

Jerzy Jasieńko, Tomasz Nowak, Piotr Mroczek, Łukasz Bednarz

Konserwacja konstrukcyjna z użyciem nowych technik na przykładzie kościoła pw. św. Anny w Ząbkowicach Śląskich

Construction conservation using new technologies on the example of St. Anna's Church in Ząbkowice Śląskie

1. Wprowadzenie

W ciągu ostatnich lat można zaobserwować wzrost zainteresowania nowymi technologiami przydatnymi w konserwacji konstrukcyjnej obiektów zabytkowych. Utrzymanie w stanie przydatności konstrukcji historycznych, które uległy częściowej lub znacznej destrukcji, to zagadnienie, z którym coraz częściej muszą mierzyć się inżynierowie konstruktorzy.

Ze względu na specyfikę budowli zabytkowych dobór metod konserwacji konstrukcyjnej powinien uwzględniać bezpieczeństwo konstrukcji i jej użytkowników, brać pod uwagę specyfikę obiektu, a także pozostać w zgodzie z doktrynami konserwatorskimi.

Jeśli techniki tradycyjne okazują się nieefektywne, to istnieje możliwość wzmocnienia obiektów zabytkowych z wykorzystaniem nowoczesnych technik konserwatorskich, budowlanych i inżynierskich. Rozwiązanie takie może być stosowane tylko wtedy, gdy poparte jest badaniami naukowymi oraz doświadczeniem i zachowuje zasady doktryny konserwatorskiej [1-3].

Istotnym aspektem jest też zrozumienie, że obiekt zabytkowy powinien nieprzerwanie trwać, a możliwość kompleksowej konserwacji nie zdarza się często. Dlatego też przyjęte rozwiązania powinny uwzględniać działania zjawisk opóźnionych (reologia materiałów). Dopuszcza się zatem np. przewymiarowanie przekrojów konstrukcyjnych, które miało również miejsce w fazie wznoszenia obiektów [4-5].

2. Założenia oraz ogólna charakterystyka obiektu

Kościół wzniesiony w latach 1354-1415 stanowi cenny zabytek. Jako nadrzędne kryterium w remoncie kościoła przyjęto jego znaczną wartość zabytkową. Prace

1. Introduction

Within the last few years increased interest in new technologies useful for construction conservation of historical objects could be observed. Maintaining historical construction, which were either partially or largely destroyed, in the state of usefulness is an issue that construction engineers have to address more and more frequently.

Because of the specificity of historical buildings, the choice of construction conservation methods should take into account the safety of construction and its users, the object specificity, and remain in accordance with conservation doctrines.

If traditional techniques appear ineffective, then there is a possibility of strengthening historical objects using modern conservation, building and engineering techniques. Such a solution can be applied only when it has been supported by scientific research and experience, and when it adheres to the principles of the conservation doctrine [1-3].

A significant aspect is also the understanding that a historical object should last incessantly, and the possibility of complex conservation does not occur often. That is why the approved solutions should take into account delayed phenomena (rheology of materials). Therefore e.g. re-dimensioning of construction cross sections which also took place during the erection phase of the object is acceptable [4-5].

2. Assumptions and general characteristics of the object

The church erected in the years 1354-1415 is a valuable historical object, so its significant historic value was approved as the superior value in the church ren-

zaprojektowano w taki sposób, aby pozostawić wszystkie niezniszczone elementy drewniane, elementy uszkodzone oczyścić do nieuszkodzonego drewna i zabezpieczyć, a w elementach zniszczonych częściowo wymienić tylko zniszczone fragmenty. Uszkodzone elementy murowe postanowiono wzmocnić i zabezpieczyć. Jako podstawową zasadę we wszystkich pracach przyjęto maksymalne utrzymanie istniejącej substancji historycznej.

Kościół pw. św. Anny jest usytuowany w centrum Ząbkowice Śląskich, w bezpośrednim sąsiedztwie „krzywej wieży”. Jest to kościół gotycki o konstrukcji murywanej, z niską wieżą przylegającą od południa do prezbiterium. Kościół trójnawowy z wyodrębnionym prezbiterium, które od wschodu zamknięte jest trójbocznie. Od północy do prezbiterium przybudowana jest zakrystia oraz kruchta boczna (ryc. 1). Prezbiterium kościoła przekryte jest żebrowanymi sklepieniami ceglany. Nad prezbiterium znajduje się pięciospadowy dach stromy, kryjący także, przy mniejszych spadkach, przybudowaną zakrystię i kruchtę boczną.

3. Więźba dachowa

3.1. Stan konstrukcji dachu

Obiekt przekryty jest dachem pięciospadowym o dużym spadku. Połacie dachu wykazywały niewielkie odkształcenia, natomiast znaczne odkształcenia występowały w kalenicy. Połacie dachu kryte są dachówką ceramiczną ułożoną na łątach.

Więźba dachowa wysoka, czterokondygnacyjna. W skład więźby wchodziły słupy (stolce) leżące oparte na tramach, które z kolei opierają się na ścianach (ryc. 2). Jętki znajdują się w 3 poziomach (ryc. 3, 4). Co trzeci wiązar jest wiązarem głównym. Połączenia elementów realizowane są przez połączenia ciesielskie z użyciem kołków drewnianych.

Liczne elementy więźby były splekane podłużnie, a niektóre ukośnie, ponadto niektóre elementy były znacznie ugięte. W połączeniach na jaskółczy ogon występowały luz między elementami, brakowało licznych kołków drewnianych, a część elementów było wysuniętych z gniazd. Ponadto w połączeniach na jaskółczy ogon część czopów zostało zniszczonych przez grzyby lub owady – kołatki. Niektóre jętki w połączeniach były zniszczone przez grzyby, występowały głębokie ubytki drewna lub partia przywęzłowa zupełnie się nie zachowała (ryc. 5).

Zniszczone jętki częściowo wzmocniono jedno- lub dwustronnymi nakładkami drewnianymi z wykorzystaniem połączeń na śruby (ryc. 5). W przypadku nielicznych krokwi została wymieniona dolna partia, w miejscu oparcia na płatwi zastosowano zbyt krótkie połączenie na zakład i nie zastosowano elementów łączących (ryc. 6).

Liczne krokwie, zwłaszcza w połaci północnej, w dolnej i środkowej partii, wykazywały na znacznej długości głębokie zniszczenia przez owady – kołatki. Zniszczone krokwie były wzmocnione obustronnymi przykładkami drewnianymi, łączonymi na śruby. W połaci południowej w krokwi zlokalizowane było ognisko głębokiego zniszczenia przez grzyby. W części słupów

owation process. The labour was designed in such a way as to leave all the undamaged wooden elements, to clean the damaged elements down to the undamaged timber and secure them, or to change only the damaged fragments in the partially damaged elements. Damaged masonry elements were to be reinforced and secured. Maximum preservation of the existing historic substance was approved as the basic principle in all kinds of work.

The church of St. Anna is situated in the centre of Ząbkowice Śląskie, directly in the vicinity of the “leaning tower”. It is a Gothic church with masonry construction and a low tower adjacent to the presbytery on the south side. It is a three – nave church with a distinct presbytery enclosed with three walls in the east. In the north a vestry and a side porch were added to the presbytery (fig. 1). The church presbytery is covered with ribbed brick vaults. Over the presbytery there is a five-plane pitched roof which also covers, though at a lesser gradient, the added vestry and side porch.

3. Roof truss

3.1. State of the roof construction

The object is covered with a high-pitched five-plane roof. Hipped roof ends showed slight deformations, while serious deformations were observed in the roof ridge. Roof slopes were covered with ceramic roof tiles laid in patches.

Rafter framing is 4-storey high and consists of posts supported on chords, which in turn rest on walls (fig. 2). Collar beams can be found on three levels (fig. 3, fig. 4). Every third roof truss is the main roof truss. Elements are joined using carpentry fastenings with the use of wooden pegs.

Numerous elements of rafter framing were cracked lengthwise, and some diagonally; moreover, some elements were seriously bent. In dovetail joints there was backlash between elements, numerous wooden pegs were missing, and some elements had slipped out of their sockets. Moreover in dovetail joints several tenons were damaged by fungi or insects – common house borers. Some collar beams in joints were practically destroyed by fungi, there were deep cavities in wood, or the joint section had been completely destroyed (fig. 5).

Damaged collar beams were partially reinforced with one- or double-side wooden cover plates fixed with bolts (fig. 5). In case of the few rafters, the lower section was replaced, a too short lap joint was used in the place where it was resting on the purlin, and no combining elements were used (fig. 6).

Numerous rafters, particularly in the lower and middle section of the north roof plane, showed serious damage on considerable surface caused by the insects – common house borer. Damaged rafters were strengthened with double-side wooden cover plates fixed with bolts. The hotbed of serious damage caused by fungi was located in the rafters of the south roof plane. Extensive damage caused by the insects – common house borer, involving substantial loss of wood was observed in the lower sections of some posts. Some chords in the support area, in the lower part of their cross-sections were seriously damaged by fungi.

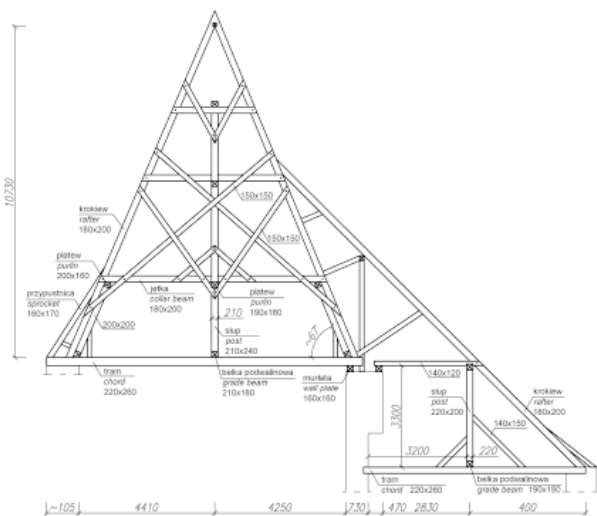
w dolnych partiach zaobserwowano głębokie zniszczenia przez owady – kołatki ze znacznymi ubytkami drewna. Część tramów w strefie przypodporowej, w dolnych strefach przekrojów, było głęboko zniszczonych przez grzyby.



Ryc. 1. Prezbiterium kościoła – widok od strony północno-wschodniej. Przybudówka mieszcząca zakryście
Fig. 1. The church presbytery – view from the north – east. The extension housing the vestry



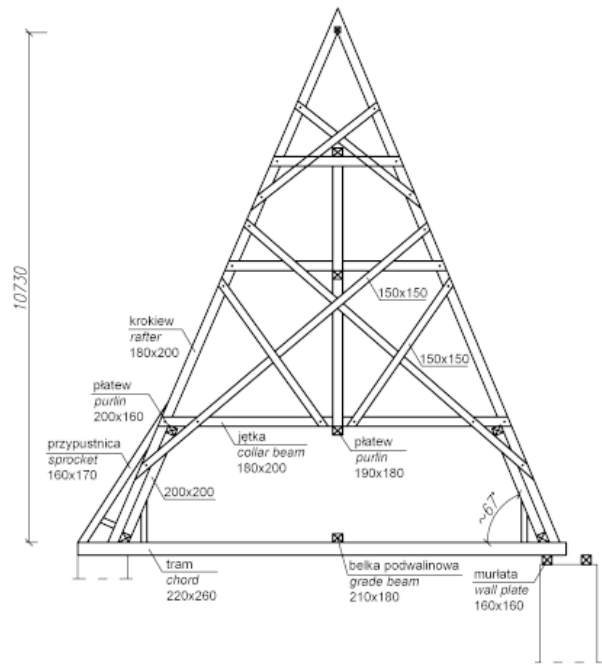
Ryc. 2. Widok ogólny konstrukcji dachu nad prezbiterium. Po bokach słupy (stolce) leżące, środkiem słupy posadowione na podciągu podłużnym leżącym na tramach
Fig. 2. General view of the roof construction over the presbytery. On the sides reclining posts, in the centre posts resting on a binding joist lying on chords



Ryc. 3. Wiązar pełny nad przybudówką
Fig. 3. Full truss over the extension

3.2. Renovation of rafter framing

Static calculations of rafter framing and testing boundary values for load-carrying ability and usability were carried out using the Robot Structural Analy-



Ryc. 4. Wiązar pośredni
Fig. 4. Intermediate truss



Ryc. 5. Jętka wzmocniona jednostronną nakładką drewnianą łączoną za pomocą śrub. Przekrój jętki w połączeniu całkowicie zniszczony przez grzyby
Fig. 5. Collar beam strengthened with a one-side wooden cover plates fixed with bolts. Cross section of the collar beam in the joint completely destroyed by fungi



Ryc. 6. Niewłaściwe połączenie w miejscu sztukowania krokwi na płatwi
Fig. 6. Incorrect joining in the place where rafter was lengthened on the purlin

3.2. Remont więźby dachowej

Obliczenia statyczne więźby dachowej oraz sprawdzenie stanów granicznych nośności i użyteczności przeprowadzono przy użyciu programu Robot Structural Analysis 2009 na podstawie normy PN-B 03150:2000 [6].

Ze względu na przewidywane niewielkie wyętie elementów więźby dachowej nie podjęto oceny klasy zastosowanego drewna konstrukcyjnego przy użyciu metod laboratoryjnych (badanie wytrzymałościowe próbek drewna) lub połowych nieniszczących (np. badanie przy użyciu rezystografu) [7-9].

Do obliczeń przyjęto, wg [6], drewno klasy C22 jak dla tarcicy klasy gorszej jakości zgodnie z relacjami sortowniczymi wg PN-D 94021:1982 [10] w stosunku do klas wytrzymałościowych wg PN-EN 338:2004 [11].

Poniżej przedstawiono schematy statyczne i wyętie poszczególnych prętów (ryc. 7-10).

Obliczenia statyczne więźby dachowej wykazały maksymalne wyętie elementów więźby na poziomie 52%, zatem nie zachodziła konieczność wzmacniania więźby z uwagi na nośność konstrukcji. Konieczne było natomiast przywrócenie nośności przekrojów elementów drewnianych w przekrojach zniszczonych i w przekrojach połączeń.

Ze znacznych zniszczeń więźby wynikał duży zakres prac remontowych, obejmujący wymianę wielu zniszczonych elementów, w tym krokwi, wymianę zniszczonych końców partii elementów, odtworzenie zniszczonych połączeń ciesielskich częściowo niedostępnych pod pokryciem, oraz oczyszczenie i impregnację wszystkich elementów.

Niezbędne było odciążenie konstrukcji przy wymianie elementów więźby. Zrealizowano je poprzez zdjęcie pokrycia dachu. Pokrycie dachów nad prezbiterium i jego przybudówkami zdejmowano partiami, sukcesywnie w miarę postępu prac. Odkryte części dachu chroniono przed możliwością zalania grubymi foliami. Pokrycie zdejmowano równomiernie na wszystkich połaciach dachu, w sposób zapewniający symetryczne obciążenie. Inny sposób zdejmowania pokrycia mógłby skutkować awarią konstrukcji więźby.

Po zdjęciu pokrycia usunięto odkształcenia połaci dachu przez wymianę odkształconych i przemieszczonych elementów. Wymianę i uzupełnienie zniszczonych części stosowano w przypadku elementów długich. Zniszczone krótkie elementy wymieniono w całości.

Wszystkie zniszczone i ugięte elementy więźby dachowej oraz elementy splekane ukośnie wymieniono na elementy o identycznym przekroju jak pierwotnie istniejące. Elementy brakujące uzupełniono. Elementy nowe opierano i łączono z elementami istniejącymi na połączenia ciesielskie, starannie dopasowując nowe elementy do istniejących gniazd, co jest warunkiem prawidłowego przenoszenia obciążeń przez te połączenia. W połączeniach uzupełniono brakujące kołki dębowe, obłuzowane dobito, a uszkodzone wymieniono. Wszystkie nowo wykonywane połączenia ciesielskie wykonano z użyciem kołków dębowych. Luzy występujące między elementami w połączeniach wypełniono szczelnie elementami drewnianymi wklejanymi za pomocą kompozycji na bazie żywicy epoksydowej.

sis 2009 programme on the basis of the standard PN-B 03150:2000 [6].

Because of the predicted slight effort of the rafter framing elements, no evaluation of the class of the used construction timber was carried out with the use of laboratory methods (strength tests of wood samples) or field non-invasive methods (e.g. tests with the use of resistograph) [7-9].

Assumptions for calculations were made acc. to [6], wood of class C22 as for timber of lower quality in accordance with sorting relations acc. to PN-D 94021:1982 [10] compared to strength classes acc. to PN-EN 338:2004 [11].

Static and effort diagrams for individual rods are presented below (fig. 7-10).

Static analysis of rafter framing showed maximum effort of the framing elements at the level of 52%, so there was no need to reinforce the rafter framing because of its load-carrying capacity. However, it was necessary to restore the load-carrying capacity of the intersections of timber elements in the damaged and joint intersection.

Significant damage of the rafter framing resulted in the large scale of renovation work, encompassing replacement of many destroyed elements including rafters, replacement of damaged end sections of elements, recreating destroyed carpenter joints partially inaccessible under the roof covering, as well as cleaning and impregnation of all elements.

When replacing rafter framing elements it was necessary to relieve the construction, which was realized by removing the roof covering. The roof covering over the presbytery and its extensions was taken off in segments, successively as the work progressed. The uncovered sections of the roof were protected against the possibility of flooding with thick plastic sheets. Roof covering was taken off uniformly on all roof planes, so as to ensure symmetric load. A different way of removing the roof covering may have resulted in damaging the rafter framing construction.

After taking off the roof covering, deformations in the roof planes were also removed by replacing the deformed and dislocated elements. Replacement and filling in the damaged sections was used in the case of long elements. Damaged short elements were replaced whole.

All the damaged and bent elements of rafter framing and diagonally cracked elements were replaced with elements identical in intersection as the originally existing. Missing elements were filled in. New elements were rested on and joined with the already existing elements using carpenter joints and carefully fitting new elements to the existing sockets, which is the condition for appropriate load bearing by those joints. In the joints the missing oak pegs were filled in, the loose ones were driven in, and the damaged ones were replaced. All the new carpenter joints were made with the use of oak pegs. Backlash between the elements in joints was filled in tight with wooden elements glued with a composite made on the basis of epoxy resin.

Engineer fastenings of elements with bolts and GEKA cogged rings using wooden cover plates were made where necessary. Such solutions allow for preserving the his-

W przypadkach koniecznych wykonano inżynierskie połączenia elementów na śruby i pierścienie zębate GEKA z użyciem nakładek drewnianych. Takie rozwiązanie pozwala zachować wartość historyczną obiektu przez pozostawienie wszystkich oryginalnych, przydatnych konstrukcyjnie fragmentów.

Uszkodzone elementy oczyszczono do nieuszkodzonego drewna. W przypadku gdy przekrój elementu po oczyszczeniu był zbyt mały, element wzmocniono obustronnymi nakładkami drewnianymi.

Wymieniono niewłaściwie wykonane wcześniej wzmocnienia krokwi, płatwi i innych elementów, czyli takie, gdzie nie usunięto zniszczonych partii elementów, a jedynie je wzmocniono, pozostawiając zainfekowane drewno oraz takie, gdzie połączenia elementów uzupełnionych wykonano ze zbyt małą liczbą śrub.

Elementy nowo wbudowywane oraz istniejące, po oczyszczeniu, impregnowano preparatem przeciw biokorozji i zabezpieczono środkiem ognioochronnym.

4. Sklepienia ceglane

4.1. Stan sklepień nad prezbiterium

Nad prezbiterium znajduje się sklepienie żebrowe z lunetami. Wysklepki sklepienia są otynkowane i wykonane z cegły ceramicznej pełnej na zaprawie wapiennej. Od dołu sklepienia znajdują się żebra z kształtek ceramicznych. Od góry istnieją żebra poprzeczne, usztywniające, wykonane z cegły ceramicznej pełnej na zaprawie wapiennej, o szerokości 1,5 cegły i wysokości 1 cegły ponad grzbiet sklepienia. Żebra przebiegają między ścianami w przekrojach nad pachami sklepienia. Sklepienie od góry (z wyjątkiem żeber) pokryte było gładzią cementową z dodatkiem wapna. Górna powierzchnia sklepienia, jak i górne żebra wykazywały znaczne asymetrie (ryc. 11).

Od dołu widoczne były niewielkie odkształcenia wysklepek oraz żeber. W sklepieniu występowały pęknięcia wysklepek zarówno wzdłuż klucza lunety, jak i skośnie (ryc. 12). Ponadto występowały pęknięcia żeber dolnych przebiegające przez spoiny.

4.2. Wzmocnienie sklepień

Uszkodzone i spękanne łuki, sklepienia i kopuły kościołów, pałaców, budynków bramnych, mostów i budynków mieszkalnych można naprawiać i wzmocniać wieloma sposobami, opisanymi np. w [5, 12-14]. Do najczęściej spotykanych i stosowanych metod wzmocnienia zakrzywionych konstrukcji ceglanych należą:

- ściagi,
- powłoki żelbetowe,
- wklejane i doklejane blachy i pręty stalowe,
- konstrukcje drewniane lub stalowe umożliwiające podwieszenie żeber i wysklepek ceglanych,
- maty, taśmy i siatki z materiałów kompozytowych FRP (*Fibre Reinforced Polymers*),
- inne: iniekcje, impregnacje, przemurowania.

Materiały tradycyjnie stosowane do wzmocnienia konstrukcji murowych to stal, beton oraz zaprawy wapienne i cementowe. W przypadku konieczności znacznego podniesienia nośności wzmocnianej konstrukcji stosuje się głównie materiały kompozytowe, których naj-

torialną wartość obiektu przez pozostawienie wszystkich oryginalnych fragmentów użytecznych w budownictwie.

Uszkodzone elementy były szlifowane do momentu, aż nieuszkodzone drewno było osiągnięte. W przypadkach, gdy przekrój elementu po czyszczeniu był zbyt mały, element wzmocniono dwustronnymi nakładkami drewnianymi.

Wzmocniono niewłaściwie wykonane wcześniej wzmocnienia krokwi, płatwi i innych elementów, czyli takie, gdzie nie usunięto zniszczonych partii elementów, a jedynie je wzmocniono, pozostawiając zainfekowane drewno oraz takie, gdzie połączenia elementów uzupełnionych wykonano ze zbyt małą liczbą śrub.

Elementy nowo wbudowywane oraz istniejące, po oczyszczeniu, impregnowano preparatem przeciw biokorozji i zabezpieczono środkiem ognioochronnym.

4. Brick vaults

4.1. State of vaults of the presbytery

Over the presbytery there is a ribbed vault with lunettes. Vault squinches are plastered and made from full ceramic brick laid on lime mortar. On the underside of the vault there are ribs made from ceramic shapes. Above there are crosswise stiffening ribs made from full ceramic brick laid on lime mortar, 1.5 brick wide and 1 brick high above the vault ridge. The ribs run between walls in intersections over the vault spandrels. On the top the vault was covered with cement finishing coat with lime addition (except the ribs). The upper surface of the vault as well as the upper ribs showed significant asymmetry (fig. 11).

Slight deformations of squinches and ribs were visible from below. Cracks in squinches occurred in the vault both along the lunette keystone and diagonally (fig. 12). Moreover, there were there were cracks which ran through the joints in lower ribs.

4.2. Vault reinforcement

Damaged and cracked arches, vaults and domes of churches, palaces, gateways, bridges and residential buildings can be repaired and reinforced in many ways described e.g. in [5, 12-14]. The most frequently encountered and applied methods of reinforcing curved brick constructions are:

- bowstrings,
- reinforced concrete coatings,
- steel sheets and rods glued in and on,
- timber or steel constructions allowing for suspending ribs and brick squinches,
- mats, tapes and meshes from FRP (*Fibre Reinforced Polymers*) composite materials,
- other (injections, impregnations, walling over).

Materials traditionally used for reinforcing masonry constructions are steel, concrete and lime and cement mortar. In cases where it is necessary to significantly increase the load-carrying ability of the reinforced construction, composite materials are mainly applied since their most important property is high ratio of strength to mass as well as easy transport and assembly.

Recently the technology of strengthening historic brick constructions with composites with epoxy matrix

istotniejszą zaletą jest wysoka wartość stosunku wytrzymałości do masy oraz łatwy transport i montaż.

Ostatnio wprowadza się technologie wzmacniania zabytkowych konstrukcji ceglanych kompozytami z matrycą epoksydową (SRP – *Steel Reinforced Polymer*) lub mineralną (SRG – *Steel Reinforced Grout*) zbrojoną włóknami stalowymi wykonanymi ze stali o podwyższonej wytrzymałości (UHTSS – *Ultra High Tensile Strength Steel*). O ich przydatności decydują bardzo dobre parametry techniczne oraz stosunkowo proste metody wytwarzania i względnie niska cena.

Materiały kompozytowe FRP są coraz częściej używane do wzmacniania i naprawy całych konstrukcji murowych, jak i ich poszczególnych elementów (takich jak łuki, sklepienia i kopuły), szczególnie jeśli chodzi o konstrukcje historyczne, których zachowanie w stanie użytkowym jest ważne ze względów kulturowych.

Kompozyty zbrojone włóknami aramidowymi (AFRP) zastosowano do wzmocnienia i przywrócenia nośności sklepień w bazylice św. Franciszka w Asyżu, po tym jak zostały one zniszczone w wyniku trzęsienia ziemi i wymagały natychmiastowej interwencji z uwagi na stan pozostałych, zachowanych sklepień [15]. W kolejnych latach coraz częściej zaczęto stosować kompozyty do wzmacniania łuków, sklepień i kopuł. Powstały realizacje głównie we Włoszech [16], ale również i w Polsce: wzmocnienie sklepienia kolebkowego w kościele św. św. Piotra i Pawła w Krakowie, wzmocnienie kopuły katedry w Lublinie, wzmocnienie łuków i sklepień Muzeum Archeologicznego w Krakowie. Badania nad statyką konstrukcji łuków wzmocnionych przedstawiono m.in. w [15]. Badano obciążane statycznie łuki ceglane wzmocnione taśmami FRP. Wyniki badań dość jednoznacznie wskazują na przydatność zastosowania tego rodzaju wzmocnień przy naprawie zakrzywionych elementów murowanych z cegły. Podobne badania nad zachowaniem konstrukcji ceglanych wzmocnionych przy użyciu FRP przedstawiono w [17]. Wpływ różnego rodzaju włókien (węglowe, szklane) zbrojących oraz umiejscowienie materiałów FRP (po stronie wewnętrznej i zewnętrznej sklepienia) zweryfikowano doświadczalnie. Uzyskane wyniki badań pozwoliły określić mechanizm zniszczenia wzmocnionych łuków i zdefiniować modele analityczne.

Modele zniszczenia wraz z powstałymi przegubami oraz wyniki przeprowadzonych badań świadczą o przydatności stosowania tego typu wzmocnień w ceglanych konstrukcjach łukowych. Poważnym problemem jest zapewnienie zakotwienia materiałów FRP używanych do wzmacniania zakrzywionych konstrukcji ceglanych od strony podniebienia. W przypadku braku takich zakotwień następuje odspojenie materiału wzmacniającego od konstrukcji, co prowadzi do niewykorzystania jego przekroju. Próby modelowania analitycznego łuków i sklepień ceglanych podjęto także w [18].

Dokumentem przydatnym do projektowania i konstruowania wzmocnień konstrukcji przy użyciu materiałów FRP jest włoska instrukcja CNR DT 200/2004 [19].

Przedstawiony krótki opis przeprowadzonych na świecie badań pokazuje, że zagadnienie stosowania innowacyjnych technologii wzmacniania historycznych łuków i sklepień ceglanych (szczególnie z zastosowaniem innowacyjnych materiałów) nie jest szczegółowo poznane.

(SRP – *Steel Reinforced Polymer*) or mineral one (SRG – *Steel Reinforced Grout*) reinforced by steel fibres made from UHTSS (*Ultra High Tensile Strength Steel*) has been introduced. Very good technical parameters, relatively simple production methods and a fairly low price have decided about their usability.

FRP composite materials are more and more frequently used for strengthening and repairing whole masonry constructions as well as their particular elements (such as arches, vaults or domes), especially when historic constructions are concerned whose preservation in a state of utility is essential for cultural heritage reasons.

Composites reinforced with aramid fibres (AFRP) were used to strengthen and restore the load-bearing ability of the vaults in the basilica of St. Francis in Assisi, after they had been ruined during the earthquake and required immediate intervention because of the condition of the remaining preserved vaults [15]. During the following years composites were more and more frequently used for reinforcing arches, vaults and domes. The following projects were realised mainly in Italy [16], but also in Poland: strengthening the barrel vault in the Church of St. Peter and St. Paul in Krakow, strengthening the dome of the Cathedral in Lublin, strengthening the arches and vaults in the Museum of Archaeology in Krakow. Research concerning the statics of the reinforced arch construction was presented e.g. in [15]. Statically loaded brick arches reinforced with FRP tapes were tested. Test results fairly unambiguously indicated the usability of that kind of reinforcement for repairing curved masonry elements made from brick. Similar research on behaviour of brick constructions reinforced with FRP was presented in [17]. The influence of diverse reinforcing fibres (carbon, glass) and placement of FRP materials (on the outside or inside of the vault) was empirically verified. Obtained test results allowed for identifying the destruction mechanism of reinforced arches and defining analytical models.

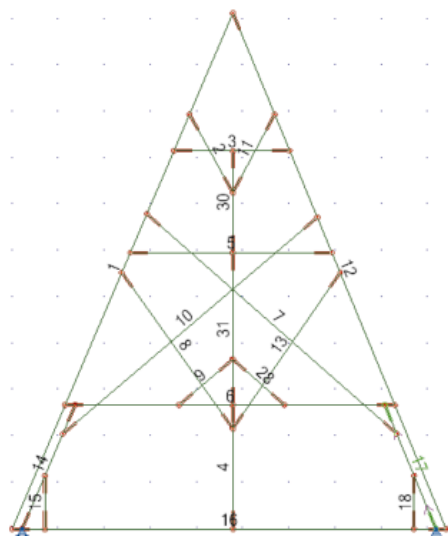
Destruction models together with created joints and the results of the conducted tests confirm the usability of such reinforcements for brick arch constructions. Ensuring anchorage for FRP materials used for strengthening curved brick constructions on the intrados side is a serious problem. When such anchorage is missing, the reinforcing material gets disconnected from the construction which leaves its section unused. Attempts at analytical modelling of brick arches and vaults were also made in [18].

The Italian instruction CNR DT 200/2004 [19] is a document useful in designing and constructing reinforcements using FRP materials.

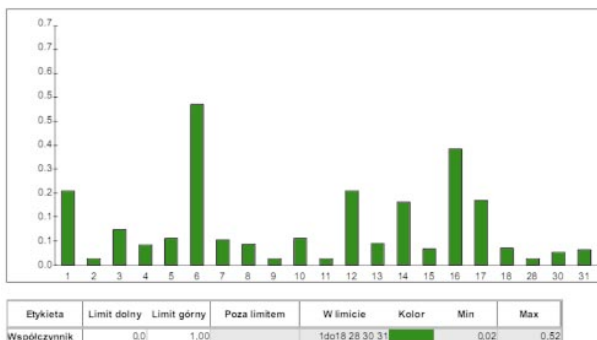
The presented here short description of research conducted all over the world shows that the issue of applying innovative technologies for reinforcement of historic brick arches and vaults (particularly with the use of innovative materials) has not been thoroughly studied.

Tests using diverse types of materials applied in reinforcements were conducted in the Building Institute of the Wrocław Polytechnic [20, 21]. Tests were carried out on brick arches measuring in section – 0.12 m thick, 0.77 m wide, 4 m span and 2 m radius. All arch models were subjected to monotonically increasing static loads

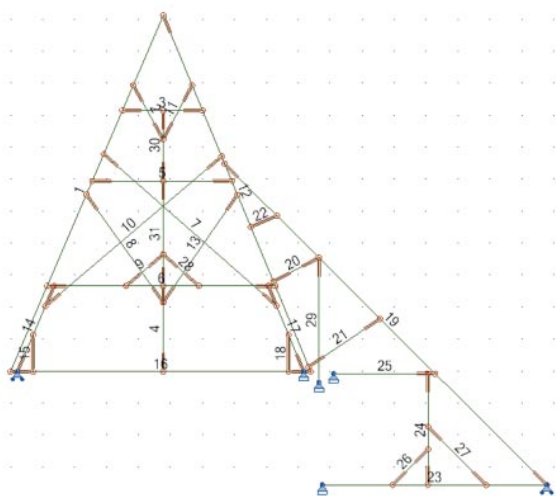
Badania z zastosowaniem różnego rodzaju materiałów używanych do wzmocnień przeprowadzono w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej [20, 21]. Badania wykonano na łukach ceglanych o następujących wymiarach przekroju – grubości 0,12 m, szerokości 0,77 m, rozpiętości 4 m i promieniu 2 m. Wszystkie modele łuków poddano monotonicznie narastającym obciążeniom statycznym realizowanym na całej szerokości łuku, w 1/3 rozpiętości, przez siłownik, aż do zniszczenia



Ryc. 7. Schemat statyczny więzara B (wiązar pełny)
Fig. 7. Static diagram for roof truss B (full truss)

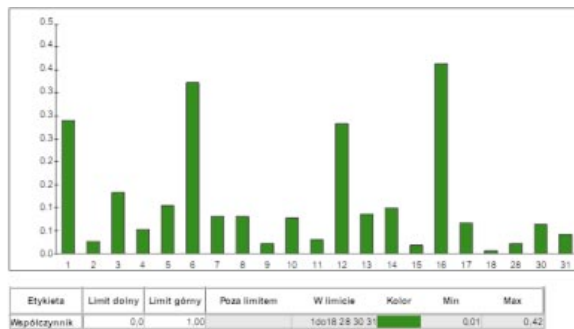


Ryc. 8. Wytyżenie prętów więzara B
Fig. 8. Effort diagram for rods in roof truss B



Ryc. 9. Schemat statyczny więzara D (wiązar pełny nad przybudówką)
Fig. 9. Static diagram for roof truss D (full truss over the extension)

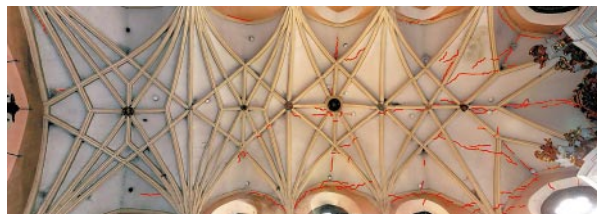
applied along the whole width of the arch, in 1/3 of its span, by a servo-motor until ultimate destruction. Each arch was reinforced in a different way, e.g. the following were used: FRCM meshes, CFRP tapes, glued steel rods. Reinforcing materials were placed on the ridge side of arches or inside the arch intersection. Such manner of reinforcing is a decisive factor in case of historic arches and vaults which are lavishly decorated on the intrados. No similar large-scale research using so many



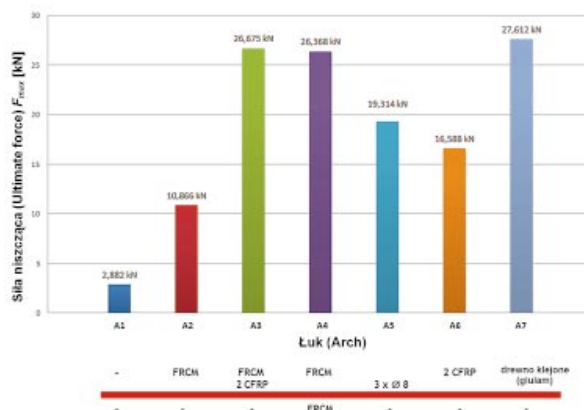
Ryc. 10. Wytyżenie prętów więzara D
Fig. 10. Effort diagram for rods in roof truss D



Ryc. 11. Sklepienie nad prezbiterium. Widoczne poprzeczne ceglano-żebra
Fig. 11. Vault over the presbytery. Crosswise brick ribs are visible

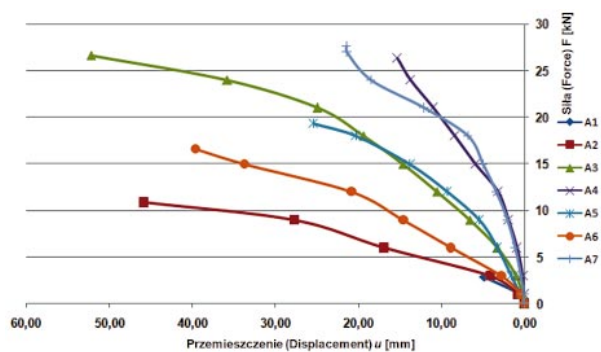


Ryc. 12. Sklepienie nad prezbiterium – mapa zarysowań
Fig. 12. Vault over the presbytery – map of cracking



Ryc. 13. Zestawienie maksymalnych wartości sił niszczących F_{max} dla wszystkich modeli łuków
Fig. 13. Chart of maximum values of ultimate forces F_{max} for all arch models

czenia. Każdy z łuków został wzmocniony w inny sposób, przy zastosowaniu między innymi siatek FRCM, taśm CFRP, prętów stalowych wklejanych. Materiały wzmacniające starano się umieszczać po stronie grzbietowej łuków lub wewnątrz przekrojów łuków. Taki sposób wzmocnienia ma decydujący wpływ w przypadku łuków i sklepień historycznych, bogato dekorowanych po stronie podniebienia. W literaturze przedmiotu nie opisano dotąd podobnych przekrojowych badań z udziałem tak wielu metod wzmocnienia zakrzywionych konstrukcji ceglanych, będących do zaakceptowania ze względów doktrynalnych w konserwacji konstrukcyjnej historycznych konstrukcji ceglanych, szczególnie jeśli chodzi o wzmocnienia typu FRCM, czyli z zastosowaniem siatek (np. węglowych) osadzanych w matrycy mineralnej. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że wzmocnianie wpływa bardzo korzystnie na nośność i sztywność badanych łuków. W przypadku łuków A3 i A4 (wzmocnionych kompozytami) wzrost nośności jest ponad dziewięciokrotny (A3 – 9,26, A4 – 9,15) i te właśnie rozwiązania wydają się być najbardziej efektywne, biorąc pod uwagę czas wykonania wzmocnienia i stosunkowo proste rozwiązanie technologiczne. Zestawienie maksymalnych wartości sił niszczących F_{max} dla wszystkich modeli łuków przedstawiono na ryc. 13.



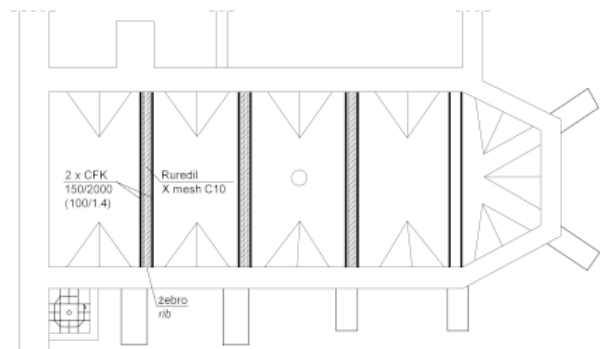
Ryc. 14. Zależność: siła F – przemieszczenie u w poszczególnych badanych modelach (w punkcie pomiarowym zlokalizowanym w środkowej osi łuków)

Fig. 14. Dependence: force 'F' – displacement 'u' in particular tested models (in the measurement point located in the central axis of the arches)



Ryc. 16. Instalacja taśm CFRP oraz siatek FRCM na żebrze sklepienia
Fig. 16. Installation of CFRP tapes and FRCM meshes of the vault rib

methods of reinforcing curved brick constructions acceptable in construction conservation of historic brick constructions because of doctrinal reasons, especially as far as reinforcements of the FRCM type i.e. using meshes (e.g. carbon) set in mineral matrix are concerned, have yet been described in the literature of the subject. On the basis of test results it was found out that reinforcing has a very beneficial effect on the load-carrying ability and rigidity of the examined arches. In the case of A3 and A4 arches (reinforced with composites) the increase of load-carrying ability was over nine-fold (A3 – 9,26, A4 – 9,15) and such solutions seem to be most effective considering the time required for



Ryc. 15. Rzut sklepień – wzmocnienie żeber
Fig. 15. Vault plan – rib reinforcement



Ryc. 17. Ściana wschodnia prezbiterium – górna i środkowa partia ściany. Pionowe pęknięcie biegnące przez całą wysokość ściany. Pęknięcie wydziela blendę otworu okiennego
Fig. 17. East wall of the presbytery – upper and middle part of the wall. A vertical crack running the whole height of the wall. The crack highlights the blind window opening

Zaobserwowano również, że przemieszczenia (ryc. 14) dla łuków wzmocnionych FRCM (łuki A2, A3 i A4) w punktach, w których powstawały największe odkształcenia modeli łuków, przy znacznych wartościach siły niszczącej są większe od innych. Świadczy to o zdecydowanie większej zdolności przekroju konstrukcji zespolonej (wzmocnionej opisanymi metodami) do kompensacji globalnych deformacji przy wysokich poziomach wyężenia. Obok wysokiej efektywności (nośność) ma to niewątpliwe znaczenie dla narastania ewentualnych stanów awaryjnych i zachowania konstrukcji w czasie.

Pomimo coraz częstszego używania materiałów FRP, FRCM, SRP/SRG do wzmocniania konstrukcji muryowanych, brak jest dostępnych, w pełni wiarygodnych modeli stosowanych w projektowaniu i potrzebne są dalsze programy badawcze.

Przedstawione technologie i metody wzmocniania łuków, sklepień i kopuł ceglanych z reguły występują łącznie. Często dopiero ich połączenie daje oczekiwane efekty. Należy pamiętać, że każda z metod wymaga szczegółowej analizy zastosowania do danego rodzaju konstrukcji, zarówno ze względu na rozwiązanie materiałowe, jak i ze względu na dostępną przestrzeń nad konstrukcją wzmocnianą, niezbędna jest także analiza jej wartości historycznych i estetycznych. Zasadniczą sprawą jest dobór metody ściśle uwzględniający zakładane parametry pracy statycznej konstrukcji po wzmocnieniu oraz defekty konstrukcji przed wzmocnieniem. Nieodzowne staje się zastosowanie MES (Metody Elementów Skończonych) w przypadku konieczności konserwacji, a przede wszystkim wzmocnienia, (w tym innowacyjnymi materiałami) takich konstrukcji, które z reguły charakteryzują się skomplikowanym układem statycznym, dużym ciężarem własnym, i – co bardzo ważne – zagrożonych awarią, a stanowiących dobro kultury globalnej.

W kościele św. Anny w Ząbkowicach Śląskich wzmocnienie sklepień obejmowało iniekcję rys i spękań, doklejenie do żeber taśm węglowych CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymers*) oraz mat węglowych FRCM (*Fibre Reinforced Cementitious Matrix*) na grzbietowej powierzchni sklepień.

Taśmy z materiałów FRP wprowadza się w celu konsolidacji konstrukcji z wytworzeniem współpracujących w przekroju pasm. Z uwagi na wysoki opór dyfuzyjny tych spoin, łączących elementy wzmocniające z oryginalnym ceglany sklepieniem, wyklucza się ich stosowanie na całej powierzchni sklepień (np. przy klejeniu mat), zwłaszcza zdobionych polichromiami.

Prace przygotowawcze obejmowały usunięcie zasypki z pach sklepienia prezbiterium i zdjęcie gładzi cementowo-wapiennej z górnej powierzchni sklepień i żeber. Z górnej powierzchni spoin usunięto zaprawę na głębokość około 1 cm, dla umożliwienia dobrego związania matrycy mineralnej ze sklepieniem. Ponadto z powierzchni górnych sklepień bezpośrednio przed założeniem siatki wzmocniającej usunięto pył i wszelkie zanieczyszczenia.

Pęknięcia sklepień wypełniono wprowadzaną pod ciśnieniem kompozycją epoksydową o składzie uzależnionym od rozwartości pęknięć. Przed przystąpieniem do iniekcji oczyszczono i wysuszone pęknięcia. Ponadto zabezpieczono je od dołu kitem grafitowym, tak aby przy wypełnianiu

making reinforcement and a relatively simple technological solution. The maximum values of ultimate force F_{max} for all the arch models are presented in Fig. 13.

It was also observed that displacement (Fig. 14) for arches reinforced with FRCM (arches A2, A3 and A4), in spots where considerable deformations were noticed in arch models, with significant values of ultimate force is greater than elsewhere. It shows that the ability of the combined construction (reinforced using the described methods) intersection to compensate global deformations at high levels of effort is definitely bigger. Besides its high effectiveness (load-carrying ability) it is of considerable significance for increased failure frequency and preserving the construction in time.

Despite more frequent use of FRP, FRCM, SRP/SRG materials for strengthening masonry constructions, there are no available fully trustworthy models applicable in designing, so further research programs are required.

The presented technologies and methods of reinforcing brick arches, vaults and domes generally occur jointly. Frequently only their combination gives the expected results. It should be remembered, that each method requires detailed analysis whether it is applicable in a given type of construction, both considering material solutions and the space available above the reinforced construction, as well as analyzing its historic and aesthetic value. The key issue is selecting a method precisely taking into account the assumed parameters of static work of the construction after reinforcement and construction defects before reinforcement. The application of FEM (Finite Element Method) seems indispensable in case of conservation and primarily reinforcement (including innovative materials) of such constructions which are generally characterised by a complicated static layout, considerable dead weight, and – which is very important – are in danger of failure while constituting global culture heritage.

In the church of St. Anna in Ząbkowice Śląskie strengthening the vaults involved injection in cracks and scratches, gluing CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymers) tapes to the ribs and FRCM (Fibre Reinforced Cementitious Matrix) matrices on the ridge surface of the vaults.

FRP tapes are introduced to consolidate constructions by creating strips cooperating in section. Because of high diffusion resistance of the joints linking the reinforcing elements to the original brick vault, their use on the whole surface of the vault (e.g. when gluing matrices), particularly those decorated with polychrome, has been ruled out.

Preparation work involved removing backfill from spandrels in the presbytery vault and removal of the cement and lime finishing coat from the upper surface of the vaults and ribs. Mortar was removed from the outer surface of the joints to the depth of app. 1 cm in order to enable the mineral matrix to bind well with the vault. Moreover, dust and dirt were removed from the outer vault surface directly before fixing the reinforcing mesh.

Cracks in the vaults were filled in with an epoxy composition, whose content depended on the crack ap-

pęknięcia nie dopuścić do wypłynięcia kompozycji żywicznej. Po wypełnieniu pęknięć i związaniu kompozycji żywicznej kit grafitowy usunięto, a licową warstwę pęknięć (od dołu) uzupełniono zaprawą wapienną.

Na sklepienia wzdłuż żeber, z obu stron żeber doklejono przy użyciu kompozycji epoksydowej taśmy węglowe CFRP (ryc. 15). Kotwienie taśm do ścian zrealizowane zostało przy użyciu elementów stalowych i wklejanych śrub. Pręty bezpośrednio przed wklejeniem, na powierzchniach wklejanych, oczyszczone zostały przez piaskowanie, co jest warunkiem zapewniającym przyczepność kompozycji żywicznej. Taśmy po zmatowieniu na końcach papierem ściernym połączono z końcowymi elementami stalowymi, przygotowanymi powierzchniowo przez piaskowanie, sklejając je kompozycją epoksydową.

Wzmocnienie sklepień wykonane zostało na całej powierzchni grzbietowej sklepienia lunet siatkami z włókna węglowego według systemu Ruredil X Mesh C10 M25. W miejscach łączenia siatek wykonano zakłady o szerokości 30 cm. Siatki ułożono wywijając je na całą wysokość żeber oraz na ściany na wysokość 20 cm, a następnie ułożono siatki na górnych powierzchniach żeber zawijając je na całej wysokości bocznej żeber, aż do grzbietowej płaszczyzny sklepień (ryc. 16).

Będąc pewną nowością technologiczną FRCM składają się z siatki z włókien węglowych zatopionych w zaprawie mineralnej łączącej siatkę z podłożem. W systemach FRCM, w odróżnieniu od FRP, stosuje się nieorganiczną zaprawę składającą się z hydraulicznego spoiwa oraz dodatków, które są chemicznie, fizycznie i mechanicznie kompatybilne z podłożem, szczególnie z murem ceglany.

Do najistotniejszych zalet tego systemu zaliczyć należy wysoką odporność ogniową, odporność na korozję, stosunkowo proste wykonanie wzmocnienia oraz możliwość układania na zawilgoconym podłożu, na nierównych i nieregularnych powierzchniach.

Dodatkowo wykonano kotwienie poprzeczne powyżej sklepień prezbiterium. Kotwienie wykonano 15 cm nad sklepieniami w odległości 10 cm od żebra sklepienia. Zastosowano kotwy stalowe Ø30 (S235JR). Na końcach oraz w miejscu założenia śruby rzymskiej pręty zostały nagwintowane gwintem M30. Pręty zamocowano w blachach oporowych o wymiarach 16 × 400 × 300 mm. Blachy zamocowano w wykonanych wnękach ścian, na świeżej zaprawie cementowej wyciskanej spod blachy przy napinaniu prętów. Pręty zostały napięte przez jednoczesne dokręcanie na obu końcach nakrętek i śruby rzymskiej. Przez ściany podłużne kościoła pręty prowadzone były przez otwory wiercone osiowo do przebiegu ściągów. Wnęki blach oporowych zamurowano płytkami wyciętymi z cegły i otynkowane.

Wykonano kotwienie obwodowe ścian prezbiterium powyżej sklepień, od strony wewnętrznej ścian, w bruzdach ścian. Kotwienie wykonano prętami stalowymi Ø30 (S235JR), ułożonymi w bruzdach wyciętych od strony wewnętrznej ścian. Bruzdy przed wypełnieniem były dokładnie oczyszczone. Pręty mocowano w blachach oporowych jw. Pręty, których nie można było zakotwić za pomocą blach oporowych, wklejono w ściany za pomocą kompozycji epoksydowej.

erture, injected under pressure. Cracks were cleaned and dried before performing injections. Moreover, they were sealed from beneath with graphite putty so that when the crack was being filled in the resin composition would not run out. After the cracks had been filled in and the resin composition had set, graphite putty was removed and the face layer of the cracks (from beneath) was filled in with lime mortar.

CFRP carbon tapes were glued using an epoxy composition on the vaults, on both sides along the ribs (fig. 15). Anchoring the tapes to the walls was realized using steel elements and glued bolts. Directly before gluing, the rods on glued surfaces were sand-blast cleaned which is a condition ensuring adhesion of the resin composition. After dulling them at the ends with sandpaper, the tapes were joined to the end steel elements whose surface had been prepared by sand-blast cleaning, and glued together with an epoxy composition.

Vault reinforcement was made on the whole outer surface of the vault and lunettes, using carbon fibre mesh according to the system Ruredil X Mesh C10 M25. In places where meshes joined 30-cm-wide overlaps were made. Meshes were laid by wrapping them up the whole height of the ribs and 20 cm up the walls, and then meshes were laid on the upper rib surfaces and wrapped along the side height of the ribs, up to the ridge surface of the vaults (fig. 16).

FRCM technologies, which are a certain novelty, consist of a mesh made of carbon fibres sealed in mineral mortar binding the mesh to the base. In the FRCM systems, unlike FRP, inorganic mortar is used consisting of hydraulic binder and additives which are chemically, physically and mechanically compatible with the base, particularly with a brick wall.

Among the vital properties of that system are: being highly fireproof, resistance to corrosion, a relatively simple way to make reinforcement, and the possibility of lying it on moist base, on uneven and irregular surfaces.

Additionally crosswise anchorage was made above the presbytery vault. Anchorage was fixed 15 cm above the vaults at the distance of 10 cm from the vault rib. Steel anchors Ø30 (S235JR) were used. At the ends and in the place where a turnbuckle was fixed, the rods were threaded with M30 thread. The rods were fixed to resistance sheets measuring 16 × 400 × 300 mm. The sheets were fixed in prepared wall recesses on fresh cement mortar squeezed from under the sheets when the rods were tensed. The rods were tensed by simultaneous tightening up the nut and the turnbuckle at both ends. Through the lengthwise walls of the church the rods ran through openings drilled axially to bowstrings. Recesses for resistance sheets were walled in with tiles cut out from brick and plastered over.

Perimeter anchorage of presbytery walls was made above the vaults, on the inside in wall chases. Anchorage was made using steel rods Ø30 (S235JR), set in chases cut on the inside of the walls. Before filling in the wall chases were thoroughly cleaned. Rods were fixed in resistance sheets as above. The rods which could not be anchored using resistance sheets were glued into the walls with epoxy composition.

5. Ściany murowane

5.1. Stan ścian murowanych prezbiterium

Ściany prezbiterium o znacznej grubości wykonane są z cegły ceramicznej pełnej na zaprawie wapiennej. Ściany wsparte są przyporami z cegły na zaprawie wapiennej. Wewnątrz kościoła ściany są tynkowane. W ścianach część cegieł była powierzchniowo skorodowanych i występowały nieznaczne ubytki. W ścianie wschodniej nad sklepieniami zlokalizowane było pęknięcie pionowe o dużej rozwarłości (ryc. 17). Pęknięcie to przebiegało przez całą wysokość ściany, w środkowej części ściany przebiegało wzdłuż krawędzi blendy okiennej. W nadbudowanej części ściany, w narożu północno-wschodnim, ozdobna głowica ceglana kolumny miała skorodowane elementy ceglane grożące spadnięciem. Na nadbudowanej części ściany północno-wschodniej istniał rozległy zaciek i naloty pleśni. W kluczu okien w ścianach północno-wschodniej i południowo-wschodniej występowały pęknięcia o nieznacznej rozwarłości.

5.2. Wzmocnienie ścian

Cegły powierzchniowo skorodowane od strony zewnętrznej ścian oczyszczono. W dolnej części ścian usunięto spoinowanie zaprawą cementowo-wapienną. W przypowierzchniowej warstwie skorodowaną zaprawę wymieniono, a brakującą uzupełniono. Zastosowano zaprawę wapienną.

W głowicy ozdobnej kolumny wymieniono skorodowane elementy ceglane grożące spadnięciem. W miejscu zacieku i nalotów pleśni zdjęto tynk od strony zewnętrznej, a ścianę w tym miejscu osuszono i zabezpieczono środkami grzybobójczymi, a następnie otynkowano.

Pęknięcie o dużej rozwarłości w górnej partii ściany wschodniej po oczyszczeniu poddano iniekcji kompozycją epoksydową.

Pozostałe pęknięcia i zarysowania ścian oczyszczono, wysuszono, wypełniono i sklejono, wprowadzaną pod ciśnieniem, kompozycją epoksydową.

W miejscach spękań i zarysowań wzmocniono ściany obustronnie, przez wklejenie prętów stalowych 2Ø6 (34GS) w co trzeciej spoinie, po obu stronach ściany. Pręty wprowadzono w taki sposób, aby sięgały 75 cm poza pęknięcie z każdej strony. Spoiny, po dokładnym oczyszczeniu i przedmuchaniu sprężonym powietrzem, wypełniono kompozycją. Powierzchnie prętów bezpośrednio przed wklejeniem przygotowano przez piaskowanie, co jest warunkiem zapewniającym przyczepność kompozycji żywicznej.

Wykonano kotwienie poprzeczne i obwodowe powyżej sklepień prezbiterium. Kotwienie wykonano przy użyciu prętów stalowych umiejscowionych nad sklepieniami. Pręty kotwiono w blachach oporowych. Blachy mocowano w wykonanych wnękach ścian, na świeżej zaprawie cementowej wyciskanej spod blachy przy napinaniu prętów. Wnęki blach oporowych zamurowano płytkami wyciętymi z oryginalnej cegły i otynkowano.

Kotwienie obwodowe wykonano w ścianach zewnętrznych i ścianie poprzecznej między prezbiterium a nawą. Kotwienie wykonano od strony wewnętrznej, w brzdach ścian. W ścianach północno-wschodniej,

5. Masonry walls

5.1. Condition of the masonry walls in the presbytery

The considerably thick presbytery walls were made from full ceramic brick on lime mortar. The walls were supported by brick buttresses on lime mortar. Inside the church the walls were plastered. Some bricks in the walls were corroded on the surface and fragments were missing. A gaping vertical crack was located in the east wall above the vaults (fig. 17). The crack ran along the whole height of the wall, in its middle section it ran along the edge of a blind window. In the added section of the wall, in the north-east corner, a decorative brick capital of a column had corroded brick elements in danger of falling. On the added section of the north-east wall there was vast seepage and mould bloom. In the window key in the north-east and south-east walls there were slight cracks.

5.2. Wall reinforcement

The bricks corroded on the surface on the outside walls were cleaned. Pointing with cement and lime mortar was removed in the lower section of the walls. In the surface layer the corroded mortar was replaced, and missing fragments were filled in. Lime mortar was applied.

In the capital of the decorative column the corroded brick elements in danger of falling were replaced. In the place of the seepage and mould bloom, plaster on the outside was removed, and the wall was dried and impregnated with fungicidal agent, and then plastered.

After cleaning the gaping crack in the upper section of the east wall was injected with epoxy composition.

The remaining cracks and scratches on the walls were cleaned, dried, filled in and glued with the epoxy composition injected under pressure.

In places where they were cracked and scratched the walls were strengthened on both sides by gluing in steel rods 2Ø6 (34GS) in every 3 joint, on both sides of the wall. The rods were fitted in such a way that they reached 75 cm beyond the crack on each side. After the joints had been thoroughly cleaned and blown through with compressed air, they were filled in with the composition. Directly before gluing in the rod surface was prepared by sand blasting which is a condition ensuring adhesion of the resin composition.

Crosswise and perimeter anchoring was made above the presbytery vaults. Steel rods placed over the vaults were used for anchorage. The rods were anchored in resistance sheets which were fixed in prepared wall recesses on fresh cement mortar squeezed from beneath the sheet when the rods were tensed. Recesses for resistance sheets were walled in with tiles cut out from original brick and plastered over.

Perimeter anchoring was made in outer walls and the crosswise wall between the presbytery and the nave. Anchorage was carried out on the inside in wall chases. In the north-east, east and south-east walls the rods, after their surface had been cleaned by sand blasting, were glued into the walls with an epoxy composition

wschodniej i południowo-wschodniej pręty po przygotowaniu powierzchni przez piaskowanie wklejano w ściany kompozycją epoksydową, a pozostałe mocowano do blachach oporowych. Bruzdy po napięciu prętów wypełniono.

6. Podsumowanie

Kościół wzniesiony na przełomie XIV i XV wieku jest cennym zabytkiem, dlatego prace zaprojektowano w taki sposób, aby pozostawić wszystkie niezniszczone elementy, a w elementach zniszczonych wymienić jedynie konieczne fragmenty. Jako podstawową zasadę przyjęto maksymalne utrzymanie istniejącej substancji historycznej.

Stan techniczny obiektu – stan więźby dachowej, sklepień oraz ścian – wymagał bezzwłocznej interwencji.

Przeprowadzone obliczenia statyczne więźby dachowej wykazały niewielkie wyężenie istniejących elementów, zatem nie było konieczności ich wzmacniania. Konieczna była natomiast naprawa elementów zniszczonych – przywrócenie nośności przekrojów, zwłaszcza w połączeniach, które są odpowiedzialne za deformację globalną tego typu konstrukcji. Prace naprawcze zostały wykonane przy zastosowaniu tradycyjnych metod naprawy konstrukcji drewnianych, przy użyciu nakładek drewnianych, śrub oraz pierścieni zębatych GEKA.

Wzmocnienie ceglanych, spękanych sklepień prezbiterium zrealizowano przy użyciu nowoczesnych technologii poprzez doklejenie taśm CFRP oraz z zastosowaniem technologii FRCM, opartej na matrycy mineralnej o oporze dyfuzyjnym zbliżonym do przegród ceglanych.

and the remaining were fixed to resistance sheets. After tensing the rods the wall chases were filled in.

6. Conclusion

The church erected at the turn of the 14th and 15th century is a valuable historic object, therefore the work was designed in such a way as to leave all the undamaged elements, or replace only the necessary fragments of the damaged elements. Maximum preservation of the existing historic substance was regarded as the superior principle.

The technical condition of the object, particularly the condition of the rafter framing, vaults and walls, required immediate intervention.

Static calculations carried out for the rafter framing showed only slight effort of the existing elements, so there was no need to reinforce them. On the other hand, repairing the damaged elements was necessary – restoring the load-carrying ability to sections, especially in joints which are responsible for global deformation in this type of constructions. Repair work was carried out using traditional methods of repairing wooden constructions, with the use of wooden cover plates, bolts and GEKA cogged rings.

Reinforcement of cracked brick vaults of the presbytery was realised using modern technologies by gluing CFRP tapes and applying the FRCM technology based on the mineral matrix with diffusion resistance similar to that of brick partitions.

Literatura

- [1] Balsamo A., Cerone M., Viskovic A.: *New Wooden Structures with Composite Material Reinforcements for Historical Buildings: the Case of the Arena Flooring in the Colosseum*, In: Proceedings of the IABSE Conference: Innovative Wooden Structures and Bridges, Lahiti, Finland, August 29-31, 2001, pp. 361-366.
- [2] Borchardt J.K.: *Reinforced plastics help preserve historic buildings*, Reinforced Plastics 47(11), 2003, pp. 30-32.
- [3] Smólski J., Stępień P.: *Kryteria konserwatorskie doboru rozwiązań inżynierskich w zabytkach architektury – w świetle doktryny i praktyki konserwacji*. In: Materiały konferencyjne – Inżynierskie problemy odnowy staromiejskich zespołów zabytkowych, Kraków, 21-23 maja 1998, pp. 63-71.
- [4] Jasieńko J.: *Połączenia klejowe i inżynierskie w naprawie, konserwacji i wzmacnianiu zabytkowych konstrukcji drewnianych*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2003.
- [5] Jasieńko J., Łodygowski T., Rapp P.: *Naprawa, konserwacja i wzmacnianie wybranych, zabytkowych konstrukcji ceglanych*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2006.
- [6] PN-B-03150:2000 + zmiany: Az1:2001, Az2:2003, Az3:2004. *Konstrukcje drewniane. Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- [7] Calderoni C. De Matteis G., Giubileo C., Mazzolani F.M.: *Structural analysis of two King-post timber trusses: Non-destructive evaluation and load-carrying tests*. Construction and Building Materials 24(3), 2010, pp. 371-383.
- [8] Ceraldi C., Mormone V., Russo E.: *Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics*. Materials and Structures, 34(1), 2001, pp. 59-64.
- [9] Jasieńko J., Nowak T. Bednarz Ł.: *Wrocław University's Leopoldinum Auditorium – Tests of Its Ceiling and a Conservation and Strengthening Concept*. Advanced Materials Research 133-134, 2010, pp. 265-270.
- [10] PN-D-94021:1982. *Tarcica iglasta konstrukcyjna sortowana metodami wytrzymałościowymi*.
- [11] PN-EN 338:2004. *Drewno konstrukcyjne. Klasy wytrzymałości*.
- [12] Bati S.B., Rovero L.: *Experimental validation of a proposed numerical model for the FRP consolidation of masonry arches*. In: Proceedings of the 3rd Internatio-

- nal Seminar o Structural Analysis of Historical Constructions, Guimarães, Portugal, 2001, pp. 1057-1066.
- [13] Kozaczewska-Golasz H., Kowal E.A., Mirski J.Z.: *Remontowe struktury kratownicowe dla sklepień P. Ferrariego w Wielkopolsce*. In: Materiały Konferencyjne – Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych, REMO 2002, Wrocław – Zamek Kliczków, grudzień 2002, pp. 189-196.
- [14] Pieper K.: *Sicherung historischer Bauten*. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1983.
- [15] Croci G., Viskovic A.: *L'uso degli FRP di fibra aramidica per il rinforzo della Basilica di San Francesco di Assisi*. In: Proceedings of Mechanics of masonry structures strengthened with FRP – materials, Venezia, Italy, 2000.
- [16] Borri A., Corradi M., Barbieri A., Di Tommaso A.: *Dynamic behaviour of masonry vaults repaired with FRP: experimental analysis*. In: Proceedings of the Sixth International Masonry Conference of the British Masonry Society, 2002, pp. 7-16.
- [17] Valluzzi M.R., Modena C.: *Experimental analysis and modelling of masonry vaults strengthened by FRP*. In: Proceedings of the 3rd International Seminar o Structural Analysis of Historical Constructions, Guimarães, Portugal, 2001, pp. 627-635.
- [18] Foraboschi P.: *Strength Assessment of Masonry Arch Retrofitted using Composite Reinforcements*. *Masonry International* 15(1), 2001, pp. 17-25.
- [19] CNR DT 200/2004. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures – Materials, RC and PC structures, masonry structures*, 2004.
- [20] Bednarz Ł.: *Praca statyczna zabytkowych, zakrzywionych konstrukcji ceglanych poddanych zabiegom naprawy i wzmocnienia*. Praca doktorska, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 2008.
- [21] Jasińko J., Bednarz Ł.: *The Analysis Of State Of Strains And Stresses Of Strengthened Brick Vaults*. In: Proceedings of the 6th International Conference on Structural Analysis of Historic Construction, 2-4 July 2008, Assembly Rooms, Bath, 2008, pp. 357-366.

Streszczenie

W pracy przedstawiono zastosowane techniki naprawy i wzmocnienia drewnianej konstrukcji dachu, sklepień oraz ścian murowanych na przykładzie remontowanego prezbiterium kościoła pw. św. Anny w Ząbkowicach Śląskich z przełomu XIV i XV wieku. Jako nadrzędną wartość w remoncie kościoła przyjęto jego znaczną wartość zabytkową. Podstawową zasadą we wszystkich pracach było maksymalne utrzymanie istniejącej substancji historycznej.

Obok tradycyjnych metod napraw konstrukcji dachowej, polegających na odtworzeniu pierwotnego stanu przedstawiono metodę wzmocnienia sklepień ceglanych przy użyciu nowoczesnych technik konserwacji konstrukcyjnej. Sklepienie ceglane zostało wzmocnione materiałami kompozytowymi – taśmami CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymers*) i siatkami FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*). Ponadto opisana została powszechnie stosowana metoda wzmocnienia sklepień ceglanych polegająca na wprowadzeniu naprężonych wstępnie ściągów stalowych. Spękane i zarysowane ściany prezbiterium zostały naprawione za pomocą iniekcji z użyciem kompozycji epoksydowych oraz poprzez wklejenie w przekrój konstrukcji prętów stalowych.

Abstract

The work presents the techniques applied for repairing and reinforcement of the wooden roof construction, masonry vaults and walls on the example of the renovated presbytery of the church of St. Anna in Ząbkowice Śląskie from the turn of the 14th and 15th century. The significant historical value of the church was treated as a superior value during its renovation. The basic principle during all the phases of the work was maintaining the existing historic substance to maximum.

Besides traditional methods of repairing a roof construction consisting of re-creating its original state, the method of brick vault reinforcement using the latest techniques of construction conservation was presented. A brick vault was strengthened with composite materials – CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymers) tapes and FRCM meshes (Fibre Reinforced Cementitious Matrix). Moreover, a commonly applied method of strengthening brick vaults involving the introduction of initially stretched steel bowstrings was described. Cracked and scratched walls of the presbytery were repaired by applying injections of epoxy compositions and by gluing steel rods into the construction section.