



PIOTR KONDERLA, *piotr.konderla@pwr.wroc.pl*
RYSZARD KUTYŁOWSKI, *ryszard.kutyłowski@pwr.wroc.pl*
Instytut Inżynierii Łądowej Politechniki Wrocławskiej
KAZIMIERZ STEFANEK, *Kazimierz.Stefanek@gkpge.pl*
PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A., Oddział Elektrownia Bełchatów

KONCEPCJA WZMOCNIENIA KONSTRUKCJI CHŁODNI KOMINOWEJ MATERIAŁEM KOMPOZYTOWYM Z MATRYCĄ CEMENTOWĄ

CONCEPT OF THE COOLING TOWER STRENGTHENING USING COMPOSITE MATERIAL WITH THE CEMENT MORTAR MATRIX

Streszczenie W pracy przedstawiono koncepcję wzmocnienia chłodni kominowej przy użyciu materiałów kompozytowych na matrycy cementowej. Przedstawiono zalety tego rozwiązania w stosunku do rozwiązań tradycyjnych. Przykładowo w pracy analizowano koncepcję wzmocnienia rzeczywistej chłodni kominowej w kontekście jej bezpiecznego użytkowania. Numeryczne obliczenia wykonano dla materiału kompozytowego na matrycy cementowej z włóknami PBO, a ponadto wskazano na pewne problemy projektowe i technologiczne jakie pojawiają się przy wzmacnianiu chłodni zaproponowanymi materiałami.

Abstract The concept of strengthening of cooling towers using composite materials with the cement mortar matrix is presented in this paper. The advantages of such kind of strengthening in comparison with traditional technologies are discussed. The concept of strengthening cooling tower in context of its safe operational use are analyzed as an example. Numerical analysis of composite material (PBO fibers embedded in mineral mortar) is made. The designing and technological problems arising during the strengthening process are discussed also.

1. Włókniste materiały kompozytowe z matrycą cementową

Wzmacnianie konstrukcji budowlanych taśmami lub matami kompozytowymi staje się coraz bardziej powszechne. Typowymi materiałami dostępnymi na rynku w wielu odmianach są taśmy i maty na matrycy polimerowej z włóknami węglowymi, szklanymi i aramidowymi, zwane dalej PMC (*Polimer Matrix Composites*). Obok niewątpliwych zalet takich jak mały ciężar, duża wytrzymałość i stosunkowo prosta aplikacja wykazują się również pewnymi wadami, do których należy zaliczyć brak odporności na podwyższone temperatury oraz stosunkowo wysokie wymagania związane z przygotowaniem powierzchni konstrukcji, na które naklejany jest materiał kompozytowy.

Tematem niniejszej pracy jest problem wzmacniania konstrukcji materiałem kompozytowym na matrycy cementowej. Jest to materiał kompozytowy nowej generacji o nazwie FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*) stosowany do wzmacniania konstrukcji betonowych i murowych. Materiał ten składa się z dwóch elementów: siatki włókien ułożonych ortogonalnie oraz zaprawy mineralnej stanowiącej matrycę materiału kompozytowego oraz jednocześnie zapewniającą połączenie materiału kompozytowego ze wzmacnianą konstrukcją. Z uwagi na

technologię wytwarzania tego materiału często określa się go systemem kompozytowym FRCM. Jako włókna siatki mogą być stosowane takie same włókna jak w materiałach PMC [1] a ponadto włókna PBO (*polyparaphenylene benzobisoxazole*). W niniejszej pracy przedmiotem rozważań jest materiał klasy FRCM na przykładzie materiału z włóknami PBO.

Materiał kompozytowy FRCM z jednej strony charakteryzuje się podobnymi właściwościami wytrzymałościowymi jak materiały klasy PMC, a jednocześnie w odróżnieniu od nich wykazują następujące pozytywne właściwości:

- siatki włókien PBO charakteryzują się dużą elastycznością, co ułatwia układanie ich na płaszczyznach o zmiennych krzywiznach,
- powierzchnia elementu konstrukcyjnego, na który nakłada się materiał kompozytowy powinna być trwała i czysta, ale nie musi być szpachlowana w celu uzyskania gładkiej powierzchni klejenia jak to jest wymagane w przypadku PMC,
- materiał kompozytowy z włóknami PBO jest niepalny i ognioodporny – w temperaturach do 600°C zachowuje swoje właściwości wytrzymałościowe.

W pracy analizowano możliwość zastosowania materiału FRCM jako wzmocnienie konstrukcji chłodni kominowej, w szczególności w aspekcie pewnych problemów natury projektowej i wykonawczej (technologicznej).

Przykładowym materiałem kompozytowym tego rodzaju jest Ruredil X Mesh Gold (*Aprobata techniczna IBDM, 2012*). System składa się z siatki wykonanej z włókna PBO oraz zaprawy mineralnej. Włókna siatki ułożone w regularne pasma tworzą ortogonalną siatkę jak to pokazano na rys. 1. Siatka jest elastyczna i łatwo można ją dopasowywać do ewentualnie nierównego podłoża. System przeznaczony jest do wzmocniania konstrukcji żelbetowych i murowych, które mogą pracować w dużym zakresie temperatur. Zaprawa może być stosowana na wilgotne podłoża, co w przypadku chłodni kominowej może być istotne.



Rys. 1. Siatka włókien systemu Ruredil X Mesh Gold

W ostatnim okresie prowadzone są badania porównujące efektywność wzmocniania konstrukcji przy pomocy systemu FRCM, z systemem CFRP [2]. Porównanie to wypada na korzyść systemu FRCM i to zarówno pod względem odporności termicznej jak i bezpieczeństwa konstrukcji ulegającej awarii. W przypadku stosowania włókna PBO zniszczenie nie następuje nagle. Na bazie badań doświadczalnych zaproponowano związki konstytutywne dla systemu FRCM z siatką z włókna PBO z uwzględnieniem wpływu temperatury [3].

Technologia montażu systemu polega na nałożeniu na wyczyszczone podłoża zaprawy, w którą następnie wtapia się siatkę, potem pokrywa kolejną warstwą zaprawy. Można stosować do trzech warstw siatki osadzając je kolejno w zaprawie. Ostatnia siatka musi być zawsze pokryta zewnętrzną warstwą zaprawy. Jedynymi ograniczeniami technologicznymi to

możliwość wykonywania wzmocnienia w zakresie temperatur od $+5^{\circ}\div+35^{\circ}\text{C}$ przy ograniczonej prędkości wiatru do 2 m/s. System nadaje się do wzmocniania konstrukcji żelbetowych wykonanych z betonu od klasy C16/20 i wyższych klas.

Poszczególne elementy systemu Ruredil X Mesh Gold charakteryzują się następującymi parametrami technicznymi (*Karta techniczna Ruredil X Mesh Gold 11/2009*):

- | | |
|---|-------------|
| a) włókna siatki | |
| – moduł sprężystości podłużnej | 270 GPa, |
| – wytrzymałość na rozciąganie | 5800 MPa, |
| – graniczne odkształcenie przy rozciąganiu | 21,5 ‰, |
| b) siatka | |
| – wytrzymałość w kierunku podłużnym (osnowa) | 264,0 kN/m, |
| – wytrzymałość w kierunku poprzecznym (wątek) | 66,5 kN/m, |
| c) zaprawa | |
| – wytrzymałość przy ściskaniu po 28 dniach | 29,0 MPa, |
| – wytrzymałość przy rozciąganiu po 28 dniach | 3,5 MPa, |
| – sieczny moduł sprężystości | 6,0 GPa. |

2. Zagadnienie wzmocnienia konstrukcji chłodni

Chłodnie kominowe o konstrukcji żelbetowej pracują w bardzo niekorzystnych warunkach eksploatacyjnych, co pociąga za sobą sukcesywną degradację materiału konstrukcji. Typowymi uszkodzeniami są złuszczenia i degradacja powierzchni płaszczka powłoki chłodni, odspajanie się otuliny zbrojenia, co w konsekwencji prowadzi do korozji stali zbrojeniowej. Zapobieganie procesowi pogarszania się stanu technicznego konstrukcji polega głównie na stosowaniu właściwych bieżących zabiegów konserwacyjnych i wykonywaniu okresowych remontów powierzchniowych elementów żelbetowych konstrukcji. Jeżeli w konstrukcji nie stwierdzono istotnych wad projektowych i wykonawczych oraz warunki eksploatacji nie zmieniają się, to przy właściwej eksploatacji i konserwacji chłodnie nie wymagają szczególnych wzmocnień konstrukcji w planowanym okresie eksploatacji.

Żelbetowe chłodnie kominowe wybudowane w Polsce w latach 70-tych i 80-tych XX wieku miały bardzo często parametry znacznie odbiegające od parametrów, które aktualnie uznajemy za właściwe, stąd po kilkudziesięciu latach eksploatacji wymagają one kapitalnych remontów, włącznie z wykonywaniem wymiany dużych obszarów powłoki chłodni oraz wykonywaniu konstrukcyjnych wzmocnień. Wzmocnienia płaszczka chłodni wykonuje się następującymi sposobami:

- metodą nakładania dodatkowej warstwy torkretu zbrojonego lub niezbrojonego,
- wykonywanie zewnętrznego uźebrowania równoleżnikowego lub/i południkowego na wybranych obszarach płaszczka chłodni,
- wykonywanie żeber ukrytych w trakcie remontu płaszczka chłodni,
- nakładanie taśm lub/i mat kompozytowych klasy PMC (na bazie żywic polimerowych).

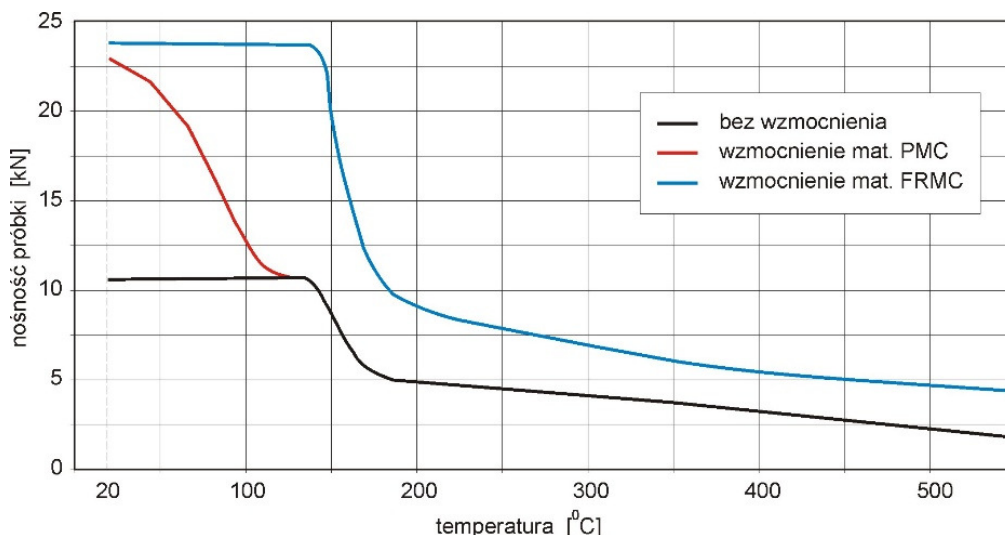
Inną przyczyną, która może wymuszać wzmocnienie jest sytuacja, gdy w sąsiedztwie istniejącej chłodni wybudowano inny obiekt, wpływający niekorzystnie na stan wyężenia powłoki rozważanej chłodni. Wtedy też można zastosować system wzmocnienia siatkami kompozytowymi.

Wzmocnienia chłodni kominowej taśmami i matami kompozytowymi klasy PMC są rzadko stosowane. Na przeszkodzie szerokiego stosowania tego systemu stoją:

- wysokie wymagania przygotowania powierzchni nakładania kompozytu,

– mała odporność termiczna kleju, który już w temperaturach powyżej 50°C wykazuje obniżanie wytrzymałości (rys. 2).

Powyższe wady nie są obserwowane w materiałach kompozytowych klasy FRCM. Powierzchnie, na które nakłada się siatki kompozytowe systemu FRCM nie muszą być specjalnie szpachlowane. System kompozytowy FRCM wykazuje się zdecydowanie wyższą ognioodpornością w stosunku do materiałów klasy PMC – ognioodporność materiałów FRCM jest podobna do ognioodporności konstrukcji betonowych i żelbetowych (rys. 2)



Rys. 2. Wyniki badań rozciąganych próbek betonowych w zależności od temperatury (wg. [2])

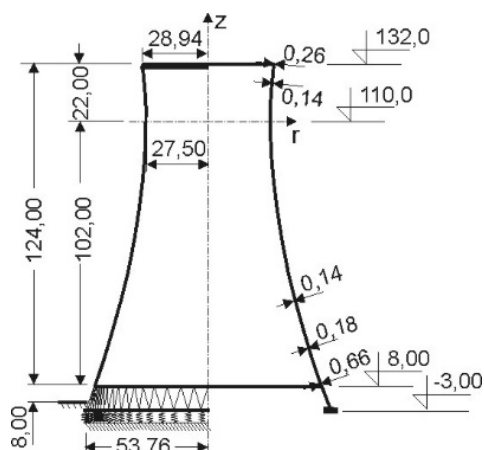
3. Przykład chłodni kominowej wymagającej wzmocnienia

Rozważana chłodnia kominowa jest eksploatowana od lat osiemdziesiątych XX wieku. Schemat statyczny chłodni pokazano na rys. 3. W ostatnim okresie wzniesiono w jej sąsiedztwie nowy blok energetyczny i nową chłodnię, co w efekcie istotnie zmieniło warunki pracy analizowanej chłodni. W związku z tym, z uwagi na zmienione warunki obciążenia, w latach 2010 i 2011 podjęto szereg działań mających na celu określenie stanu technicznego i stanu bezpieczeństwa konstrukcji, na co składało się:

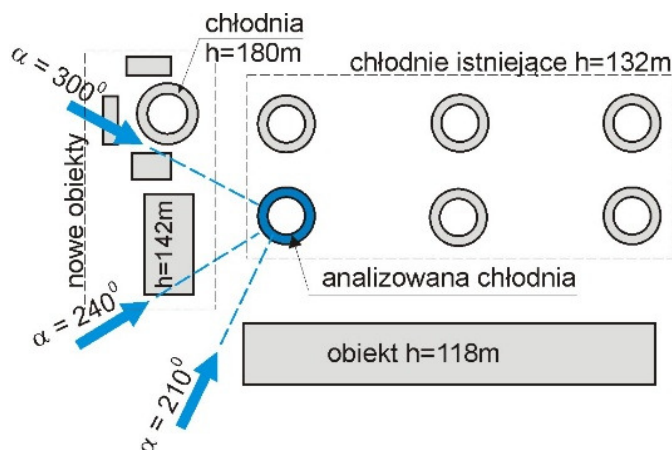
- badania stanu technicznego konstrukcji chłodni,
- opracowanie koncepcji wzmocnienia konstrukcji.

Badania stanu technicznego obejmowały: badania materiału wbudowanego w chłodnię, pomiary geodezyjne i obliczenia statyczne i wytrzymałościowe. Obliczenia powłoki chłodni i słupów podbudowy były przeprowadzone z uwzględnieniem aktualnych norm z uwzględnieniem rzeczywistego kształtu powłoki, a także wzięto pod uwagę wpływ sąsiednich obiektów. Parametry betonu konstrukcyjnego przyjęto na podstawie badań laboratoryjnych próbek materiału pobranych z chłodni. W obliczeniach statycznych uwzględniono następujące obciążenia: ciężar własny, skurcz betonu, parcie wiatru i oddziaływania termiczne. W obciążeniu parciem wiatru uwzględniono interferencję aerodynamiczną – współczynniki interferencji wyznaczono w Laboratorium Wiatrowym w Bochum dla najniekorzystniejszych kierunków obciążenia parciem wiatru jak to pokazano na rys. 4.

Sprawdzono warunki stateczności chłodni. Przy wszystkich kombinacjach obciążeń jak również symulowanego zmniejszenia grubości ścianki powłoki chłodni, warunki były spełnione, w szczególności $\gamma > \gamma_B = 5,0$.

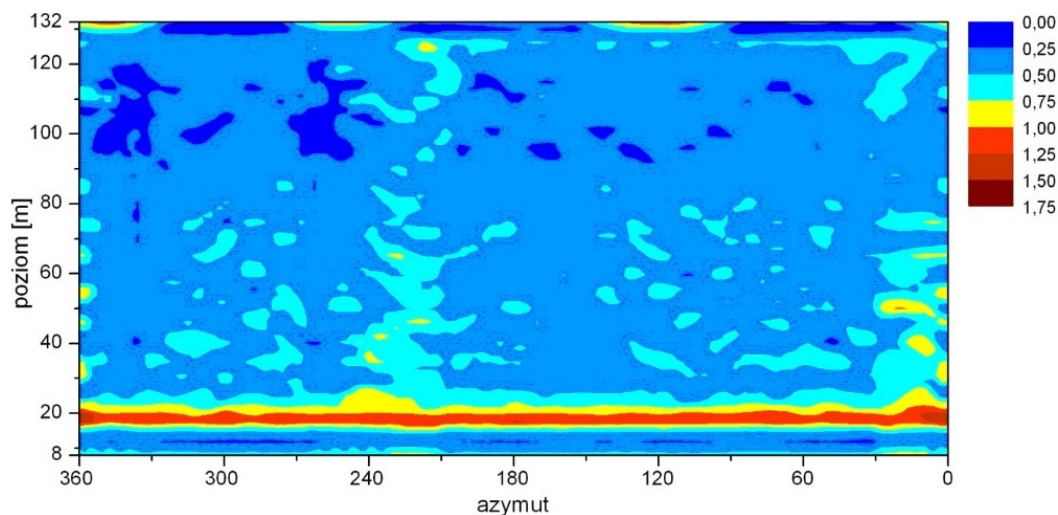


Rys. 3. Schemat statyczny chłodni



Rys. 4. Schemat obciążenia wiatrem w badaniach aerodynamicznych

Sprawdzano warunki stanu granicznej nośności. Przy wszystkich kombinacjach obciążeń wyznaczono obwiednie maksymalne i minimalne miarodajnych, obliczeniowych wartości sił wewnętrznych w powłoce. Znając ilość zbrojenia wbudowanego w powłokę chłodni, wyznaczono rozkłady lokalnych współczynników wyteżenia przekrojów e_i , odpowiednio dla kierunku południkowego ($i = 1$) i kierunku równoleżnikowego ($i = 2$). Jeśli $e_i > 1,0$ to oznacza, że w rozpatrywanym przekroju powłoki chłodni nośność graniczna jest wyczerpana. Na rys. 5 przedstawiono na planie rozwiniętej powłoki chłodni plan warstwiczny maksymalnych wartości współczynnika wyteżenia uwzględniając łącznie trzy analizowane kierunki oddziaływania wiatru. Pokazano występowanie obszarów, w których współczynniki wyteżenia przekraczają dopuszczalną wartość $e_{dop} = 1,0$ (na wykresach oznaczone kolorem czerwonym).



Rys. 5. Plan warstwiczny współczynnika wyteżenia

Przekroczenia wyteżenia na kierunku obwodowym:

- w pasach pomiędzy poziomami 16,0÷22,0 m ($e_{max} = 1,48$),
- lokalnie pomiędzy poziomami 50,0÷52,0 m oraz azymutami 13°÷25° ($e_{max} = 1,03$); z uwagi na nieznaczne przekroczenia w dalszym ciągu ten obszar nie był brany pod uwagę,
- w pasach pomiędzy poziomami 130,8÷132,0 m ($e_{max} = 1,16$).

Na kierunku południkowym przekroczenia wyteżenia występują lokalnie pomiędzy poziomami 16,0÷20,0 m oraz azymutami 275°÷310° ($\epsilon_{max} = 1,16$).

W obszarach tych warunki granicznej nośności przekroju nie są spełnione z uwagi na brak wystarczającej ilości zbrojenia, a tym samym obszary te należy wzmocnić. W tabelicy 1 zestawiono porównawcze ilości brakującego zbrojenia.

Tabela 1. Zestawienie ilości dodatkowego zbrojenie powłoki

Kierunek równoleżnikowy				
poziom [m]	Istniejące zbrojenie poziome zewn. [cm ² /m]	Współczynnik wyteżenia stan aktualny	Dodatkowe zbrojenie poziome zewn. [cm ² /m]	Współczynnik wyteżenia z dodatkowym zbrojeniem
16,0÷18,0	5,24	1,38	2,5	0,96
18,0÷20,0	5,24	1,48	3,0	0,97
20,0÷22,0	5,24	1,17	1,5	0,93
130,8÷132,0	6,39	1,16	1,5	0,91
Kierunek południkowy				
	Istniejące zbrojenie pionowe zewn. [cm ² /m]		Dodatkowe zbrojenie pionowe zewn. [cm ² /m]	
16,0÷18,0	9,01	1,16	2,0	0,96
18,0÷20,0	9,27	1,01	0,5	0,97

4. Wymiarowanie wzmocnienia powłoki chłodni kominowej

Powłoka chłodni kominowej traktowana jest jako powłoka cienka pracująca w złożonym stanie tarczowo-giętnym. Wymiarowanie powłoki wzmocnionej systemem kompozytowym FRCM wykonano na podstawie opracowania *ICCC Evaluation Service AC434 2011* ujmującego ogólne zasady wymiarowania żelbetowych konstrukcji powierzchniowych, wzmocnionych materiałami kompozytowymi na bazie matrycy cementowej.

Przyjęto następujące założenia:

- założenie płaskości przekrojów,
- materiał kompozytowy jest idealnie połączony z powłoką,
- maksymalne odkształcenie betonu w strefie ściskanej jest równe 0,003.

Należy brać pod uwagę następujące przypadki osiągnięcia stanu granicznego:

- zniszczenie betonu w strefie ściskanej,
- osiągnięcie stanu granicznego w zbrojeniu,
- delaminacja materiału FRCM od powierzchni powłoki,
- zniszczenie materiału FRCM na wskutek rozciągania.

Na podstawie szeregu testów laboratoryjnych oraz rozważań teoretycznych sformułowano kilka ograniczeń, które należy brać pod uwagę przy formułowaniu warunków wytrzymałościowych powłoki wzmocnionej materiałem FRCM:

1. Efektywne odkształcenie włókien materiału kompozytowego ϵ_{fe} powinno spełniać zależność:

$$\epsilon_{fe} \leq \epsilon_{fd} = 0,7 \epsilon_{fu} \quad (1)$$

gdzie ϵ_{fu} jest granicznym odkształceniem włókien; natomiast ϵ_{fd} jest odkształceniem dopuszczalnym.

2. Efektywne naprężenie odpowiadające efektywnym odkształceniom należy przyjmować zgodnie z zależnością:

$$f_{fe} = 0,85 E_f \varepsilon_{fe} \quad \text{gdzie } \varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd} \quad (2)$$

gdzie E_f jest modułem sprężystości materiału kompozytowego w stanie granicznym.

3. Wytrzymałość obliczeniowa (projektowa) przekroju zginanej powłoki M_n należy wyznaczać z zależności

$$\phi_m M_n = \phi_m (M_s + M_f) \quad (3)$$

gdzie M_s i M_f są odpowiednio momentem granicznym elementu powłoki zbrojonego wyłącznie zbrojeniem stalowym oraz materiałem kompozytowym; natomiast współczynnik redukcyjny ϕ_m należy wyznaczyć z zależności

$$\phi_m = \begin{cases} 0,90 & \text{dla } \varepsilon_t \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}} & \text{dla } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0,005 \\ 0,65 & \text{dla } \varepsilon_t < \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (3)$$

gdzie ε_t jest maksymalnym odkształceniem siatki gdy stal zbrojeniowa wzmocnionej powłoki jest w stanie granicznej nośności, natomiast ε_{sy} jest granicznym odkształceniem stali zbrojeniowej.

4. Przyrost nośności przekroju powłoki w wyniku wzmocnienia nie powinien być większy niż 50% nośności bez wzmocnienia.

Biorąc pod uwagę powyższe warunki i zalecenia wyznaczono konieczną ilość materiału kompozytowego w systemie Ruredil X Mesh Gold, aby warunki stanu granicznego były spełnione w całym obszarze powłoki chłodni kominowej. Przy parametrach wytrzymałościowych materiału podanych w p. 1 powłoka chłodni spełnia warunki nośności, jeżeli zastosować wzmocnienie zawierające jedną warstwę siatki włókien kompozytu w obszarach podanych w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie zakresów obszarów wzmocnienia powłoki

Lp.	Zakres wys. [m]	Zakres po obwodzie
1	15÷23	na całym obwodzie
2	128÷130*	na całym obwodzie

* Zdecydowano wykonać wzmocnienie pasa chłodni poniżej korony na wys. 128÷130, zamiast wzmocnić samą koronę na wysokości 130,8÷132,0, jak to wskazywały wartości współczynników wyężenia. Obliczenia wykazały, że takie przesunięcie pasa wzmocnienia jest bardziej efektywne

5. Technologia wykonania wzmocnienia

Projekt technologii wykonania wzmocnienia uwzględniał wszystkie zalecenia producenta systemu *Ruredil X Mesh Gold*, a w szczególności:

1. Wzmocnienia należy nakładać pasami obwodowymi o szerokości równej szerokości siatki kompozytowej, tzn. 1,0 m poczynając od najwyższego poziomu. Ze względu na długość obwodu powłoki chłodni konieczne będzie wykonywanie zakładów siatki. Zgodnie z zaleceniami minimalna długość zakładki siatki winna być 0,10 m. Ze względu na trudne warunki wykonywania wzmocnienia proponuje się, aby zastosować zakłady na długość 0,25 m. Na kierunku pionowym zaleca się wykonanie zakładu na szerokość 0,10 m.
2. Z uwagi na wymagany reżim czasowy należy starannie opracować projekt organizacji pracy dostosowany do technologii montażu siatki. Przygotowana zaprawa musi być zużyta w przeciągu 30 min. Należy przewidzieć wykonywanie prac z trzech pomostów roboczych posuwających się po obwodzie chłodni jeden za drugim: z pierwszego pomostu nakładana winna być zaprawa, z drugiego układana powinna być siatka, a z trzeciego ponownie nakładana powinna być zaprawa przykrywająca siatkę.

6. Podsumowanie

Niniejszy referat pokazuje praktyczną możliwość i zasadność zastosowania jako wzmocnienia powłoki chłodni kominowej materiału kompozytowego klasy FRCM – materiału kompozytowego włóknistego na bazie matrycy cementowej. Wykazano, że materiał w przypadku wzmocniania powierzchniowego jest nie tylko w pełni konkurencyjny w materiałami kompozytowymi włóknistymi na bazie matrycy polimerowej, ale również wykazuje lepsze parametry fizyczne i mechaniczne.

Technologia wykonania wzmocnienia jest wymagająca i roboty te mogą być wykonywane przez wyspecjalizowane firmy. Koszty wykonania wzmocnienia metodami tradycyjnymi oraz przy pomocy włóknistych materiałów kompozytowych są porównywalne, przy wyraźnej odmiennej proporcji nakładów finansowych na materiał i robociznę. W przypadku wykonania wzmocnienia materiałami kompozytowymi, koszty materiałów są znacznie wyższe natomiast koszty robocizny znacznie niższa w stosunku do kosztów poniesionych w przypadku stosowania technologii tradycyjnej.

Literatura

1. Jasińko J., Bednarz Ł.: Metody wzmocniania zabytkowych sklepień ceglanych akceptowalne z punktu widzenia doktryny konserwatorskiej. *Wiadomości konserwatorskie*, nr 23/2008.
2. Trapko T.: Fibre Reinforced Cementitious Matrix confined concrete elements. *Materials and Design*, 44/2013
3. Trapko T.: Stress–strain model for FRCM confined concrete elements. *Composites: Part B*, 45/2013.