

Mikołaj Malesza, Czesław Miedziałowski, Jarosław Malesza

Wybrane zagadnienia rekonstrukcji obronnej cerkwi gotyckiej pw. Zwiastowania Najświętszej Marii Panny w Supraślu

Selected issues from the reconstruction of a defensive Gothic Orthodox church of the Annunciation in Supraśl

1. Rys historyczny

Obronna cerkiew pw. Zwiastowania Najświętszej Marii Panny w Supraślu jest najciekawszym zabytkiem późnego gotyku na wschodnim pograniczu Rzeczypospolitej i wraz z klasztorem odegrała niezwykle ważną rolę w rozwoju kultury duchowej prawosławia w Polsce. Gotyckie cerkwie w Synkowiczach, Małomożejkwie i Supraślu należały do budownictwa sakralnego typu cytafelowego na pograniczu dawnej Rzeczypospolitej. Niektóre detale architektoniczne różniły te świątynie, a cerkiew w Supraślu była zaliczana do obiektów późnego gotyku. Odmienność formy była wynikiem kształtowania się i postępującego rozwoju gotyku na pograniczu Rzeczypospolitej, na który miało wpływ budownictwo drewniane w zakresie detali w obiektach sakralnych. W odróżnieniu od świątyń prawosławnych w Małomożejkwie i Synkowiczach cerkiew w Supraślu ma węższe nawy, a podstawy czterech wież bocznych i narożnych mają mniejsze wymiary w planie oraz połączone są z murami głównego obiektu. Dwie centralne główne kolumny są wydzielone, a dwie pozostałe są połączone z murami wewnętrznymi. Wszystkie kolumny połączone są szerokimi przesklepieniami i wyniosłymi łukami gotyckimi. Zwężenie fasady zachodniej i wschodniej przy wydłużeniu głównego korpusu umacnia efekt głównych obrysów pionowych budynku.

Dach cerkwi jest bardziej rozbudowany niż w świątyniach w Synkowiczach i Małomożejkwie, a cztery wieże wyniesione ponad dach oraz centralna, piąta wieża doskonale harmonizują z charakterem fasad. Podstawowy dach dwuspadowy jest przecięty przekryciem wychodzącym na boczne fasady z nośnymi frontonami.

1. Historical outline

The defensive Orthodox church of the Annunciation to the Blessed Virgin Mary in Supraśl is the most interesting historical building from the late Gothic period in the eastern borderland of Poland, and together with the monastery it has played a significant part in the development of the spiritual Orthodox culture in Poland. Gothic Orthodox churches in Synkowicze, Małomożejkwie and Supraśl represented church buildings of the citadel type in the borderland of the former Polish Republic. Some architectonic details made them distinctive, and the Orthodox church in Supraśl was numbered among the late Gothic objects. The difference in form resulted from shaping and progressing development of Gothic in the Polish borderland, which was influenced by timber buildings especially as far as details in churches were concerned. Unlike the Orthodox churches in Małomożejkwie and Synkowicze, the Orthodox church in Supraśl has a narrower nave, the bases of four side and corner towers are of smaller size in plan and are connected with the walls of the main object. Two main central columns are separate, and the remaining two are connected with the internal walls. All the columns are connected by wide vaulting and lofty Gothic arches. Narrowing the western and eastern facade with elongating the main building sets up the effect of the main vertical outline of the building.

The roof of the Orthodox church is more extended than in the churches in Synkowicze and Małomożejkwie, and the four towers rising above the roof and the central fifth tower perfectly harmonise with the character of the facades. The basic gable roof is dissected with a cover coming onto the side facades with load-bearing frontage. The central tower with the dome is organically con-

Centralna wieża z kopułą jest związana organicznie z wewnętrznym łańcem budynku i podziałem wnętrza świątyni i jest umieszczona na tym skrzyżowaniu dachu.

Cerkiew w Supraślu jest obiektem o bizantyjskim planie, gotyckiej konstrukcji cytadelowej i detalach przyjętych z cerkiewnego budownictwa drewnianego, charakterystycznego dla Rosji.

Cerkiew miała bizantyjski ołtarz z centralną absydą, co było wynikiem pochodzenia i źródeł założycieli klasztoru – mnichów sprowadzonych ze Świętej Góry Athos pierwotnie do Gródka, a następnie w 1498 r., po uzyskaniu zgody na przeniesienie klasztoru, do Supraśla. Budowę cerkwi Zwiastowania NMP rozpoczęto w 1505 r. pod patronatem metropolity kijowskiego Jonasza II. Cerkiew była duchowym centrum rodu Chodkiewiczów. W 1944 roku cerkiew została zburzona przez wycofujące się oddziały niemieckie.

Dzięki decyzji Synodu Biskupów Kościoła Prawosławnego w Polsce z 1984 r. świątynia jest odbudowywana. Z dokumentów ocalała jedynie fragmentaryczna inwentaryzacja wykonana przez Pokriszkina przed pierwszą wojną światową. Materiały te stanowiły podstawę do opracowania projektu architektonicznego, tak aby można było odtworzyć tę świątynię z zachowaniem wszystkich szczegółów i detali. Na tej podstawie opracowywano odpowiedni projekt konstrukcji budynku.

2. Wybrane elementy konstrukcji budynku

Na podstawie analizy dostępnej literatury, dokumentacji inwentaryzacyjnej obiektu oraz zachowanych zdjęć konstrukcję odbudowywanej świątyni zmodyfikowano w stosunku do jej pierwotnej formy. Szczególną uwagę objęto układ sklepień gwiaździstego, kryształowego i krzyżowych związanych z układem wsporczych łuków gotyckich i kolumn nośnych. Konstrukcja centralnej wieży z kopułą i jej połączenie z konstrukcją nośną oraz konstrukcja wyniosłego dachu gotyckiego o kształcie łukowym były przedmiotem analiz konstrukcyjnych. Oddzielnym zagadnieniem było posadowienie obiektu – jego wzmocnienie z uwagi na istniejące podziemie i katakumby ze szczątkami mnichów, założycieli i zarządców świątyni na przestrzeni wieków jej istnienia.

Zagadnienia związane z fundamentowaniem nie są ujęte w tej pracy. Praca analizuje problemy realizacji wybranych elementów konstrukcji świątyni. Na ryc. 1 przedstawiono świątynię po rekonstrukcji w jej obecnej formie i świątynię przed jej zburzeniem w 1944 roku.

Tradycyjny układ konstrukcji z centralną wieżą murowaną wspartą na układach łuków i podpierających je ścian i filarów murowanych przedstawiono na ryc. 2 zgodnie z jedyną ocalałą inwentaryzacją architektoniczną z 1911 roku.

Wymagania w zakresie obu stanów granicznych projektowania konstrukcji oraz przyjęte (wymuszone) z uwagi na koszty rozwiązania materiałowe spowodowały konieczność wykonania rusztu opartego na ścianach i słupach jako podstawy nośnej wieży. W ten sposób zmniejszono wielkość reakcji poziomych z łuków przekazywanych na ściany.

connected with the internal order of the building and the division of the church interior, and is situated on this intersection of the roof.

The Orthodox church in Supraśl has a Byzantine plan, Gothic citadel construction, and details adopted from Orthodox timber building characteristic for Russia.

The church had a Byzantine altar with a central apse, which resulted from the descent and sources of the monastery founders – monks brought from the Holy Mount Athos initially to Gródek and then in 1498, after obtaining official agreement for transferring the monastery, to Supraśl. Construction of the Orthodox church of the Annunciation to the Blessed Virgin Mary commenced in 1505, under the patronage of the Kiev metropolitan bishop Jonas II. The church was a spiritual centre for the Chodkiewicz family. In 1944, the church was destroyed by the retreating German troops.

By the decision of the Synod of Bishops of the Orthodox Church in Poland, made in 1984, the church is being rebuilt. A fragmentary inventory made by Pokriszkin before the World War I is the only preserved document. Those materials constituted the basis for preparing an architectonic project in such a way that the church could be recreated with all the details and elements preserved.

On such basis an appropriate project of the building construction has been prepared.

2. Selected elements of the building construction

On the basis of an analysis of available literature, inventory documentation of the object and preserved photographs, the construction of the rebuilt church was modified in relation to its original form. Particular attention was paid to the layout of stellar, diamond and groin vaults connected with the layout of supporting Gothic arches and load-bearing columns. The construction of the central tower with its dome and its connection with the load-bearing construction, and constructions of the lofty Gothic arch-shaped roof were the subject of construction analyses. A separate issue were foundations of the object – their reinforcement because of the existing cellars and the catacombs with remains of the monks, founders and managers of the church during the centuries of its existence.

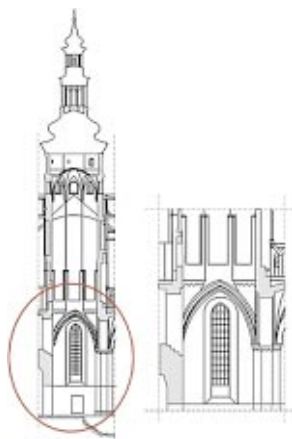
Issues connected with foundations have not been enclosed in this work. The work analyses problems encountered when realising selected elements of the church construction. Drawing no 1 presents the church after reconstruction in its present form, and the church before its demolition in 1944.

Traditional layout of the construction with a central masonry tower supported on sets of arches and walls and masonry columns supporting them was presented on drawing 2, according to the only preserved architectonic inventory from 1911.

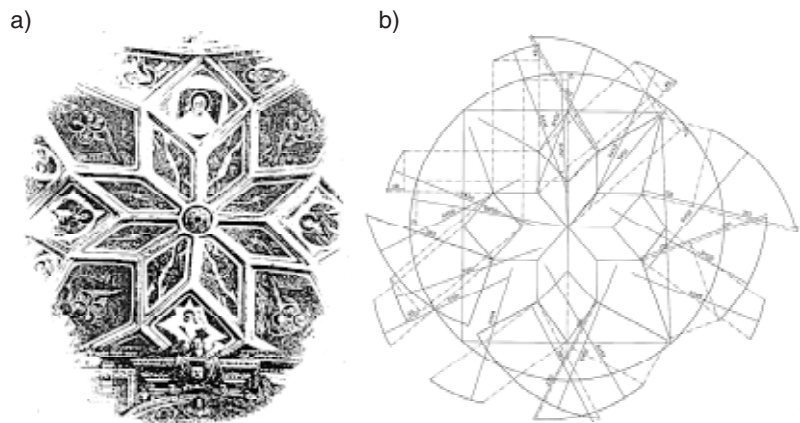
Requirements concerning both allowable capacity of the designed construction and the material solutions accepted (enforced) because of the cost, created the need for making a grid resting on walls and posts as the carrying base of the tower. In this way the magnitude of horizontal reactions from arches transferred onto the walls was reduced.



Ryc. 1. Cerkiew ZNMP w Supraślu: a) widok przed zburzeniem, b) ruiny po zburzeniu, c) stan obecny
 Fig. 1. The Orthodox church of the Annunciation in Supraśl: a) view before demolition, b) ruins after demolition, c) present state



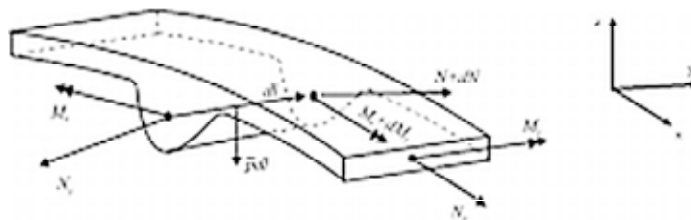
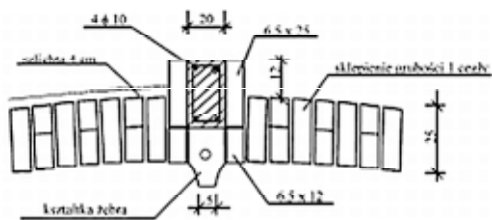
Ryc. 2. Tradycyjny układ wieży murowanej
 Fig. 2. Traditional layout of a masonry tower



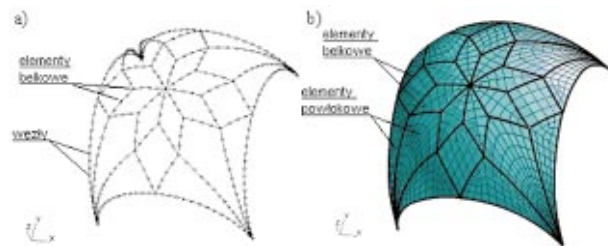
Ryc. 3. Zachowana fotografia oryginalnego sklepienia i odtwarzanie geometrii
 Fig. 3. Preserved photograph of the original vault and recreating its geometry (powłoka sferyczna = spherical shell; żebra = ribs)



Ryc. 4. Widok wykonanego sklepienia i układ elementów nośnych oraz model 3D konstrukcji powłoki
 Fig. 4. View of the executed vault and the arrangement of load-bearing elements, and a 3D model of the shell construction



Ryc. 5. Konstrukcja sklepienia i uogólniony układ sił w przekroju
 Fig. 5. Construction of the vault and generalised force system in cross-section (szlichta = cement screed; kształtka żebra = rib shaped stone; sklepienie grubości 1 cegły = 1 brick thick vault)



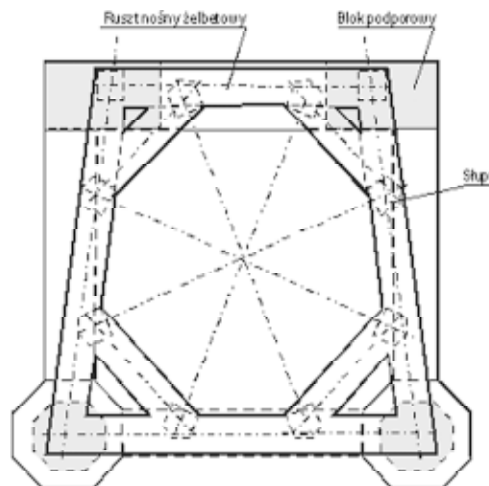
Ryc. 6. Numeryczny model konstrukcji przestrzennych żebier i uzebrowanej powłoki
 Fig. 6. Numerical models of a spatial rib construction and a ribbed shell (element belkowe = beam elements; węzły = knots; element powłokowe = shell elements)



Ryc. 8. Fragment konstrukcji sklepień i łuków
 Fig. 8. Fragment of vault and arch construction



Ryc. 7. Naprężenia główne w powłoce: a) powłoka o grubości 25 cm z osiadaniem podpór, b) sklepienie o grubości 12 cm
 Fig. 7. Principal stress in the shell: a) 25 cm thick shell with settling of supports, b) 12 cm thick vault



Ryc. 9. Układ rusztu nośnego wieży
 Fig. 9. System of the tower carrying grill (ruszt nośny żelbetowy = carrying reinforced concrete grill; blok podporowy = supporting block; słupy = posts)



Ryc. 10. Fragment konstrukcji wieży i zbrojenia rusztu wsporczo wieży
 Fig. 10. Fragment of the tower construction and reinforcement in the tower supporting grill

3. Układ sklepień, sklepienie gwiazdziste

Jednym z elementów konstrukcji był układ sklepień o tradycyjnej murowanej konstrukcji. Kształt elementów murowych wynikający z przebiegu sił wewnętrznych i detali architektonicznych w pierwotnej postaci był indywidualnie dobierany i wypalany. Rekonstrukcja z gospodarczą realizacją borykającą się z trudnościami w poszukiwaniu nakładów wymagała zastępczych rozwiązań. Odrębnym problemem było pozyskanie wymaganego rysunku i formy sklepienia z uwagi na niewystarczające informacje w zakresie formy i detali.

Posiadany, ocalały z pożogi wojennej materiał posłużył do studiów w zakresie kształtowania formy sklepienia. Wykonanie sklepienia w pierwotnej formie na obrysie nieregularnego czworoboku było dodatkowym utrudnieniem w procesie projektowania. Proces projektowania rozpoczął się od skanowania zachowanego zdjęcia sklepienia i wprowadzenia go do programu komputerowego [3], a kształtowanie architektoniczne i odpowiedni projekt opracował mgr inż. arch. Tomasz Rogala.

Przestrzenna konstrukcja sklepienia i detale architektoniczne uwzględniające nieregularności formy konstrukcji wymagały opracowania przestrzennego modelu konstrukcji w formie obliczeniowego modelu numerycznego pozwalającego na prześledzenie stanu naprężeń w sklepieniu. Zachowane fotografie oryginalnego układu sklepienia przed zburzeniem i schemat odtwarzania jego geometrii przedstawiono na ryc. 3. Na ryc. 4 przedstawiono widok wykonanego sklepienia gwiazdzistego wraz z elementami nośnymi łuków i fragmentem modelu przestrzennego konstrukcji.

4. Konstrukcja powłoki

Sklepienie analizowano jako uźebrowaną powłokę o konstrukcji murowej. Analizy stanu naprężeń w podobnych rodzajach konstrukcji można znaleźć w pracach [2] i [4], poświęconych nośności konstrukcji przestrzennych sklepień. Konstrukcje żeber i sklepienia pokazano na ryc. 5 wraz z uogólnionym układem sił w przekroju. Analizę sił w układzie wykonano za pomocą MES.

Uogólnione siły wewnętrzne [1] można ująć w postaci

$$\mathbb{W} = \{N_x, M_y, M_x, M_y, M_{xy}, Q_z, Q_{xy}\}^T$$

$$\mathbb{W} = \bar{\mathbb{D}} \cdot \varepsilon$$

gdzie $\bar{\mathbb{D}}$ – macierz sztywności.

Dokonano analizy układów konstrukcji sklepienia gwiazdzistego przyjmując dwa schematy [5] i [8]:

- przestrzenny prętowy układ żeber, dla którego obciążenie stanowi wypełnienie ceglanych sklepień międzyżebrowych będące obciążeniem,
- przestrzenny układ powłoki uźebrowanej jako trójwymiarową konstrukcję.

Na ryc. 6 przedstawiono oba analizowane schematy konstrukcji.

3. Vault layout, stellar vault.

One of the construction elements was an arrangement of vaults with traditional masonry construction. In the original version, masonry elements whose shape resulted from the distribution of internal forces, and architectonic details were individually selected and fired. With economic realisation struggling with difficulties in finding financial means, the reconstruction required substitute solutions. Still another problem was obtaining the required sketch and form of the vault because of insufficient information concerning its form and details.

Available material, rescued from the ravages of war, was used for studies concerning shaping the vault form. Building the vault in the original form on the outline of an irregular quadrangle was an additional difficulty in the designing process. The designing process started with scanning the preserved photograph of the vault and loading it into the computer programme [3], and architectonic forming and an appropriate project were prepared by mgr inż. arch. Tomasz Rogala.

The spatial construction of the vault and architectonic details taking into account irregularities of the construction required preparing a spatial model of the construction in the form of a computational numerical model allowing for observing the state of stress in the vault. Preserved photographs of the original layout of the vault before its destruction and the scheme of recreating its geometry were presented in figure 3. Figure 4 presents a view of the built stellar vault together with load-bearing elements of arches and a fragment of the construction spatial model.

4. Construction of the shell

The vault was analysed as a ribbed shell with masonry construction. The analysis of the state of stress in constructions of similar type can be found in the works [2] and [4], devoted to load capacity of spatial constructions of vaults. The constructions of ribs and the vault are shown in figure 5, together with a generalised force system in cross-section. The analysis of forces in the system was carried out using the MES programme.

Generalised internal forces [1] can be shown as follows:

$$\mathbb{W} = \{N_x, M_y, M_x, M_y, M_{xy}, Q_z, Q_{xy}\}^T$$

$$\mathbb{W} = \bar{\mathbb{D}} \cdot \varepsilon$$

where $\bar{\mathbb{D}}$ – rigidity matrix.

The analysis of construction systems for a stellar vault was conducted for two schemes [5] and [8]:

- spatial rod system of ribs, in which the load consists of filling in brick vaults between ribs constituting the load,
- spatial system of a ribbed shell as a 3D construction.

Figure 6 presents both analysed construction schemes.

W pierwszym przypadku układ równań miał postać

$$\mathbf{Kd} = \mathbf{P}$$

gdzie:

\mathbf{K} – macierz sztywności układu żeber,
 \mathbf{d} – wektor przemieszczeń,
 \mathbf{P} – wektor obciążeń.

W drugim przypadku układ równań uzupełniono o macierz sztywności powłok międzyżebrowych

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_b + \mathbf{K}_p$$

gdzie:

\mathbf{K}_b – macierz sztywności żeber,
 \mathbf{K}_p – macierz sztywności powłok.

W analizach uwzględniono następujące fazy pracy układu:

- obciążenie ciężarem własnym,
- obciążenie ciężarem własnym i zasypką,
- przemieszczenie podpór jako wynik wpływu nadbudowy (wieży) i osiadania na podpory sklepienia gwiaździstego.

Na ryc. 7 przedstawiono trajektorie naprężeń głównych układu powłokowego sklepienia dla wariantu grubości 25 cm i dla 12 cm między żebrami.

5. Centralna wieża z ustrojem nośnym

Pierwotnie murowaną wieżę wspartą na łukach przekazujących obciążenie na wewnętrzne słupy i układ ścian zastąpiono żelbetową przestrzenną ramą wychodzącą z rusztu żelbetowego.

Odciażyło to znacznie układ łuków zmniejszając ich reakcje rozporowe, nie zmniejszając obciążeń pionowych konstrukcji wsporczych [6].

Analiza konstrukcji tradycyjnie murowanej nie spełnia warunków stanów granicznych nośności i użyteczności przy zastosowaniu określonych rozwiązań materiałowych. Również powstające rozpory łuków uzyskane z analizy przestrzennej całego układu prowadziły do przekroczenia stanu granicznego nośności ścian podpierających łuki.

Konstrukcję wieży zaprojektowano jako przestrzenną ramę żelbetową wbudowaną w tradycyjną konstrukcję murową o geometrii i układzie dostosowanym do tradycyjnej rekonstruowanej wieży cerkwi. Schemat rusztu nośnego centralnej wieży przyjęto dla geometrii wynikającej z historycznego, pierwotnego układu konstrukcji wsporczej, utrzymując asymetrię w planie jako rezultat rzeczywistego odwzorowania murowanej cerkwi XVI-wiecznej.

Na ryc. 9 przedstawiono układ rusztu nośnego centralnej wieży, a na ryc. 10 przedstawiono konstrukcję wieży.

6. Podsumowanie

Wymagania w zakresie stanu granicznego nośności i użyteczności oraz zastosowane materiały ukształto-

In the first case the equation system was

$$\mathbf{Kd} = \mathbf{P}$$

where:

\mathbf{K} – rib system rigidity matrix,
 \mathbf{d} – displacement vector,
 \mathbf{P} – load vector.

In the other case the rigidity matrix for shells between ribs was added to the equation system

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_b + \mathbf{K}_p$$

where:

\mathbf{K}_b – rib rigidity matrix,
 \mathbf{K}_p – shell rigidity matrix.

The analyses took into consideration the following phases of the system work:

- dead weight load,
- load of dead weight and backfill,
- displacement of supports as a result of the impact of superstructure (the tower) and the stellar vault settling onto the supports.

Figure 7 presents trajectories of principal stress in the shell system of the vault which is 25 cm thick and ribs density equals 12 cm.

5. Central tower with its carrying system

The original masonry tower supported on arches transferring load onto the internal posts and a system of walls was replaced with reinforced concrete spatial frame coming out from a reinforced concrete grill.

It significantly lifted the load off the system of arches decreasing their thrust reactions, but without decreasing vertical load on supporting structures [6].

The analysis of a traditionally built masonry construction does not fulfil the conditions of allowable load capacity and usability if certain material solutions are applied. Also the thrust of arches obtained in the spatial analysis of the whole system led to exceeding allowable load capacity of walls supporting the arches.

The tower construction was designed as a reinforced concrete spatial frame built into the traditional masonry construction with geometry and layout adapted to the reconstructed traditional Orthodox church tower. The scheme of the carrying grill of the central tower was accepted for geometry resulting from an original historic layout of the supporting structure, maintaining its asymmetric plan as the effect of a real representation of a masonry Orthodox church from the 16th century.

Figure 9 presents the layout of the carrying grill of the central tower, and figure 10 presents the tower construction.

6. Summary

Requirements concerning the allowable load-bearing capacity and usability and the materials used, appro-

wały odpowiednio rozwiązania projektowe odtwarzanych konstrukcji obiektów sakralnych:

- ruszt nośny z wieżą żelbetową nadbudowy oparto na tradycyjnej konstrukcji nośnej,
- analiza obliczeniowa uwzględniła rzeczywiste schematy i fazy pracy konstrukcji, a w przypadku elementów typu przekryć powłokowych również wpływ czynników związanych z wymuszonymi przemieszczeniami,
- przyjęte rozwiązania podporządkowane są wymogom wynikającym z historycznej formy, przeznaczenia budynku, zastosowanych materiałów i spełniają warunki obu stanów granicznych.

priately determined project solutions for recreated constructions of church objects:

- load-bearing grill with the reinforced concrete of the superstructure was supported on a traditional carrying construction,
- computational analysis took into account real schemes and phases of construction work, and in the case of elements such as shells also the impact of factors associated with enforced displacement,
- adopted solutions are subordinate to the requirements resulting from the historical form, function of the building, used materials and fulfil the conditions of both allowable capacity limits.

Literatura

- [1] Zienkiewicz O.C., *Metoda Elementów skończonych*. Arkady, Warszawa 1972.
- [2] Baratta A., Corbi O., *Analysis of Masonry Vaulted Systems: The Barrel*. Vth International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, November 6-8, 2006, New Delhi, India.
- [3] Rogala T., Malesza M., Syczewski M., *Rekonstrukcja sklepień gwiazdzystych w cerkwi Zwiastowania w Supraślu*. Konferencja Naukowo-Techniczna Budownictwo Sakralne '96. Białystok, 10-11 maja 1996.
- [4] Molins L., Roca P., *Capacity of masonry arches and spatial frames*. Journal of Structural Engineering, 124 (6), 1998.
- [5] Malesza M., Miedzialowski C., *The modern methods analyses in reconstruction of the historical buildings*. Vth International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, November 6-8, 2006, New Delhi, India.
- [6] Malesza M., Miedzialowski C., *Influence of misapplication in reconstruction on durability of historic buildings*. XIIth Science and Technology Conference REMO 2006, Wrocław – Kliczków, 6-8 grudnia 2006.
- [7] Malesza M.: *Projekt konstrukcyjny rekonstrukcji cerkwi pw. Zwiastowania NMP w Supraślu*. 1984-1992.
- [8] Malesza M., Miedzialowski C., *Static analysis and construction of 3D spatial ribbed and panel gothic vault*. IASS-ICAM 2000, Athens, Greece, 2000.

Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia rekonstrukcji obronnej cerkwi gotyckiej pw. Zwiastowania Najświętszej Marii Panny w Supraślu. Problem przedstawiono głównie od strony rekonstrukcji sklepienia gwiazdzystego. Na wstępie podano rys historyczny obiektu, okoliczności jego zniszczenia i materiały archiwalne, które posłużyły do prac rekonstrukcyjnych. Następnie podano zagadnienia współczesnego kształtowania tego typu sklepień i analizę statyczną. Przedstawiono model obliczeniowy konstrukcji i wariantowe rozkłady naprężeń głównych w powłoce. Podano również sposób kształtowania centralnej wieży znajdującej się nad sklepieniem. Na zakończenie pokazano niektóre etapy realizacji łuków sklepienia i wieży.

Abstract

The article presents selected issues from the process of reconstruction of a defensive Gothic Orthodox church dedicated to the Annunciation to the Blessed Virgin Mary in Supraśl. The problem was presented mainly from the angle of reconstruction of the stellar vault. At the beginning a historical outline of the object has been presented, with the circumstances in which it was destroyed, and archive materials which were used for reconstruction work. Then issues concerning modern forming of such vaults were listed together with a static analysis. The computational model of the construction and variance distribution of principal stress in the shell have been presented. The manner of forming the central tower situated above the vault is also presented. Finally, some stages of realisation of the vault and tower arches are shown.