

Jerzy Jasieńko, Łukasz Bednarz

Metody wzmocnienia zabytkowych sklepień ceglanych akceptowalne z punktu widzenia doktryny konserwatorskiej

The methods of strengthening of historic brick vaults acceptable by conservatory doctrine

1. Wstęp

Utrzymanie w stanie przydatności użytkowej konstrukcji zabytkowych, a zwłaszcza łuków i sklepień, które uległy częściowej lub znacznej destrukcji, to zadanie, przed którym coraz częściej stają osoby zajmujące się wzmocnianiem konstrukcji.

Skuteczne rozwiązywanie tego zadania wymaga wszechstronnej wiedzy o źródłach zjawisk powodujących obniżenie użytkowych cech konstrukcji, poznania dawnych technik budowlanych oraz znajomości nowoczesnych metod, które umożliwią zarówno przeciwdziałanie tym zjawiskom, jak i przywracanie zabytkowym obiektom ich pierwotnych własności w zakresie nośności i sztywności.

Stosowanie nowoczesnych metod naprawy i wzmocnienia konstrukcji ceglanych czy też ich poszczególnych elementów (np. łuków, sklepień, kopuł) prowadzi do znacznych oszczędności, a niejednokrotnie pozwala na ocalenie obiektów ważnych kulturowo.

Wzmocnianie i naprawa ceglanych konstrukcji łuków i sklepień są zagadnieniami trudnymi, wymagającymi najczęściej indywidualnego podejścia do każdego przypadku.

Analiza konstrukcji murowych (zawłaszcza zabytkowych łuków, sklepień i kopuł), jest bardzo trudnym tematem z powodu wielu problemów w opisie i modelowaniu tego typu konstrukcji. Trudne jest również podejście numeryczne (modelowanie materiału – zachowującego się w rze-

1. Introduction

Keeping and maintaining the monumental constructions, particularly the arches and vaults, which were either partly or totally devastated, is the problem which is encountered by more and more people dealing with construction reinforcement.

The effective accomplishment of this task requires an extensive knowledge about the origins of the effects which contribute to deteriorating the construction's properties, and both the knowledge about the old construction methods and modern methods which enable one to prevent those effects and to restore the objects within the scope of their former carrying capacity and stiffness.

Implementing the modern methods of restoring and reinforcing the brick constructions or their specific elements (e.g. arches, vaults or domes), leads to the considerable decline in costs, allowing at the same time saving the culture-precious objects.

Reinforcing and restoring the brick constructions of the arches and vaults are the difficult tasks which usually require the individual approach to each case.

The analysis of the masonry constructions (especially the monumental arches, vaults and domes) is a very complicated topic because of many problems resulting from the description and from the simulation of this type of constructions. Moreover, the numerical approach is also a complex problem (simulation of the material which in fact be-

czywistości w sposób nieliniowy). Trudność polega również na niekompletności informacji o właściwościach mechanicznych materiałów i na złożoności geometrycznej konstrukcji.

2. Analiza konstrukcji

W modelowaniu konstrukcji murowych możemy przeprowadzić wiele typów analiz, które można podzielić na trzy główne grupy: analizę liniową, analizę nieliniową oraz analizę metodą nośności granicznej (*limit analysis*). Należy również nadmienić, że pomimo różnic wynikających z tego, że różne metody prowadzenia analizy prowadzą do otrzymania różnych współczynników bezpieczeństwa i innych ostatecznych wyników, nie ma dostatecznych powodów, by uznać wyższość jednej metody nad innymi – w badaniach zdecydowano się na użycie najprostszego typu analizy – analizy liniowej. Zdecydowano się na ten typ analizy z powodu przydatności w prostych rozwiązaniach inżynierskich.

Analityczne modele obliczeniowe

Analiza matematyczna zakrzywionych konstrukcji ceglanych zajmowała przez długi czas ważne miejsce w rozważaniach matematyków i teoretyków konstrukcji. Powstało też wiele wytycznych bazujących w dużej mierze na praktyce inżynierskiej. Dopiero połączenie wiedzy praktycznej z rozważaniami teoretycznymi doprowadziło do lepszego zrozumienia problemu pracy statycznej łuków, sklepień i kopuł.

Analizując dotychczasowy stan wiedzy o szacowaniu nośności łuków, sklepień i kopuł zauważa się, że jednym z podstawowych problemów pojawiających się na etapie oceny nośności jest przyjęcie schematu statycznego zakrzywionej konstrukcji ceglanej, zastosowanie odpowiedniej metody obliczania sił wewnętrznych w elementach konstrukcyjnych.

W celu konstruktywnego prowadzenia rozważań nad statyką zakrzywionych konstrukcji murowych celowym wydaje się ich usystematyzowanie. Systematyka ta powinna być jednak inna od systematyki dominującej w ujęciach historycznych tematu. Uzasadniony jest tu podział na grupy, ze względu na schemat statyczny ich pracy, który dla danej grupy można przyjąć. Znajomość schematu statycznego pozwala na obliczenie sił wewnętrznych panujących w elementach łuków, sklepień i kopuł oraz na przeprowadzenie analizy ich pracy ze względu na bezpieczeństwo konstrukcji, a także – w razie awarii – na przyjęcie właściwej metody wzmacniania.

Należy jednak pamiętać, że obliczenia statyczne opierają się na różnych założeniach upraszczających, mniej lub bardziej odbiegających od rzeczywistości. Obliczenia te można wykonywać tylko z pewną ograniczoną dokładnością. Niepewność

ma miejsce (w sposób nieliniowy), a także ograniczona jest informacja o właściwościach mechanicznych materiałów i o złożoności geometrycznej konstrukcji.

2. The analysis of the construction

Making the simulation of the masonry construction, there are three major groups of analyses: linear analysis, nonlinear analysis and limit analysis. It is also worth mentioning that despite the differences resulting from the fact that various types of methods generate different safety coefficients and different final results, there are no ample reasons for choosing the one particular method over the others – during the researches, it was decided that the simplest type of analysis will be applied, namely the linear analysis. Such a decision was made because of the applicability of this type of analysis in the simple constructing solutions.

The analytical models of calculation

A mathematical analysis of the curved brick constructions placed an important position in the deliberations of mathematicians and construction theoreticians for a long time. What is more, many instructions substantially based on the engineering practice were established.

Associating the practical knowledge with the theoretical deliberations, enabled one to the better understanding of the problem of the static work of arches, vaults and domes. Making the analysis of the current state of knowledge about estimating the capacity of arches, vaults and domes, one can easily notice that one of the major problems appearing on the level of the estimation of carrying capacity is accepting the static scheme of the curved brick construction with application of the proper method of calculating the internal forces in constructing elements.

On the way to constructive deliberations about the statistics of the curved masonry constructions, the systematization of those deliberations seems to be intentional. However, this systematization should be different from that which dominates over the historical aspects of the subject. Here, the static scheme of the work of the groups, justifies the division into groups which can be attributed to a certain group. The knowledge of the static scheme enables the calculation of internal forces which are present in elements of the arches, vaults and domes as well it facilitates carrying out the analysis of their work in respect to construction security and in case of a failure in accepting the proper method of strengthening.

obliczeń statycznych wyraźnie wychodzi na jaw przy uwzględnianiu obciążenia. Ciężar własny konstrukcji (szczególnie jeśli chodzi o obiekty zabytkowe), obciążenia śniegiem i wiatrem są w znacznym stopniu nieznane i zależą od licznych czynników, których nie można ocenić z wystarczającą dokładnością podczas wykonywania obliczeń. Również doświadczenia modelowe nie mogą usunąć całkowicie tej niepewności.

Problemem, który należy dokładnie rozważyć, jest zagadnienie obliczeń statycznych łuków, sklepień i kopuł uszkodzonych. Należy określić, jak uszkodzenia różnego typu (np. odspojenie wysklepki od żebra, zmiana geometrii konstrukcji) wpływają na przebieg sił wewnętrznych w zakrzywionych konstrukcjach ceglanych oraz na bezpieczeństwo pracy całej konstrukcji.

Pomimo że nie wszystkie rozważania matematyczne nadają się do łatwego zastosowania w praktyce, można wymienić kilka, które mają znaczący wpływ w analizie zachowania zakrzywionych konstrukcji murowych. Należy również zaznaczyć, że kolejne rozwiązania nie odnoszą się tylko i wyłącznie do jednego, opisanego typu konstrukcji (np. do łuków), a wręcz przeciwnie – wiele rozwiązań opracowano i rozwinięto w odniesieniu do pozostałych typów zakrzywionych konstrukcji ceglanych.

Ze znanych metod analitycznych można wyróżnić:

- metodę graficzną wyznaczania linii ciśnień w łukach,
- metodę obliczania łuków trójprzegubowych,
- metodę bezmomentową Heymana stosowaną w sklepieniach i kopułach.

Wszystkie analizy numeryczne obiektów zabytkowych dotyczące analizy statycznej obarczone są podstawowym błędem polegającym na trudności, czy wręcz niemożliwości opisanego wytrzymałości i odkształcalności materiałów istniejących konstrukcji murowych, co pozwoliłoby przyjąć poprawny model obliczeniowy.

Głównym problemem, z jakim należy się zmierzyć przy takim podejściu, jest przyjęcie jak najbardziej dokładnego i efektywnego modelu materiału.

Po dogłębnej analizie literatury przedmiotu zdecydowano się traktować materiał murowy jako materiał zhomogenizowany (jednorodny) i izotropowy (mający te same własności fizyczne we wszystkich kierunkach).

3. Opis modeli badawczych

Badania laboratoryjne wykonano na 7 łukach ceglanych (grubości 0,12 m, szerokości 0,77 m, rozpiętości 4 m i promieniu 2 m każdy – jak na rys. 1 i rys. 2). Łuki o kształcie koleby wymurowano

However, the static calculations are based on various simplified assumptions which are not truly real. Therefore, such calculations cannot be made with full precision. Uncertainty of the static calculations becomes problematic when weight is taken into consideration. The construction weight (especially in relation to monumental buildings) and snow and wind burdens, are rather unknown and depend on other factors which cannot be precisely calculated. Even model-scale experiment cannot ensure certainty.

The problem which ought to be precisely analysed is the issue of static calculations of the damaged arches, vaults and domes. It must be specified how the various types of damage (i.e. loosening of squinch from arch rib, change of construction geometry) influence the way the internal forces flow through the curved brick constructions and safety of the entire construction. Although not all the mathematical considerations can be easily applied, there are a few considerations which highly influence the analysis of the curved masonry constructions' behaviour. Moreover, further solutions relate to various types of the curved brick constructions, not only to the one described type of construction (i.e. arches).

The group of major analytical methods comprises of:

- graphical method of establishing the line of pressure in the arches,
- three-jointed arches calculation method,
- Heyman's non-moment method applied to vaults and domes,

All of the numerical analyses of the monumental buildings related to the static analysis, are encumbered with a basic error, namely it is very difficult or almost impossible to describe the resistance and deformability of materials in present masonry constructions. If this was possible, it would enable taking the correct calculation model.

The main problem of such approach is the acceptance of the most precise and efficient model of material. After a profound study of the subject's literary sources, it was decided that the masonry material will be treated as homogenous and isotropic material as it has got the same physical properties in all directions.

3. The description of the research models

The laboratory researches were made on 7 brick arches (thickness: 0,12 m, width: 0,77 m, span: 4 m, ray: 2 m each – as specified in figures 1 and 2). Arches in the shape of rocker dump car was made of materials with the properties similar to the ma-

z materiałów przypominających swoimi cechami materiały w obiektach zabytkowych (z cegły pełnej ceramicznej klasy 100 oraz zaprawy czystowapiennej). Schemat statyczny podparcia i obciążenia we wszystkich badanych łukach zrealizowano w ten sam sposób.

Wszystkie modele łuków poddano monotonicznie narastającym obciążeniem statycznym, realizowanym na całej szerokości łuku, w 1/3 rozpiętości przez siłownik, aż do zniszczenia. Każdy z łuków został wzmocniony w inny sposób.

- model A1 – łuk niewzmocniony – łuk świadkowy,
- model A2 – łuk wzmocniony za pomocą materiału FRCM – siatki z włókna węglowego Ruredil X Mesh C10 osadzonej w zaprawie Ruredil X Mesh M25 po stronie grzbietowej,
- model A3 – łuk wzmocniony za pomocą 2 taśm węglowymi CFRP S & P Lamelle CFK 150/2000 (o przekroju 100/1.4) przyklejonych w rozstawie osiowym 40 cm oraz materiału FRCM – siatki z włókna węglowego Ruredil X Mesh C10 osadzonej w zaprawie Ruredil X Mesh M25 po stronie grzbietowej,
- model A4 – łuk wzmocniony za pomocą materiału FRCM – siatki z włókna węglowego Ruredil X Mesh C10 osadzonej w zaprawie Ruredil X Mesh M25 po stronie grzbietowej oraz po stronie podniebienia łuku,
- model A5 – łuk wzmocniony za pomocą prętów stalowych $\varnothing 8$, osadzonych w bruzdach wykonanych w powierzchni grzbietowej łuku ceglano, wklejonych za pomocą kompozycji klejowej na bazie żywicy epoksydowej Epidian 5,
- model A6 – łuk wzmocniony 2 taśmami węglowymi CFRP S & P Lamelle CFK 150/2000 (o przekroju 100/1.4) przyklejonych w rozstawie osiowym 40 cm po stronie grzbietowej,
- model A7 – łuk wzmocniony za pomocą dźwignicy z drewna klejonego klasy GL24 połączonego z łukiem ceglano przy użyciu stalowych kotew wklejanych $\varnothing 8$ po stronie grzbietowej łuku.

Na rys. 3-5 przedstawiono schematyczny sposób wzmocnienia porównany z widokiem rzeczywistym kolejnego łuku.

W artykule postanowiono opisać dokładnie 3 badane przypadki wzmocnienia: łuki A2, A5, A6 i porównać je z wynikami dla łuku świadkowego A1.

4. Wyniki badań laboratoryjnych

W trakcie badań, mierząc wielkość siły obciążającej modele laboratoryjne, wyznaczono ścieżki równowagi statycznej dla wszystkich łuków. Na rys. 7 przedstawiono te właśnie ścieżki.

materials used in the monumental buildings (full ceramic brick quality- 100 and pure lime mortar). The static scheme of the racking and bearing in all examined arches was realized in the same manner.

All of the arches models underwent monotonically increasing static loading which was realized on the entire width of the arch, 1/3 by an actuator until the destruction of the arch.

Each arch was reinforced in a different way:

- A1 model – the arch without any reinforcement – witness arch,
- A2 model – the arch reinforced with FRCM – Ruredil X Mesh C10 carbon fibre screen set in the Ruredil X Mesh M 25 mortar on the side of the ridge,
- A3 model – the arch reinforced with 2 CFRP S & P Lamelle CFK 150/2000 carbon tapes (100/1.4 intersection) placed in a 40 cm axial spacing and with FRCM material – Ruredil X Mesh C10 carbon fibre screen set in the Ruredil X Mesh M 25 mortar on the side of the ridge,
- A4 model – the arch reinforced with FRCM – Ruredil X Mesh C10 carbon fibre screen set in the Ruredil X Mesh M 25 mortar on the side of the ridge and on the intrados side,
- A5 model – the arch reinforced with $\varnothing 8$ steel bars, set in furrows made in the ridge surface of brick arch, put ins with glue made on the basis of Epidian 5 epoxide resin,
- A6 model – the arch reinforced with 2 CFRP S & P Lamelle CFK 150/2000 carbon tapes (100/1.4 intersection) glued in a 40 cm axial spacing on the side of the ridge,
- A7 model – the arch reinforced with a girder made of GL24 glulam, joined with the brick arch by the use of $\varnothing 8$ steel anchors glued on the side of the ridge.

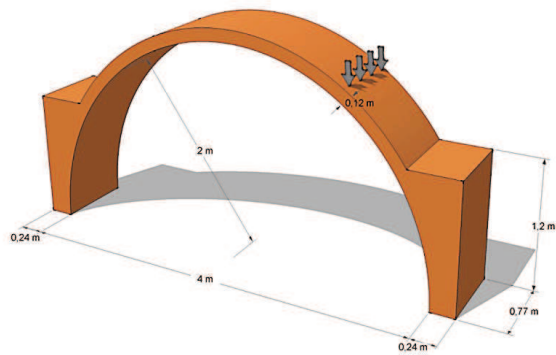
Figures 3-5 present a diagrammatic way of enforcing compared with a real view of another arch.

The article accurately describes the 3 major types of the examined reinforcements: arch A2, arch A5, and arch A6.

4. Laboratory findings

In the course of the researches, the tracks of the static balance for all the arches were marked out by measuring the intensity of the force loading the laboratory models. Figure 7 presents those tracks.

The reinforcing materials were supposed to be set by the dorsal side of the arches or inside the arches' section. This type of reinforcement is dominant in case of the historical arches and vaults which are vividly decorated on the intrados side. In the subject's literary source, one cannot find any similar cross-sectional researches with so many



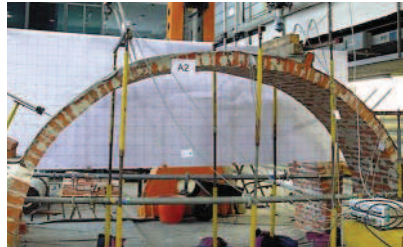
Rys. 1. Model badawczy łuku
Fig. 1. Research model of an arch



Rys. 2. Widok rzeczywisty jednego z modeli badawczych łuków – łuk A2
Fig. 2. Real view of one of the examined arches – arch A2



Rys. 3. Model i łuk A1
Fig. 3. Model and arch A1



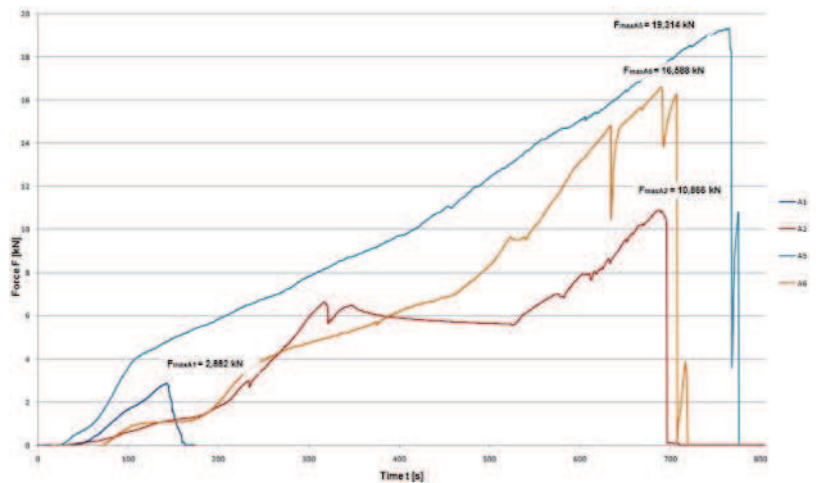
Rys. 4. Model i łuk A2
Fig. 4. Model and arch A2



Rys. 5. Model i łuk A5
Fig. 5. Model and arch A5

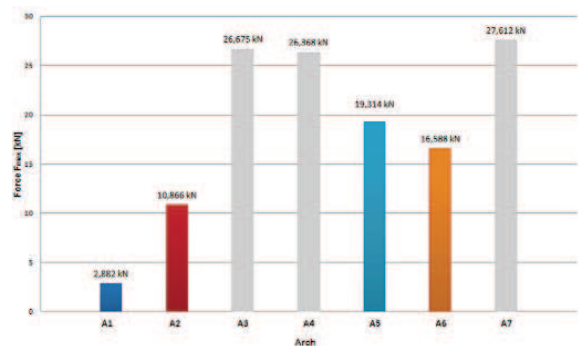


Rys. 6. Model i łuk A6
Fig. 6. Model and arch A6



Rys. 7. Ścieżka równowagi statycznej dla łuków A1, A2, A5 i A6
Fig. 7. Track of the static balance for arches A1, A2, A5 and A6

Rys. 8. Graniczne wartości siły niszczonej F_{max} w poszczególnych modelach laboratoryjnych
Fig. 8. Frontier amts of destructive force F_{max} in the specific laboratory models



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 wzmacniania zakrzywionych konstrukcji ceglanych, będących do zaakceptowania ze względów doktrynalnych w konserwacji konstrukcyjnej historycznych łuków ceglanych – szczególnie jeśli chodzi o wzmocnienia typu FRCM, czyli z zastosowaniem siatek (np. węglowych) osadzanych w matrycy mineralnej.

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że wzmacnianie wpływa bardzo korzystnie na nośność i sztywność badanych łuków.

Na rys. 8 przedstawiono wyniki badań wszystkich 7 modeli łuków – wyszczególniono analizowane przypadki łuków A1, A2, A5 i A6. Można zauważyć znaczny wzrost siły niszczącej we wszystkich wzmocnionych łukach w porównaniu z łukiem wzorcowym. Procentowy wzrost wartości siły przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Wzrost wartości siły niszczącej F_{max}

łuk	siła niszcząca F_{max} [kN]	wzrost siły niszczącej [%]
A1	2,882	–
A2	10,866	377,03
A5	19,314	670,16
A6	16,588	575,57

Wyznaczono również przemieszczenia łuków w punkcie przyłożenia siły na różnych poziomach obciążeń (rys. 9).

Na rys. 10-13 przedstawiono schematy rzeczywiste oraz modele zniszczenia badanych łuków. Należy zwrócić uwagę na zmianę tych modeli zniszczenia. Począwszy od klasycznego, opisanego w literaturze zniszczenia występującego w łuku A1 (model z 4 przegubami), w kolejnych łukach powstające przeguby zmieniają miejsce występowania (tworzą się w obrębie podpór oraz pod miejscem przyłożenia siły). Można też zaobserwować ścinanie łuków w obszarach podpór. W rzeczywistych konstrukcjach w miejscach podpór występują bardzo masywne ściany znacznie wyższe od łuków, dodatkowo dociążone (np. przez pinakle), ograniczające możliwość rozporu łuków i przypadek ścięcia w podporze raczej nie może wystąpić.

Wzmocnione modele osiągają znacznie większe ugięcia niż łuk świadkowy, przy równoczesnym znacznym obciążeniu. Szczególnie dotyczy to mo-

ethods of reinforcing the curved brick constructions which are acceptable with respect to the doctrine in the constructional conservation of the historical brick arches, especially with respect to FRCM reinforcements (with the use of screens e.g. carbon screens placed in a mineral die-block). The laboratory findings showed that the reinforcement favorably affects the carrying capacity and stiffness of the examined arches.

Figure 8 presents the laboratory findings of all the 7 models of arches with specification of the analyzed arches: A1, A2, A5, and A6. One can also notice the considerable growth of the destructive force in all the reinforced arches comparing to the model arch. Table 1 shows the proportional growth of force.

Table 1. Growth of destructive force F_{max}

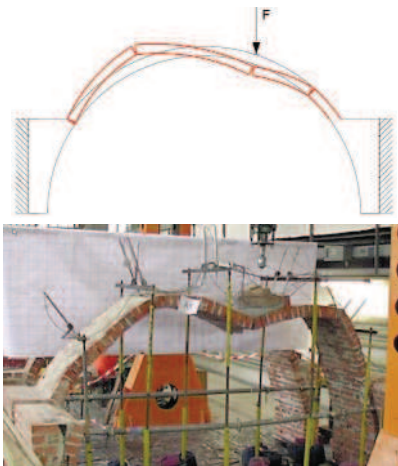
arch	destructive force F_{max} [kN]	growth of destructive force [%]
A1	2,882	–
A2	10,866	377,03
A5	19,314	670,16
A6	16,588	575,57

The displacements of the arches at the application force points with the different levels of loading were also marked (see figure 9).

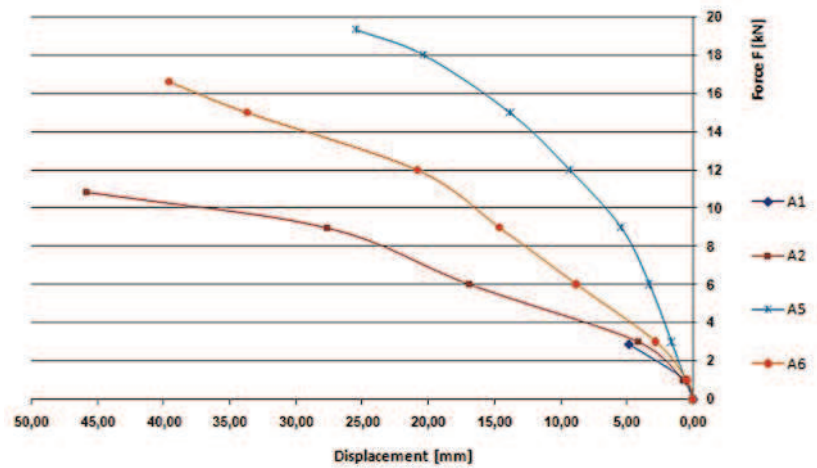
Figures 10-13 show the real schemes and models of destruction of the examined arches. One should also notice the transformation of those models of destruction. Starting from the typical destruction taking place in the arch A1 and described in literature (the model with 4 articulated joints), the next arches the forming articulated joints change their place (they are formed within bearings and under the place of application force). One can also observe the shearing of the arches on the bearings' areas. In the practical use of constructions, there are also very massive walls at the places of bearings, which are much higher than arches and which have the additional loadings (e.g. loadings of pinnacles). Those walls prevent the arches from a thrust so as the case of shearing in bearing cannot occur.

The reinforced models gain much bigger deflections than the witness arch, even with an additional loading. It relates to especially those models of reinforcement which involve using the carbon fibre screens where the deformation and destruction proceeds slowly and smoothly.

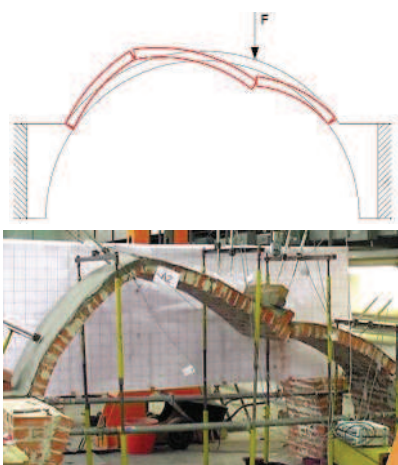
There is no any rapid movement related to separation of the reinforced material as it is with the models reinforced by the CFRP tapes of steel bars



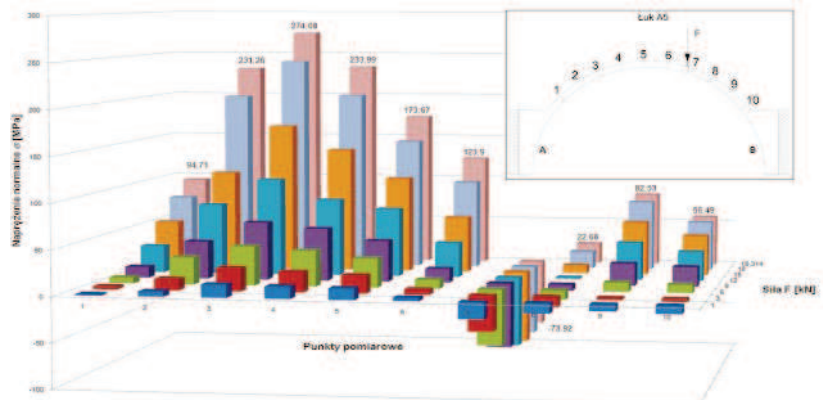
Rys. 10. Model i schemat rzeczywisty zniszczenia łuku A1 (siła 2,882 kN)
 Fig. 10. Model and real scheme of the destruction of the arch A1 (force: 2,882 kN)



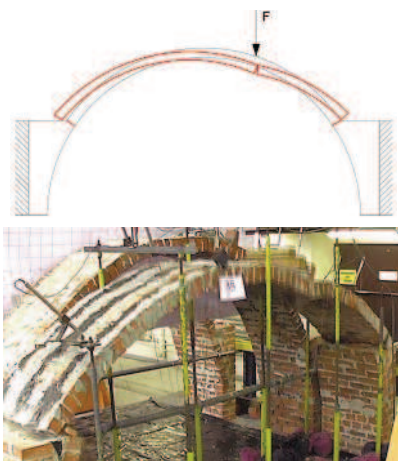
Rys. 9. Zależność: siła F – przemieszczenie ε w punkcie przyłożenia obciążenia
 Fig. 9. Relation: force F – displacement ε at the loading application point



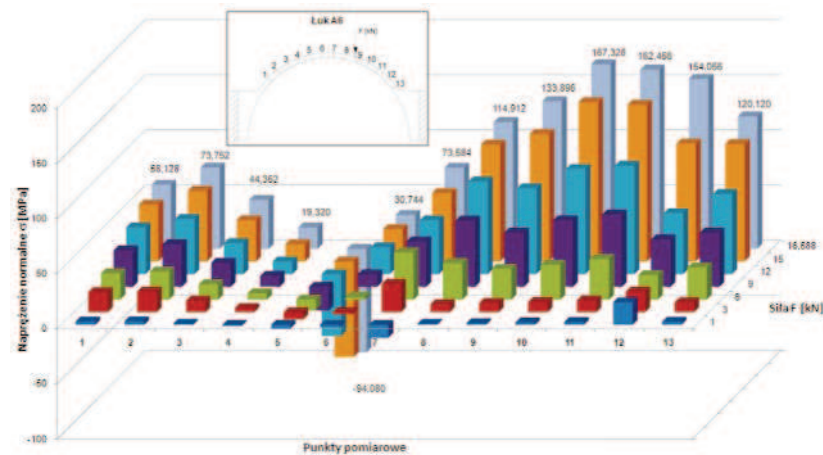
Rys. 11. Model i schemat rzeczywisty zniszczenia łuku A2 (siła 10,866 kN)
 Fig. 11. Model and Real scheme of the destruction of the arch A2 (force: 10,866 kN)



Rys. 14. Naprężenia normalne τ w pręcie stalowym w punktach od 1 do 10 przy kolejnych wartościach obciążenia siłą F w łuku A5
 Fig. 14. Normal stresses τ in the steel bar at points 1-10 in the sequent amts of the loading with F force in the arch A5

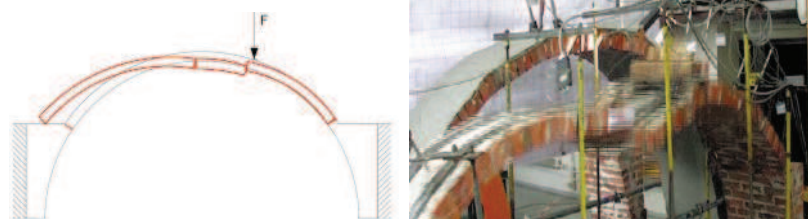


Rys. 12. Model i schemat rzeczywisty zniszczenia łuku A5 (siła 19,314 kN)
 Fig. 12. Model and Real scheme of the destruction of the arch A5 (force: 19,314 kN)



Rys. 15. Naprężenia normalne τ w taśmie węglowej w punktach od 10-13 in the sequent amts of the loading with F force in the arch A6

Rys. 13. Model i schemat rzeczywisty zniszczenia łuku A6 (siła 16,588 kN)
 Fig. 13. Model and Real scheme of the destruction of the arch A6 (force: 16,588 kN)



deli wzmocnionych przy użyciu siatek z włókien węglowych, w przypadku których odkształcenie i zniszczenie następuje w sposób bardzo płynny i powolny. Brak jest skoku związanego z gwałtownym oderwaniem materiału wzmacniającego, jak w modelach wzmocnionych samymi taśmami CFRP lub prętami stalowymi.

Zmiana schematów zniszczenia i wzrost nośności poszczególnych badanych modeli łuków świadczą o przydatności zastosowanych wzmocnień i poprawności ich wykonania.

W trakcie badań mierzono również (w przypadku łuków A5 i A6) odkształcenia i wyznaczono naprężenia normalne oraz naprężenia styczne w spoinach klejowych w taśmach węglowych (A6) oraz prętach stalowych (A5). Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rys. 14 i 15 (naprężenia normalne) i na rys. 16 i 17 (naprężenia styczne).

5. Wyniki badań numerycznych

Ogólnie wiadomo, że do dokładnego opisu zachowania i zniszczenia konstrukcji murowych konieczne jest zastosowanie modeli obliczeniowych uwzględniających nieliniowość i kruchą naturę muru. Jednakże w przypadku analizy pracy statycznej badanych łuków zdecydowano się na zastosowanie o wiele mniej skomplikowanych modeli liniowo-sprężystych. W dużej mierze wynikało to z faktu, że jednym z założeń było umożliwienie analizy efektywności wzmocnień w prostych opracowaniach inżynierskich.

W oparciu o zbudowane modele numeryczne łuków przeprowadzono szereg wytrzymałościowych obliczeń numerycznych w zakresie sprężystym. W ich wyniku otrzymano warstwicę deformacji oraz stanu naprężeń dla poszczególnych modeli obliczeniowych.

Na rys. 18 przedstawiono przykładowe odkształcenia w łuku A5 powstałe przy odciążeniu na poziomie 1 kN, a na rys. 19 porównanie krzywych odkształceń w 5 punktach pomiarowych dla modelu rzeczywistego (linia ciągła) i modelu numerycznego (linia przerywana).

6. Wnioski

Jak można zauważyć na wszystkich wzmocnionych modelach łuków, zmieniły się w nich schematy zniszczenia w porównaniu z niewzmocnionym łukiem A1 (rys. 10-13). Świadczy to o zmianie pracy statycznej wzmocnionych łuków i potwierdza przydatność zastosowanych wzmocnień. Należy również zwrócić uwagę na schematy znisz-

alone. The change of the schemes of destruction and growth of the carrying capacity of the particular models of arches prove the usefulness of the applied reinforcements and the good quality of their workshop.

In the course of the researches, also the deformations were measured (arches A5 and A6) and the normal stresses as well as tangential stresses in the adhesive-bonded joints, carbon tapes (A6) and steel bars (A5) were assigned. The results of those measures are shown on the figures 14 and 15 (normal stresses) and on figures 16 and 17 (tangential stresses).

5. Numerical findings

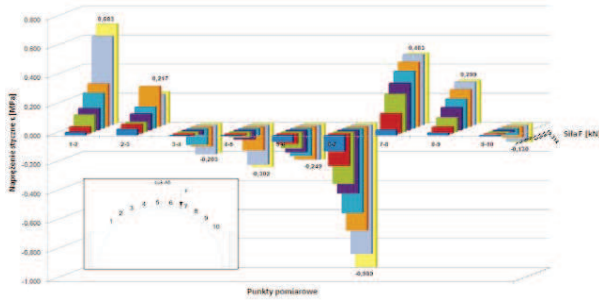
It is generally acknowledged that for the detailed description of the functioning and destruction of masonry constructions, it is necessary to adopt the calculative models with respect to nonlinearity and brittleness of walls. However, in the case the analysis of the static work of the examined arches, it was decided to adopt much less complicated linear-elastic models. This was mainly the result of the fact that one of the assumptions was to enable the analysis of the effectiveness of the reinforcements in the common engineering papers.

On the bases of the created numerical models of the arches, the series of numerical calculations in the area of flexibility were made with respect to resistance and strength. Basing on those calculations, the contour line of deformations and level of stresses for the particular calculative models was received. Figure 18 shows the examples of the deformations in the arch A5 which arose as a result of unloading on 1kN level. Figure 19 shows the comparison of the curves of deformations at rod-man points for the real model (a full line) and the numerical model (dashed line).

6. Conclusions

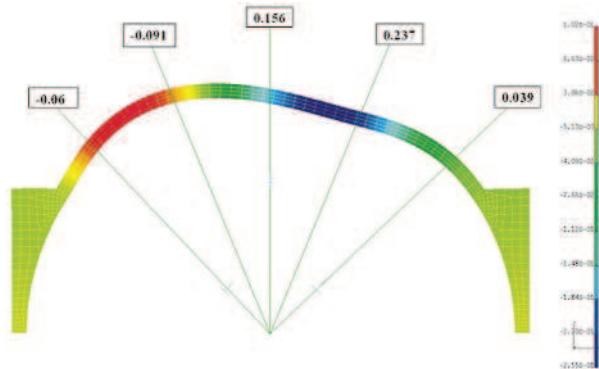
It is easy to notice that the schemes of destruction in all of the reinforced arch models changed in comparison with the A1 arch which was not reinforced (figure 10-13). It shows that the static work of the reinforced arches changed and it also proves the need for the applied reinforcements. One should also consider the schemes of destruction of the joints between an enforcing material and an arch:

- within the A2 arch it was noticed that the carbon fibre screen loosened from masonry construction with brick elements – it shows that destruction (disruption) took place inside the brick,



Rys. 16. Naprężenia styczne τ w spoinie klejowej pomiędzy punktami od 1 do 10 przy kolejnych wartościach obciążenia siłą F w łuku A5

Fig. 16. Tangential stresses τ in the adhesive-bonded joint between points 1-10 in the sequent amts of the loading with F force in the arch A5



Rys. 18. Odkształcenia w modelu numerycznym łuku A5 – poziom obciążenia – 1 kN

Figure 18. Deformations in the numerical model of the arch A5 – the loading level – 1 kN

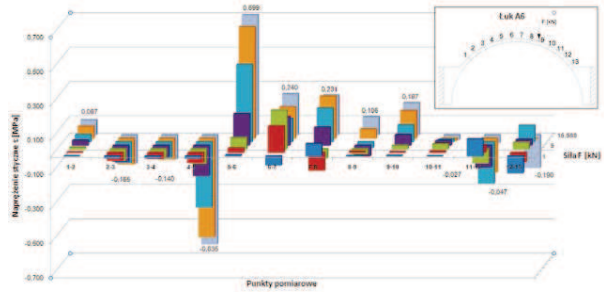
czenia połączeń pomiędzy materiałem wzmacniającym a poszczególnymi łukami:

- w łuku A2 zaobserwowano odspojenie się siatki z włókna węglowego od konstrukcji murowej z fragmentami cegieł, co świadczy o tym, że zniszczenie (rozerwanie) nastąpiło w cegle,
- w łuku A5 zaobserwowano odspojenie się prętów stalowych od konstrukcji murowej z fragmentami cegieł, co świadczy o tym, że zniszczenie (rozerwanie) nastąpiło w cegle, a kompozycja klejowa spełniła swoje zadanie,
- w łuku A6 zaobserwowano odspojenie się taśmy FRP od konstrukcji murowej z fragmentami cegieł co świadczy o tym, że zniszczenie (rozerwanie) nastąpiło w cegle.

Wszystkie wzmocnione modele łuków znacznie zwiększyły swoją nośność. Jak widać na rys. 8, wzrost nośności jest bardzo duży, od 3,77 (w przypadku łuku A2), poprzez 5,76 (łuk A6) aż po 6,70 (łuk A5).

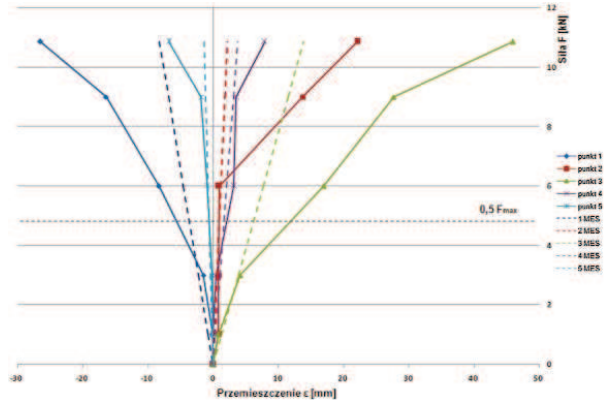
Podsumowując przeprowadzone badania na modelach w skali technicznej, można stwierdzić, co następuje:

- wszystkie modele badawcze przygotowano mając na uwadze praktyczne wykorzystanie badanych technik w konserwacji konstrukcji murowych,



Rys. 17. Naprężenia styczne τ w spoinie klejowej pomiędzy punktami od 1 do 13 przy kolejnych wartościach obciążenia siłą F w łuku A6

Fig. 17. Tangential stresses τ in the carbon tape between points 10-13 in the sequent amts of the loading with F force in the arch A6



Rys. 19. Porównanie odkształceń w 5 punktach pomiarowych w łuku A2 (dla modelu rzeczywistego – linia ciągła oraz modelu numerycznego – linia przerywana)

Fig. 19. Comparison of the deformations at 5 rodman points in the arch A2 (for the real model – a full line and for the numerical model – dashed line)

- within the A5 arch it was noticed that steel bars loosened from masonry construction with brick elements – it shows that destruction (discerption) took place inside the brick and glue composition fulfilled its role,
- within the A6 arch it was noticed that the FRP tape loosened from the masonry construction
- it shows that destruction (discerption) took place inside the brick.

All reinforced models of arches considerably increased their carrying capacity. As it is presented in the figure 8, the increase of carrying capacity is very huge, ranging from 3,77 (A2 arch) through 5,76 (A6 arch) up to 6,70 (A5 arch).

The conclusion of the performed research on the models in technical scale shows, it may be stated that:

- all research models were performed with reference to the practical use of analysed techniques in conservation of the masonry constructions,
- the research proved the possibility and usability of FRCM enforcement application, that is the carbon fibre screens submerged in mineral mortar in order to enforce the historical curved brick constructions,
- the serving facility of FRCM systems in arches and vaults constructions was confirmed,

- badania potwierdziły możliwość i przydatność stosowania wzmocnień FRCM, czyli siatek z włókien węglowych zatapianych w zaprawie mineralnej, do wzmacniania zakrzywionych historycznych konstrukcji ceglanych,
 - potwierdzono łatwość w aplikacji systemów FRCM w konstrukcjach łuków i sklepień,
 - badania potwierdziły możliwość i przydatność stosowania wspólnie technik klejenia taśm CFRP oraz systemów FRCM, a co za tym idzie, korzystanie w pozytywnych właściwości obu tych systemów,
 - badania potwierdziły możliwość i przydatność stosowania wklejanych wewnątrz konstrukcji wzmacniających prętów stalowych (wydaje się to jednak bardzo czasochłonne i pracochłonne),
 - badania potwierdziły możliwość i przydatność stosowania elementów z drewna klejonego (łączonych z konstrukcją za pomocą wklejanych kotew stalowych) do usztywniania powłok łukowych (należy zwrócić jednak uwagę na trudności związane z dopasowaniem krzywizn elementów wzmacniających z drewna klejonego do krzywizn konstrukcji łuków i sklepień),
 - przekroje taśm CFRP oraz prętów stalowych zostają wykorzystane w niewielkim stopniu; najwłaściwszym rozwiązaniem wydaje się być wstępne ich sprężenie, co pozwala na znaczne wykorzystanie ich nośności, a co za tym idzie, na zwiększenie efektywności wzmocnienia; rozwiązanie takie jest jednak właściwie niemożliwe w tego typu konstrukcjach.
- the research proved possibility and usability of joint application of CFRP tapes and FRCM system gluing techniques and, in result use of the positive properties of both aforementioned systems,
 - the research proved the possibility and usability of the application of steel bars glued in the construction (however, it seems to be very time-consuming and labour-consuming),
 - the research proved the possibility and usability of the application of glued wood elements (joined with the construction by the glued steel anchors) in order to stiffen the arch layers (it should be noticed that there are some difficulties with matching of the curvature of enforcing elements made of glued wood to the curvatures of arches and vaults constructions)
 - the intersections of CFRP tapes and steel bars are very rarely used; the best solution of this problem seems to be their preliminary conjunction which enables the substantial use of their carrying capacity what further results in increasing the effectiveness of reinforcement. However, such solution is barely feasible in this type of constructions.

Streszczenie

W artykule omówiono zagadnienia związane z analizą odkształceń i naprężeń wzmocnionych sklepień ceglanych. Przedstawiono problemy związane z naprawą i rekonstrukcją sklepień. Zaprezentowano różne sposoby wzmacniania tego typu konstrukcji ceglanych stosowane po stronie grzbietowej, mając na uwadze, że zazwyczaj po stronie podniebienia występują freski lub inne zdobienia. Przedstawiono metody analityczne i numeryczne (MES) stosowane w analizie konstrukcji łuków, sklepień i kopuł. Przedstawiono również wyniki badań wykonanych w skali technicznej w laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Dokonano też oceny efektywności różnego rodzaju zastosowanych wzmocnień (wklejane pręty stalowe, siatki i taśmy FRP).

Abstract

The article specifies the aspects of the analysis of strains and stresses of the reinforcement of the brick vaults. It introduces the problems of restoring and reconstruction of the vaults and presents various ways of reinforcing these types of brick constructions applied to the dorsal side, minding at the same time that frescos and other decorations are normally applied to the intrados side. What is more, the analytical methods and numerical methods (MES) used in the analysis of the construction of arches, vaults and domes, are introduced together with the findings of the research conducted within the range of technical scale in the laboratory of the Engineering Institute of the Technical University of Wrocław. In addition, the measurement of the effectiveness of various types of the adopted reinforcements was also made (inserted bar steels, grids and FRP tapes).