

PRZYSPIESZENIE PROCESU WZMACNIANIA ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH TAŚMAMI Z WŁÓKIEN WĘGLOWYCH W METODZIE NSMR

DOROTA MICHAŁOWSKA-MAZIEJUK, *e-mail: d.michalowska@tu.kielce.pl*

BARBARA GOSZCZYŃSKA

WIESŁAW TRAMPCZYŃSKI

Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska

Streszczenie: W referacie przedstawiono wyniki badań na zginanie elementów żelbetowych wzmocnionych taśmami z włókien węglowych, metodą NSMR. Taśmy CFRP (carbon fibre reinforced polymer) zostały wklejone w betonową otulinę przy zastosowaniu przyspieszonej metody wzmocniania, z wykorzystaniem prototypu urządzenia grzewczego. Do wykonania wzmocnienia elementów żelbetowych zastosowano taśmy z włókien węglowych, wklejane przy użyciu kleju na bazie dwuskładnikowej, tiksotropowej żywicy epoksydowej. W normalnych warunkach (temperatura 23°C) proces wiązania kleju trwa 7 dni. Do przyspieszenia procesu wiązania kleju zastosowano grzanie taśmy z wykorzystaniem urządzenia grzewczego. Badania przeprowadzono dla trzech różnych temperatur grzania, w ustalonym czasie wynoszącym 1,5 godz. Przedstawiono analizę wyników badań zginanych elementów żelbetowych o wymiarach 0,15×0,15×0,60 m wzmocnionych i referencyjnych, poddanych obciążeniu monotonicznemu do zniszczenia. Wyznaczono stopień wzmocnienia badanych elementów, w stosunku do elementów referencyjnych. Analiza wyników badań pozwoliła na dobór odpowiedniej temperatury grzania, przy której uzyskano najwyższy stopień wzmocnienia. Pokazano sposób wykonania wzmocnienia metodą NSMR przy użyciu urządzenia grzewczego i omówiono jego działanie. Omówiono zalety wybranej metody NSMR w stosunku do tradycyjnych technik wzmocnień elementów konstrukcyjnych. W podsumowaniu przedstawiono dalsze plany obejmujące badanie wzmocnianych, z wykorzystaniem prototypu urządzenia grzewczego, belek żelbetowych.

Słowa kluczowe: elementy żelbetowe, taśmy z włókien węglowych (CFRP), metoda NSMR, urządzenie grzewcze, wzmocnienie elementu

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach w Polsce, tak jak i w wielu krajach na całym świecie, obserwowane jest zjawisko zmniejszenia się liczby nowowznoszonych obiektów budowlanych, przy równoczesnym zwiększeniu remontów, przebudowy, czy wzmocnień eksploatowanych konstrukcji. Konieczność wzmocniania lub napraw konstrukcji budowlanych wynika m.in. z błędów projektowych, błędów wykonawczych, z użytkowania obiektu niezgodnie z jego przeznaczeniem, a także ze „zużycia obiektu” po projektowanym okresie eksploatacji. Potrzeba wykonania wzmocnienia związana może być także ze zmianą funkcji, rozbudowy, lub sposobu użytkowania obiektu, które wiąże się najczęściej ze zwiększeniem obciążeń użytkowych, a tym samym z koniecznością podniesienia nośności jego elementów konstrukcyjnych. Dlatego też w wielu ośrodkach badawczych w Polsce jak i w innych krajach, prowadzone są liczne badania doświadczalne nad sposobami wzmocniania elementów konstrukcyjnych istniejących obiektów budowlanych, czy konstrukcji inżynierskich. Ważnym aspektem staje się także czas wykonania wzmocnienia, który niejednokrotnie jest przyczyną generowania znaczących kosztów, związanych z koniecznością wyłączenia z użytkowania wzmocnianego obiektu. Coraz częściej też, tradycyjne techniki

wzmacniania, takie jak, wprowadzenie dodatkowego zbrojenia zewnętrznego, lub wewnętrznego, zwiększenie przekroju betonowego, czy zmiana schematu statycznego [1], zastępowane są innowacyjnymi wzmocnieniami, przy użyciu lekkich, odpornych na korozję, wysokowartościowych, stosunkowo łatwych w aplikacji kompozytów. Dodatkową ich zaletą jest możliwość stosowania dowolnych długości bez wykonywania złączy, łatwość transportu i montażu bez ciężkiego sprzętu, a także wysoka odporność na środowisko zasadowe [2].

Prowadzone są więc liczne badania wzmocnień wykonanych z materiałów kompozytowych typu FRP (ang. *fibre reinforced polymer*), stosowanych w celu podwyższenia nośności elementów konstrukcyjnych ze względu na zginanie, ścinanie czy ściskanie. W ostatnich latach wiele z tych badań zostało ukierunkowanych na metodę wzmocnień elementów żelbetowych przy użyciu materiałów kompozytowych typu CFRP, wklejanych w betonową otulinę – NSMR [3, 4, 5, 6]. Metoda ta (ang. *near surface mounted reinforcement*) polega na wklejaniu laminatów kompozytowych w bruzdy wycięte w betonowej otulinie wzmacnianego elementu, przy pomocy dwuskładnikowej zaprawy klejowej, złożonej z żywicy epoksydowej i utwardzacza. Takie wklejenie powoduje lepszą przyczepność kompozytu w porównaniu z montażem laminatu do zewnętrznej powierzchni betonu. Ponadto, wklejony kompozyt jest chroniony przed uszkodzeniem mechanicznym, nie powoduje zmiany estetyki konstrukcji i jest lepiej zabezpieczony w przypadku pożaru niż kompozyt przyklejany do zewnętrznej powierzchni betonu.

Jak już wspomniano, istotnym aspektem procesu wzmacniania elementów konstrukcyjnych danego obiektu, także w przypadku zastosowania materiałów kompozytowych, jest czas wykonania wzmocnienia, który uzależniony jest ściśle od czasu wiązania kleju. Zgodnie z kartą informacyjną produktu [7] wiązanie zastosowanego kleju w normalnej temperaturze otoczenia trwa 7 dni. Uzyskanie możliwości skrócenia czasu wiązania wpływa więc bezpośrednio na skrócenie czasu wykonania wzmocnienia i tym samym na skrócenie wyłączenia obiektu z eksploatacji. W celu skrócenia czasu wiązania kleju stosuje się jego podgrzewanie, co sprawdzono przy aplikowaniu taśm kompozytowych do zewnętrznej powierzchni elementu. W pracy przedstawiono opracowany, we współpracy z firmą SIKA Poland, przyspieszony sposób wykonania wzmocnienia elementów żelbetowych taśmami z włókien węglowych CFRP wklejanych w betonową otulinę z zastosowaniem procesu grzania taśmy przy pomocy prototypowego urządzenia grzewczego, który pozwala skrócić czas wiązania kleju nawet do 1,5 godziny.

2. Opis urządzenia grzewczego

W celu przyspieszenia czasu wiązania zaprawy klejowej w bruzdzie wykonanej w otulinie betonowej, a tym samym skrócenia czasu całego procesu wzmocnienia elementu metodą NSMR, zastosowano podgrzewanie kompozytu, wykorzystując prototyp urządzenia grzewczego – „*heating device*”.

Działanie tego urządzenia oparte jest na przepływie prądu o określonych parametrach przez taśmy z włókien węglowych. Przepływ ten powoduje wzrost temperatury taśm, co za tym idzie podgrzanie kleju, a w efekcie znacznie skrócenie czasu jego utwardzania. Przewody prądowe (rys. 1) dołączane są przy pomocy klem do zaciśniętych na końcach taśm obejm, wystających poza wzmacniany element. Pierwsza próba zastosowania obejm metalowych nie powiodła się, dlatego w kolejnej próbie wykonano obejmę z miedzianych płaskowników. W zależności od długości i typu taśm przeznaczonych do wzmacniania, otrzymuje się ich różne rezystancje. Widok elementu badawczego wraz z zastosowanym urządzeniem grzewczym, podłączonym przy pomocy przewodów prądowych, przedstawia rysunek 1.

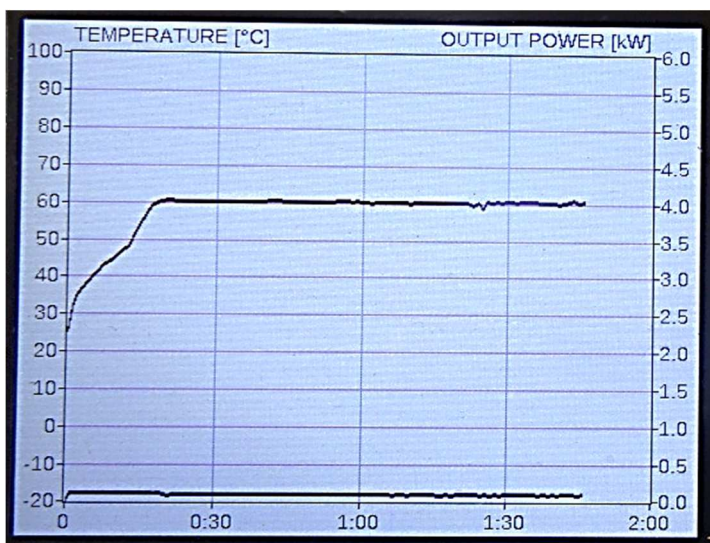
Prototypowe urządzenie grzewcze daje możliwość wyboru jego ustawienia w zależności od zastosowanego typu taśmy, czasu i temperatury grzania. Wybór taśmy powoduje automatyczny dobór przez urządzenie grzewcze napięcia i prądu wyjściowego.



Rys. 1. Widok elementu badawczego z dołączonym urządzeniem grzewczym

Temperatura grzania mierzona jest przy pomocy kabla termoparowego, zatopionego w kleju w miejscu najcieplejszym – na środku grzanej taśmy węglowej. Do stabilizacji temperatury zastosowano w urządzeniu regulator PID (ang. *proportional integral derivative controller*), który nie dopuszcza do wzrostu temperatury ponad ustawioną wartość, gdyż za wysoka temperatura powoduje degradację kleju.

Urządzenie umożliwia również śledzenie, podczas procesu grzania, zmian temperatury czujnika termoparowego oraz mocy wyjściowej. Zmiany te rejestrowane są co jedną minutę i rysowane na wykresie widocznym w głównym panelu urządzenia. Wykres ten obrazuje profil temperatury taśmy podczas procesu twerdnienia kleju. Widok przykładowego wykresu zmian temperatury w czasie oraz zmiany mocy wyjściowej, uzyskany z urządzenia grzewczego, pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Przykładowy wykres zmian temperatury uzyskany z urządzenia „heating device”

3. Przeprowadzone badania

W celu uzyskania efektywnej temperatury grzania wykonano badania na zginanych elementach żelbetowych, które zostały wzmocnione taśmą klejoną w otulinę betonową z zastosowaniem przyspieszonego wiązania kleju w 3 różnych temperaturach oraz porównawczo na elementach niewzmocnionych i wzmocnionych bez podgrzewania. Badania realizowane były w maszynie wytrzymałościowej, która pozwala wykonywać badania jednoprzęsłowych elementów badawczych w schemacie statycznym trzypunktowego zginania. Ruchome podpory przymocowane na dolnej belce stalowej umożliwiają uzyskanie rozpiętości w osiach tych podpór w granicach od 100 do 550 mm. Dokładność rozstawu podpór kontrolowana jest za pomocą podziałki umieszczonej na dolnej belce stalowej. Obciążenie w postaci siły skupionej przekazywane jest na element za pomocą siłownika śrubowego, umieszczonego w połowie rozpiętości elementu. Ogólny widok stanowiska badawczego wraz z elementem żelbetowym pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Widok stanowiska badawczego wraz z badanym elementem

Biorąc pod uwagę możliwości stanowiska badawczego, do badań przyjęto schemat statyczny jednoprzęsłowej belki swobodnie podpartej o rozpiętości w osiach podpór równej $l_{eff} = 500$ mm. Zastosowane elementy żelbetowe o wymiarach $150 \times 150 \times 600$ mm były poddawane obciążeniu, które dawało monotoniczny wzrost siły skupionej F , aż do zniszczenia elementu. Siła była ustawiona w połowie odległości od osi podpór tj. w $1/2$ rozpiętości l_{eff} przęsła.

We wszystkich elementach badawczych zastosowano jako zbrojenie podłużne po dwa pręty o średnicy 8 mm (dwa pręty w strefie ściskanej i rozciąganej), ze stali żebrowanej klasy A-IIIIN, gatunku BST500S. Strzemiona wykonano z tej samej klasy i gatunku stali, z prętów o średnicy 6 mm, w rozstawie co 100 mm. W celu zapewnienia odpowiedniego otulenia prętów zbrojenia, także pod kątem możliwości wklejenia taśmy w otulinę betonową, podczas betonowania zastosowano wkładki dystansowe o wysokości 20 mm.

Wykonano łącznie 15 sztuk elementów badawczych i podzielono je na pięć serii po 3 elementy w każdej. Serię pierwszą stanowiły elementy referencyjne – niewzmocnione, natomiast

każdą kolejną elementy wzmocnione taśmą z włókien węglowych. Serie elementów wzmocnionych różniły się od siebie czasem i temperaturą wiązania kleju, i tak: serie 2, 3 i 4 (po 3 elementy) z wykonanym wzmocnieniem przy czasie grzania 1,5 godziny, różniącym się temperaturą grzania taśm oraz serię 5 (3 elementy) z czasem wiązania 7 dni w temperaturze otoczenia.

Przyjęto wzmocnienie elementów żelbetonowych, ze względu na zginanie, poprzez wklejenie w betonową otulinę pojedynczej taśmy z włókien węglowych. Taśma o wymiarach przekroju 3×10 mm i długości 450 mm została wklejona przy pomocy żywicy epoksydowej w wyciętą bruzdę w betonowej otulinie. Bruzda o wymiarach 7×15 mm została wykonana przy pomocy bruzdownicy od spodu elementu badawczego. Przed procesem wklejania na końcach taśmy zaciśnięto obejmy wykonane z miedzianego płaskownika, będące łącznikiem podczas przepływu prądu między taśmą, a przewodami prądowymi. Dla lepszej przewodności prądu styk taśmy z obejmą smarowano pastą miedzianą. Widok taśmy wraz z obejmami pokazany został na rysunku 4.



Rys. 4. Widok taśmy węglowej z miedzianymi płaskownikami

Dwuskładnikowa żywica epoksydowa wymieszana została z zachowaniem proporcji wagowych, zgodnie z kartą informacyjną produktu [7], dając materiał o jednolitej szarej barwie. Tak każdorazowo przygotowana zaprawa klejowa została zastosowana do aplikacji taśmy węglowej w bruzdę wyciętą w betonowej otulinie. Widok aplikowania taśmy pokazany został na rysunku 5.



Rys. 5. Wklejanie taśmy w badany element

Elementy badawcze serii 5 z wklejoną taśmą pozostawiono w temperaturze 23°C do momentu samoistnego związania kleju. Obciążanie tych elementów rozpoczęto po 7 dniach od wzmocnienia. Elementy serii 2, 3 i 4 wzmocniano pojedynczo, z wykorzystaniem urządzenia grzewczego do podgrzewania taśm z włókien węglowych i od razu obciążano. Serie 2, 3 i 4 różniły się temperaturą podgrzewania taśmy: odpowiednio 60 , 70 i 80°C .

4. Wyniki i analiza przeprowadzonych badań

Podczas przeprowadzonych badań elementów żelbetowych zostały zarejestrowane wyniki pomiarów, w postaci:

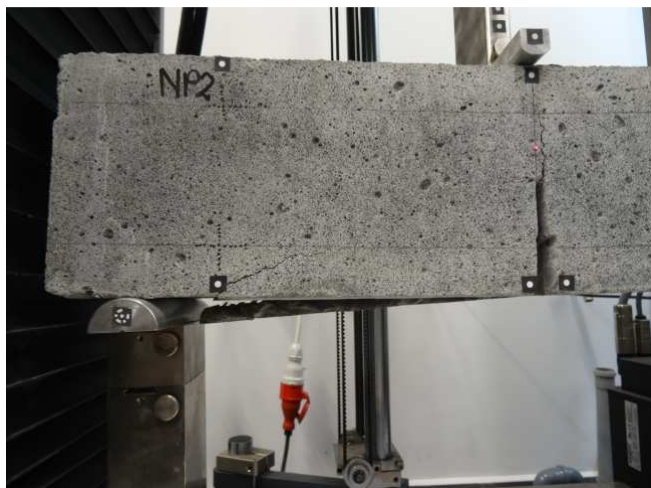
- przyrostu obciążenia,
- czasu badania,
- wartości siły niszczącej,
- wartości szerokości rysy,
- wartości ugięcia elementu.

Stan graniczny użyteczności, ukazujący zarysowanie i ugięcie elementu został pominięty w tym opracowaniu. Wyniki wartości sił niszczących zamieszczono w tablicy 1.

Tablica 1. Zestawienie sił niszczących

Seria	Elementy	Temperatura grzania w czasie 1,5 h [°C]	Siła niszcząca [kN]	Siła niszcząca, wartość średnia [kN]
1	A1	-	10,9	11,2
	A2		11,5	
	A3		11,3	
2	B1	60	44,6	47,2
	B2		48,8	
	B3		48,1	
3	C1	70	54,9	55,2
	C2		56,9	
	C3		53,9	
4	D1	80	51,8	54,0
	D2		56,8	
	D3		53,5	
5	E1	-	59,5	58,8
	E2		57,5	
	E3		59,3	

Wszystkie elementy zniszczyły się w podobny sposób przez odspojenie się taśmy CFRP wraz z częścią otuliny betonowej. Zniszczenie elementów zawsze przebiegało gwałtownie, niezależnie od tego, czy element był poddany przyspieszonemu procesowi wiązania kleju z wykorzystaniem urządzenia grzewczego, czy proces wiązania był zgodny z kartą informacyjną produktu [7]. Przyspieszenie procesu wzmocnienia elementów nie spowodowało więc wystąpienia innego sposobu zniszczenia w stosunku do zniszczenia elementów, w których proces wiązania kleju przebiegał w normalnych warunkach temperaturowych. We wzmocnionych elementach serii 2, 3 i 4 taśmy z włókien węglowych odspajały się w strefie przypodporowej, a otulina betonowa pozostawała dobrze zespolona z taśmą. Odspojenie to nie dochodziło do punktu przyłożenia siły, która obciążała element żelbetowy. Taśmy węglowe, wzmocniające elementy serii 5, odspajały się w większej odległości od strefy przypodporowej, bliżej środka rozpiętości elementu. Widok przykładowego zniszczenia elementu żelbetowego serii 2, 3 i 4 pokazano na rysunku 6, na którym wyraźnie widoczne jest odspojenie taśmy w strefie przypodporowej.



Rys. 6. Przykład zniszczenia wzmocnionego elementu żelbetowego

Zarejestrowane wyniki pomiarów siły niszczącej posłużyły do wyznaczenia stopnia wzmocnienia badanych elementów w stosunku do elementów referencyjnych.

Tablica 2 przedstawia wartości momentów niszczących dla poszczególnych elementów badawczych, a także stopień wzmocnienia η_u elementów.

Tablica 2. Stopień wzmocnienia elementów żelbetowych

Seria	Elementy	Moment niszczący [kNm]	Moment niszczący, wartość średnia [kNm]	Stopień wzmocnienia η_u
1	A1	1,36	1,40	-
	A2	1,44		
	A3	1,41		
2	B1	5,58	5,90	0,76
	B2	6,10		
	B3	6,01		
3	C1	6,86	6,90	0,80
	C2	7,11		
	C3	6,74		
4	D1	6,48	6,75	0,79
	D2	7,10		
	D3	6,69		
5	E1	7,44	7,35	0,81
	E2	7,19		
	E3	7,41		

Stopień wzmocnienia η_u elementów wyznaczono ze wzoru (1):

$$\eta_u = \frac{(M_u - M_{u0})}{M_u}; \quad (1)$$

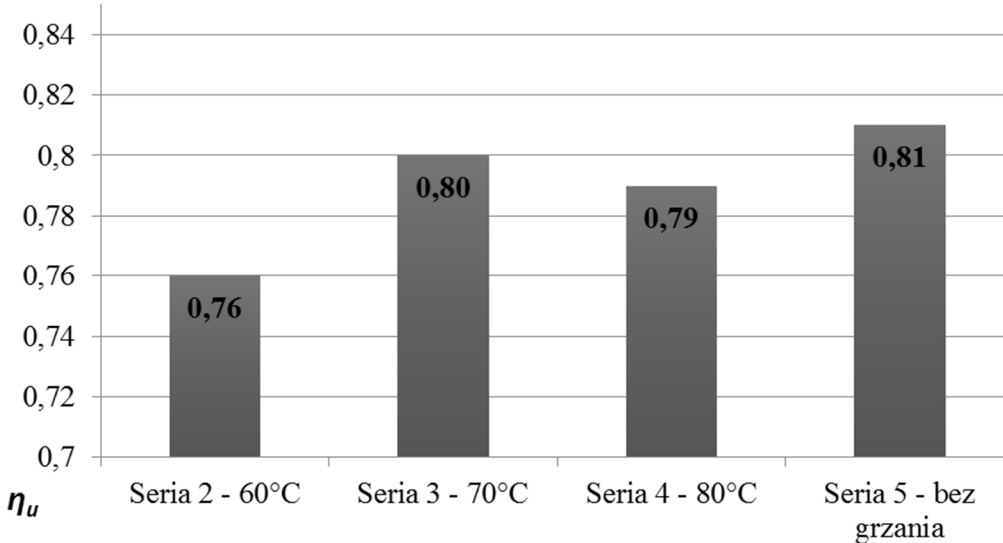
gdzie:

M_u – moment niszczący element wzmocniony,

M_{u0} – moment niszczący element niewzmocniony.

Biorąc pod uwagę wzmocnienie elementów przy zastosowaniu tego samego czasu grzania i trzech temperatur grzania taśm z włókien węglowych, można stwierdzić że stopień wzmocnienia η_u odnoszący się do nośności elementu niewzmocnionego jest najbardziej zbliżony w przypadku elementów serii 3 oraz 5 i wynosi odpowiednio 0,8 oraz 0,81.

Graficzny obraz stopnia wzmocnienia badanych elementów w stosunku do elementów referencyjnych przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Uzyskany stopień wzmocnienia elementów żelbetowych

5. Wnioski i podsumowanie

- Na podstawie wyników doświadczalnych i przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że:
- zastosowanie wklejanych taśm z włókien węglowych w betonową otulinę strefy rozciąganej elementu prowadzi do zwiększenia jego nośności ze względu na zginanie,
 - potwierdzono, że zastosowanie prototypowego urządzenia grzewczego umożliwia skrócenie czasu wiązania kleju,
 - zastosowanie obejm z miedzianych płaskowników na końcach taśm węglowych umożliwiło zastosowanie prototypowego urządzenia grzewczego do przyspieszenia czasu wiązania kleju w metodzie NSMR,
 - założony czas grzania taśm, wynoszący 1,5 godziny jest wystarczający do wykonania wzmocnienia w metodzie NSMR,
 - temperatura grzania taśmy t_2 , wynosząca 70°C, jest temperaturą przy której uzyskano najwyższy stopień wzmocnienia η_u w stosunku do belek referencyjnych, odnoszący się do nośności elementu,
 - stopień wzmocnienia η_u elementów żelbetowych serii 3 (zastosowane urządzenie grzewcze i temperatura grzania $t_2 = 70^\circ\text{C}$) okazał się najbardziej zbliżony do stopnia wzmocnienia elementów serii 5 (bez zastosowania urządzenia - wiązanie kleju w czasie 7 dni, w temperaturze 23°C).
 - temperatura grzania $t_2 = 70^\circ\text{C}$, przy założonym czasie grzania równym 1,5 godz., jest najbardziej odpowiednia do wykonania wzmocnienia w metodzie NSMR.

Głównym celem wykonanych badań zginanych elementów żelbetonowych wzmocnionych taśmami CFRP w metodzie NSMR było opracowanie sposobu skrócenia czasu wiązania kleju z 7 dni w normalnej temperaturze otoczenia do 1,5 godziny z zastosowaniem prototypowego urządzenia grzewczego wraz z określeniem efektywnej temperatury grzania, przy której zostałaby uzyskany stopień wzmocnienia elementu odpowiadający wzmocnieniu realizowanemu zgodnie z kartą informacyjną produktu [7]. Można stwierdzić, że cel ten został osiągnięty i jako efektywna została określona temperatura $t_2 = 70^\circ\text{C}$.

Opisana, przyspieszona metoda wzmocniania elementów żelbetonowych na zginanie poprzez wklejanie taśm w otulinę betonową (NSMR) zostanie zastosowana w badaniach dotyczących efektywności wzmocnienia belek żelbetonowych wstępnie obciążonych, wzmocnianych pod obciążeniem, z uwzględnieniem wpływu sposobu niszczenia na bezpieczeństwo wzmocnianego elementu. Ponieważ w praktyce inżynierskiej, w większości, nie dokonuje się wzmocnienia nowych elementów, a obciążenia użytkowe przekazywane są na konstrukcję w sposób zmienny, planowane badania 20 belek żelbetonowych o wymiarach $0,12 \times 0,30 \times 3,30$ m z wykorzystaniem prototypowego urządzenia grzewczego uwzględniać będą wstępne obciążenie i wykonanie wzmocnienia pod obciążeniem oraz dwa programy obciążania tych elementów monotoniczny przyrost siły aż do zniszczenia oraz obciążenie cykliczne.

Literatura

1. Urban T.: Wzmocnianie konstrukcji żelbetonowych metodami tradycyjnymi, PWN, Warszawa 2016.
2. CNR DT 200, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, National Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, 2004.
3. Sena-Crus J., Dias S., Ferreira D., Fortes A., Baros J.: Near surface mounted CFRP – based technique for the strengthening of concrete structures, Jornada Tecnica En Honor a Ravinida Gettu. 5 De Octubre De 2004.
4. Kotynia R.: Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted CFRP strip, III International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006), 13-15 Dec. 2006.
5. Barros J., Dias S., Lima J.: Efficacy of CFRP – based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams, Cement and Concrete Composites no 29/2007.
6. Kalayci A.S., Yalim B., Mirmiran A.: Construction tolerances and design parameters for NSM FRP reinforcement in concrete beams, Construction and Buildings Materials, 2010.
7. Sikadur®-330: Dwuskładnikowa impregnacyjna żywica epoksydowa – karta informacyjna produktu, lipiec 2016.

ACCELERATION OF STRENGTHENING REINFORCED CONCRETE WITH CARBON FIBER STRIPS IN NSMR METHOD

Abstract: The paper presents the results of flexural reinforced concrete elements reinforced with carbon fiber strips, using the NSMR method. CFRP strips (carbon fiber reinforced polymer) have been pasted into a concrete cover using the accelerated method of application and heating device prototype. The carbon fiber strips with adhesive on the basis of a two-component, thixotropic epoxy resin was used to strengthen reinforced concrete elements. Under normal conditions (temperature 23°C), the adhesive bonding process takes seven days. A prototype of the heating device was used to accelerate the strengthening process. The study was conducted at different temperatures heating in a fixed period of 1,5 hours. The paper presents an analysis of the test results of flexural reinforced concrete elements with dimensions $0,15 \times 0,15 \times 0,60$ m, under the monotonic load. Reinforcement ratio of the tested components relative to reference elements has been appointed. Analysis of the results allowed the selection of appropriate heating temperature at which obtained the highest degree of reinforcement, which refers to the load

capacity of the elements. It is shown how to perform strengthening in the NSMR method, using a heating device and discusses how the device works. The advantages of the NSMR method over traditional techniques reinforcement components was discussed. In conclusion the article, a further study plans reinforced concrete beams, using a prototype heating device has been presented.

Keywords: reinforced concrete elements, carbon fiber strips (CFRP), NSMR method, heating device, reinforcement element