

Jan Piekarczyk<sup>1</sup>, Beata Macherzyńska<sup>2</sup>, Stanisław Błażewicz<sup>3</sup>

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

## BADANIA NAD WYKORZYSTANIEM LAMINATÓW WĘGLOWYCH DO WZMACNIANIA KSZTAŁTEK BETONOWYCH

Celem pracy było wytwarzanie laminatów z żywicy epoksydowych i włókien wysokomodulowych oraz zastosowanie ich do wzmocnienia próbek wykonanych z betonu i zaprawy cementowej. Zastosowano cztery rodzaje włókien węglowych różniących się wartościami modułu Younga, w zakresie od 230 GPa (T-230) do 960 GPa (K-950) (tab. 1, rys. 1). Właściwości sprężyste włókien węglowych, żywicy epoksydowych i laminatów były wyznaczane na podstawie badań ultradźwiękowych (rys. 2, tab. 3). Kształty próbek użytych do badań właściwości mechanicznych przedstawiają rysunki 4-6. Laminaty z włóknami węglowymi otrzymano drogą impregnacji wiązek włókien roztworem żywicy epoksydowej. Następnie, jednokierunkowe wiązki układano w formie metalowej, usuwano nadmiar żywicy pod ciśnieniem (około 30 atm.) i uformowane laminaty utwardzano w temperaturze pokojowej. Mikrofotografie przekroju poprzecznego otrzymanego kompozytu pokazano na rysunku 7. W zależności od typu włókien węglowych i ich udziału objętościowego otrzymano laminaty kompozytowe mające różne wartości modułu Younga (tab. 3). Wyniki testów mechanicznych różnych jednokierunkowych kompozytów laminatowych wykazały, że wartości modułu Younga mieściły się w zakresie od 95 do 595 GPa. Badania przyczepności laminatów do powierzchni próbek betonowych określone metodą ścinania wykazały, że wartość wytrzymałości na międzywarstwowe ścinanie wynosi  $5,8 \pm 0,78$  MPa. Wzrost wytrzymałości na zginanie próbek wykonanych z zaprawy cementowej i próbek betonowych wyniósł od 7 do 14 razy w porównaniu do próbek bez wzmocnienia. Badania wpływu środowiska wodnego na właściwości mechaniczne próbek cementowych z przyklejonymi laminatami nie wykazały straty wytrzymałości w teście zginania w okresie dwóch miesięcy.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, włókna węglowe, wzmocnianie betonu, właściwości mechaniczne

## STUDY ON APPLICATION OF CARBON FIBERS LAMINATES FOR STRENGTHENING OF CONCRETE SAMPLES

The aim of this work was the manufacture of high-modulus carbon fibers - based epoxy resin laminates and application them for strengthening of samples made of concrete and cement mortar. Four types of carbon fibres were used in this work, varying in Young modulus from 230 GPa (T-230) to 960 GPa (K-950) (Tab. 1, Fig. 1). The elastic properties of fibres, epoxy resin and laminates were calculated by using ultrasonic method (Fig. 2, Tables 2 and 3). Figures 4-6 demonstrate the shapes of samples for studying the mechanical properties. The carbon fibers - based laminates were obtained by impregnation of carbon fibres tows with epoxy resin solution. Subsequently, unidirectional fibre composite tapes were formed under compression (30 atm) to reduce an excess of resin followed by the curing of the laminates at room temperature. Figure 7 shows photomicrograph of cross section area of the composite. Composite laminates having different values of Young modulus were prepared, depending upon the type of carbon fibres reinforcement and its volume fraction (Tab. 3). Mechanical tests results from the various unidirectional composite laminates showed that the values of Young's modulus ranged from 90 to 595 GPa. Adhesion assessment of laminates to the concrete samples surfaces indicated that the interlaminar shear strength is  $5.8 \pm 0.78$  MPa. An increase of flexural strength of cement mortar and concrete samples strengthened with laminates from 7 to 14-times was obtained, as compared to the as-received cement samples. The effect of water exposure of cement samples with glued laminates on mechanical properties revealed that no loss in flexural strength occurred within the time of two months.

Key words: polymer laminate, carbon fibers, concrete strengthening, mechanical properties

### WSTĘP

Włókna węglowe charakteryzują się bardzo wysoką wytrzymałością, wysokim modułem Younga i niską gęstością. Są one kojarzone przede wszystkim z zastosowaniami w konstrukcjach lotniczych, kosmicznych, w przemyśle motoryzacyjnym i sportowym [1-4]. Jednakże, dzięki malejącej cenie tego materiału znajdują coraz większe zastosowanie w budownictwie. Włókna węglowe wykorzystuje się do wzmocniania betonu w celu poprawy niektórych jego właściwości mecha-

nicznych. Jednym ze sposobów uzyskiwania dużej efek-

tywności wzmocnienia struktur betonowych jest zastosowanie kształtek kompozytowych typu włókno-polimer (w postaci taśm, prętów, tkanin i rowingu) metodą podklejania [5-8]. Od niedawna zaczęto wprowadzać na rynek materiałów budowlanych taśmy węglowe do naprawy i wzmocniania konstrukcji betonowych, stalowych, murowanych i drewnianych [9-14]. Dotychczasowe badania i aplikacje w tym zakresie wy-

<sup>1</sup> dr., <sup>2</sup> dr inż., <sup>3</sup> prof. dr hab. inż.

kazały, że efektywność wzmocnienia konstrukcji betonowych taśmami w postaci kompozytowych laminatów węglowo-polimerowych jest bardzo wysoka. W zależności od rodzaju taśm (elementu, laminatu), ich grubości i sposobu ich obciążenia graniczna wytrzymałość elementu konstrukcyjnego może wzrastać 2÷3-krotnie przy znacznym wzroście wytrzymałości zmęczeniowej [15-17].

Taka poprawa parametrów mechanicznych pozwala na zwiększenie dopuszczalnych obciążeń danej konstrukcji, a metoda może być wykorzystana do naprawy uszkodzonych elementów nośnych, poprawy warunków użytkowania konstrukcji poprzez ograniczenie odkształceń czy redukcji naprężeń w zbrojeniu.

Celem pracy było otrzymanie wysokomodułowych laminatów polimerowych, opartych na krajowych żywicach epoksydowych, wzmacnianych jednokierunkowo włóknami węglowymi i wykorzystaniem ich do wzmacniania kształtek betonowych. Przeprowadzono badania właściwości mechanicznych i mikrostrukturalnych otrzymanych kompozytów węglowo-polimerowych oraz określono wpływ przyklejonych laminatów do kształtek z zaprawy cementowej i betonów B-30 i B-15 (na cementzie CI i CIII) na właściwości mechaniczne tych układów.

## MATERIAŁY I METODY BADAŃ

### Materiały

Do wykonania laminatów wykorzystano cztery rodzaje włókien węglowych oznaczonych w pracy jako K-950, K-600, U-400 i T-230. Podstawowe właściwości badanych włókien węglowych podanych przez producentów ( $d$  - średnica włókien,  $\rho$  - gęstość,  $E$  - moduł Younga,  $\sigma$  - wytrzymałość) przedstawiono w tabeli 1. Włókna te otrzymuje się z prekursorów: z paków mezofazowych i poliakrylonitrylowych poprzez ich odpowiednią obróbkę termiczną. Przykładowy przekrój poprzeczny włókien węglowych wysokomodułowych K-600 pokazano na rysunku 1.

TABELA 1. Charakterystyka włókien węglowych  
TABLE 1. Characteristic of carbon fibres

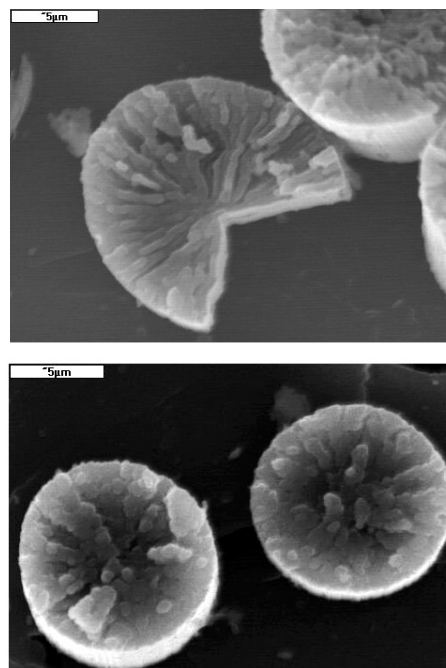
Oznaczenie włókien	$d$ $\mu\text{m}$	$\rho$ $\text{g/cm}^3$	$E$ , GPa		$\sigma$ GPa
			dane producenta	z pomiarów	
T-230	6,9	1,76	230	210	3,5
U-400	5,5	1,79	395	330	4,6
K-600	10,7	2,12	640	550	2,6
K-950	9,9	2,26	960	830	3,3

W tabeli 1 zamieszczono dodatkowo wartości modułów Younga wyznaczone w niniejszej pracy metodą

ultradźwiękową z zależności (1) obowiązującej dla ośrodka jednowymiarowego [18, 19]

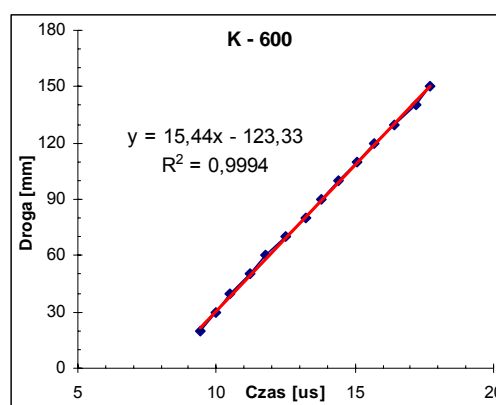
$$E = \rho \cdot V_L^2 \quad (1)$$

gdzie  $V_L$  jest prędkością propagacji podłużnej fali ultradźwiękowej w badanych włóknach, wyznaczonej ze zmiany czasu przejścia fali w zależności od długości skracanych włókien (rys. 2), zgodnie metodyką przedstawioną w pracach [18, 19];  $\rho$  jest gęstością pozorną włókien.



Rys. 1. Morfologia włókien węglowych typu K-600

Fig. 1. Morphology of carbon fibres type K-600



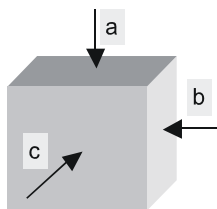
Rys. 2. Wykres zależności czasu przejścia fali ultradźwiękowej od długości wiązki włókien K-600. Współczynnik kierunkowy prostej jest prędkością fali ultradźwiękowej  $V_L = 15\,440$  m/s

Fig. 2. Time of ultrasonic wave propagation versus length of fibres tow K-600. Slope of a straight line is a velocity of ultrasonic wave  $V_L = 15\,440$  m/s

Z przetestowanych wcześniej różnych rodzajów żywic krajowych i utwardzaczy wybrano jako osnowę

do otrzymywania wysokomodułowych laminatów węglowych żywicą epoksydową 601 z utwardzaczem Z1, którą oznaczono dalej jako E1.

Podstawowe właściwości sprężyste żywicy wyznaczono metodą ultradźwiękową [20]. Do tego celu wykonano kostkę o wymiarach 25x25x15 mm, której schemat przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat kostki żywicy do pomiarów ultradźwiękowych

Fig. 3. Scheme of epoxy block for ultrasonic measurements

Aparaturą ultradźwiękową UZP-1 INCO VERITAS wykonano pomiary prędkości rozchodzenia się podłużnej  $V_L$  i poprzecznej  $V_T$  fali ultradźwiękowej w podstawowych kierunkach kostki. Stwierdzono izotropowość próbki i wyliczono stałe materiałowe ze wzorów obowiązujących dla ośrodka trójwymiarowego [20]. Wyznaczone wartości prędkości i stałych materiałowych dla żywicy epoksydowej podano w tabeli 2.

TABELA 2. Charakterystyka żywicy epoksydowej  
TABLE 2. Characteristic of epoxy resin

Oznaczenie żywicy	$V_L$ m/s	$V_T$ m/s	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$\mu$	$E$ GPa	$G$ GPa
E 1	2666 ±27	1226 ±16	1,153 ±0,005	0,366 ±0,008	4,72 ±0,28	1,73 ±0,04

Opracowano metodę otrzymywania węglowych laminatów jednokierunkowych o udziale objętościowym włókien przekraczającym 75% w płytkach o wymiarach 1000x50x0,7 mm. Laminaty o tak wysokim udziale objętościowym (L2-600) otrzymano w matrycy stalowej, w której na szerokości 50 mm ułożono 30 wiązek rowingu. Rowing zawierał po 12 000 elementarnych włókien węglowych o preparacji powierzchniowej dostosowanej do żywic epoksydowych. Ułożone wiązki rowingu, nasycone żywicą epoksydową z utwardzaczem, poddane były (począwszy od obszaru w środkowej części formy) działaniu ciśnienia ok. 30 atm., pod wpływem których następowało usuwanie nadmiaru żywicy z formy i równocześnie dokładne zwilżanie nią włókien węglowych. W badaniach mikroskopowych zglądów z otrzymanych laminatów nie stwierdzono występowania porów. Podobną metodą otrzymano inne typy laminatów L-950, L1-600, L-400 i L-230, które różniły się między sobą rodzajem zastosowanych włókien węglowych i wielkością naprężeń ściskających w trakcie formowania.

Kształtki betonowe (B-30, B-15) i kształtki z zaprawy cementowej (CEM I), które wzmacniano laminatami węglowymi, wycinano z bloków o wymiarach 500x100x100 mm, otrzymanych zgodnie z odpowiednimi normami (PN-EN 206-1; PN-B-06250; PN-EN 196-1).

### Metody badań laminatów

Moduł Younga w kierunku ułożenia włókien w laminatach włókno węglowe-żywica epoksydowa wyznaczono metodą ultradźwiękową z pomiarów prędkości fal podłużnych i z wzoru dla ośrodka dwuwymiarowego przy założeniu liczby Poissona  $\nu = 0,25$  [20].

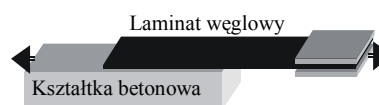
Badanie wytrzymałości na rozciąganie laminatów wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 527-5. Długość czynna laminatu poddanego rozciąganiu wynosiła 150 mm. Na końce laminatu naklejano nakładki z kompozytu włókno szklane-żywica epoksydowa (wzmocnienie w miejscu zacisku szczęk maszyny wytrzymałościowej). Badania te wykonano na maszynie wytrzymałościowej typu TIRATEST 2300 z szybkością odkształcania 2 mm/min. Schemat próbki do badań przedstawiono na rysunku 4. Wytrzymałość na rozciąganie  $\sigma_{roz}$  wyznaczono z pomiarów siły niszczącej i pola przekroju poprzecznego laminatu.



Rys. 4. Schemat próbki laminatu węglowego do badania wytrzymałości na rozciąganie

Fig. 4. Scheme of sample of carbon laminate for determination of tensile strength

Wykonano badania przyczepności otrzymanych laminatów do kształtek betonowych (B-30, B-15) i kształtek z zaprawy cementowej (CEM I) oraz wyznaczono wytrzymałość na zginanie kształtek z wymienionych materiałów oraz kształtek z podklejonymi laminatami węglowymi. Laminaty przyklejano do badanych kształtek również żywicą E1 po wcześniejszej impregnacji jej powierzchni rozcieńczoną żywicą E1. Badania zginające wykonano na maszynie wytrzymałościowej ZWICK model 1435. Szybkość odkształcania próbek wynosiła 2 mm/min. Sposób wykonywania pomiarów wytrzymałości na międzywarstwowe ścinanie pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat układu do badania wytrzymałości na międzywarstwowe ścinanie laminatu węglowego przyklejonego do próbki

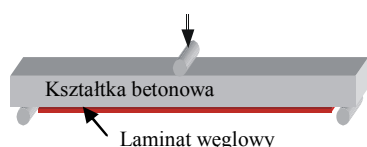
Fig. 5. Scheme of setup for determination of interlayer shear strength of carbon laminate glued to cement mortar sample

Przyczepność kompozytu do kształtki  $\tau$  obliczono według wzoru

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2)$$

gdzie:  $F$  - siła ścinająca;  $A$  - pole powierzchni kompozytu przyklejonego do próbki.

Wytrzymałość na zginanie została wyznaczona za pomocą metody trójpunktowego zginania (rys. 6).



Rys. 6. Schemat układu do badania wytrzymałości na zginanie

Fig. 6. Scheme of system to measure flexural strength

Do badania wykorzystano prostopadłościenne belki o wymiarach: a - długość 250 mm, szerokość 25 mm, wysokość 25 mm; b - 500x25x25 mm; c - 500x50x50 mm wycięte z odpowiednich próbek. Do tego typu kształtek przyklejono laminaty o szerokości równej szerokości badanych belek. Końce belek o długości 20 mm, które wspierały się na podporach maszyny wytrzymałościowej, nie były wzmacniane laminatem.

Wytrzymałość na zginanie belki została obliczona z zależności

$$\sigma_z = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot a \cdot b^2} \quad (3)$$

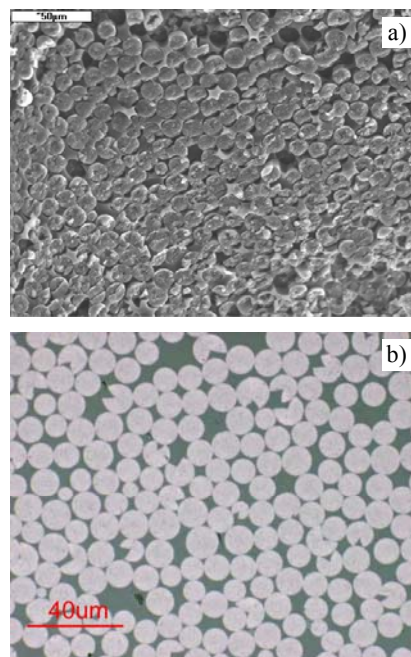
gdzie:  $F$  - siła zginająca;  $l$  - rozstaw podpór;  $a$  - szerokość próbki;  $b$  - wysokość próbki.

## WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Na otrzymanych laminatach z różnych rodzajów włókien węglowych wykonano pomiary gęstości i pomiary modułu Younga oraz na laminatach z włókien K-600 wykonano również pomiary wytrzymałości na rozciąganie. Z przeprowadzonych badań wynika, że otrzymane laminaty charakteryzowały się udziałem objętościowym włókien ( $V_v$ ) dochodzącym do 75%. Na rysunku 7 przedstawiono zdjęcia przełamu poprzecznego laminatu L-600 i zglądu wykonanego z tego przełamu.

Podstawowe parametry charakteryzujące wytworzone laminaty kompozytowe zamieszczono w tabeli 3. Z danych tych wynika, że możliwe jest otrzymanie laminatów o korzystnych parametrach mechanicznych, dla których moduł Younga można zmieniać w szerokich granicach od 100 do 600 GPa, zmieniając udział objętościowy włókien i rodzaj zastosowanych włókien. Wytrzymałość na rozciąganie  $\sigma_{roz}$  zmierzona dla laminatów typu L-600 mieści się w granicach 1,1÷1,3 GPa. Jak

wynika z tabeli 3, ze wzrostem udziału objętościowego włókien w laminacie jednokierunkowym rośnie wielkość anizotropii właściwości sprężystych charakteryzowana przez stosunek prędkości mierzonej w kierunku równoległym i prostopadłym do kierunku ułożenia włókien w laminacie. Dla L1-600 anizotropia prędkości propagacji podłużnej fali ultradźwiękowej ( $a = V_{II}/V_{\perp}$ ) wyniosła  $a = 6,6$ , zaś dla L2-600  $a = 7,5$ .



Rys. 7. Mikrofotografia przełamu poprzecznego laminatu L2-600 (a) i zgląd zrobiony z tego laminatu (b)

Fig. 7. Photomicrograph of cross-section area of laminate L2-600 (a) and microsection of this laminate (b)

TABELA 3. Charakterystyka laminatów  
TABLE 3. Characteristic of laminates

Typ laminatu	$d$ mm	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$V_v$ %	$V_{II}$ m/s	$V_{\perp}$ m/s	$E$ GPa	$\sigma_{roz}$ GPa
L-230	0,71	1,44	50	8146	2520	90	-
L-400	0,30	1,67	75	11 700	2480	220	-
L1-600	1,04	1,67	60	13 450	2030	280	1,1
L2-600	0,74	1,92	78	14 430	1920	383	1,3
L-950	0,30	1,96	75	17 910	1805	595	-

Do dalszych badań wytypowano 2 rodzaje laminatów: laminat L-600 z włóknami K-600, którym wzmacniano kształtki z betonu B-30, B-15 i zaprawy cementowej CEM I oraz laminat L-230 z włóknami T 300, którym wzmacniano kształtki z zaprawy cementowej. W tym celu przyklejono laminaty do powierzchni wymienionych kształtek żywicą epoksydową E-1 i badano wytrzymałość na zginanie tego układu. Efektywność wzmocnienia belek określono jako stosunek wytrzymałości kształtek z laminatem do wytrzymałości kształtek bez laminatu.

Wyniki pomiarów wytrzymałości na zginanie kształtek z zaprawy cementowej ZC o wymiarach 250x25x25 mm i kształtek z zaprawy cementowej z przyklejonymi laminatami ZC + L-300 o szerokości 12 mm (12) oraz laminatami o szerokości 25 mm (25) zamieszczono w tabeli 4. W przypadku wzmocnienia laminatem o szerokości równej szerokości kształtki zaprawy (25 mm) uzyskano 8-krotne wzmocnienie, natomiast dla laminatu o połowę węższego (12 mm) przyklejonego do belki o szerokości 25 mm osiągnięto 5-krotne wzmocnienie. Przetrzywanie w wodzie przez okres dwóch miesięcy kształtek z zaprawy cementowej z przyklejonym laminatem nie zmienia efektywności wzmocnienia (8-krotne). Na efektywność wzmocnienia ma wpływ długość badanych belek. Dla belek dwukrotnie dłuższych (500x25x25 mm), wykonanych z zaprawy cementowej, z przyklejonym laminatem L2-600 uzyskano 14-krotny wzrost wytrzymałości na zginanie w porównaniu z wytrzymałością belek bez laminatu. Uzyskane wartości wytrzymałości na zginanie wynosiły odpowiednio  $94,7 \pm 15,0$  i  $6,6 \pm 0,8$  MPa.

TABELA 4. Wytrzymałości na zginanie kształtek z zaprawy cementowej niewzmacnianej i wzmacnianej laminatem typu L-230

TABLE 4. Comparison of strength of nonreinforced and reinforced cement mortar samples with laminate type L-230

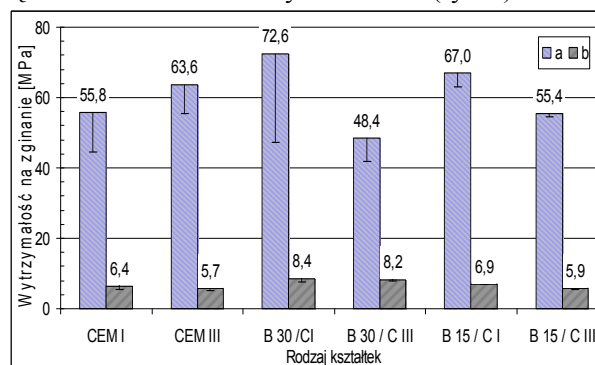
Typ próbek	$\sigma$ , MPa
ZC	$6,6 \pm 2,7$
ZC + L-230 (12)	$34,0 \pm 2,4$
ZC + L-230 (25)	$52,7 \pm 4,4$
ZC + L-230 (25) 2 m-ce w wodzie	$52,4 \pm 2,7$

Nieznacznie mniejsze wzmocnienie (12-krotne) uzyskano dla kształtek o wymiarach 500x25x25 mm wyciętych z betonu B-15 otrzymanego na cemencie CEM III. Uzyskane wartości wytrzymałości na zginanie kształtek B-15 wzmocnionych laminatem L2-600 wynosiły  $77,3 \pm 1,5$  i  $6,5 \pm 1,0$  MPa dla kształtek nie-wzmocnionych.

Przeprowadzono również badania porównawcze efektywności wzmocnienia laminatem L2-600 (o szerokości 50 mm) innych rodzajów kształtek o wymiarach 500x50x50 mm. Kształtki wycięto z bloków betonowych B-30 i B-15 otrzymanych na cemencie CEM I i CEM III oraz kształtek wyciętych z bloków zaprawy cementowej CEM I i CEM III. Wyniki pomiarów wytrzymałości na zginanie przedstawiono na rysunku 8.

Największe wzmocnienie uzyskano dla kształtek z zaprawy cementowej CEM III (11-krotne) i kształtek z betonu B-15 (ponad 9-krotne). Najmniejszy wzrost wytrzymałości na zginanie kształtek po przyklejeniu laminatu L2-600 stwierdzono dla betonu B-30 otrzymanego na cemencie C III (tylko 6-krotny).

We wszystkich przypadkach zniszczenie następowało poprzez łamanie belki tuż przy końcu przyklejonego laminatu, któremu często towarzyszyło odwarstwianie się laminatu od betonu w tym obszarze (rys. 9).



Rys. 8. Wytrzymałość na zginanie kształtek wzmocnionych laminatem (a) i kształtek bez laminatu (b)

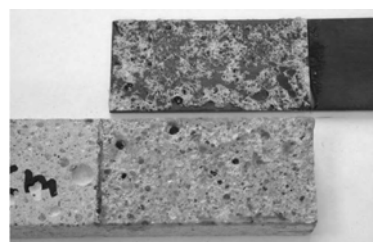
Fig. 8. Flexural strength of samples strengthened with lamina (a) and without lamina (b)



Rys. 9. Próbkę z przyklejonymi laminatami węglowymi po badaniach wytrzymałości na zginanie

Fig. 9. Samples with glued carbon composite after flexural

Bardzo ważnym elementem przy wzmacnianiu betonu kompozytami jest odpowiednia wytrzymałość połączenia pomiędzy poszczególnymi elementami, co jest charakteryzowane poprzez wytrzymałość na międzywarstwowe ścinanie. Badania wykazały, że niszczenie połączenia międzywarstwowego następowało w wyniku złożonego mechanizmu ścinania i odrywania od kształtki części materiału przyklejonego do laminatu, jak to pokazano na rysunku 10. Średnia wartość wytrzymałości na ścinanie wynosiła  $\tau = 5,8 \pm 0,78$  MPa. Jest to wartość zbliżona do uzyskiwanych w typowych kompozytach kruchych.



Rys. 10. Makrografia po badaniu wytrzymałości na międzywarstwowe ścinanie

Fig. 10. Macrography of sample after interlaminar shear test

Obserwacje mikroskopowe próbek poddanych testom trójpunktowego zginania wskazują, że początkowo powstające pęknięcia w kształtce są mostkowane w miejscu połączenia z kompozytem drogą częściowej jego delaminacji. Dzieje się tak w strefie występowania największych naprężeń rozciągających. Taki mechanizm niszczenia wskazuje na absorpcję energii pęknięcia w trakcie niszczenia drogą powstawania nowych powierzchni rozdziału między kompozytem a kształtką. W kilku przypadkach belka uległa zniszczeniu w miejscu podparcia urządzenia drogą ścinania, co może sugerować, że przekrój poprzeczny zastosowanego laminatu jest zbyt duży w stosunku do przekroju poprzecznego kształtki. Dalsza optymalizacja rodzaju włókien i wymiarów poprzecznych laminatów względem wielkości kształtek betonowych jest tutaj niezbędna.

## WNIOSKI

Do otrzymywania laminatów zastosowano krajową żywicę epoksydową 601 z utwardzaczem Z1 i włókna węglowe o różnym module Younga (230-950 GPa) otrzymywane z paku mezofazowego. Otrzymane w pracy laminaty charakteryzowały się modulem Younga od 100 do 600 GPa w zależności od udziału objętościowego, jak również od rodzaju zastosowanych włókien. Wartość wytrzymałości na rozciąganie dla laminatów wzmacnianych włóknami K-600 o udziale objętościowym włókien 60 i 78% wynosiła odpowiednio 1,1 i 1,3 GPa, a gęstość 1,67 i 1,92 g/cm<sup>3</sup>.

Przyczepność kompozytu węglowego na bazie krajowej żywicy epoksydowej do podłoża betonowego i podłoża z zaprawy cementowej jest duża i efektywnie zwiększa wytrzymałość na zginanie wzmocnionej konstrukcji. Wzrost wytrzymałości na zginanie zaprawy cementowej wzmacnianej laminatem L-230 jest 8-krotnie większy w porównaniu do próbki niewzmocnionej i utrzymuje się na tym samym poziomie po przetrzymywaniu ich w wodzie przez dwa miesiące.

Większe wzmocnienia (ponad 10x) uzyskano dla kształtek wyciętych z betonów B-30 i B-15 (otrzymanych na cemencie CEM I), do których przyklejono laminat L-600.

Przedstawione w niniejszej pracy wstępne badania laminatów polimerowych z włóknami węglowymi wskazują na potencjalne możliwości zastosowania otrzymanych kompozytów do wzmacniania elementów konstrukcji wykonanych z betonu. Wymaga to jednak prowadzenia dalszych badań nad trwałością połączenia beton/kompozyt w różnych warunkach: długotrwałych obciążeń statycznych, dynamicznych i zmiennych warunków otoczenia.

*Pracę realizowano w ramach projektu badawczego finansowanego przez Komitet Badań Naukowych, grant nr 4T08D 014 23.*

## LITERATURA

- [1] Donnet J.B., Bansal R.C., Carbon Fibres, Marcel Dekker, New York and Basel 1990.
- [2] Gaier J.R., Slabe M.E., Stahl M., Effect of heat-treatment temperature of vapour-grown graphite fibres, Synthetic Metals 1989, 31, 241-249.
- [3] Gaier J.R., Slabe M.E., Shaffer N., Stability of the electrical resistivity of bromine, iodine monochloride, copper (II) chloride, and nickel (II) chloride intercalated pitch-based graphite fibres, Carbon 1988, 26, 3, 381-387.
- [4] Błażewicz S., Piekarczyk J., Chłopek J., Błocki J., Michałowski J., Stodulski M., Żychowski P., Effect on neutron irradiation on mechanical properties of graphite fibres-based composites, Carbon 2002, 40, 721-727.
- [5] Fukuyama K., Higashibata Y., Miyauchi Y., Studies on repair and strengthening methods of damaged reinforced concrete columns, Cement and Concrete Composites 2000.
- [6] Brandt A.M., Zastosowanie włókien jako uzbrojenia w elementach betonowych, Konferencja Beton na progu nowego millenium 2000.
- [7] Brandt A.M., O zastosowaniu uzbrojenia i sprężania konstrukcji prętami, cięgnami i taśmami z materiałów kompozytowych, Konferencja Beton na progu nowego millenium 2000.
- [8] Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP systems for Strengthening Concrete Structures, Reported by ACI Committee 440, ACI 440.2R.
- [9] Ogawa H., Architectural application of carbon fibres, Carbon 2000, 38, 2, 211-226.
- [10] Meier U., Strengthening of structure using carbon fibres epoxy composites, Constructional and Building Materials 1995, 9, 6.
- [11] Kamińska M.E., Kotynia R., Doświadczalne badania żelbetowych belek wzmocnionych taśmami CFRP, Katedra Budownictwa Betonowego, Zeszyt 9, Politechnika Łódzka, Łódź 2000.
- [12] Siwowski T., Radomski W., Pierwsze krajowe zastosowanie taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu, Inżynieria i Budownictwo 1998, 7, 382-388.
- [13] Czarnecki L., Emmons P.H., Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. Polski Cement, Kraków 2002.
- [14] Furtak K., Koncepcja wzmacniania żelbetowych belek mostu matami kompozytowymi z włókien węglowych, Konferencja Nauk.-Techn. nt. Materiały kompozytowe.
- [15] Yagi K., Tanaka T., Jinnai T., Experimental studies on strengthening of prestress concrete beams with carbon fiber sheet, Proceedings of the First International Conference on Composites in Infrastructure, Tucson, AZ 1996.
- [16] Hiroshi F., Shunsuke Sugano, Japanese seismic rehabilitation of concrete buildings after the Hyogoken - Nanbu Earthquake, Cement and Concrete Composites 2000, 22, 59-79.
- [17] Kunio F., Yasuo H., Yasuyoshi M., Studies on repair and strengthening methods of Damaged Reinforced Concrete Columns, Cement and Concrete Compositions 2000, 22, 81-89.

- [18] Piekarczyk J., Zastosowanie metody ultradźwiękowej do pomiaru modułu Younga włókien ceramicznych, *Inżynieria Materiałowa* 1984, 5, 9-13.
- [19] Piekarczyk J., Własności włókien węglowych i grafitowych, monografia - Włókna węglowe (red. R. Pampuch), Wyd. AGH, Kraków 1986, 191-245.
- [20] Piekarczyk J., Hennicke H.W., Pampuch R., On determining the elastic constants of porous zinc ferrite materials, *cfi/Ber.D.K.G.* 1982, 59, 4, 227-232.

Recenzent  
Lech Czarnecki