

Jerzy Jasieńko, Lech J. Engel

Badania, konserwacja i wzmocnienie konstrukcji ceglanej kopuły kościoła św. Jana w Owińskach

1. Wstęp

Kościół św. Jana Chrzciciela w Owińskach jest ważnym przykładem późnobarokowej budowli sakralnej w Wielkopolsce.

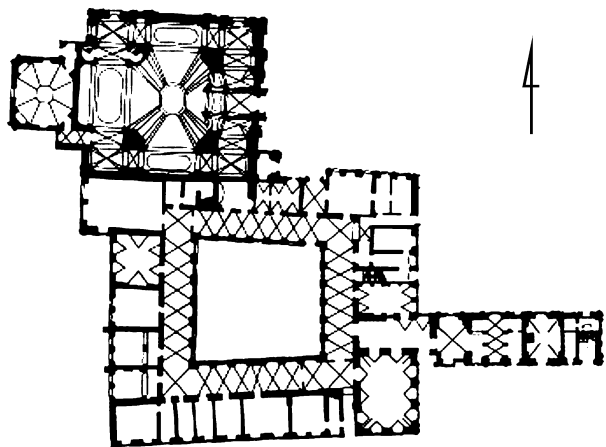
Dokładny opis uszkodzeń, badań i przyjętych rozwiązań konserwatorskich podano w [1], [2]. O wartości tej prawie już trzystuletniej świątyni m.in. stanowi masywna i harmonijna bryła, dzieło włoskiego architekta Pompeo Ferrariego i zdobiące sklepienia polichromie autorstwa Adama Swacha. Dominująca we wnętrzu kościoła, potężna kopuła stanowiąca przekrycie centralnej nawy, jest silnie spękana (rys. 3, 4). Uszkodzenia te budzą poważny niepokój i od kilku lat bada się przyczyny ich powstania. Powstało kilka hipotez na temat przyczyn i pochodzenia uszkodzeń. Jedna z nich mówi o nie w pełni właściwej konstrukcji kopuły i zakłada, że zbyt ciężka latarnia i źle dobrana geometria powodują lokalnie przekroczenie nośności muru na rozciąganie. Hipoteza ta wydaje się być prosta do zweryfikowania, gdyż sprowadza się do przeprowadzenia obliczeń statycznych obiektu i określenia panującego w nim stanu naprężeń. Okazuje się jednak, że ta pozornie prosta procedura w przypadku tego obiektu jest w praktyce trudna do zrealizowania [1], [2].

Ze względu na skomplikowaną geometrię kopuły, klasyczne metody obliczeniowe nie dają tu satysfakcjonujących wyników. Trudno znaleźć tu dokładne rozwiązanie analityczne. Dodatkowe komplikacje powoduje fakt, że zachowanie się kopuły, jako ustroju konstrukcyjnego, jest wrażliwe na imperfekcje geometryczne. Kopuły wieloboczne o podobnych gabarytach, ale o różnej wyniosłości czy krzywiźnie powierzchni, z punktu widzenia statyki, pracować będą w zupełnie odmiennym

sposób i trudno byłoby szukać między nimi daleko idących analogii. Jedną z możliwości prowadzących do opisu zachowania kopuły i oceny rzeczywistego charakteru jej pracy statycznej jest zastosowanie numerycznych metod obliczeniowych [1], [2].

2. Analiza teoretyczna

Uszkodzenia kopuły rozpiętej nad nawą centralną można podzielić na dwa rodzaje. Pionowe, południkowe zarysowania w narożach, tuż przy krawędziach między powłokami (rys. 5) i obwodowe spęknięcia współśrodkowe wokół podstawy latarni wieńczącej kopułę (rys. 6). Południkowe spęknięcia bieżą wzdłuż wszystkich naroży, są jednak zdecydowanie większe w narożach południowo-zachodnim i północno-wschodnim. Wszystkie mają wyraźną tendencję do zbiegania się w górnej części kopuły do wewnątrz narożnych



Rys. 1. Zespół klasztoru pocysterskiego i kościoła św. Jana Chrzciciela w Owińskach

Praca dopuszczona do druku po recenzjach



Rys. 2. Kopuła kościoła Św. Jana Chrzciciela w Owieńskach



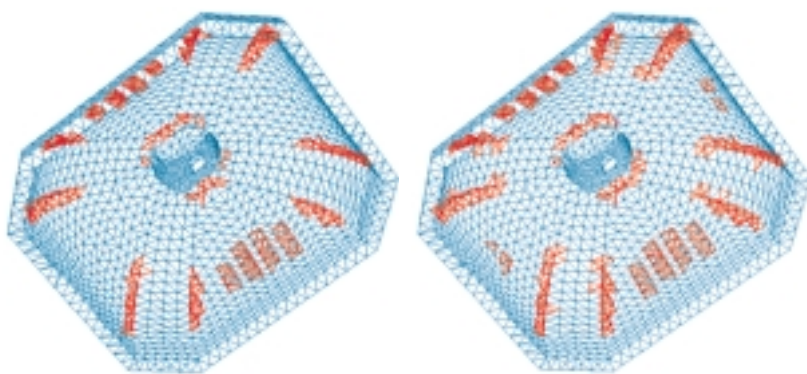
Rys. 3. Kopuła w Owieńskach – spękania na kopule nawy centralnej – stan z 1952 roku



Rys. 4. Kopuła w Owieńskach – spękania na kopule nawy centralnej. Zaznaczono południkowe kierunki biegu spękań [1], [2], [3]



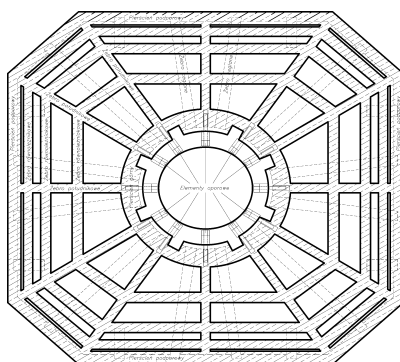
Rys. 5. Jedna z rys o przebiegu południkowym i spękanie naroża pn.-zach. [1], [2], [3]



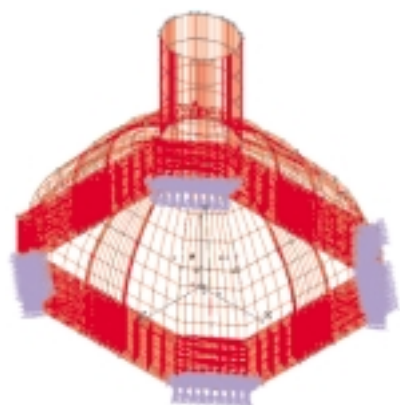
Rys. 7. Kopuła w Owieńskach – model MES w systemie ABAQUS. Rozwój zarysowania w kolejnych przyrostach obciążenia (elementy spękane zaznaczono na czerwono) [1]



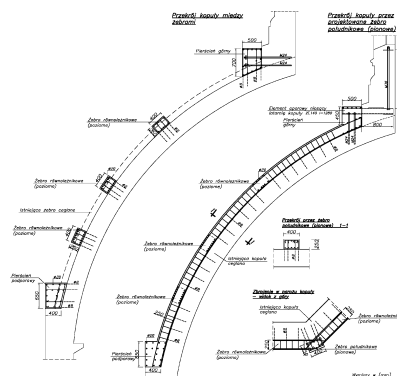
Rys. 6. Kopuła w Owieńskach – spękania obwodowe wokół podstawy latarni [1], [2], [3]



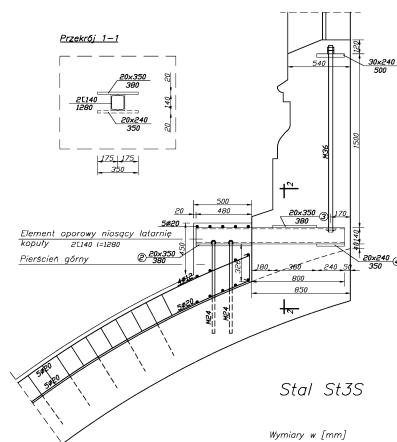
Rys. 8. Kopuła w Owieńskach – rzut z góry wzmacniającego układu pierścieni i żebier żelbetowych [6], [5]



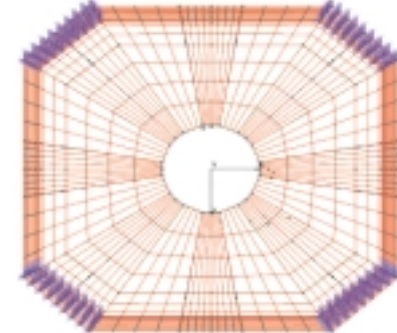
Rys. 11. Kopuła w Owieńskach – numeryczny model sklepienia do analiz w systemie COSMOS: aksonometria; widok z góry [6], [5]



Rys. 9. Kopuła w Owieńskach – konstrukcja żelbetowych żebier wzmacniających [6], [5]



Rys. 10. Kopuła w Owieńskach – szczegół podparcia latarni [6], [5]



powierzchni sklepienia, a ich szerokość waha się w granicach od kilku milimetrów do kilku centymetrów [1], [2].

Wobec występujących zagrożeń najpierw M. Krzysztofiak [3], P. Rapp [4] oraz T. Łodygowski i M. Wierszycki [1], a następnie J. Jasieńko, L. Engel, D. Skrycki [5] podjęli analizę pracy statycznej kopuły metodą elementów skończonych (MES). Szczególnie istotne dla dalszego postępowania wobec kopuły były studia teoretyczne podjęte przez Rappa [4] oraz Łodygowskiego i Wierszyckiego [1], których główne założenia i wyniki podano w [1], a szerzej opisano w [2].

Proces tworzenia modelu numerycznego i wykonywania na nim analizy za pomocą tej metody, można zasadniczo podzielić na następujące podstawowe etapy [1]:

- przygotowanie geometrii modelowanego obiektu,
- ustalenie podstawowych parametrów fizycznych materiału, z których wykonany jest rzeczywisty obiekt oraz przyjęcie związku konstytutywnego opisującego zachowanie się tego materiału,
- przyjęcie warunków brzegowych modelu, które możliwie wiernie oddają rzeczywisty charakter pracy modelowanego obiektu,
- analiza numeryczna w środowisku MES.

Przyjęto przestrzenny opis geometrii kopuły, dzięki czemu nie narzucono żadnego określonego charakteru jej pracy: np. belkowego, płytowego czy powłokowego. Pozwoliło to na próbę określenia specyfiki jej statycznego zachowania, [1].

Ostatecznie na modelu numerycznym kopuły wykonanym w środowisku programu ABAQUS wygenerowano siatkę 14477 elementów skończonych o 28553 węzłach i 85659 stopniach swobody, [1]. Ze względu na skomplikowaną geometrię zastosowano siatkę elementów tetragonalnych drugiego rzędu, dziesięciowęzłowych. Analizę numerycznego modelu kopuły przeprowadzono w środowisku systemu analizy nieliniowej ABAQUS/Standard w wersji 6.1 pracującym w systemie IRIX 6.2 zainstalowanym na 12-procesorowym komputerze o 64-bitowej architekturze SGI Power Challenge w Poznańskim Centrum Superkomputerowo-Sieciowym. Zasadniczym celem była analiza spękań kopuły, dlatego kluczową wagę przywiązywano do precyzyjnego opisu zachowania się konstrukcji w takim właśnie stanie. System ABAQUS oferuje model materiału CONCRETE wykorzystujący opis spękania wg teorii rys rozmytych dla materiałów kruchych.

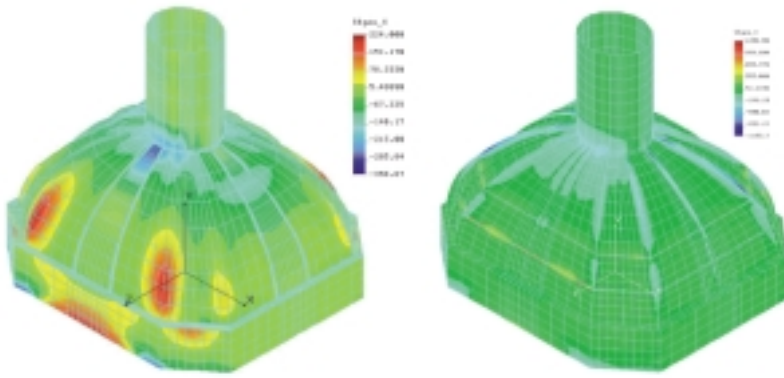
Uzyskane w wyniku obliczeń dane dobrze oddają dwa zasadnicze rodzaje zarysowań kopuły: pionowe w narożach i obwodowe wokół podsta-

wy latarni. Także liczba spękanych elementów zwiększająca się wraz ze wzrostem zadanego obciążenia oraz charakter propagacji tego zarysowania pokrywają się z obserwowanymi w rzeczywistości kierunkami rys. Mają one wyraźną tendencję zbiegania się do środka narożnych powierzchni sklepienia. Podobnie, widoczne są współsiłkowe, obwodowe spękania wokół wieńczącej kopułę latarni. Znalazły one swoje odzwierciedlenie w modelu (rys. 5). W przeprowadzonej analizie, podczas której sterowano wzrostem obciążenia, zaobserwowano, że konstrukcja kopuły posiada pewne, niewielkie rezerwy nośności. Przekroczona została natomiast wartość dopuszczalnych naprężeń rozciągających. Stąd pojawiło się zarysowanie. Przyjęty model tracił stabilność numeryczną dla wzrostu obciążenia o ok. 8%, co przekłada się na wartość ok. 2 kN/m² powierzchni rzutu kopuły. Wspomniana utrata stabilności modelu numerycznego związana jest z pojawiającą się osobliwością macierzy sztywności i brakiem zbieżności algorytmu kruchego pęknięcia. W praktyce obliczeń numerycznych spowodowane jest to postępującymi deformacjami geometrii i znaczną propagacją zarysowania [1].

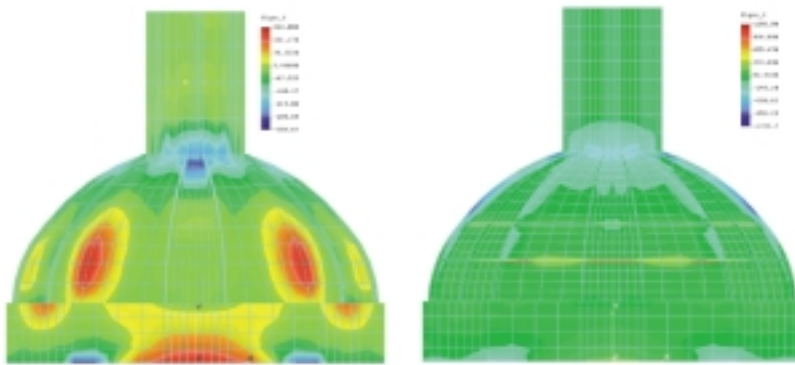
Biorąc pod uwagę wyniki analizy przedstawione powyżej oraz w wyniku badań morfologii zarysowań, a także w wyniku obliczeń statycznych prowadzonych w oparciu o modele analityczne, w trosce o bezpieczeństwo konstrukcji, a tym samym użytkowników oraz zachowanie cennego obiektu dziedzictwa kulturowego, zdecydowano się na interwencję konserwatorską – wzmocnienie kopuły. Projekt opracowali J. Jasieńko i L.J. Engel, asystent – D. Skrycki, weryfikacja i konsultacja – P. Rapp. Wykonano uzupełniające badania numeryczne o charakterze jakościowym (J. Jasieńko, D. Skrycki [5]), które potwierdziły uzyskane wcześniej wyniki. Ze względu na brak możliwości wiarygodnej weryfikacji tak skomplikowanego modelu konstrukcji na innej niż komputerowa drodze, zdecydowano się na wykonanie obliczeń przy wykorzystaniu MES i programu COSMOS M. To dwutorowe podejście do rozwiązania zagadnienia umożliwiło obliczeniową weryfikację przyjętych modeli i uzyskanych wyników. Badania numeryczne wykonano dla modeli kopuły przed i po planowanym wykonaniu wzmocnienia.

3. Prace projektowe i realizacja wzmocnienia

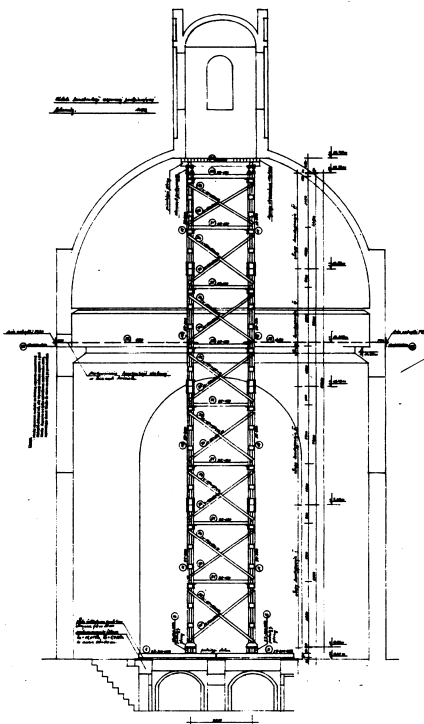
Kopuła w Owińskach jest uźebrowaną powłoką wieloboczną. W wyniku badań, kontrolnych obliczeń statycznych, oceny stopnia wyęźnienia konstrukcji kopuły w oparciu o modelowanie nume-



Rys. 12. Naprężenia główne σ_x [kPa] na wewnętrznej stronie powłoki – widok aksonometryczny; z lewej – przed wzmocnieniem; z prawej – po wzmocnieniu [6], [5]



Rys. 13. Naprężenia główne σ_x [kPa] na wewnętrznej stronie powłoki – widok z boku; z lewej – przed wzmocnieniem; z prawej – po wzmocnieniu, [6], [5]



Rys. 14. Konstrukcja tymczasowego podparcia latarni kopuły kościoła



Rys. 15. Kopuła w Owińskach – widok tymczasowego podparcia latarni kopuły



Rys. 16. Kopuła i latarnia w widoku z zewnątrz – demontaż pokrycia dachu



Rys. 18. Kopuła ceglana z żebrami w widoku z zewnątrz



Rys. 19. Kopuła w widoku z zewnątrz w trakcie prac wzmocniających – w narożu widoczne poziome elementy drewniane łączone żelaznym płaskownikiem, spinające kopułę ceglana



Rys. 20. Zbrojenie pierścienia dolnego, rozciąganego



Rys. 21. Zbrojenie drugiego, trzeciego i czwartego żebra równoleżnikowego wraz ze zbrojeniem żeber południowych

ryczne uznano, że podstawowym problemem dla nośności i sztywności kopuły jest usytuowanie na niej zbyt ciężkiej latarni. Uznano za potrzebne przeniesienie obciążeń od latarni na ściany i filary obiektu. Zdecydowano się zaprojektować przestrzenny ruszt żelbetowy, który spełni tę rolę. Równocześnie założono, że ze względu na działanie zjawisk opóźnionych ruszt zapewni także zwiększenie nośności kopuły pierwotnej o 100%.

W ramach prac projektowych przyjęto rozwiązanie polegające na:

- wykonaniu tymczasowego podparcia latarni o wadze ok. 80 ton konstrukcją stalową (rys. 14, 15),
- rozebraniu na czas prac istniejącego pokrycia dachu,
- wzmocnieniu konstrukcji kopuły systemem pierścieni i żeber żelbetowych (zaprojektowano pierścień podporowy – rozciągany, pierścień górny – ściskany, 3 żebra równoleżnikowe oraz 12 żeber południkowych), zespolonych z powłoką ceglana kopuły przy użyciu stalowych strzemion wklejanych (rys. 8, 9),
- wzmocnieniu posadowienia istniejącej latarni na kopule przy wykorzystaniu sztywnych, stalowych elementów oporowych, mocowanych w górnym, nowo projektowanym pierścieniu oraz ceglanej powłoce kopuły przy użyciu techniki klejenia (rys. 10),
- wykonaniu (ostrożnych ze względu na cenne polichromie wewnętrznej płaszczyzny) sklepień spękań (iniekcje) kopuły kompozycją epoksydową,
- odtworzeniu pokrycia dachu.

Decydującym dla wymiarowania wzmocnienia kopuły było założenie współpracy nowej konstrukcji żelbetowej ze starą konstrukcją ceglana. Współpracę tę starano się zapewnić w miejscach styczności obu składowych układu przez zalecenie usunięcia z powierzchni kopuły i żeber ceglanych gładzi wapiennej, dokładne oczyszczenie powierzchni kopuły szczotkami stalowymi oraz wklejenie w konstrukcję ceglana, kompozycją epoksydową, co drugiego strzemienia $\varnothing 8$ (34GS) wszystkich żeber i pierścieni. Powierzchnię ceglana przed betonowaniem zalecono bardzo delikatnie zwilżyć wodą.

Przewidziano użycie jako głównego zbrojenia elementów żelbetowych prętów $\varnothing 20$ (St3S) i betonu B25. Włączenie nowej konstrukcji żelbetowej do pracy w obszarze latarni przewidziano wykonać za pomocą wklejanych przelotowo w mur latarni bolców stalowych z zespalanych skrzynkowo ceowników C140. Założono wspornikowe zamocowanie bolców w pierścieniu górnym i powłoce ceglanej.

Potwierdzeniem przyjętych założeń projektowych odnośnie sposobu wzmocnienia kopuły w Owińskach były analizy numeryczne prowadzone w środowisku programu COSMOS M. Na rys. 11 przedstawiono przyjęty do obliczeń numerycznych model MES, natomiast na rys. 12, 13 wyniki uzyskane dla modelu kopuły przed wzmocnieniem i po wzmocnieniu.

W roku 2005 zrealizowane zostało tymczasowe podparcie latarni (prętowa konstrukcja stalowa). W 2006 roku rozpoczęły się prace mające na celu wzmocnienie samej kopuły.

Z przezorności należy zwrócić uwagę, iż przy projektowaniu tymczasowych konstrukcji wsporczych (rys. 14, 15) konieczne jest dokładne rozpoznanie możliwości ich oparcia. Często bowiem w podziemiach świątyń istnieją krypty, co może prowadzić do oparcia konstrukcji zabezpieczającej na powłokach sklepiennych rozpiętych między filarami krypt, a w konsekwencji do przeciążenia sklepień.

Na rys. 16-19 pokazano przebieg prac przygotowawczych do wzmocnienia kopuły.

Na rys. 20-30 pokazano przebieg prac wzmocniających kopułę wykonywanych według wyżej opisanego projektu.

Literatura

- [1] ŁODYGOWSKI T., WIERSZYCKI M., *Analiza numeryczna ceglanej kopuły zabytkowego kościoła*. Inżynieria i Budownictwo, 7/2002.
- [2] JASIEŃKO J., ŁODYGOWSKI T., RAPP P., *Naprawa, konserwacja i wzmocnianie wybranych, zabytkowych konstrukcji ceglanych*. Wrocław, DWE, 2006.
- [3] KRZYSZTOFIAK W., *Projekt wzmocnienia kopuły nad nawą centralną kościoła pocysterskiego pw. św. Jana Chrzciciela w Owińskach k. Poznania*. Poznań, 1997.
- [4] RAPP P., *Ocena stanu technicznego kopuły głównej i kopuły południowej w kościele klasztornym pw. św. Jana Chrzciciela w Owińskach*. Poznań, 1993.
- [5] SKRYCKI D., *Projekt budowlano-konserwatorski wzmocnienia Kopuły Pompeo Ferrariego w Owińskach*. Magisterska praca dyplomowa pod kierunkiem dr. hab. inż. J. Jasieńko, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2004.
- [5] ENGEL L., JASIEŃKO J., *Projekt budowlano-konserwatorski wzmocnienia kopuły kościoła św. Jana Chrzciciela w Owińskach*. Biuro Projektów i Ekspertyz CCI Sp. z o.o., Wrocław – Długołęka, 2005.



Rys. 17. Kopuła – drewniana konstrukcja dachu pod pokrycie



Rys. 22. Wykonane dolne równoleżnikowe wraz z fragmentem jednego z łąber południkowych



Rys. 23. Przygotowane do zakotwienia w pierścieniu górnym, ściskanym, zbrojenie żebra południkowego



Rys. 24. Osadzenie elementów wsporczych w ścianach latarni wraz z zakotwieniem, przy użyciu techniki klejenia w powłoce ceglanej kopuły. Elementy przygotowano do zabetonowania w żelbetowym pierścieniu ściskanym



Rys. 25. Osadzone elementy wsporcze w ścianach latarni – widok od wnętrza latarni



Rys. 26. Faza wykonania odwiertów dla osadzenia elementów wsporczych w ścianie latarni



Rys. 27. Badanie wytrzymałości na wrywanie połączenia klejowego strzemion stalowych wklejanych w powłokę ceglana kopuły w celu zespolenia nowo wprowadzanych łąber żelbetowych z ceglana powłoką kopuły



Rys. 28. Zbrojenie pierścienia górnego, ściskanego



Rys. 29. Pierścień górny ściskany. Widoczny stalowy element wsporczy osadzony w ścianie latarni, przygotowany do zabetonowania



Rys. 30. Rysa o przebiegu południkowym po iniekcji kompozycją epoksydową