

Jerzy Jasieńko*

orcid.org/0000-0002-8574-6121

Andrzej Kadłuczka**

orcid.org/0000-0001-7009-5330

Kopuła Brunelleschiego we Florencji, wybrane problemy budowlane, statyczne i konserwatorskie

Brunelleschi Dome in Florence: Selected Structural, Static, and Conservational Aspects

Słowa kluczowe: historia architektury, architektura renesansu, statyka kopuły, Filippo Brunelleschi, ochrona dziedzictwa kulturowego

Keywords: history of architecture, Renaissance architecture, dome static behavior, Filippo Brunelleschi, cultural heritage conservation

W dniu 7 sierpnia 2020 roku minęło 600 lat od momentu rozpoczęcia budowy we Florencji przez Filippo Brunelleschiego tej największej na świecie murowanej kopuły o wewnętrznej średnicy liczącej 45 metrów. Oficjalne uroczystości upamiętniające rocznicę wskutek rozwoju epidemii zostały przełożone na późniejszy okres, ale ze względu na znaczenie tego dzieła dla światowej historii architektury i inżynierii cywilnej autorzy¹ uznali potrzebę przybliżenia środowisku konserwatorskiemu aktualnej problematyki budowlanej, statycznej i konserwatorskiej, co ma swoje uzasadnienie pojawiającymi się obawami o stan techniczny kopuły.

W niniejszym artykule ograniczonym możliwościami wydawniczymi nie sposób poruszyć wszystkich aspektów związanych z tą unikalną konstrukcją początku włoskiego quattrocenta. Być może warto będzie w przyszłości omówić te, które świadczą o wyjątkowej wiedzy budowlanej i statycznej przez Filippo Brunelleschi, z wykształcenia rzeźbiarza i złotnika, ale pasjonata architektury antycznego Rzymu, która była przedmiotem jego dociekliwych studiów i badań. Wśród tych aspektów najbardziej interesujące wydają się być: struktura statyczna kopuły i sposób użycia materiałów do jej wykonania, nowatorska technika budowy bez zastosowania

August 7, 2020, marked the sixcentennial anniversary of the inauguration of construction of the world's biggest masonry dome (with an internal diameter of 45 m) by Filippo Brunelleschi. Although official celebrations of the anniversary were postponed due to the pandemic, minding the dome's global significance for the history of architecture and civil engineering, the authors¹ found it appropriate to provide some insights on relevant structural, static, and conservational issues pertaining to the monument, a decision motivated by emerging concerns about its technical condition.

Due to editorial restrictions, it is not feasible for this paper to cover all aspects related to this unique structure of the early Italian Quattrocento. Therefore, those that prove Filippo Brunelleschi's expertise in construction and knowledge of static behavior of structures may be worth devoting a separate discussion in the future. A sculptor and goldsmith by profession, Brunelleschi was fascinated by ancient Rome's architecture, which he meticulously studied. Among these aspects, the following seem to be particularly interesting: the dome's static structure and use of materials in the construction process; novel

* prof. dr hab. inż., Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej

** prof. dr hab. inż. arch., Wydział Architektury Politechniki Krakowskiej

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

** *Professor, Ph.D., Faculty of Architecture, Cracow University of Technology*

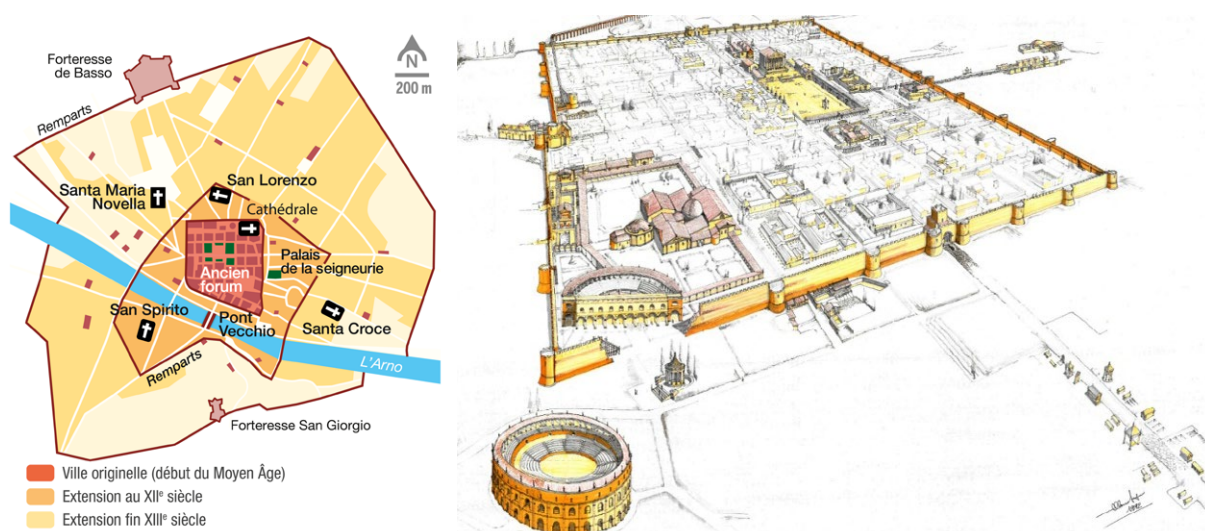
Cytowanie / Citation: Jasieńko J., Kadłuczka A. Brunelleschi Dome in Florence: Selected Structural, Static, and Conservational Aspects. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2021, 66:182–194

Otrzymano / Received: 21.02.2021 • **Zaakceptowano / Accepted:** 29.03.2021

doi: 10.48234/WK66FLORENCE

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews



Ryc. 1. Miasto antyczne Florentia: schematyczny plan miasta rzymskiego (kolor czerwony) na tle miasta średniowiecznego i nowożytnego (po lewej), źródło: <https://www.lolivrescolaire.fr/page/15110132>; perspektywa z lotu ptaka (po prawej), źródło: <https://www.romanoimperio.com/2017/12/florentia-firenze-toscana.html> (dostęp: 22 II 2021).

Fig. 1. The ancient city of Florentia: schematic plan of the Roman city (red) against the background of the medieval and modern city (left), source: <https://www.lolivrescolaire.fr/page/15110132>; bird's eye view (right), source: <https://www.romanoimperio.com/2017/12/florentia-firenze-toscana.html> (accessed on 22 II 2021).

rusztowania szalunków i krążyn profilujących czy system ruchomych roboczych platform murarskich, który pozwolił na oszczędne stosowanie drewna do ich wykonania. Problematykę tę omawia szczegółowo profesor Uniwersytetu we Florencji Roberto Corazzi w książce *Brunelleschi's Dome. The secret of its construction* wydanej w 2017 roku, a zawierającej rezultaty wieloletnich badań, których synteza *La cupola del Brunelleschi – storia e indagini* (*Kopuła Brunelleskiego – historia i badania*) została opublikowana w języku polskim².

Kopuła została osadzona na koronie murów katedry Santa Maria del Fiore rozpoczętej przez Arnolfo di Cambio w 1294 roku, a powiększonej od wschodu przez Francesco Talenti poprzez przedłużenie nawy i powiększenie absyd, ale z zachowaniem charakterystycznego planu. Kopuła jest samonośną konstrukcją inżynierską wykonaną bez użycia szalunków i rusztowań, wprowadzając w niekłamane zdumienie współczesnych badaczy, którzy postrzegają tę konstrukcję jako cud renesansowej inżynierii stosującej starożytne techniki i nawet przekraczającej granice tego, co można dziś zbudować przy użyciu nowoczesnych technologii budowlanych³.

Fenomen katedry Santa Maria del Fiore i jej monumentalnej kopuły jest wielowątkowy i zadziwia trwałością unikalnej konstrukcji wieńczącej świątynię budowaną ponad 120 lat: od 1294 do 1418 z przerwami wynikającymi z równoczesnego użytkowania w jej wnętrzu aż do 1375 roku wczesnochrześcijańskiego kościoła Santa Reparata z IV–VI wieku n.e., w końcu znacznie powiększoną w jej neowaligicznym punkcie krzyżowania się osi absyd bocznych z osią główną kościoła i absydy ołtarzowej. Wybór lokalizacji katedry Santa Maria del Fiore w miejscu dawnego kościoła Santa Reparata, a wcześniej ściśle zabudowanego kwartału północno-wschodniego antycznej Florentia, nie stwarzał idealnych warunków geotechnicznych

building technique without scaffolds, formwork, or centering; and mobile working platforms for brick-laying, which reduced the amount of wood needed. These issues were discussed in detail by Professor Roberto Corazzi from the University of Florence (UF) in his book *Brunelleschi's Dome. The secret of its construction* published in 2017, highlighting the results of years-long research, the synthesis of which, *La cupola del Brunelleschi – storia e indagini*, was published, among others, in Polish.²

The dome was laid on the crest of the Cathedral of Santa Maria del Fiore (Saint Mary of the Flower), initiated in 1294 by Arnolfo di Cambio and extended in the east by Francesco Talenti through prolongation of the nave and extension of apses, with preservation of the original, characteristic plan. It is a self-supporting engineering structure made without formwork or scaffolding, which leaves contemporary researchers truly astounded; they see the structure as a masterpiece of Renaissance engineering, which made use of ancient techniques to reach even beyond what is achievable with today's building technology.³

The phenomenon of the Cathedral of Saint Mary of the Flower and its monumental dome is multithreaded, with the unique structure topping the shrine being astoundingly solid. The construction of the cathedral took over 120 years, from 1294 to 1418. The process was interrupted every now and then because an early Christian Church of Santa Reparata, dating from the fourth/sixth century AD, was simultaneously being used in the shrine's interior until 1375. Finally, the building was significantly expanded at the critical crossing point of the axis of the lateral apses, the church's main axis, and the axis of the altar apse. The choice of siting of the cathedral, on the site of the former Church of Santa Reparata and an



Ryc. 2. Kościół Santa Reparata na tle planów 1 i 2 katedry Santa Maria del Fiore, źródło: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SMDFplan36.gif>; przekrój przez katedrę z modelem Santa Reparata, źródło: <https://duomo.firenze.it/en/opera-magazine/post/5143/santa-reparata> i plan relikwów Santa Reparata – kolejno (dostęp: 22 II 2021).

Fig. 2. The Santa Reparata church against the planes of the first and second cathedral of Saint Mary of the Flower, source: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SMDFplan36.gif>; cathedral cross-section with a model of the Santa Reparata church, source: <https://duomo.firenze.it/en/opera-magazine/post/5143/santa-reparata>, and a plan of the remains of Santa Reparata church (accessed on 22 II 2021).

podłoża, jakie byłyby dziś wymagane dla budowy tak prestiżowej i skomplikowanej konstrukcji. Ma to zapewne swoje reperkusje w jej pracy statycznej w ciągu sześciu wieków, podobnie jak często występujące w tej szerokości geograficznej ruchy tektoniczne podłoża⁴. Notowano je m.in. w samej Florencji po zbudowaniu kopuły w latach: 1453, 1729, 1925, ale znacznie częściej w regionie Toskanii w pobliżu Florencji⁵.

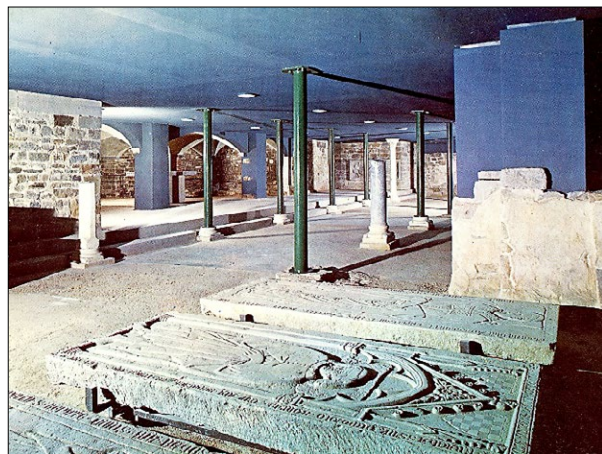
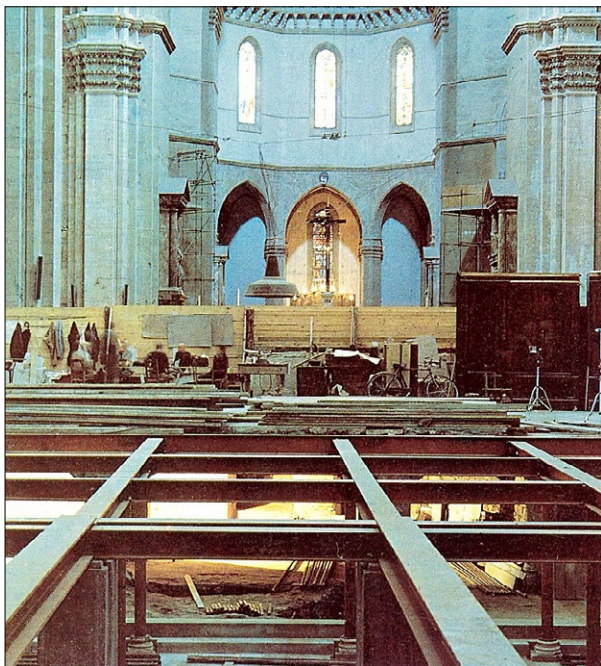
Odkrycie w 1966 roku dobrze zachowanego przyziemia kościoła Santa Reparata podczas prac konserwatorskich związanych z renowacją marmurowej posadzki w nawie głównej było nie tylko sensacją historyczną i archeologiczną, ale także początkiem wielkich prac adaptacyjnych, które doprowadziły do powstania podziemnej ekspozycji w katedrze Santa Maria del Fiore, opartej na nowej konstrukcji stalowej rozporającej mury fundamentowe budowli Arnolfo di Cambio i bez wątpienia musiały mieć istotne znaczenie dla jej oryginalnego układu statycznego, a także powstania nowych stosunków termiczno-wilgotnościowych. Wprawdzie nowa ekspozycja zajęła tę część katedry, która nie była bezpośrednio związana ze ścianami niosącymi tambur i czaszę kopuły, ale należy pamiętać, że cały teren, na którym posadowiona jest Santa Maria Del Fiore, posiada skomplikowaną stratygrafię geotechniczną w związku z licznymi rozbiórkami dawnych budynków⁶ i wtórnym wykorzystaniem materiału budowlanego do stworzenia platformy dla rozszerzonego planu świątyni przez Francesco Talenti⁷.

Pierwsze nieudokumentowane sygnały o problemach statycznych i pojawiających się pęknięciach pojawiły się wkrótce po ukończeniu prac budowlanych, ale dopiero około 200 lat później, w 1639 roku Gherardo Silvani, architekt katedry, przeprowadził odnotowane w źródłach prace naprawcze, wprowadzając uzupełnienia tynków oraz metalowe, niewielkie kotwy. W 1691 roku kolejny architekt katedry Bernardo Possi zaobserwował powiększenie się pęknięć, co spowodowało powołanie przez wielkiego księcia Cosimo III specjalnej komisji eksperckiej, która zaleciła zastosowanie 4 dużych obwodowych ściągnięć żelaznych, a co spotkało się

even earlier site of a tightly built northeastern quarter of ancient Florentia, was far from perfect in terms of the geotechnical condition of soil that would today be required for construction of such a prestigious and complex structure. This surely affected the building's static behavior over the six centuries of its existence, as did the tectonic movements typical of this latitude,⁴ reported in Florence following the construction of the dome in 1453, 1729, and 1925, but far more frequent in Tuscany (near Florence).⁵

The discovery of a well-preserved basement of the Santa Reparata church in 1966 during conservation works related to the renovation of the nave's marble floor, next to being a historical breakthrough, also initiated far-fetched conversion works, crowned with an underground exhibition at the Cathedral of Saint Mary of the Flower supported on a new steel structure strutting the foundation walls of Arnolfo di Cambio's edifice, which undoubtedly influenced the cathedral's original static system and thermal and moisture patterns. Even though the new exhibition occupied a segment of the cathedral that was not directly connected with the walls supporting the drum and the dome, it must be noted that the entire terrain where the church is founded has a complex stratigraphic geology resulting from the disassembly of numerous former buildings⁶ and the reuse of the remaining building materials by Francesco Talenti for the construction of a platform for the extended plane of the shrine.⁷

The first undocumented signals of static issues and emerging cracks appeared shortly after completion of the construction works, but it was not until 200 years later (1639) that Gherardo Silvani, the cathedral's architect, conducted registered repair works that included plasterwork repair and installation of small metal anchors. In 1691, another architect of the cathedral, Bernardo Possi, noticed crack expansion, following which an expert committee was appointed by Prince Cosimo III, which recommended the use of four big peripheral iron ties; an idea that met with protests and



Ryc. 3. Podziemna ekspozycja relikwii Santa Reparata w katedrze Santa Maria del Fiore (kolejno): wnętrze katedry z konstrukcją stalową podziemi, widok konstrukcji stalowej z poziomu Santa Reparata, odkryte relikwii bocznej absydy Santa Reparata, ukończona podziemna ekspozycja (stan z 1979), źródło: P. Bargellini, G. Morozzi, G. Batini, *Looking back to Santa Reparata: A cathedral within the cathedral*, Bonechi Editore Firenze 1971.

Fig. 3. Underground exhibition of the relics of the Santa Reparata church in the Cathedral of Saint Mary of the Flower. Top to bottom: cathedral's interior with a steel structure in the basement; view of the steel structure from the level of the Santa Reparata church; uncovered relics of the lateral apse of the Santa Reparata church; finished underground exhibition (as of 1979), source: P. Bargellini, G. Morozzi, G. Batini, *Looking back to Santa Reparata: A cathedral within the cathedral*, Firenze 1971.

z protestem i dalszą dyskusją nad przyczynami. Słabe trzęsienie ziemi, jakie nawiedziło Florencję w 1697 roku, i brak widocznego wpływu na stan kopuły dostarczyło argumentów dla zwolenników nieinterwencji, a uważany za autorytet inżynier papieża Benedykta XIV Giovanni Poleni po przeprowadzeniu oględzin kopuły uznał, że ustabilizowane pęknięcia płatów kopuły nie są spowodowane ruchami podłoża i fundamentów, ale powstały wskutek przeciążenia jej konstrukcji przez dużą masę własną. Kolejna komisja pod kierunkiem Rodolfo Sabatini, powołana dopiero w 1935 roku z udziałem słynnego architekta i konstruktora Pier Luigi Nervi, uznała, że pęknięcia są wynikiem zmian temperaturowych i skurczem materiału, ale nie stanowią żadnego zagrożenia dla cennego zabytku.

provoked continued discussion on the origin of cracks. The weak earthquake registered in Florence in 1697 did not visibly affect the dome's condition, which was used as an argument by those who opted for not proceeding with the works. Giovanni Poleni, a highly-respected engineer of Benedict XIV, stated following a visual inspection of the dome that the stabilized cracks in the dome were not caused by movements of the ground and foundations, but emerged due to the structure being overstrained by its own weight. It took many years until another commission was appointed (in 1935), headed by Rodolfo Sabatini and with Pier Luigi Nervi, a renowned architect and structural engineer, among its members. The commission decided that the cracks emerged due to temperature changes

Ostatnie interdyscyplinarne badania przeprowadzone przez naukowców z Department of Earth Sciences i Department of Civil and Environmental Engineering, University of Florence, oraz Department of Civil Engineering and Architecture, University of Parma, oparte na analizach geotechnicznych i geofizycznych wspartych modelowaniem numerycznym, a uwzględniające zarówno obserwacje historyczne, jak i zapisy stałego monitoringu⁸ i pomiarów dynamicznych, opublikowane w 2013 roku⁹, pozwalają na optymistyczne konkluzje co do dalszych losów tej unikalnej budowli, określając proces powstawania spękań i odkształceń jako *normal behaviour* w określonych warunkach środowiskowych, a nowoczesne narzędzia i multidyscyplinarne metody analityczne oparte na stałym monitoringu obiektu prowadzące do „walidacji możliwych wzmocnień i interwencji konsolidujących” jako gwarancję bezpiecznego trwania zabytku w przyszłości¹⁰.

Nad statyką kopuły Brunelleschiego są prowadzone badania także w Polsce w Politechnice Wrocławskiej. Na podstawie analizy raportów badawczych dotyczących stanu konstrukcji kopuły oraz uwzględniając badania własne, Jerzy Jasieńko, Krzysztof Raszczuk i Grzegorz Rybak¹¹ wykonali własne modele numeryczne odnoszące się do trzech symulowanych sytuacji: bez pęknięć, z pęknięciami i z zastosowaniem wzmocnienia kopuły. Badania te wnoszą wkład do analizy zagrożeń związanych z zabezpieczeniem jednej z najważniejszych historycznych kopuł świata oraz pozwalają na sformułowanie hipotez roboczych na temat przyczyn powstałych pęknięć. W zakresie ogólnych zaleceń wyniki badań potwierdzają stanowisko włoskich ekspertów, że stałe parametry, takie jak ciężar własny konstrukcji i temperatura, nie stanowią poważnego zagrożenia dla stabilności konstrukcji i na obecnym etapie nie są wymagane niezależne wzmocnienia podparcia kopuły. Autorzy badań zwracają natomiast uwagę na potencjalne zagrożenie, jakim są trzęsienia ziemi występujące w tej strefie geograficznej, i konieczność bliższego rozpoznania tego zjawiska zarówno w kwestii reakcji konstrukcji na wibracje i oszacowania częstotliwości drgań własnych, a także czynników je tłumiących. Interesującym zapewne byłoby przeprowadzenie eksperymentu polegającego na wywołaniu sztucznego drgania konstrukcji *in situ*, jaki zaproponowali Giovanni i Michele Fanelli¹², co dałoby odpowiedź na postawiony powyżej problem i pozwoliłoby określić moduł Younga dla częstotliwości modalnej dla całej konstrukcji.

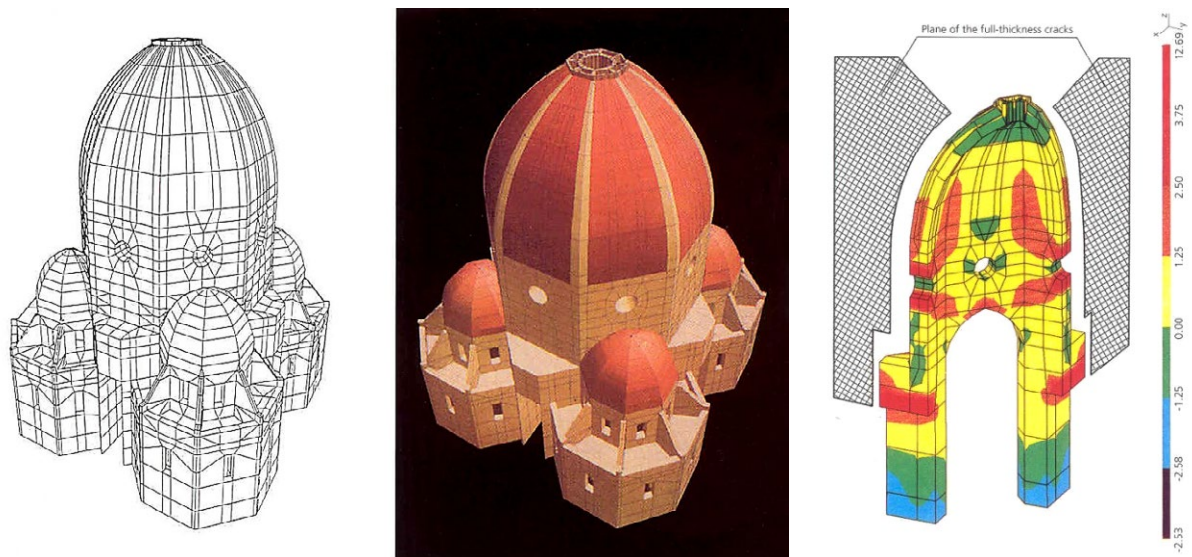
Ciekawy wątek badawczy zagrożenia sejsmicznego kopuły w przeszłości dotyczy kwestii zauważonej już przez Gianbattistę Nelli i Vincenza Viviani po obserwacji rezultatów trzęsienia ziemi w 1697 roku, których wnioski potwierdzają eksperci. Chodzi tu o problem ciężaru własnego jednorodnie uformowanego masywu kopuły opartej na niejednorodnej strukturze jej podpór. Zwrócili na to uwagę Giovanni i Michele Fanelli w 2004 roku na podstawie numerycznego modelu kopuły, dowodząc, że główną przyczyną pęknięć były drgania generowane przez trzęsienia ziemi, ale ciężar

and material shrinkage, but did not pose a threat to the valuable monument.

Recent interdisciplinary studies conducted by researchers from the Departments of Earth Sciences and Civil and Environmental Engineering of the UF and from the Department of Civil Engineering and Architecture of the University of Parma with the use of geotechnical and geophysical analyses based on numerical modeling and historical observations and of continuous monitoring records⁸ and dynamic measurements (published in 2013)⁹ warrant optimistic conclusions regarding the future of this unique structure, as the researchers see the process of cracking and deformation as normal behavior under specific environmental conditions and perceive the modern tools and multidisciplinary methods of analysis, based on continuous monitoring of the site and allowing “validation of possible reinforcements and consolidating interventions,” as a guarantee of a safe future of the building.¹⁰

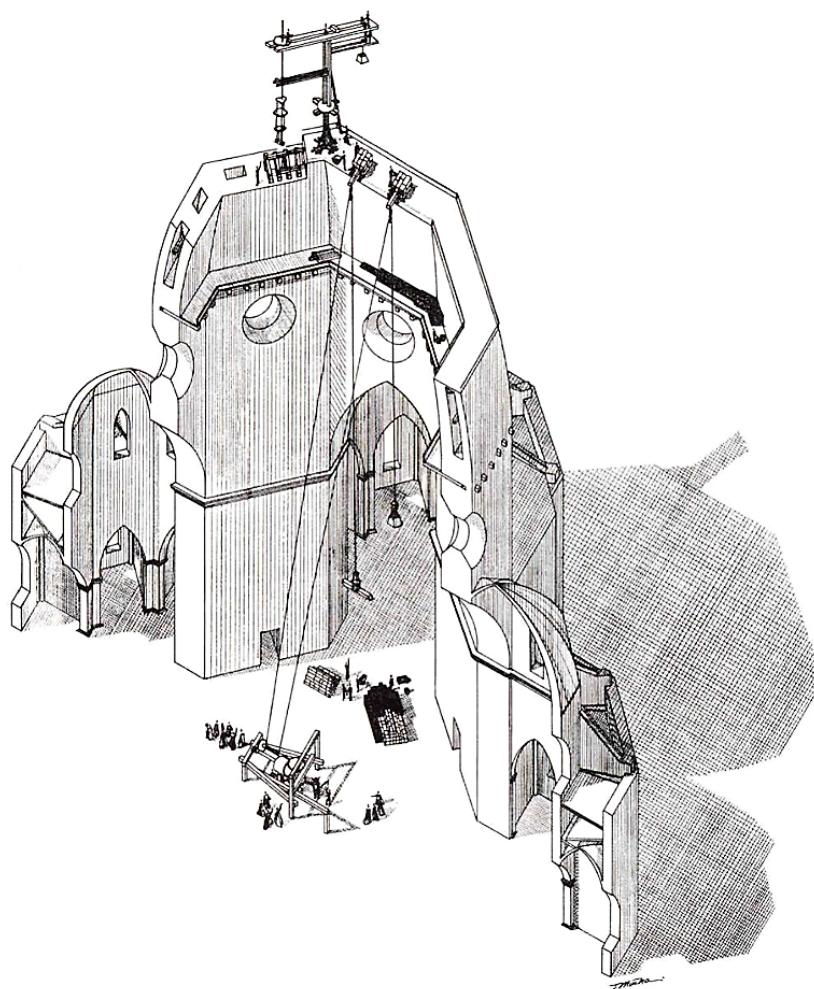
Research on the static behavior of Brunelleschi's dome is also conducted in Poland, at the Wrocław University of Science and Technology. Based on the analysis of research reports on the condition of the dome structure and original research, Jerzy Jasieńko, Krzysztof Raszczuk, and Grzegorz Rybak¹¹ made their own numerical models of three simulated situations: no cracks present, cracks present, and dome reinforcement. Their research contributes to the analysis of threats performed for the purpose of decision-making regarding preservation of one of the world's most important historical domes and allows formulation of working hypotheses concerning the causes of the cracks. In terms of general recommendations, research results confirm the opinion of Italian experts that invariable parameters such as the structure's self-weight and temperature do not pose a serious threat to its stability, wherefore independent dome support reinforcement is not required at this stage. Authors of the research highlight the potential threats, i.e., earthquakes that occur in this geographical zone, and the need for a deeper insight into this phenomenon in terms of the structure's response to vibrations, frequency of proper vibrations, and attenuating agents. It would probably be interesting to conduct an experiment that would encompass provoking artificial in-situ vibrations of the structure, as proposed by Giovanni and Michele Fanelli,¹² to answer the aforementioned question and determine Young's modulus for the entire structure's modal frequency.

An interesting thread related to past seismic risks for the dome was highlighted by Gianbattista Nelli and Vincenzo Viviani following their observation of the aftermath of the 1697 earthquake: they brought to light the issue of self-weight of the homogeneously structured dome sitting on heterogeneously structured supports and their conclusions were confirmed by experts. The same was pointed out by Giovanni and Michele Fanelli in 2004 based on a numerical model of



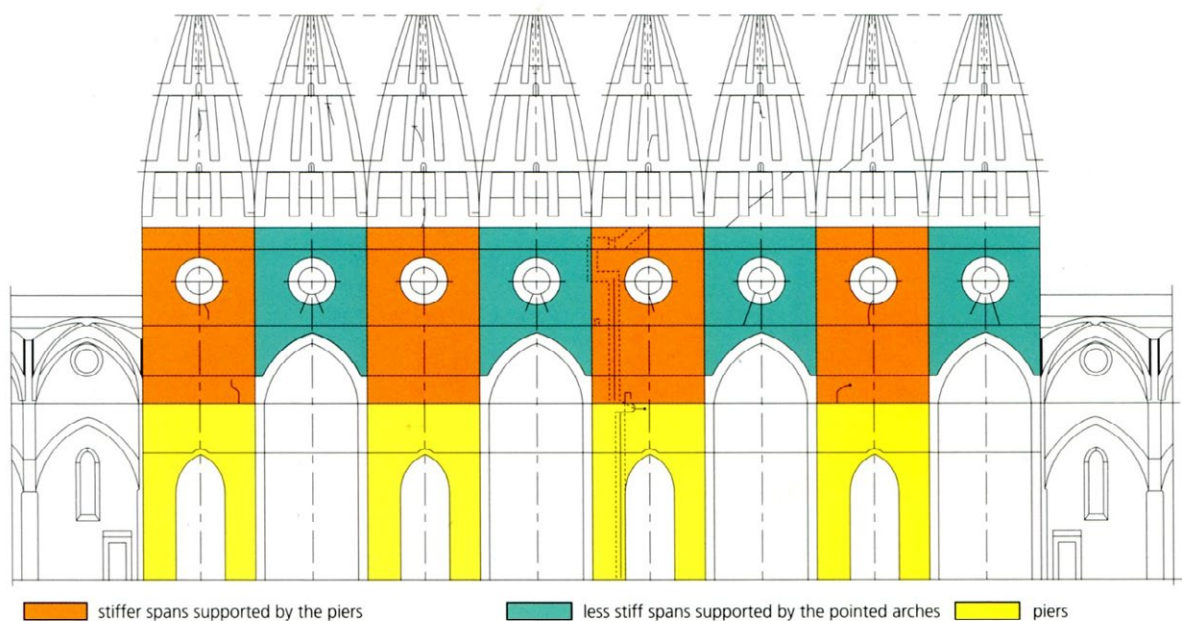
Ryc. 4. Model numeryczny kopuły Brunelleschiego wraz z wykresem naprężeń (po prawej), źródło: G. Fanelli, M. Fanelli, *La cupola del Brunelleschi. Storia e futuro di una grande struttura*, Mandragora, Florencia 2004.

Fig. 4. Numerical model of Brunelleschi's dome with a stress diagram (right), source: G. Fanelli, M. Fanelli, *La cupola del Brunelleschi. Storia e futuro di una grande struttura*, Florence 2004.



Ryc. 5. Rekonstrukcja procesu budowy kopuły przy użyciu wiszącego rusztowania budowlanego i dźwigów, źródło: G. Fanelli, M. Fanelli, *La cupola del Brunelleschi. Storia e futuro di una grande struttura*, Mandragora, Florencia 2004.

Fig. 5. Reconstruction of the dome erection process with the use of suspended scaffolds and cranes, source: G. Fanelli, M. Fanelli, *La cupola del Brunelleschi. Storia e futuro di una grande struttura*, Florence 2004.



Ryc. 6. Rozwinięcie tamburu kopuły jako konstrukcji belki-ściany z ośmioma przęsłami (pełne – kolor czerwony i arkadowe – kolor zielony) opartymi na czterech podporach (kolor żółty), źródło: G. Fanelli, M. Fanelli, *La cupola del Brunelleschi. Storia e futuro di una grande struttura*, Mandragora, Florencja 2004.

Fig. 6. Exploded view of the drum as a folded plate structure: eight-spans (solid – red; arched – green) on four supports (yellow), source: G. Fanelli, M. Fanelli, *La cupola del Brunelleschi. Storia e futuro di una grande struttura*, Florence 2004.

własny kopuły, w połączeniu z brakiem wystarczającej wytrzymałości muru na rozciąganie¹³.

W tym miejscu warto może sięgnąć do typologii średniowiecznych ustrojów architektonicznych i skomplikowanych zasad działalności strzech i gildii budowlanych w późnym średniowieczu.

Filippo Brunelleschi, z zawodu złotnik i odlewnik w brązie, przyjaciel wielkiego Donatello, ale także pasjonat matematyki i geometrii, w czasie kilkuletniego pobytu w Rzymie podjął głębokie studia, analizy i pomiary budowli architektonicznych doby Cesarstwa Rzymskiego, myślą wybiegając daleko w kierunku renesansowych idei artystycznych. Początkowo nie miał związku z trwającą budową katedry ani wpływu na jej ostateczny kształt. Również zarząd budowy katedry prowadził prace budowlane, nie mając ostatecznej wizji, jak miałyby wyglądać przykrycie jej centralnej części. Brunelleschi zaoferował wybudowanie wielkiej kopuły bez tradycyjnego systemu rusztowań i ram wspierających żebrowania, ale nie zgodził się na ujawnienie żadnych szczegółów.

Typologicznie jego „kopuła” nie była klasyczną, sferyczną czaszą opartą na kolistym obwodzie, ale raczej w sensie geometrycznym kombinacją dwóch sklepień klasztornych nałożonych na siebie z przesunięciem o kąt 45°. Tym sposobem Brunelleschi otrzymał formę ośmiu wąskich sklepiennych łupin usztywnionych między sobą krawędziami, opartych na każdej z ośmiu dolnych krawędzi obwodu i zbiegających się w oktagonalnym opoconie u góry. Podstawa oktagonalna takiego układu statycznego odpowiadała oktagonalnemu zarysowi murów przygotowanych pod tambur kopuły

the dome. They proved that the primary reason for the cracks was not earthquake-generated vibrations, but the dome's self-weight and insufficient tensile strength of walls.¹³

At this point it may be useful to refer to the typology of medieval architectural systems and the complex rules of conduct of late medieval lodges and construction guilds.

Filippo Brunelleschi was a goldsmith and bronze founder by profession and a friend of the great Donatello. He was also a passionate mathematician and geometrician, who spent several years in Rome conducting in-depth studies, analyses, and measurements of architectural structures from the times of the Roman Empire, and looked ahead towards Renaissance artistic ideas. At first he was not connected in any way with the pending construction of the cathedral, nor did he have a say about its final shape. The construction managing body, too, conducted the works without a final vision of how the roofing of the central part would look like. Brunelleschi offered to build a huge dome without a traditional scaffolding system or supporting frames for the ribbing, but refused to share details.

Typologically, his dome was not a classic spherical cap lying on a circular perimeter, but rather, in geometric terms, represented a combination of two cloister vaults superimposed with a 45° shift. In this way, Brunelleschi obtained eight narrow vault shells stiffened by edges, laid on the eight bottom edges of the perimeter and converging at the octagonal oculus on top. The octagonal base of this static system corre-

i niesionych przez zmienny wytrzymałościowo układ złożony z przekątniowych masywnych filarów i osiowych ażurowych arkad na kierunkach N–S i E–W.

Eksperci wyodrębnili dwa różne rodzaje pęknięć: pionowe o sporej szerokości 5–6 cm, występujące na powłokach łupinach kopuły w segmentach przekątniowych (2, 4, 6 i 8), oraz pęknięcia w poziomie tamburu kopuły, udokumentowane z kolei w segmentach osiowych (1, 3, 5 i 7), wiążąc te różnice ze zwiększonym naciskiem ciężaru kopuły na filary, spowodowanym kierunkiem działania sił przenoszonych na nie poprzez arkady ustawione w osiach N–S i E–W.

Kiedy Brunelleschi otrzymał zlecenie na wykonanie kopuły, konstrukcja pod nią była już zbudowana, dlatego walcząc o to zlecenie z Lorenzo Ghiberti, Brunelleschi przyjął zastane warunki, mając zapewne świadomość konieczności maksymalnego odciążenia konstrukcji. Świadczy o tym wyrafinowane rozwiązanie podwójnej powłoki kopuły: wewnętrznej nośnej o szkieletowym charakterze z wypełnieniem lekkim materiałem ceramicznym, bardziej opornym na wewnętrzne naprężenia i lekkiej powłoki zewnętrznej chroniącej przed klimatem zewnętrznym. Znanie są też stałe dążenia Brunelleschiego, który już wkrótce po rozpoczęciu budowy wprowadził zmiany w celu zmniejszenia całkowitej wagi kopuły poprzez zmniejszenie wymiarów żeber pośrednich i zastąpienie wypełnień kamiennych specjalnie układaną cegłą¹⁴.

Jak napisała Amelia Herb z Princeton University w wyniku rezultatów studiów i obliczeń matematycznych przeprowadzonych w 2020 roku wspólnie z Uniwersyteciem w Bergamo nad statyką (fizyką strukturalną) kopuły Santa Maria del Fiore, nowoczesna inżynieria może się wiele nauczyć od Filippo Brunelleschiego, który stosując starożytne techniki, potrafił osiągnąć zdumiewające rezultaty, które z punktu widzenia współczesnej inżynierii przesuwają granice tego, co można zbudować nawet przy użyciu nowoczesnych technologii budowlanych¹⁵.

Równie interesującym problemem jest kwestia dekoracji artystycznej kopuły i sposobu jej konserwacji. Można jedynie przypuszczać, że Brunelleschi będąc zwolennikiem klarownej konwencji plastycznej charakterystycznej dla włoskiego quattrocenta, podkreślającej strukturalną finezję architektoniczną, widział kopułę Santa Maria del Fiore z podkreśleniem jej czystej geometrii i statycznej gry sił, podobnie jak to zrobił nieco wcześniej w Starej Zakrystii przy kościele San Lorenzo we Florencji, gdzie konfiguracja kopuły jest akcentowana przez linearnie traktowaną dekorację uwypukloną kontrastem między elementami kamieniarki a jasnymi płaszczyznami tynku. Ostatecznie kopuła w Santa Maria del Fiore otrzymała na życzenie Cosimo I Medyceusza manierystyczną kompozycję monumentalnego fresku inspirowanego Sądem Ostatecznym z kaplicy Sykstyńskiej autorstwa Giorgio Vasari, ukończone po jego śmierci przez Federico Zuccariego z Urbino.

Kiedy Vasari rozpoczął w 1572 roku realizację fresku, pęknięcia powłok łupin kopuły Brunelleschiego były na tyle niewielkie, że warstwa świeżego tynku *in-*

sponded with the octagonal outline of walls prepared for drum-mounting, borne by the variable-strength system of massive diagonal piers and axial openwork arches (N–S and E–W).

Experts distinguished two types of cracks: vertical, considerably wide (5–6 cm), seen on the dome shells in diagonal segments (2, 4, 6 and 8), and horizontal, seen in the drum in axial segments (1, 3, 5 and 7), and linked these differences to an increased thrust of the dome's weight on piers, a consequence of the direction of forces transferred onto the piers across arches on the N–S and E–W axes.

When Brunelleschi was asked to erect the dome, the support structure was already there. Therefore, when accepting the conditions (Brunelleschi competed for the commission with Lorenzo Ghiberti), he was probably aware of the need to ensure maximum stress relief to the structure. This is confirmed by the dome's refined double shell: a framed inner shell filled with lightweight ceramic material, more resistant to inner stresses, and a light outer shell ensuring protection against the external environment. Also, it is no secret that soon after the commencement of works, Brunelleschi introduced changes that were aimed at decreasing the dome's total weight by reducing the dimension of intermediate ribs and replacing stone filling with specially laid brick.¹⁴

Based on the results of studies and mathematical calculations pertaining to the static behavior (structural physics) of the dome of the Saint Mary of the Flower cathedral performed in 2020 in cooperation with the University of Bergamo, Amelia Herb from Princeton University concluded that today's engineering has a lot to learn from Filippo Brunelleschi, who achieved astonishing results using ancient techniques, pushing the limits of what can be built even with currently used building technologies.¹⁵

Another interesting issue is the artistic ornamentation of the dome and its preservation. It can only be inferred that, as an advocate of a clear-cut visual convention typical of the Italian Quattrocento, giving weight to structural architectural finesse, Brunelleschi saw the dome of Santa Maria del Fiore as a representation of pure geometry and static interplay of forces, which was also the case with his earlier work, the Old Sacristy of San Lorenzo in Florence, where the dome's configuration was accentuated by linear decoration, made even more visible by the stone elements contrasting with bright plaster planes. At the request of Cosimo de' Medici, the dome of Saint Mary of the Flower ultimately received a Mannerist composition: a monumental fresco inspired by the Last Judgement from the Sistine Chapel, painted by Giorgio Vasari and completed after his death by Federico Zuccari from Urbino.

When Vasari started working on the fresco in 1572, the cracks in the dome shell were small enough to be effectively covered with fresh *intonaco* plaster; and were difficult to see due to the considerable height



Ryc. 7. Kopuła Brunelleschiego z freskami Vasariego i Zuccariego w trakcie renowacji; widok ogólny i fragment z kilkucentymetrowym pęknięciem, po restauracji, źródło: C. Acidini Luchinat, R. Dalla Negra, *La cupola di Santa Maria del Fiore. Architettura, pittura, restauro*, Istituto Poligrafico del Stato, Libreria Cortina Milano, Rome 1995.

Fig. 7. Brunelleschi's dome with frescos by Vasari and Zuccari during restoration works; general view and fragment with a crack of several centimeters, post restoration, source: C. Acidini Luchinat, R. Dalla Negra, *La cupola di Santa Maria del Fiore. Architettura, pittura, restauro*, Rome 1995.

tonato przykryła skutecznie rysy, zresztą trudno dostrzegalne ze względu na wielką wysokość, z jakiej oglądano kopułę. Znaczący malarstwa włoskiego cinquecenta zwracają uwagę na różnice w warsztacie artystycznym obu mistrzów: manierystyczna konwencja i staranna technika malarska części wykonanej przez Vasariego jest wyżej oceniana niż swobodny, często iluzoryczny, graniczący z niedbałą nonszalancją w operowaniu farbą i pędzlem styl jego ucznia Zuccariego¹⁶.

Dla podjętej decyzji o renowacji fresków Vasariego i Zuccariego (przeprowadzonej w latach 1980–1995) pęknięcia powłoki kopuły okazały się być poważnym problemem konserwatorskim, jaki należało rozwiązać. Chodziło nie tylko o względy estetyczne, bo 5–6-centymetrowa szczelina przebiegająca przez fresk spowodowała widoczną deformację kompozycji, a praca podłoża wykonanego z wąskich cegieł i jego ruchy termiczne stwarzały niebezpieczeństwo dla całego malowidła, które odspojone od podłoża mogło odpaść i ulec bezpowrotnemu zniszczeniu. Projekt renowacji zatwierdzony i finansowany przez włoskie ministerstwo sztuki i kultury, który kosztował 25 mln dolarów, prowadziła Cristina Acidini, znana historyk sztuki, ekspert i wysoki urzędnik rządowy oraz inspektor muzeów i zabytków regionu Florencji. Przygotowując założenia projektu, oceniała ona, że część fresków wykonana przez Zuccariego była generalnie w dobrym stanie, ale widoczne były fragmenty, gdzie artysta używał nadmiernej ilości pigmentów, zwłaszcza ciemne zielenie i czernie, które wykazywały tendencje do łuszczenia się i utraty przyczepności do podłoża. Te fragmenty musiały być ponownie mocowane za pomocą klejów z żywic akrylowych¹⁷.

Utrata przyczepności fresków została naruszona także tam, gdzie występowały mikroruchy podłoża powodowane termicznymi skurczami czaszy kopuły, sygnalizowane

difference between the dome and potential observers. Experts in paintings of the Italian Cinquecento stress the differences in the style of both masters: Vasari's Mannerist convention and careful technique is rated higher than the natural, oftentimes illusory style of his student Zuccari, which tends to border on slapdash nonchalance.¹⁶

In the light of the decision to renovate Vasari's and Zuccari's frescos (works performed between 1980 and 1995), cracks in the dome shell turned out to be a serious conservational problem to be solved, not only for aesthetic reasons, but also because a slit of 5 or 6 cm in the fresco caused visible deformation of the composition and the behavior and thermal movements of the thin-brick substrate posed threat to the entire painting which, when loosened, could fall off and suffer unrepairable damage. The restoration project, approved and funded by the Italian Ministry of Arts and Culture, cost \$25 million and was headed by Cristina Acidini, a renowned art historian, expert, senior government official, and inspector of museums and monuments in the Florence region. When preparing the design input, she assessed that some of Zuccari's frescoes were actually in a good condition, but there were visible fragments with excessive amounts of pigments used by the artist—especially dark greens and blacks—and a tendency to flake and loosen, which needed reattachment with acrylic resin adhesives.¹⁷

The bonding strength of the frescoes was also compromised in places with substrate micromovements caused by thermal contraction of the dome, signaled and localized by the monitoring system. In such cases, a decision was made to temporarily transfer selected fragments of the fresco, together with plaster, onto can-



Ryc. 8. Lokalna translokacja fresków Vasarięgo i Zuccarięgo dla wzmocnienia podłoża i czyszczenia kamiennych detali latarni metodą ultradźwięków, źródło: C. Acidini Luchinat, R. Dalla Negra, *La cupola di Santa Maria del Fiore. Architettura, pittura, restauro*, Istituto Poligrafico del Stato, Libreria Cortina Milano, Rome 1995.

Fig. 8. Local translocation of Vasari's and Zuccari's frescos for soil stabilization works and ultrasound cleaning of the lantern's stone detailing, source: C. Acidini Luchinat, R. Dalla Negra, *La cupola di Santa Maria del Fiore. Architettura, pittura, restauro*, Rome 1995.

i lokalizowane przez system monitoringu. W takich przypadkach podejmowano decyzje o czasowym transferze wybranych fragmentów fresku wraz z tynkiem na podłoże płócienne i po przeprowadzeniu iniekcji muru ponownie mocowano je do oryginalnego podłoża.

Od wczesnych lat sześćdziesiątych ub. stulecia nastąpił znaczny postęp w renowacji fresków, oddając do dyspozycji konserwatorów nowe materiały, narzędzia i technologie. Przez stulecia trwania fresków kopuły na ich powierzchni osadzała się warstwa brudu wytworzona przez unoszący się kurz zawierający zanieczyszczenia atmosferyczne, a także dym powstający podczas oświetlenia i ogrzewania wnętrza kościoła.

Sufit kaplicy Sykstyńskiej w Rzymie został oczyszczony przy użyciu mieszaniny węglańu sodu, wodorowęglanu amonu i antybiotyku deksogen. W latach 1984–1989 gruba warstwa brudu na freskach kaplicy Brancaccich we Florencji Santa Maria del Carmine została usunięta za pomocą specjalnej żywicy jonowej, która przekształciła warstwę brudu w żel. W obu tych przypadkach konserwowane freski zabezpieczone były przez artystów popularną w XVII wieku powłoką ochronną z lakieru z zawartością jajek lub kleju kazeinowego¹⁸. W przypadku fresków Vasarięgo i Zuccarięgo eksperci uznali za bardziej właściwą znacznie prostszą metodę ich czyszczenia wodą dejonizowaną, nakładaną w formie kompresów z mączki drzewnej poprzez arkusze japońskiego papieru na okres 20 minut, po czym zabrudzenia usuwane są mechanicznie bawełnianym wacikiem, ale miejsca szczególnie wrażliwe czyszczone wyłącznie papierem i wodą¹⁹. Projekt ukończony ostatecznie w 1995 roku kosztował blisko 30 mln dolarów.

Podczas renowacji fresków cały czas prowadzone były prace konserwatorskie i wzmocniające strukturę murowaną kopuły, której ruchy od 1988 roku są mo-

vas substrate and reattach them to the original surface following wall injection.

Since the early 1960s, there has been considerable progress in fresco restoration, with restorers having at their disposal new materials, tools, and technologies. Over the centuries of the frescoes' existence, a layer of dirt containing atmospheric pollutants has deposited on their surface, produced by airborne dust and by smoke generated when lighting and heating the church's interior.

The ceiling of the Sistine Chapel in Rome was cleaned with a mixture of sodium carbonate, ammonium bicarbonate, and the antibiotic dexogen. Between 1984 and 1989, a thick layer of grime on the frescoes of the Brancacci Chapel at Santa Maria del Carmine in Florence was removed with dedicated ionic resin that turned dirt into a gel. In both cases the restored frescoes had been protected by the artists with a coating of egg- or casein glue-based varnish, a solution popular in the seventeenth century.¹⁸ For the frescoes by Vasari and Zuccari, experts assessed that a simpler cleaning method would be more appropriate, i.e., with deionized water applied as a wood-flour dressing through Japanese paper sheets and left for 20 minutes, whereupon the dirt would be mechanically removed with a cotton swab. However, particularly sensitive places were cleaned exclusively with paper and water.¹⁹ The project was ultimately completed in 1995 and cost nearly \$30 million.

Fresco restoration was accompanied by conservation works and works aimed at the reinforcement of the masonry structure of the dome, the movements of which have been monitored since 1988 by an innovative and continuously extended system of sensors, able to detect vertical, horizontal, and diagonal

monitorowane przez innowacyjny i stale modernizowany i rozszerzany system czujników, które potrafią wykryć przesunięcia pionowe, poziome i boczne nawet o wartości 0,04 mm. Jak ocenił ten system monitoringu prowadzący te prace od 1982 roku architekt Riccardo Della Negra, profesor Uniwersytetu we Florencji, jest to wszechstronna, kompleksowa rejestracja parametrów fizycznych struktury w wymiarze 3D uwzględniająca zmiany dzienne, miesięczne i sezonowe, a także pomiary temperatury powietrza, ścian i temperaturę zewnętrzną, co pozwala precyzyjnie śledzić źródła ruchów kopuły. Dane z monitoringu przesyłane są do specjalnego laboratorium na UF, gdzie aktualizowany jest permanentnie numeryczny model kopuły pozwalający na wizualizację wpływu ruchów na całą strukturę i przewidywanie ostatecznych konsekwencji budowlanych²⁰.

Precyzyjny monitoring i jego stała analiza pozwalają na poznanie prawdziwych przyczyn notowanych zmian. Dotychczasowa wiedza zdaje się potwierdzać pogląd, że kopuła ma pewne wady konstrukcyjne, co może potwierdzać fakt, że zauważone zmiany pozostają wciąż w fazie ekspansji i choć na wyciąganie wniosków, jak uważa Riccardo Della Negra, jest jeszcze za wcześnie – potrzeba jeszcze kilka lat obserwacji, aby realistycznie ocenić sytuację – to zmiany te mogą stać się źródłem poważnych problemów w przyszłości, jeśli zostaną pozostawione bez stosownych interwencji. Stały monitoring pozwala na kontrolę aktualnej sytuacji i badanie dynamiki zmian: czy są one stabilne, czy też rozszerzają się, a modelowanie numeryczne kopuły ułatwia prognozowanie ich rezultatów i uchwycenie punktu, w którym powinna nastąpić interwencja, aby nie przekroczyć punktu krytycznego²¹.

displacements (even by 0.04 mm). Riccardo Della Negra, professor at the UF and one of the architects conducting these works since 1982, assessed the monitoring system as a versatile and comprehensive system for 3D registration of the structure's physical parameters with daily, monthly, and seasonal changes, and for the measurement of air, wall, and outside temperature, enabling precise tracking of the source of the dome's movements. Monitoring data are sent to a designated laboratory at the UF, where the dome's numerical model is being constantly updated, allowing visualization of the movements' impact on the entire structure and projection of their ultimate building consequences.²⁰

Precise monitoring and its continuous analysis provide information on the true causes of the changes observed. Current knowledge seems to confirm structural flaws of the dome, which may be further proved by the fact that the changes observed are still in the expansion phase, and although it is too early to draw conclusions, as stated by Riccardo Della Negra—because a couple more years of observations are still needed before realistic evaluation of the situation is possible—if left unattended, the changes may lead to serious problems in the future. Continuous monitoring warrants control of the current situation and investigation of the dynamics of the changes (assessment whether they are stable or progressive), while numerical modeling of the dome facilitates projecting the results and capturing the moment when an intervention should be made in order not to exceed the critical point.²¹

Bibliografia / References

- Ballenstedt Janusz, *Jak Brunelleschi budował kopułę Santa Maria del Fiore*, „Kwartalnik Architektury i Urbanistyki”, zeszyt 2, tom XLI, Warszawa 1996.
- Bartoli Giovanni, Betti Michele, Borri Claudio, *Numerical modeling of the structural behavior of Brunelleschi's Dome of Santa Maria del Fiore*, International Journal of Architectural Heritage, 2015.
- Bartoli Giovanni, Blasi Carlo, De Robertis Niccolo, & Foraboschi Paolo, *Monitoring system of the Brunelleschi's dome in Florence: interpretations of the recorded data*, w: Structural repair and maintenance of historical buildings II. Vol. 1: general studies, materials and analysis. 1991, pp. 209-221.
- Bartoli Giovanni, Chiarugi Andrea, & Gusella Vittorio, *Monitoring systems on historic buildings: the Brunelleschi Dome*. *Journal of structural engineering*, 122(6), 1996, s. 663-673.
- Ceravolo R., Coletta G., Miraglia G., & Palma F. Statistical correlation between environmental time series and data from long-term monitoring of buildings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 152, 2021.
- Chiarugi Andrea, Fanelli Michele, Giuseppetti Gabriella, *Analysis of a Brunelleschi-Type Dome Including Thermal Loads*. IABSE Symposium on Strengthening of Building Structure, Diagnosis and Therapy, Zurich 1983.
- Coli Massimo, Marchetti Emanuele, Ripepe Maurizio, Blasi Carlo, Ottoni Federica, Bartoli Giovanni, Betti Michele, *The Dome of Santa Maria Del Fiore in Florence: Historical, geotechnical, and structural studies for its conservation*, w: ATC19 Work Shop on Geo Engineering for Conservation of Cultural Heritage 18th ICSMGE, Paris - Role of Geo Engineering for Conservation of World Heritage – Sep. 2013.
- Corazzi Roberto, *Brunelleschi and the Dome in Florence, Domes and Cupolas Vol I – 2014 – N.1*, Angelo Ponte Corboli, Florencja 2014.
- Falciani Carlo, Natali Antonio, *The Cinquecento in Florence: 'Modern Manner' and Counter-Reformation*, Mandragora 2017.

- Fanelli Giovanni, Fanelli Michele, *La cupola del Brunelleschi. Storia e futuro di una grande struttura*, Mandragora, Florencia 2004.
- Guidoboni Emanuela, Ferrari Graziano, *Historical cities and earthquakes: Florence during the last nine centuries and evaluations of seismic hazard*, w: *Annali di Geofisica*, vol. XXXVIII n. 5-6 November-December 1995.
- Jasieńko Jerzy, Raszczuk Krzysztof, Rybak Grzegorz, *Static behaviour of the Dome of the Santa Maria del Fiore in Florence – a numerical analysis*, w: *Domes and Cupolas*. 2014, vol. 1, nr 2, s. 67-1.
- Luchinat Acidini Cristina, Dalla Negra Riccardo, *La cupola di Santa Maria del Fiore. Architettura, pittura, restauro*, Istituto Poligrafico del Stato, Libreria Cortina Milano, Rome 1995.
- Ottoni Federica, Blasi Carlo, *Results of a 60-year monitoring system for Santa Maria del Fiore Dome in Florence*, *International Journal of Architectural Heritage*, 2015.
- Ottoni Federica, Coisson Eva, Blasi Carlo, *The Crack Pattern in Brunelleschi's Dome in Florence: Damage Evolution from Historical to Modern Monitoring System Analysis*. w: *Advanced materials research*, Vol. 133, 2010, Trans Tech Publications Ltd., pp. 53-64).
- Saalman Howard, *Filippo Brunelleschi. The Cupola of Santa Maria del Fiore*, Zwemmer London 1980.

- ¹ Obaj Autorzy są międzynarodowymi ekspertami Fundacji Romualdo Del Bianco, współinicjatorami i współorganizatorami, a zarazem uczestnikami głośniego światowego kongresu Domes in the Worlds 3-6.11.2011, którego celem była wymiana doświadczeń dot. ochrony unikalnych historycznych konstrukcji kopułowych.
- ² R. Corazzi, *La cupola del Brunelleschi – storia e indagini (Kopuła Brunelleschiego – historia i badania / The Dome of Santa Maria Del Fiore – History and Research)*, w: *Florencia i Kraków – Miasta Partnerskie w Europie: Wspólne Dziedzictwo Kultury*, Międzynarodowa Konferencja zorganizowana w ramach obchodów 750-lecia Lokacji Krakowa, redakcja naukowa: J. Jasieńko, A. Kadłuczka, E. Mandelli, Wydawnictwo Universitas, Kraków 2010, s. 145-167.
- ³ Amalia Herb, wykładowczyni Princeton University, komentując wyniki badań naukowców tej uczelni we współpracy z Uniwersytetem w Bergamo geometrii i statyki kopuły Brunelleschiego, napisała: „What can modern engineering learn from an erstwhile jeweler who built the largest masonry dome in existence? The construction of the Florentine duomo by Filippo Brunelleschi has been an engineering marvel for more than 500 years, showcasing ancient techniques that still hold valuable insights for modern engineering. Until now, it has remained a mystery how the master goldsmith and sculptor managed to build the masterpiece that pushes the limits of what is possible to construct even with modern building technologies, and how the masters who followed Brunelleschi carried on the tradition”, <https://www.princeton.edu/news/2020/05/21/double-helix-masonry-researchers-uncover-secret-italian-renaissance-domes>.
- ⁴ E. Guidoboni, G. Ferrari, *Historical cities and earthquakes: Florence during the last nine centuries and evaluations of seismic hazard*, w: *Annali di Geofisica*, vol. XXXVIII n. 5-6 November-December 1995. „The study is based on a review of 131 seismic events of potential interest for the site of Florence from the 12th century. In the case of each of these earthquakes, it was possible to verify the real seismic effects sustained, and thus to assess the seismic intensity on the site. This also enabled the limits in the application of the standard attenuation laws of to be checked. Of all the earthquakes analyzed. those which caused the greatest effects on the urban area have also been identified: namely, the earthquake of 28 September 1453. and those of 18 May and 6 June 1895, both with $I_0=VIII$ MCS”.
- ⁵ Ibidem, s. 620-622.
- ⁶ Północne kwartały antycznej Florencji po edykcje mediolańskim Konstantyna I Wielkiego zostały przeznaczone dla gminy chrześcijańskiej i tu na miejscu wcześniejszej zabudowy (rzymska bazylika) został zlokalizowany pierwszy paleo-chrześcijański kościół Santa Reparata, który zburzony w czasie najazdów Gotów został zastąpiony przez nowy kościół w czasach Karola Wielkiego prawdopodobnie z dwoma wieżami po stronie wschodniej.
- ⁷ M. Coli, E. Marchetti, M. Rippepe, C. Blasi, F. Ottoni, G. Bartoli, M. Betti, *The Dome of Santa Maria Del Fiore in Florence: Historical, geotechnical, and structural studies for its conservation*, w: *ATC19 Work Shop on Geo Engineering for Conservation of Cultural Heritage 18th ICSMGE, Paris -Role of Geo Engineering for Conservation of World Heritage -Sep. 2013*.
- ⁸ Obecnie działają dwa niezależne systemy stałego monitoringu: 1) mechaniczny zainstalowany przez Zarząd Katedry (*Opera del Duomo*) w 1955 roku oraz 2) cyfrowy zainstalowany przez ISMES (*Istituto Sperimentale Modelli e Strutture*) we współpracy z florencką służbą konserwatorską *Soprintendenza* w 1987 roku; zastosowano czujniki elektroniczne do pomiaru odkształceń i pomiaru rozwarłośc zarzyciary ulokowane w wewnętrznej powłoce kopuły.
- ⁹ Ibidem.
- ¹⁰ Ibidem, s. 125: „Monitoring systems, combined to historical studies, material analysis and dynamic investigations, and finally confirmed by numerical models, allow today to reliably forecast the “normal behaviour” of the Cupola, evidencing crack width variations which normally are strictly connected to seasonal and daily cycles. [...] The study presented in this paper, gathering all the information needed for a correct analysis of the damage evolution, can be used to further calibrate and validate possible strengthening and reinforcement interventions and it can represent a general methodology, particularly suitable for ancient monument retrofitting strategy, which, in a multidisciplinary approach, finds its primary guarantee of success”.

¹¹ J. Jasieńko, K. Raszczuk i G. Rybak, *Static behaviour of the Dome of the Santa Maria del Fiore in Florence – a numerical analysis*, w: *Domes and Cupolas*. 2014, vol. 1, nr 2, s. 67–81.

¹² G. Fanelli, M. Fanelli, *La cupola del Brunelleschi. Storia e futuro di una grande struttura*, Mandragora, Florencja 2004.

¹³ Ibidem.

¹⁴ Ibidem, s. 29.

¹⁵ Por. przyp. 2.

¹⁶ C. Falciani, A. Natali, *The Cinquecento in Florence: 'Modern*

Manner' and Counter-Reformation, Mandragora 2017.

¹⁷ K. Shulman, *On the Scaffolds, a Delicate Labor in the Duomo*, w: *The New York Times* 3.12.1989.

¹⁸ Ibidem.

¹⁹ C. Acidini Luchinat, R. Dalla Negra, *La cupola di Santa Maria del Fiore. Architettura, pittura, restauro*, Istituto Poligrafico del Stato, Libreria Cortina Milano, Rome 1995.

²⁰ Ibidem.

²¹ Ibidem.

Streszczenie

Artykuł zawiera podsumowanie aktualnej wiedzy na temat architektury, statyki, stanu technicznego i potencjalnych zagrożeń słynnej renesansowej kopuły Brunelleschiego we Florencji. W oparciu o analizę źródeł historycznych, kontekstu topograficznego i czasowo-przestrzennego jako uwarunkowań powstania i trwania tej unikalnej konstrukcji zaprezentowano najnowsze metody monitoringu i badań statyki zabytku z uwzględnieniem perspektywicznej prognozy jej bezpieczeństwa.

Abstract

This paper summarizes current knowledge of the architecture, static behavior, and technical condition of Brunelleschi's famous Renaissance dome in Florence as well as potential risks to the structure. Based on an analysis of historical sources and topographic, temporal, and spatial contexts determining the structure's erection and survival, it discusses the currently used monitoring methods and recent studies on the monument's static behavior, including its prospective safety profile.

* Na życzenie autorów artykuł nie podlegał adyustacji językowej; wprowadzono jedynie korektę ortograficzną i interpunkcyjną.