

KOPUŁY I ICH GEOMETRIA

THE GEOMETRY OF DOMES

Agnieszka Kornak

Politechnika Wrocławska

Wydział Architektury

Zakład Kształtowania Środowiska

ul. Bolesława Prusa 53/55

50-317 Wrocław

e-mail: agnieszka.kornak@pwr.edu.pl

Abstract: This article is focused on design of traditional historical domes. Outstanding works of architecture such as: the dome of Hagia Sophia, dome of the rock mosque, the dome of Florence Cathedral, the dome of Basil's Cathedral in Moscow, as well as less famous – Greek-Catholic Church of St. Michael the Archangel in Krowica Sama have been analyzed. According to the criterion of geometrical complexity we created the table in which the individual structures were systematized. The table also includes information on historical period, building materials, technology and dimensions for all examples. The paper aims to summarize the changes that took place in terms of how to construct and demonstrate the appropriateness of use of this type of solution, which led to the conclusion that each of new solutions is based on already existing one.

Keywords: dome, geometry, cross section, the base, the criterion of geometrical complexity.

Wprowadzenie

„Kopuła, sklepienie zamknięte o osi pionowej, wznoszone nad pomieszczeniami na planie centralnym (okrągłym, kwadratowym, wielobocznym), także i wyodrębniona zewn. część budowli, zawierająca takie sklepienie (kopuła zewnętrzna)” [8].

Geometrycznie kopuła jest powierzchnią obrotową, która może przyjmować różne kształty przekroju poprzecznego. W historii architektury znajdziemy wiele przykładów kopuł o odmiennych geometrycznie formach: spłaszczonej, w kształcie półkopuły, półkulistej (tzw. bani), żaglastej jednopowierzchniowej (kapa czeska), wielosegmentowej, zastrzonej, cebulastej.

Obiekty takie niejednokrotnie już analizowano, jednak ze względu na ich liczbę i różnorodność form, wydaje się, że przydatne będzie ich skategoryzowanie ze względu na wybrane kryterium. Poniżej przedstawiono próbę usystematyzowania istniejących rodzajów konstrukcji kopułowych w zakresie ich geometrii oraz wykazania celowości stosowania przyjętych rozwiązań. Skoncentrowano się jedynie na wybranych przykładach z literatury. Omówione zostały następujące obiekty: Kościół Mądrości Bożej Hagia Sophia w Stambule, Kopuła na Skale (tzw. Meczet Omara) znajdujący się na Wzgórzu Świątynnym w Jerozolimie, kopuła katedry we Florencji, Sobór Wasyla Błogosławionego zlokalizowany w Moskwie na Placu Czerwonym, w pobliżu Kremla, dawna cerkiew greckokatolicka p.w. Św. Michała Archaniola w Krowicy Samej. Wybór

wymienionych przykładów nie jest przypadkowy. Podyktowany był on przede wszystkim chęcią przedstawienia możliwie szerokiego spektrum rozwiązań dla konstrukcji kopuł, przy ograniczonych możliwościach wyznaczonych ramami artykułu. Z tego samego powodu nie zostały tu przedstawione wszystkie możliwe typy rozwiązań. Wybrano na podstawie literatury, obiekty zdaniem Autorki najciekawsze, a jednocześnie bardzo charakterystyczne, by w jasny i czytelny sposób móc zaprezentować zastosowane kryteria systematyzowania. Wszystkie wskazane do analizy kopuły stanowią obiekty kultu, wybrano je także przez wzgląd na ich wartość estetyczną.

Poniższa praca ma stanowić przyczynek do dalszych rozważań na temat rozwoju kopuł oraz potencjału związanego z wprowadzaniem w życie nowych technologii w tym zakresie.

Metodologia - kryterium złożoności geometrycznej

Na potrzeby niniejszego opracowania przyjęto kryterium złożoności geometrycznej, czyli zasadę kategoryzacji opartą na analizie formy geometrycznej danej kopuły. Wyróżnione zostały dwa rodzaje takich struktur:

PROSTA - przyjmująca zarówno po stronie wewnętrznej jak i zewnętrznej tożsamy kształt;

ZŁOŻONA - struktura prosta, która uległa przekształceniom.

Struktury, zakwalifikowane jako złożone, można dodatkowo podzielić ze względu na rodzaj zastosowanego przekształcenia:

typ A - multiplikacja,

typ B - różnica wnętrza i zewnątrz,

typ C - z konstrukcją główną i wypełnieniem.

Ponadto multiplikację przyjęto w dwóch odmianach:

- podstawowej - polegającej na powieleniu tego samego kształtu,

- zmodyfikowanej - gdzie wyraźnie można zauważyć analogie do kształtu podstawowego, jednak omawiana struktura uległa przekształceniom.

Ponadto uwzględnia się też aspekty takie, jak: okres historyczny, technologie wykonania oraz rodzaj zastosowanego materiału, a także wymiary obiektu.

Porównanie rozwiązań konstrukcji kopuł

W tabeli 1 zostały zaprezentowane wyniki przeprowadzonych analiz. Mają one na celu porównanie różnych rodzajów przekryć kopułowych oraz podsumowanie zmian, jakie zachodziły w zakresie sposobu ich konstruowania. W tabeli uszeregowano poszczególne przykłady w sposób chronologiczny. Uwzględniono geometrię podstawy i przekroju dla danej kopuły oraz rodzaj konstrukcji według opisanego powyżej kryterium złożoności geometrycznej, a także zastosowane materiały.

Tab.1. Porównanie rozwiązań konstrukcji kopuł ze względu na ich geometrię.

NAZWA OBIEKTU (DATA POWSTANIA)	PODSTAWA (WYMIAR)	PRZEKRÓJ (WYMIAR)	RODZAJ GEOMETRII	MATERIAŁ
Hagia Sophia (532-537 r.)	koło (31,2 m)	elipsa (55,6 m- wys. Od posadzki do najwyższego punktu kopuły)	złożona	cegła+ zaprawa
Kopuła na Skale (691 r.)	koło (20,20 m)	ostrołuk (20,48 m)	prosta	drewno; ołów; brąz+ aluminium
Kopuła katedry Santa Maria del Fiore (1416-1434 r.)	ośmiobok (41,5 m)	elipsa/ latarnia (33 m)	złożona	Kamień+ cegła+ołów+ marmur
Sobór Wasyla Błogosławionego (1555-1561 r.)	koło (ok. 5-8 m)	kopuła cebulasta	złożona	kamień
Dawna cerkiew p.w. św. Michała Archanioła w Krowicy Samej (1870 r.)	ośmiobok	kopuła cebulasta/ elipsa	złożona	drewno

Omówienie wybranych przykładów

Źródeł konstrukcji kopułowych należy szukać już starożytności, zarówno w aspekcie filozoficznym, jak i architektonicznym. Struktura świata złożona była, według niektórych wierzeń, z kwadratowej ziemi i okrągłego nieba. Zygmunt Kalinowski wspomina o tym, pisząc o pierwiastku boskości, który można odnaleźć w obiektach typu *čahar-tak* w Armenii. Rzeczywiście kopuły pojawiają się początkowo najczęściej w obiektach kultowych. W okresie V-VI w. rozwijały się w Kapadocji, co mogło być przyczynkiem bądź procesem równoległym do wprowadzenia takich struktur w architekturze bizantyjskiej [6].

Jednakże znane są już wcześniejsze struktury kształtowane w podobny sposób. Za przykład mogą służyć odkryte na terenie Grecji antyczne grobowce, takie jak grobowiec Agamemnona (rys. 1). Budowniczo, w celu uzyskania takiej formy, stosowali tzw. sklepienie

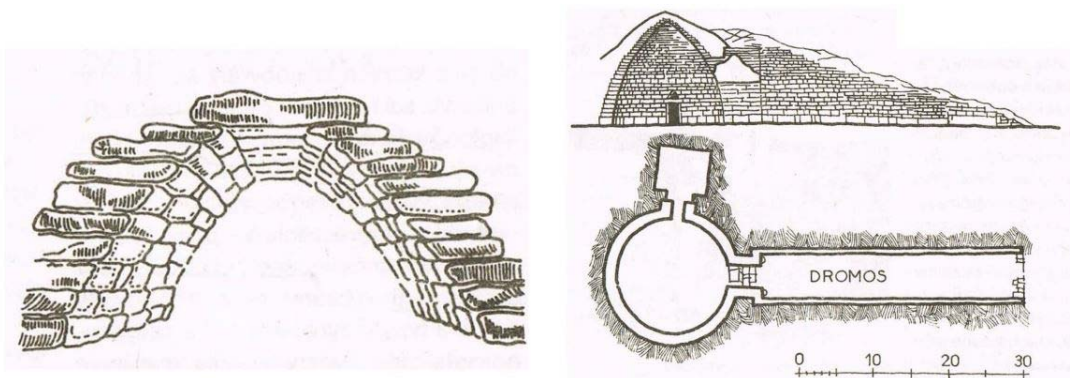
kopułowe pozorne (rys. 1), czyli system kamiennych ciosów uformowanych w taki sposób, by każdy kolejny cios w danej warstwie był wysunięty w stronę wnętrza komory grobowej. Ten system wydaje się być pewnym pierwowzorem dla późniejszych kopuł [2].

W różnych częściach świata stosowano odmienne technologie przy wykonywaniu tego typu konstrukcji. W starożytnym Rzymie stosowano beton wykonany na bazie kruszyw o różnych frakcjach. Kopuły takie odciążano niekiedy przez wprowadzenie kasetonów lub żeber ceramicznych. Na Wschodzie - w Armenii i Persji stosowano suszoną cegłę na zaprawie, układaną w koncentryczne kręgi, a w Syrii kopuły tworzone z kamiennych kłińców łączonych zaprawą. Prawdopodobnie układano je na krążynach [6, 10].

Przez wiele stuleci stosowane materiały pozostawały takie same: drewno, kamień, cegła (zmieniały się sposoby jej wytwarzania), beton. Dawały one możliwości przekrycia dużych powierzchni, a dzięki odpowiedniej

konstrukcji umożliwiały uzyskiwanie znacznej nośności. Wynalezione później: żelbet, stal czy odpowiednio przygotowane szkło, znacząco wpłynęły na rozwój kształtowania kopuł, dając możliwość powiększenia

gabarytów budowli, a zastosowanie mniejszych przekrojów pozwalało zaoszczędzić materiał i nadać formom lekkość.



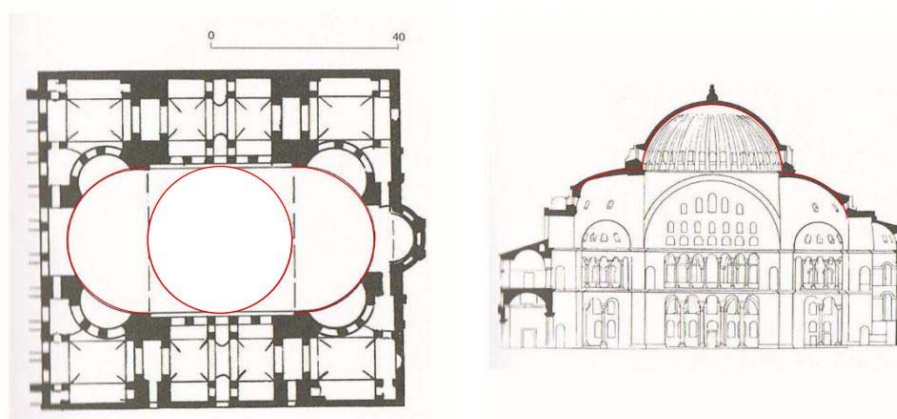
Rys. 1. Sklepienie pozorne i grobowiec Agamemnona [2].

Poniżej zaprezentowano szereg różnorodnych przykładów, przedstawiających jak w przeszłości kształtowano formę kopuł.

Kościół Hagia Sophia w Stambule (rys. 2) został zbudowany w latach 532-537. Obiekt zaprojektowali Antemios z Trales i Izydor z Miletu. Prostokątna w rzucie budowla została nakryta kopułą o podstawie w kształcie koła o średnicy 31,2 m (100 stóp), opartej na 4 pendentywach, które przenoszą obciążenia na 4 filary wzmocnione przyporami. Całość dodatkowo podpira 107 kolumn oraz dwie półkopuły umieszczone od wschodniej i zachodniej strony. U podstawy zaprojektowano otwory okienne. Taki układ pozwala nieco

odciążyć filary, przekryć znacznie większą powierzchnię. W przekroju kopuła oraz półkopuły mają kształt eliptyczny, natomiast w rzucie, jak już wcześniej wspomniano, jest to koło i jego odcinki, zatem geometrycznie można zaklasyfikować obiekt jako kopułę złożoną typu A zmodyfikowaną.

7 maja 538 r. kopuła zawałiła się w czasie trzęsienia ziemi. Była prawdopodobnie zbyt płaska, przez co przy poziomym obciążeniu wywołanym przez wstrząsy pojawiły się w niej znaczne siły rozciągające, co stało się przyczyną katastrofy. Po katastrofie kopułę odbudowano, nadając jej większą niż poprzednio wysokość.



Rys. 2. Hagia Sophia - rzut i przekrój z zaznaczonymi elementami geometrii kopuły [12].

Drugim bardzo ciekawym przykładem jest meczet Kopuła na Skale (rys. 3 i 4), znajdujący się na Wzgórzu Świątynnym w Jerozolimie, zwany niekiedy meczetem

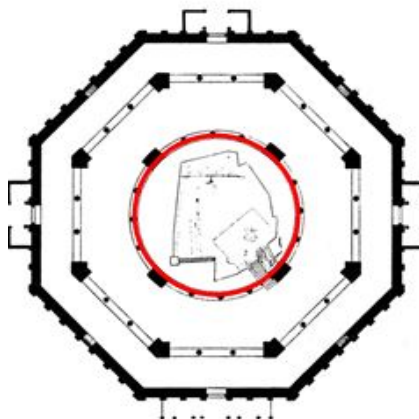
Omara, który stanowi jedno z najważniejszych sanktuariów świata islamu. Budowę według projektu Raya Ibn Haywaha oraz Yazid Ibn Salama rozpoczęto po

śmierci kalifa Omara, a zakończono w roku 691 w czasie panowania kalifa Abd al-Malika. Kopuła na planie koła na bębnie oparta jest na czterech filarach i dwunastu kolumnach i stanowi centralną część przekrycia ośmiobocznej budowli. Ma wymiary 20,20 m średnicy podstawy i ok. 20,48 m w przekroju. Pierwotnie skonstruowano ją z dwóch warstw drewnianego stelażu, które przybrały w przekroju formę delikatnie ostrołukową.

Stelaż wewnętrzny utrzymywał całą strukturę z mozaikami, natomiast zewnętrzny, usztywniony krzyżowymi stężeniami, pokryto dachówkami. Założenie przeszło kilka renowacji – w roku 1965 ołowianą kopułę zastąpiono konstrukcją z aluminium i brązu, sprowadzonym specjalnie z Włoch, a w 1993 r. dachówki pokryto złotem. Biorąc pod uwagę geometrię należałoby zaklasyfikować konstrukcję jako prostą.



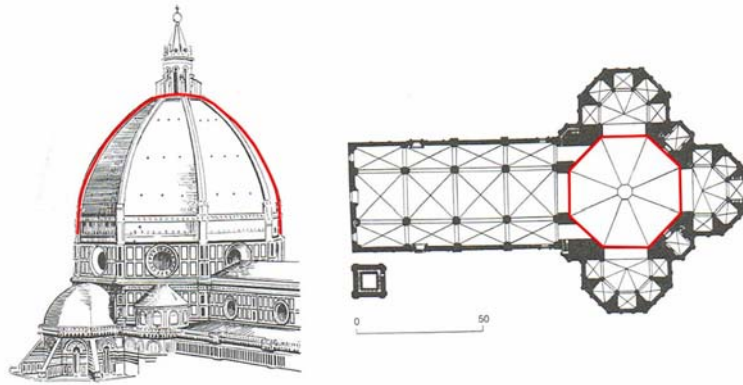
Rys. 3. Kopuła na Skale – widok [13].



Rys. 4. Kopuła na Skale – rzut z zaznaczoną geometrią podstawy kopuły [14].

Kopuła katedry Santa Maria del Fiore we Florencji (rys. 5) powstała według projektu Filippo Brunelleschiego. Jest to obiekt na planie ośmioboku o rozpiętości 41,5 m, o wysokości 13 m. Całość tworzą kamienne żebrę i pierścienie, wzmocnione w dolnej części ołowianymi obręczami oraz podwójna powłoka wykonana z cegły ułożonej w wątku jodełkowym. Wątek ten uzyskano w taki sposób, że warstwy poziome były poprzecinane skośnymi, spiralnie ułożonymi elementami dociska-

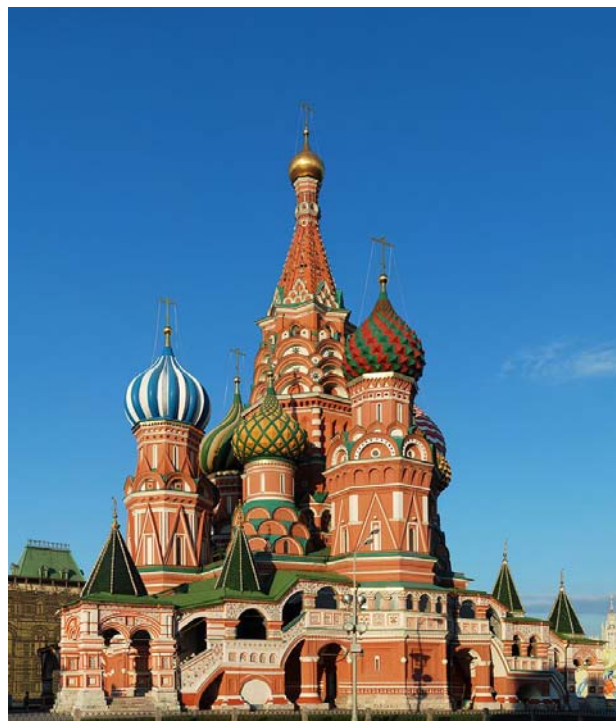
jącymi, co zapewniło znaczną wytrzymałość muru i dobrą jego spoistość. Na zewnątrz zastosowano marmurową licówkę. Kopuła podzielona jest na osiem żaglastych powierzchni w kształcie eliptycznego ostrołuku i opiera się ona na bębnie. Pomiędzy powłokami umieszczono schody, a na szczycie- latarnię, która zapewnia stabilizację konstrukcji. Według przyjętego kryterium złożoności kopuła została zaklasyfikowana jako złożona typu C [3, 5, 11].



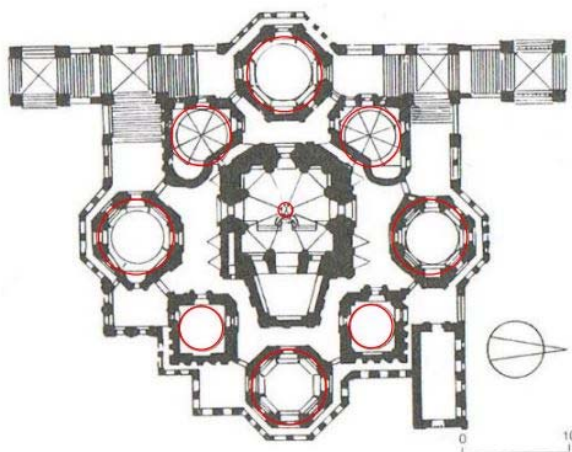
Rys. 5. Widoki i rzut katedry Santa Maria del Fiore we Florencji z zaznaczonymi elementami geometrii kopuły [7].

Sobór Wasyla Błogosławionego (rys. 6 i 7) (Sobór Opieki Matki Bożej na Fosie) zlokalizowany w Moskwie na Placu Czerwonym, w pobliżu Kremla, został zbudowany w latach 1555-1561 za panowania cara Iwana Groźnego, jako pamiątka wojen z Tatarami. Projekt Mistrzów Barmy i Postnika Jakowlewa wzniesiono z białego kamienia, a kopuły pokryto złotem. Zgrupowane są one w sposób piętrzący od 4 niższych, poprzez kolejne 4 wyższe aż do centralnej, dziewiętej cerkwi, stanowiącej centrum założenia. Całość, umieszczoną na tej samej platformie, łączy obwodowy korytarz

oraz arkadowe przejścia. Centralną cerkiew nakryto dachem namiotowym zakończonym małą kopułą, a pozostałe - kopułami cebulastymi, z czego cztery w narożnikach poprzez cylindryczny bęben łączą się z kwadratową w rzucie podstawą, a pozostałe w podobny sposób opierają się na ośmiokącie. Wszystkie kopuły jako podstawę mają koło, można więc je zaklasyfikować jako strukturę złożoną typu A podstawową, gdzie mamy do czynienia z kilkoma prostymi, cebulastymi konstrukcjami różnych wielkości.



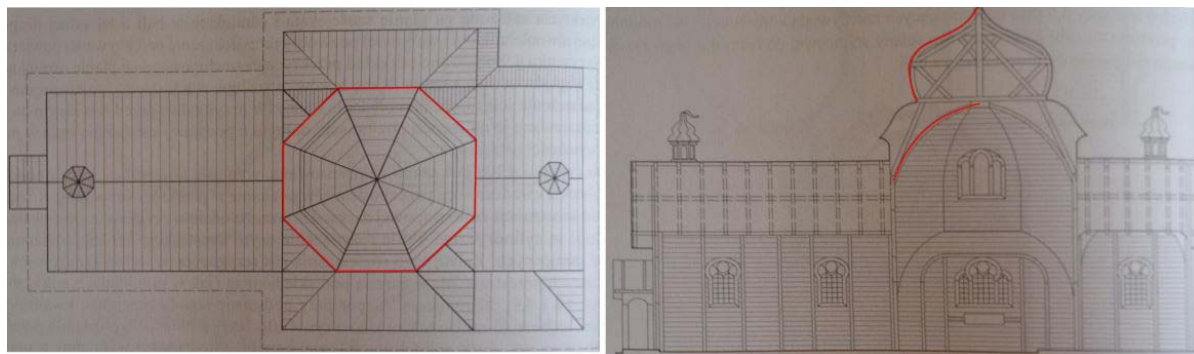
Rys. 6. Sobór Wasyla Błogosławionego – widok [15].



Rys. 7. Sobór Wasyla Błogosławionego z zaznaczonymi elementami geometrii kopuły - rzut [7].

Inną budowlą o ciekawej architekturze kopuły była dawna cerkiew greckokatolicka p.w. św. Michała Archanioła w Krowicy Samej (rys. 8), która w roku 2002 spłonęła w pożarze. Była to budowla z 1870 r., a jej budowę, nadzorował Dymitr Hładko. Wykonano ją w zrębowej konstrukcji drewnianej, miała plan krzyża łacińskiego, a ośmioboczną, perforowaną otworami okiennymi wieżę na przecięciu naw zwieńczono kopułą. Połączono ją peł-

nyimi przeponami - pionowymi stężeniami z cebulastym, pokrytym blachą hełmem, typowym dla architektury cerkiewnej. Geometrycznie obiekt można zaklasyfikować jako złożony typu B, gdyż konstrukcja przybiera od wewnątrz kształt wielosegmentowej kopuły, natomiast od zewnątrz - kształt cebulasty, jednakże brak tu bębna, latarni i jabłka, a bania i makówka zostały połączone [4, 9].



Rys. 8. Dawna cerkiew greckokatolicka p.w. św. Michała Archanioła w Krowicy Samej - rzut i przekrój z zaznaczonymi elementami geometrii kopuły [9].

Podsumowanie

Zaprezentowany podział ma służyć za przykład stworzenia pewnej klasyfikacji kopuł, w celu usystematyzowania obiektów istniejących. Tabełacyjne zestawienie budowli może być przydatne dla badaczy architektury. W zaproponowanym układzie można łatwiej je porównywać, a podane kryterium w analogiczny sposób sprawdzi się w badaniach innych elementów budowli. Tabela zawiera tylko kilka przykładów, głównie przez wzgląd na dużą liczbę istniejących obiektów oraz ograniczenia, jakie narzuca forma artykułu, jednak będzie nadal rozwijana i uzupełniana o nowe obiekty.

Na podstawie zebranych informacji jest możliwe również analiza zalet, wad i celowości stosowania poszczególnych rozwiązań. Wśród zalet można wymienić możliwość przekrycia dużych powierzchni i wytrzymywanie dużych obciążeń, wadą natomiast jest większe zużycie materiału, a co za tym idzie – większe koszty budowy. Jak wynika z tabeli każde kolejne proponowane rozwiązanie konstrukcyjne bazuje na już istniejących rozwiązaniach. Zmiany spowodowane są tu między innymi nieznacznymi modyfikacjami wybranej formy architektonicznej oraz różnicami materiałowymi, a zatem – różnymi technologiami wykonania.

Literatura

1. Baynes, N.H., Moss, H.St.L.B., Bizancjum: wstęp do cywilizacji wschodniorzymskiej, Warszawa, 1964.
2. Buchner, M., Buchner, A., Laube, J., Krasiński, S., Zarys projektowania i historii architektury, Warszawa, 1976.
3. Carpetti, E., Brunelleschi. Klasycy sztuki: 39. Warszawa, 2006.
4. Dovganük, I., Architektura ukraińskich cerkwi, Gdańsk, 2005.
5. Fanelli, G., Firenze:L architettura e città, Florencja, 1973.
6. Kalinowski, Z., Orient und Rom okcydentalność i orientalność kościołów antycznych. Architektura jako język polityki i teologii, Poznań, 2013.
7. Koch, W., Style w architekturze. Arcydzieła budownictwa europejskiego. Warszawa, 1991.
8. Kubalska-Sulkiewicz, K., Bielska-Lach, M., Manteuffel-Szarota, A., Słownik terminologiczny sztuk pięknych, Wydanie czwarte. Warszawa, 2003.
9. Misztal, B., Kształtowanie kopuł z drewna jednolitego, Wrocław, 2012.
10. Morrisson, C., Świat Bizancjum, praca zbiorowa, T. 1, Cesarstwo Wschodniorzymskie, Kraków, 2007.
11. Schedler, U., Synthese von Antike und Mittelalter in der Renaissance, Petersberg, 2004.
12. https://pl.wikipedia.org/wiki/Hagia_Sophia#/media/File:Hagia_Sophia_09.JPG (dostęp 20.01.2016).
13. https://pl.wikipedia.org/wiki/Kopu%C5%82a_na_Skale#/media/File:Israel-2013%282%29-Jerusalem-Temple_Mount-Dome_of_the_Rock_%28SE_exposure%29.jpg (dostęp 20.01.2016).
14. https://pl.wikipedia.org/wiki/Kopu%C5%82a_na_Skale#/media/File:Israel-2013%282%29-Jerusalem-Temple_Mount-Dome_of_the_Rock_%28SE_exposure%29.jpg;Dehio_10_Dome_of_the_Rock_Floor_plan.jpg (dostęp 20.01.2016).
15. https://pl.wikipedia.org/wiki/Sob%C3%B3r_Wasyła_B%C5%82ogos%C5%82awionego#/media/File:Moscow_July_2011-4a.jpg (dostęp 20.01.2016).