

Analiza porównawcza koncepcji przekrycia Hali Stulecia we Wrocławiu

Comparative analysis covering concept Centennial Hall in Wrocław

dr inż. Daniel Przywara (ORCID:0000-0002-1722-6140), Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Opolska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.1303

Streszczenie: Sława wrocławskiej Hali Stulecia to nie tylko jej historia – i związana z nią skala wyzwania, jakie postawili sobie jej budowniczowie w początkach ubiegłego stulecia; rozgłos tej pięknej – obok katedry św. Jana Chrzciciela – wizytówce Wrocławia przyniosła również forma jej przekrycia – kopuła, wzorowana ideowo na rzymskim Panteonie. Przyjęty na początku ubiegłego wieku przez konstruktora hali, Gintera Trauera, model obliczeniowy – w postaci płaskiego więzara dwuprzegubowego – pozwolił na uzyskanie wartości sił wewnętrznych, wielkości skądinąd znacznie zawyżonych, choć na płaszczyźnie wiedzy technicznej początku XX stulecia wyników metodologicznie uzasadnionych. Nowoczesne techniki numeryczne (m.in. Metoda Elementów Skończonych), używane w specjalistycznym oprogramowaniu komputerowym pozwalają na określenie stopnia przewymiarowania ustrojów konstrukcyjnych powstałych bez ich wspomaganie. W artykule dokonano, w formie studium przypadku, analizy porównawczej koncepcji przekrycia Hali Stulecia we Wrocławiu, zestawiając dwa warianty – istniejącą żebrową konstrukcję kopułową oraz alternatywne rozwiązanie w postaci kopuły łupinowej.

Słowa kluczowe: przekrycie kopułowe, konstrukcje powierzchniowe, kopuła, konstrukcja łupinowa.

Abstract: The fame of Wrocław's Centennial Hall is not only its history – and the related scale of the challenge its builders set themselves at the beginning of the last century; the notoriety of this beautiful – next to the Cathedral of St. John the Baptist – the showcase of Wrocław was also the form of its covering – a dome, ideologically modeled on the Roman Pantheon. The computational model adopted at the beginning of the last century by the hall's designer, Ginter Trauer – in the form of a flat double-hinged truss – allowed for obtaining the values of internal forces, which were otherwise significantly overestimated, although the results were methodologically justified at the level of technical knowledge at the beginning of the 20th century. Modern numerical techniques (including the Finite Element Method), used in specialized computer software, make it possible to determine the degree of overdimensioning of structural structures created without their support. The article presents, in the form of a case study, a comparative analysis of the concept of covering the Centennial Hall in Wrocław, comparing two variants – the existing ribbed dome structure and an alternative solution in the form of a shell dome.

Keywords: dome covering, surface structures, dome, shell structure.

1. Wprowadzenie

Kopuły jako jedne z najstarszych rozwiązań konstrukcyjnych przekryć rozwinęły się na terenach ubogich w drewno, a obfitujących w inne materiały budowlane, takie jak kamień. Już w starożytności przekroczyły one ograniczenia rozpiętości konstrukcyjnych alternatywnych do nich wówczas układów typu słup-belka [1]. Tak w sferze sacrum, jak i profanum, były to zazwyczaj konstrukcje przekryć obiektów na planie centralnym.

Geneza morfologiczna kopuł bierze swój początek w łuku pozornym oraz w jednokrzywiznowych sklepieniach pozornych nad pomieszczeniami prostokątnymi, konstrukcjach poprzedzających sklepienie pozorne. Płaską formą tego typu konstrukcji jest łęk pozorny.

Na tle monumentalnych teatrów greckich, budowli otwartych usytuowanych na zboczach, śmiała innowacją konstrukcyjną

dla okresu Grecji starożytnej wydaje się być tzw. Grób Agamemnona (Skarbiec Arteusza) w Mykenach z połowy XIV w p.n.e. Sklepienie kopułowe tego obiektu, o rozpiętości 14,5 m było wówczas największym osiągnięciem konstrukcyjnym na świecie w dziedzinie konstrukcji kopułowych. Nie bez podstaw jednak mówi się, że o ile Grecy byli znakomitymi artystami, o tyle Rzymianie dobrzy inżynierami: powstały w I w.p.n.e. Panteon rzymski – pierwszy tak imponujących rozmiarów obiekt na planie koła, przekryty masywną konstrukcją kopułową – w kartach historii zapisał się bez wątpienia jako niedościgniony wzorzec masywnych, murowanych kopuł świata antycznego krajów śródziemnomorskich. Rzymska budowla, która pełniła sakralną funkcję świątyni poświęconej wszystkim bogom, przesłoniła swą świetnością mykeński Skarbiec Arteusza – jej żebrowa konstrukcja kopułowa ma rozpiętość 43,5 m – symboliczne sto stóp rzymskich [2]. Starożytni Rzymianie potrafili docenić zalety konstrukcji

powłokowych również w odniesieniu do obiektów opartych na planie prostokątnym, stosując proste sklepienia kolebkowe – wywodzące się już z Mezopotamii, poprzez bardziej złożone sklepienia krzyżowe i klasztorne, po kopułę rzymską, która w późniejszych wiekach zdominowała architekturę sakralną całej Europy Zachodniej.

Praca statyczna kopuły determinowana jest sposobem pracy łuku, będącego jej elementarnym wycinkiem. W łuku parabolicznym, którego kształt odpowiada linii ciśnień, podobnej do linii łańcuchowej, obciążenie ciężarem własnym nie wywołuje momentów zginających – zatem wygenerowanie kształtu geometrycznego konstrukcji pozwala na takie jej uformowanie, w którym ustrój statyczny pracuje wyłącznie na siły ściskające i rozciągające. Wycięty pasek kopuły sferycznej ma jednak kształt półkolisty, czyli niezgodny z linią ciśnień. Oznacza to, że jako samodzielny element konstrukcyjny musiałby być sztywny na zginanie w takiej mierze, w jakiej jego geometria odbiega od linii ciśnień [3].

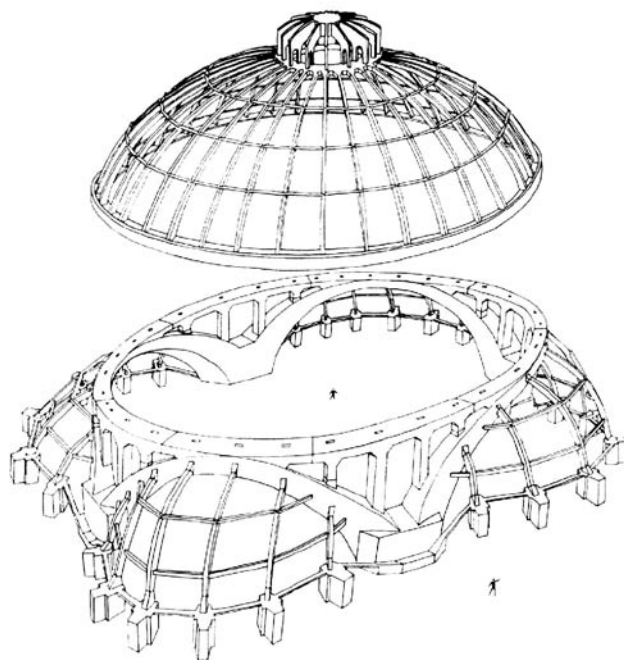
Wybitną, światowej sławy konstrukcją kopuły, wzniesioną w 1913 roku, jest wrocławska Hala Stulecia – żebrowa konstrukcja żelazobetonowa – przykład nawiązania do antycznych wzorców konstrukcyjnych. Formy hali, a także wypowiedzi Maxa Berga – jej twórcy, wskazują, że bliskie mu były platońskie idee o obiektywnym pięknie regularnych form geometrycznych, w tym najdoskonalszej – kuli [4].

Ideą Berga, zawartą w jego wypowiedziach z czasów projektowania i budowy hali, było nawiązanie w rozpiętości hali, mierzącej 65 m, do średnicy kopuły Panteonu. Nowoczesna konstrukcja żebrowa miała przekroczyć rozpiętość Panteonu o 50%.

Wrocławska Hala miała być przede wszystkim historycznym pomnikiem 100-lecia wojny wyzwoleniczej i początku zjednoczenia Niemiec pod berłem Prus. Budowla ta była manifestem architektonicznym, sięgającym jeszcze XIX-wiecznych idei syntezy [5], a więc połączenia archetypów klasycznych (kopuła i portyk) z gotycką konstrukcją żebrową, ze szczególnym podkreśleniem symboliki nowego materiału przez pozostawienie surowej powierzchni żelazobetonu, wspaniałych efektów wizualnych i doskonałej akustyki – dzięki antycznemu ideałowi wnętrza bez pogłosu (rys. 1).

Wyraziście zarysowana teologiczna symbolika kopuły i jej głównego źródła światła – latarni – zostały rychło, bo już w latach dwudziestych, gruntownie zakłócone. Z przyczyn technicznych prawdopodobnie w wyniku nieszczelności przeszklenia oraz rys w słupach ramy, tworzących układ konstrukcyjny latarni, zrezygnowano z górnego oświetlenia i na trwałe przekryto jej górne okna. Tym samym świetlista latarnia została zamieniona w ciężki zwornik.

Szczególną funkcję wizualną, zarówno w widoku z zewnątrz, jak i wewnątrz hali, pełnił żelazobeton. Jego powierzchnię pozostawiono, zgodnie z estetyką „prawdy materiału”, w surowej fakturze, uzyskanej w wykonanych z desek formach. Centralna kopuła mierzy 65 m rozpiętości i wznosi się na wysokość 42 m, z czterech stron świata, będących zarazem



Rys. 1. Kompozycja przestrzenna Hali Stulecia we Wrocławiu [4]; opis w tekście

kierunkami głównych wejść, kopułę i łuki jej podstawy wspierają absydy, które mieszczą widownię – ogółem 6000 miejsc siedzących i 10 000 miejsc stojących. Wolna przestrzeń między przeciwległymi absydami wynosi 95 m [4].

Główne wnętrze nakryte kopułą sprawia wrażenie pełnej harmonii klasycznych proporcji. Podobnie jak w rzymskim Panteonie, wchodzący do jej wnętrza ma wrażenie, że wysokość kopuły odpowiada jej średnicy.

W ogłoszonych w 1911 roku założeniach projektowych hali dopuszczono zastosowanie zarówno konstrukcji stalowej, jak i żelbetowej. Analiza wykazała jednak, że konstrukcja stalowa byłaby nieoptymalna, bowiem ze względów bezpieczeństwa przeciwpożarowego należałoby jej stalowe elementy otoczyć powłoką betonową. Żelbet okazał się też bardziej odpowiedni do przeniesienia naprężeń ściskających w kopule, łukach głównych i łukach odpornych. Słabą stroną tego wariantu był – charakterystyczny dla tego materiału – gwałtowny przyrost ciężaru własnego konstrukcji przy zwiększaniu jej rozpiętości. Śmiałe formy konstrukcyjne i niespotykane dotychczas rozpiętości skłoniły Trauera, konstruktora hali, do zastąpienia niewyznaczalnego układu statycznego ustrojem wyznaczalnym. W tym celu w konstrukcję wprowadzono liczne przeguby i szczeliny konstrukcyjne [4].

Ówczesne doświadczenia nad konstrukcjami żelbetowymi o dużych rozpiętościach wykazały, że ustroje statycznie niewyznaczalne [7], chociaż trudniejsze w obliczeniach, wywierały jednak większe wrażenie i dlatego uważano je także za bardziej estetyczne.

Z reguły postępowano w ten sposób, że skomplikowany układ przestrzenny, np. kopuły żebrowej, zredukowano do wyizolowanej formy więźarów opartych u dołu na pierścieniu

rozciągany, a u góry na pierścieniu ściskanym. Zapewne takie przekształcenie układu statycznego wrocławskiej hali do formy wyznaczalnej sprawiło, iż według niektórych współczesnych historyków jest ona właściwie zaprojektowana jak konstrukcja stalowa [6].

Zgodnie z tak sformułowanym założeniem podzielono całość ustroju konstrukcyjnego hali na dwie zasadnicze, oddzielone od siebie części. Pierwszą z nich stanowi złożona z 32 żebra kopuła zwieńczona kopułką latarni. Żebra mają zmienny przekrój poprzeczny, zwężający się ku górze – co daje iluzję lżejszego i wyższego niż w rzeczywistości ustroju. Kopuła ta spoczywa swobodnie na części dolnej, stanowiącej drugą z zasadniczych części konstrukcji.

Obliczenia statyczne przeprowadzone zostały metodą graficzną według linii zginania i planu przesunięć. Obliczenia te poparto metodami analitycznymi według ogólnej teorii sprężystości z wyznaczonymi liniami wpływów wielkości statycznie niewyznaczalnych.

Znaczenie historyczne, symbolika obiektu, a także jego rola w przestrzeni urbanistycznej Wrocławia sprawiły, że w 1962 roku Hala Stulecia została zaliczona w poczet zabytków architektury i objęta ochroną konserwatora zabytków.

2. Obliczenia statyczne – studium przypadku

Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń statycznych w trzech podejściach metodycznych do modelu obliczeniowego – założonego przez konstruktora hali płaskiego łuku przegubowego, a także żebrowej i łupinowej konstrukcji kopułowej [8].

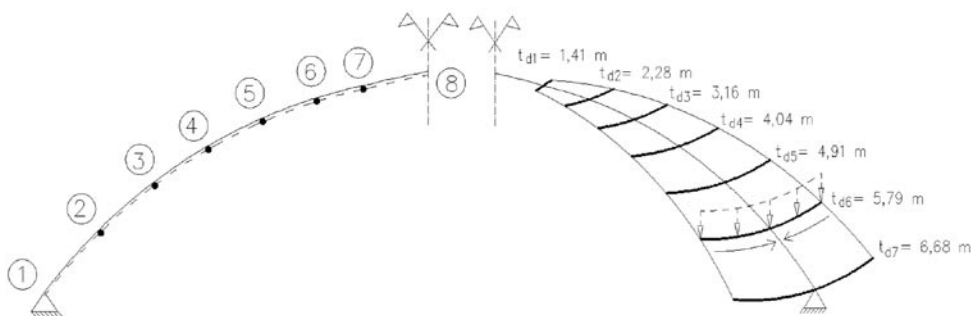
2.1. Płaski łuk przegubowy

Schemat żebra, wraz z numeracją punktów charakterystycznych – przecięć żebra południkowego z żebrowymi równoleżnikowymi i pierścieniami przedstawiono na rysunku 2.

Dla łuku przegubowego – do kombinacji obciążeń – przyjęto przypadek parcia wiatru, jako bardziej niekorzystne oddziaływanie; zebrane obciążenie z żebrowych równoleżnikowych – w postaci siły skupionej – rozłożono na składowe poziome i pionowe [9].

Kształt wykresu momentów zginających dla łuku przegubowego – schematu statycznego, który przyjęto na początku ubiegłego stulecia przy wymiarowaniu kopuły hali – determinowany jest znacznym oddziaływaniem latarni. Pominięcie przestrzennej roli usztywniającej żebrowych równoleżnikowych kopuły nadało znacznej sile,

Rys. 2. Żebro południkowe – numeracja węzłów oraz schemat zestawczy obciążeń z kopuły; opis w tekście; opracowanie własne [8]



pochodzącej od jej oddziaływania, ramię sięgające 40% rozpiętości konstrukcyjnej przekrycia, skutkując nieporównywalnie większą wartością momentu zginającego w łuku, w stosunku do ustroju przestrzennego kopuły.

Wykresy sił wewnętrznych dla opisanego modelu przedstawiono na rysunku 3.

2.2. Żebrowa i łupinowa konstrukcja kopułowa

W przypadku kopuły żebrowej siły wewnętrzne przedstawiono dla łuku żebra południkowego jako elementu powtarzalnego całego ustroju konstrukcyjnego. W odniesieniu do konstrukcji łupinowej siły wewnętrzne zobrazowano dla pionowego przekroju poprzecznego powłoki, jako powierzchni symetrycznej.

Dla porównania wartości sił wewnętrznych obliczenia zrealizowano w tym przypadku dla analogicznej kombinacji obciążeń, jak dla łuku przegubowego, zestawiając obciążenia stałe żebra południkowego, żebrowych równoleżnikowych (w postaci siły skupionej), ciężar przekrycia wraz z parciem wiatru na kopułę przy zalegającym na niej śniegu.

Ustrój konstrukcyjny łupiny zamodelowany został siatką dyskretyzacyjną. Stąd też ze względu na obrotowo symetryczną powierzchnię kopuły wprowadzono uogólniony przekrój pionowy powtarzalnego panelu.

Przestrzenne modele analizowanych ustrojów przedstawiono na rysunku 4, zaś wykresy sił wewnętrznych dla opisanego przypadku obciążeń – na rysunkach 5 i 6.

2.3. Analiza porównawcza wyników obliczeń statycznych

Analiza porównawcza wyników obliczeń statycznych dla trzech wariantów podejścia do problemu daje szerokie spektrum wniosków.

Zestawienie wariantów metodycznych obliczeń konstrukcji unaocznia dalece uproszczoną formę przestrzennej kopuły do postaci płaskiego łuku przegubowego – i płynące stąd znaczne jej przewymiarowanie.

Wykres momentów zginających w statyce kopuły żebrowej obrazuje, jak duży wpływ na sztywność przestrzenną ustroju mają żebra równoleżnikowe – widoczna jest tu praca poszczególnych odcinków żebra południkowego jako samodzielnych dźwigarów.

W tabelach zestawczych (tab. 1, 2, 3) wartości sił wewnętrznych łupiny przemnożono przez rozstaw żebrowych. Różnica w sposobie podparcia schematu statycznego

Rys. 3. Wykresy sił wewnętrznych dla płaskiego łuku przegubowego (od góry): momenty zginające M_Y [kNm], siły poprzeczne F_Z [kN], siły podłużne F_X [kN]; opis w tekście; opracowanie własne [8]

łuku przegubowego, a także samej geometrii ustroju, skutkuje w znacznych odchyleniach wyników – nie tylko co do wartości, ale i co do znaku.

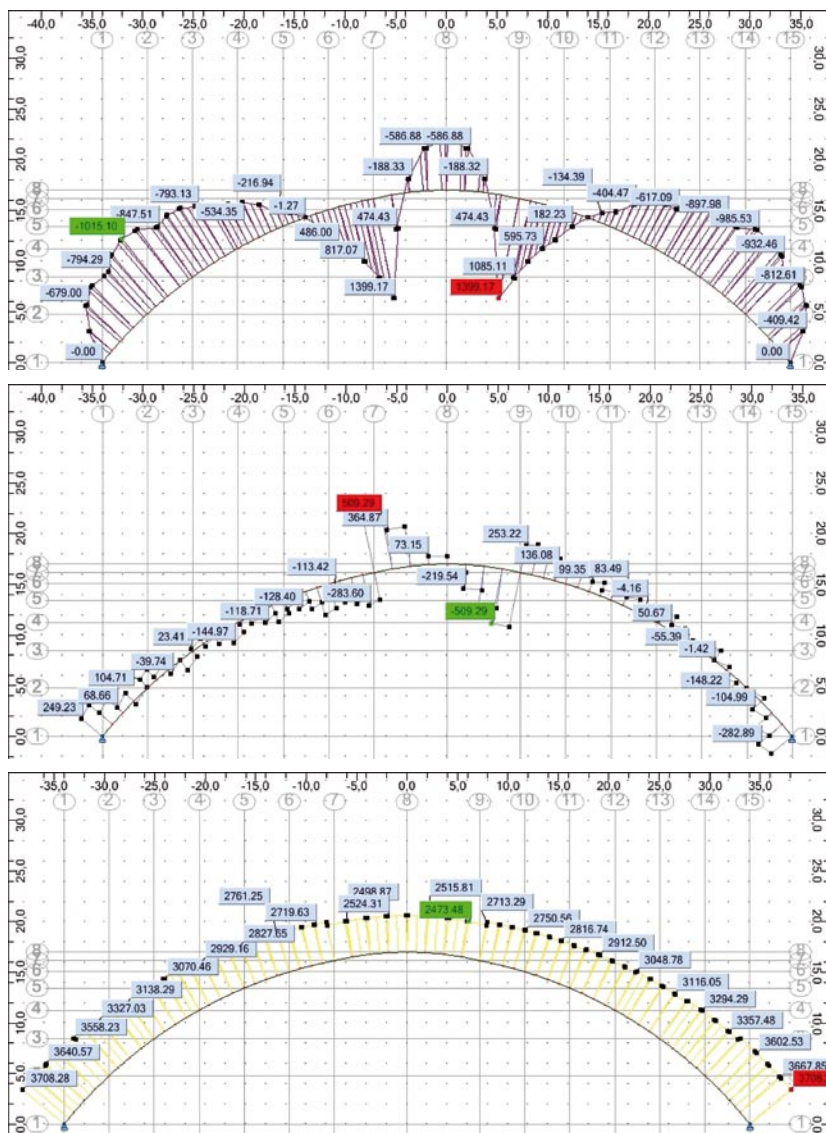
Podejście porównawcze w aspekcie modelowym: analiza żebrowej konstrukcji kopułowej na tle ustroju łupinowego przedstawia, jak dominującą funkcję pełnią w kopule żebrowej jej górny i dolny pierścień; wynikają stąd nieporównywalnie mniejsze – w stosunku do łupiny (rys. 7, tab. 4) – wartości sił na krańcach łuku, większe jednak po całej jego długości.

Znaczne różnice w wartościach reakcji podporowych (tab. 5), pochodnych skądinąd konstrukcji, wynikają z ich ciężaru własnego – oto główna przesłanka tak znacznych wahań w wartościach sił wewnętrznych, przy identycznym obciążeniu zewnętrznym.

3. Podsumowanie

Przedstawiona analiza porównawcza wyników obliczeń statycznych w aspekcie modelu obliczeniowego – żebrowej konstrukcji kopułowej i konstrukcji łupinowej dowodzi bezspornie, iż następną tego typu konstrukcją przekrycia – po wrocławskiej Hali Stulecia – byłyby już łupina, że pełnościenna czapa powłokowa będzie wypierała model szkieletowy. Teza ta potwierdzona jest nie tylko słusznym, co do ewolucji kopuł, kierunkiem ich rozwoju: przemawiają za nią również względy ekonomiczne, dyktowane zużyciem materiałów konstrukcyjnych – co w dobie XXI wieku stanowi często podstawową wykładnię w procesie podejmowania decyzji, od etapu projektowania począwszy.

Pomimo różnicy typologicznej między kopułą żebrową a ustrojem łupinowym można w przybliżeniu określić rozpiętość, jaką uzyskałaby łupina, wzniesiona z całego materiału

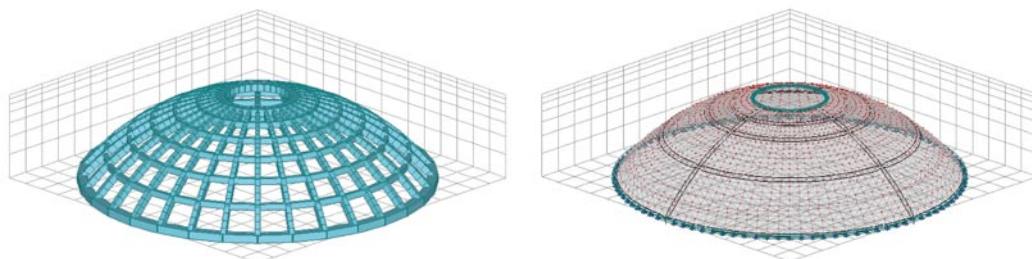


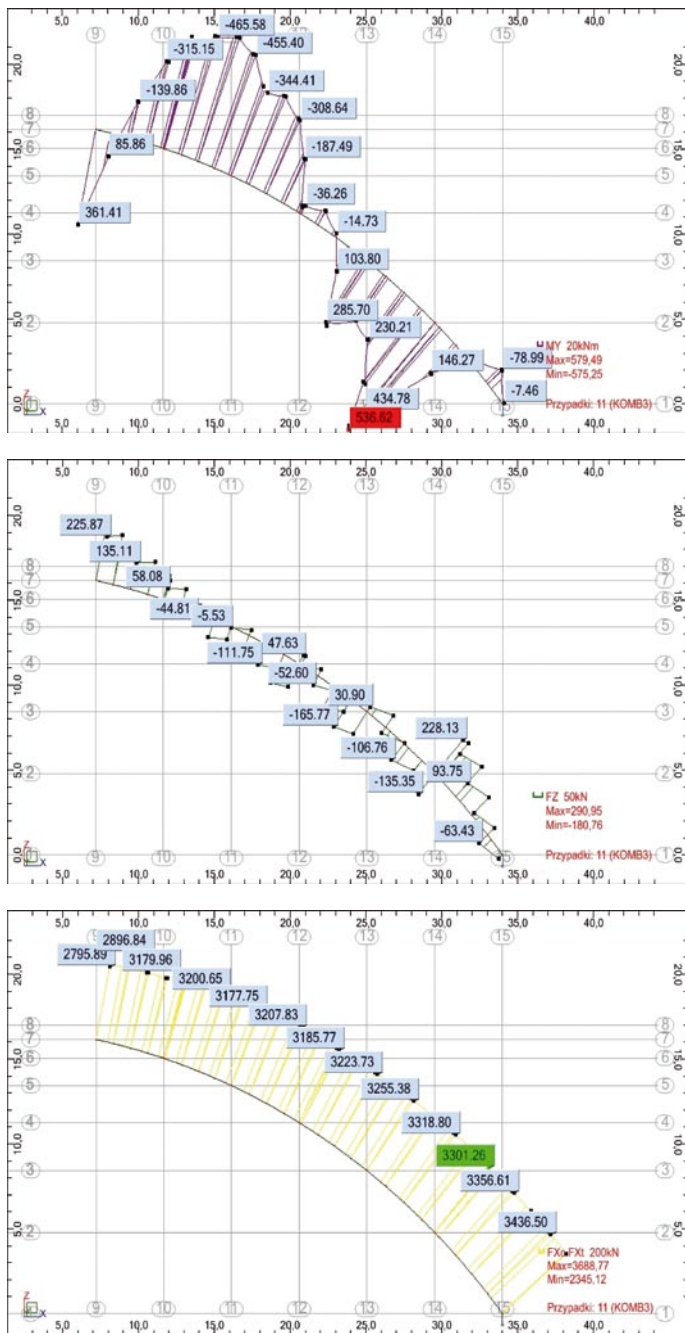
konstrukcyjnego, użytego do budowy wrocławskiej kopuły: łupina taka osiągnęłaby rozpiętość 297 m [4].

Łupinowa konstrukcja zadaszenia hali w Lipsku, wzniesiona na przełomie 1927–28 roku – 15 lat po budowie Hali Stulecia we Wrocławiu, a także zrealizowane w latach 50. projekty Feliksa Candeli, architekta i konstruktora zarazem, który zaprojektował całą masę przekryć w formie kopuły łupinowej, stanowią przesłankę początku nowego etapu ewolucji w dziedzinie szeroko pojmowanych konstrukcji powłokowych.

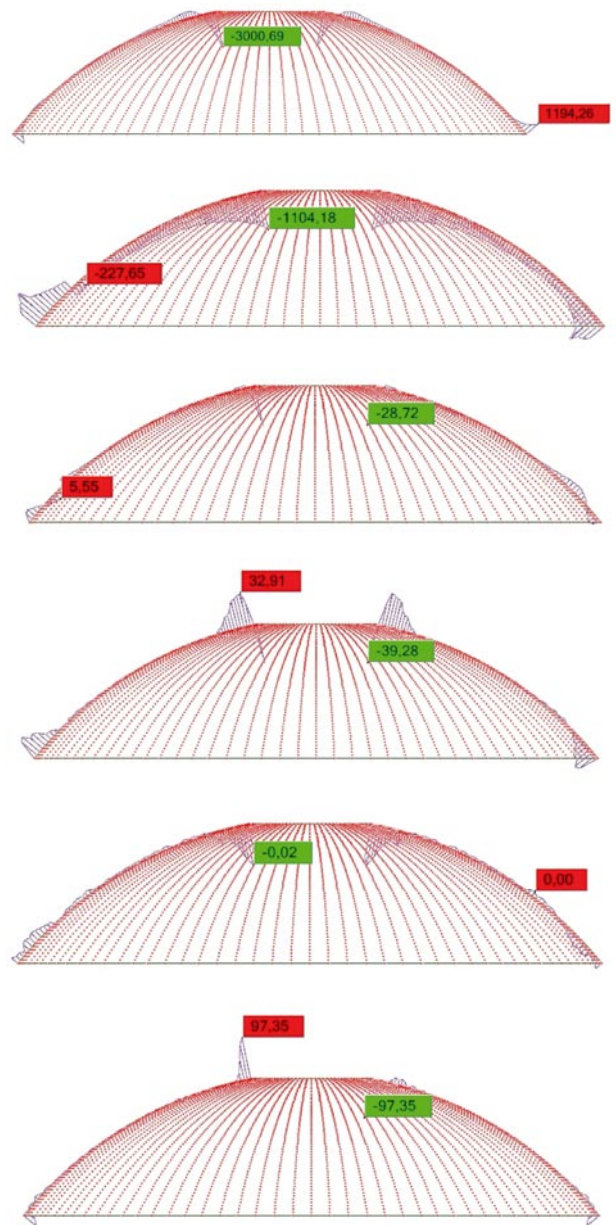
Konstrukcje powłokowe w ogóle cechuje ów magnetyzm wizualny, w którym trójwymiarowa przestrzeń Kartezjusza

Rys. 4. Przestrzenny model ustroju konstrukcyjnego kopuły (od góry): konstrukcja żebrowa, konstrukcja łupinowa; opis w tekście; opracowanie własne [8]





Rys. 5. Wykresy sił wewnętrznych dla żebrowej konstrukcji kopułowej (od góry): momenty zginające MY [kNm], siły poprzeczne FZ [kN], siły podłużne FX [kN]; opis w tekście; opracowanie własne [8]



Rys. 6. Wykresy sił wewnętrznych dla łupinowej konstrukcji kopułowej (od góry): siły membranowe N_{xx} [kN/m], siły membranowe N_{yy} [kN/m], momenty M_{xx} [kNm/m], momenty M_{yy} [kNm/m], siły ścinające Q_{xx} [kN/m], siły ścinające Q_{yy} [kN/m]; opis w tekście; opracowanie własne [8]

Tabela 1. Wartości momentów zginających w łuku przegubowym, konstrukcji żebrowej i konstrukcji łupinowej [kNm]

Punkty	1	2	3	4	5	6	7
Łuk przegubowy	0	-794,29	-847,51	-617,09	-216,94	486,00	1399,17
Konstrukcja żebrowa	-7,46	536,62	296,05	-57,46	-358,65	-443,96	373,06
Konstrukcja łupinowa (M_{xx})	98,20	20,32	-12,72	-7,15	-8,34	-7,23	-40,88

ustępuje miejsca układom krzywoliniowym, opisującym harmonijną grę krzywizn. Ten ostentacyjny symbol secesji, zrodzony niegdyś z protestu przeciw bezkrytycznemu i mechanicznemu naśladowaniu form tradycyjnych w sztuce,

przetrwiał – i jest dziś realizowany w wielkogabarytowym formacie – w funkcjonalnym, powiązanim z naturą stylu – z akcentem wręcz dwudziestopiętowiecznym.

Tabela 2. Wartości sił poprzecznych w łuku przegubowym, konstrukcji żebrowej i konstrukcji łupinowej [kN]

Punkty	1	2	3	4	5	6	7
Łuk przegubowy	-249,23	-5,06	-23,40	25,88	84,83	113,42	213,96
		-104,71	68,63	103,00	128,36	184,50	-509,13
Konstrukcja żebrowa	-29,43	228,13	73,59	47,63	-4,17	93,76	254,14
		-135,35	-133,78	-130,65	-67,41	127,86	
Konstrukcja łupinowa (Qxx)	-49,63	15,34	-13,50	-9,09	-14,38	25,08	37,94

Tabela 3. Wartości sił podłużnych w łuku przegubowym, konstrukcji żebrowej i konstrukcji łupinowej [kN]

Punkty	1	2	3	4	5	6	7
Łuk przegubowy	3708,28	3558,37	3138,29	3048,78	2929,16	2761,25	2713,29
Konstrukcja żebrowa	3477,08	3376,32	3263,98	3238,59	3223,08	3179,45	2755,16
Konstrukcja łupinowa (Nxx)	8754,07	-867,11	458,00	333,46	620,81	1164,19	-4581,39

Rys. 7. Wykres momentów zginających MY [kNm] dla górnego i dolnego pierścienia łupiny; opis w tekście; opracowanie własne [8]

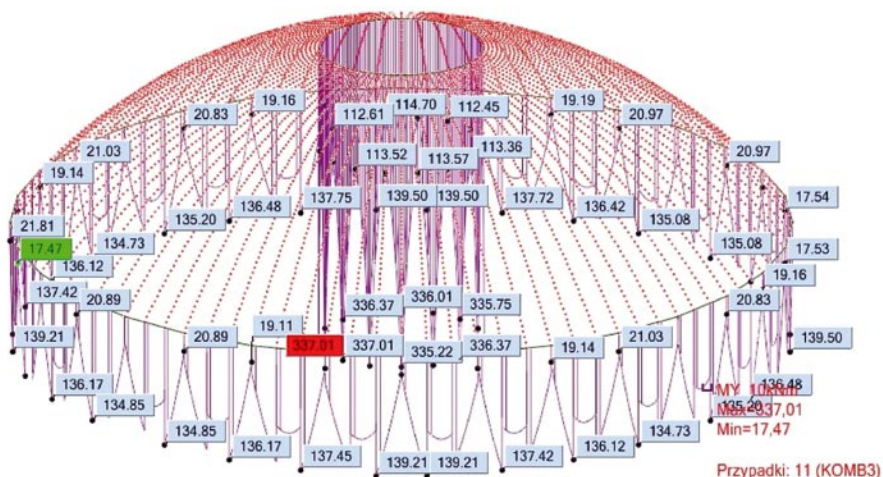


Tabela 4. Wartości sił wewnętrznych w pierścieniach kopuł

Typ pierścienia	Górny pierścień ściskany			Dolny pierścień rozciągany		
	FX [kN]	FZ [kN]	MY [kNm]	FX [kN]	FZ [kN]	MY [kNm]
Siły wewnętrzne						
Konstrukcja żebrowa	13746,18	321,35	1879,68	-11486,86	-321,45	-494,63
Konstrukcja łupinowa	5116,13	260,34	338,90	-4028,18	-260,34	139,21
Miarodajna wartość sił dla łupiny *	12378,11	320,48	451,88	-6957,13	-276,92	189,50

* po zebraniu sił z połowy rozpiętości między żebrem równoleżnikowym i pierścieniem

Tabela 5. Wartości reakcji podporowych [kN]

Typ reakcji	Reakcja pionowa V1	Reakcja pozioma H1
Punkt podparcia	1	
Konstrukcja żebrowa	3262,72	1665,56
Konstrukcja łupinowa	1294,29	457,45
Różnica [%]	60,33	72,53

BIBLIOGRAFIA

[1] Mirski J. Z., Geneza i morfologia kopuł prętowych w aspekcie geometrycznego kształtowania form architektonicznych, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2003
 [2] Koch W., Style w architekturze, licencyjne wydanie Klubu „Świat Książki”, Warszawa, 1996
 [3] Walkus B., Podstawy projektowania betonowych przekryć powłokowych, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 1991
 [4] Niemczyk E., Hala Ludowa we Wrocławiu, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997

[5] Bogusz W., Zarys historii architektury, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa, 1996
 [6] Kolendowicz T., Konstrukcje powłok i struktur w architekturze, Redakcja Wydawnictw Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1970
 [7] Majewski M., Przekrycia powłokowe – geometryczne kształtowanie w projektowaniu architektonicznym, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 1997
 [8] Przywara D., Studium projektowe hali widowiskowo-sportowej, Wydział Budownictwa Politechniki Opolskiej w Opolu, praca magisterska, Opole, 2006
 [9] Grabiec K., Bogucka J., Grabiec-Mizera T., Obliczanie przekrojów w elementach betonowych i żelbetowych, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 2002