

PORÓWNANIE RÓŻNYCH ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH STALOWYCH KOPUŁ

Paweł Sałapa, Jacek Jaworski

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. W pracy porównano różne rozwiązania konstrukcyjne stalowych kopuł parabolicznych (żebrowych, Schwedlera i typu lamella) o średnicy $D = 46$ m i wysokości $H = 8$ m. Stosowano sztywne i przegubowe połączenia prętów. Uwzględniono obciążenia stałe, wiatrem i śniegiem. Na podstawie obliczeń wykonanych w programie Robot dobrano przekroje prętów potrzebne ze względu na spełnienie warunków SGN i SGU. Stwierdzono, że w większości przypadków o masie konstrukcji decydują ugięcia (przyjęto dopuszczalne wartości przemieszczeń: pionowych $D/300$, poziomych $H/150$). Stwierdzono, że najkorzystniej ze względu na niewielką masę wypadły kopuły Schwedlera. Dla kopuły lamella zasadne okazało się dodanie równoleżników. Zwiększenie liczby podpór w przypadku kopuły żebrowej z połączeniami sztywnymi nieznacznie zmniejszyło masę konstrukcji.

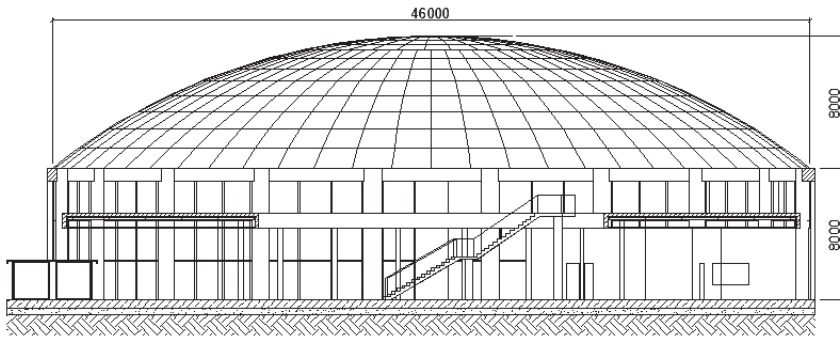
Słowa kluczowe: stalowe kopuły, kopuła żebrowa, kopuła Schwedlera, kopuła lamella

WSTĘP

Stosowane w budownictwie rodzaje kopuł omówiono obszernie w książce Łubińskiego i Żółtowskiego [2004]. W niniejszej pracy porównano różne rozwiązania konstrukcyjne kopuł o kształcie parabolicznym, średnicy $D = 46$ m i wysokości $H = 8$ m. Chodziło o znalezienie najlepszego wariantu kopuły do przykrycia projektowanej hali wystawowej (rys. 1) o kubaturze $20\,120\text{ m}^3$ [Sałapa 2013]. Elementy nośne konstrukcji zaprojektowano z prostokątnych i kwadratowych rur ze stali gatunku S355.

Południki (zebra) oparte są w części dolnej przegubowo na żelbetowej belce wieńczącej słupy nośne hali (kopuły żebrowe i Schwedlera podparto w 20 punktach, kopułę typu lamella w 30), a w części górnej zamocowane są sztywno do stalowego pierścienia szczytowego o średnicy 3,38 m dla kopuł żebrowej i Schwedlera oraz 2,61 m dla kopuły lamella. Na poszycie dachowe przewidziano panele szklane zespolone ze szkła refleksyjnego.

Adres do korespondencji – Corresponding author: Jacek Jaworski, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Katedra Inżynierii Budowlanej, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: jacek_jaworski@sggw.pl

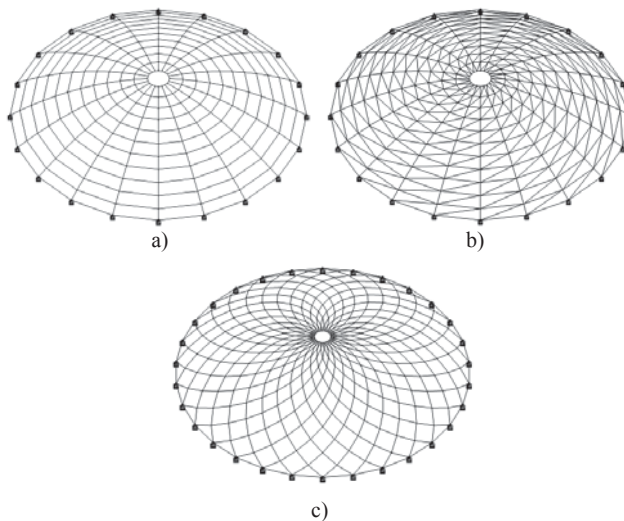


Rys. 1. Projektowany budynek (przekrój)

Fig. 1. Designed building (cross-section)

PORÓWNANIE KOPUŁ: ŻEBROWEJ, SCHWEDLERA I LAMELLA

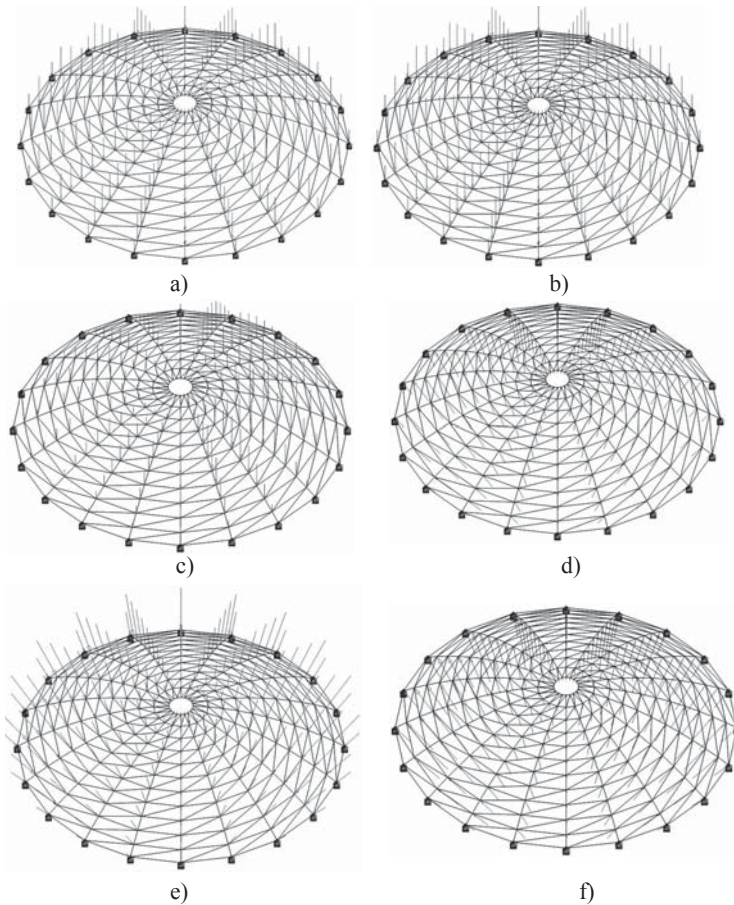
Pokazane na rysunku 2 trzy rodzaje kopuł zaprojektowano tak, że tworzą pięć rozwiązań konstrukcyjnych: kopułę żebrową, w której południki (żebra) są sztywno połączone z równoleżnikami (połączenie spawane); kopułę żebrową z przegubowym połączeniem południków z równoleżnikami (połączenie śrubowe); kopułę Schwedlera, w której południki są sztywno połączone z równoleżnikami i z prętami skratowania; kopułę Schwedlera z przegubowym połączeniem południków z równoleżnikami i z prętami skratowania; kopułę lamella ze sztywnym połączeniem prętów (przegubowe połączenie krzyżulców nie zapewnia sztywności konstrukcji).



Rys. 2. Schematy konstrukcyjne kopuł: a – żebrowej, b – Schwedlera, c – lamella

Fig. 2. Design solutions: a – ribbed dome, b – Schwedler dome, c – lamella dome

Uwzględniono obciążenia stałe ciężarem własnym konstrukcji prętowej i panelami szklanymi o ciężarze $1,4 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, dwa warianty (symetryczny i asymetryczny) obciążenia śniegiem dla 3 strefy według PN-EN 1991-1-3 i obciążenia wiatrem dla 1 strefy, III kategorii terenu oraz wysokości poniżej 300 m n.p.m. według PN-EN 1991-1-4. Wartość szczytowej prędkości wiatru wyniosła $q_p = 0,65 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$. Utworzono kombinacje tych obciążeń zgodnie z załącznikiem krajowym do normy PN-EN 1990. Obciążenia zostały sprowadzone do sił skupionych działających w węzłach konstrukcji. Sposób uwzględnienia obciążeń pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Obciążenia kopuły: a – stałe, b – równomierne obciążenie śniegiem, c – nierównomierne obciążenie śniegiem, d – oddziaływanie wiatru na powierzchnie zewnętrzne, e – oddziaływanie wiatru na powierzchnie wewnętrzne – ssanie, f – oddziaływanie wiatru na powierzchnie wewnętrzne – parcie

Fig. 3. Dome loads: a – dead load, b – balanced snow load, c – unbalanced snow load, d – wind external pressure, e – wind internal negative pressure – suction, f – wind internal positive pressure

Obliczenia wykonano zgodnie z PN-EN 1993-1-1 w programie Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2012, dla kopuł z połączeniami sztywnymi według teorii I i II rzędu, a z węzłami przegubowymi – według teorii I rzędu. Wyniki podano w tabeli 1 (dane w nawiasach dotyczą teorii II rzędu). Określono siły wewnętrzne w prętach konstrukcji i dobrano przekroje dla każdej z grup prętów. Ze względu na warunek stanu granicznego nośności konstrukcje nośne kopuł żebrowych i Schwedlera charakteryzowały się masą rzędu 30–40 ton, masa kopuły lamella wyniosła ponad 50 ton. Jednocześnie kopuły żebrowe i lamella charakteryzowały się dużymi ugięciami. W tabeli 1 podano największe wartości pionowych i poziomych przemieszczeń węzłów konstrukcji.

Tabela 1. Parametry porównywanych konstrukcji

Table 1. Data of compared constructions

Kopuła Dome	Żebrowa Ribbed dome		Schwedlera Schwedler dome		Lamella Lamella
	Sztywne Rigid	Przegubowe Hinged	Sztywne Rigid	Przegubowe Hinged	Sztywne Rigid
Maks. siły w południkach [kN] Max. forces in ribs	392,2 (392,5)	389,1	394,8 (397,4)	396	242,6 (243,0)
Dobry przekrój południków Chosen ribs section	RP 150×100×10	RP 200×100×12	RP 120×60×8	RP 100×60×8	RP 120×80×10 (140×80×10)
Masa z warunku SGN [kg] Mass from the ULS condition	37514	33923	33914	31142	51776 (57834)
Maks. przemieszczenie pionowe/poziome [cm] Max. displacement vertical/horizontal	23,2 / 12,9	62,1 / 35,5	2,3 / 0,9 (2,3 / 1,0)	2,5 / 1,0	22,2 / 9,9 (21,1 / 9,1)
Ponownie dobrany przekrój południków Again chosen ribs section	RK 220×220×12	RK 300×300×12	RP 120×60×8	RP 100×60×8	RP 140×140×8
Masa dla warunków SGN i SGU [kg] Mass from the ULS and SLS conditions	67 864	60 131	33 914	31 142	61 396
Maks. przemieszczenie pionowe/poziome [cm] Max. displacement vertical/horizontal	9,2 / 5,1	9,1 / 5,1	2,3 / 0,9 (2,3 / 1,0)	2,5 / 1,0	10,4 / 4,6 (12,4 / 5,3)
Maks. wyężenie przekroju południków [%] Max. effort of ribs section	25	26	87 (93)	99	54 (56)

Przyjęto warunki stanu granicznego użyteczności, ograniczając przemieszczenia pionowe węzłów do wartości $D/300 = 15,3$ cm i poziome do $H/150 = 5,3$ cm. Aby spełnić te warunki, dobrano ponownie przekroje grup prętów i określono masę konstrukcji. W przypadku kopuł żebrowych masa konstrukcji nośnej wyniosła 67,9 i 60,1 t, w zależności od rodzaju połączeń, a wyteżenie prętów (południków) – odpowiednio 25 i 26%. W przypadku kopuły lamella masa wzrosła z 51,8 do 61,4 t, a wyteżenie południków wyniosło 54% (56%). Dla kopuł Schwedlera przemieszczenia węzłów były niewielkie i nie było potrzeby zwiększania przekroju prętów (tab. 1).

Masa konstrukcji nośnej kopuły Schwedlera wynosiła, w zależności od rodzaju połączeń, 33,9 i 31,1 t, a stopień wykorzystania przekroju południków 87 (93) i 99%. Kopuła Schwedlera okazała się więc najkorzystniejszym rozwiązaniem zarówno ze względu na wielkość deformacji, jak i z uwagi na zużycie stali.

Szczegółowe wyniki obliczeń dla kopuły żebrowej zamieszczono w tabeli 2 (dla teorii II rzędu w nawiasach). W kolejnych wierszach podano największe siły i momenty występujące w południkach i równoleżnikach, zebrane dla różnych prętów i różnych przypadków obciążeń. Siły te nie występują jednocześnie w jednym pręcie. Podane wartości dotyczą pierwszej fazy obliczeń, w której były spełnione jedynie warunki SGN. Następnie podano największe siły występujące dla jednego pręta w wymiarującym przypadku obciążenia. O doborze przekrojów południków z rur prostokątnych decydowało zginanie, wykorzystanie nośności na wyoboczenie nie przekraczało 30% (przy współczynnikach wyoboczenia równych odpowiednio 0,86 i 0,90). Decydującym przypadkiem obciążenia była kombinacja obciążenia stałego, nierównomiernego obciążenia śniegiem jako obciążenia dominującego i obciążenia wiatrem (ze ssaniem dla powierzchni wewnętrznych) jako obciążenia towarzyszącego. Dobrane przekroje południków podano w tabeli 1. Przekroje równoleżników w kopule o połączeniach sztywnych dobrane z warunków SGN i SGU to odpowiednio $RP 120 \times 120 \times 6,3$ i $120 \times 120 \times 10$, a dla kopuły z połączeniami przegubowymi $RK 90 \times 90 \times 4$.

Tabela 2. Siły w prętach kopuły żebrowej

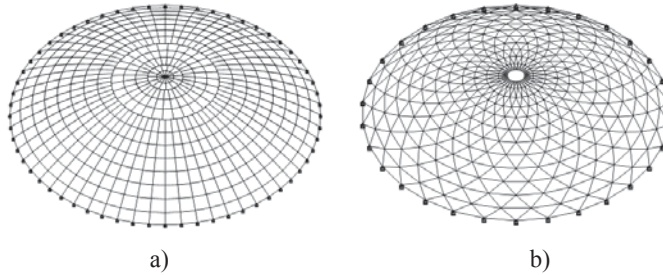
Table 2. Forces in ribbed dome bars

Kopuła żebrowa Ribbed dome	Połączenia sztywne Rigid joints	Połączenia przegubowe Hinged joints
Maks. siły w południkach N [kN] / M_y / M_z [kN·m] Max. forces in ribs	394 / 18,3 / 30,1 (392,5 / 37,6 / 34,1)	391,6 / 105,2 / 20,6
Maks. siły w równoleżnikach N [kN] / M_y / M_z [kN·m] Max. forces in ribs	136,9 / 13,1 / 20,6 (128,6 / 8,85 / 14,5)	118,9 / 0 / 0
Wymiarujące siły w południkach N [kN] / M_y / M_z [kN·m] Forces in ribs in critical case	368,1 / 0,3 / 29,5 (368,6 / 0,3 / 29,5)	234,4 / 103,3 / 0,01

Wyniki obliczeń według teorii I i II rzędu (z uwzględnieniem analizy nieliniowej i efektu P-delta) nie różniły się znacznie. Zastosowanie analizy II rzędu wymogło zwiększenie przekroju południków kopuły lamella, aby spełnić warunek SGN, ale po uwzględnieniu ugięcia i tak dobrano takie same przekroje.

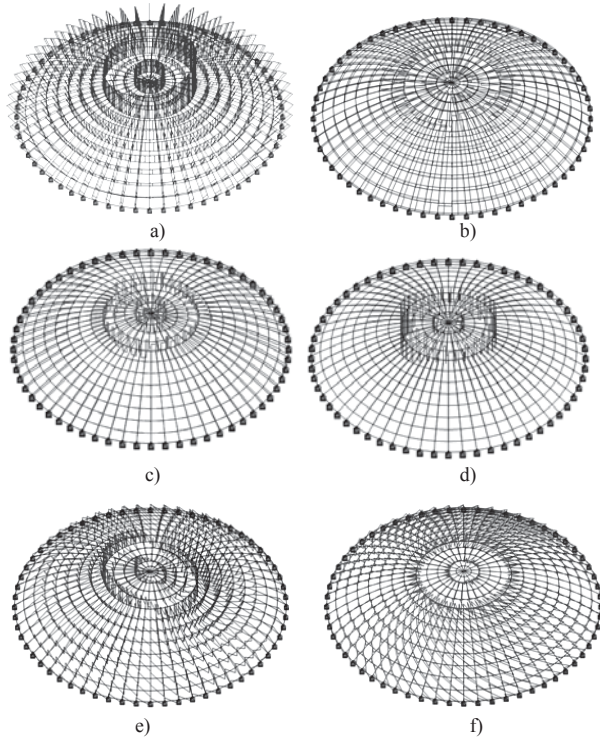
INNE ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE KOPUŁ: ŻEBROWEJ I LAMELLA

Sprawdzono wpływ dwóch modyfikacji konstrukcji. Uwzględniono kopuły żebrowe z połączeniami sztywnymi oparte na 60 podporach i kopułę lamella ze sztywnymi połączeniami prętów, w której dodano równoleżniki (rys. 4).



Rys. 4. Schematy kopuł: a – żebrowej (60 podpór), b – lamella z równoleżnikami
 Fig. 4. Design solutions of: a – ribbed dome (60 supports), b – trimmed lamella dome

Wielkości sił wewnętrznych w prętach kopuły żebrowej pokazano na rysunku 5, a w tabeli 3 zamieszczono: wartości sił w południkach, potrzebny przekrój południków, masę konstrukcji po spełnieniu warunku nośności i największe wartości przemieszczeń pionowych i poziomych węzłów konstrukcji (wyniki według teorii II rzędu podano w nawiasach).



Rys. 5. Siły wewnętrzne przy obciążeniach: stałym, nierównomiernym śniegiem i towarzyszącym wiatrem: a – siły podłużne F_x , b – siły poprzeczne F_y , c – siły poprzeczne F_z , d – moment M_x , e – moment M_y , f – moment M_z
 Fig. 5. Forces by: constant load, unbalanced snow load and accompanying wind load: a – longitudinal forces F_x , b – transversal forces F_y , c – transversal forces F_z , d – torque M_x , e – torque M_y , f – torque M_z

Tabela 3. Parametry zmodyfikowanych konstrukcji
Table 3. Data of modified constructions

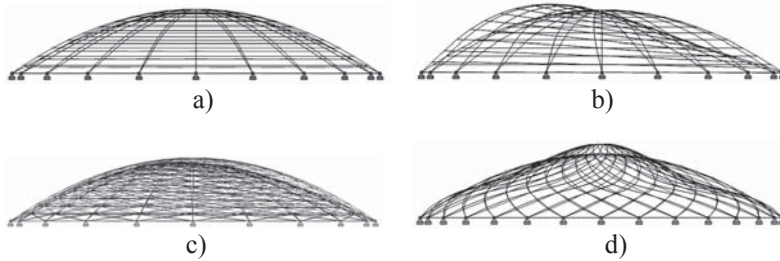
Kopuła Dome	Żebrowa – 60 podpór Ribbed dome, 60 supports	Lamella z równoleżnikami Trimmed lamella dome
Rodzaj połączeń Kind of joints	szttywne rigid	szttywne rigid
Maks. siły w południkach [kN] Max. forces in ribs	142,9 (145,2)	224,8 (224,5)
Dobry przekrój południków Chosen ribs section	RP 120×60×8	RK 80×80×8
Masa z warunku SGN [kg] Mass from the ULS condition	38 448	38 600
Maks. przemieszczenie pionowe/poziome [cm] Max. displacement vertical/horizontal	26,4 / 14,7 (26,3 / 14,0)	2,8 / 0,7 (2,8 / 0,8)
Ponownie dobrany przekrój południków Again chosen ribs section	RP 180×100×8	RK 80×80×8
Masa dla warunków SGN i SGU [kg] Mass from the ULS and SLS conditions	57 310	38 600
Maks. przemieszczenie pionowe/poziome [cm] Max. displacement vertical/horizontal	7,8 / 4,2 (7,8 / 4,1)	2,8 / 0,7 (2,8 / 0,8)
Maks. wyężenie prze- kroju południków [%] Max. effort of ribs section	33	83 (85)

Następnie ponownie dobrano przekrój południków tak, aby nie były przekroczone dopuszczalne ugięcia, podano masę konstrukcji, największe przemieszczenia węzłów i największy stopień wyężenia przekroju południków.

Dodanie równoleżników do kopuły lamella wpłynęło bardzo korzystnie na zmniejszenie masy tej konstrukcji (do 38,6 ton). Kopułę żebrową podpartą w 60 punktach z połączeniami sztywnymi cechowała masa 57,3 tony – mniejsza niż dla analogicznej kopuły żebrowej podpartej w 20 punktach.

KSZTAŁTY ZDEFORMOWANYCH KONSTRUKCJI

Warto zwrócić uwagę na odmienny charakter deformacji konstrukcji dla różnych kopuł, co pokazano na rysunku 6. Dla kopuły żebrowej widać wyraźną różnicę formy odkształcenia przy obciążeniu symetrycznym i asymetrycznym. Dla kopuł Schwedlera i lamella deformacje dla obciążeń symetrycznych i asymetrycznych nie różnią się w sposób tak istotny. W niektórych przypadkach węzły konstrukcji przemieszczają się do góry, co jest widoczne na rysunku 6d dla kopuły lamella.

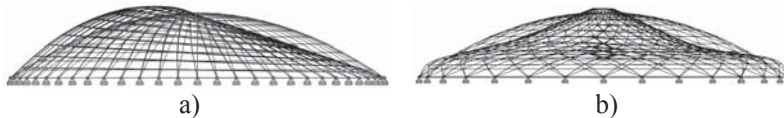


Rys. 6. Odształcenia konstrukcji nośnej kopuły: a – żebrowej (obciążenia symetryczne), b – żebrowej (obciążenia niesymetryczne), c – Schwedlera, d – lamella

Fig. 6. Deformation of a structure: a – ribbed dome (symmetric load), b – ribbed dome (unsymmetric load), c – Schwedler dome, d – lamella dome

Istotny wpływ na kształt deformacji konstrukcji ma zastosowany układ prętów. Kopia Schwedlera posiada krzyżulce, które pełnią funkcję stężeń i zmniejszają odształcenia konstrukcji. Pozbawiona stężeń (krzyżulców) kopia żebrowa charakteryzuje się większymi odształceniami i znaczną zależnością odształceń od symetrii/asymetrii obciążeń.

Wprowadzenie opisanych wcześniej zmian konstrukcyjnych nie zmieniło zasadniczo kształtu deformacji badanych kopuł. Widać to na rysunku 7a (kopia żebrowa przy obciążeniu asymetrycznym) i 7b (kopia lamella z dodanymi równoleżnikami).



Rys. 7. Odształcenia konstrukcji nośnej kopuły: a – żebrowej (60 punktów podparcia, obciążenia niesymetryczne), b – lamella z dodanymi równoleżnikami

Fig. 7. Deformation of a structure: a – ribbed dome (60 supports, unsymmetric load), b – trimmed lamella dome

PODSUMOWANIE

Stwierdzono, że w wielu opisywanych przypadkach o doborze przekrojów prętów (a tym samym i masie konstrukcji) decydował warunek użyteczności. Należy jednak uwzględnić, że norma nie określa dopuszczalnych wartości przemieszczeń węzłów kopuły. Przyjęto je arbitralnie, stosując analogię do wymagań normowych stawianych innym konstrukcjom o podobnym charakterze.

Mniejszymi masami charakteryzowały się te konstrukcje, które posiadają elementy pełniące funkcję stężeń. Najkorzystniej pod tym względem wypadły w porównywanym zakresie kopia Schwedlera. Dodanie do kopuły lamella dodatkowych prętów (równoleżników) spowodowało zmniejszenie masy konstrukcji o ponad 35%.

Stwierdzono dużą różnorodność kształtów zdeformowanych konstrukcji. W zależności od rodzaju zadanego obciążenia występują odkształcenia symetryczne, bliskie symetrycznym i asymetryczne. Przemieszczenia pionowe węzłów skierowane są najczęściej do dołu, ale można też zaobserwować przemieszczenia węzłów do góry.

PIŚMIENNICTWO

- Łubiński M., Żółtowski W., 2004. Konstrukcje metalowe. Część II. Obiekty budowlane. Arkady, Warszawa.
- PN-EN 1990 Podstawy projektowania konstrukcji.
- PN-EN 1991-1-3 Oddziaływania na konstrukcje. Oddziaływania ogólne. Oddziaływania śniegu.
- PN-EN 1991-1-4 Oddziaływania na konstrukcje. Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.
- PN-EN 1993-1-1 Projektowanie konstrukcji stalowych. Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- Sałapa P., 2013. Projekt stalowej konstrukcji nośnej hali wystawowej krytej kopułą. Praca dyplomowa. WBIŚ, SGGW, Warszawa.

COMPARISON OF DIFFERENT DESIGNS OF STEEL DOMES

Abstract. Different designs of parabolic steel domes (ribbed dome, Schwedler dome, lamella dome) with the diameter $D = 46$ m and the height $H = 8$ m are compared in this paper. Rigidly – joined and pin – connected systems were used. Dead loads, wind loads and snow loads were included. Rods sections were chosen using results of the computation in the program *Robot* and considering ULS and SLS conditions. It was found that in most cases the mass of a construction was determined by permissible deformation (critical value of the vertical deformation was set as $D/300$ and of the horizontal deformation as $H/150$). The Schwedler dome shovd the smallest mass. The trimmed lamella dome demanded less mass than the lamella dome without rings. The increase of the number of supports in the rigidly – joined ribbed dome decreased slightly the construction mass.

Key words: steel domes, ribbed dome, Schwedler dome, lamella dome

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 25.08.2014