

Krzysztof Raszczyk*

orcid.org/0000-0002-0121-0670

Anna Karolak**

orcid.org/0000-0002-2652-1299

Korelacja między deformacją i układem zarysowania ścian i sklepień zabytkowej kaplicy zamkowej w Otyniu

Correlation Between Deformation and Cracking Pattern of Walls and Vaults of the Historical Castle Chapel in Otyń

Słowa kluczowe: konserwacja konstrukcyjna, skanowanie laserowe, analiza statyczna, deformacje, zarysowania, obiekty historyczne

Keywords: structural conservation, laser scanning, static analysis, deformation, cracks, historic structures

Wprowadzenie

Analiza statyczna obiektów historycznych

Wiele obiektów zabytkowych wymaga renowacji, a w niektórych przypadkach proces ten powinien obejmować konieczne wzmocnienie konstrukcji. Ze względu na znaczną wartość kulturową i historyczną zabytku każda decyzja konstrukcyjna powinna być poprzedzona dogłębną analizą i diagnostyką. Istnieje wiele możliwości przeprowadzenia analizy statycznej obiektów zabytkowych, np. obliczenia statyczno-wytrzymałościowe czy metoda elementów skończonych (MES) [Fathy et al. 2009, s. 675–689; Guarnieri et al. 2017, s. 527–533]. Aby wyniki obliczeń były wiarygodne, obie metody wymagają szczegółowych danych, takich jak właściwości materiału, geometria czy charakterystyka połączeń. W szczególności parametry materiałowe są trudne do osiągnięcia, a metody diagnostyczne kosztowne [Roca 2011, s. 151–167; Saisi et al. 2012].

W przypadku konstrukcji murowych określenie parametrów mechanicznych muru (np. wytrzymałości na ściskanie elementu murowego i zaprawy, modułu Younga, wytrzymałości na ścinanie) w istniejących obiektach budowlanych jest z jednej strony zagadnieniem skomplikowanym, a z drugiej kluczowym przy ocenie ich

Introduction

Structural analysis of historical objects

Many monuments require renovation and sometimes this process should include the need for structural strengthening. Because of the significant cultural and historical value of the monuments, each structural decision should be preceded by an in-depth diagnosis and analysis. There are many options for conducting the structural analysis of historical structures, i.e., static and strength analyses based on static calculations or finite element analysis (FEM) [Fathy et al. 2009, pp. 675–689, Guarnieri et al. 2017, pp. 527–533]. In order for the calculation results to be reliable, both methods require detailed data, such as material properties, geometry or joint characteristics. In particular, material parameters are difficult to achieve and diagnostic methods are expensive [Roca 2011, pp. 151–167, Saisi et al. 2012].

In the case of masonry structures, determining the mechanical parameters of the wall (e.g., compressive strength of the masonry element and mortar, Young's modulus, shear strength, etc.) in existing buildings is, on the one hand, a complicated issue, and on the other hand, a key when assessing their level of utilization in

* dr inż. arch., Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

** dr inż. arch., Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

* *Ph.D. Eng. Arch., Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Civil Engineering*

** *Ph.D. Eng. Arch., Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Civil Engineering*

Cytowanie / Citation: Raszczyk K., Karolak A. *Correlation Between Deformation and Cracking Pattern of Walls and Vaults of the Historical Castle Chapel in Otyń*. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2024, 80:

Otrzymano / Received: 2.08.2024 • **Zaakceptowano / Accepted:** 28.10.2024

doi: 10.48234/WK80WALLS

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews

poziomu wyężenia w celu oceny stanu technicznego i potencjalnego zagrożenia bezpieczeństwa konstrukcji. Problemem jest różnorodność elementów mурowych stosowanych w kolejnych okresach wznoszenia obiektów historycznych (z uwzględnieniem wymian cegieł i kamieni w ramach przebudów, wzmocnień, napraw czy remontów), a także różna wytrzymałość i odkształcalność używanych zapraw. Ponadto kłopotliwe jest uwzględnienie rozmaitych wtrąceń (np. z rudy darniowej) w zhomogenizowanym modelu materiałowym podczas obliczeń statyczno-wytrzymałościowych. Wśród badań diagnostycznych dotyczących oceny właściwości konstrukcji mурowych wyróżnić można metody zarówno niszczące, jak i nieniszczące (lub quasi-nieniszczące) [Orłowicz et al. 2018, s. 36–38], m.in. metodę *flat-jack*, polegającą na szacowaniu wytrzymałości na ściskanie muru poprzez pomiar jego odkształcalności na zadane ciśnienie [Szwanowicz 2002, s. 93–110; Binda, Tiraboschi 1999, s. 449–472].

Zrozumienie pracy statycznej konstrukcji zabytkowej ułatwia dogłębne rozpoznanie historii obiektu i jego przekształceń. To w wyniku zmian w konstrukcji obiektu na przestrzeni wieków mogło dojść do redystrybucji naprężeń i powstania trwałych odkształceń. Dane na temat historii i chronologii powstawania obiektu mogą stanowić istotny wkład w analizę konstrukcyjną obiektu zabytkowego [Prarat, Schaaf 2015, s. 99–110; Legendziewicz et al. 2024, s. 429–448].

Współpraca interdyscyplinarna może dotyczyć zarówno obszarów historycznych i architektonicznych, jak i geologicznych. Wielokrotnie przyczyną uszkodzeń obiektu zabytkowego są zmiany w warunkach gruntowo-wodnych. Dane, które uzyskuje się z odwiertów geologicznych i badań poziomu wód gruntowych, powinny stanowić podstawę analiz, jeśli układ zarysowania obiektu i jego deformacji na to wskazuje [Burland et al. 2003, s. 63–80; Jasięko et al. 2015, s. 38–50].

Mając na uwadze powyższe, należy przyjąć, że identyfikacja współzależności między zarysowaniem i deformacją występującą w obiekcie historycznym może być zarówno celem samym w sobie, jak i podstawą do kontynuacji badań w innych dziedzinach. Ale przede wszystkim analiza układu zarysowań i geometrii obiektu dostarcza kluczowych informacji na temat globalnej sztywności konstrukcji oraz wspomaga ocenę stanu zagrożenia [Bosiljkov et al. 2010, s. 239–249; Raszczuk, Karolak 2021]. Zasadniczym etapem takiego badania jest wówczas znalezienie korelacji pomiędzy deformacjami a obrazem zarysowań.

Mur charakteryzuje się kruchością, więc co do zasady nie zakłada się możliwości występowania jego znacznych deformacji, z uwagi na niską (bliską zerowej) wytrzymałość na rozciąganie. Dopiero kiedy pojawiają się dodatkowe czynniki, może dojść do przekroczenia granicznego poziomu naprężeń i utraty ciągłości muru przejawiającego się zarysowaniem. Następstwem tych procesów mogą być widoczne i mierzalne deformacje. Taka sytuacja występuje głównie w elementach ściskanych (takich jak sklepienia czy filary), w których

order to assess the technical condition and the safety of the structure. The problem is the diversity of masonry elements applied in subsequent periods of construction of historical buildings (including the replacement of bricks and stone as a part of rebuilds, reinforcements, repairs or renovations), as well as different values of strength and deformability of the mortars used. Moreover, it is problematic to take into account various types of inclusions (e.g., from bog iron ore) in a homogenized material model during static and strength calculations. Among the diagnostic tests for assessing the properties of masonry structures, various methods can be distinguished, both destructive and non-destructive (or quasi-non-destructive) [Orłowicz et al. 2018, pp. 36–38], including flat-jack method, which consists in estimating the compressive strength of a wall by measuring its deformability to a given pressure [Szwanowicz 2002, pp. 93–110, Binda, Tiraboschi 1999, pp. 449–472].

Understanding the static behavior of a historic structure facilitates in-depth investigation of the history of the structure and its transformations. As a result of changes in the structure of the structure over the centuries, stresses could have been redistributed and permanent deformations could have occurred. Data on the history and chronology of the creation of the structure can be a significant contribution to the structural analysis of the historic structure [Prarat, Schaaf 2015, pp. 99–110, Legendziewicz et al. 2024, pp. 429–448].

Interdisciplinary cooperation can concern both historical and architectural areas as well as geological ones. It has often happened that the cause of damage to a historic structure is changes in soil and water conditions. Data obtained from geological drilling and groundwater level tests should form the basis for analyses if the arrangement of the structure's cracks and its deformations indicates this [Burland et al. 2003, pp. 63–80, Jasięko et al. 2015, pp. 38–50].

Considering the above, it should be assumed that identification of independence between the correlation of cracking pattern and deformation occurring in historical structures can be both a goal itself and a basis for continuing research in other fields. However, above all, the analysis of the cracking pattern and the geometry of the structure provides key information on the global stiffness of the structure and supports the assessment of the structural safety state [Bosiljkov et al. 2010, pp. 239–249, Raszczuk, Karolak 2021]. The fundamental stage of such a study is then finding the correlation between deformations and the image of cracks.

Masonry is characterized by brittleness, hence in principle, the possibility of significant deformation is not assumed, due to its low (close to zero) tensile strength. It is only when additional factors come into play that the limited stress level can be exceeded and the loss of material continuity may be lost, resulting in cracking. The consequences of these processes can be visible and measurable deformations. Such a situation occurs mainly in compressed elements (such as vaults or pillars), where in the first phase microcracks appear,

w pierwszym etapie tworzą się mikrozarysowania osłabiające strukturę elementów, a następnie obniża się sztywność i zwiększa podatność, przez co pojawiają się przemieszczenia lub dochodzi do utraty stateczności. Istnieją również sytuacje odwrotne (np. wieża w Pizie), w których mur ma na tyle dużą sztywność globalną, że pomimo znacznych deformacji (np. wychyleń na skutek niestabilnych warunków gruntowo-wodnych) nie ulega zarysowaniu czy zniszczeniu.

W związku z powyższym korelacja między deformacją a zarysowaniem ma na celu próbę ustalenia, co powstało najpierw: deformacja czy zarysowanie i na ile powstałe zmiany konstrukcyjne są niebezpieczne dla obiektu zabytkowego.

Skanowanie laserowe i technologia H-BIM

Obecnie skanowanie laserowe jest jedną z metod stanowiących podstawę badań naukowych, a co za tym idzie, może być wykorzystywane do podejmowania decyzji o pracach projektowych, budowlanych i konserwatorskich w szeroko rozumianej renowacji obiektów zabytkowych [Barber et al. 2006, s. 35–52]. Rezultatem badań są informacje o geometrii i położeniu badanego obiektu w postaci chmury punktów (o współrzędnych geometrycznych). Na podstawie chmury punktów można stworzyć model badanego obiektu używany w dalszych analizach. Do największych zalet tej bezinwazyjnej metody należą: szybkość pozyskiwania danych, łatwość obsługi urządzenia, szeroka dostępność i możliwość zastosowania niemal wszędzie, nawet w trudno dostępnych miejscach, a także wysoka dokładność i szczegółowość pozyskiwanych danych oraz możliwość ich prostego przetwarzania [Dinis et al. 2020].

Technologia skanowania laserowego znajduje szerokie zastosowanie w badaniach obiektów zabytkowych. Można tu wskazać najcenniejsze obiekty, tj. starożytne piramidy egipskie [Neubauer et al. 2005], kompleks Inków Machu Picchu w Peru [Kubicka 2017, s. 52–56] czy średniowieczne katedry romańskie i gotyckie w Niemczech [Pritchard et al. 2017, s. 213–220; Walmsley, Kersten 2020], we Francji [Landes et al. 2015, s. 263–270; Bork 2022, s. 397–421], a także wiele innych. Oprócz dostarczenia bardzo precyzyjnych danych o obiekcie, metoda ta może stanowić punkt wyjścia do dalszych badań czy analiz dotyczących np. bezpieczeństwa konstrukcji, jak to często bywa w przypadku obiektów zabytkowych dotkniętych silnymi trzęsieniami ziemi [Quagliarini et al. 2017, s. 175–183].

Metoda ta może być przydatna do pozyskiwania danych o geometrii obiektów historycznych, w tym zabytkowych [Yin, Antonio 2020], w różnych fazach budowy czy przebudowy [Vacca et al. 2012, s. 589–594], a także jako źródło informacji o pracy statycznej obiektu w czasie, w tym o deformacjach, które zaszły na przestrzeni lat pod wpływem obciążeń działających na konstrukcję [Huber et al. 2010].

Na podstawie skanowania laserowego można dodatkowo stworzyć model H-BIM (ang. *Historic Building*

weakening the structure of the elements and consequently the element's stiffness is reduced and vulnerability increases, leading to large displacements or loss of stability. There are also reverse situations (e.g., the Tower of Pisa), in which the masonry has such high global stiffness that despite significant deformations (e.g., horizontal displacements due to unstable soil and water conditions), the structure is not cracked or destroyed.

Therefore, the correlation between deformation and cracking pattern is intended to determine what occurred first: deformation or cracking, and to what extent the resulting structural changes are dangerous to the monument.

Laser scanning and H-BIM technology

Nowadays, laser scanning technique is used as one of the methods constituting the basis for scientific research and, consequently, as the basis for decisions on design, construction and conservation works in the broadly understood renovation of historical structures [Barber et al. 2006, pp. 35–52]. As a result, information about the geometry and location of the examined structure is obtained as a cloud of points (with geometric coordinates). Then, on that basis, a model of such a structure can be created for the purposes of further analyses. The great advantages of this non-invasive method include the speed of data acquisition, ease of use of the device, wide access and possibility of application practically everywhere, even in difficult places, as well as high accuracy and detail of the acquired data and simple data processing [Dinis et al. 2020].

Laser scanning technology is widely used in the examination of historic structures. Many examples can be cited here, such as research on the most valuable historic structures, i.e., ancient Egyptian pyramids [Neubauer et al. 2005], the Inca complex of Machu Picchu in Peru [Kubicka 2017, pp. 52–56] or medieval Romanesque and Gothic cathedrals in Germany [Pritchard et al. 2017, pp. 213–220, Walmsley, Kersten 2020], France [Landes et al. 2015, pp. 263–270, Bork 2022, pp. 397–421], as well as many others. In addition to providing very precise data about the structure, this method can be a starting point for further research or analysis, e.g., on the safety of the structure, as is often the case with historic buildings hit by severe earthquakes [Quagliarini et al. 2017, pp. 175–183].

This method may be useful for obtaining data about the geometry of structures, including historical ones [Yin, Antonio 2020], in various phases of construction or reconstruction [Vacca et al. 2012, pp. 589–594], but also as a source of information about the static work of the structure over time—deformations that have occurred over the years under the influence of loads acting on the structure [Huber et al. 2010].

Based on laser scanning, it is also possible to create an HBIM (Historic Building Information Modeling) model [Barazzetti et al. 2015, pp. 71–87, Yang et

Information Modelling) [Barazzetti et al. 2015, s. 71–87; Yang et al. 2020, s. 350–360], który zawiera m.in. elementy analityczne służące do przeprowadzenia obliczeń statycznych. H-BIM to nowoczesna metoda, coraz powszechniej stosowana w ostatnich latach [Lopez et al. 2018], polegająca na stworzeniu trójwymiarowego modelu (o odpowiednim stopniu szczegółowości) istniejącego obiektu historycznego. W modelu tym zawarte są dane dotyczące architektury, konstrukcji (model analityczny) czy też historii budynku. W celu utworzenia takiego modelu wykorzystuje się m.in. technologię skanowania laserowego, fotogrametrię, a także dane uzyskane z analizy dokumentacji architektonicznej i historycznej obiektu. H-BIM umożliwia nie tylko kompleksową analizę obiektu historycznego, lecz także zrozumienie zagadnień związanych z materiałami i technikami budowlanymi.

Jedną z możliwości wykorzystania omówionych metod jest analiza konstrukcyjna, zwłaszcza w kontekście dostrzeżenia wcześniejszych faz przebudowy i analizy deformacji układów konstrukcyjnych (ugięcia i przemieszczenia sklepień i ścian itp.). W artykule szczegółowo przedstawiono wyniki analiz deformacji kaplicy zamkowej w Otyniu uzyskane za pomocą techniki skanowania laserowego w połączeniu z analizą morfologii zarysowania. Może to być także pierwszy krok do bardziej zaawansowanej analizy, np. numerycznej.

Kaplica zamkowa w Otyniu – historia budowy

Przedmiotem prezentowanej analizy jest kaplica zamkowa w Otyniu, mieście położonym w Polsce, w województwie lubuskim. Poniższą historię obiektu sporządzono na podstawie danych źródłowych przedstawionych w [Andrzejewski, Motyl 2002; Adamek-Pujszo 2010].

Historycznie pierwsze datowane źródła wzmiankujące o mieście pochodzą z roku 1313, kiedy to było ono częścią księstwa glogowskiego. Pierwszy murowany zamek w Otyniu pochodzi z XV w. i został zbudowany w stylu gotyckim na planie czworoboku z wieżą bramną, domem mieszkalnym, wieżą i murem obwodowym. Następnie w XVI w. zamek został przebudowany w stylu renesansowym. Pierwszą kaplicę zamkową wzniesiono w 1638 r. Co ciekawe, uważa się, że powstanie kaplicy mogło się wiązać z przystosowaniem na ten cel jednego ze sklepionych pomieszczeń zamkowych. W połowie XVII stulecia obiekt przejął zakon jezuitów, co zaowocowało kolejną rozbudową i kapitalnym remontem budowli. W czasie prac związanych z adaptacją zamku na klasztor wybudowano nowe skrzydło mieszkalne i kaplicę. Pod koniec wieku XVII budowę nowej kaplicy rozpoczęto od rozbioru zewnętrznych ścian jednego ze skrzydeł (prawdopodobnie była to fasada północna skrzydła zachodniego) i poszerzenia obrysu kaplicy przed lico budynku. Kaplicę zbudowano w 1677 r., a w 1683 powiększono ją o jedno przęsło. Zamek wraz z kaplicą i całym wyposażeniem uległ zniszczeniu podczas pożaru w roku 1702.

al. 2020, pp. 350–360], which includes, among others, analytical elements for performing static calculations. HBIM is a modern method, increasingly used in recent years [Lopez et al. 2018], consisting in creating a three-dimensional model (with an appropriate degree of detail) of an existing historical structure. This model contains data on the architecture, structure (analytical model) or history of the building. In order to create such a model, among others, laser scanning technology, photogrammetry, as well as data obtained from the analysis of architectural and historical documentation of the structure are used. HBIM allows not only for conducting a comprehensive analysis of a historical structure, but also for understanding issues related to materials and construction techniques.

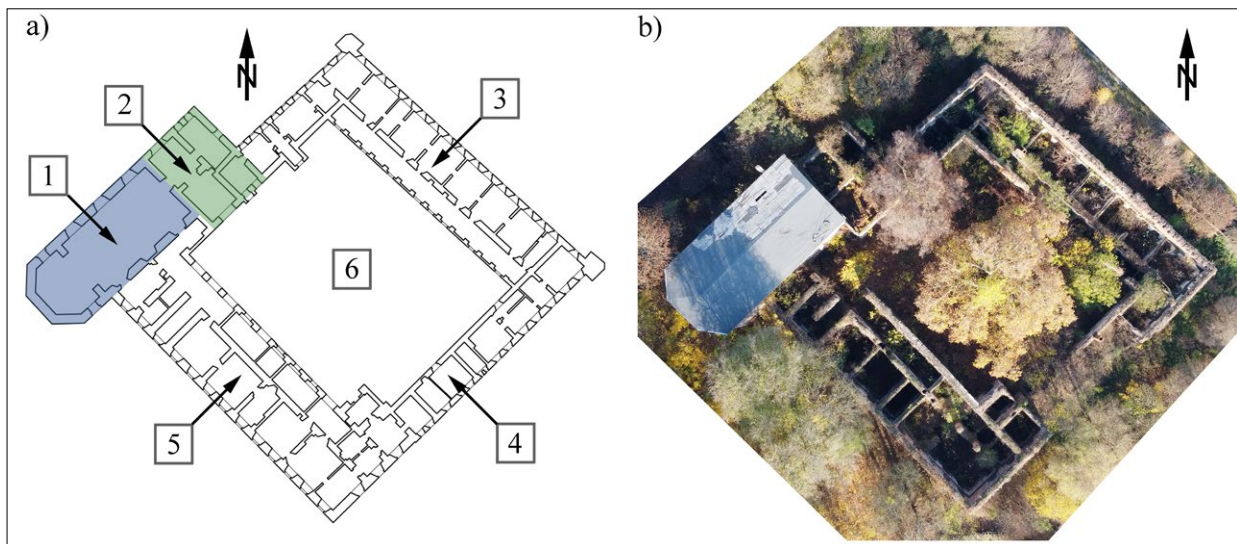
One of the possibilities of using the mentioned above methods is the possibility of conducting a structural analysis, especially in the context of noticing earlier phases of reconstruction and analyzing the deformation of structural systems (deflections and displacements of vaults and walls, etc.). This paper presents in detail the results of the analysis of deformation of the castle chapel in Otyń, obtained as a result of the laser scanning technique combined with the analysis of cracking morphology. It could be also the first step for more advanced numerical analysis.

Castle chapel in Otyń – history of construction

The subject of the presented analysis is the castle chapel in Otyń, a town located in Poland, in Lubusz Voivodeship. The following history of the building was prepared in accordance with [Andrzejewski, Motyl 2002, Adamek-Pujszo 2010].

Historically, the first dated sources mentioning the town come from 1313, when it was a part of the Duchy of Glogów. The first brick castle in Otyń, dates back to the fifteenth century and was built in the Gothic style on a quadrilateral plan with a gatehouse, a residential house, a tower and a perimeter wall. Then, from the sixteenth century, the castle was rebuilt in the Renaissance style. The first castle chapel was built in 1638. Interestingly, it is believed that the creation of the chapel could have involved adapting one of the castle's vaulted rooms for this purpose. In the mid-seventeenth century, the structure was taken over by the Jesuit order, which resulted in another expansion and major renovation of the building. During the works related to the adaptation of the castle into a monastery, a new residential wing and a chapel were built. At the end of the seventeenth century, the construction of a new chapel began by dismantling the outer walls of one of the wings (it was probably the northern facade of the west wing) and extending the outline of the chapel in front of the face of the castle. The chapel was built in 1677, and in 1683 it was enlarged by one bay. The castle with the chapel and all its equipment was destroyed during the fire in 1702.

In the years 1703–1705, a Baroque reconstruction



Ryc. 1. a) plan zamku z zaznaczonymi: 1 – kaplicą zamkową, 2 – budynkiem bramnym, 3 – skrzydłem północno-wschodnim, 4 – skrzydłem południowo-wschodnim, 5 – skrzydłem południowo-zachodnim, 6 – dziedzińcem; b) widok z lotu ptaka zamku w obecnym, złym stanie technicznym (autorem wszystkich rycin jest K. Raszczuk).

Fig. 1. a) The plan of the castle with marked: 1 – chapel, 2 – gate building, 3 – northeastern wing, 4 – southeastern wing, 5 – southwestern wing, 6 – courtyard, b) orthophoto top view of the castle in the current bad technical state (the author of all drawings is K. Raszczuk).

W latach 1703–1705 przeprowadzono barokową rekonstrukcję zniszczonego założenia. W roku 1703 położono kamień węgielny pod budowę nowej kaplicy klasztornej, którą ukończono w 1704. Nową kaplicę dobudowano do zachodniej elewacji budynku bramnego. Założona została na rzucie wydłużonego prostokąta z prezbiterium po stronie zachodniej. Prace wykończeniowe przy kaplicy klasztornej trwały do końca lat 30. XVIII w. Zamek w Otyńiu pełnił funkcję klasztoru jezuitów do 1776 r. W 1790 utworzono tu samodzielną parafię ewangelicką i oddano do użytku kilka pomieszczeń. Obiekt pełnił wówczas funkcje sakralne, administracyjne, mieszkalne i gospodarcze. Forma obiektu z tego okresu jest w znacznym stopniu zbliżona do dzisiejszego wyglądu kaplicy.

Dalsze remonty w części zamku z kaplicą miały miejsce na początku XIX w. W roku 1811 przeprowadzono prace przy sklepieniu prezbiterium kaplicy, które groziło zawaleniem. W latach 1824 i 1839 odnowiono wnętrze kaplicy. W 1859 r. wzmocnione zostały fundamenty skrzydła południowego i kaplicy. W 1877 ze względu na zły stan techniczny kaplica zamkowa została zamknięta, a jej remont ukończono w roku 1883. Co ciekawe, zamek nie był zniszczony w efekcie działań wojennych, lecz przez dwa pożary: w latach 1946 i 1954. Podczas drugiego pożaru częściowo zniszczone zostały sklepienia kaplicy, które następnie odbudowano, a kaplicę przekryto dachem. Od tego czasu zespół zamkowy ulega ciąglemu niszczeniu na skutek braku prac remontowych i konserwatorskich (ryc. 1).

Charakterystyka obiektu i metodyka badań

Opis architektoniczny

Kaplica zamkowa, zlokalizowana w zachodnim skrzydle zamku, dominuje – w sposób architektoniczny – nad

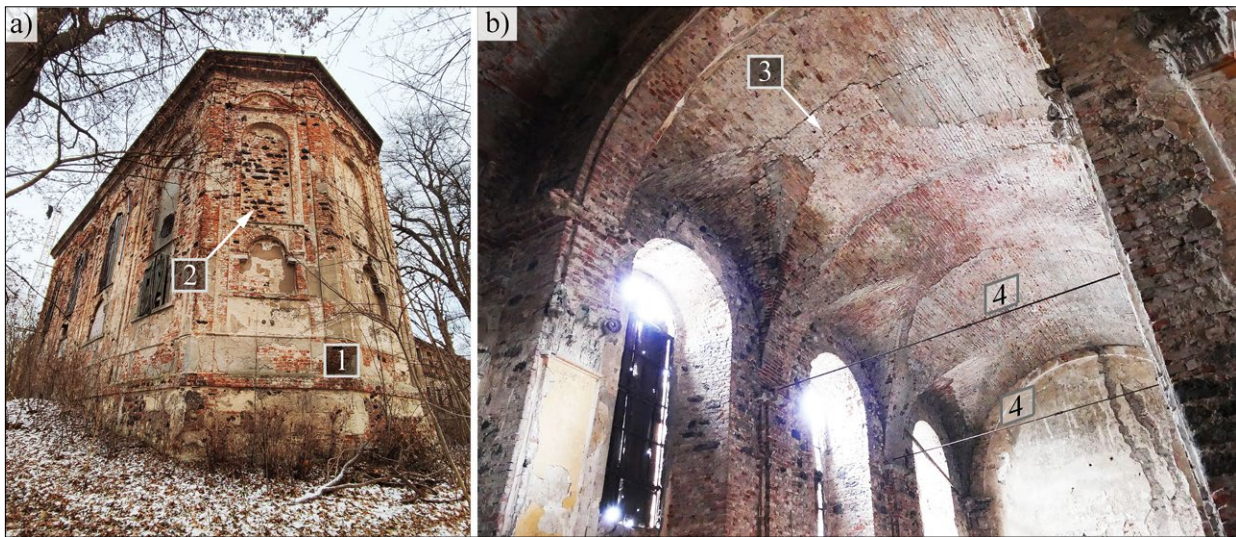
of the destroyed complex was carried out. In 1703, the foundation stone was laid for the construction of a new monastery chapel, which was completed in 1704. The new chapel was added to the western facade of the gate building. It was founded on an elongated rectangular plan with a presbytery on the western side. The finishing works on the monastery chapel lasted until the end of the 1730s. The castle in Otyń served as a Jesuit monastery until 1776. In 1790, an independent Evangelical parish was established there and several rooms in the castle were given its use. At that time, the building served religious, administrative, residential and economic uses. The present appearance of the building is to a large extent similar to the form of the chapel from this period.

Further renovation works on the part of the castle with the chapel took place in the early nineteenth century. In 1811, work was carried out on the vault of the chapel's presbytery, which was in danger of collapse. In 1824 and 1839 the interior of the chapel was renovated. In 1859, work was carried out to strengthen the foundations of the southern wing and the chapel. In 1877, due to its poor technical condition, the castle chapel was closed, and in 1883, its renovation was completed. The castle was not destroyed by war, but by two fires in 1946 and 1954. During the second fire, the vaults of the chapel was partially destroyed, which was then rebuilt and the chapel was roofed. Since then, the castle complex has been subject to constant destruction due to the lack of renovation and conservation works (Fig. 1).

Structure characteristics and research methodology

Architectural identification

The castle chapel, located in the western part of the wing, is the architectural dominant over the entire



Ryc. 2. a) widok od zewnątrz na prezbiterium kaplicy od południowego zachodu: 1 – prezbiterium, 2 – elementy murowe z rudy darniowej; b) widok od wewnątrz na sklepienia wzmocnione stalowymi ściągami: 3 – fragmenty rekonstruowane, 4 – ściąg wzmacniające.

Fig. 2 a) External view on the chapel's presbytery from the south – west, 1 – presbytery, 2 – bog iron masonry units, b) internal view on the vaults strengthened with steel tie rods, 3 – vault reconstruction areas, 4 – steel tie rods.

całym założeniem. Zbudowano ją na rzucie prostokąta z pięciobocznym prezbiterium zorientowanym w kierunku południowo-zachodnim. Elewacje kaplicy wykonano w stylu barokowym, lecz obecnie pozbawione są większości detali architektonicznych. Elewację frontową północno-zachodnią tworzą cztery osie okienne rozdzielone pilastrami. Pierwszy poziom otworów okiennych tworzą mniejsze okna w kształcie prostokąta z półkolistym zamknięciem, natomiast drugi poziom otworów tworzą wysokie okna, również zamknięte półkoliście. Pierwotnie budynek kaplicy nakryty był dachem dwuspadowym wykończonym dachówką ceramiczną, zwieńczonym dzwonnica z barokową latarnią. W części wschodniej (nad budynkiem bramnym) kaplicę zakończono wysokim szczytem. Do obecnego czasu nie zachował się ceglany szczyt ani dzwonnica, a budynek kaplicy nakryty jest znacznie niższym dachem tymczasowym, wykończonym papą. Na południowo-wschodniej elewacji kaplicy znajdują się ślady cegieł, które wskazują, że istniały tam wcześniej otwory okienne lub drzwiowe, prowadzące bezpośrednio do pomieszczeń skrzydła południowo-zachodniego.

Główne wejście do kaplicy prowadziło z przejazdu bramnego, natomiast drugie wejście usytuowano w północnej elewacji budynku. Wnętrze kaplicy wykonano jako jednonawowe z trzema przęsłami i częścią prezbiterium. W grubości muru południowo-wschodniego wykute były nisze zamknięte ceglany arkadami, nad którymi znajdowały się empory.

Opis konstrukcyjny

Wszystkie budynki w obrębie zespołu zamkowego wzniesiono jako murowane z cegły pełnej, połączonej zaprawą wapienną. W konstrukcji ścian nośnych widoczne są wtrącenia w postaci nierównomiernie rozmieszczonych fragmentów rudy darniowej, typowej

complex. It was built on a rectangular plan with a pentagonal presbytery oriented towards the south-west. The chapel's facades were created in the Baroque style, but currently they are devoid of most of the architectural details. The northwest front façade is formed by four window axes, separated by pilasters. The first level of window openings is formed by smaller windows in the shape of a lying rectangle with a semicircular closure, while the second level of openings is formed by tall windows also closed in a semicircular manner. Originally the chapel building was covered with a gable roof covered with ceramic tiles, topped with a bell tower with a Baroque lantern. In the eastern part (above the gate building), the chapel was finished with a high gable. In its existing state, neither the brick gable nor the bell tower have been preserved, and the chapel building is covered with a much lower temporary roof, covered with roofing felt. On the southeastern façade of the chapel there are traces of brickwork, which indicate that there were window openings or doorways previously existing there, leading directly to the rooms of the southwest wing.

The main entrance to the chapel led from the gate passage, while the second entrance was located in the northern façade of the chapel. The interior of the chapel was made as a single-nave with three bays and part of the presbytery. In the thickness of the southeastern wall, there were niches closed with brick arches, above which there were galleries.

Structural identification

All buildings within the castle complex were built of solid brick connected with lime mortar. When building the load-bearing walls, inclusions in the form of unevenly distributed fragments of bog ore were used, typical of the central Odra River region (Fig. 2a). Ma-

dla regionu środkowej Odry (ryc. 2a). Ściany murowane o zmiennej grubości (1,0–1,6 m) stanowią podpory dla ceglanych, kolebkowych sklepień z lunetami oraz drewnianej, wtórnej więźby dachowej. Fundamenty budynku prawdopodobnie stanowią kamienne lub kamienno-ceglane ławy fundamentowe. Nadproża okienne i drzwiowe w przeważającej części wykonano w postaci łęków ceglanych. W budynku należy wyróżnić dwie główne osie podłużne 1 i 2, na których spoczywa cała konstrukcja. W kierunku poprzecznym można wydzielić 4 zasadnicze przęsła między osiami A, B, D i E. W osiach C i D wprowadzono (prawdopodobnie w XIX lub XX w.) ściągi przejmujące siły rozporu ze sklepień (ryc. 2b).

Skanowanie laserowe

Skanowanie laserowe obiektu wykonano przy użyciu skanera Faro Focus S7 z modułem skanowania w rozdzielczości do 165 MPx. Dokładność pomiarów wynosi ± 10 mm. Na podstawie uzyskanego skanu 3D wykonano analizę komputerową wyników skanowania przy użyciu oprogramowania Autodesk Navisworks i Autodesk Recap. Zakres skanowania obejmował wnętrze obiektu. Z uwagi na słabe doświetlenie wnętrza podjęto decyzję o wykonaniu skanu czarno-białego, który daje korzystniejszy obraz w kontekście zwiększonego kontrastu poszczególnych elementów. Kaplica w Otyniu pozbawiona jest w stanie istniejącym tynków zewnętrznych i wewnętrznych, przez co była możliwa inwentaryzacja układu zarysowania z uwzględnieniem wiązań między cegłami.

Na podstawie pomiaru laserowego odtworzono m.in. geometrię kaplicy. Rozpiętość w podłużnych osiach konstrukcyjnych obiektu (1, 2) wynosi 12,37 m, rozstaw osi poprzecznych (A, B, C, D, E) wynosi od 6,43 m do 8,45 m (największy rozstaw w części stanowiącej prezbiterium). Wysokość od przyziemia do sklepienia kaplicy wynosi 9,65 m, a wysokość samego sklepienia to 4,75 m (całkowita wysokość wnętrza to 14,40 m).

Wyniki badań

Układ zarysowania

Spękania występujące w obszarze sklepień kaplicy mają zróżnicowany charakter i kierunek propagacji w zależności od strefy, w której występują (ryc. 3).

W obszarze prezbiterium (między osiami A i B) spękania sklepień występują głównie na połączeniu wysklepek, czyli w tzw. szwach, na kierunku głównie południowym, przechodzącym od sklepienia do połączenia ścian w wewnętrznym narożniku. W bezpośrednim sąsiedztwie łuku tęczowego występują liczne spękania ukośne.

W strefie trójprzęsłowej nawy (między osiami B i E) kluczowe jest spękanie podłużne wzdłuż osi C. Spękanie to stanowiło początek całego ciągu uszkodzeń występujących między osiami B i D, a spowodowanych wypłaszczeniem wysklepki głównej.

sonry walls of variable thickness (1.0–1.6 m) support brick barrel vaults with lunettes and a timber, secondary roof truss. The foundations of the building are probably stone or stone-brick strips. Window and door lintels are mostly made in the form of brick arches. The building structure can be divided into two main longitudinal axes 1 and 2, on which the entire structure of the building is based. In the transverse direction, four main spans can be distinguished between axes A, B, D and E. In axes C and D, tie rods were introduced (probably in the nineteenth or twentieth century) to take over the tension forces from the vaults (Fig. 2b).

Laser scanning

Laser scanning of the structure was performed using a Faro Focus S7 scanner with a scanning module with a resolution of up to 165 MPx. The accuracy of measurements obtained using the laser scanning method is ± 10 mm. Based on the obtained 3D scan, a computer analysis of the scanning results was performed using Autodesk Navisworks and Autodesk Recap software. The range of the scan included the interior of the structure. Due to the poor lighting of the interior, a decision was made to make the monochromatic scan, which gives an output with higher contrast for each element. Currently, the chapel in Otyń is devoid of external and internal plasters, which made it possible to identify cracking pattern and bonds between the bricks.

Based on the laser measurement, among other things, the geometry of the chapel was recreated. The span in the longitudinal structural axes of the structure (1, 2) is 12.37 m, the spacing of the transverse axes (A, B, C, D, E) is from 6.43 m to 8.45 m (the largest span in the part constituting the presbytery). The height from the ground floor to the chapel vault is 9.65 m, and the height of the vault itself is 4.75 m (total height of the interior is 14.40 m).

Results

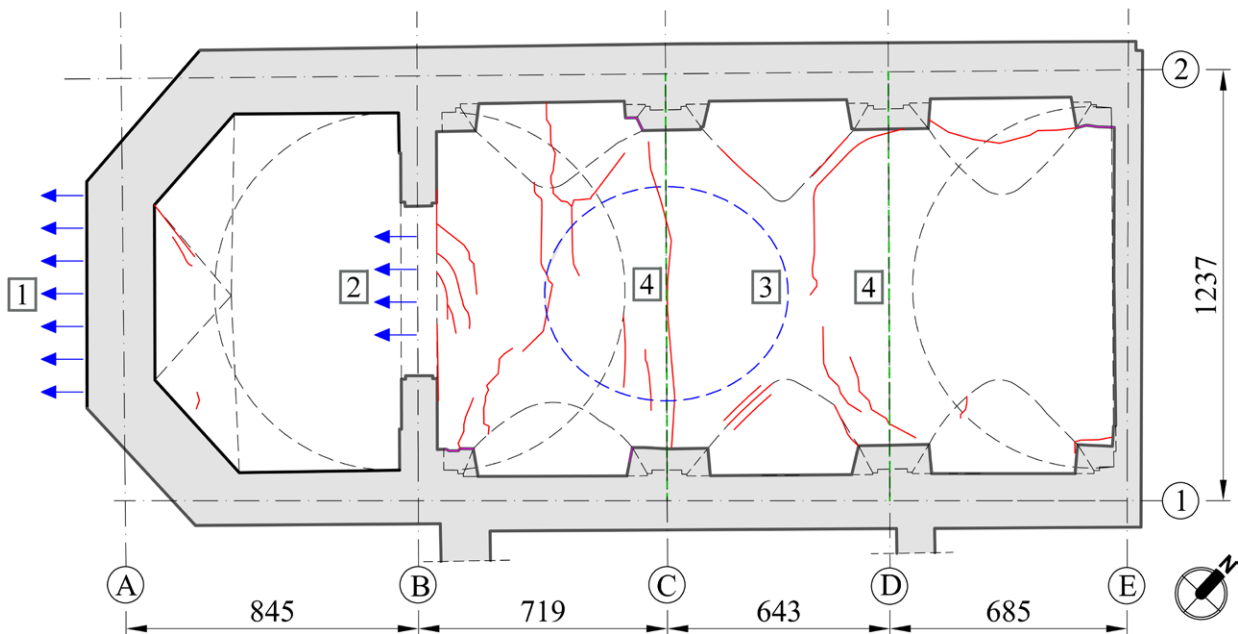
Cracking pattern

The cracks occurring in the area of the chapel vaults have a varied nature and direction of propagation, depending on the zone in which they occur (Fig. 3).

In the presbytery area (between axes A and B), the cracks in the vaults occur mainly at the junction of the vaults, i.e., in the so-called seams, in a mainly meridional direction, passing from the vault to the junction of the walls in the inner corner.

There are numerous diagonal cracks in the immediate vicinity of the chancel arch.

In the three-span zone of the nave (between axes B and E), the key is the longitudinal crack along axis C. This crack was the beginning of the entire sequence of damages occurring between axes B and D, and caused by the flattening of the main vault.



Ryc. 3. Plan kaplicy z oznaczeniem układu zarysowania oraz deformacji: 1 – wychylenie ściany szczytowej prezbiterium, 2 – wychylenie łuku tęczowego, 3 – ugięcie środkowej strefy sklepień, 4 – ściągi wzmacniające.

Fig. 3 Plan of the chapel with cracking pattern and deformation areas, 1 – deflection of the presbytery gable wall, 2 – deflection of the chancel arch, 3 – deflection of the central zone of the vaults, 4 – strengthening tie rods.

W strefie pomiędzy osiami D i E uszkodzenia występują głównie w obszarze lunet sklepienia kolebkowego, w miejscach występowania największych naprężeń rozciągających.

Deformacje

Na podstawie skanowania laserowego wnętrza kaplicy przeanalizowano deformacje ścian. Można wskazać 3 zasadnicze obszary deformacji kaplicy:

1. wychylenie ściany szczytowej prezbiterium w osi A w kierunku południowo-zachodnim,
2. wychylenie łuku tęczowego w osi B w kierunku południowo-zachodnim,
3. ugięcie środkowej strefy sklepienia kolebkowego w obszarze osi C.

Wychylenie ściany szczytowej w osi A w obszarze pęknięcia wynosi 1,8%. Wychylenie łuku tęczowego w osi B wynosi 2,1%. Wskazane deformacje wynikają m.in. z oddziaływań konstrukcji dachowych na mur i są typowe dla obiektów zabytkowych, ale nie stanowią istotnego zagrożenia dla konstrukcji, niemniej jednak wymagają prowadzenia monitoringu w zakresie minimalnym poprzez okresową weryfikację przemieszczeń.

Kluczowa deformacja występuje w części centralnej sklepienia w obszarze osi C. Na podstawie wyników skanowania można wyznaczyć mapę współrzędnych pionowych sklepienia w stosunku do powierzchni referencyjnej dla najwyższego poziomu sklepień, którą oznaczono kolorem fioletowym (część nad prezbiterium między osiami A i B) i na skali przypisano jej wartość 0,0, co należy traktować jako płaszczyznę referencyjną, względem której mierzone są współrzędne

In the zone between axes D and E, the damages occur mainly in the area of the lunettes of the barrel vault, in places where the greatest tensile stresses occur.

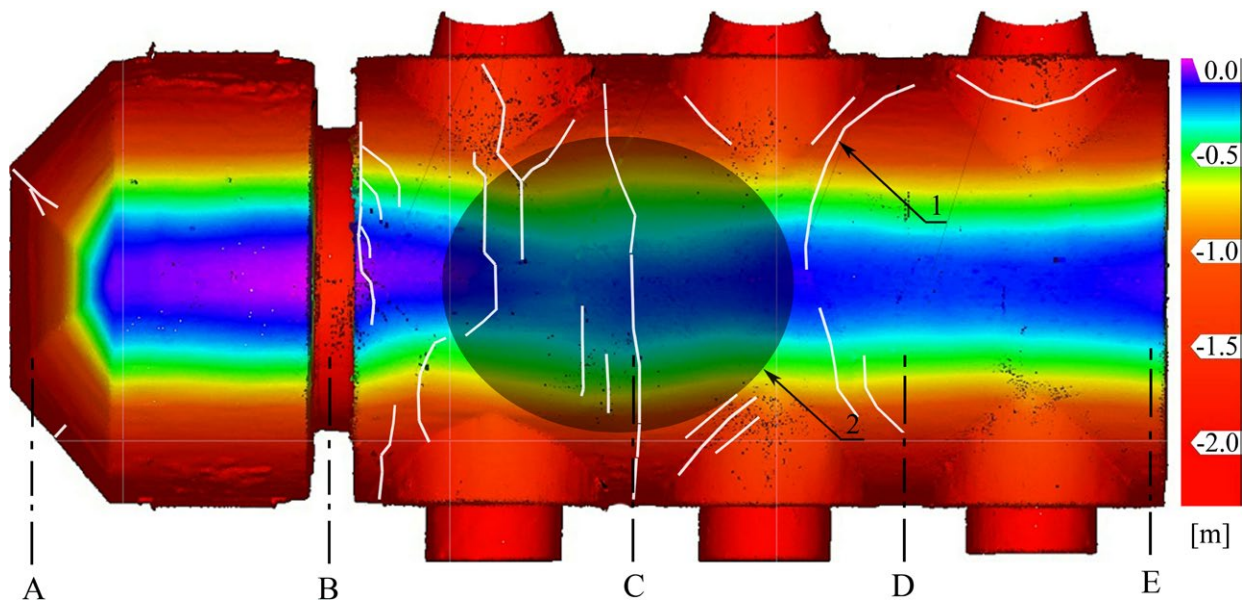
Deformations

Based on laser scanning of the chapel interior, an analysis of wall deformations was performed. Three main areas of chapel deformation can be identified:

1. deflection of the presbytery gable wall in the A axis towards the southwest direction,
2. deflection of the chancel arch in the B axis towards the southwest direction,
3. deflection of the central zone of the barrel vault in the C axis area.

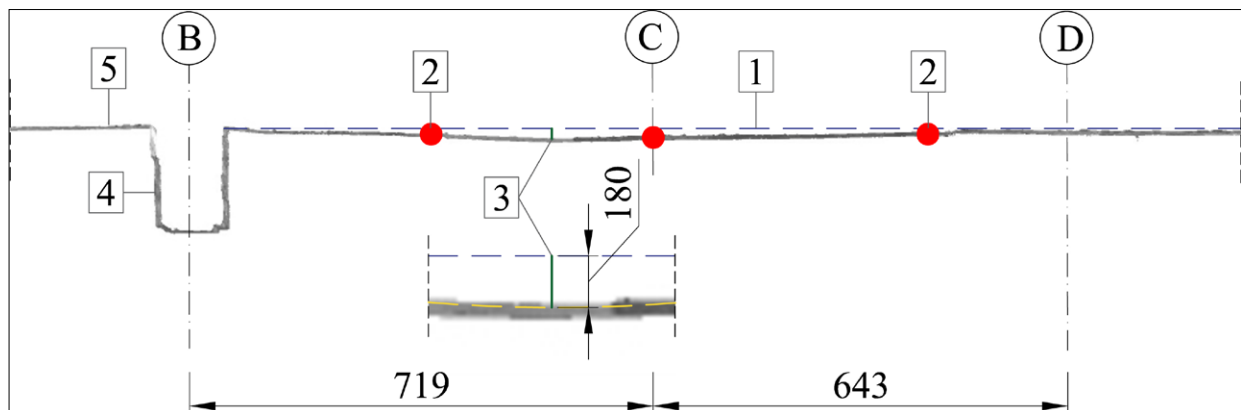
The deflection of the gable wall in the A axis in the crack area is 1.8%. The deflection of the chancel arch in the B axis is 2.1%. The indicated deformations result from, among others, the impact of roof structures on the wall and are typical for historic buildings, but do not pose a significant threat to the structure, however, they require monitoring to a minimum extent through periodic verification of displacements.

The key deformation occurs in the central part of the vault in the C axis area. Based on the scanning results, a map of the vertical coordinates of the vault can be determined in relation to the reference surface for the highest level of the vaults, which was marked in purple (the part above the presbytery between the axis A and B) and assigned value of 0.0 on the scale, which should be treated as the reference plane in relation to which the coordinates of the remaining point are measured (Fig. 4). Thanks to



Ryc. 4. Mapa współrzędnych pionowych w stosunku do powierzchni referencyjnej sklepień skorelowana z zarysowaniami: 1 – zarysowania, 2 – ugięcia.

Fig. 4 Map of the vertical coordinates in relation to reference plane correlated with cracking pattern, 1 – cracks, 2 – deflections.



Ryc. 5. Analiza ugięcia sklepień w osi podłużnej budynku: 1 – referencyjna linia pozioma, 2 – zarysowania w obszarze sklepień, 3 – maksymalne ugięcie sklepienia, 4 – przekrój poprzeczny łuku tęczowego, 5 – linia podniebienia sklepienia w prezbiterium.

Fig. 5 Analysis of the deflection of the vaults in the longitudinal axis of the building, 1 – reference horizontal line, 2 – cracks in the vault area, 3 – maximum deflection of the vault, 4 – cross-section of the chancel arch, 5 – line of the vault's palate in the presbytery.

pozostałych punktów (ryc. 4). Dzięki zastosowanemu obrazowaniu możliwa jest interpretacja geometryczna deformacji wysklepek sklepienia.

Na powyższej mapie widoczne jest zwiększenie różnicy poziomów między podniebieniem sklepienia w najniższym punkcie linii kalenicowej w strefie osi C a pozostałymi poziomami sklepienia głównej nawy. Poddano analizie linię ugięcia w osi podłużnej budynku w obszarze osi B, C i D. Zgodnie z pomiarem ugięcia maksymalne wynosi 18 cm (ryc. 5).

Analizę deformacji przeprowadzono również wzdłuż osi C, porównując geometrię pierwotną łuku z istniejącą. Zauważono, że deformacja ma formę asymetryczną, co może prowadzić do powstawania przegubów i postępującego zniszczenia sklepień (ryc. 6).

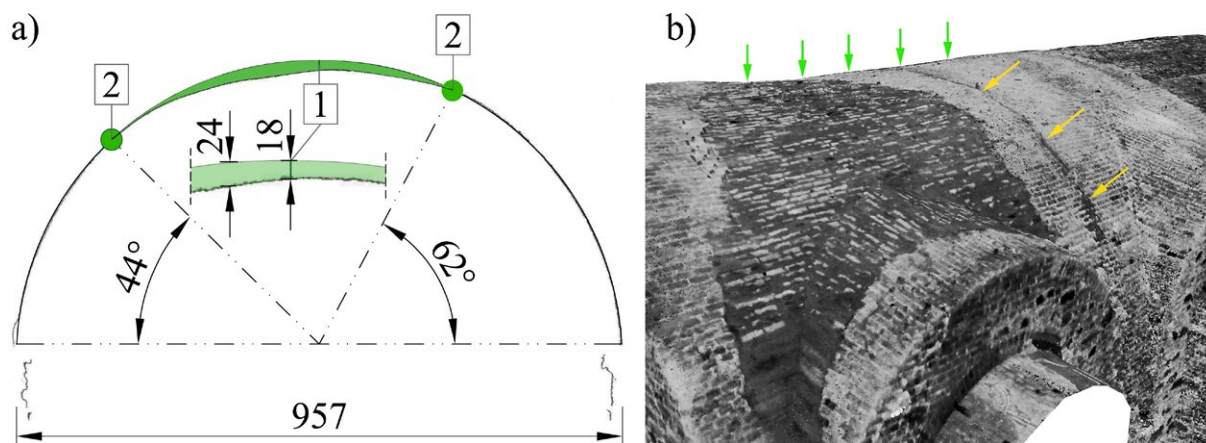
Przeguby powstawały asymetrycznie przy kątach 44° i 62° względem osi poziomej. Należy zwrócić uwagę, że maksymalne ugięcie w osi C występuje nie w osi

the applied imaging, geometric interpretation of the vault deformation is possible.

The above deflection map shows an increase in the difference in levels between the vault intrados at the lowest point of the ridge line in the C axis zone compared to the other intrados levels of the main nave vault. The deflection line in the longitudinal axis of the building in the area of axes B, C and D was analyzed. According to the measurement, the maximum deflection is 18 cm (Fig. 5).

Deformation analysis was also conducted along the C axis, comparing the original geometry of the arch with the current one. It was noted that the deformation has an asymmetric form, which can lead to the formation of hinges and progressive destruction of the vaults (Fig. 6).

The hinges were formed asymmetrically at angles of 44° and 62° relative to the horizontal axis. It should



Ryc. 6. a) analiza geometrii sklepienia w osi C: 1 – ugięcia w osi podłużnej, 2 – punkty występowania przegubów konstrukcyjnych; b) widok chmury punktów z oznaczeniami: strzałki zielone – ugięcia strefy między osiami B i D, strzałki żółte – zarysowanie wzdłuż osi C.

Fig. 6 a) Analysis of the vault geometry in axis C, 1 – deflections in the longitudinal axis, 2 – points of structural hinges, b) point cloud view with markings: green arrows – deflections of the zone between axes B and D, yellow arrows – cracking along axis C.

podłużnej, gdzie osiągnięto 18 cm, lecz bliżej osi 2, gdzie występuje deformacja na poziomie 24 cm. Układ zarysowań jest w znacznym stopniu zbliżony z charakterem deformacji wysklepek i przemieszczeń ścian.

Schemat korelacji

Korelacja między układem zarysowania i deformacją daje podstawę do oceny, które spękania mają kluczowe znaczenie w ocenie bezpieczeństwa konstrukcji kaplicy. Istotne zarysowanie sklepienia występuje wzdłuż osi C niemal na całej szerokości obiektu między osiami 1 i 2. Dało ono początek kolejnym procesom deformacji i zarysowaniom (pojawiły się zarysowania łukowe bliżej osi B i D), a z uwagi na asymetryczne ugięcie względem osi podłużnej spowodowało dodatkowe zarysowania również w obszarze lunet sklepienia kolebkowego. Poniższy rysunek przedstawia wyidealizowany – w stosunku do ryc. 3 – schemat korelacji między układem zarysowania i deformacją, który może być przydatny w analizie innych obiektów o podobnej konstrukcji (ryc. 7).

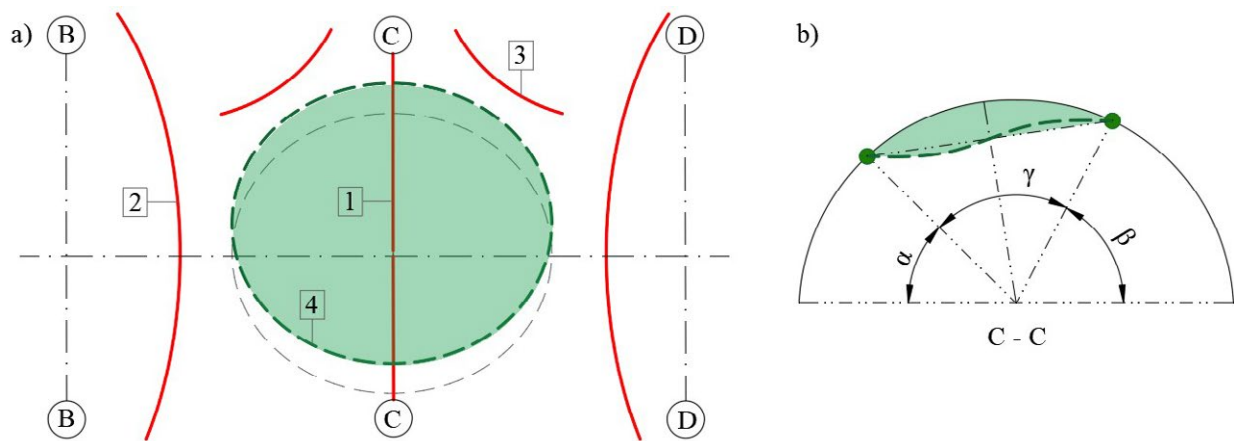
Tak znaczna deformacja może mieć przyczynę w nieprawidłowym uzupełnieniu sklepienia po pożarze w 1954 r., z uwagi na brak skutecznego przewiązania fragmentów oryginalnych i nowych, przez co wartość naprężeń ścinających przekracza wytrzymałość na ścinanie muru w strefie przewiązania. Należy również zweryfikować w przyszłości stan powierzchni grzbietowej i potencjalne zwiększone obciążenie sklepień przez gruz pozostały po pracach remontowych. Brak prowadzonych prac konserwatorskich i długoterminowa nieszczelność pokrycia dachowego spowodowały dodatkową dezintegrację struktury materiałowej sklepień ścian, która pogłębiła procesy deformacji i zarysowania konstrukcji. W związku z powyższym należy przyjąć, że istnieje wiele przyczyn powstałych uszkodzeń, niemniej jednak wtórne przemurowania sklepień stanowią jeden z głównych czynników obecnego słabego stanu konstrukcji.

be noted that the maximum deflection in the C axis does not occur in the longitudinal axis, where 18 cm was reached, but closer to axis 2, where deformation occurs at the level of 24 cm. The cracking pattern corresponds to the nature of deformation of the vaults and the displacements of walls.

Correlation scheme

The correlation between the cracking pattern and deformation provides a basis for assessing which cracks are of key importance in assessing the safety of the chapel structure. A significant crack in the vault occurs along axis C across practically the entire width of the structure between axes 1 and 2. This gave rise to another deformation and cracking process, i.e., the appearance of arc cracks closer to axes B and D, and due to the asymmetric deflection in relation to the longitudinal axis, it also caused additional cracks in the area of the lunettes of the barrel vault. The figure below shows an idealized—in relation to Fig. 3—scheme of correlation between cracking pattern and deformation, which may be useful in the analysis of other structures of similar construction (Fig. 7).

Such a significant deformation may have its cause in the improper completion of the vault after the fire in 1954, due to the lack of effective bonding of the original and new fragments, due to which the value of shear stresses exceeds the shear strength of the wall in the bonding zone. The condition of the ridge surface and the potential increased load on the vaults by debris left after renovation works should also be verified in the future. The lack of restoration works in the building for last years and long-term leakage of the roof covering caused additional disintegration of material structure of vaults and walls, which intensify deformations and cracking of the structure. Therefore, it should be assumed, that there are many causes of existing damages, but nevertheless, secondary, partial reconstruction of the vaults is one of the main factors of the current, poor condition of the structure.



Ryc. 7. a) schemat korelacji między zarysowaniem i deformacją w środkowej części głównej nawy kaplicy: 1 – główne pęknięcie wzdłuż osi C, 2 – pęknięcia łukowe w obszarze osi B i D, 3 – pęknięcia w obszarze lunet sklepienia kolebkowego spowodowane asymetryczną deformacją sklepienia; b) schemat powstania przegubów w powłoce sklepienia w osi C.

Fig. 7 a) Scheme of correlation between cracking pattern and deformation in the central part of the main nave of the chapel, 1 – main crack along axis C, 2 – arc cracks in the area of axes B and D, 3 – cracks in the area of the lunettes of the barrel vault caused by asymmetric deformation of the vault, b) scheme of the formation of hinges in the vault shell along axis C.

Podsumowanie

Analiza wyników badań umożliwiła korelację między układem zarysowania i deformacją obiektu oraz dała podstawę do sformułowania następujących wniosków:

1. Analizę korelacji między układem zarysowania i deformacją należy prowadzić wielokierunkowo w kontekście geometrii budynku. W przypadku kaplicy w Otyńiu przeprowadzono ją zarówno wzdłuż osi podłużnej obiektu, jak i wzdłuż osi C, przez co możliwa była weryfikacja miejsc występowania pęknięć i przegubów wyseparowanych łuków sklepienia. Strefa obniżonego sklepienia między osiami B – C – D wymaga prac wzmacniających z uwagi na znaczne ugięcia wysklepki.
2. Na podstawie analizy wykonano wyidealizowany schemat korelacji obrazujący schemat uszkodzeń sklepienia, który może być przydatny w analizie innych obiektów zabytkowych. Taka analiza powinna być podstawą dalszych badań obiektu zabytkowego, takich jak badania materiałowe, odkrywki architektoniczne, badania geologiczne czy analizy numeryczne.
3. W obiektach zabytkowych występują bardzo często deformacje, które są ustabilizowane, a mimośrody działania sił nie odgrywają istotnej roli. W przypadku kaplicy w Otyńiu takie deformacje występują w obszarze ściany szczytowej prezbiterium i łuku tęczowego, lecz ich wychylenie (zbliżone do 2%) nie stanowi bezpośredniego zagrożenia dla obiektu.
4. W przypadku złożonego i wielokierunkowego układu zarysowania należy wytypować spękania kluczowe w aspekcie konstrukcyjnym, a jeśli to możliwe, zasadne jest wskazanie kolejności powstawania zarysowań w obiekcie wraz z ich powiązaniem z przyczyną powstawania. W kaplicy w Otyńiu kluczowe pęknięcie pojawiło się wzdłuż osi C i związane było

Summary and conclusions

The analysis of the research results allowed for the correlation between the cracking pattern and deformation of the structure and provided the basis for the following conclusions:

1. The analysis of the correlation between the cracking pattern and deformation should be conducted multi-directionally in the context of the building geometry. In the case of the chapel in Otyń, the analysis was conducted both along the longitudinal axis of the structure and along axis C, which enabled the verification of the locations of cracks and hinges of the separated vault arches. The zone of the lowered vault between axes B, C and D requires reinforcement works due to significant deflections of the vault surface.
2. Based on the analysis, an idealized correlation scheme was created illustrating the pattern of damage to the vaults, which may be useful in the analysis of other historic buildings. Such an analysis should be the basis for further research on the monument, like material testing, architectural excavations, geological surveys or numerical analysis.
3. In historic buildings, deformations very often occur, which are stabilized, and the eccentricities of the forces do not play a significant role. In the case of the chapel in Otyń, such deformations occur in the area of the presbytery gable wall and the chancel arch, but their deflection (close to 2%) does not affect the direct safety of the structure.
4. In the case of a complex and multi-directional cracking pattern, it is necessary to select the key cracks in the structural aspect, and if possible, it is reasonable to indicate the order in which the cracks appeared in the structure together with their connection with the cause of their occurrence. In the case of the chapel

ze słabym przewiązaniem części rekonstruowanej po pożarze z pozostałą częścią oryginalną sklepień. Dało to początek tworzeniu się kolejnych deformacji i zarysowań.

5. Jeśli obiekt zabytkowy jest chwilowo pozbawiony tynków zewnętrznych i wewnętrznych, to jest to stan umożliwiający inwentaryzację układu zarysowania w korelacji z układem wiązań elementów murowych (w przypadku kaplicy – cegieł).
6. W przypadku słabego doświetlenia wewnątrz obiektów zabytkowych zasadne jest wykonanie skanowania laserowego w wersji monochromatycznej, gdyż pozwala to na zwiększenie kontrastu poszczególnych elementów, co umożliwi bardziej precyzyjną analizę konstrukcyjną.
7. Kaplica wymaga pilnych prac remontowych i wzmacniających w celu zabezpieczenia konstrukcji obiektu oraz pozostałości cennego wystroju architektonicznego. W zakresie konserwacji konstrukcyjnej konieczna będzie naprawa sklepień w ramach całej powłoki i znaczne wzmocnienie w obszarze osi B – C – D.

Kaplica zamkowa w Otyńiu jest interesującym przykładem obiektu zabytkowego, powstałego na początku XVIII w., który w różnych okresach swojego istnienia wymagał prac budowlano-konserwatorskich. Na podstawie skanowania laserowego i analizy układu zarysowań oraz deformacji obiektu uzyskano istotne informacje dotyczące stanu zagrożenia bezpieczeństwa konstrukcji, dzięki czemu możliwe jest sformułowanie postulatów w obszarze konserwacji konstrukcyjnej dla celów dalszych prac remontowych i wzmacniających.

W ramach przyszłych badań zaleca się wykonanie dodatkowych analiz numerycznych określających stan naprężeń i odkształceń obiektu. Do tego potrzebne są dodatkowe dane geometryczne (w tym grubość sklepień określona przy dostępie do obiektu od strony poddasza) i parametry materiałowe elementów konstrukcyjnych obiektu. Ponadto należy w ramach kolejnych etapów rozpoznania obiektu przeprowadzić badania geologiczne i odkrywki fundamentowe w celu przeanalizowania warunków posadowienia.

in Otyń, the key crack appeared along the C axis and was associated with a weak bond between the part reconstructed after the fire and the remaining original part of the vaults. This gave rise to the formation of further deformations and cracks.

5. If the historic structure is temporarily devoid of external and internal plasters, this is a state that allows for the inventory of the cracking pattern in correlation with the bonding system of the masonry elements (in the case of the chapel—bricks).
6. In the case of poor lighting of the interiors of historic buildings, it is reasonable to conduct laser scanning in the monochromatic version, as this allows for increased contrast of individual elements, which in consequence allows for more precise structural analysis.
7. The chapel requires urgent renovation and reinforcement works in order to protect the structure of the building and the remains of valuable architectural decoration. In terms of structural conservation, it will be necessary to repair the vaults within the entire shell and significantly strengthen the area of the axes B, C and D.

The castle chapel in Otyń is an interesting example of a historic building, built at the beginning of the eighteenth century, which required construction and conservation works at various times of its existence. Based on the conducted laser scanning and analysis of the cracks and deformations pattern of the building, significant information was obtained regarding the state of the structural safety of the structure, and consequently it is possible to formulate postulates in the area of structural conservation for the purposes of further renovation and reinforcement works.

As a part of future research, it is recommended to carry out additional numerical analysis to determine the state of stresses and strains of the structure. For this purpose, additional geometrical data are required (including the thickness of the vaults determined when accessing the structure from extrados) and material properties of structural elements. Furthermore, geological surveys and foundations excavations should be carried out as a part of the next stages of research in order to analyze foundation and soil conditions.

Bibliografia / References

Dokumentacja / Documentation

- Adamek-Pujaszko Katarzyna, *Zabytki gminy Otyń*, [w:] *Otyń – zarys dziejów*, red. Tomasz Andrzejewski, Otyń 2010.
- Andrzejewski Tomasz, Motyl Krzysztof, *Siedziby rycerskie w księstwie głogowskim: zamki i dwory Rechenbergów i Schönaichów*, Nowa Sól 2002.

Opracowania / Secondary sources

- Barazzetti Luigi, Banfi Fabrizio, Brumana Raffaella, Gusmeroli Gaia, Previtali Mattia, Schiantarelli Giu-

sepe, *Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans*, „Simulation Modelling Practice and Theory” 2015, nr 57.

Barber David, Dallas Ross, Mills Jon, *Laser scanning for architectural conservation*, „Journal of Architectural Conservation” 2006, nr 12 (1).

Binda Luigia, Tiraboschi Claudia, *Flat-Jack Test: A slightly destructive technique for the diagnosis of brick and stone masonry structures*, „Restoration of Buildings and Monuments” 1999, nr 5 (5).

Bork Robert, *A Geometrical Perspective on Otto von Sim-*

- son's Gothic Cathedral, „Nexus Network Journal” 2022, nr 24 (2).
- Bosiljkov Vlatko, Uranjek Mojmir, Žarnić Roko, Bokan-Bosiljkov Violeta, *An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures*, „Journal of Cultural Heritage” 2010, nr 11 (3).
- Burland John, Jamiolkowski Michele, Viggiani Carlo, *The stabilisation of the Leaning Tower of Pisa*, „Soils and Foundations” 2003, nr 43 (5).
- Dinis Fabio, Sanhudo Luis, Martins Joao, Ramos Nuno, *Improving project communication in the architecture, engineering and construction industry: Coupling virtual reality and laser scanning*, „Journal of Building Engineering” 2020, nr 30.
- Fathy Armin, Planas Jaime, Sancho Jose, *A numerical study of masonry cracks*, „Engineering Failure Analysis” 2009, nr 16 (2).
- Guarnieri Alberto, Fissore Francesca, Masiero Andrea, Di Donna Alice, Coppa Ugo, Vettore Antonio, *From survey to FEM analysis for documentation of built heritage: The case study of Villa Revedin-Bolasco*, „International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences” 2017, nr 42 (5/W1).
- Huber Daniel, Akinci Burcu, Tang Pingbo, Adan Antonio, Okorn Brian, Xiong Xuehan, *Using laser scanners for modeling and analysis in architecture, engineering, and construction*, 44th Annual Conference on Information Sciences and Systems, Princeton, New Jersey 2010.
- Jasieńko Jerzy, Di Tommaso Angelo, Bednarz Łukasz, Casacci Susanna, Raszczuk Krzysztof, *Comparative analysis of collapsing towers in Poland and Italy: different causes, similar problems*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2015, nr 43.
- Kubicka Anna, *The metrological research of the Machu Picchu site. Application of a cosine quantogram method for 3D laser data*, „Acta IMEKO” 2017, nr 6 (3).
- Landes Tania, Kuhnle Gertrud, Bruna Robin, *3D modeling of the Strasbourg's Cathedral basements for interdisciplinary research and virtual visits*, „The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences” 2015, nr 40.
- Legendziewicz Andrzej, Marcinów Aleksandra, Polak Katarzyna, *Research and conservation issues regarding the southern facade of Wrocław town hall. A case study*, „International Journal of Conservation Science” 2024, nr 15 (2).
- López Facundo, Leronés Pedro, Llamas Jose, Gómez-García-Bermejo Jaime, Zalama Eduardo, *A review of heritage building information modeling (H-BIM)*, „Multimodal Technologies and Interaction” 2018, nr 2 (2).
- Neubauer Wolfgang, Doneus Michael, Studnicka Nikolaus, Riegl Johannes, *Combined high resolution laser scanning and photogrammetrical documentation of the pyramids at Giza*, CIPA XX International Symposium, Torino 2005.
- Orłowicz Romuald, Tkacz Piotr, Buszkiewicz Roman, *Wybrane sposoby oszacowania wytrzymałości muru w budynkach istniejących*, „Przegląd Budowlany” 2018, nr 89.
- Prarat Maciej, Schaaf Ulrich, *Measurement and drawing inventory of wooden architecture monuments in the renovation process – problems and proposal of standardization*, „Budownictwo i Architektura” 2015, nr 14 (4).
- Pritchard Douglas, Sperner Joerg, Hoepner Sophie, Tenschert Ruth, *Terrestrial laser scanning for heritage conservation: The Cologne Cathedral documentation project*, „ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences” 2017, nr 4.
- Quagliarini Enrico, Clini Paolo, Ripanti Mirko, *Fast, low cost and safe methodology for the assessment of the state of conservation of historical buildings from 3D laser scanning: The case study of Santa Maria in Portonovo (Italy)*, „Journal of Cultural Heritage” 2017, nr 24.
- Raszczuk Krzysztof, Karolak Anna, *Correlation between the cracking pattern of historical structure and soil properties: the case of the church in Koźuchów*, „Heritage Science” 2021, nr 9.
- Roca Pere, *Restoration of historic buildings: conservation principles and structural assessment*, „International Journal of Materials and Structural Integrity” 2011, nr 5 (2–3).
- Saisi Antonella, Cantini Lorenzo, Binda Luigia, *Investigation strategies for the diagnosis of historic structures*, „Emerging Technologies in Non-Destructive Testing V” 2012, nr 43.
- Szwaranowicz Andrzej, *Metoda badań wytrzymałościowych konstrukcji murowych „in situ” za pomocą poduszek ciśnieniowych*, „Prace Instytutu Techniki Budowlanej” 2002, nr 31 (4).
- Vacca Giuseppina, Deidda Monica, Dessi Andrea, Marras Monica, *Laser scanner survey to cultural heritage conservation and restoration*, „International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences” 2012, nr 39 (B5).
- Walmsley Alexander, Kersten Thomas, *The Imperial Cathedral in Königslutter (Germany) as an immersive experience in virtual reality with integrated 360 panoramic photography*, „Applied Sciences” 2020, nr 10 (4).
- Yang Xiucheng, Grussenmeyer Pierre, Koehl Mathieu, Macher Helene, Murtiyoso Arnadi, Landes Tania, *Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques*, „Journal of Cultural Heritage” 2020, nr 46.
- Yin Yongsheng, Antonio Juan, *Application of 3D laser scanning technology for image data processing in the protection of ancient building sites through deep learning*, „Image and Vision Computing” 2020, nr 102.

Streszczenie

Rozpoznanie układu konstrukcyjnego obiektu zabytkowego może być oparte na wielu czynnościach pomiarowych i diagnostycznych. Jedną z metod przydatnych w identyfikacji i ocenie stanu zagrożenia bezpieczeństwa konstrukcji jest korelacja między deformacją a układem zarysowania ścian, sklepień, filarów czy łęków. Takie badanie przeprowadzono w XVIII-wiecznej kaplicy zamkowej w Otyniu, dla której wykonano skan laserowy generujący chmurę punktów stanowiących podstawę analizy. W obszarze sklepień zlokalizowane były liczne zarysowania i deformacje, których analiza i korelacja mogą posłużyć do podjęcia dalszych decyzji w zakresie konserwacji konstrukcyjnej obiektu. Analiza pozwoliła odkryć, że układ zarysowania jest bezpośrednio powiązany z deformacją globalną obiektu, oraz wskazała, które strefy są szczególnie wyczerpane i wymagają wzmocnienia w zakresie przyszłych prac budowlano-konserwatorskich.

Abstract

The identification of the structural system of a historical building may be based on many measurement and diagnostic actions. One of the methods useful in identifying and assessing the safety of the structure is correlation between deformation and cracking pattern of walls, vaults, pillars and arches. Such a study was carried out in the eighteenth century castle chapel in Otyń, for which a laser scan was performed generating a cloud of points constituting the basis for the analysis. In the area of the vaults, numerous cracks and deformations were located, the analysis and correlation of which is the basis for further decisions in the field of the structural conservation of the structure. The analysis showed that the cracking pattern is directly related to the global deformation of the structure and indicated which zones are particularly utilized and require reinforcement in the scope of future construction and conservation works.