2. Systemy wykonane z pojedynczych prefabrykowanych jednostek połączonych ze sobą, zwane „systemami modułowymi” (*modular systems*).
3. Systemy złożone z elementów ciągłych kratownic zwane „systemami kratowymi” (*lattice grid systems*).

Najczęściej stosowanymi komercyjnymi strukturami przestrzennymi są [211]:
- System Mero,
- System Triodetic,
- System Unibat,
- System Space Deck,
- System Nodus,
- System Unistrut.

Systemy te są wykonane ze standardowych węzłów lub modułów, które mogą być zastosowane jako płaskie konstrukcje przestrzenne, sklepienia kolebkowe lub kopuły. Gdy rozpiętości przekrycia są bardzo duże, często stosuje się niestandardowe konstrukcje przestrzenne, których pręty składają się z kształtowników stalowych walcowanych na gorąco, jako głównych elementów konstrukcyjnych. Zawsze oszczędniej jest minimalizować liczbę połączeń, maksymalizując rozmiar modułu i stosując proste geometrie. Systemy te można z reguły stosować do różnych wysokości konstrukcyjnych, rozmiarów modułów i warunków podparcia.

Obecnie większość komercyjnych przestrzennych systemów konstrukcyjnych składa się z wariacji systemów Mero i Triodetic.

2.2. Systemy struktur przestrzennych i ich montaż

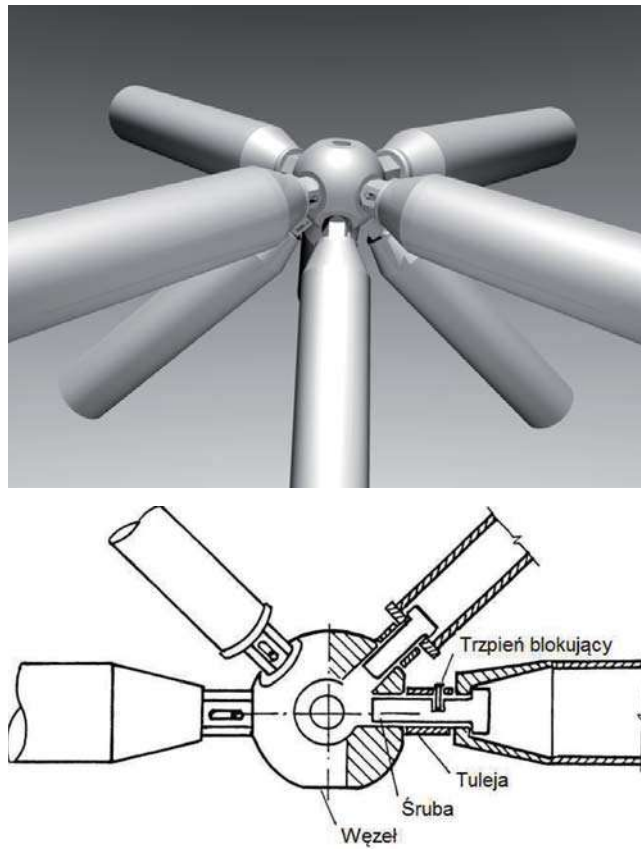
2.2.1. Systemy struktur przestrzennych

Poniżej opisano najczęściej stosowane struktury przestrzenne (patrz [55, 56, 73, 152, 211]).

System Mero

System ten, opracowany w 1942 r., jest najczęściej stosowany na struktury dwuwarstwowe i wielowarstwowe (patrz rys. 2.2). Każdy węzeł może mieć do 18 nagwintowanych otworów. Osiągana rozpiętość to 100 m [165].

W systemie Mero [211] główne komponenty (węzły i pręty rurowe) są produkowane w różnych rozmiarach, które wybiera się na podstawie sił obliczonych na tych elementach. Pręty rurowe Mero mają stożkowe końcówki, które są przyspawane do ich końców i są połączone z kulistymi węzłami za pomocą śrub umieszczonych w środku tulei na końcach prętów rurowych. Węzły wykonane są



Rys. 2.2. Przekrój przez węzeł systemu Mero [152, 165]

z litych, kutych, stalowych kul z gwintowanymi w nich otworami. Śruby i węzły są ocynkowane. Istnieją trzy typy węzłów Mero: standardowe, regularne i specjalne. Standardowy węzeł ma 18 powierzchni o kątach łączenia 45, 60, 90 stopni i ich wielokrotności tych kątów. Węzeł regularny ma 10 powierzchni. Specjalne węzły mają otwory pod dowolnym kątem. Minimalny kąt między dwoma sąsiadującymi otworami wynosi 35 stopni. Wytwarza się węzły o siedmiu różnych średnicach: 2 cale (odległość między dwiema równoległymi ścianami wynosi 1,8 cala dla 18 ścian), 3,3 cala, 4,3 cala, 5,1 cala, 5,9 cala, 7,5 cala i 9,4 cala. Kule mają płaskie powierzchnie wokół nagwintowanych otworów, aby zapewnić lepszy styk tulei pręta rurowego z węzłem.

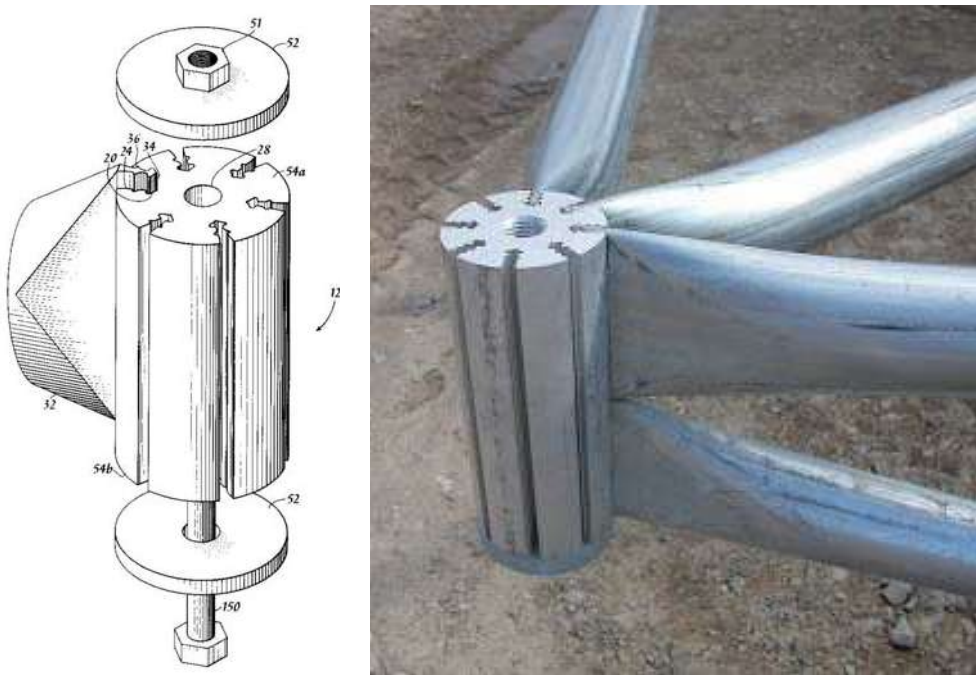
Pręty rurowe mają zakres przenoszenia siły od 20 do 200 kN. Są one dostępne w 8 różnych długościach (1,6 ft, 2,3 ft, 3,3 ft, 4,1 ft, 4,6 ft, 6,6 ft, 8,2 ft i 9,3 ft), mierząc od środka do środka węzłów. Standardowa średnica rury wynosi około 100 mm. Do jej połączenia do węzła używa się wysokowytrzymałych stalowych śrub.

Prosta konstrukcja połączenia systemu Mero ułatwia jej montaż i demontaż. System Mero można montować za pomocą metody wspornikowej, metody podnośnikowej lub kombinacji obu metod. Modułowe rozmiary systemu Mero znacznie upraszczają obsługę, transport i wysyłkę. Elementy są chronione przed korozją przez cynkowanie ogniowe wewnątrz i na zewnątrz.

Komponenty Mero (węzły i pręty) mogą być prefabrykowane z tworzyw sztucznych i być stosowane do konstrukcji o umiarkowanych rozpiętościach. Można również użyć kombinacji elementów stalowych i plastikowych. System Mero zastosowano w ponad pięćdziesięciu krajach – na płaskie struktury, kopuły, sklepienia kolebkowe, złożone płyty, piramidy, maszty, wieże i struktury w postaci paraboloidy hiperbolicznej. Konstrukcje te były wykorzystywane przede wszystkim jako systemy dachowe dla różnych konstrukcji o dużych rozpiętościach. Różne firmy opracowały odmiany systemu Mero, np. japońska adaptacja nosi nazwę TM Truss System.

System Triodetic

Został on opracowany w Kanadzie w 1955 roku. System ten (patrz rys. 2.3) był pierwotnie wykonany z elementów aluminiowych, a w 1966 roku również zastosowano w nim stal. Wykorzystuje się w nim wytłaczane z aluminium cylin-



Rys. 2.3. Węzeł systemu Triodetic [źródło: US patent US 6, 286, 282 B1, [152]]

dryczne piasty ze szczelinami, które pełnią rolę węzłów, a jako elementy pręty rurowe aluminiowe lub stalowe z dopasowanymi zaciśniętymi końcami wkładanymi w węzły. W środku piast znajduje się otwór do umieszczenia śruby przelotowej, aby zabezpieczyć elementy wprowadzone do piasty przed wysunięciem. Śruba ta nie przenosi żadnych sił. Specjalna prasa służy do spłaszczania końcówek elementów, aby pasowały do otworów w piastach (węzłach). Kąty, długości i zakończenia rur są fabrycznie wykonane z dużą precyzją i można je malować. Gwinty na rurach są wykonane bez usuwania materiału, aby nie zmniejszać wytrzymałości rur. Są one wkładane do piast za pomocą miękkiej końcówki ręcznej lub elektrycznego młota. Aby stworzyć lekkie systemy, opracowano aluminiowe piasty i rury, jednak bardziej popularne są aluminiowe piasty z rurami stalowymi. Do węzła może być podłączonych do 12 elementów, pod niemal dowolnym kątem. Dostępnych jest sześć różnych konfiguracji węzła.

Testy przeprowadzone na systemie Triodetic wykazały, że jest on praktyczny i odpowiedni dla większości zastosowań. Nie stwierdzono zmniejszenia wytrzymałości ze względu na korozję aluminiowych łączników. Również testy przeprowadzone na systemie z wykorzystaniem kombinacji rur stalowych i aluminiowych piast nie wykazały problemów elektrolitycznych między tymi dwoma metalami. Zastosowanie ocynkowanych rur zmniejsza ogólne koszty konserwacji.

System ten został wykorzystany w jedno- i dwuwarstwowych siatkach płaskich, do kolebkowych sklepień, kopuł, paraboloidy hiperbolicznej i w swobodnych strukturach przestrzennych. Rozpiętości do 30 m były stosowane do płaskich dwuwarstwowych siatek. System jest najbardziej opłacalny dla kwadratowych lub prostokątnych konstrukcji o stosunku długości do szerokości mniejszym niż 1,5. Moduły siatek przyjmuje się do 2 × 2 m. Główne zalety systemów Triodetic to: (1) względnie niski koszt węzłów z możliwością podłączenia do nich wielu elementów w przestrzeni oraz (2) niskie koszty montażu, ponieważ w większości przypadków elementy Triodetic są lekkie i mogą być montowane na miejscu, a struktura – **w większości przypadków** – już sama jest rusztowaniem. Ponadto (3) montaż systemu wymaga bardzo niewielkich umiejętności, ponieważ mocowania prętów do węzłów są czysto mechaniczne.

System Unibat

System Unibat to system modułowy, który został opracowany we Francji w 1959 roku przez S. Du Chateau. Jest on wykonany z piramidowych jednostek o kwadratowej, trójkątnej lub sześciokątnej podstawie połączonej za pomocą jednej poziomej śruby w każdym górnym rogu. Pręty dolnej siatki struktury połączone są ze sobą za pomocą pojedynczych pionowych śrub. Górną warstwę tego systemu wykonano z kształtowników dwuteowych ze stężeniami z kwadratowych rur, a dolną warstwę – z okrągłych rur.