

Krzysztof Kubicki

## KONSTRUKCJE STALOWE Z RUR WYCINANYCH LASEROWO

### Wprowadzenie

Przy projektowaniu i wznoszeniu obiektów budowlanych musi być spełnionych wiele warunków. Konieczne jest zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości konstrukcji, ograniczenie przemieszczeń do wartości dopuszczalnych czy dopasowanie funkcjonalności budowli do potrzeb użytkownika. W obiektach mieszkalnych i użyteczności publicznej ważną rolę odgrywa także estetyka. W obiektach przemysłowych aspekt ten schodził na plan dalszy, gdyż wymagania technologii i rozwiązania konstrukcyjne wymuszały niejednokrotnie formę nadawaną budowli. Jednak coraz częściej inwestorzy oczekują, aby ich obiekty przemysłowe były nie tylko funkcjonalne, ale zwyczajnie ładne. Estetykę konstrukcji stalowych mogą poprawić elementy z rur. Dodatkowo geometria rur korzystnie wpływa na charakterystykę wytrzymałościową elementów konstrukcji (szczególnie ściskanych słupów czy prętów kratownic) i zmniejsza powierzchnię do zabezpieczenia antykorozyjnego. Konstrukcjami wykonanymi z rur zajmowało się wielu naukowców i projektantów. Powstało mnóstwo publikacji. Tu z uwagi na prezentowane w dalszej części konstrukcje podano przykładowo te, których autorami lub współautorami byli Japończycy, m.in. [1-7]. Także polscy autorzy zajmowali się konstrukcjami rurowymi, m.in. J. Bródka i M. Broniewicz w monografii [8], w rozdziałach książek, np. [9, 10], albo przy omawianiu różnych rodzajów konstrukcji, w których wykorzystuje się przekroje rurowe, np. [11]. Jednak trudności w wykonaniu styków rur, szczególnie o przekroju kołowym, skutecznie ograniczało powszechność stosowania konstrukcji rurowych. Problem pogłębiał się jeszcze w przypadku łączenia rur ze stali różnych gatunków [12]. Dopiero zastosowanie urządzeń laserowych do cięcia rur, szczególnie z głowicą 3D, umożliwiło efektywne wytwarzanie takich konstrukcji.

W artykule przedstawiono przykłady konstrukcji z rur powstałych w Japonii przy wykorzystaniu urządzeń laserowych firmy Yamazaki Mazak Optonics Corp. Podstawowymi maszynami do cięcia rur były: *3D Fabri Gear 150* dla rur o średnicy do  $\phi$  152,4 mm i rur kwadratowych o boku max 152,4 mm oraz *3D Fabri Gear 300* dla rur o maksymalnych wymiarach odpowiednio  $\phi$  267,0 mm

i  $\square$  203,2 mm [12]. Do wykonania przestrzennych elementów złącznych konstrukcji o skomplikowanych kształtach wykorzystuje się maszyny z serii SPACE GEAR, a elementy płaskie wycina się np. na urządzeniach z serii HYPER GEAR czy HYPER TURBO-X.

### 1. Mazak World Technology Center w Minokamo

Firma Yamazaki Mazak Optonics jest producentem urządzeń m.in. do laserowego cięcia i obróbki metali. Centrum technologiczne wzniesiono w Minokamo koło Nagoi dla własnych potrzeb jako obiekt, w który można zgromadzić pod jednym dachem wszystkie typy maszyn do cięcia i obróbki metali (przede wszystkim urządzeń laserowych) i prezentować ich możliwości.

Projekt obiektu stworzyła firma Takenaka. Pierwotnie projekt został opracowany w taki sposób, aby wykorzystać dostępne tradycyjne technologie wykonania konstrukcji. Po sugestjach inwestora i przetestowaniu węzła kratownicy przestrzennej (rys. 1), opracowanego i opatentowanego przez firmę Mazak, przeprojektowano obiekt tak, aby zastosować ten rodzaj węzła oraz inne elementy wycinane laserowo.



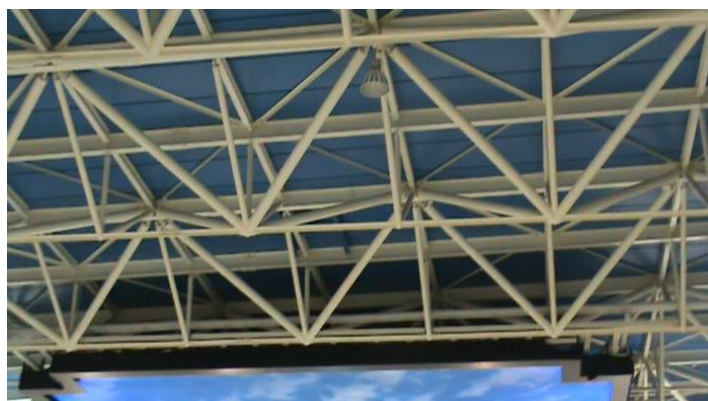
Rys. 1. Węzeł kratownicy przekrycia Mazak World Technology Center, Minokamo (fotografia autora)

Węzeł taki zastosowano po raz pierwszy właśnie w Mazak World Technology Center, którego budowa przebiegała od lata 2005 do wiosny 2006 roku. Przez schodzące się w węźle krzyżulce i słupki, wykonane z rur i połączone między sobą systemem gniazd i wpustów, przenika pas dolny wykonany z zestawu kątowników. W ten sposób węzeł jest tak szczepiony, że stanowi samonośny układ przestrzenny nawet bez spoin.

Wymusiło to konieczność zachowania ścisłego reżimu wymiarowego. Budynek ten o wymiarach 25 x 175 m, wybudowany bez pośrednich podpór, musiał spełnić tolerancję  $\pm 2$  mm dla całego obiektu, co udało się osiągnąć dzięki wręcz niebywalej precyzji cięcia uzyskanej na maszynach laserowych. Na rysunku 2 przedstawiono widok hali z uwidocznionym systemem słupów nośnych, umieszczony na posterze w Mazak World Technology Center w Minokamo, a na rysunku 3 - fragment konstrukcji dachu z podwieszonym olbrzymim ekranem LCD.



Rys. 2. Poster z widokiem Mazak World Technology Center, Minokamo (fotografia autora)



Rys. 3. Fragment konstrukcji dachu Mazak World Technology Center, Minokamo (fotografia autora)

Przestrzenne więzary kratowe rozpiętości 25 m spawano na placu budowy i montowano w jednym bloku. W porównaniu do tradycyjnych metod skrócono czas budowy o około 40%. Czas montażu jednego więzara, włączając w to składanie, spawanie, malowanie, transport na miejsce wbudowania i bezpośrednie wbudowanie, wyniósł przeciętnie pięć i pół godziny.

Ciekawym rozwiązaniem są również schody policzkowe, których elementy konstrukcji zostały wykonane na urządzeniach laserowych. Główną belkę nośną stanowi załamana kratownica trójpasowa z rur. Ogólny widok oraz system połączeń ułatwiających montaż i spawanie pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Poster z konstrukcją schodów w Mazak World Technology Center, Minokamo (fotografia autora)

Widok fragmentu konstrukcji schodów zamieszczono na rysunku 5.



Rys. 5. Fragment konstrukcji schodów w Mazak World Technology Center, Minokamo (fotografia autora)

Wykonanie takich konstrukcji metodami tradycyjnymi byłoby niemożliwe (np. kratownice dachowe) lub bardzo żmudne. Przy cięciu laserowym szybkość i dokładność wykonania elementów znacznie skraca czas potrzebny na ich spasowanie i zespawanie, a jakość połączeń i estetyka całej konstrukcji trudna jest do osiągnięcia innymi metodami.

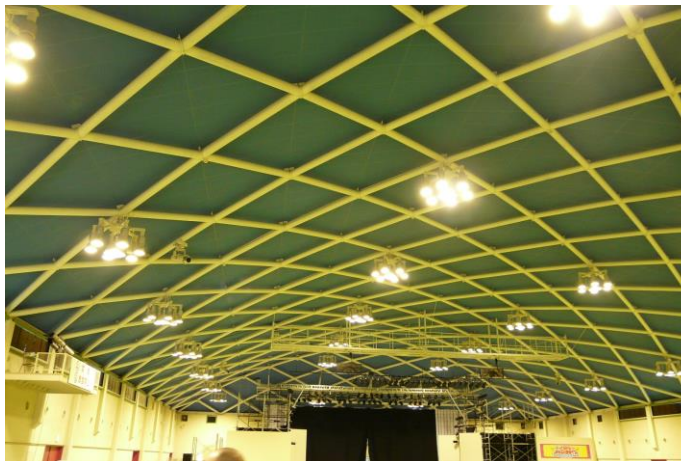
## 2. Nagashima SPA DOME

Obiekt ten (rys. 6), także autorstwa Takenaka Corporation, wykonany został w rekordowo krótkim czasie, między 20.01. a 1.07.2006 r., tj. w niecałe 23,5 tygodnia. Latem w jego wnętrzu znajduje się wielki basen z wodą morską, a poza sezonem w budynku są organizowane wystawy, koncerty i inne imprezy. Obiekt znajduje się na terenie parku rozrywki w miasteczku w prefekturze Mie, niedaleko Nagoi.



Rys. 6. Nagashima SPA Dome (fotografia autora)

Najciekawszą częścią obiektu jest jednowarstwowe przekrycie (rys. 7) wykonane z przecinających się rur tworzących prostą strukturę przestrzenną.



Rys. 7. Przekrycie Nagashima SPA Dome (fotografia autora)

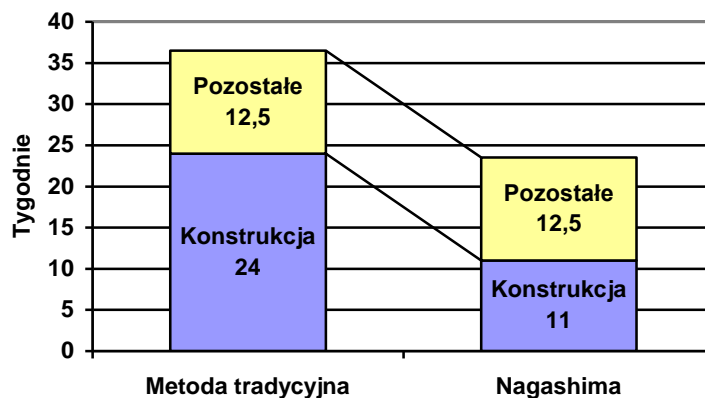
Wymiary przekrycia w rzucie wynoszą 35 x 61,6 m (całkowite gabaryty obiektu 44 x 70,6 m przy maksymalnej wysokości 10,9 m). Rury były docinane laserowo

i łączone w specjalnie zaprojektowanych węzłach przez spawanie. Zastosowanie w węzłach systemu wycięć i klinów umożliwiło precyzyjne scalanie konstrukcji, przy zachowaniu dużej sztywności na etapie montażu (rys. 8). Dzięki temu wzniesienie konstrukcji w swej prostocie przypominało budowę z pasujących do siebie klocków. Przyjęcie takiego rozwiązania pozwoliło skrócić czas realizacji o około 35% w stosunku do metod tradycyjnych.

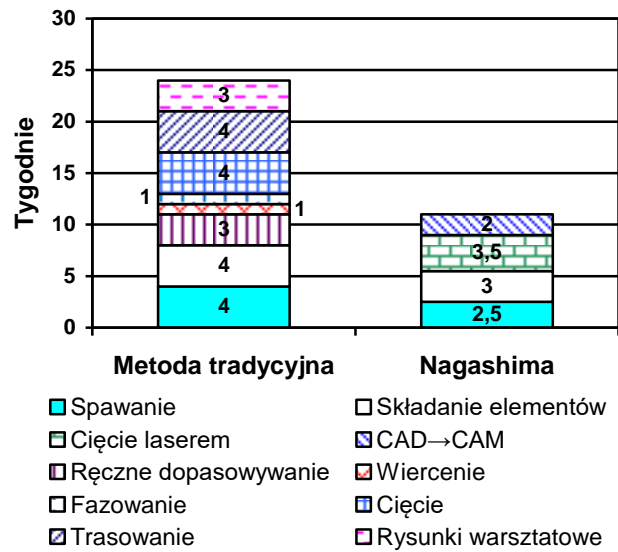


Rys. 8. Węzeł przekrycia Nagashima SPA Dome (fotografia autora)

Porównanie czasu realizacji takiego obiektu oraz czasu operacji wykonania samej konstrukcji metodami tradycyjnymi i zastosowanymi w Nagashima SPA Dome przedstawiono odpowiednio na rysunkach 9 i 10.



Rys. 9. Porównanie czasu budowy metodą tradycyjną i zastosowaną w Nagashima SPA Dome



Rys. 10. Porównanie czasu operacji wykonania konstrukcji metodą tradycyjną i zastosowaną w Nagashima SPA Dome

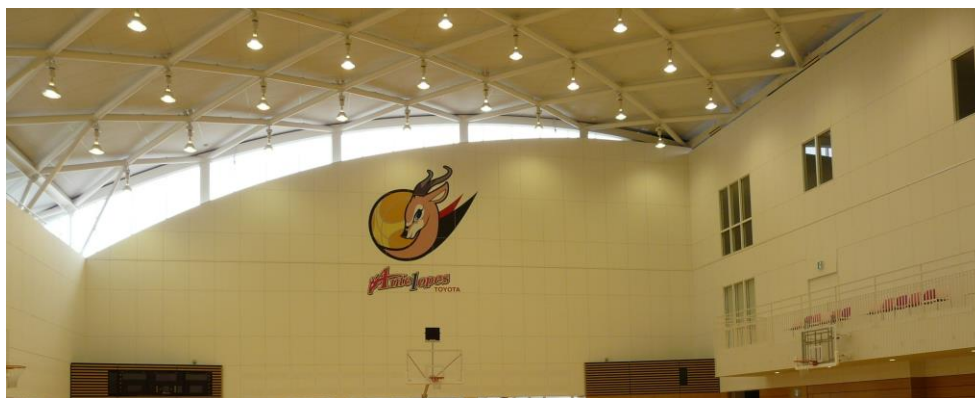
### 3. Sala treningowa Ante1opes w Nagoi

Drużyna koszykarska Ante1opes koncernu Toyota swoje treningi odbywa w hali wybudowanej w Nagoi. Widok zewnętrzny zamieszczono na rysunku 11. Hala mieści pełnowymiarowe boisko do koszykówki bez trybun i część socjalną wzdłuż dłuższego boku budynku.



Rys. 11. Widok hali Ante1opes (fotografia autora)

Podobnie jak w Nagashima SPA Dome, konstrukcję dachu stanowi jednowarstwowa struktura przestrzenna o oczkach kwadratowych zespawana z rur kołowych (rys. 12). Jednak węzły, ukształtowane również laserowo, różnią się nieco.



Rys. 12. Widok hali AnteLopes (fotografia autora)

Zastosowane w węzłach blachy mają tu mniejszą średnicę, a stabilizację na czas montażu zapewniają klamry spinające węzeł od góry (rys. 13). Dzięki temu węzły oglądane ze zwykłej perspektywy (czyli z dołu) są delikatne i nie ujawniają „tajemnicy” ich scalenia. W każdym węźle pośrednim zamontowano lampy oświetleniowe.



Rys. 13. Węzeł hali AnteLopes (fotografia autora)

#### 4. Phoenix Laboratory, Minokamo

Ostatni obiekt został przedstawiony jako ciekawostka. W 2008 roku Mazak zbudował podziemną fabrykę Phoenix Laboratory w Minokamo w pobliżu Nagoi, przeznaczoną do montażu urządzeń obróbki laserowej. Również tutaj wykorzystano urządzenia laserowe do wytworzenia elementów, chociaż sama konstrukcja jest rozwiązaniem tradycyjnym. Przekrycie stanowią masywne kratownice wykonane



z dwuteowników szerokostopowych, na których opierają się belki pośrednie, połączone w połowie rozpiętości zastrzałami rurowymi z dolnymi pasami kratownic (rys. 14).



Rys. 14. Konstrukcja Phoenix Laboratory (fotografia autora)

Całkowita powierzchnia przekracza 10 000 m<sup>2</sup>, a obiekt zagłębiony jest 11 m poniżej powierzchni terenu. Taka lokalizacja umożliwia doskonałą izolację od otoczenia, co pozwala zachować bardzo rygorystyczny reżim jakości powietrza pod względem zawartości cząsteczek pyłu (szczególnie w pomieszczeniach do montażu zwierciadeł laserów), a także temperatury i wilgotności. Przekłada się to na bardzo duże oszczędności energii wydatkowanej na klimatyzację, gdyż przez cały rok utrzymywana jest tam temperatura około 16°C przy stosunkowo małym udziale klimatyzatorów. Gotowe urządzenia laserowe montowane w tej fabryce opuszczają ją za pomocą suwnicy wyjeżdżającej na zewnątrz obiektu przez specjalnie zaprojektowaną śluzę.

Oryginalne wejście do fabryki w postaci szklanej piramidy pokazano na rysunku 15.



Rys. 15. Wejście do Phoenix Laboratory (fotografia autora)

## Podsumowanie

Przedstawione przykłady realizacji konstrukcji, których elementy wykonano przy zastosowaniu techniki laserowej, mogą zainspirować projektantów do poszukiwania nowych rozwiązań węzłów. Ograniczenia wynikające z tradycyjnej technologii wytworzenia i montażu konstrukcji z rur, a także innych profili zostały przewyżnione dzięki laserowym urządzeniom do cięcia, zwłaszcza posiadającym głowicę 3D. Szybkość i dokładność cięcia laserem redukuje znacznie czas potrzebny na cięcie, pasowanie i spawanie elementów prętowych. Dodatkowym zyskiem przy konstrukcjach spawanych w pobliżu miejsca wbudowania jest skrócenie czasu i kosztu transportu, gdyż dostarczane są elementy małogabarytowe lub względnie długie elementy liniowe, niewymagające specjalistycznego sprzętu transportowego.

Zastosowanie maszyn od cięcia laserowego rur otwiera drogę do badań nad nowymi węzłami, w których profile przenikają przez np. rury o większych wymiarach przekroju poprzecznego. Przedmiotem badań może być określenie podatności samych węzłów, wpływu przerwania ciągłości rury w miejscu przenikania czy sposobu wymiarowania spoin w takich połączeniach.

## Literatura

- [1] Kurobane Y., Connections in tubular structures, *Progress in Structural Engineering and Materials* 2002, 4, 35-45.
- [2] Kurobane Y., Ochi K., AWS vs International Design Rules for circular tubular K-connections, *Engineering Structures* 1997, 19, 3, 259-266.
- [3] Wang B., Hu N., Kurobane Y., Makino Y., Lie S.T., Damage criterion and safety assessment approach to tubular joints, *Engineering Structures* 2000, 22, 424-434.
- [4] Sakai Y., Hosaka T., Isoe A., Ichikawa A., Mitsuki K., Experiments on concrete filled and reinforced tubular K-joints of truss girder, *Journal of Constructional Steel Research* 2004, 60, 683-699.
- [5] Zerbst U., Miyata T., The fracture behaviour of a welded tubular joint-an ESIS TC1.3 round robin on failure assessment methods, Part VI: application of WES 2805-1997, *Engineering Fracture Mechanics* 2002, 69, 1161-1169.
- [6] Chen D.H., Ozaki S., Numerical study of axially crushed cylindrical tubes with corrugated surface, *Thin-Walled Structures* 2009, 47, 1387-1396.
- [7] Hayashi T., Kawasaki Y., Yamada H., Kiwa T., Tamazumi M., Tsukada K., Magnetic image detection of the stainless-steel welding part inside a multi-layered tube structure, *NDT&E International* 2009, 42, 308-315.
- [8] Bródka J., Broniewicz M., *Konstrukcje stalowe z rur*, Arkady, Warszawa 2001.
- [9] Bródka J., Łubiński M., *Lekkie konstrukcje stalowe*, Arkady, Warszawa 1978.
- [10] Ferenc K., Ferenc J., *Konstrukcje spawane, Połączenia*, WNT, Warszawa 2008.
- [11] Łubiński M., Żółtowski W., *Konstrukcje metalowe, cz. II, Obiekty budowlane*, Arkady, Warszawa 2004.
- [12] Kysiak A., Pokorska I., Numeryczna symulacja powstawania naprężeń spawalniczych w złączach elementów konstrukcji rurowych wykonanych ze stali stopowych o różnych strukturach, *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej* 1997, nr 151, seria Budownictwo, 7, 41-47.
- [13] Folder: 3D Fabri Gear 150 & 300, 2D/3D Laser Processing Machine, MAZAK.

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono przykłady konstrukcji z rur stalowych wybudowanych w Japonii. Zastosowanie elementów wycinanych laserowo umożliwiło wzniesienie takich konstrukcji. Dodatkowo czas potrzebny do spawania i montażu jest znacznie zredukowany, ponieważ elementy są wycinane z dużą dokładnością.

**Abstract**

In the paper examples of constructions made of steel tubes built in Japan are presented. Application the laser cutting components made possible to build such structures. Additionally, the time required for welding and assembly is reduced significantly, because the components are cut with high accuracy.