

dr inż. Dorota Marcinczak¹⁾
ORCID 0000-0001-9496-2638

Strengthening of concrete structures with composite materials with natural fibres

Wzmacnianie konstrukcji betonowych materiałami kompozytowymi z włóknami naturalnymi

DOI: 10.15199/33.2025.09.10

Abstract. The article discusses the use of composite materials with natural fibers for strengthening concrete structures. The aim was to investigate the possibility of using flax and hemp fibers as an alternative to synthetic fibers. The research included checking the relationship between the type of fiber and the effectiveness of reinforcement, as well as the effect of the number of fabric layers on the load-bearing capacity of the element in compression.

Keywords: concrete structures; strengthening; composites; natural fibers.

Streszczenie. W artykule omówiono zastosowanie materiałów kompozytowych z włóknami naturalnymi do wzmacniania konstrukcji betonowych. Celem było zbadanie możliwości wykorzystania włókien lnianych i konopnych zamiast włókien syntetycznych. Badania obejmowały sprawdzenie zależności pomiędzy rodzajem włókna a efektywnością wzmocnienia, a także wpływu liczby warstw tkaniny na nośność elementu na ściskanie.

Słowa kluczowe: konstrukcje betonowe; wzmacnianie; kompozyty; włókna naturalne.

Around the world, the protection and preservation of existing structures is of fundamental cultural, economic, and human importance. Repair and reinforcement rather than demolition is a good alternative from an economic point of view, especially when considering buildings of historical significance. Over the years, several reinforcement technologies have been introduced, but the most popular are FRP (*Fiber Reinforced Polymers*) composite materials, due to their numerous advantages, such as high strength, corrosion resistance, and ease of application. FRP composite material consists of at least two components – a polymer matrix and fibers, most often carbon, basalt, or glass. It should be emphasized that these fibers are produced using energy-intensive and complex technologies. Replacing them with natural materials would contribute to reducing carbon dioxide and other pollutant emissions into the atmosphere and reducing energy consumption. For example, the production of a linen sheet, including the process of cultivation, harvesting and separating the fibers, consumes 9.55 MJ/kg of energy, which is only about 17% of the energy required to produce glass fiber mats (54.7 MJ/kg) [1].

What is more, materials made from hemp, have a negative carbon footprint, as hemp absorbs more carbon dioxide during growth than is later used to make building materials from it. In recent years, attempts have been made to replace synthetic fibres with natural fibres, mainly jute, bamboo and flax. Foreign studies [2÷5] have shown that they are as effective in reinforcing structures as classic composite materials. Studies on wooden beams have shown that flax fibres combined with a polymer matrix increased bending strength by 120% [2], while in masonry structures, the load-bearing capacity of the

Na całym świecie ochrona i konserwacja istniejących konstrukcji ma fundamentalne znaczenie kulturowe, ekonomiczne i ludzkie. Naprawa i wzmacnianie zamiast rozbioru jest dobrą alternatywą z ekonomicznego punktu widzenia, szczególnie gdy rozpatrujemy obiekty o znaczeniu historycznym. Z biegiem lat wprowadzono kilka technologii wzmocnienia, jednak największą popularność zdobyły materiały kompozytowe FRP (*Fibre Reinforced Polymers*), ze względu na liczne zalety, jakimi są: duża wytrzymałość; odporność na korozję i łatwość aplikacji. Materiał kompozytowy FRP złożony jest z minimum dwóch składników – matrycy polimerowej i włókien, najczęściej węglowych, bazaltowych lub szklanych. Należy podkreślić, że włókna te są produkowane wg energochłonnych i skomplikowanych technologii. Zastąpienie ich materiałami pochodzenia naturalnego przyczyniłoby się do ograniczenia emisji dwutlenku węgla i innych zanieczyszczeń do atmosfery oraz ograniczenia zużycia energii, np. wytworzenie maty z lnu, obejmujące proces uprawy, zbioru i separacji włókien, zużywa 9,55 MJ/kg energii, co stanowi zaledwie ok. 17% zużycia energii wymaganego do produkcji mat z włókien szklanych (54,7 MJ/kg) [1].

Co więcej, materiał wykonany m.in. z konopi charakteryzuje się ujemnym śladem węglowym, ponieważ podczas wzrostu konopie pochłaniają więcej dwutlenku węgla, niż zużywa się go później do wykonania z nich materiałów budowlanych. W ostatnich latach podjęto próby zastąpienia włókien syntetycznych włóknami naturalnymi, głównie jutą, bambusem i lnem. W zagranicznych badaniach [2÷5] wykazano, że są one równie skuteczne we wzmacnianiu konstrukcji jak klasyczne materiały kompozytowe. W badaniach na zginanych belkach drewnianych wykazano, że włókna lniane w połączeniu z matrycą polimerową spowodowały zwiększenie wytrzymałości na zginanie o 120% [2], natomiast w przypadku kon-

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; dorota.marcinczak@pwr.edu.pl



masonry increased by 20-65% [3]. The load-bearing capacity of concrete cylindrical elements increased by up to 400% in the case of flax fibres [4] and by 67% in the case of jute fibres [5].

The article presents research on the possibility of using flax and hemp fibres as an alternative to synthetic fibres, analysing the impact of the number of layers on the effectiveness of strengthening and comparing the effectiveness of natural fibres and synthetic carbon fibres

Research test and preparation of samples

The test subjects were 18 cylindrical concrete samples measuring 150×300 mm, made of concrete with an average compressive strength of 27.7 MPa and a modulus of elasticity of 31.2 GPa. The samples were divided into six groups, three in each. One group was a control group without strengthening, and the others differed in the type of strengthening and the number of layers. The following were used in sequence: one (1L) or two layers (2L) of linen fabric; one (1K) or two (2K) layers of hemp fabric and one layer of CFRP carbon fabric (1W). All strengthening was made on the basis of epoxy resin. In the case of natural fabrics, two types of resins were used: S&P Resin 55 HP and S&P Resin 220, due to the higher density of the fabric and the need for good fibre impregnation. The first was used to soak the fabric, while the second was applied to the concrete surface, and then the composite material was applied on top of it. In accordance with the manufacturer's recommendations, only S&P Resin 55 HP was used for the carbon sheet. The following materials were used for strengthening: carbon sheet with a density of 200 g/m^2 ; linen fabric with a density of $590 \pm 30 \text{ g/m}^2$; hemp fabric with a density of 545 g/m^2 .

Before proceeding with reinforcement, the strength of natural fibre fabrics and FRP laminates (resin-impregnated fabrics) was determined in axial tensile tests. The test results are presented in Table 1. It was found that, unlike the fabric itself, the combination of the properties of the fibres and resin in the FRP laminate significantly reduces the elongation of the sample due to the high stiffness of the laminate, while more than doubling the maximum tensile force.

In the case of carbon fibre mats, the mechanical properties were specified by the manufacturer and are as follows: tensile strength – 4400 MPa; elongation at break of dry fibres – 1.8%.

During the curing period, the concrete samples were transferred to a tank with

struktury murowych stwierdzono zwiększenie nośności muru o 20–65% [3]. Nośność betonowych elementów walcowych zwiększyła się nawet o 400% w przypadku włókien lnianych [4] i o 67% w przypadku włókien jutowych [5].

W artykule zaprezentowano badania dotyczące możliwości wykorzystania włókien lnianych i konopnych jako alternatywy dla włókien syntetycznych, poddając analizie wpływ liczby warstw na efektywność wzmocnienia oraz porównując efektywność włókien naturalnych i syntetycznych włókien węglowych.

Program badań i przygotowanie elementów badawczych

Przedmiotem badań było 18 cylindrycznych próbek betonowych o wymiarach 150×300 mm, wykonanych z betonu o średniej wytrzymałości na ściskanie 27,7 MPa i module sprężystości 31,2 GPa. Próbkę podzielono na sześć grup, po trzy w każdej. Jedną grupą była grupa kontrolną bez wzmocnienia, a kolejne różniły się rodzajem wzmocnienia oraz liczbą warstw. Zastosowano kolejno: jedną (1L) lub dwie warstwy (2L) tkaniny lnianej; jedną (1K) lub dwie (2K) warstwy tkaniny konopnej oraz jedną warstwę tkaniny węglowej CFRP (1W). Wszystkie wzmocnienia wykonane były na bazie żywicy epoksydowej. W przypadku tkanin naturalnych zastosowano dwa rodzaje żywicy S&P Resin 55 HP i S&P Resin 220, ze względu na większą gęstość tkaniny i potrzebę dobrej impregnacji włókien. Pierwsza służyła do nasączania tkanin, natomiast druga była aplikowana na powierzchnię betonu, a następnie układano na niej materiał kompozytowy. Do maty węglowej, zgodnie z zaleceniami producenta, użyto jedynie S&P Resin 55 HP, a do wzmocnienia zastosowano matę węglową o gęstości 200 g/m^2 ; tkaninę lnianą o gęstości $590 \pm 30 \text{ g/m}^2$; tkaninę konopną o gęstości 545 g/m^2 .

Przed przystąpieniem do wzmacniania określono wytrzymałość tkanin z włókien naturalnych oraz laminatów FRP (tkanin zaimpregnowanych żywicą) w próbach osiowego rozciągania. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1. Stwierdzono, że w odróżnieniu od samej tkaniny, połączenie właściwości

włókien i żywicy w laminacie FRP znacznie zmniejsza wydłużenie próbki ze względu na dużą sztywność laminatu, przy jednoczesnym ponaddwukrotnym zwiększeniu maksymalnej siły rozciągającej.

W przypadku maty z włókien węglowych, właściwości

Table 1. Results of material testing of fabrics and laminates made from natural fibres

Tabela 1. Wyniki badań materiałowych tkanin i laminatów z włókien naturalnych

Type of fabric and laminate / Rodzaj tkaniny i laminatu	Maximum tensile strength / Maksymalna siła rozciągająca [N]	Ultimate deformation under tension / Graniczne odkształcenie przy rozciąganiu [%]	Ultimate deformation under tension / Graniczne odkształcenie przy rozciąganiu [mm]
Linen fabric / Tkanina lniana	912.7	8.33	12.5
Linen laminate (LFRP) / Laminat lniany (LFRP)	2114.0	3.31	5.0
Hemp fabric / Tkanina konopna	1120.4	8.21	12.3
Hemp laminate (KFRP) / Laminat konopny (KFRP)	1363.3	5.04	7.56

water at a temperature of $20 \pm 2^\circ\text{C}$, where they were stored for 28 days. More than 90 days passed between the time of concreting and the actual tests. The strengthening process was carried out in accordance with the manufacturer's instructions [6]. Before proceeding with the strengthening, all unevenness of the substrate was filled and smoothed. After preparing the resin, the fabrics were impregnated and a layer of resin was applied to the surface of the element (photograph 1a). Next, a single, continuous sheet of fabric was wrapped around the side surface of the concrete sample, maintaining the circular orientation of the main fibres (photograph 1b). The overlap length was 150 mm. Finally, an additional thin layer of resin was applied, paying particular attention to the composite overlap areas. The time recommended by the manufacturer (more than 7 days) elapsed between the strengthening and the actual destructive tests.

The tests were carried out at the Laboratory of the Faculty of Civil Engineering of the Wrocław University of Science and Technology. In

each tested group, two samples were tested on a strength testing machine with a range of $0\div 3000$ kN (photo 2a) at a constant speed of 0.3 MPa/s. The deformations of the elements were measured on the surface of the FRP strengthening using foil strain gauges evenly spaced at 120° around the sample, in the middle of its height. In the case of elements strengthened with natural FRP, both axial and circumferential deformations were recorded, while for CFRP only circumferential deformations were recorded due to the unidirectional arrangement of the fibres. The third sample from each tested group was loaded on a strength testing machine with a range of up to 6 MN (photo 2b). The change in equipment was motivated by an additional method of monitoring deformations using

mechanical ones determined by the producer and amounting to: tensile strength – 4400 MPa; elongation at break – 1.8% .

Próbki betonowe na czas dojrzewania betonu przełożono do zbiornika z wodą o temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$, gdzie przechowywano je przez 28 dni. Od momentu betonowania do właściwych badań minęło ponad 90 dni. Prace wzmacniające wykonano zgodnie z instrukcjami producenta [6]. Przed przystąpieniem do wzmocnienia zostały wypełnione i wygładzone wszelkie nierówności podłoża. Po przygotowaniu żywicy przystąpiono do impregnacji tkanin i nałożono warstwę żywicy na powierzchnię elementu (fotografia 1a). Następnie pojedynczy, ciągły arkusz tkaniny został owinięty wokół bocznej powierzchni próbki betonowej, zachowując okrężnię orientację głównych włókien (fotografia 1b). Długość zakładu wynosiła 150 mm. Na koniec nałożono dodatkową, cienką warstwę żywicy, zwracając szczególną uwagę na miejsca zakładu kompozytu. Od momentu wykonania wzmocnienia do właściwych badań niszczących minął czas zalecany przez producenta (ponad 7 dni).

Badania zostały przeprowadzone w Laboratorium Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. W każdej badanej grupie dwie próbki testowano na maszynie wytrzymałościowej o zakresie $0\div 3000$ kN (fotografia 2a), przy stałej prędkości $0,3$ MPa/s. Odształcenia elementów mierzono na powierzchni wzmocnienia FRP za pomocą tensometrów foliowych rozmieszczonych równomiernie co 120° wokół próbki, w środku jej wysokości. W przypadku elementów wzmocnionych naturalnym FRP zarejestrowano zarówno odształcenia osiowe, jak i obwodowe, natomiast dla CFRP jedynie odształcenia obwodowe ze względu na jednokierunkowe ułożenie włókien. Trzecią próbkę z każdej badanej grupy obciążano na maszynie wytrzymałościowej o zakresie do 6 MN (fotografia 2b).

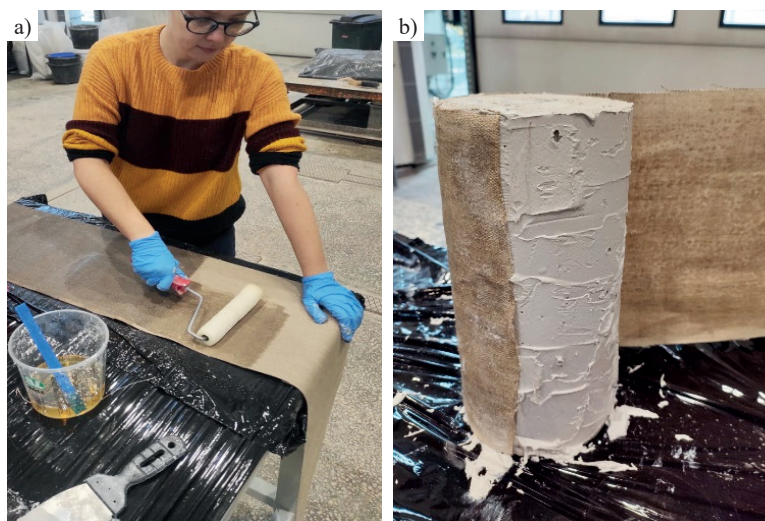


Photo 1. Preparation of test elements: a) fabric impregnation, b) fabric application to the element

Fot. 1. Wykonanie elementów do badań: a) impregnacja tkaniny; b) nakładanie tkaniny na element

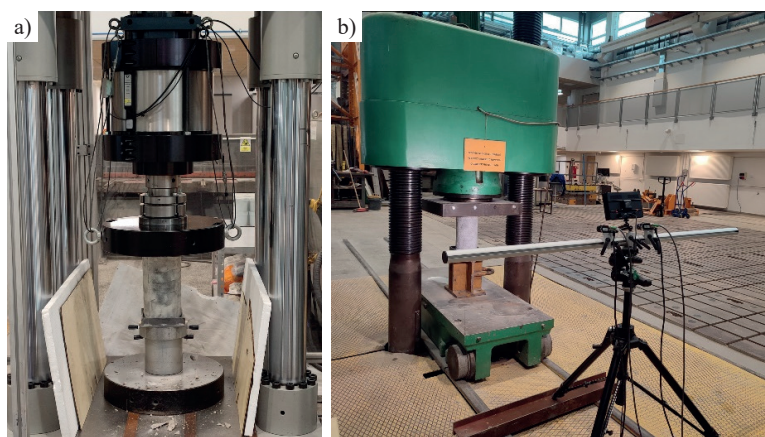


Photo 2. Test setup: a) specimens with strain gauges; b) specimens tested using the Digital Image Correlation (DIC) method

Fot. 2. Stanowisko badawcze: a) próbki z tensometrami; b) próbki badane metodą Cyfrowej Korelacji Obrazu



Digital Image Correlation (DIC). This non-contact optical technique allows for the recording of displacements in both two and three dimensions. The process involves taking a series of digital photographs of the test sample before and during loading, and then subjecting them to appropriate computer correlation. The algorithm tracks the position of points on the surface of the sample, enabling precise measurement of displacements and the creation of a vector displacement field. Based on these results, deformations can be determined [7]. The system was calibrated using a 230 mm calibration plate and Istra 4D software.

Test results and analysis

The results of the tests are presented in Table 2. The degree of strengthening is the ratio of the load-bearing capacity of the strengthened sample to that of the unreinforced sample. The following sample nomenclature was used: number of layers (1 or 2); type of fibres (L – linen, K – hemp, W – carbon); sample number.

In the tests of cylindrical samples subjected to compression, the degree of strengthening ranged from 1.08 to 2.62, with the highest value obtained for carbon fibres. The highest degree of strengthening among the samples reinforced with natural fibre composites was 1.67. This result was obtained for a sample wrapped with a single layer of linen fabric. Increasing the number of composite layers did not significantly improve the shear strength, which is contrary to the assumptions and research presented in the literature. This is probably related to the low axial stiffness of natural fabric, and large differences could be noticeable with a significant increase in the number of layers, e.g. to 4, 8 or 12 layers, as observed in other studies [4, 5]. The second reason may be the high variability of results, related to the method of fabric production and the properties of fibres, which de-

Zmiana aparatury była podyktowana dodatkowym sposobem monitorowania odkształceń za pomocą Cyfrowej Korelacji Obrazu (DIC – Digital Image Correlation). Ta bezkontaktowa technika optyczna pozwala na rejestrowanie przemieszczeń zarówno w dwóch, jak i trzech wymiarach. Proces ten obejmuje wykonanie serii cyfrowych fotografii badanej próbki przed i w trakcie jej obciążania, a następnie poddanie ich odpowiedniej korelacji komputerowej. Algorytm śledzi położenie punktów na powierzchni próbki, umożliwiając precyzyjne mierzenie przesunięć i tworzenie wektorowego pola przemieszczeń. Na podstawie tych wyników można wyznaczyć odkształcenia [7]. Kalibracja systemu odbywała się za pomocą płyty kalibracyjnej 230 mm oraz oprogramowania Istra 4D.

Wyniki badań i analiza

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w tabeli 2. Stopień wzmocnienia oznacza stosunek nośności próbki wzmocnionej do próbki bez wzmocnienia. Zastosowano następujące nazewnictwo próbek: liczba warstw (1 lub 2); rodzaj włókien (L – lniane, K – konopne, W – węglowe); numer próbki.

W badaniach próbek walcowych poddanych ścisnaniu stopień wzmocnienia wyniósł 1,08–2,62, przy czym największą wartość otrzymano w przypadku wzmocnienia włóknami węglowymi. Najwyższy stopień wzmocnienia, spośród próbek

wzmocnionych kompozytami z włóknami naturalnymi, wyniósł 1,67. Wynik ten uzyskano w przypadku próbki owiniętej pojedynczą warstwą tkaniny lnianej. Zwiększenie liczby warstw kompozytu nie poprawiło w istotny sposób wytrzymałości na ścisnienie, co jest sprzeczne z założeniami i badaniami przedstawionymi w literaturze. Prawdopodobnie ma to związek z małą sztywnością osiową tkaniny naturalnej, a duże różnice mogłyby być zauważalne przy znacznym zwiększeniu liczby warstw. np. do 4, 8 lub 12 warstw, co było obserwowane w innych badaniach [4, 5]. Drugim powodem może być duża zmienność wyników,

Table 2. Summary of test results
Tabela 2. Wyniki badań

Sample type / Typ próbki	Number of layers / Liczba warstw	Failure force / Siła niszcząca	Average failure force / Średnia siła niszcząca	Standard deviation / Odchylenie standardowe	Degree of strengthening / Stopień wzmocnienia	
		[kN]	[kN]	[kN]		
0_1	0	504.2	491.9	16.4	–	
0_2		498.1				
0_3		473.3				
1L_1	1	821.0	737.2	73.0	1.67	1.50
1L_2		687.7			1.40	
1L_3		702.8			1.43	
2L_1	2	752.5	716.3	35.5	1.53	1.46
2L_2		714.7			1.45	
2L_3		681.6			1.39	
1K_1	1	792.4	681.2	104.4	1.61	1.38
1K_2		665.7			1.35	
1K_3		585.4			1.19	
2K_1	2	755.6	659.1	116.3	1.54	1.34
2K_2		691.6			1.41	
2K_3		530.0			1.08	
1W_1	1	1290.0	1113.4	205.0	2.62	2.26
1W_2		1161.5			2.36	
1W_3		888.7			1.81	

pend on many factors during plant growth, including temperature, sunlight and hydration. It should be emphasised that industrial fabrics, mainly used in the clothing industry, were used for the tests, as fabrics made of natural fibres intended directly for structural strengthening are not produced in Poland.

When comparing the two natural materials, flax fibres provided better strengthening than hemp fibres, but the differences were not very significant. Samples with one layer of linen fabric achieved an average strengthening level 8.7% higher, and those with two layers 9.0% higher, compared to strengthening with hemp material. It should be emphasised that the linen samples showed less variation in results than the hemp fibre samples, which indicates greater homogeneity of the material used. The coefficient of variation obtained was 9.9% (1L), 5% (2L) and 15.3% (1K), 17.6% (2K).

When analysing the mechanisms of destruction, it was found that the samples strengthened with linen FRP fibre were damaged by the sudden formation of a single crack in the strengthening layer (photo 3). The samples strengthened with hemp fabric behaved slightly differently. Cracks along the axis of the sample were also observed, but the material often broke in multiple places (photo 4a).

It is worth noting that the failure mode of samples made of natural fabrics differs from that of samples strengthened with carbon fibres, which break in a single or multiple rings, indicating that the composite significantly restricts the movement of the element (photo 4b).

A difference in the pattern of the failure crack was also observed depending on the number of fabric layers. In the case of strengthening with a single layer of fabric, the failure crack ran perpendicular to the base across the entire height of the sample, while with two layers of fabric, the crack was inclined towards the base or Y-shaped. All samples were destroyed by fibre breakage. In no case did the

związana ze sposobem produkcji tkanin i właściwościami włókien, zależnymi od wielu czynników w trakcie wzrostu rośliny, m.in. temperatury, nasłonecznienia, nawodnienia. Należy podkreślić, że do badań użyto tkanin przemysłowych, wykorzystywanych głównie w przemyśle odzieżowym, ponieważ w Polsce nie są produkowane tkaniny z włókien naturalnych, przeznaczone bezpośrednio do wzmocnień konstrukcyjnych.

Porównując ze sobą oba materiały naturalne, lepsze wzmocnienie uzyskano w przypadku włókien lnianych niż konopnych, ale nie są to bardzo duże różnice. Próbkę z jedną warstwą tkaniny lnianej uzyskały średni stopień wzmocnienia większy o 8,7%, a z dwiema warstwami o 9,0% w porównaniu ze wzmocnieniem materiałem konopnym. Należy podkreślić, że w przypadku próbek lnianych otrzymano mniejszy rozrzut wyników niż próbek z włókna konopnego, co wskazuje na większą jednorodność zastosowanego materiału. Otrzymany współczynnik zmienności wynosił odpowiednio 9,9% (1L), 5% (2L), 15,3% (1K), 17,6% (2K).

Analizując mechanizmy zniszczenia, stwierdzono, że próbki wzmocnione włóknem lnianym FRP ulegały uszkodzeniu przez gwałtowne powstanie pojedynczego pęknięcia w warstwie wzmocnienia (fotografia 3). Nieco inaczej zachowywały się próbki ze wzmocnieniem z tkaniny konopnej. Obserwowano również pęknięcia wzdłuż

osi próbki, ale często pojawiało się przerwanie materiału w wielu miejscach (fotografia 4a). Warto zaznaczyć, że sposób uszkodzenia próbek z tkaninami naturalnymi różni się od próbek wzmocnionych włóknami węglowymi, które pękają pojedynczym lub wieloma pierścieniami, co świadczy o dużym skrępowaniu elementu przez kompozyt (fotografia 4b). Stwierdzono także różnicę w przebiegu rysy niszczącej zależnie od liczby warstw tkaniny. W przypadku wzmocnienia z jedną warstwą tkaniny rysa niszcząca przebiegała prostopadle do podstawy przez całą wysokość próbki, natomiast przy dwóch warstwach tkaniny rysa była pochylona do podstawy lub w kształcie litery Y. Wszystkie próbki zniszczyły się przez pęknięcie włókien. W żadnym

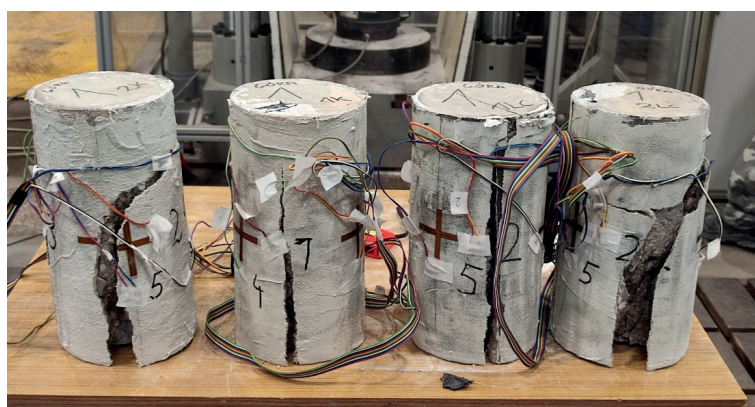


Photo 3. Failure of specimens, from left: 2K, 1K, 1L, and 2L
Fot. 3. Zniszczenie próbek, od lewej: 2K, 1K, 1L i 2L

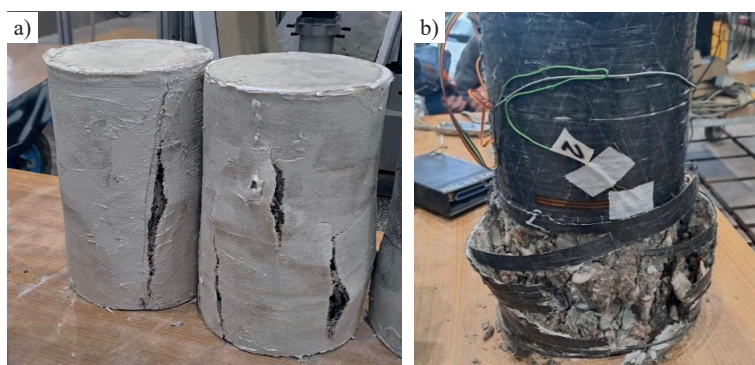


Photo 4. Failure of specimens: a) with hemp fibers – fabric tearing in multiple locations along the circumference; b) with carbon fibers – ring-shaped fracture at the base of the specimen

Fot. 4. Zniszczenie próbek: a) z włóknami konopnymi – rozerwanie tkaniny w wielu miejscach po obwodzie; b) z włóknami węglowymi – pęknięcie pierścieniowe u podstawy próbki



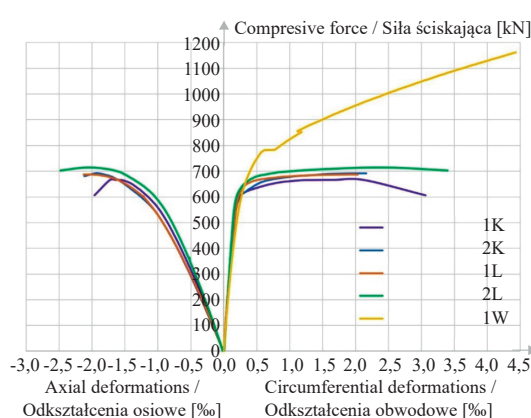
composite detach, which indicates a very good bond between the strengthening and the concrete core.

The figure shows the curves of the relationship between compressive force and axial and circumferential deformations. It shows a slight increase in deformations and compressive strength with an increasing number of layers of natural fabric. The deformation curves have an approximate shape that can be divided into two main stages: the first linear and the second non-linear. In the case of circumferential deformation, the first stage is the same for all types of strengthening. The second stage, in all samples strengthened with natural fibres, is characterised by a significant increase in circumferential deformation without a significant further increase in load. The opposite is observed in the case of carbon fibre strengthening, where the material behaves more brittle, which means sudden failure without prior signs of weakening.

Photograph 5 shows the circumferential deformation maps for the maximum compressive force and the damage image obtained using the Digital Image Correlation (DIC) method. The designated 'Line 1' is located at the point of damage and is used to determine the maximum deformation values along its length.

Table 3 summarises the results of circumferential deformations of the elements tested using the strain gauge method and DIC. The values differ because the strain gauges were placed halfway up the sample, while the DIC method allows the deformations to be examined over the entire surface of the sample, i.e. also at the point of maximum stress. All the tested samples were destroyed in the lower part, where no strain gauge was attached, which is why the deformations obtained using the DIC method are so large.

The deformation results obtained do not even reach half of the final deformation of the tested laminates. The maximum deformation before rupture was 27.3%



Force-strain relationship for all tested reinforced specimens

Zależność siła-odkształcenie w przypadku wszystkich badanych próbek wzmocnionych

wszystkich rodzajów wzmocnienia. Drugi etap, we wszystkich próbkach wzmocnionych włóknami naturalnymi, charakteryzuje się znacznym przyrostem odkształceń obwodowych bez istotnego dalszego wzrostu obciążenia. Przeciwnie jest w przypadku wzmocnienia włóknami węglowymi, gdzie materiał zachowuje się bardziej krucho, co oznacza nagłe zniszczenie bez wcześniejszych oznak osłabienia.

Na fotografii 5 przedstawiono mapy odkształceń obwodowych w przypadku maksymalnej siły ściskającej oraz obraz zniszczenia otrzymany z metody Cyfrowej Korelacji Obrazu (DIC). Wyznaczona linia „Line 1” znajduje się w miejscu zniszczenia i służy do określenia wartości maksymalnych odkształceń na jej długości.

W tabeli 3 zestawiono wyniki odkształceń obwodowych elementów badanych metodą tensometryczną oraz DIC. Wartości różnią się między sobą, ponieważ tensometry umieszczone były w połowie wysokości próbki, a w przypadku badania metodą DIC można zbadać odkształcenia na całej powierzchni próbki, czyli także w miejscu maksymalnego wyężenia. Wszystkie badane próbki niszczyły się w dolnej części, w której nie było naklejonego tensometru, dlatego otrzymują tak duże odkształcenia otrzymane metodą DIC.

Otrzymane wyniki odkształceń nie osiągają nawet połowy odkształcenia końcowego badanych laminatów. Maksymalne odczytane odkształcenie przed rozerwaniem

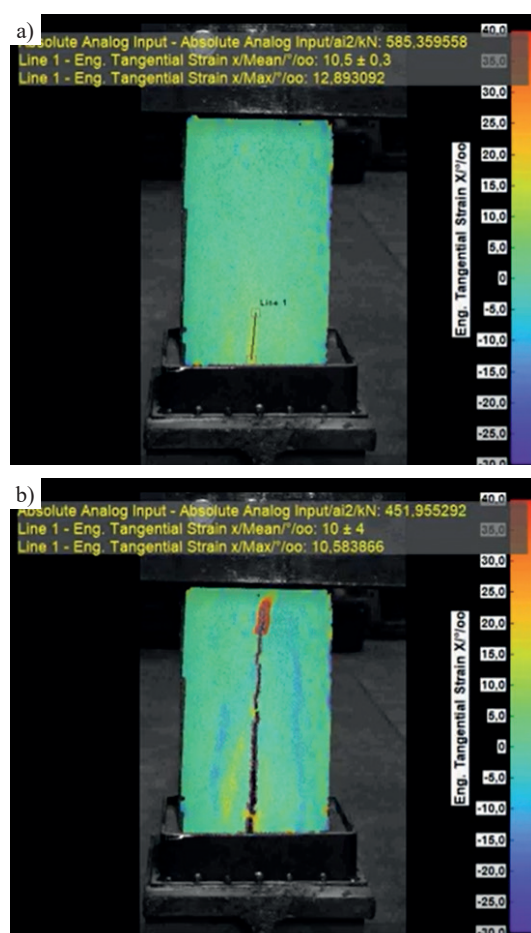


Photo 5. DIC measurement results for specimen 1K: a) before failure; b) after failure

Fot. 5. Wyniki pomiaru DIC próbki 1K: a) przed zniszczeniem; b) po zniszczeniu

and 32.2% of the final deformation recorded for hemp and linen laminates, respectively. According to the manufacturer's declaration, the elongation at break of carbon fibres is 1.8%. The tests yielded a value of 14.84%, which represents 82.4% of the stated elongation of the fibres.

Conclusions and summary

In all cases, the use of FRP strengthening with natural fibres increased the strength of the tested elements by 8–67%, with an average of 34–50% for individual groups of strengthening elements. Although natural fibres are less efficient than synthetic ones, their advantages include low price and a positive impact on the environment. The properties of natural fibres are influenced by many factors, such as age, origin, and environmental conditions (moisture, sunlight). This can cause quite large discrepancies in results, especially in the case of hemp fabric. For this reason, when designing strengthening of this type, a high safety factor would be required, or a fabric dedicated to the purpose of strengthening the structure would have to be manufactured.

With an increase in the number of fabric layers, the expected increase in load-bearing capacity was not achieved. However, it should be emphasised that only two layers were used, and a better effect would probably have been achieved with an even greater number of layers. The use of two layers of fabric, on the other hand, had an impact on increasing the axial and circumferential deformations of the composites by an average of 20% compared to single-layer strengthening. Carbon fibres (CFRP) are characterised by the absence of a clear signal before failure, which means sudden destruction without prior signs of weakening. Natural fibres, on the other hand, show a significant increase in circumferential deformation before failure, which makes it easier to predict the moment of failure. Flax and hemp fibres are an interesting alternative for strengthening concrete structures, but the results presented are only a prelude to further research into this type of strengthening. It is now essential to search for natural materials for construction and other industries in order to minimise carbon dioxide emissions and reduce environmental pollution and energy consumption. Once the mechanism of operation of this type of composite on small concrete elements, which were the subject of the described research, has been understood, a further research programme can be developed for concrete and reinforced concrete elements of various sizes and with varying de-

Table 3. Summary of strains measured by the strain gauge method and DIC

Tabela 3. Odształcenia w przypadku badania metodą tensometryczną i DIC

Sample / Próbka	Ultimate axial strain – strain gauges / Końcowe odkształcenie osiowe – tensometry [%]	Ultimate circumferential strain – strain gauges / Końcowe odkształcenie obwodowe – tensometry [%]	Ultimate circumferential strain – DIC method / Końcowe odkształcenie obwodowe – metoda DIC [%]
1K	1,646	1,881	12,89
2K	1,954	2,165	13,74
1L	2,023	1,926	(measurement error) / (błąd pomiaru)
2L	2,067	2,409	10,67
1W	–	4,431	14,84

stanowi odpowiednio 27,3% i 32,2% odkształcenia końcowego, zarejestrowanego w przypadku laminatów konopnych i lnianych. Wydłużenie przy zniszczeniu włókien węglowych wynosi, wg deklaracji producenta, 1,8%. W wyniku badań otrzymano wartość 14,84%, co stanowi 82,4% podanego wydłużenia włókien.

Wnioski i podsumowanie

We wszystkich przypadkach zastosowanie wzmocnienia FRP z włóknami naturalnymi zwiększyło

wytrzymałość badanych elementów o 8–67%, przy czym średnia w przypadku poszczególnych grup elementów wynosiła 34–50%. Mimo że włókna naturalne są mniej wydajne niż syntetyczne, to ich zaletami jest niska cena i pozytywny wpływ na środowisko. Na właściwości włókien naturalnych wpływa wiele czynników, takich jak wiek, pochodzenie, warunki środowiskowe (wilgoć, nasłonecznienie). To może być przyczyną dość dużej rozbieżności wyników, szczególnie w przypadku tkaniny konopnej. Z tego względu przy projektowaniu wzmocnień tego typu wymagany byłby wysoki współczynnik bezpieczeństwa lub produkowanie tkaniny do zastosowania w celu wzmocnienia dedykowanej konstrukcji.

Wraz ze zwiększeniem liczby warstw tkaniny nie osiągnięto spodziewanego wzrostu nośności. Ze względu na słabsze właściwości włókien naturalnych oraz niską sztywność materiału pożądaný efekt wzrostu nośności byłby prawdopodobnie osiągnięty przy jeszcze większej liczbie warstw. Zastosowanie dwóch warstw tkaniny miało natomiast wpływ na zwiększenie odkształceń osiowych i obwodowych kompozytów średnio o 20% w porównaniu ze wzmocnieniem jednowarstwowym.

Włókna węglowe (CFRP) charakteryzują się brakiem wyraźnego sygnału przed uszkodzeniem, co oznacza nagłe zniszczenie bez wcześniejszych oznak osłabienia. Włókna naturalne wykazują natomiast znaczny przyrost odkształceń obwodowych przed zniszczeniem, co umożliwia łatwiejsze przewidzenie momentu awarii. Włókna lniane i konopne stanowią interesującą alternatywę we wzmacnianiu konstrukcji betonowych, ale zaprezentowane wyniki stanowią jedynie wstęp do dalszych badań tego rodzaju wzmocnień. Obecnie niezbędne jest poszukiwanie naturalnych materiałów dla budownictwa i innych działów przemysłu, aby zminimalizować emisję dwutlenku węgla oraz ograniczyć zanieczyszczenie środowiska i zużycie energii. Po poznananiu mechanizmu pracy tego typu kompozytów na małych elementach betonowych, które były przedmiotem opisanych badań, można rozwinąć dalszy program badawczy elementów betonowych i żelbetowych o różnych gabarytach i różnym stopniu zbrojenia





grees of reinforcement and strengthening. This will enable the development of effective composite strengthening using natural fibres, which would encourage designers to choose this type of material instead of expensive synthetic fibre composites.

The research presented in this article was conducted as part of the NCN MINIATURA 7 project.

Received: 25.03.2025

Revised: 26.05.2025

Published: 19.09.2025

oraz wzmocnienia. Pozwoli to na opracowanie skutecznego wzmocnienia kompozytowego z wykorzystaniem włókien naturalnych, co zachęciłoby konstruktorów do wyboru tego rodzaju materiału zamiast kosztownych kompozytów z włókien syntetycznych.

Badania przedstawione w artykule zostały wykonane w ramach grantu NCN MINIATURA 7.

Artykuł wpłynął do redakcji: 25.03.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 26.05.2025 r.

Opublikowano: 19.09.2025 r.

Literature

- [1] Oksman K. High Quality Flax Fibre Composites Manufactured by the Resin Transfer Moulding Process, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2001;20:621-627.
- [2] Wang B, Bachtar EV, Yan L, Kasal B, Fiore V. Flax, Basalt, E-Glass FRP and Their Hybrid FRP Strengthened Wood Beams. An Experimental Study. *Polymers*. 2019;11(8):1255.
- [3] Cevallos OA, Olivito RS, Codispoti R, Ombres L. Flax and polyparaphenylene benzobisoxazole cementitious composites for the strengthening of masonry elements subjected to eccentric loading, *Composites Part B: Engineering*. 2015;71:82-95.
- [4] Bai Y-I, Yan Z-W, Jia J-F, Ozbakkaloglu T, Liu Y. Dynamic compressive behavior of concrete confined with unidirectional natural flax FRP based on SHPB tests, *Composite Structures*. 2020;259(6):113233.
- [5] Ma G, Hou C, Bai J, Li B, Chen X. Compressive Behavior of Predamaged Concrete Cylinders Repaired with Jute and Basalt FRP Composites: A Comparative Study. *Composites for Construction*. 2022;26(3):04022018.
- [6] <https://www.sp-reinforcement.pl/pl-PL/systemy/systemy-frp-do-wzmocnienia>.
- [7] Marcinczak D. Metoda DIC. *Builder*. 2019;23(2):66-68.