

ŁUKASZ HOJDYS\*, ZBIGNIEW JANOWSKI\*\*

WZMACNIANIE SKLEPIEŃ MUROWYCH  
SIATKAMI Z WŁÓKIEN SZKLANYCHSTRENGTHENING OF MASONRY VAULTS  
WITH GLASS GRIDS

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych na pięciu sklepieniach walcowych. Sklepienia wykonano z cegły ceramicznej pełnej układanej na zaprawie wapiennej. Grubość sklepień wynosiła 125 mm. Rozpiętość sklepień mierzona w świetle podpór była równa 2000 mm, a strzałka 730 mm. Obciążenie przekazywane było bezpośrednio do górnej powierzchni sklepień w 1/4 ich rozpiętości. Opisano wyniki badań dwóch sklepień niewzmocnionych oraz trzech sklepień wzmocnionych powierzchniowo kompozytem o matrycy mineralnej zbrojonym siatką z włókien szklanych. Badano sklepienia wzmocniane przy powierzchni grzbietowej lub przy powierzchni podniebienia. Określono wpływ zastosowanej metody wzmocnienia na nośność i schemat zniszczenia sklepień.

*Słowa kluczowe: sklepienia, luki, wzmocnianie, konstrukcje murowe, materiały kompozytowe*

## Abstract

This paper presents results of experimental tests on five masonry barrel vaults. The vaults were made of clay bricks and lime mortar. Thickness, internal span and rise of the vaults were 125 mm, 2000 mm and 730 mm respectively. Two of them were tested without strengthening whereas three of them were strengthened with composite material. A glass grid embedded in a cement-based matrix was used. The vaults were strengthened at its extrados or at its intrados. In all tests the load was applied at a quarter span. The main aim of the research was the experimental study of the influence of strengthening on load bearing capacity and failure mechanism of masonry vaults. The influence of strengthening location was also discussed.

*Keywords: vaults, arches, strengthening, masonry, composite materials*

\* Dr inż. – Politechnika Krakowska

\*\* Dr hab. inż. – Politechnika Krakowska

## 1. Wstęp

Sklepienie konstrukcje murowe stosowane były powszechnie w budownictwie do końca XIX w. [1]. Obecnie spotykane są głównie w zabytkowych obiektach sakralnych, świeckich, inżynierskich i militarnych. Znaczna ich część jest nadal użytkowana pomimo długiego okresu eksploatacji. W obiektach historycznych oprócz stanowienia o walorach estetycznych wnętrz – sklepienia i łuki są podstawowym elementem konstrukcji stropów, a łukowe konstrukcje mostowe stanowią istotny element infrastruktury transportowej.

Zachowane sklepienia, kopuły i łuki często narażone są na bardziej niekorzystne oddziaływanie niż przewidziane przez ich budowniczych przed laty. Wiele sklepień jest uszkodzonych w wyniku zmiany sposobu użytkowania obiektu lub na skutek dodatkowych oddziaływań. Konstrukcje te wymagają napraw, rekonstrukcji bądź wzmocnienia, aby móc nadal bezpiecznie funkcjonować [2, 3].

Typowe metody napraw i wzmocnienia sklepionych konstrukcji murowych oparte są na wykorzystaniu tradycyjnych materiałów. Wykonywane są dodatkowe konstrukcje podwieszające lub odciążające ponad istniejącymi sklepieniami bądź łukami. Stosowane jest wzmocnianie powierzchniowe albo przypowierzchniowe z wykorzystaniem na przykład elementów stalowych. W przypadku sklepień i mostów łukowych wymieniany jest materiał zasypowy lub zastępowany betonem. Poza tym montowane są dodatkowe elementy przenoszące siły rozporu lub wzmocniane istniejące ściągi i przypory. Stosowana jest iniekcja i przemurowania, a w przypadku znacznej degradacji, rekonstrukcja.

Obecnie przy wzmocnianiu obiektów budowlanych coraz częściej stosowane są materiały z kompozytów zbrojonych włóknami. Powszechnie znane i stosowane, zwłaszcza przy wzmocnianiu konstrukcji żelbetowych, są kompozyty polimerowe (FRP – Fiber Reinforced Polymer). Obserwowany jest wzrost zainteresowania stosowaniem kompozytów również do wzmocniania konstrukcji murowych.

Przy wzmocnianiu konstrukcji zabytkowej przyjęcie odpowiedniej metody spełniającej zalecenia ICOMOS [4] wymaga od projektanta dużego doświadczenia i dokładnego rozeznania specyfiki analizowanego obiektu [5]. W wielu przypadkach tradycyjne metody wzmocnienia murowanych konstrukcji sklepionych są trudne albo niemożliwe w realizacji, a rozwiązania korzystne z punktu widzenia projektanta-konstruktora nie są akceptowane przez konserwatorów i historyków sztuki. W takich sytuacjach, dopuszczone jest stosowanie w obiektach zabytkowych nowoczesnych technik, których skuteczność wykazana została danymi naukowymi oraz doświadczeniem [6].

Wzmocnianie z wykorzystaniem materiałów kompozytowych, jest procesem mało inwazyjnym, a zwykle niewielkie rozmiary wykonanego w ten sposób wzmocnienia zapewniają dostateczną estetykę. Metody te zapewniają szybką i niewymagającą dużego nakładu pracy aplikację. Mogą być stosowane w wielu miejscach, gdzie dostęp jest utrudniony, a kształt konstrukcji zróżnicowany. W większości zastosowań podczas wzmocniania konstrukcji murowych materiały kompozytowe formowane są bezpośrednio na konstrukcji.

W praktyce inżynierskiej częstym problemem jest ocena wpływu wzmocnienia, realizowanego z zastosowaniem materiałów kompozytowych na nośność i mechanizm zniszczenia sklepień. W literaturze można znaleźć prace dotyczące wpływu wzmocnienia na nośność konstrukcji sklepień, oparte na badaniach w których stosowano głównie kompozyty o matrycach polimerowych [7, 8, 9, 10]. Główną wadą materiałów FRP jest

gwałtowny spadek właściwości mechanicznych kompozytu przy podwyższonych temperaturach. Skutkuje to koniecznością wykonania dodatkowych zabezpieczeń tak, aby projektowane wzmocnienie mogło spełnić wymagania nośności ogniowej R. Na rynku dostępne są także kompozyty na matrycach mineralnych, które lepiej niż materiały FRP znoszą działanie wysokiej temperatury a ponadto są bardziej kompatybilne pod względem fizycznym i chemicznym z podłożem murowym. Pojedyncze badania konstrukcji sklepionych wzmocnianych z zastosowaniem kompozytów z matrycami mineralnymi zbrojonych włóknami węglowymi lub stalowymi przedstawiono w pracach [11, 12].

Ostatnie lata charakteryzują się gwałtownym wzrostem liczby nowych inwestycji budowlanych na terenie Starego Miasta w Krakowie. W związku z gęstą zabudową większość prac budowlanych prowadzona jest w pobliżu bądź w istniejących obiektach zabytkowych. Obiekty te niejednokrotnie adaptowane są do nowych funkcji. Modernizacji towarzyszą prace remontowe, często remonty kapitalne oraz przebudowy [13]. Wprowadzenie innego sposobu użytkowania wiąże się zwykle ze zwiększeniem obciążeń przekazywanych na istniejącą, często mocno nadwerżoną czasem konstrukcję. W krakowskich kamienicach staromiejskich nad najniższymi kondygnacjami powszechnie występują sklepienia. Aby elementy te mogły sprostać nowym wymaganiom, niejednokrotnie wymagają wzmocnienia. Z uwagi na zalety kompozytów należy rozważyć ich zastosowanie do wykonania wzmocnienia sklepień, jako alternatywę dla materiałów tradycyjnych.

W prezentowanej pracy przedstawiono wycinek badań doświadczalnych zrealizowanych w ramach programu badawczego dotyczącego wzmocnienia sklepień materiałami kompozytowymi [14]. Zaprezentowano wyniki testów przeprowadzonych na sklepieniach walcowych wzmocnianych powierzchniowo materiałem kompozytowym zbrojonym włóknami szklanymi. Opisano badania sklepień wzmocnianych przy powierzchni grzbietowej lub przy powierzchni podniebienia. Celem badań było określenie wpływu zastosowanej metody wzmocnienia na nośność i schemat zniszczenia sklepień. Otrzymane wyniki zestawiono z wynikami uzyskanymi z badań sklepień niewzmocnionych.

## 2. Badania doświadczalne

### 2.1. Materiały

Materiały użyte do wykonania elementów badawczych dobrano tak, aby cechami mechanicznymi odpowiadały materiałom występującym w sklepieniach zabytkowych. Do murowania zastosowano współczesną cegłę ceramiczną pełną oraz zaprawę bezzementową na bazie wapna hydraulicznego NHL 2 wyrabianą z gotowej mieszanki.

W celu określenia wybranych właściwości mechanicznych dla materiałów stosowanych w badaniach przeprowadzono serię badań uzupełniających w oparciu o zalecenia aktualnie obowiązujących przepisów.

Średnia wytrzymałość na ściskanie cegieł uzyskana w badaniach wyniosła 24,4 N/mm<sup>2</sup>. Na podstawie prób przeprowadzonych na wszystkich próbkach zaprawy murarskiej pobranych w trakcie realizacji programu badawczego średnia wytrzymałość zaprawy na zginanie i ściskanie wyniosła odpowiednio 1,0 i 1,1 N/mm<sup>2</sup>.

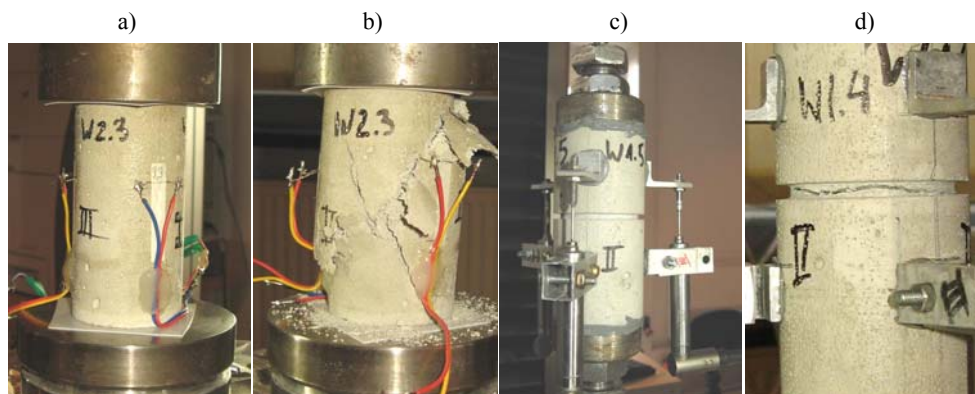
Do wzmocnienia zastosowano system naprawczy przeznaczony do konstrukcji murowych dostarczony przez MAPEI Polska. Sklepienia wzmocniano powierzchniowo siatkami z włókna szklanego, odpornego na środowisko alkaliczne, o nazwie handlowej MapeGrid G220. Matrycę stanowiła zaprawa polimerowo-cem. z dodatkiem rozproszonych włókien - Planitop HDM. Stosowany do wzmocnienia kompozyt był łatwy w aplikacji na zakrzywionej powierzchni sklepienia. Nie wymagał specjalistycznego przygotowania powierzchni ani specjalistycznych narzędzi.

Tabela 1

**Cechy wytrzymałościowe zaprawy Mapei Planitop HDM  
oznaczone na beleczkach lub połówkach beleczek 40x40x160 mm<sup>3</sup>**

Wiek próbek w dniu badania (doby)	Wytrzymałość na zginanie		Wytrzymałość na ściskanie	
	wartość średnia [N/mm <sup>2</sup> ]	współczynnik zmienności [%]	wartość średnia [N/mm <sup>2</sup> ]	współczynnik zmienności [%]
14±1	10,5	19	25,0	11
17±1	11,5	15	26,3	21
28±1	12,5	14	31,8	12

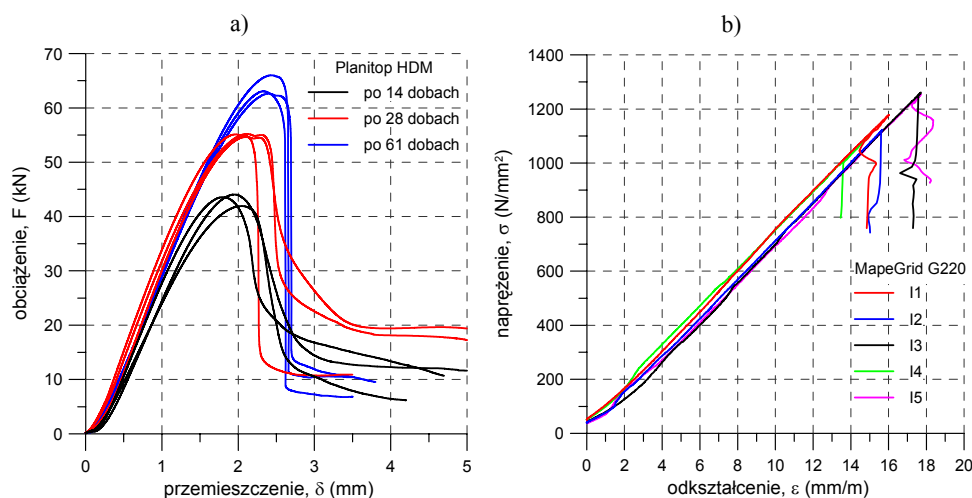
W ramach badań wyznaczono podstawowe cechy mechaniczne dla obu faz zastosowanego materiału kompozytowego. Szczegółowe wyniki badań zostały podane w pracy [14]. Zakres przeprowadzonych badań zilustrowano na rys. 1 i 3. W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań stwardniałej zaprawy Planitop HDM, natomiast na rys. 2a pokazano przykładowe zależności obciążenie - przemieszczenie uzyskane z badań ścisanych próbek walcowych zaprawy.



Rys. 1. Badanie próbek walcowych z zaprawy Mapei Planitop HDM:  
a-b) próba osiowego ściskania, c-d) próba osiowego rozciągania

Fig. 1. Mapei Planitop HDM tests:  
a)–b) compressive strength tests on cylinders, c)–d) tensile strength tests

Sklepienia wzmocniane były pojedynczym pasmem siatki z włókien szklanych MapeGrid G220 o szer. 91,4 cm zawierającym 36 wiązek włókien, ułożonych w rozstawie co ok. 25,4 mm (rys. 3a). Z uwagi na zróżnicowane ukształtowanie włókien siatki MapeGrid G220 w kierunku podłużnym i poprzecznym (rys. 3a), przeprowadzono testy na wiązkach włókien wycinanych z siatki w obu prostopadłych kierunkach. Próbki wycięte wzdłuż pasma siatki, (oznaczone „I”), oraz próbki wycięte w kierunku prostopadłym, (oznaczone „II” – rys. 3) poddano rozciąganiu aż do momentu zerwania. Wyniki badań dla próbek typu „I” przedstawiono w tabeli 2 oraz na rys. 2b.

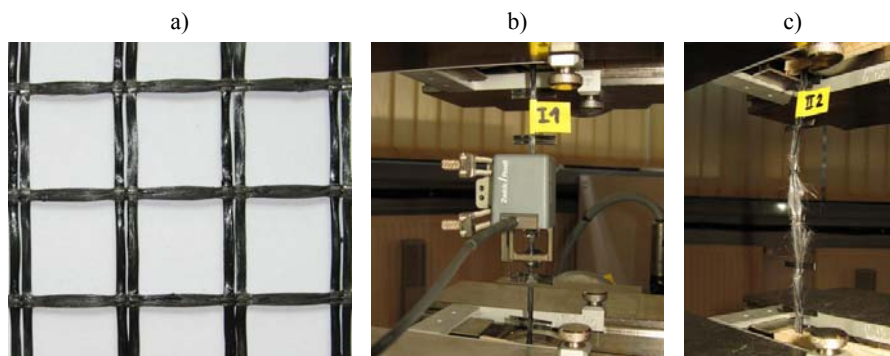


Rys. 2. a) Wyniki badań osiowo ściskanych próbek walcowych o  $\varnothing$  50 mm z zaprawy Planitop HDM – zależności obciążenie-przemieszczenie głowicy maszyny wytrzymałościowej,  
b) Zależności naprężenie-odkształcenie, uzyskane z próby statycznego rozciągania dla pojedynczej wiązki siatki z włókien szklanych MapeGrid G220 - próbki typu „I”

Fig. 2. a) Compressive load-displacement diagrams for Planitop HDM cylinders,  
b) Stress-strain diagrams for glass grid specimens – longitudinal type “I” specimens of MapeGrid G220

Jak pokazano na rys. 2a, w próbie rozciągania zależności naprężenie-odkształcenie dla włókien szklanych są w całym zakresie zbliżone do liniowych. Próbki ulegały kruchemu zniszczeniu, więc podane w tabl. 2 naprężenia przy zerwaniu są tożsame z wytrzymałością na rozciąganie. Średnie wytrzymałości na rozciąganie uzyskane z badań w kierunku wzdłuż długości i w poprzek pasma siatki wyniosły odpowiednio 39,7 i 41,0 kN/m.

W trakcie realizacji programu badawczego prowadzone były także doświadczenia na wzmocnionych i niewzmocnionych elementach próbnych muru. Wyniki tych badań podano w pracach [14, 15].



Rys. 3. Siatka z włókien szklanych MapeGrid G220:  
 a) szczegół (włókna poziome mają przebieg równoległy do długości pasma siatki),  
 b) próbka typu „I” w trakcie badania, c) próbka typu „II” po zniszczeniu

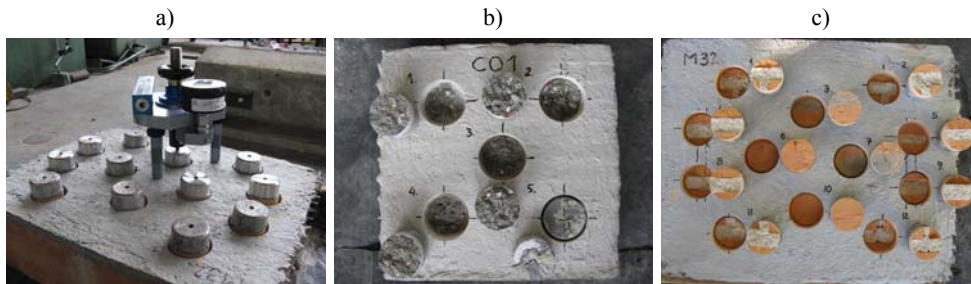
Fig. 3. MapeGrid G220 glass grid:  
 a) detail (horizontal fibres are longitudinal),  
 b) type “I” specimens tensile tests, c) typical failure mode observed for type “II” specimens

Tabela 2

**Właściwości mechaniczne przy statycznym rozciąganiu dla włókien szklanych siatki Mapei MapeGrid G220 uzyskane na próbach typu „I”**

Oznaczenie próbek	Napężenie przy zerwaniu		Odształcenie przy zerwaniu		Moduł sprężystości	
	wartość średnia [N/mm <sup>2</sup> ]	Współcz. zmienności [%]	wartość średnia [mm/m]	Współcz. zmienności [%]	wartość średnia [N/mm <sup>2</sup> ]	Współcz. zmienności [%]
I1-I5	1230	8	16,4	7	65200* 71900**	18 3
* wartość uzyskana dla przedziału odkształceń 0.5-2.5 mm/m ** wartość uzyskana dla przedziału odkształceń 2.5-10.0 mm/m						

Materiały stosowane do wzmocnienia powinny charakteryzować się odpowiednią przyczepnością do podłoża – konstrukcji. W ramach badań materiałowych przewidziano wykonanie pomiaru przyczepności przez odrywanie dla zastosowanego systemu naprawczego. Badanie polegało na bezpośrednim odrywaniu krążków przyklejonych do nawierzonej powierzchni wzmocnienia za pomocą urządzenia Dyna Z16 (rys. 4a). Testowano przyczepność do betonu i przyczepność do muru.



Rys. 4. Pomiar przyczepności przez odrywanie:

a) próbka w trakcie badania, b-c) widok próbek po badaniu – widoczny typ zniszczenia

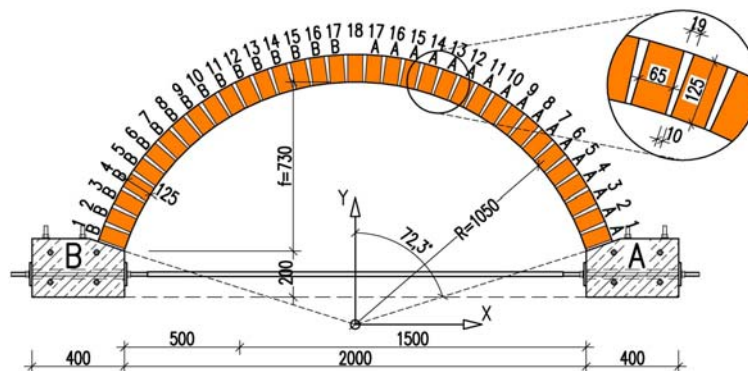
Fig. 4. Mapei Planitop HDM pull-off tests:

a) strengthened concrete failure modes, b)-c) strengthened masonry failure modes

Podczas badania przyczepności przez odrywanie, w większości przypadków dla podłoża betonowego i we wszystkich przypadkach dla muru, następowało zniszczenie kohezyjne w podłożu – rys. 4b i c. Średnia wytrzymałość na odrywanie dla próbek murowych wyniosła 0,4 lub 0,2 N/mm<sup>2</sup>, natomiast dla próbek betonowych 2,4 N/mm<sup>2</sup>.

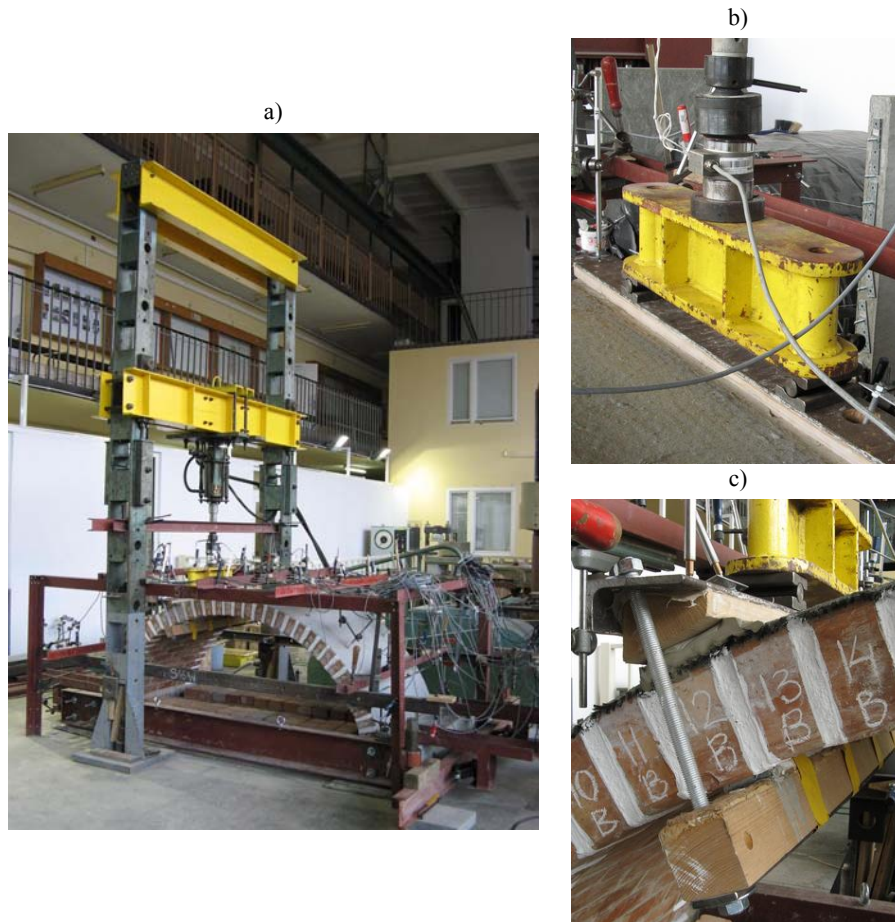
## 2.2. Geometria sklepień. Opis stanowiska badawczego

Elementy badawcze zostały zaprojektowane tak, aby ich geometria zbliżona była do geometrii sklepień spotykanych w istniejących obiektach. Zostały wykonane jako fragmenty sklepień kolebkowych (walcowych). Pasma sklepień murowano na szerokość 1040 mm. Grubość sklepień wynosiła 1/2 cegły (125 mm). Rozpiętość sklepień mierzona w świetle podpór była równa 2000 mm, a strzałka 730 mm. Sklepienie rozpięte na wycinku pobocznicy walca o promieniu 1050 mm. Kąt pomiędzy płaszczyznami podparcia na węzłach wynosił 144,5°. Szczegółowe wymiary badanych elementów podano na rys. 5. Na sklepienie składało się 35 warstw cegieł. Siedemnaście warstw cegieł ułożono od strony każdej z podpór: „A” i „B” oraz dodatkowo jedną warstwę w kluczu sklepienia. Warstwy cegieł zostały ponumerowane zgodnie z oznaczeniami z rys. 5.



Rys. 5. Geometria badanych sklepień wraz z przyjętymi oznaczeniami warstw cegieł

Fig. 5. Geometry of tested specimens with brick layers numbering

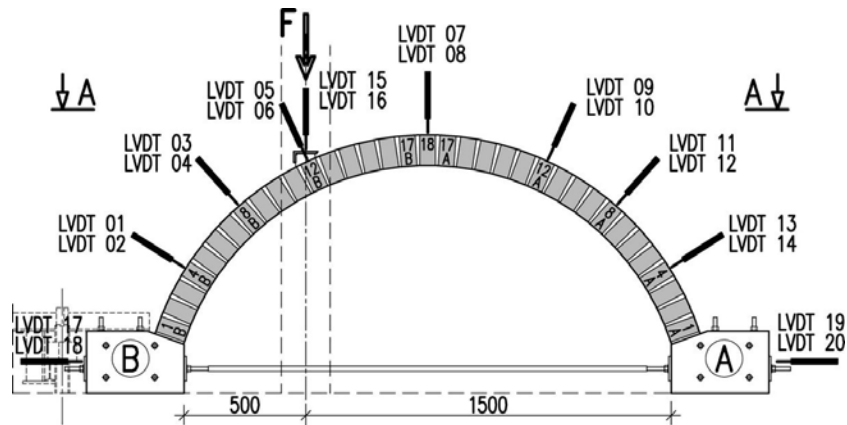


Rys. 6. a) Widok kompletnego stanowiska badawczego,  
b–c) Szczegóły przekazania obciążenia z siłownika na sklepienie

Fig. 6. a) General view of vaults test setup, b)–c) details

Testy przeprowadzono na specjalnie dostosowanym do tych celów stanowisku badawczym. Sklepienie umieszczano pod stalową ramą, umożliwiającą realizację badań pod obciążeniem. Obciążenie pion. przykładano do elementów badawczych w płaszczyźnie ramy za pomocą siłownika hydraulicznego podwieszonego do dolnego rygla ramy. Obciążenie przekazywane było bezpośrednio do górnej powierzchni sklepienia w 1/4 jego rozpiętości. Taka lokalizacja obciążenia pozwala wyznaczyć najmniejsze obciążenie niszczące dla sklepień i łuków kołowych [16]. Zestaw łożysk i trawersów zapewniał równomierne rozłożenie obciążenia na całej szerokości sklepienia w obszarze warstwy cegieł 12B (por. rys. 6b i c). Widok stanowiska badawczego z ustawionym elementem badawczym przedstawiono na rys. 6a.

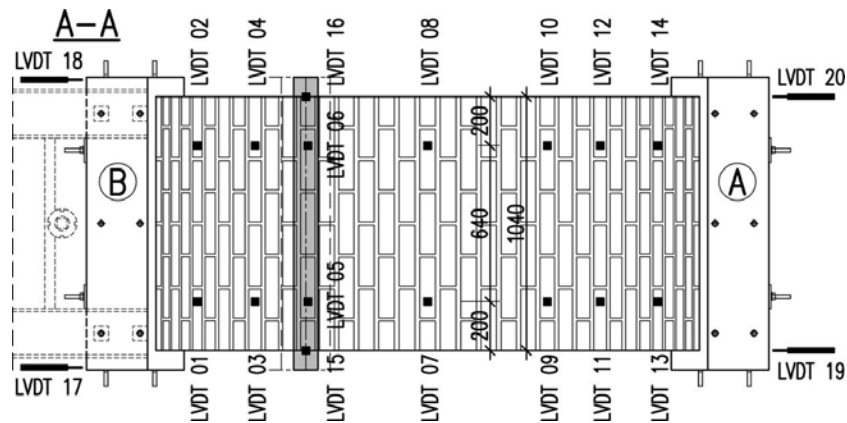




Rys. 7. Rozmieszczenie czujników pomiarowych - widok z przodu

Fig. 7. Displacement transducers arrangement - front view

W trakcie badania obciążenie pionowe z siłownika hydraulicznego przyrastało ze stałą prędkością aż do zniszczenia elementu. Prowadzony był ciągły pomiar siły, przemieszczeń na kierunku radialnym w czternastu punktach pomiarowych zlokalizowanych przy powierzchni grzbietowej sklepienia, przemieszczeń pionowych w miejscu przyłożenia obciążenia, przemieszczeń poziomych podpór i odkształceń ściągów. Do pomiarów stosowano indukcyjne czujniki przemieszczeń oraz tensometryczne czujniki siły. Notowano siłę niszczącą oraz postać zniszczenia sklepienia. Szczegółowy układ i oznaczenia czujników przemieszczeń przedstawiono na rys. 7 i 8.



Rys. 8. Rozmieszczenie czujników pomiarowych - widok A-A (z góry)

Fig. 8. Displacement transducers arrangement - top view

W pracy przedstawiono wyniki badań dwóch sklepień wzmocnionych przy powierzchni grzbietowej (sklepienia S02W i S03W) oraz jednego sklepienia wzmocnionego przy

powierzchni podniebienia (sklepienie S05W). Wyniki badań sklepień wzmocnionych zostały zestawione z wynikami uzyskanymi z badań sklepień niewzmocnionych (elementy S02 i S04). Szczegółowa charakterystyka badanych elementów oraz dokładny opis stanowiska badawczego zostały przedstawione w pracy [14].

### 2.3. Sklepienia niewzmocnione

W pierwszym etapie przeprowadzono badania na dwóch elementach świadkach – sklepieniach niewzmocnionych S02 i S04 (Rys. 9). Wyniki uzyskane z badania sklepień niewzmocnionych posłużyły w analizach jako dane porównawcze dla oceny wpływu wzmocnienia na pracę i nośność sklepień.

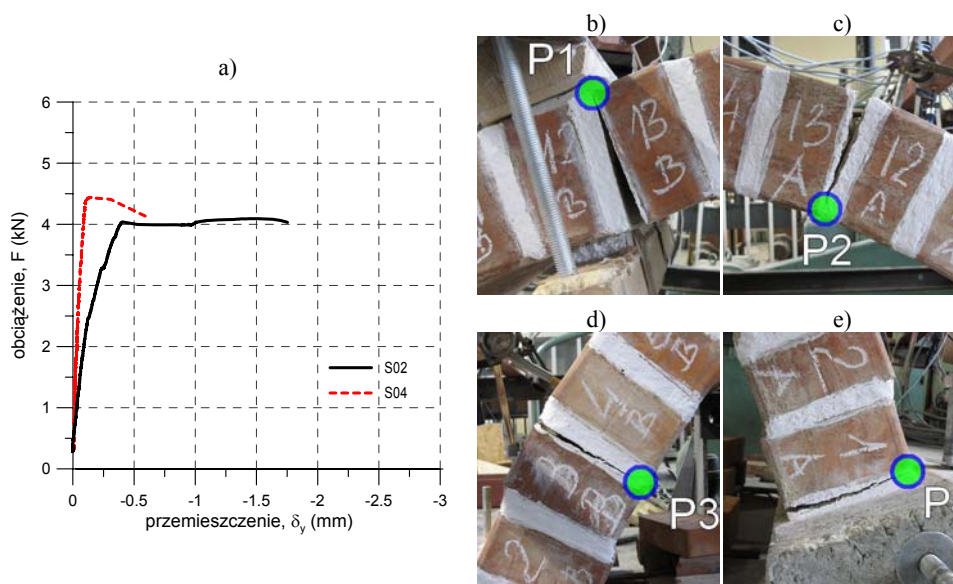


Rys. 9. Element S04:  
a) na stanowisku roboczym, b) przed badaniem, na stanowisku badawczym

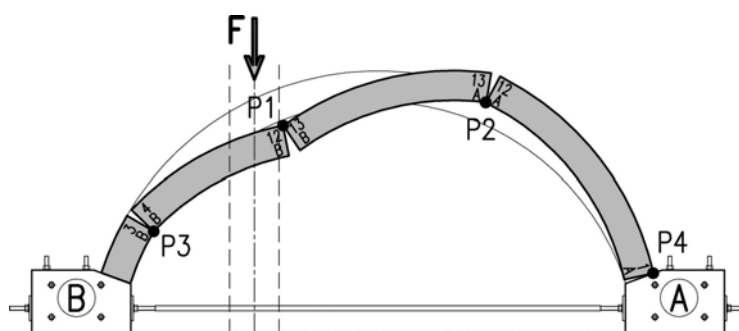
Fig. 9. Specimen S04:  
a) general view, b) before the test

Elementy S02 i S04 obciążone zostały w 1/4 rozpiętości. W trakcie badania wraz ze wzrostem obciążenia powstawały rysy w spoinach wspornych na styku zaprawy z ceglami bądź w zaprawie. W przekrojach zarysowanych przy ściskanej powierzchni sklepienia kształtowały się przeguby – rys. 10b–e, rys. 11.

Obydwa sklepienia uległy zniszczeniu na skutek wykształcenia się czteroprzegubowego mechanizmu. Zniszczenie sklepień nastąpiło w sposób nagły. Maksymalne obciążenie, wyniosło dla sklepienia S02 – 4,09 kN, a dla sklepienia S04 – 4,45 kN. Postać zniszczenia obu elementów była podobna i nie odbiegała od obserwowanych i opisanych w literaturze [17]. Przebieg przemieszczeń pionowych zmierzonych w punkcie obciążenia sklepienia dla obu sklepień niewzmocnionych pokazano na rys. 10a.



Rys. 10. a) Średnie przemieszczenie pionowe w punkcie przyłożenia obciążenia dla sklepień niewzmocnionych, (punkty pomiarowe 15 i 16), b–e) widok ukształtowanych przegubów P1-P4 sklepienia S04 w momencie zniszczenia, (por. rys. 11)  
 Fig. 10. a) Vertical mean displacement at loading point for un-strengthened specimens (measuring points 15 and 16), b)–e) localization of hinges P1 to P4 for specimen S04, (see Fig. 11)



Rys. 11. Postać zniszczenia elementu S04 – szkic

Fig. 11. Failure mechanism of specimen S04

#### 2.4. Sklepienia wzmocnione przy powierzchni grzbietowej

W drugim etapie przeprowadzono badania na elementach wzmocnionych. Sklepienia S02W i S03W zostały wzmocnione na całej powierzchni grzbietowej pojedynczym pasmem siatki z włókien szklanych MapeGrid G220 wklejanym na zaprawie Planitop

HDM – rys. 12. Siatka została doprowadzone do pierwszych warstw cegieł bez kotwienia na podporach.

Sklepienia S02W i S03W wzmocniano jako elementy uszkodzone we wcześniejszych badaniach po uzupełnieniu ubytków zaprawy i wypełnieniu rys o rozwarości powyżej 0,5 mm iniektm. Szczegółowy opis uszkodzeń przedstawiono w pracach [14, 15].

Badania sklepień wzmocnionych przeprowadzono po 14 dobach od dnia wykonania wzmocnienia. Sklepienia obciążone zostały obciążeniem pionowym przyłożonym w 1/4 rozpiętości.



Rys. 12. Widok elementu S02W:  
a) przed wzmocnieniem, po wypełnieniu rys iniektm, b) po wzmocnieniu

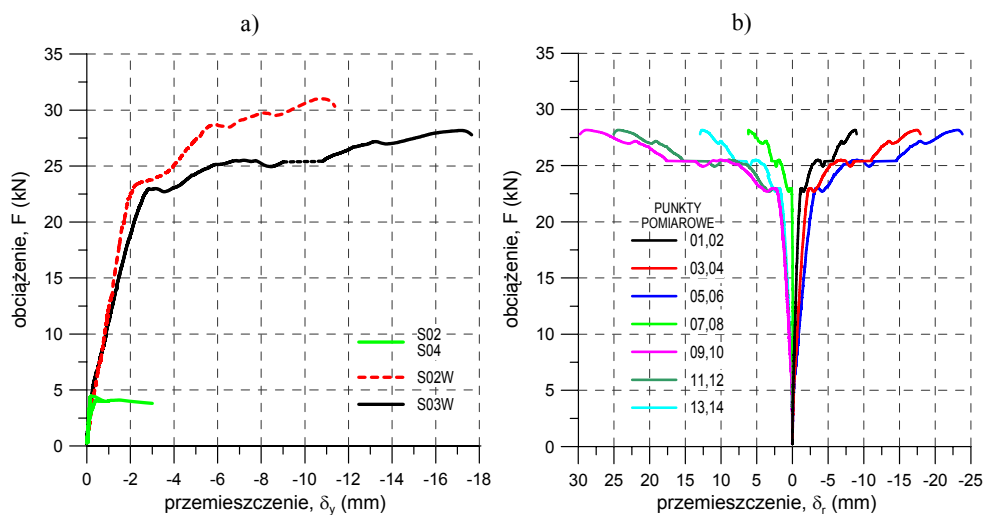
Fig. 12. General view of specimen S02W:  
a) before, b) and after strengthening



Rys. 13. Uszkodzenia elementu S03W:  
a) zarysowanie w spoinach wspornych w strefie powstania rys we wzmocnieniu – w trakcie badania,  
b) pęknięcia w matrycy wzmocnienia, widok powierzchni grzbietowej – w trakcie badania

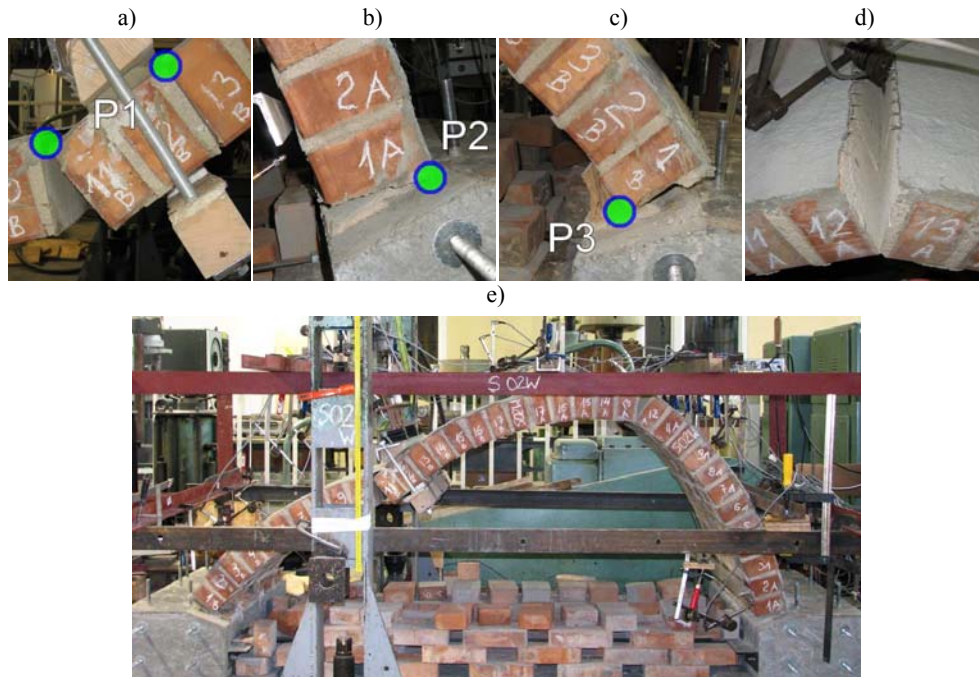
Fig. 13. Specimen S03W cracks development details:  
a) cracks in joints, b) cracks in strengthening layer

Obserwacje poczynione w trakcie badania obu sklepiń wzmocnionych przy powierzchni grzbietowej były podobne. W początkowej fazie obciążania przemieszczenia narastały w przybliżeniu liniowo (rys. 14). Pierwsza rysa pojawiała się przy dolnej powierzchni sklepienia pod siłownikiem przy obciążeniu około 7 kN. Zarysowanie przebiegało przy warstwie cegieł 12B, na styku pomiędzy warstwą zaprawy i ceglami. Przy obciążeniu ok. 23 kN następowało pierwsze pęknięcie w matrycy wzmocnienia w okolicy warstwy cegieł 13A. Zauważalny był znaczny przyrost przemieszczeń przy niewielkim przyroście obciążenia. Dalszy wzrost obciążenia skutkowałam powstawaniem kolejnych rys przy powierzchni grzbietowej (we wzmocnieniu) w części sklepienia od strony podpory „A” (rys. 13) oraz rozwieraniem się istniejących rys w spoinach wspornych oraz w matrycy kompozytu. Zarysowania w warstwie kompozytu występowały w liniach spoin wspornych (rys. 13). Pojawianie się kolejnych pęknięć we wzmocnieniu skutkowałam wyraźną utratą sztywności sklepiń – rys. 14. W końcowym etapie eksperymentów obserwowano pojawienie się rys przy węzłowiach.



Rys. 14. a) Średnie przemieszczenia pionowe mierzone w miejscu przyłożenia obciążenia (punkty pomiarowe 15 i 16) – zależności uzyskane z badania sklepiń wzmocnionych przy powierzchni grzbietowej S02W i S03W w porównaniu z zależnościami dla sklepiń niewzmocnionych S02 i S04;  
b) Średnie przemieszczenia radialne w punktach pomiarowych 01-14 dla elementu S03W

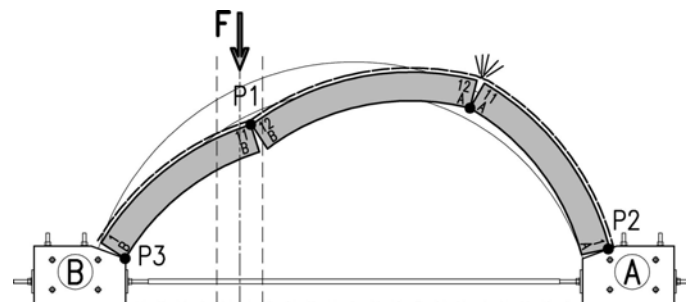
Fig. 14. a) Vertical mean displacement at loading point (measuring points 15 and 16) for specimens strengthened at their extrados S02W and S03W and for unstrengthened specimens S02 and S04;  
b) Vertical mean displacement at measuring points 01 to 14 for specimen S03W



Rys. 15. Uszkodzenia elementu S02W:  
 a) lokalizacja przegubu P1, b) lokalizacja przegubu P2 – po zniszczeniu,  
 c) lokalizacja przegubu P3 – widoczne wtórne uszkodzenia powstałe po zniszczeniu,  
 d) przekrój, w którym nastąpiło zerwanie włókien e) postać zniszczenia elementu S02W

Fig. 15. Failure mechanisms of specimen S02W:  
 a) hinge P1 localization, b) hinge P2 localization, c) hinge P3 localization,  
 d) ruptured fibres, e) failure mode of specimen S02W

Po osiągnięciu obciążenia 31,0 kN dla elementu S02W i 28,2 kN dla elementu S03W sklepienia uległy zniszczeniu. Następowало zerwanie włókien szklanych w przekroju przy warstwie cegieł 12A, po czym sklepienia przekształcały się w 4-przegubowy mechanizm.



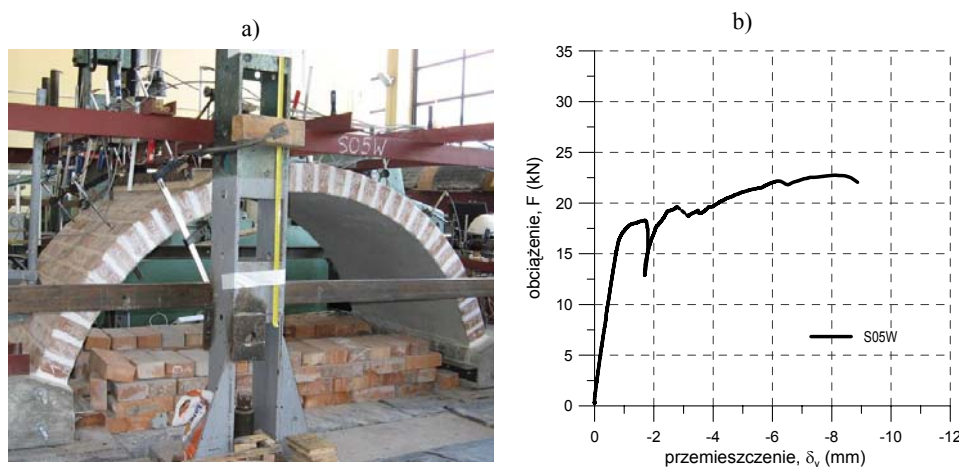
Rys. 16. Schemat zniszczenia elementu S03W – szkic

Fig. 16. Failure mechanism of specimen S03W

Widok ukształtowanych przegubów oraz ich lokalizację dla sklepienia S02W przedstawiono na rysunku 15. Dla obu sklepień przeguby P2 i P3 ukształtowały się w przekrojach przypodporowych, przy węzłowie „A” oraz przy węzłowie „B”. Przegub P1 zlokalizowany był przy powierzchni grzbietowej w miejscu przyłożenia obciążenia, natomiast czwarty przegub zlokalizowany był przy powierzchni podniebienia w przekroju, w którym nastąpiło zerwanie włókien. Postać zniszczenia sklepienia S03W wzmocnionego przy powierzchni grzbietowej przedstawiono na rys. 16.

### 2.5. Sklepienie wzmocnione przy powierzchni podniebienia

Wzmocnienie sklepienia S05W, podobnie jak dla sklepień S02W i S03W, realizowano na sklepieniu uszkodzonym we wcześniejszych badaniach po wypełnieniu pęknięć iniektem.



Rys. 17. a) Element S05W na stanowisku badawczym;  
b) Średnie przemieszczenia pionowe sklepienia wzmocnionego przy powierzchni podniebienia (element S05W) mierzone w miejscu przyłożenia obciążenia (punkty pomiarowe 15 i 16)

Fig. 17. a) Specimen S05W test setup;  
b) Vertical mean displacement at loading point for specimen strengthened at its intrados (S05W) – measuring points 15 and 16

Pojedyncze pasmo siatki z włókien szklanych MapeGrid G220 wklejono na zaprawie Planitop HDM na całej długości łuku od strony podniebienia. Badanie przeprowadzono po 14 dobach od wzmocnienia pod obciążeniem pionowym przykładanym w 1/4 rozpiętości. Widok sklepienia S05W na stanowisku badawczym przedstawiono na rys. 17a.

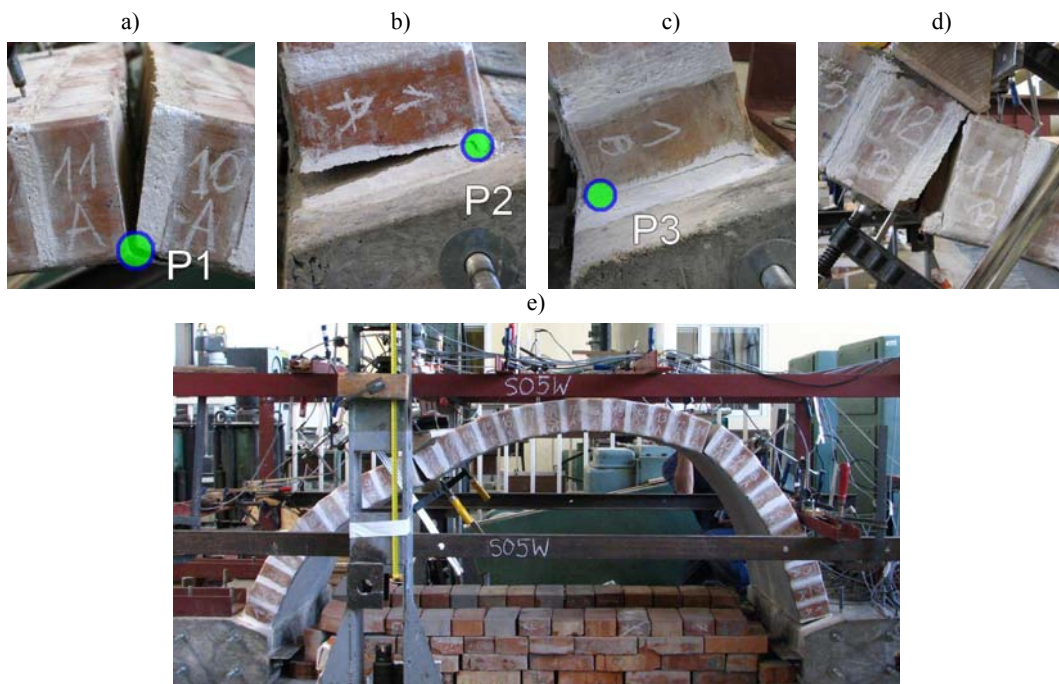


Rys. 18. Uszkodzenia elementu S05W:

- a) zarysowanie we wzmocnieniu, widok powierzchni podniebienia pod siłownikiem - w trakcie badania,  
b) miejsce zerwania włókien

Fig. 18. Specimen S05W cracks development details:

- a) cracks at intrados in strengthening layer, b) failure mechanism – fibres rupture



Rys. 19. Uszkodzenia elementu S05W:

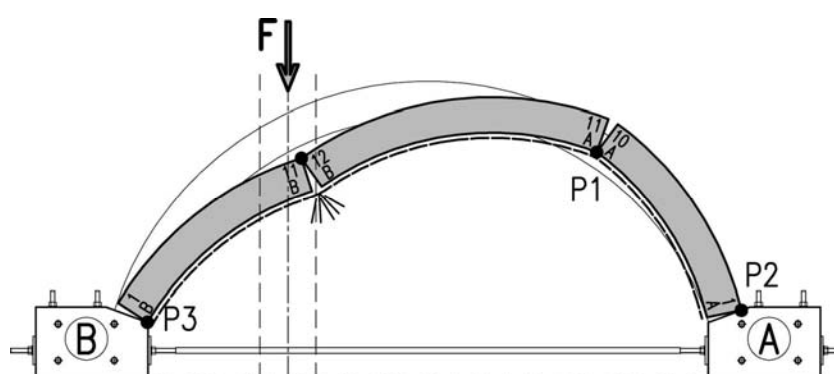
- a-c) lokalizacja przegubów P1-P3, d) przekrój, w którym nastąpiło zniszczenie (przez zerwanie włókien),  
e) postać zniszczenia elementu S05W

Fig. 19. Failure mechanisms of specimen S05W:

- a)-c) hinges P1-P3 localization, d) ruptured fibres, e) failure mode of specimen S05W



Pierwszą rysę zaobserwowano przy obciążeniu około 9,7 kN. Zlokalizowana była przy powierzchni grzbietowej, na styku spoiny wspornej i cegieł pomiędzy warstwami cegieł 10A i 11A. Kolejne rysy pojawiły się w przekroju przy węzłowie „A” od strony podniebienia oraz w matrycy wzmocnienia pod punktem przyłożenia obciążenia, na wysokości spoin wspornych, pomiędzy warstwami cegieł 11B i 14B – rys. 18a. Dalszemu wzrostowi obciąż. towarzyszyło rozwieranie się istniejących rys. W końcowej fazie badania pojawiły się rysy przy powierzchni grzbietowej w okolicy warstw cegieł 3B, 6A oraz przy węzłowie „B”.



Rys. 20. Schemat zniszczenia elementu S05W – szkic

Fig. 20. Failure mechanism of specimen S05W

Sklepienie uległo gwałtownemu zniszczeniu, na skutek zerwania włókien w przekroju 11B/12B – rys. 18b, i 19d. Konstrukcja przekształciła się w mechanizm po wykształceniu się przegubów P2 i P3 we wcześniej zarysowanych przekrojach przy podporowych, przegubu P1 w przekroju 10A/11A oraz przegubu w przekroju, w którym nastąpiło zerwanie włókien – rys. 19. Maksymalne obciążenie wyniosło 22,8 kN. Postać zniszczenia sklepienia pokazano na rys. 19e, natomiast szkic schematu zniszczenia na rys. 20. Wykres zależności obciążenie – przemieszczenie pionowe przedstawiono na rys. 17b.

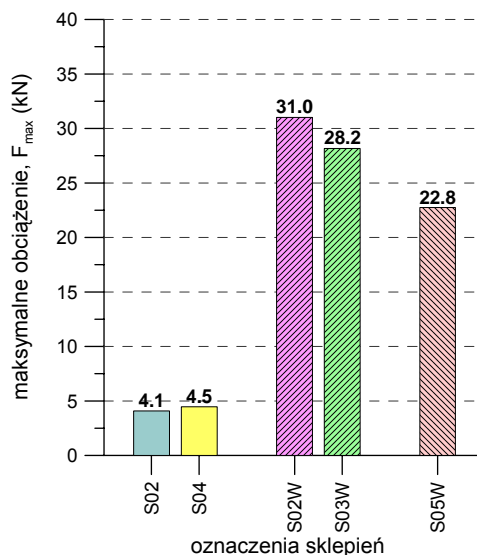
### 3. Podsumowanie wyników badań

Wyniki badań wskazują, że obecność powierzchniowego wzmocnienia, wykonanego z siatek z włókien szklanych wklejanych na matrycy mineralnej, zwiększa nośność sklepień. Podsumowanie wyników badań, pod kątem poziomego obciążenia niszczącego, przedstawiono na rys. 21.

Sklepienia wzmocnione, niezależnie od lokalizacji wzmocnienia ulegały zniszczeniu przy kilkukrotnie większym obciążeniu niż sklepienia niewzmocnione. Powyższy wniosek sformułowano przy obciążeniu przyłożonym bezpośrednio do powierzchni grzbietowej w 1/4 rozpiętości. Zastosowane metody wzmocnienia okazały się skuteczne, pomimo istnienia w konstrukcjach wstępnych uszkodzeń.

Poziome obciążenia niszczące był uzależniony od lokalizacji wzmocnienia. Sklepienia wzmocniane od strony grzbietowej, przy obciążeniu przyłożonym w 1/4 rozpiętości, charakteryzowały się większą nośnością niż sklepienie wzmocnione od strony podniebienia. Średnia siła niszcząca sklepienia S02W i S03W wyniosła 29,6 kN, podczas gdy sklepienie S05W uległo zniszczeniu przy obciążeniu 22,8 kN. Wszystkie sklepienia wzmocniano tym samym systemem naprawczym Mapei – pojedynczą siatką z włókien szklanych MapeGrid G220 wklejaną w zaprawę Planitop HDM.

Sklepienia bez wzmocnienia (S02, S04) niszczyły się w sposób niesygnalizowany, na skutek przekształcenia konstrukcji w czteroprzegubowy mechanizm. Średnie obciążenie niszczące sklepienia niewzmocnione wyniosło 4,3 kN.



Rys. 21. Wyniki badań – porównanie poziomu obciążenia niszczącego

Fig. 21. Collapse loads for tested specimens

Obydwa sklepienia wzmocniane na całej powierzchni grzbietowej niszczyły się według podobnego schematu. W trakcie badania obecność wzmocnienia skutecznie zapobiegała powstawaniu przegubów przy powierzchni podniebienia na odcinku pomiędzy przekrojami przypodporowymi. Przed zniszczeniem obserwowano pojawienie się rys od strony podniebienia w miejscu przyłożenia obciążenia oraz w spoinach wspornych na węzłach. Zniszczenie było poprzedzone pojawieniem się wielu rys w matrycy kompozytu, w obszarze naprężeń rozciągających powłokę wzmocnienia. Elementy S02W i S03W zniszczyły się na skutek przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie we włóknach wzmocnienia na wysokości spoin wspornych przylegających do warstwy cegieł 12A. Po zerwaniu włókien sklepienia zamieniały się w mechanizmy i ulegały zawaleniu.

Niewielki stopień zbrojenia sklepienia S05W i odpowiednio mała krzywizna geometrii sklepienia spowodowały, że naprężenia powodujące odrywanie wzmocnienia od sklepienia, nie przekroczyły przyczepności wzmocnienia do muru. Obecność wzmocnienia od strony

podniebienia zapobiegła w trakcie badania powstaniu przegubu od strony grzbietowej na odcinku pomiędzy wezłowiami. Sklepienie zniszczyło się w sposób nagły na skutek przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie we włóknach w przekroju zlokalizowanym pod miejscem przyłożenia obciążenia.

Z zależności obciążenie – przemieszczenie przedstawionych na rys. 10a, 14 i 17b wynika, że sklepienia wzmocnione charakteryzowały się większą zdolnością do deformacji pod obciążeniem niż sklepienia niewzmocnione. Maksymalne obciążenie sklepień bez wzmocnienia osiągnięto przy przemieszczeniu 0,5-1,0 mm. Dla sklepień wzmocnionych przemieszczenie pionowe w punkcie obciążenia dochodziło do kilkunastu milimetrów.

Pomimo nagłego, kruchego zerwania włókien w trakcie badania sklepień wzmocnionych moment zniszczenia był sygnalizowany. Pojawiały się rysy oraz pęknięcia w matrycy kompozytu wzmocnienia. W przypadku sklepień niewzmocnionych, przed zniszczeniem pojawiały się rysy o niewielkiej rozwarości, w poziomie spoin wspornych pod miejscem przyłożenia obciążenia. Dostrzeżenie ich wymagało dokładnej obserwacji spoin na powierzchniach bocznych sklepienia. Zniszczenie sklepień bez wzmocnienia następowało gwałtownie, bez wyraźnych oznak przeciążenia konstrukcji.

#### 4. Wnioski

Wzmocnienie elementów sklepionych realizowane powierzchniowo przy zastosowaniu materiałów kompozytowych zwiększa ich nośność głównie na skutek zwiększenia nośności przekrojów poddanych działaniu sił ściskających na znacznych mimośrodkach. Ograniczone zostaje rozwieranie się rys i pęknięć, nie kształtują się przeguby, co zapobiega przekształcaniu się konstrukcji w mechanizm. W badaniach obserwowano wyższe nośności dla sklepień wzmocnianych przy powierzchni grzbietowej. Można stwierdzić, że decyzja czy wzmocnienie zlokalizowane powinno być od strony grzbietowej czy od strony podniebienia, związana powinna być głównie z dostępnością tych powierzchni, ich stanem zachowania i możliwościami technologicznymi. W badaniach wzmocnienie realizowano w sposób ciągły na całej długości sklepień.

Należy zauważyć, że stosowane lokalnie wzmocnienie powierzchniowe, w miejscach istnienia uszkodzeń, nie zabezpiecza sklepienia przed zniszczeniem na skutek przekształcenia konstrukcji w mechanizm [8, 10]. Nowe uszkodzenia lub zniszczenie mogą zostać spowodowane tuż poza obszarem aplikacji wzmocnienia. Poza obserwowanym w badaniach zniszczeniem na skutek przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie kompozytu w literaturze opisane są inne schematy zniszczenia sklepień wzmocnionych kompozytami [7, 8, 9, 10, 14]. Postać zniszczenia sklepień wzmocnionych zależy w dużej mierze od ich geometrii oraz cech wytrzymałościowych poszczególnych materiałów.

Stosowane w badaniach systemy naprawcze, wykorzystujące materiały kompozytowe o matrycach mineralnych, mogą znaleźć zastosowanie przy powierzchniowym wzmocnianiu konstrukcji murowych w istniejących obiektach zabytkowych. Z uwagi na wykazaną w badaniach doświadczalnych skuteczność tych materiałów do wzmocniania sklepień, stanowią one alternatywę dla technik i materiałów stosowanych tradycyjnie. Systemy te, w zależności od stanu zachowania elementów konstrukcyjnych w obiekcie, zakresu i przyczyn uszkodzeń, należy stosować wspólnie z innymi metodami naprawczymi (np. iniekcją). Należy zaznaczyć, że wszelkie analizy i dobór wzmocnienia powinny być

poprzedzone szczegółową inwentaryzacją konstrukcyjną, zawierającą dokładny opis istniejących w konstrukcji uszkodzeń oraz analizę przyczyn ich powstania. W praktycznych zastosowaniach, z uwagi na często unikalny charakter obiektów historycznych, niezbędne mogą okazać się dodatkowe badania materiałowe, a wszelkie prace naprawcze powinny zostać podjęte po usunięciu przyczyn powstania uszkodzeń.

**Autorzy dziękują firmie MAPEI Polska Sp. z o.o.  
za bezpłatne dostarczenie materiałów do wzmocnienia sklepień.**

#### Literatura

- [1] B o r u s i e w i c z W., *Budownictwo murowane w Polsce*, 1985, PWN, Warszawa-Kraków.
- [2] J a n o w s k i Z., H o j d y s Ł., K r a j e w s k i P., *Sklepienia zabytkowe – klasyfikacja, ocena stanu technicznego i nośności, naprawy i wzmocnienia*, XXII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, 2007, s. 197-239.
- [3] J a n o w s k i Z., H o j d y s Ł., K r a j e w s k i P., *Analiza oraz naprawa i rekonstrukcja sklepień w obiektach historycznych*, XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane, 2007, s. 251-260.
- [4] ICOMOS. Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage, International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage, 2003.
- [5] J a n o w s k i Z., *Zasady diagnostyki konstrukcji murowanych w pracy rzeczoznawcy budowlanego*, II Konferencja Naukowo-Techniczna Warsztat pracy rzeczoznawcy budowlanego, 1996, s. 143-160.
- [6] Karta Wenecka. Postanowienia i Uchwały II Międz. Kongresu Arch. i Techników Zabytków w Wenecji w 1964 r. Vademecum Konserwatorów Zabytków – Międz. Normy Ochrony Dziedzictwa Kultury, Biuletyn ICOMOS, Warszawa 1996.
- [7] V a l l u z z i M. R., V a l d e m a r c a M., M o d e n a C., *Behavior of brick masonry vaults strengthened by FRP laminates*, Journal of Composites for Construction, 2001, Vol. 5, No. 3, s.163-169.
- [8] F o r a b o s c h i P., *Strengthening of masonry arches with Fiber-Reinforced Polymer strips*, Journal of Composites for Construction, 2004, Vol. 8, No. 3, s. 191-202.
- [9] B r i c c o l i b a t i S., R o v e r o S., T o n i e t t i U., *Experimental analysis on scale models of CFRP reinforced arches*, 3rd National Congress Mechanics of Masonry Structures Strengthened with Composite Materials “MuRiCo 3”, 2009, s. 140-145.
- [10] O l i v e i r a D., B a s i l i o I., L o u r e n c o P., *Experimental behavior of frp strengthened masonry arches*, Journal of Composites for Construction, 2010, Vol. 14, No. 3, s. 312-322.
- [11] C a s t o r i G., B o r r i A., E b a u g h S., C a s a d e i P., *Strengthening masonry arches with composites*, Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering “CICE 2006”, 2006.
- [12] B e d n a r z Ł., *Praca statyczna zabytkowych, zakrzywionych konstrukcji ceglanych, poddanych zabiegom naprawy i wzmocnienia*, 2008, Praca Doktorska, Politechnika Wroclawska.

- [13] J a n o w s k i Z., J a n o w s k i M., *Problemy projektowe związane z adaptacją budynków zabytkowych na cele użyteczności publicznej*, Czasopismo Techniczne, 2009, Vol. 2-B, s. 139-150.
- [14] H o j d y s Ł., *Wpływ wzmocnienia materiałami kompozytowymi sklepień murowych na ich nośność*, Praca Doktorska, Politechnika Krakowska, 2010.
- [15] K r a j e w s k i P., *Analiza wpływu materiału zasypowego na nośność sklepień murowych*, 2010, Praca Doktorska, Politechnika Krakowska, 2010.
- [16] H e y m a n J., *The masonry arch*, 1982, Ellis Horwood Limited.
- [17] P a g e J., *Masonry arch bridges*, 1993, HMSO.