istotne, z punktu widzenia przyczepności do betonu, jest wykończenie powierzchni prętów. Najczęściej, ze względu na łatwy proces produkcji, stosowany jest oplot z włókna – pojedynczy jednoskośny lub podwójny dwuskośny. Rzadziej spotkana jest posypka piaskowa (fotografia 1). Główna różnica tkwi w mechanizmie kotwienia pręta w strukturze betonu. Powierzchnia z oplotu zapewnia dosyć dobrą przyczepność mechaniczną (jak w prętach żebrowanych) w zależności od wysokości i skoku oplotu. Powierzchnia piaskowa zapewnia tarcie na całej powierzchni pręta, a co za tym idzie większą przyczepność takiego pręta. Produkcja prętów kompozytowych z posypką piaskową jest bardziej skomplikowana technicznie i technologicznie niż produkcja prętów z samym oplotem. W standardowym procesie włókna są nasączane żywicą, formowane i utwardzane. Przy oplocie, pręt owija się dodatkową nitką przed wejściem do pieca. W przypadku posypki, linia produkcyjna musi być wyposażona w dodatkowy system aplikacji kruszywa o ściśle określonej frakcji, który równomiernie pokrywa lepki jeszcze pręt. W procesie produkcji piasek nie może być też naniesiony na powierzchnię pręta za wcześnie lub zbyt późno.



Photo 1. Examples of GFRP bars with different diameters and surface finishes: sand coating; single helical wrapping; and double cross-helical wrapping
Fot. 1. Przykładowe pręty GFRP o różnej średnicy i sposobie wykończenia powierzchni: posypka piaskowa; oplot jednoskośny; oplot krzyżowy dwuskośny

W Polsce wymagania dotyczące badania prętów kompozytowych FRP określają podstawowe dokumenty normowe: ISO 10406-1:2015 [16], ACI 440.3R-04 [17] oraz EAD 260023-00-0301 [18], obejmujące ocenę właściwości mechanicznych, trwałości oraz odporności ogniowej materiału. Rosnące znaczenie materiałów kompozytowych w budownictwie powoduje zwiększone zapotrzebowanie na specjalistyczne badania laboratoryjne, umożliwiające ocenę właściwości użytkowych prętów FRP. Wykorzystanie kompozytów w budownictwie jest w ścisłym obszarze zainteresowania pracowników Katedry Budownictwa Betonowego Poli-

The department's Research Laboratory of Building Materials and Structures systematically develops its expertise in testing composite materials, as demonstrated by the extension of its accredited testing scope to include FRP materials. The laboratory holds accreditation certificate No. AB 536 issued by the Polish Centre for Accreditation. Its accredited scope includes tensile testing of composite bars and determination of their modulus of elasticity.

This article presents the experience of the KBB PŁ Research Laboratory of Building Materials and Structures in the experimental assessment of GFRP composite bars used as concrete reinforcement. Selected test methods and laboratory capabilities for assessing their mechanical properties and durability are discussed. Particular attention is given to determining bar geometry, tensile, compressive and shear strength, bond to concrete and creep behaviour.

Determination of the bar cross-sectional area

According to Clause 5 of ISO 10406-1:2015 [16], the nominal cross-sectional area of the bar (A) should be determined from measurements of the specimen length (l) and volume (V), with the latter determined using the hydrostatic method. The nominal bar diameter (D) is then calculated from the cross-sectional area obtained in this way. Since the geometry of the surface wrapping may affect the cross-sectional area determined using this method, the cross-sectional area (A_d) calculated from the manufacturer-declared diameter (d) may also be used in strength calculations.

The geometric parameters are determined using Equations (1) and (2):

$$A = \frac{v}{l} \quad (1)$$

$$D = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2)$$

where:

V – volume determined from the amount of water displaced by the test specimen, measured with an accuracy of ±1 mL [mL];

l – mean specimen length measured with an accuracy of ±0.1 mm [mm];

A – nominal cross-sectional area [mm²];

D – nominal bar diameter rounded to one decimal place [mm].

Geometric measurements revealed that bars with a declared diameter of 8 mm or less had non-circular cross-sections. The observed flattening of the cross-section occurs during the bar manufacturing process. In some cases, the manufacturer-declared diameter (d) differed from the actual diameter (D) by as much as approximately 20%.

Tensile strength testing

Owing to the brittle nature of FRP composites, proper gripping in the testing machine is a key consideration when preparing specimens for tensile strength testing. Inadequate anchorage may cause premature bar failure in the gripping zone, preventing reliable determination of tensile strength.

techniki Łódzkiej (KBB PŁ). Laboratorium Badawcze Materiałów i Konstrukcji Budowlanych KBB PŁ systematycznie rozwija kompetencje dotyczące badania materiałów kompozytowych, czego potwierdzeniem jest rozszerzenie zakresu badań akredytowanych o badania materiałów FRP. Laboratorium posiada certyfikat akredytacji Polskiego Centrum Akredytacji nr AB 536, w ramach którego realizuje badania wytrzymałości na rozciąganie prętów kompozytowych wraz z określeniem modułu sprężystości.

W artykule przedstawiono doświadczenia Laboratorium Badawczego Materiałów i Konstrukcji Budowlanych KBB PŁ z eksperymentalnej oceny prętów kompozytowych GFRP stosowanych do zbrojenia betonu oraz omówiono wybrane metody badań i możliwości laboratoryjne związane z oceną ich właściwości mechanicznych i trwałości. Szczególną uwagę poświęcono badaniom obejmującym oznaczanie charakterystyki geometrycznej prętów, wytrzymałości na rozciąganie, ściskanie oraz ścinanie, a także ocenę przyczepności do betonu i właściwości pełzania.

Określenie pola powierzchni pręta

Nominalne pole przekroju pręta (A), zgodnie z normą ISO 10406-1: 2015 [16] pkt 5, powinno być określone na podstawie pomiarów długości (l) i objętości próbki (V), wyznaczonej metodą hydrostatyczną. Na podstawie tak wyznaczonego pola przekroju oblicza się średnicę nominalną pręta (D). W związku z tym, że wyznaczone w ten sposób pole przekroju może być zaburzone przez geometrię oplotu powierzchniowego, do obliczenia wytrzymałości można również przyjąć pole przekroju (A_d), wyznaczone z uwzględnieniem średnicy deklarowanej przez producenta (d).

Parametry geometryczne wyznacza się z wzorów:

$$A = \frac{v}{l} \quad (1)$$

$$D = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2)$$

gdzie:

V – objętość określona na podstawie ilości wody wypartej przez badaną próbkę, wyznaczona z dokładnością ± 1 ml [ml];

l – średnia długość próbki wyznaczona z dokładnością ± 0,1 mm [mm];

A – nominalne pole przekroju [mm²];

D – nominalna średnica pręta zaokrąglona do jednego miejsca po przecinku [mm].

Podczas pomiarów geometrycznych zauważono, że w przypadku prętów o deklarowanej średnicy 8 mm i mniejszej, przekrój prętów nie był kołowy. Zaobserwowane spłaszczenie przekroju powstaje w procesie produkcji prętów. W niektórych przypadkach deklarowana przez producenta średnica (d) różniła się nawet o ok. 20% od rzeczywistej (D).

Badanie wytrzymałości na rozciąganie

Ze względu na kruchy charakter kompozytów FRP, kluczowym zadaniem podczas przygotowania próbek do oznaczenia wytrzymałości na rozciąganie jest ich właściwe mocowanie

To minimise local damage and prevent specimen slippage, both ends of the bar should be anchored in steel tubes whose diameter and length are selected to suit the diameter of the bar being tested.

Detailed procedures for preparing the anchorages are specified in ACI 440.3R-04 [17] and EAD 260023-00-0301 [18]. The steel tubes used for anchorage have diameters proportional to the diameter of the test bar. Document [17] also specifies a minimum tube wall thickness of 4.8 mm, which minimises the risk of anchorage failure within the machine grips. Detailed requirements for anchorage geometry are summarised in Table 1.

In the experimental investigations, a two-component epoxy resin adhesive was used as the anchoring material. This adhesive provides high mechanical strength and good adhesion to concrete and steel.

The free length of the bar between the anchorages also depends on its diameter and should be at least 300 mm or 40d, whichever is greater, where d is the bar diameter. Consequently, when all specimen configuration requirements are taken into account, the total length of the bar prepared for testing may be considerable. For example, the minimum specimen length for a 16 mm diameter bar should be approximately 140 cm, whereas a 20 mm diameter bar requires a length of 172 cm according to ACI 440.3R-04 [17] or 200 cm according to EAD 260023-00-0301 [18]. The required working space of the testing machine considerably exceeds that typically used for testing steel reinforcing bars, which may present significant organisational and technical challenges. The tensile testing setup at KBB PŁ was custom-designed for testing glass, carbon and basalt fibre-reinforced composite bars in accordance with European standards. Its maximum load capacity of 600 kN and clear working height of 2 m allow specimens with diameters of up to 32 mm to be tested (Photo 2). The machine is also equipped with a non-contact optical extensometer for measuring specimen strain, together with data analysis software. The testing setup is innovative and unique within Poland and is used, among other applications, for product certification.

Tensile strength and the modulus of elasticity are calculated using Equations (3) and (4) and reported to three significant figures, in accordance with ISO 10406-1:2015 [16]. The modulus of elasticity is determined from the stress–strain relationship between stress levels corresponding to 20% and 50% of the tensile strength.

Table 1. Comparison of specimen anchorage methods
Tabela 1. Porównanie sposobu zakotwienia próbek

Sposób zakotwienia L	Długość zakotwienia L w zależności od średnicy pręta d [mm]	Minimalna zewnętrzna średnica rurki zakotwienia [mm]	Długość zakotwienia L w zależności od średnicy pręta d [mm]	Minimalna zewnętrzna średnica rurki zakotwienia [mm]
Dokument odniesienia				
ISO 10406-1:2015 [16]	ACI 440.3R-04 [17]		EAD 260023-00-0301 [18]	
Zakotwienie powinno być dostosowane do geometrii prętów testowych i mieć zdolność przenoszenia siły rozciągającej	6.4 L = 300	35	5 < d < 10 L = 125	21
	9.5 L = 300	35	12 < d < 18 L = 400	27
	13 L = 380	42	20 < d < 24 L = 600	35
	16 L = 380	42	25 < d < 30 L = 800	50
	19 L = 460	48	d = 32 L = 1000	72
	22 L = 460	48		

w maszynie wytrzymałościowej. Nieprawidłowe zakotwienie może prowadzić do przedwczesnego zniszczenia pręta w strefie zacisku, a tym samym uniemożliwić wiarygodne określenie badanej cechy. W celu ograniczenia lokalnych uszkodzeń oraz zapobieżenia poślizgowi próbki zaleca się obustronne zakotwienie pręta w stalowych rurach o średnicy i długości dostosowanej do średnicy badanego pręta. Procedury dotyczące przygotowania zakotwienia zostały szczegółowo określone w normach ACI 440.3R-04 [17] oraz EAD 260023-00-0301 [18]. Do zakotwienia stosuje się rury stalowe o średnicy proporcjonalnej do średnicy badanego pręta. W dokumencie [17] wskazano również minimalną grubość ścianki rurki, która powinna wynosić 4,8 mm. Minimalizuje to ryzyko zniszczenia zakotwienia w zacisku maszyny. Szczegółowe wymagania dotyczące geometrii zakotwienia zestawiono w tabeli 1. W prowadzonych doświadczeniach jako materiał kotwiący zastosowano dwuskładnikowy klej na bazie żywic epoksydowych, który charakteryzuje się dużą wytrzymałością mechaniczną oraz ma dobrą przyczepność do betonu i stali.

Długość odcinka swobodnego pręta pomiędzy zakotwieniami jest również uzależniona od jego średnicy i powinna wynosić co najmniej 300 mm lub 40d (d – średnica pręta), przy czym należy przyjąć wartość większą. W konsekwencji, z uwzględnieniem pełnych wymagań dotyczących konfiguracji próbek, całkowita długość pręta przygotowanego do badań może osiągać znaczne wartości, np. w przypadku pręta o średnicy 16 mm minimalna długość próbki powinna wynosić ok. 140 cm, natomiast pręta o średnicy 20 mm – odpowiednio 172 cm zgodnie z ACI 440.3R-04 [17] lub 200 cm zgodnie z EAD 260023-00-0301 [18]. Wymagana przestrzeń robocza maszyny wytrzymałościowej istotnie przekracza typowe zakresy stosowane podczas badań prętów stalowych, co może stanowić istotne utrudnienie organizacyjne oraz techniczne. Stanowisko do badania wytrzymałości na rozciąganie w KBB zostało zaprojektowane indywidualnie pod kątem prętów kompozytowych z włókien szklanych, węglowych, bazaltowych, zgodnie z wymaganiami europejskich norm. Maksymalny zakres siły wynoszący 600 kN oraz przestrzeń robocza o wysokości 2 m umożliwiają badanie próbek o dużej średnicy, dochodzącej do 32 mm, (fotografia 2). Dodatkowo maszyna wyposażona jest w bezdotykowy ekstensometr optyczny do pomiaru odkształceń próbki wraz z oprogramowaniem umożliwiającym analizę danych. Stanowisko badawcze

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (3)$$

$$E = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon \, A} \quad (4)$$

\where:
E – Young's modulus [N/mm²];
f_u – tensile strength [N/mm²];
F_u – maximum tensile force [N];
A – cross-sectional area [mm²];
ΔF – difference between the loads corresponding to 20% and 50% of the maximum tensile force [N];
Δε – strain difference corresponding to ΔF [–].

Representative values of the mechanical parameters of the bars obtained from tensile testing are presented in Table 2. The tested bars had fibre wrapping, and each row presents results for bars from a different manufacturer. The cross-sectional area used in the calculations was determined from the actual dimensions.

The stress – strain curves obtained from tensile testing, shown in Figure 1, indicate that GFRP bars exhibit linear elastic behaviour up to sudden failure. The tensile strengths obtained fall within the typical range for the respective type of GFRP. The observed scatter in the results reflects the influence of manufacturing factors, material heterogeneity and the quality of the fibres used. The absence of a yielding stage results in sudden failure, which represents a significant difference compared with steel reinforcement. The tensile test results show low variability in the measured parameters, with a coefficient of variation of up to 4.1% for specimens from a single manufacturer.

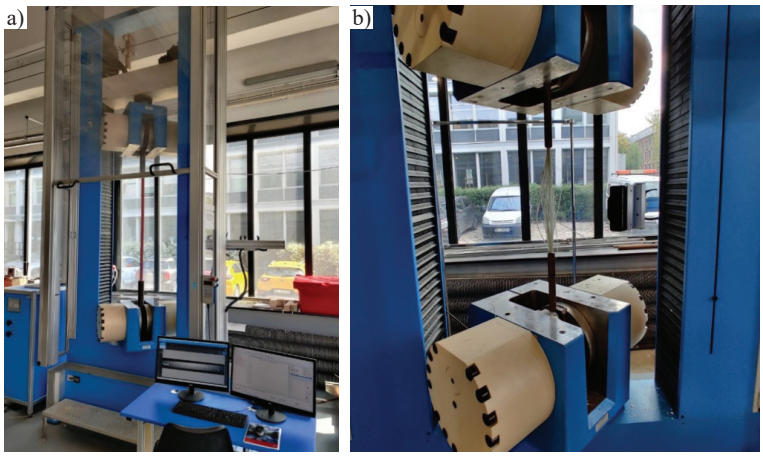


Photo 2. The machine for mechanical testing: a) an FRP bar with a diameter of 28 mm mounted in the machine; specimen length: 180 cm; b) example of GFRP bar failure during a tensile test
Fot. 2. Maszyna do badania wytrzymałości: a) z zamocowanym prętem FRP o średnicy 28 mm, długość próbki 180 cm; b) przykładowe zniszczenie pręta GFRP w próbie rozciągania

The maximum stress in the bar is independent of its diameter (Figure 1), whereas its load-carrying capacity is influenced by the type of glass fibres and matrix (resin), as well as the manufacturing method. During tensile testing, damage develops progressively through interacting mechanisms, including microcracking, fibre pull-out and fibre rupture, ultimately leading to failure (Photo 2b). The failure mechanism depends largely on the anchorage. In the final stage of the test, premature slippage of the bar out of its anchorage may occur due to shearing of the fibre wrapping.

Compressive strength testing

Neither ISO 10406-1:2015 [16] nor ACI 440.3R-04 [17] specifies a method for determining compressive strength. Such guidance is provided in Section 2.2.3 of EAD 260023-00-0301 [18], which refers to the test procedure described in [19]. The

jest innowacyjne i unikatowe także w skali kraju, wykorzystywane m.in. do certyfikacji wyrobów.

Wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości oblicza się na podstawie wzorów (3) i (4) z dokładnością do trzech cyfr znaczących zgodnie z wymaganiami ISO 10406-1:2015 [16]. Moduł sprężystości wyznaczany jest z zależności naprężenie–odkształcenie, uzyskanej dla poziomu obciążenia równego 20% i 50% wytrzymałości na rozciąganie.

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (3)$$

$$E = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon \, A} \quad (4)$$

gdzie:
E – moduł Younga [N/mm²];
f_u – wytrzymałość na rozciąganie [N/mm²];
F_u – maksymalna siła rozciągająca [N];
A – pole przekroju poprzecznego [mm²];
ΔF – różnica między obciążeniami przy 20% i 50% maksymalnej siły rozciągającej [N];
$\Delta\varepsilon$ – różnica odkształcenia w przypadku ΔF [–].

Przykładowe wartości parametrów wytrzymałościowych prętów, otrzymane w badaniu rozciągania przedstawiono w tabeli 2. Badane pręty, to pręty z oplotem. W każdym wierszu zaprezentowano wyniki dotyczące prętów pochodzących od innego producenta. W badaniach pole przekroju określono na podstawie wymiarów rzeczywistych.

Na podstawie wykresów uzyskanych w badaniach **wytrzymałości na rozciąganie**, przedstawionych na rysunku 1, stwierdzono, że pręty GFRP wykazują liniowo-sprężysty charakter pracy aż do nagłego zniszczenia. Osiągane wartości wytrzymałości na rozciąganie mieszczą się w typowym zakresie danego rodzaju GFRP. Widoczny rozrzut wyników wskazuje na wpływ czynników technologicznych (procesu produkcji), a także niejednorodności materiału oraz jakości zastosowanych włókien. Ze względu na brak fazy uplastycznienia zniszczenie jest nagłe, co stanowi istotną różnicę w porównaniu ze stalą zbrojeniową. Wyniki badań rozciągania charakteryzuje niewielka zmienność wyznaczanych parametrów (współczynnik zmienności do 4,1% w ramach próbek od jednego producenta). Maksymalne naprężenia w pręcie nie zależą od jego średnicy (rysunek 1), natomiast na nośność pręta mają wpływ rodzaj włókien szklanych i matrycy (żywicy), także metoda produkcji. Podczas próby rozciągania kompozyt nie ulega pęknięciu, lecz niszczy się stopniowo przez nakładające się mechanizmy uszkodzeń – mikropęknię-

Table 2. Tensile strength and modulus of elasticity test results for GFRP bars
Tabela 2. Wyniki oznaczenia wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości prętów GFRP

Rodzaj pręta	Średnica deklarowana d [mm]	Deklarowane pole przekroju A_d [mm²]	Nominalne pole przekroju A [mm²]	Siła maksymalna F_u [kN]	Odchylenie standardowe F_u [kN]	Wytrzymałość na rozciąganie f_u [MPa]	Moduł sprężystości E [GPa]
GFRP	8	50.3	50.3	65.2	2.7	1297	60.7
GFRP	8	50.3	49.4	59.9	2.0	1212	57.9
GFRP	8	50.3	50.3	62.7	0.8	1247	57.7
GFRP	8	50.3	50.0	52.9	2.1	1052	55.4
GFRP	8	50.3	50.1	56.6	0.9	1130	54.3
GFRP	8	50.3	50.3	82.1	3.0	1634	54.2
GFRP	8	50.3	52.2	44.1	0.9	845	47.8
GFRP	6	28.2	31.4	33.8	1.0	1077	55.8
GFRP	6	28.2	28.3	36.7	1.3	1300	55.6
GFRP	12	113.1	120.7	137.8	3.2	1142	54.0
GFRP	12	113.1	113.1	134.9	4.8	1193	54.0

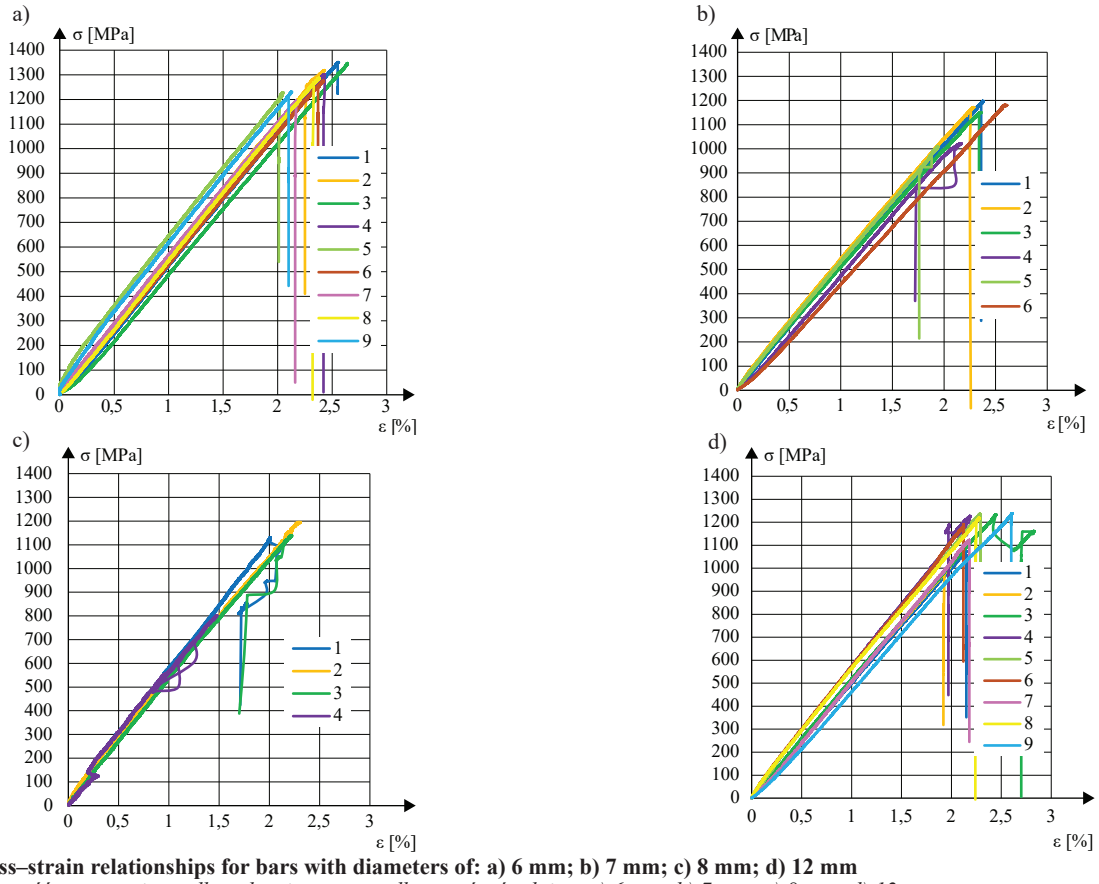


Fig. 1. Stress–strain relationships for bars with diameters of: a) 6 mm; b) 7 mm; c) 8 mm; d) 12 mm
Rys. 1. Zależność naprężenie – odkształcenie w przypadku prętów średnicy: a) 6 mm; b) 7 mm; c) 8 mm; d) 12 mm

specimen is prepared by cutting the bar to the required length (3d). The test also allows the compressive modulus of elasticity to be determined. Compressive strength is calculated using Equation (5):

$$f_c = \frac{F_c}{A} \quad (5)$$

where:
f_c – compressive strength [N/mm²];
F_c – load causing failure in compression [N];
A – nominal cross-sectional area of the specimen [mm²].

cia, wyciąganie i zrywanie włókien (fotografia 2b). Mechanizm zniszczenia w dużej mierze zależy od zakotwienia. W końcowej fazie próby może dojść do przedwczesnego wysunięcia pręta (spowodowanego ścięciem oplotu).

Badania wytrzymałości na ściskanie

W obu dokumentach stanowiących wytyczne dotyczące badań prętów kompozytowych nie określono metody badania wytrzymałości na ściskanie. Wytyczne takie wyszczególniono

Splitting at one end of the specimen is considered a valid failure mode. In compression testing parallel to the fibres, performed in accordance with standard [19], steel rings sized to fit the bar diameter are recommended to prevent premature splitting of the specimen fibres (Photo 3). Experience gained at the KBB PŁ laboratory indicates that the absence of protective rings causes premature specimen failure or shearing. The failure loads measured for specimens without rings were 10–20% lower than those obtained for specimens fitted with rings. Greater variability in the test results was also observed for specimens without protective rings. Table 3 presents the test results for bars fitted with protective rings.

Transverse shear strength testing

ISO 10406-1:2015 [16] specifies the requirements for specimens and apparatus used for shear testing of FRP bars. The specimens should be as straight as possible and should not be



Photo 3. Specimen after the compressive strength test
Fot. 3. Próbka po badaniu wytrzymałości na ściskanie

w EAD 260023-00-0301 [18] poz. 2.2.3, odwołując się do procedury badawczej opisanej w [19]. Próbka przygotowywana jest przez docięcie pręta na odpowiednią długość (3d). Badanie umożliwia również wyznaczenie modułu sprężystości przy ściskaniu. Wytrzymałość na ściskanie wyrażana jest wzorem:

$$f_c = \frac{F_c}{A} \tag{5}$$

gdzie:
f_c – wytrzymałość na ściskanie [N/mm^2]
F_c – obciążenie powodujące zniszczenie przy ściskaniu [N];
A – nominalna powierzchnia przekroju poprzecznego próbki [mm^2].

Prawidłowe zniszczenie próbki następuje przez rozszczepienie jednego z końców. W próbie ściskania wzdłuż włókien realizowanej wg normy [19], zaleca się stosowanie stalowych pierścieni dopasowanych do średnicy pręta w celu zapobieżenia przedwczesnemu rozszczepieniu włókien próbki (fotografia 3). Z doświadczeń prowadzonych w Laboratorium KBB PŁ wynika, że brak pierścieni zabezpieczających powoduje przedwczesne zniszczenie lub ścięcie próbki. Uzyskiwane wartości siły niszczącej próbek bez pierścieni były o 10-20% mniejsze od analogicznych wartości uzyskiwanych z pierścieniami. Zauważono również większą zmienność wyników badań w przypadku próbek bez zabezpieczenia pierścieniami. W tabeli 3 przedstawiono wyniki badań prętów zabezpieczonych pierścieniami.

Badanie wytrzymałości na ścinanie poprzeczne

W normie ISO 10406-1:2015 [16] opisano wymagania dotyczące próbek oraz aparatury do badań ścinania prętów FRP. Próbki powinny być możliwie proste i niepoddawane obróbce. Długość próbek musi być stała (niezależna od średnicy) i stanowić co najmniej pięciokrotność odległości mię-

Table 3. Compressive and shear strength test results for GFRP bars
Tabela 3. Wyniki oznaczenia wytrzymałości na ściskanie i ścinanie prętów GFRP

Rodzaj pręta	Producent	Średnica deklarowana d [mm]	Średnica z pomiaru bezpośredniego D [mm]	Maksymalna siła ściskająca F_c [kN]	Odchylenie standardowe F_c σ [kN]	Wytrzymałość na ściskanie f_c [MPa]	Maksymalna siła ścinająca P_s [kN]	Odchylenie standardowe P_s σ [kN]	Wytrzymałość na ścinanie T_s [MPa]
GFRP	3	6	6.2	14.0	1.3	464	10.9	0.5	181
GFRP	2	6	6.0	16.7	1.4	591	12.3	0.3	218
GFRP	10	6	6.3	18.7	1.2	600	12.7	0.5	204
GFRP	8	8	8.0	25.0	1.1	500	18.1	1.0	181
GFRP	1	8	8.0	26.5	1.2	534	26.5	0.8	267
GFRP	10	8	8.0	24.8	2.0	496	18.7	0.9	187
GFRP	11	12	11.6	65.2	4.3	617	46.7	1.6	221
GFRP	10	12	12.4	71.8	2.9	595	40.0	0.6	177
GFRP	9	12	11.6	64.7	5.1	612	43.5	1.9	206
GFRP	3	12	11.9	68.4	4.2	615	45.8	2.0	206
GFRP	2	12	11.8	66.4	3.4	607	31.1	0.7	142

machined. Their length must be constant, irrespective of the bar diameter, and must be at least five times the distance between the shear planes, which is 50 mm, without exceeding 300 mm.

At least three specimens must be tested. If an inappropriate failure mode occurs, such as fibre pull-out rather than shearing, the result must be discarded and an additional test performed. The specimen is positioned centrally in the shear apparatus (Photo 4a), ensuring close contact with the loading components without visible gaps. The load should be applied uniformly at a rate producing a shear stress increase of 30–60 N/mm²/min. Testing continues until specimen failure, and the failure load must be recorded to three decimal places. After testing, the failure mode is assessed visually.

Shear strength is calculated using Equation (6):

$$\tau_s = \frac{P_s}{2A} \quad (6)$$

where:

τ_s – shear strength [N/mm²];

P_s – load causing failure in shear [N];

A – nominal cross-sectional area of the specimen [mm²].

dzy płaszczyznami ścinania, wynoszącej 50 mm oraz nie przekraczać 300 mm. Należy wykonać badanie co najmniej trzech próbek, a w przypadku nieprawidłowego zniszczenia (np. wyciągnięcia włókien zamiast ścięcia), wynik trzeba odrzucić i wykonać dodatkowy test. Próbkę umieszcza się centralnie w aparacie ścinającym (fotografia 4a), tak aby dokładnie przylegała do elementów obciążających, bez widocznych szczelin. Obciążenie powinno być przyłożone równomiernie z prędkością powodującą wzrost naprężenia ścinającego od 30 do 60 N/mm²/min. Badanie prowadzi się aż do momentu zniszczenia próbki, a siłę niszczącą należy zapisać z dokładnością do trzech cyfr po przecinku. Po wykonaniu próby ocenia się wizualnie sposób zniszczenia. Wytrzymałość na ścinanie wyrażana jest wzorem:

$$\tau_s = \frac{P_s}{2A} \quad (6)$$

gdzie:

τ_s – wytrzymałość na ścinanie [N/mm²];

P_s – obciążenie powodujące zniszczenie przy ścinaniu [N];

A – nominalna powierzchnia przekroju poprzecznego próbki [mm²].

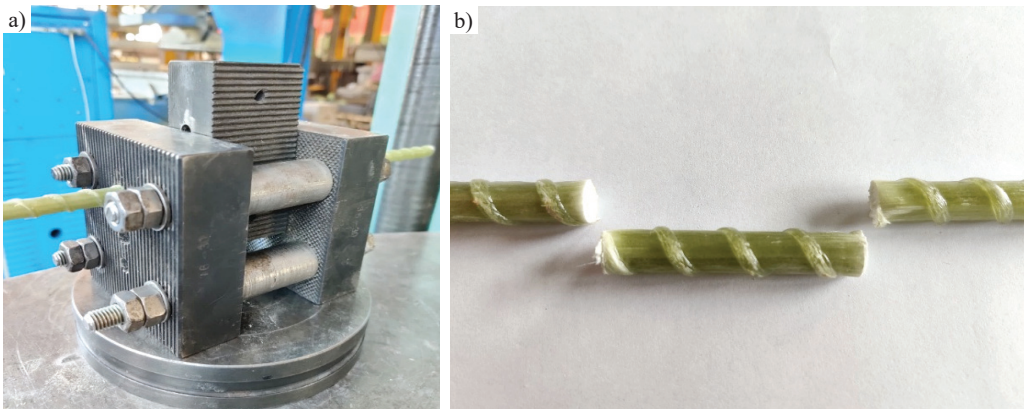


Photo 4. Shear test: a) test apparatus for determining shear strength; b) GFRP bar after testing

Fot. 4. Próba ścinania: a) przyrząd do określania wytrzymałości; b) pręt GFRP po badaniu

The shear test divides the specimen into three pieces. In a correctly performed test, the edges at both shear planes should be smooth (Photo 4b), with no evidence of fibre pull-out. Representative strength test results obtained from compression and shear testing are presented in Table 3.

The compressive and shear strength test results for GFRP bars show greater scatter between manufacturers, although the coefficient of variation within each test series does not exceed 10.2% and is generally no greater than 6%. This variability arises from differences in bar composition between manufacturers, including the amount and properties of the fibres within the matrix, the type of resin used and the manufacturing process.

Efektem próby ścinania jest przecięcie próbki na trzy części. W prawidłowo wykonanej próbie obie krawędzie w płaszczyźnie ścinania powinny być gładkie (fotografia 4b), bez efektu wyciągania włókien. Przykładowe wyniki badań wytrzymałościowych uzyskane w próbie ściskania i ścinania przedstawiono w tabeli 3.

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i ścinanie prętów GFRP charakteryzują się większym rozrzutem pomiędzy producentami, ale współczynnik zmienności w ramach każdej z serii nie przekracza 10,2% (zazwyczaj nie przekracza 6%). Wynika to z różnej kompozycji pręta w zależności od producenta, tj. ilości i właściwości włókien w matrycy, rodzaju zastosowanej żywicy, procesu produkcji itp.

Pull-out testing of bond between bars and concrete

ISO 10406-1:2015 [16] describes the procedure for testing the bond between a bar and concrete using the pull-out method. The test specimen is a concrete block, usually a cube

Badanie przyczepności prętów do betonu metodą pull-out

W normie ISO 10406-1:2015 [16] opisano sposób badania przyczepności pręta do betonu metodą wyciągania pręta – pull-out. Elementem badanym jest próbka betonowa, zazwyczaj

with a side length of 100 mm or 150 mm, in which a single FRP bar is embedded vertically along the central axis. The bonded length should be four times the bar diameter and should be located on the free-end side of the specimen. The bar should protrude approximately 10 mm beyond the concrete on the free-end side, and its surface should allow a displacement measuring device, such as a dial gauge, to be attached to measure movement during loading (Photo 5).

To ensure uniform stress transfer from the loaded side, the portion of the bar outside the bonded length should be sleeved, for example with a PVC tube, to prevent contact between the bar and the concrete. Spiral reinforcement is also recommended within the specimens to prevent splitting failure.

In accordance with ISO 10406-1:2015 [16], the loading rate should be selected so that the average tensile stress in the FRP bar increases at a rate of 10–20 N/mm²/min. The loading rate should remain constant to avoid sudden loads or shocks acting on the specimen. The KBB PŁ laboratory can perform pull-out tests under either force or displacement control. The test produces a curve of bond stress versus displacement of the free end of the bar.

The surface geometry of FRP bars, particularly the formation of ribs, has a significant influence on their bond to concrete. The most common solution is glass fibre wrapping applied during bar manufacture. Sand-coated surfaces are used less frequently. Figure 2 illustrates the influence of surface finish – sand-coated bars (PP) and smooth bars (BP) – on the bond stress of 8 mm diameter bars. The bonded length of the tested bars was 4d, corresponding to 32 mm, in accordance with ISO 10406-1:2015 [16].

For wrapped bars, shearing of the ribs is observed as the bar is pulled out of the concrete (Photo 6 and Figure 3).

Important differences exist between the bond tests specified in ISO 10406-1:2015 [16] and EAD 260023-00-0301 [18]. Under ISO 10406-1:2015 [16], testing is performed only in a concentric configu-

w kształcie sześcianu o boku 100 mm lub 150 mm, w którym pojedynczy pręt FRP jest osadzony pionowo w osi próbki. Długość odcinka zakotwienia powinna wynosić czterokrotność średnicy pręta i znajdować się od strony wolnego końca próbki. Pręt powinien wystawać na ok. 10 mm od strony wolnego końca, a jego powierzchnia umożliwiać zamocowanie czujnika (np. zegarowego) do pomiaru przemieszczenia podczas przyłożenia obciążenia (fotografia 5). W celu zapewnienia równomiernego przenoszenia naprężenia od strony obciążenia, część pręta poza odcinkiem zakotwienia powinna być osłonięta (np. rurką PVC), uniemożliwiając kontakt pręta z betonem. Dodatkowo zaleca się zastosowanie zbrojenia spiralnego w próbkach, aby zapobiec zniszczeniu przez rozłupanie betonu.

Zgodnie z wymaganiami ISO 10406-1:2015 [16] obciążenie należy tak dobrać, aby średnie naprężenie rozciągające w pręcie FRP zwiększało się w tempie od 10 do 20 N/mm²/min. Prędkość obciążania powinna być stała, aby uniknąć nagłych obciążeń (wstrząsów), działających na próbkę. W laboratorium KBB PŁ można wykonać badanie pull-out sterowane siłą oraz przemieszczeniem. Wynikiem badania jest wykres naprężenia na pobocznicy w funkcji przemieszczenia wolnego końca pręta. Istotny wpływ na przyczepność prętów FRP do betonu ma sposób ukształtowania ich powierzchni, przede wszystkim wykonanie żeberek. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest oplot z włókien szklanych, aplikowany na etapie produkcji prętów. Rzadziej wykorzystuje się powierzchnie z posypką piaskową. Wpływ rodzaju wykończenia powierzchni prętów (z posypką piaskową – PP oraz prętów gładkich – BP) na wartość naprężenia stycznego w przypadku prętów o średnicy 8 mm przedstawiono na rysunku 2. Długość zakotwienia zastosowanych prętów wynosiła 4d, czyli 32 mm, zgodnie z dokumentem ISO 10406-1:2015 [16].

W przypadku prętów z oplotem obserwowane jest ścinanie żeberek podczas wyciągania pręta z betonu (fotografia 6 oraz rysunek 3).



Oznaczenia:
1 – czujnik przemieszczeń;
2 – wolny koniec pręta o długości 10 mm ponad próbkę betonową;
3 – próbka betonowa, sześcian o boku $H = 150$ mm;
4 – osłonka z rurki PVC, część niezakotwiona w betonie, $H - 4d$;
5 – swobodny odcinek próbki (a) długość min. 300 mm lub 40d;
6 – strefa mocowania w maszynie wytrzymałościowej;

Photo 5. Pull-out bond test of FRP bars: a) test setup; b) schematic diagram of the test
Fot. 5. Badanie przyczepności prętów FRP metodą pull-out: a) stanowisko do badań; b) schemat badania

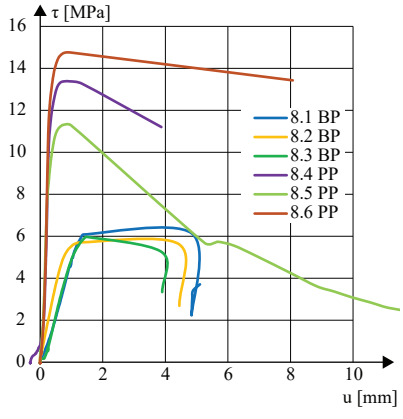


Fig. 2. Bond stress – slip relationship for an 8 mm bar with sand coating (PP) and without sand coating (BP)
Rys. 2. Zależność naprężenie – poślizg w przypadku pręta 8 mm z posypką piaskową (PP) i bez posypki (BP)



Photo 6. GFRP bars after bond testing. Shearing of all ribs within the bonded zone is visible
Fot. 6. Pręty GFRP po badaniu przyczepności. Widoczny efekt ścięcia wszystkich żeberek w strefie zakotwienia

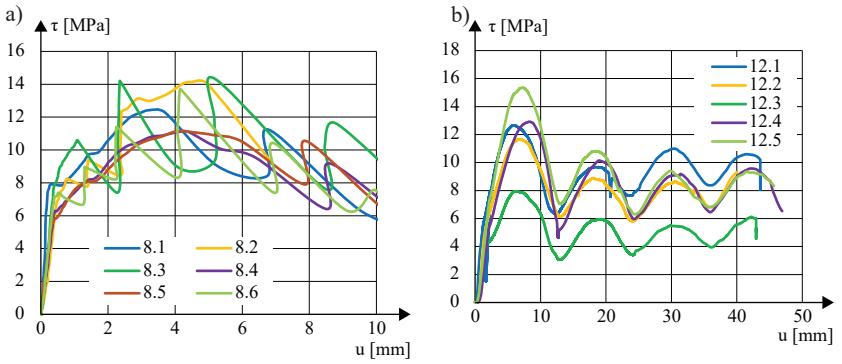


Fig. 3. Bond stress – slip relationships for wrapped bars: a) 8 mm, bar tested under force-controlled loading; b) 12 mm, bar tested under displacement-controlled loading
Rys. 3. Zależność naprężenie na pobocznicy – poślizg w przypadku prętów z oplotem: a) 8 mm, badanie sterowane przyrostem siły; b) 12 mm, badanie sterowane przyrostem przemieszczenia

ration. The concrete compressive strength, determined using 150 mm × 300 mm cylinders, should be 30 ± 3 MPa after 28 days of water curing. The concrete specimens are cubes whose size depends on the bar diameter: a side length of 100 mm for d < 17 mm and 150 mm for 17 mm ≤ d ≤ 30 mm. The bonded length is 4d.

Under EAD 260023-00-0301 [18], the bonded length should be 5d, and two concrete strength classes, C20/25 and C50/60, should be considered. The concrete cubes should have a side length of 200 mm for all bar diameters. An additional requirement applies to concentric bond tests in lower-strength concrete (C20/25): the bars should also be tested after prior conditioning in an alkaline solution with an initial pH ≥ 13 at 60 ± 3°C. EAD 260023-00-0301 [18] also requires eccentric bond testing, performed only in lower-strength concrete (C20/25).

Creep testing

The tests were conducted in accordance with ISO 10406-1:2015 [16]. A creep testing setup was prepared to ensure axial gripping of the bar and maintain a constant force with an accuracy of ±0.5%, while preventing the force from falling by more than 2% of the prescribed value during testing. The creep testing apparatus is shown in Photo 7.

Measurement data were automatically recorded and archived using a data acquisition system. A constant force was maintained while changes in bar length were recorded to determine strain. The minimum creep test duration was 1000 h. During the initial period, up to 12 h after the start of testing, both parameters were recorded at 10 min intervals. Subsequently, force was recorded every 24 h and specimen displacement every 2 h. Displacement was measured using a linear displacement transducer.



Photo 7. Creep test setup
Fot. 7. Stanowisko do badań pełzania

Należy podkreślić istotne różnice w badaniach przyczepności wg ISO 10406-1:2015 [16] i EAD 260023-00-0301 [18]. W normie ISO 10406-1:2015 [16] badanie realizowane jest wyłącznie w układzie osiowym, a wytrzymałość betonu określana na próbkach walcowych o wymiarach 150 mm × 300 mm i powinna wynosić 30±3 MPa po 28 dniach dojrzewania w wodzie. Próbki betonowe mają kształt sześcianów, których wymiar zależy od średnicy badanego pręta: 100 mm w przypadku prętów d < 17 mm oraz 150 mm – prętów o średnicy 17 mm ≤ d ≤ 30 mm. Długość zakotwienia wynosi 4d. Zgodnie z wymaganiami EAD 260023-00-0301 [18], długość zakotwienia powinna wynosić 5d. W badaniach należy uwzględnić dwie klasy wytrzymałości betonu – C20/25 oraz C50/60. Dodatkowo próbka betonowa powinna mieć stały wymiar boku równy 200 mm. Istotną różnicą jest również konieczność przeprowadzenia dodatkowego kondycjonowania prętów w przypadku betonu o małej wytrzymałości (C20/25). Pręty przed badaniem powinny być poddane działaniu środowiska alkalicznego (pH > 13) w temperaturze 60 ± 3°C przez okres 3000 h. Ponadto dokument EAD 260023-00-0301 [18] rozszerza zakres badań o badanie przyczepności przy obciążeniu mimośrodowym, które przeprowadza się wyłącznie w przypadku betonu o małej wytrzymałości (C20/25).

Badanie pełzania

Badania realizowane były zgodnie z wytycznymi ISO 10406-1:2015 [16]. Do badań pełzania przygotowano stanowisko, które zapewnia osiowe zamocowanie pręta oraz utrzymanie stałego poziomu siły z dokładnością ±0,5% i jednocześnie niedopuszczenie do spadku siły podczas badania o więcej niż 2% wartości zadanej. Pełzarkę przedstawiono na fotografii 7.

Podczas badania dane z pomiaru były automatycznie rejestrowane i archiwizowane za pomocą systemu akwi-

Creep testing was performed at a load level corresponding to approximately 70% of the tensile strength of the bar. The reference tensile strength was obtained from five bars selected at random from the batch submitted for testing. The creep test results for composite bars are presented in Table 4 and Figure 4. During testing, the temperature and relative humidity in the room containing the test setup were maintained at 20 ± 2°C and 45 ± 5%, respectively.

Alkali resistance

The purpose of the test is to assess the durability and mechanical strength of FRP composites under conditions approximating those encountered in service. Alkali resistance is assessed by exposing composite bars to an aqueous alkaline environment. The alkaline solution should have a composition similar to that of concrete pore solution, with an initial pH greater than 13. It contains 8.0 g of NaOH and 22.4 g of KOH per 1 L of demineralised water.

zycji danych. Utrzymywano stałą siłę i jednocześnie dokonywano rejestracji zmiany długości pręta, co pozwoliło na wyznaczenie odkształceń. Czas badania pełzania określono na co najmniej 1000 h. W początkowym okresie (do 12 h od rozpoczęcia badań) oba parametry były rejestrowane w odstępach co 10 min. Następnie wartość siły odczytywano w odstępach co 24 h, a przemieszczeń próbki co 2 h. Pomiar przemieszczeń realizowano za pomocą czujnika przemieszczeń liniowych. Badanie pełzania przeprowadzono przy poziomie obciążenia odpowiadającego ~70% wytrzymałości pręta na rozciąganie. Poziomem odniesienia była wytrzymałość na rozciąganie, uzyskana w przypadku pięciu losowo wybranych prętów z dostarczonej do badań partii. Wyniki badań pełzania prętów kompozytowych przedstawiono w tabeli 4 i na rysunku 4. Temperatura i wilgotność w pomieszczeniu, w którym znajdowało się stanowisko do badań, utrzymywane były podczas badania pełzania w następujących zakresach: temperatura 20 ±2°C, wilgotność: 45 ±5%.

Table 4. Results of specimen strain changes measured during the creep test
Tabela 4. Wyniki oznaczenia zmiany odkształcenia próbki w teście pełzania

Teoretyczny poziom obciążenia $f_{u\,min}$(%)	Wyniki z badań rozciągania		Rzeczywisty poziom obciążenia		Zmiana odkształcenia próbki ε_i (‰) od momentu przyłożenia obciążenia stałego po czasie badania t					Przyrost odkształ. $\Delta(\varepsilon_{1000} - \varepsilon_{24}) / \varepsilon_{24}$ [%]
	f_u [MPa]	F_u [kN]	F_0 [kN]	F_0 / F_u [%]	2h	24h	100h	500h	1000h	
70	max. 1274 min. 1160	max. 62.7 min. 57.9	42.8	68–74	15.1	17.6	17.6	18.5	18.6	+5.7
70			42.8	68–74	17.6	19.0	19.7	19.9	20.1	+5.8
70			42.8	68–74	14.6	16.7	17.2	17.4	17.4	+4.2
70			42.8	68–74	16.6	18.4	19.1	19.3	19.3	+4.9
70			42.8	68–74	14.6	16.8	17.3	18.3	18.4	+9.5

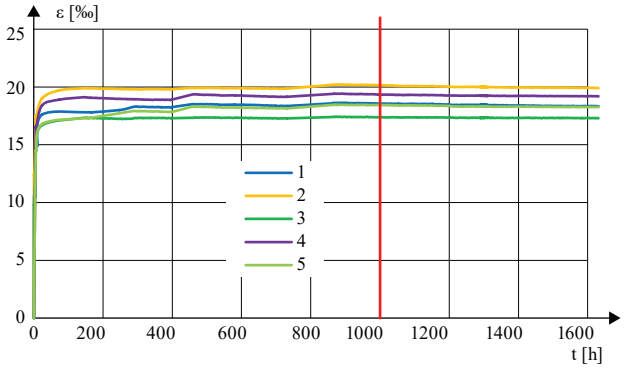


Fig. 4. Strain–time relationship for 8 mm diameter bars at a stress level equal to 70% of f_{umax}
Rys. 4. Pręty o średnicy 8 mm; zależność między odkształceniem a czasem badania przy poziomie naprężenia 70% f_{umax}

ISO 10406-1:2015 [16] describes the procedures for preparing and testing FRP bar specimens. A key stage is immersion in the alkaline solution for one month [16] or 1000 h [18]. The solution temperature should be 60 ± 3°C. Before testing, the specimen ends are sealed with epoxy resin to prevent direct in-

Odporność na alkalia

Celem badania jest ocena trwałości i wytrzymałości mechanicznej kompozytu FRP w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych. Odporność na alkalia mierzy się przez poddanie prętów kompozytowych działaniu środowiska wodnego zawierającego alkalia. Roztwór alkaliczny musi mieć skład zbliżony do roztworu porowego betonu, a jego początkowe pH powinno być większe od 13. Skład roztworu alkalicznego zawiera 8,0 g NaOH i 22,4 g KOH w 1 l wody demineralizowanej. W normie ISO 10406-1:2015 [16] opisano zasady przygotowania i badania próbek prętów FRP. Kluczowym etapem jest zanurzenie próbek w roztworze alkalicznym przez miesiąc [16], 1000 h [18]. Temperatura roztworu powinna wynosić 60^0C ±3^0C. W celu uniknięcia bezpośredniego wnikania roztworu w próbkę, jej końce zabezpiecza się przed badaniem żywicą epoksydową (fotografia 8). Wynikiem badania jest wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie, określony przez porównanie wytrzymałości na rozciąganie próbek poddanych działaniu alkaliów z próbkami referencyjnymi, według wzoru:

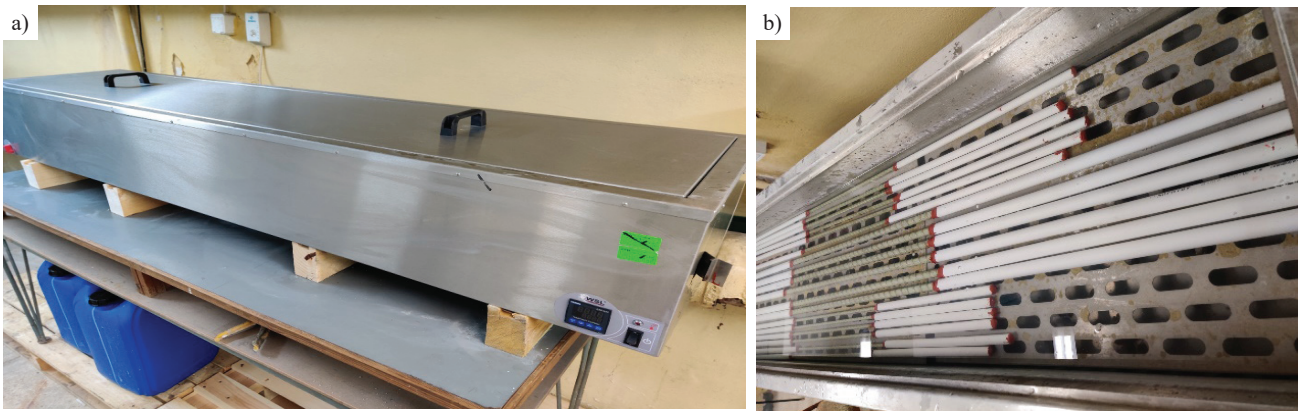


Photo 8. Water bath with controlled temperature (a); bars immersed in the solution, with the anchorage zone protected against direct penetration of the alkaline solution (b)
Fot. 8. Łaźnia wodna z kontrolowaną temperaturą (a); pręty zanurzone w roztworze, strefa zakotwienia zabezpieczona przed bezpośrednią penetracją roztworu alkaliów (b)

gress of the solution through the ends (Photo 8). The test result is the tensile capacity retention rate, determined by comparing specimens exposed to the alkaline solution with unexposed reference specimens, as expressed in Equation (7).

$$R_{et} = \frac{F_{u1}}{F_{u0}} \times 100\% \quad (7)$$

where:
R_{et} – tensile capacity retention rate [%];
F_{u1} – maximum tensile force of specimens after immersion in the solution [N];
F_{u0} – maximum tensile force of unexposed reference specimens [N].

The results presented in Table 5 indicate that the tensile strength of GFRP reinforcing bars gradually decreases with ageing time in an aqueous alkaline environment. Degradation was also observed to proceed considerably faster at 60°C (Photo 9). This may be explained by increased diffusion of the solution into the bar structure at higher temperatures. For bars of the same diameter, the reduction in tensile strength was greater than the reduction in the modulus of elasticity,

$$R_{et} = \frac{F_{u1}}{F_{u0}} \times 100\% \quad (7)$$

gdzie:
R_{et} – wskaźnik wytrzymałości [%];
F_{u1} – maksymalna siła rozciągająca próbek po zanurzeniu w roztworze [N];
F_{u0} – maksymalna siła rozciągająca próbek referencyjnych niepoddanych działaniu roztworu [N].

Wyniki badań przedstawione w tabeli 5 wskazują, że wytrzymałość na rozciąganie prętów zbrojeniowych GFRP ulega stopniowemu zmniejszeniu wraz z czasem starzenia w środowisku wodnym o odczynie alkalicznym. Zaobserwowano również, że proces degradacji przebiega znacznie szybciej w temperaturze 60°C (fotografia 9). Zjawisko to można wyjaśnić zwiększeniem intensywności dyfuzji roztworu do struktury prętów w wyższej temperaturze. Ponadto stwierdzono, że spadek wytrzymałości na rozciąganie prętów o tej samej średnicy jest większy niż spadek ich modułu sprężystości, który wykazuje mniejszą wrażliwość na temperaturę ekspozycji oraz czas starzenia. Z projektowego punktu widzenia wy-

Table 5. Strength parameters of the bars after 1000 h of exposure
Tabela 5. Parametry wytrzymałościowe prętów po 1000 h ekspozycji

Nominalna średnica próbek D [mm]	Maksymalna siła rozciągająca F_u		Wytrzymałość na rozciąganie f_u		Moduł sprężystości E		Średnia zmiana modułu sprężystości	Wskaźnik wytrzymałości wg ISO 10406 R_{et}	Średni spadek wytrzymałości na rozciąganie
	F_{u0} [kN]	F_{u1} [kN]	f_{u0} [MPa]	f_{u1} [MPa]	E_0 [GPa]	E_1 [GPa]	$R_{\Delta E}$ [%]	F_{u1}/F_{u0} [%]	Δf_u [%]
6,5 GFRP	39,1	30,4	1179	916	50,1	47,4	-5	78	22
6 GFRP	36,7	16,5	1299	583	53,8	33,0	-39	45	55
12 GFRP	131,4	72,0	1177	661	55,0	36,1	-34	55	44
12 GFRP	133,6	94,6	1181	836	54,6	42,1	-23	71	29
12 GFRP	134,9	90,0	1193	796	53,8	41,6	-23	67	33

which showed lower sensitivity to exposure temperature and ageing time.

From a design perspective, alkali resistance test results directly affect the assessment of the durability of structures reinforced with GFRP bars. The European document [18] provides for the degradation of mechanical properties to be taken into account through an environmental reduction factor. Consequently, the test results obtained after alkaline exposure are relevant to structural design.

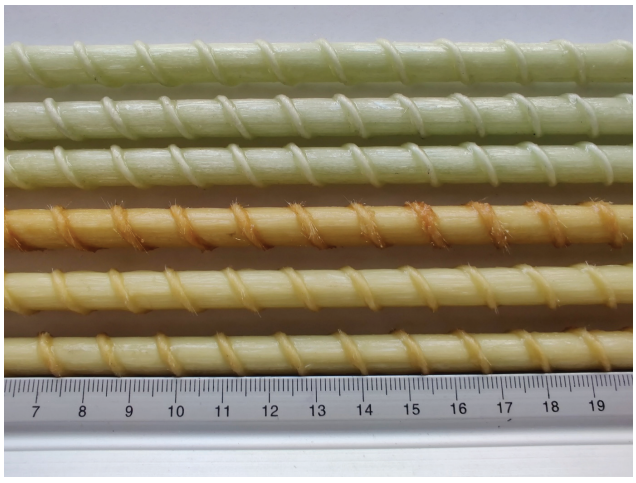


Photo 9. GFRP composite bars with a diameter of 8 mm before (top) and after (bottom) the 1000 h alkaline resistance test
Fot. 9. Pręty kompozytowe GFRP średnicy 8 mm przed (od góry) i po (od dołu) badaniu odporności na działanie alkaliów – 1000 h

Conclusions

The test results presented in this article are representative of GFRP bars used as concrete reinforcement and are consistent with published data and the requirements of applicable normative documents. The tensile strengths obtained exceeded 800 MPa, with some of the tested bars achieving values above 1200 MPa, while the modulus of elasticity ranged from 45 to 61 GPa. Although GFRP bars have considerably higher tensile strength than steel reinforcement, the dimensions and reinforcement of typical flexural members are generally governed by the serviceability limit state. This is attributable to the considerably lower modulus of elasticity of GFRP bars, which leads to greater deflections and wider cracks than those associated with steel reinforcement. Bond testing confirmed that the surface geometry of the bars significantly influences their interaction with concrete. Sand-coated bars achieved higher bond strengths than bars without sand coating, which should be considered when designing anchorage lengths and load-transfer zones.

From a design perspective, the results of alkali resistance testing are particularly important. Following conditioning, reductions of 5–39% in the modulus of elasticity and 22–55% in tensile strength were recorded. These findings confirm that exposure to an alkaline environment may significantly degrade the mechanical properties of GFRP bars. Such substantial reductions highlight the need to account for alkaline exposure when designing structures with a long service life. Structural design should therefore consider not only the high initial strength of the bars but also their durability and changes in their properties over time. Unlike steel reinforcement, GFRP bars do not undergo electrochemical corrosion. However, the degradation of glass fibres in an alkaline environment is one of the principal limitations affecting their long-term load-carrying capacity and serviceability.

According to the Italian design guidelines CNR-DT 203/2006 [20], FRP bars may be used as reinforcement in

niki badań odporności na alkalia mają bezpośredni wpływ na trwałość konstrukcji zbrojonych prętami GFRP. Dokument europejski [18] zaleca uwzględnić degradację właściwości mechanicznych przez współczynnik środowiskowy. Oznacza to, że podczas projektowania istotny jest wynik badania po ekspozycji na alkalia.

Podsumowanie

Prezentowane w artykule wyniki badań są charakterystyczne dla prętów GFRP stosowanych jako zbrojenie betonu i pozostają zgodne z danymi prezentowanymi w literaturze oraz wymaganiami obowiązujących dokumentów normowych. Uzyskane wartości wytrzymałości na rozciąganie przekraczały 800 MPa, osiągając w przypadku części badanych prętów ponad 1200 MPa, natomiast moduł sprężystości mieścił się w zakresie 45–61 GPa. Pomimo znacznie większej wytrzymałości na rozciąganie prętów GFRP w porównaniu ze stalą zbrojeniową, w przypadku typowych elementów zginanych o wymiarach i zbrojeniu konstrukcji zazwyczaj decyduje stan graniczny użytkowalności. Wynika to z istotnie mniejszego modułu sprężystości prętów GFRP, który prowadzi do większych ugięć oraz szerszego rozwarcia rys niż w przypadku stali. Badania przyczepności potwierdziły istotny wpływ sposobu ukształtowania powierzchni prętów na mechanizm współpracy z betonem. Pręty z posypką piaskową uzyskiwały większe wartości przyczepności niż pręty bez posypki, co powinno być uwzględniane podczas projektowania długości zakotwień oraz stref przekazywania sił.

Z punktu widzenia projektowania, szczególne znaczenie mają wyniki badań odporności na środowisko alkaliczne. Po przeprowadzeniu kondycjonowania odnotowano spadek modułu sprężystości o 5–39% oraz wytrzymałości na rozciąganie o 22–55%. Potwierdza to, że oddziaływanie środowiska alkalicznego może prowadzić do istotnej degradacji właściwości mechanicznych prętów GFRP. Tak znaczny spadek parametrów mechanicznych wskazuje na konieczność uwzględniania wpływu środowiska alkalicznego podczas projektowania konstrukcji o długim okresie eksploatacji. Przy projektowaniu konstrukcji należy więc uwzględniać nie tylko dużą wytrzymałość początkową prętów, lecz również ich trwałość oraz zmianę parametrów w czasie eksploatacji. W przeciwieństwie do zbrojenia stalowego pręty GFRP nie ulegają korozji elektrochemicznej, ale degradacja włókien szklanych w środowisku alkalicznym stanowi jedno z podstawowych ograniczeń decydujących o ich długotrwałej nośności i użytkowalności.

Z formalnego punktu widzenia, zgodnie z włoskimi zaleceniami projektowymi CNR-DT 203/2006 [20], pręty FRP mogą być stosowane jako zbrojenie elementów betonowych,

concrete members, provided that minimum material requirements are met. GFRP bars must have a characteristic tensile strength of at least 400 MPa and a mean longitudinal modulus of elasticity of at least 35 GPa.

pod warunkiem spełnienia minimalnych wymagań materiałowych. Wymagana wytrzymałość charakterystyczna na rozciąganie prętów GFRP wynosi co najmniej 400 MPa, natomiast średni moduł sprężystości w kierunku podłużnym nie może być mniejszy niż 35 GPa.

Photo R. Walendziak

The research presented in this article was partially funded by the National Science Centre, Poland, through the OPUS call under the Weave programme, grant No. 2023/51/I/ST11/00069, and by the Czech Science Foundation, project No. 25-14337L, as part of the project entitled "Multilevel Modelling of Shear Capacity Based on Research, Simulations, and Probabilistic Methods" (WMNSS).

Fot. R. Walendziak

Badania przedstawione w artykule były częściowo finansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach konkursu OPUS w programie Weave nr 2023/51/I/ST11/00069 oraz Czeską Fundację Naukową, projekt numer 25-14337L, w ramach projektu pt. Wielopoziomowe modelowanie nośności na ścinanie na podstawie badań, symulacji i metod probabilistycznych (WMNSS).

Received: 15.06.2026
Revised: 29.07.2026
Published: 21.10.2026

Artykuł wpłynął do redakcji: 15.06.2026 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 29.07.2026 r.
Opublikowano: 21.10.2026 r.

Literatura

[1] Czulak A. „Pręty kompozytowe w budownictwie i infrastrukturze – stan obecny, trendy i perspektywy rozwoju w Polsce, Europie i na świecie", *Kompozyty.net*. Accessed: Jun. 08, 2026. [Online]. Available: https://kompozyty.net/prety-kompozytowe-w-budownictwie-i-infrastrukturze-stan-obecny-trendy-i-perspektywy-rozwoju-w-polsce-europie-i-na-swiecie/

[2] „Steel Rebar Market Size & Share, Statistics Report 2025-2034". Accessed: Jun. 08, 2026. [Online]. Available: https://www.gminsights.com/industry-analysis/steel-rebar-market

[3] Szczech D, Kotynia R. „Beam bond test of GFRP and steel reinforcement to concrete", *Archives of Civil Engineering*, vol. 64, no. 4, 2018.

[4] Szczech D, Kotynia R. „Effect of shear reinforcement ratio on the shear capacity of GFRP reinforced concrete beams", *Archives of Civil Engineering*, vol. 67, no. 1, 2021.

[5] Szczech D. „Wpływ rozstawu i średnicy strzemion na nośność na ścinanie belek betonowych ze zbrojeniem GFRP", *Materiały Budowlane*, 2025; 635 (7): 63–70.

[6] Kotynia R, Szczech D, Kaszubska M. „Bond behaviour of GFRP bars to concrete in beam test", *Procedia Eng.*, vol. 193, pp. 401–408, 2017.

[7] Kotynia R, Szczech D. „Bond behaviour of GFRP and steel reinforcement to concrete – experimental tests", in *5th International fib Congress*, Melbourne, 2018.

[8] Szczech D, Kotynia R. „Badania przyczepności zbrojenia niemetalicznego do betonu", *Inżynieria i Budownictwo*, 2019; 75 (4): 176–180.

[9] Urbański M, Woyciechowski PP, Szmigiera ED, Adamczewski G, Sosnowska E. „Charakterystyka przyczepności prętów GFRP i BFRP do betonu z dodatkiem zeolitu i metakaolinitu", *Przegląd Budowlany*, 2023; 94 (11–12): 124–127.

[10] „Zastosowanie popiołów lotnych z kotłów fluidalnych w betonach konstrukcyjnych", praca zbiorowa pod red. Andrzeja M. Brandta, Studia z zakresu inżynierii, zeszyt 72, Warszawa 2010, ark. wyd. 28: Rozdział 11 – P. Mossakowski i W. Radomski, Przyczepność zbrojenia stalowego oraz zbrojenia z taśm i prętów niemetalicznych do betonów konstrukcyjnych z popiołami fluidalnym, s. 253–281.

[11] Wiater A. „Zastosowanie prętów kompozytowych GFRP w polskim mostownictwie", *Drogownictwo*, pp. 36–42, 2023.

[12] Wiater A, Siwowski T. „Nośność na ścinanie zginanych elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi FRP w świetle wybranych procedur obliczeniowych", *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, vol. 64, no. 2, pp. 267–297, 2017, doi: 10.7862/rb.2017.98.

[13] Nanni A, De A, Hany L, Zadeh J. „Reinforced Concrete with FRP Bars : Mechanics and Design", *Reinforced Concrete with FRP Bars*, Mar. 2014, doi: 10.1201/B16669.

[14] Mossakowski P, „Pręty z kompozytów polimerowych z włóknami do zbrojenia betonowych konstrukcji inżynierskich", *Drogi i Mosty*, 2006; 5 (1): 35–52.

[15] Wang X, Wang Z, Wu Z, Cheng F. „Shear behavior of basalt fiber reinforced polymer (FRP) and hybrid FRP rods as shear resistance members", *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 781–789, Dec. 2014, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.09.104.

[16] „ISO 10406-1:2015 Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete. Test methods. Part 1: FRP bars and grids", 2015, *International Organization for Standardization*.

[17] „ACI 440.3R-04 Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures", 2004, *American Concrete Institute*.

[18] „EAD 260023-00-0301 Carbon, glass, basalt and aramid fibre reinforced polymers bars as reinforcement of structural elements", *European Organisation for Technical Assessment*.

[19] „PN-EN ISO 604 Tworzywa sztuczne. Oznaczanie wytrzymałości przy ściskaniu", *Polski Komitet Normalizacyjny*.

[20] CNR DT203 2006 Guide for the Design and Construction of Concrete Structures reinforced with Fibre-Reinforced Polymer Bars.