

Jerzy Jasieńko, Włodzimierz Majchrzak, Piotr Rapp, Grzegorz Słowek

# Wzmocnienie konstrukcji sklepienia nad nawą kościoła Przemienienia Pańskiego w Poznaniu (cz. II)

## 1. Wstęp

W pierwszej części artykułu opublikowanej w „Wiadomościach Konserwatorskich” nr 13/2003 przedstawiono opis i analizę stanu technicznego, analizę statyczno-wytrzymałościową i projekt wzmocnienia zagrożonej konstrukcji sklepienia nad nawą kościoła Przemienienia Pańskiego w Poznaniu [4, 5, 7-10]. Z uwagi na polichromie występujące na podniebieniu sklepienia, zaprojektowano wzmocnienie sklepienia przez jego podwieszenie i zespolenie z żelbetową cienkościenną powłoką wykonaną w technologii betonu natryskowego (torkretu) na grzbietowej powierzchni sklepienia. Wyboru tej technologii dokonano ze względów technicznych, z uwagi na jej doskonałą efektywność konstrukcyjną oraz ze względów konserwatorskich z uwagi na zachowanie pierwotnego kształtu sklepienia po stronie grzbietowej oraz ochronę polichromii przed zawilgoceniem i uszkodzeniami mechanicznymi. Projektowane prace realizowano w okresie od września do grudnia 2003. Z uwagi na specjalistyczny charakter prac w pierwszej kolejności przedstawiono technologię betonu natryskowego (torkretu), a następnie szczegółowy opis i ilustracje wykonanych prac.

Przyjęta technologia wzmocnienia, jakkolwiek dyskusyjna z punktu widzenia konserwatorskiego, jest właściwie w chwili obecnej tak naprawdę jedyną skuteczną dla sklepień znacznych rozpiętości, będących w stanie przedawaryjnym. W dyspozycji pozostają jeszcze technologie związane z podwieszeniem sklepień do zaprojektowanych konstrukcji nośnych z drewna klejonego lub przestrzennych konstrukcji stalowych.

Przy znacznych imperfekcjach powłoki i żeber powstaje tu jednak problem właściwego zakotwie-

nia wieszaków, w trudnych do rozpoznania przekrojach zdeformowanych sklepień. Podwieszenia mają ponadto charakter punktowy, a w wyniku zjawisk opóźnionych w przekrojach wokół podwieszeń można się spodziewać znacznych koncentracji naprężeń ścinających.

Przy projektowaniu takich wzmocnień problemem projektowym pozostaje również ustalenie modelu fizycznego pracy konstrukcji po wzmocnieniu. Potrzebna jest również przestrzeń do wprowadzenia nowych konstrukcji.

Inną metodą, często spektakularnie stosowaną bez wystarczającej liczby informacji pochodzących z programów badawczych, jest naklejanie na stropie sklepienia taśm i mat węglowych CFRP. Metoda ta jest jednak w ogóle nieprzydatna przy występowaniu, w skrajnych warstwach podniebienia sklepień, znacznych naprężeń ściskających przechodzących w naprężenia rozciągające (stan awaryjny).

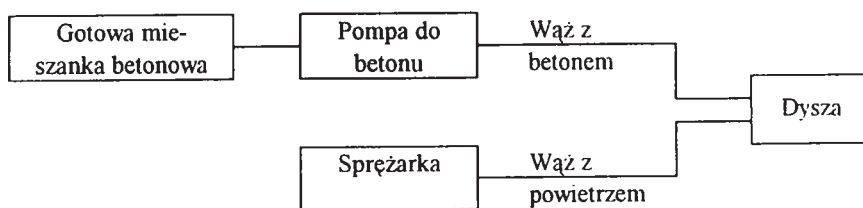
W podmiotowym przypadku przyjęto metodę nanoszenia mieszanki metodą suchą z uwagi na polichromie oraz zjawiska dyfuzyjne (fizyki budowli) mniej istotne wobec znacznej kubatury wnętrza.

## 2. Technologia betonu natryskowego (torkretu)

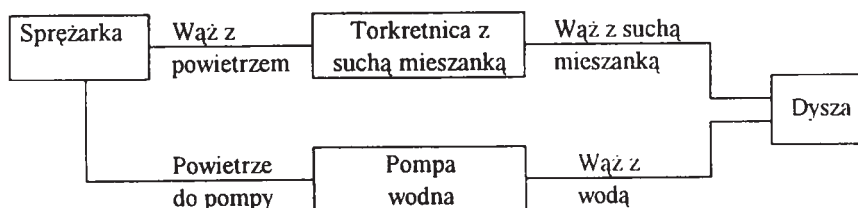
Metoda ta polega na narzuceniu (natryśnięciu) mieszanki betonowej na naprawiane podłoże, jakim w tym przypadku jest grzbietowa powierzchnia sklepienia. Czynność ta nazywana jest w terminologii technicznej *torkretowaniem*. Efekt ten można uzyskać stosując dwie różne metody realizacji betonu natryskowego, mianowicie *metodę mokrą* lub *metodę suchą* [1, 3].

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

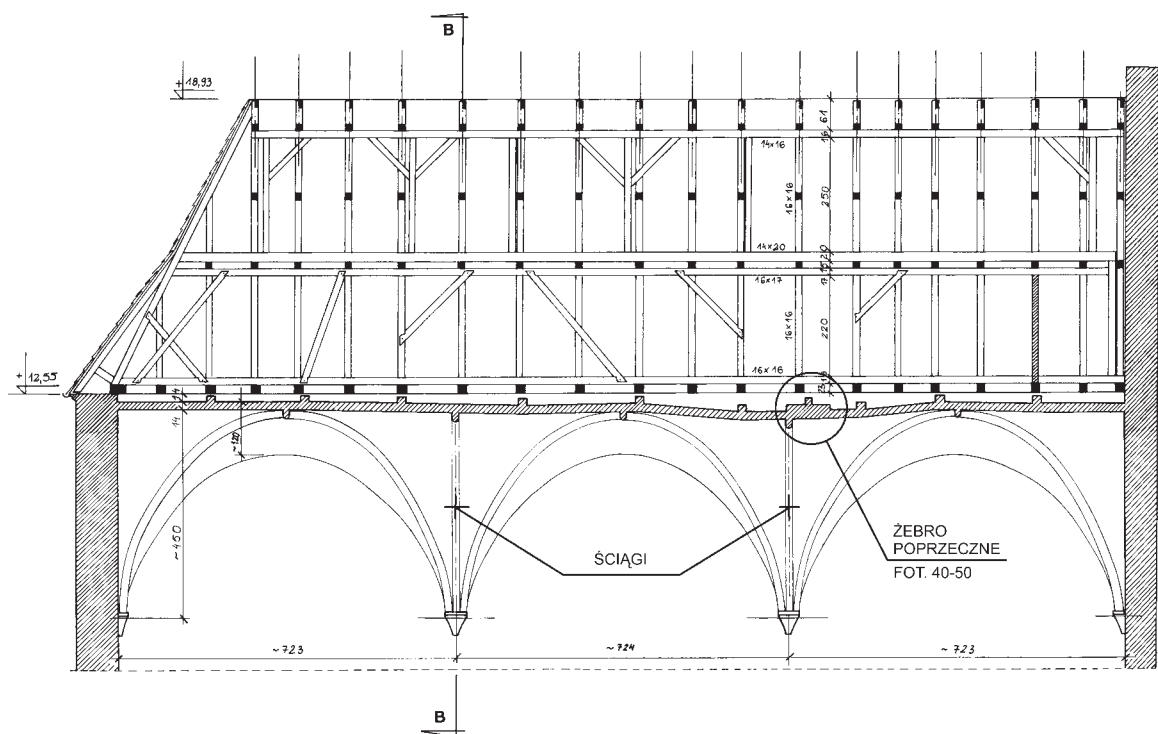
## METODA MOKRA



## METODA SUCHA



Rys. 1. Schematy technologiczne realizacji betonu natryskowego



Rys. 2. Przekrój podłużny przez sklepienia i więźbę dachową

**Metoda mokra** (metoda mokrej mieszanki) jest procesem sprowadzającym się do tradycyjnego wykonania mieszanki betonowej, a następnie jej hydraulicznego przetransportowania do dyszy wylotowej, skąd pneumatycznie i w sposób ciągły jest natryskiwana na miejsce wbudowania.

**Metoda sucha** (metoda suchej mieszanki) jest techniką, w której sucha mieszanka cementu i kruszywa jest podawana do specjalnego urządzenia, tzw. torkretnicy, skąd strumieniem sprężonego po-

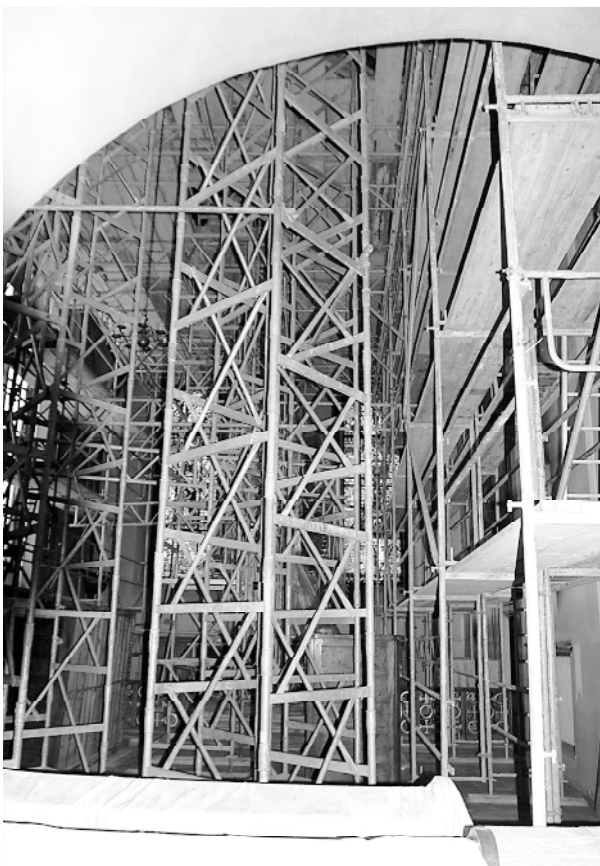
wietrza przesyłana jest przewodami elastycznymi do dyszy natryskowej (wylotowej). Do dyszy doprowadzona jest woda oraz domieszki ciekłe w postaci rozpylonej w celu nawilżenia mieszanki. Zwraca się uwagę, że w metodzie suchej połączenie suchej mieszanki z wodą zarobową następuje w dyszy natryskowej oraz na drodze pomiędzy dyszą a miejscem natryśnięcia mieszanki betonowej. Odcinek ten ma zwykle długość od 0,6 do 1,8 m, a składniki mieszanki betonowej wyrzuca się



Fot. 1. Przestrzeń poddasza



Fot. 4. Poduszka z pianki poliuretanowej pod żebrzem sklepienia



Fot. 2. Ogólny widok rusztowań



Fot. 5. Poduszka z pianki poliuretanowej widoczna po demontażu podpór sklepienia



Fot. 3. Podpory żeber sklepienia



Fot. 6. Otwór w ścianie zewnętrznej przeznaczony do montażu ściągu



z dyszy wylotowej pod ciśnieniem roboczym około 0,6 MPa, przy czym maksymalne ciśnienie może wzrosnąć do około 1,0 MPa. Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie obie techniki wykonania betonu natryskowego. W ujęciu ogólnym zasadnicza różnica między obiema metodami sprowadza się do ilości wody i miejsca jej połączenia z suchymi składnikami mieszanki betonowej.

W omawianym przypadku wybór metody torkretu suchego nie budzi wątpliwości. Metoda ta umożliwia korektę konsystencji mieszanki betonowej w chwili jej nakładania, dając możliwość bardzo dobrego zagęszczenia materiału, a tym samym uzyskania korzystnej struktury betonu i większej jego wytrzymałości. Charakteryzuje się niskim wskaźnikiem wodno-cementowym (stosunkiem ilości wody do ilości cementu):  $W/C = 0,30 \div 0,35$ , co ma duże znaczenie w przypadku konieczności ochrony polichromowanej strony sklepienia przed zawilgoceniem i prowadzenia robót w istniejących trudnych warunkach na poddaszu gęsto zabudowanym drewnianymi elementami belkowania nad sklepieniem i więźby dachowej (fot. 1, rys. 2).

Jest oczywistym, że skład mieszanki betonowej musi uwzględnić wymagania stawiane betonowi natryskowemu dla określonych uwarunkowań i ograniczeń. Stąd przy projektowaniu receptury wykorzystano obowiązujące w tym względzie wymagania Specyfikacji Europejskiej dla Betonu Natryskowego [2] oraz doświadczenia własne wynikające ze zrealizowanych wcześniej napraw i wzmocnień konstrukcji żelbetowych [6, 11-13] metodą betonu natryskowego.

Istotnym dodatkiem do mieszanek natryskowych jest mikrokrzemionka, która poprawia właściwości technologiczne i użytkowe betonu natryskowego, zarówno w metodzie suchej jak i mokrej. Mikrokrzemionka przyspiesza wiązanie i twardnienie betonu, wpływa na zwiększenie wytrzymałości oraz jego odporności na wpływy agresywnych czynników chemicznych. Mieszanki z dodatkiem mikrokrzemionki mają zwiększoną spójność, co zmniejsza straty spowodowane odbiciem materiału od powierzchni, na którą beton jest natryskiwany. Jest to istotne, gdyż ubytki materiału spowodowane odbiciem w obu metodach są znaczące. W metodzie suchej są one większe niż w metodzie mokrej, a w przypadku torkretowania na płaszczyznach pochyłych sklepień mogą one sięgać nawet 25%. Należy zaznaczyć, że ilość mikrokrzemionki należy zoptymalizować i ograniczyć ze względu na zwiększenie modułu Younga powodującego zwiększenie kruchości wykonanego betonu natryskowego.

W celu uzyskania optymalnego efektu zaprojektowano skład betonu piaskowego różnicując

średnicę ziaren zastosowanego kruszywa płukane-go. Dla wieńców obwodowych przyjęto kruszywo drobnoziarniste o uziarnieniu 0-8 mm, natomiast dla powłoki żelbetowej kruszywo 0-4 mm. W obu przypadkach w składzie mieszanki przewidziano zastosowanie dodatków mikrokrzemionki oraz niealkalicznych przyspieszaczy wiązania cementu. Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na ograniczony zakres stosowania przyspieszaczy wiązania cementu, gdyż przy zbyt dużej ich ilości spada wytrzymałość wykonanego betonu, a ponadto na powierzchniach betonu pojawiają się wykwyty, co w niektórych przypadkach jest bardzo istotne. Beton natryskowy klasy B30 zaprojektowano stosując jako spoiwo cement portlandzki CEM I 42,5 R z cementowni Górażdże. Skład mieszanki betonowej dla wykonania wieńców obwodowych na kruszywie 0-8 mm oznaczono jako TMP 8-B30, a dla powłoki przy użyciu kruszywa 0-4 mm jako TMP4-B30.

Jak już wspomniano, przewidziano wykonanie betonu natryskowego metodą suchą. Jednak zastosowano mieszankę wstępnie nawilżoną, a nie suche składniki betonu. Takie rozwiązanie było korzystne w celu ograniczenia ilości wody w składzie betonu, ze względu na zagrożenie dla istniejących polichromii oraz w celu zmniejszenia zapylenia przestrzeni poddasza w trakcie wykonywania torkretowania metodą suchą. Zastosowano specjalistyczne urządzenie umożliwiające nawilżenie suchych składników betonu natryskowego do 6% wilgotności. W tym stanie mieszanka podawana była do torkretnicy, a następnie transportowana węzami elastycznymi do dyszy natryskowej. Zastosowano torkretnicę produkcji szwajcarskiej – Aliva 246.

### 3. Wykonanie rusztowań

W części I artykułu podkreślono, że sklepienie znajdowało się w stanie krytycznym, który należało traktować jako pierwszy etap globalnej katastrofy budowlanej. Stąd przystąpienie do prac wzmocniających i naprawczych wymagało wykonania odpowiedniej konstrukcji zabezpieczającej sklepienie przed zawaleniem oraz umożliwiającej bezpieczne prowadzenie prac na stronie grzbietowej sklepienia.

Bezpośrednio pod sklepieniem wykonano pomocniczy pomost roboczy przykrywający cały rzut kościoła. Pomost był oparty na kratownicach stalowych rozpiętych w kierunku poprzecznym nawy. Kratownice oparto na rusztowaniu rurowym ustawionym wzdłuż ścian podłużnych nawy. Ponadto wykonano niezależną konstrukcję złożoną z kratowych słupów stalowych, które wraz



Fot. 7. Styki montażowe i końcówki ściągow



Fot. 10. Fragment oczyszczonej strony grzbietowej sklepienia



Fot. 8. Miejsca kotwienia ściągow w przyporach



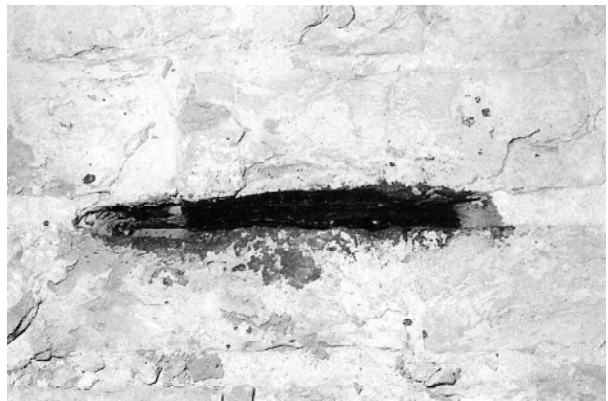
Fot. 11. Fragment oczyszczonej strony grzbietowej sklepienia



Fot. 9. Fragment wykonanego ściągu



Fot. 12. Wysoka spoina między cegłami przeznaczona do osadzenia kotwy



Fot. 13. Zagruntowana żywicą spoina między cegłami przeznaczona do osadzenia kotwy





Fot. 14. Kotwa przed osadzeniem w spoinie



Fot. 17. Próba nośności kotwy na wyrywanie. Zarejestrowana siła 7,4 kN



Fot. 15. Kotwa po zalaniu żywicą



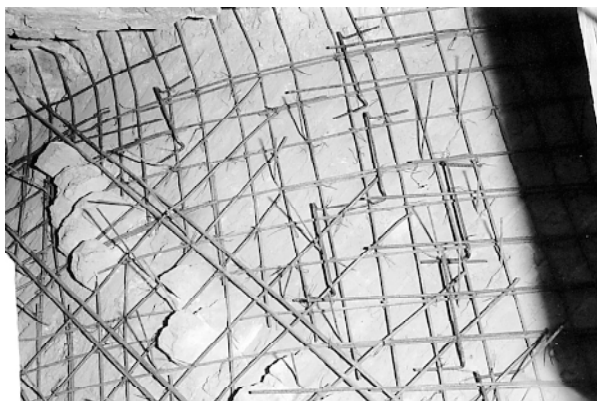
Fot. 18. Strzemiona wklejone w sklepienie w miejscu ukrytego żebra



Fot. 16. Fragment powierzchni grzbietowej sklepienia z osadzonymi kotwami



Fot. 19. Układanie pierwszej warstwy zbrojenia. Widoczne zbrojenie ukrytych żeber



Fot. 20. Układanie pierwszej warstwy zbrojenia w rejonie istniejącego żebra ceglanego

z pomostem roboczym stanowiły bazę dla podpór pod żebra sklepienia. Ogólny widok przestrzeni pod sklepieniem wypełnionej rusztowaniami pokazany jest na fot. 2. Sklepienie zostało podparte wzdłuż żebrowania na poduszce z pianki poliuretanowej spienionej w drewnianych korytkach ustawionych na podporach pod żebrowaniem i dostosowanych kształtem do krzywizny żebrowania. W ten sposób polichromowane wysklepki między żebrowaniem zostały ochronione przed uszkodzeniami mechanicznymi. Sposób podparcia żebrowania sklepienia pokazany jest na fot. 3 (oraz na fot. 14 – część I). Ukształtowanie poduszek z pianki poliuretanowej wspierających żebra, wypełniających przestrzenie między korytkami drewnianymi i żebrowaniem sklepienia, widoczne jest na fotografiach 4, 5 wykonanych w trakcie demontażu podpór po zakończeniu prac.

#### 4. Wykonanie ściąągów stalowych

W celu przejścia sił rozporu poziomego i zabezpieczenia ścian zewnętrznych przed przemieszczeniami poziomymi, szczególnie na skutek zwiększenia obciążenia po wykonaniu powłoki żelbetowej, w osiach wewnętrznych żebrowania poprzecznych rozdzielających trzy segmenty sklepienia zainstalowano dwa ściąagi stalowe wykonane z pręta kwadratowego 50 x 50 mm. W przyporach zewnętrznych i analogicznych przyporach wewnętrznych wywiercono otwory, w których osadzono ściąagi (fot. 6). Ze względów technologicznych ściąagi były łączone na długości za pomocą spoin pachwinowych i czołowych na pełny przekrój. Styki montażowe pokazane są na fot. 7. Spawanie wykonano w osłonie CO<sub>2</sub>. Ściągi kotwiono za pomocą blach oporowych i napinano za pomocą nakrętek z siłą ok. 2 kN. Strefy kotwienia ściąągów w przyporach zewnętrznych po zakończeniu prac pokazane są na fot. 8, a fragment wykonanego ściąagu wewnątrz kościoła widoczny jest na fot. 9. Ściągi zainstalowano przed wykonaniem powłoki żelbetowej na sklepieniu, zatem dodatkowe siły rozporu spowodowane zwiększeniem obciążenia sklepień w całości zostały przejęte przez ściąagi i nie zostały przekazane na ściany.

#### 5. Przygotowanie powierzchni sklepienia

Ze względu na zaistnienie stanu awaryjnego, prowadzenie wszystkich prac związanych z realizacją wzmocnienia sklepienia wymagało dużej ostrożności. Stąd prace te należało prowadzić ręcz-

nie. Niedopuszczalne było zastosowanie jakiegokolwiek sprzętu mechanicznego, którego oddziaływania dynamiczne mogłyby zaszkodzić konstrukcji. W pierwszej kolejności w delikatny sposób usunięto warstwę zaprawy pokrywającej prawie całą powierzchnię grzbietową sklepienia. Prace te prowadzono przy użyciu ostrych przecinaków stalowych i małych młotków, za pomocą których ścinano warstwę zaprawy i usuwano za pomocą odkurzaczy przemysłowych, co w istotny sposób ograniczało pylenie i przyczyniało się do bieżącego oczyszczenia sklepienia ceglanego z pyłów oraz luźnych ziaren kruszywa i złuszczonej cegły. Z istniejących żebrowania po stronie grzbietowej usunięto cegły nieprzewiązane ze sklepieniem, a pozostałe cegły przewiązane włączono w strukturę powłoki żelbetowej wykorzystując ich dodatkowy efekt zespolenia powłoki żelbetowej ze sklepieniem ceglanym. Fragmenty oczyszczonej powierzchni grzbietowej sklepienia pokazane są na fot. 10, 11.

#### 6. Podwieszenie sklepienia do powłoki żelbetowej

Podwieszenie sklepienia ceglanego do powłoki żelbetowej nastąpiło za pośrednictwem kotew stalowych w kształcie litery U wykonanych z prętów gładkich  $\phi$  6 mm wklejonych w pionowe spoiny między cegłami sklepienia i zakotwionych na zbrojeniu powłoki żelbetowej. Przyjęty rozstaw kotew wynosi ok. 30 cm w obu kierunkach. Po odpyleniu i oczyszczeniu powierzchni grzbietowej sklepienia przystąpiono do ręcznego usunięcia spoin pionowych między cegłami w sklepieniu, w miejscach przeznaczonych do osadzenia kotew stalowych. Kotwy wklejono na głębokość ok. 6 cm. Po wklejeniu i zamknięciu ramion kotwy pełnią funkcję strzemion. Zarówno w trakcie wykonywania tych prac, jak i po ich zakończeniu konieczne było ponowne dokładne oczyszczenie płaszczyzny górnej sklepienia oraz „odkurzenie” powstałych gniazd dla osadzenia kotew. Kotwy-strzemiona wklejano w przygotowane gniazda w spoinach pionowych przy użyciu kleju epoksydowego. Zastosowano klej Epidian 505 z utwardzaczem TFF. Dla uzyskania właściwej konsystencji kleju zastosowano w jego składzie mączkę kwarcową o zawartości 99,7% SiO<sub>2</sub>. Taki skład kleju epoksydowego wyeliminował niebezpieczeństwo jego przenikania na wewnętrzną, polichromowaną płaszczyznę dolną sklepienia ceglanego. Należy zwrócić uwagę, że bezpośrednio przed wtłoczeniem żywicy epoksydowej i osadzeniem kotew-strzemion przeprowadzono kolejne odpylenie przy użyciu odkurzaczy oraz zagruntowano czy-



stą żywicą powierzchnie cegieł przeznaczone na spoinę. Poszczególne fazy prac oraz widok powierzchni górnej sklepienia po wklejeniu kotew przedstawiono na fotografiach 12-16. W trakcie wklejania kotew przeprowadzono kontrolę nośności zakotwienia metodą „pull-off”. Wykorzystano w tym celu tester Dyna Z15 produkcji szwajcarskiej firmy Proceq – co ilustruje fot. 17. Test kontynuowano do momentu powstania poślizgu na uchwycie mocującym tester do pręta. Uzyskano wskazanie siły równe 7,4 kN na 1 pręt, co oznacza, że nośność jednej kotwy wynosi co najmniej 14,8 kN. Przy tej sile nie stwierdzono jakichkolwiek zmian w spoinie. Taka nośność umożliwiła bezpieczne przeniesienie ciężaru ok. 4,5 m<sup>2</sup> sklepienia na 1 kotwie, co przy zastosowanym rozstawie kotew daje współczynnik pewności równy ok. 45. Rzeczywista nośność zespolenia sklepienia ceglanego z powłoką żelbetową może być jednak niższa, gdyż może być limitowana wytrzymałością na ścinanie spoin między cegłami przyległymi do zakotwienia. Przyjmując asekuracyjnie niską wytrzymałość spoiny wapiennej na ścinanie równą 0,008 kN/cm<sup>2</sup> (bez uwzględnienia np. naprężeń normalnych i siły tarcia w spoinach), przy zastosowanym rozstawie kotew otrzymuje się współczynnik pewności równy ok. 12. Dodatkowo istotne zespolenie sklepienia ceglanego z powłoką żelbetową uzyskano za pomocą strzemion wklejonych w sklepienia wzdłuż żeber krzyżowych ukrytych w powłoce żelbetowej (fot. 18, 19 oraz 27, 28) oraz, w mniejszym stopniu, za pomocą cegieł przewiązanych ze sklepieniem wprowadzonych w strukturę powłoki żelbetowej. Istotnym elementem naprawy na tym etapie prac było zagruntowanie grzbietowej strony sklepienia za pomocą preparatu Atlas Uni-Grunt, dzięki czemu zmniejszono wnikanie wody w konstrukcję sklepienia, eliminując ryzyko uszkodzenia polichromii oraz zmniejszono wsiąkanie wody ze świeżego betonu natryskowego w suche podłoże ceglane. Stwarzało to korzystne warunki dla prawidłowego przebiegu procesów wiązania i twardnienia betonu powłoki żelbetowej oraz zwiększenia jej przyczepności do podłoża ceglanego, co jest szczególnie ważne przy niskim wskaźniku cementowo-wodnym betonu natryskowego.

## 7. Wykonanie zbrojenia powłoki żelbetowej

Zbrojenie powłoki żelbetowej wykonano na podstawie obliczeń statyczno-wytrzymałościowych, które przeprowadzono z uwzględnieniem stanów błonowego i zgięciowego w powłoce.

Uwagi szczegółowe dotyczące projektu powłoki zamieszczono w części I artykułu.

Poniżej prezentuje się uwagi dotyczące wykonania zbrojenia, co przy istniejących uwarunkowaniach geometrycznych sklepienia krzyżowo-żebrowego stwarzało znaczne utrudnienia w jego realizacji ze względu na konieczność nadawania prętom kształtów krzywoliniowych, dostosowując układ zbrojenia do istniejących kształtów sklepienia. Należy zwrócić uwagę, że w powłoce żelbetowej należało wykonać ukryte żebra krzyżowe zlokalizowane na przecięciu powłok walcowych tworzących sklepienie. Znaczne trudności stwarzało wykonanie zbrojenia w celu połączenia i włączenia do współpracy z powłoką żelbetową wystających cegieł przewiązanych ze sklepieniem ceglanym. Oddzielnym problemem realizacyjnym było wprowadzenie zbrojenia w obwodowe wieńce podporowe jak i wykonanie samego zbrojenia podłużnego tych wieńców. W fazie prac wstępnych związanych z przygotowaniem podłoża wykuto w murach bruzdy dla osadzenia wieńców, które nie są elementami prostoliniowymi, belkowymi jak ma to miejsce w rozwiązaniach typowych. Zbrojenie wykonano w dwóch warstwach. Sposób jego wykonania w poszczególnych obszarach powłoki pokazany jest na fot. 19-27. Odrębny fragment konstrukcji stanowiło wzmocnienie rozbudowanego żebra poprzecznego, pokazanego w przekroju na rys. 2. Kolejne etapy prac pokazane są na fot. 28-32.

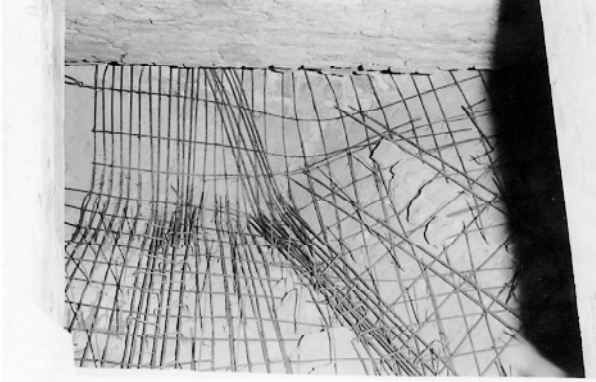
## 8. Wykonanie betonu natryskowego – torkretowanie

Dzięki opracowanej technologii uwzględniającej wstępne nawilżenie suchych składników mieszanki betonowej torkretowanie wykonano minimalizując straty wynikające z odbicia oraz wyraźnie obniżono zapylenie towarzyszące natryskowi. Stwarzało to korzystne warunki pracy w istniejących, obiektywnie trudnych warunkach, w ograniczonej przestrzeni stropodachowej kościoła.

W pierwszej kolejności wykonano wieńce obwodowe stosując mieszankę TMP 8-B30. W dalszej kolejności torkretowano sklepienie, realizując natrysk „obwodowo” od wieńców ku górze sklepienia, a więc metodą serpentyny. W tym przypadku zastosowano mieszankę TMP4-B30, co było konieczne ze względu na lokalnie istniejące duże zagęszczenie prętów zbrojenia. Sposób wykonywania betonu natryskowego przedstawiono na fot. 30-31.

Wydajność torkretnicy (Aliva 246) była zmienna od 0,6 do 3,0 m<sup>3</sup>/h betonu wbudowanego w konstrukcję powłoki żelbetowej, co wynikało ze stopnia utrudnień przy torkretowaniu. Dołożono sta-

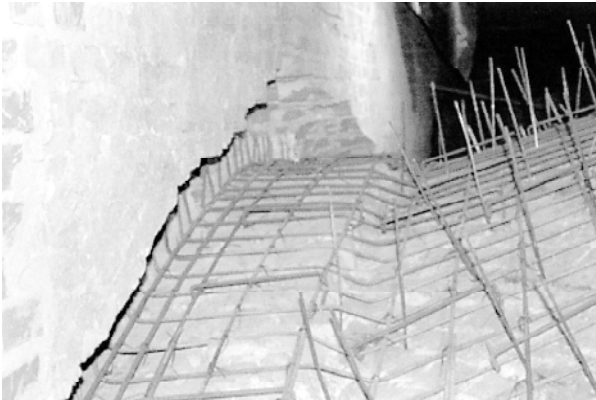




Fot. 21. Układanie pierwszej warstwy zbrojenia w rejonie zbiegu żeber



Fot. 25. Widok zbrojenia podwójnego w pobliżu wieńca podporowego



Fot. 22. Układanie pierwszej warstwy zbrojenia w rejonie wieńca podporowego



Fot. 26. Detal układu cegieł żebra poprzecznego po wyjęciu cegieł nieprzewiązanych



Fot. 23. Szczegół mocowania kotew do zbrojenia



Fot. 27. Detal osadzenia strzemion i kotew w żebrze poprzecznym

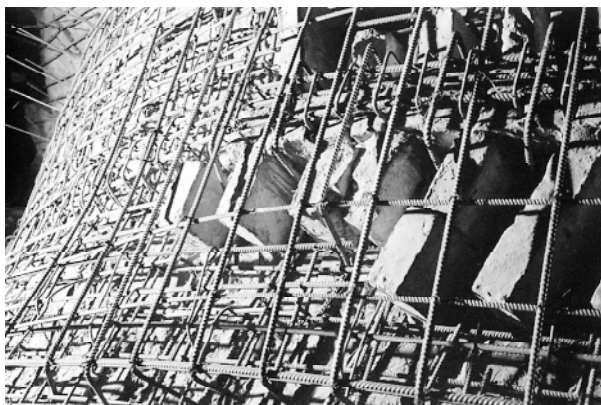


Fot. 24. Szczegół zbrojenia podwójnego w rejonie wieńca podporowego



Fot. 28. Początek zbrojenia żebra poprzecznego





Fot. 29. Detal zbrojenia żebra poprzecznego



Fot. 30. Detal torkretowania wieńca podporowego



Fot. 31. Fragment zatorkretowania zbrojenia. Widoczne zbrojenie żebra ukrytego



Fot. 32. Widok na żebro poprzeczne po zakończeniu prac



Fot. 33. Fragment sklepienia po zakończeniu prac



Fot. 34. Widok zewnętrzny uszkodzonej strefy żebra



Fot. 35. Zasięg uszkodzenia żebra z fot. 34



Fot. 36. Zasięg uszkodzenia żebra

rań, by grubość powłoki zgodnie z projektem wynosiła 8 cm, jednak ze względu na istniejące ceglane żebra na grzbietowej stronie sklepienia oraz w obszarach zagęszczenia zbrojenia jej grubość wzrosła do około 12-13 cm.

## 9. Pielęgnacja betonu powłoki żelbetowej

Świeżo wykonany beton powłoki żelbetowej poddano mokrej pielęgnacji. Oczywiście zabieg ten jest stosowany w każdym przypadku betonowania konstrukcji. Jednak w istniejących uwarunkowaniach i ograniczeniach zabieg ten wymagał ścisłej kontroli nad realizowanym zraszaniem wodą wykonanej powierzchni betonowej powłoki. Należało wykluczyć możliwość zalewania wodą, stąd czynności pielęgnacyjne polegały na zraszaniu powierzchni betonu mgiełką wodną i wykonywane były częściej, racjonując porcje wody w kolejnych etapach nawilżania powierzchniowego betonu.

Widok wykonanych powierzchni górnych żelbetowej powłoki żelbetowej przedstawiono na fot. 32, 33.

## 10. Uwagi końcowe

Po wykonaniu prac i zdemontowaniu podpór żeber sklepienia była możliwość udokumentowania poprawności czynności wstępnych oraz wykonania uzupełniających badań stopnia uszkodzenia konstrukcji. W szczególności potwierdzono skuteczność podparcia żeber sklepienia na poduszce z pianki poliuretanowej spienionej w korytkach drewnianych pod żebrami. Na fot. 4-6 widoczne jest właściwe ułożenie pianki tworzącej poduszki równomiernie rozłożone i podpierające żebra na ich długości. Również możliwe było, już w sposób bezpieczny, określenie wielkości strefy zmiążdżenia żeber na skutek zginania sklepienia. Na przykład żebro w punkcie 2 (fot. 2, 4, 8 – część I) wykazywało zewnętrzne objawy zniszczenia pokazane na fot. 34. Po wykonaniu prac i zdjęciu podpór w sposób bezpieczny można było usunąć zmiążdżone fragmenty cegieł i odkryć zasięg strefy zniszczenia, który jest pokazany na fot. 35. Podobnie w punkcie 3 (fot. 9 – część I) zasięg zmiążdżonej strefy żebra pokazany jest na fot. 36. Uzyskany obraz potwierdza prawidłowość wstępnej diagnozy o zaistnieniu stanu awaryjnego i wytworzeniu się układu zbliżonego do mechanizmu grożącego runięciem sklepienia.

## Literatura i materiały źródłowe

- [1] Austin S., Robins P.: *Sprayed Concrete: Properties, Design and Application*. Bristol 1995.
- [2] EFNARC Technical Committee, European Specification for Sprayed Concrete, European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures, Aldershot 1996.
- [3] *Guide to Shotcrete*. ACI 506 R-90. ACI Manual of Concrete Practice 1992 – Part 5.
- [4] Heyman J.: *Equilibrium of shell structures*. Clarendon Press, Oxford 1977.
- [5] Jasięńko J., Kleszcz W.: *Analiza pracy statycznej sklepień krzyżowo-żebrowych. Sposoby wzmacniania, metody projektowania*. Materiały 5. Wrocławskiej Konferencji Naukowo-Technicznej, Szklarska Poręba 1990.
- [6] Przybyłowicz E., Słowek G.: *Odnowa zabytkowej kopuły w poznańskim ZOO*. „Warsztwy” nr 1 styczeń-marzec 1997, str. 14-17.
- [7] Rapp P.: *Ocena stanu technicznego konstrukcji sklepienia w kościele Przemienienia Pańskiego w Poznaniu*. Poznań, czerwiec 2002.
- [8] Rapp P.: *Projekt podparcia żeber sklepienia w kościele Przemienienia Pańskiego w Poznaniu*. Poznań, luty 2003.
- [9] Rapp P.: *Projekt wzmocnienia konstrukcji sklepienia nad nawą kościoła Przemienienia Pańskiego w Poznaniu*. Poznań, kwiecień 2003 (weryfikacja: J. Jasięńko, konsultacja: G. Słowek).
- [10] Sieczkowski J.M., Szołomicki J.: *Analiza statyczna sklepień krzyżowo-żebrowych*. XL Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Rzeszów-Krynica-Warszawa 1994.
- [11] Słowek G., Majchrzak Wł.: *Technologia torkretowania a specyfikacja europejska*. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 3, 1997, str. 118-120.
- [12] Słowek G., Majchrzak Wł.: *Naprawy konstrukcji żelbetowych metodą torkretowania*. XIII Ogólnopolska Konferencja: Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji – 1998, Ustroń, 26-28 lutego 1998 r., t. I, str. 213-231.
- [13] Słowek G., Majchrzak Wł.: *Zastosowanie betonu natryskowego w rehabilitacji obiektów zabytkowych oraz wzniesionych metodami uprzemysłowionymi*. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej nr 82, Seria: Konferencje nr 31, Wrocław 2002 r., str. 375-382.