



LUCJAN JANAS

Politechnika Rzeszowska  
ljanas@prz.edu.pl

## Kilka uwag na temat obiektów mostowych z drewna klejonego

### Ogólna charakterystyka materiału

Drewno klejone zostało opatentowane już w 1910 r. Rozwój konstrukcji z tego materiału nastąpił jednak dopiero w połowie XX w., po wynalezieniu klejów o odpowiedniej wytrzymałości i trwałości oraz odpornych na działanie czynników atmosferycznych.

W porównaniu do drewna litego, drewno klejone to materiał, który pozwala uzyskać znacznie większe przekroje dźwigarów i większe rozpiętości konstrukcji. Umożliwia łatwe kształtowanie nawet skomplikowanych form architektonicznych. Dzięki odseparowaniu wad, takich jak sęki i pęknięcia, ma większą wytrzymałość w stosunku do drewna litego. Ma dużą wytrzymałość właściwą, to znaczy korzystny stosunek wytrzymałości do masy, przy czym wartość wytrzymałości nie jest wysoka, na zginanie wynosi ok. 20–30 MPa. Kolejną zaletą jest niski współczynnik rozszerzalności termicznej, dzięki czemu w konstrukcjach drewnianych występują mniejsze kłopoty z łożyskami i urządzeniami dyfuzyjnymi. Drewno jest trwałe w warunkach suchych i odporne na agresywne środowisko chemiczne. Regeneracja zasobów następuje w ciągu 80–100-letniego cyklu, więc budowanie z drewna jest postępowaniem jak najbardziej proekologicznym. Zaletą jest także znacznie mniejszy ciężar w porównaniu do innych materiałów konstrukcyjnych. Ta cecha powoduje częstą prefabrykację całych przęseł, ułatwia transport i montaż. Spektakularnym przykładem montażu jest kładka Traversina w Alpach Szwajcarskich, o rozpiętości ok. 40 m i masie ok. 4,3 t, która została ustawiona na podporach przy użyciu śmigłowca.

Drewno klejone ma oczywiście wady. Są to przede wszystkim: budowa anizotropowa, wpływ wilgotności na właściwości drewna, podatność na korozję biologiczną, wady naturalne takie jak sęki, rozwarstwienia. W drewnie występuje też efekt starzenia. Oddziaływanie słońca i deszczu na konstrukcję drewnianą nie pozostaje bez wpływu na jej trwałość, dlatego konieczne jest stosowanie odpowiednich rozwiązań konstrukcyjnych i/lub innych zabezpieczeń minimalizujących te niekorzystne oddziaływania. Drewno klejone jest materiałem palnym, ale ma dużą odporność ogniową, co w uproszczeniu oznacza, że pod wpływem wysokiej temperatury i ognia, stosunkowo wolno traci wytrzymałość.

Nie wszędzie drewno klejone jest najlepszym wyborem. Konstrukcje z tego materiału niezbyt dobrze komponują się z obszarami przemysłowymi, natomiast doskonale z terenami zielonymi, parkami, osiedlami mieszkaniowymi i tam są szczególnie polecane.

### Przykłady

Z drewna klejonego można projektować konstrukcje o praktycznie dowolnych schematach statycznych. Mogą to być belki swobodnie podparte i ciągłe, o osi prostej lub zakrzywionej, konstrukcje ramownicowe i kratownicowe. Duża liczba użytkowanych obecnie obiektów to konstrukcje łukowe, podwieszane i wspornikowe – wiele przykładów można znaleźć np. w pracach [2] i [7]. Jedną z ciekawszych konstrukcji jest kładka o rozpiętości przęsła 73 m w Essing, w Niemczech. Jest to konstrukcja wstęgowa, która w przekroju poprzecznym nie ma elementów stalowych (lin, prętów, kabli sprężających). Drewno ma stosunkowo dużą wytrzymałość na rozciąganie i ta cecha została w pełni w tym obiekcie wykorzystana.

W Polsce pierwsze kładki z drewna klejonego powstały na początku lat 80-tych XX wieku. Są to kładki w Brodnicy nad Drwęcą, użytkowane z powodzeniem do dzisiaj, czyli już przez około 35 lat. Jedną z tych kładek ma schemat statyczny belki swobodnie podpartej o osi zakrzywionej, druga jest ramownicowa. Rozpiętości są znaczne nawet jak na dzisiejsze standardy – w przypadku kładki belkowej jest to 35,8 m (fot. 1a). W latach 2013–2015 zbudowano w Brodnicy dwie kolejne kładki z drewna klejonego – jedną z nich przedstawiono na fot. 1b). Wybór drewna jako materiału konstrukcyjnego dla nowych obiektów potwierdza przydatność tego materiału do budowy kładek oraz świadczy o jego akceptacji przez projektantów i użytkowników.

Mówiąc o współczesnych kładkach z drewna klejonego nie sposób pominąć obiektu na Dunajcu w Sromowcach Niżnych, zaprojektowanego przez prof. J. Biliszczuka wraz z zespołem [1]. Jest to konstrukcja z przęsłem podwieszonym o największej na świecie rozpiętości, równej 90 m (fot. 2).

W przekroju poprzecznym obiekt składa się z dwóch dźwigarów z drewna świerkowego klasy KL32, o wysokości 1,60 m i szerokości 0,3 m. Dźwigary zostały połączone stalowymi półramami i układem stężeń wiatrowych. Przed oddziaływaniem czynników atmosferycznych zostały z obu stron zabezpieczone szalówką z drewna modrzewiowego a od góry drewnianą nakładką. Stalowy pylon jest pochylony pod kątem 75° w kierunku przęsła nurtowego. Całkowita długość kładki wynosi 112 m, a szerokość użytkowa pomostu 2,5 m.

Kładką rekordową jest też kładka na Sanie w Przemyślu, zaprojektowana przez prof. T. Siwowskiego wraz z zespołem i oddana do użytkowania pod koniec 2015 r. [6]. Obiekt ma długość 138 m i jest to obecnie najdłuższa w kraju kładka z drewna klejonego. Konstrukcja jest dwuprzęsłowa, podwieszona do centralnie umieszczonego, pionowego pyło-

Fot. 1. Kładki w Brodnicy: a) zbudowana w latach 80-tych XX w., b) zbudowana w 2015 r. [8]



nu (fot. 3). W przekroju poprzecznym ma dwa dźwigary z drewna klasy GL32c o wysokości 1,55 m i szerokości 0,24 m. Pomost składa się z drewnianych podłużnic i stalowych poprzecznic (fot. 3b). Szerokość użytkowa kładki wynosi 3 m. Zwraca uwagę bardzo mała wysokość konstrukcyjna, która wynosi tylko ok. 20 cm. Na obiekcie nie projektowano balustrad ponieważ dźwigary chronią pieszych do wysokości ok. 1,35 m. Montaż kładki był nietypowy – konstrukcja została scalona na brzegu wzdłuż rzeki, podwieszona do pylonu i obrócona o 90°.

Pomosty na kładkach, nie tylko drewnianych, wykonuje się często z drewna egzotycznego, np. azobe – bongossi, które ma wysoką wytrzymałość i jest trwałe. Na kładce w Przemyślu zrezygnowano z drewna egzotycznego na rzecz kompozytu drewna, tj. materiału wytworzonego z mączki drzewnej, tworzywa polimerowego i dodatków.

Podobnie jak inne konstrukcje, kładka w Przemyślu została przebadana pod obciążeniem statycznym i dynamicznym (fot. 4). Obciążenie i procedura badań były analogiczne jak

w przypadku kładek stalowych czy betonowych, a wyniki wykazały spełnienie wymagań stanów granicznych nośności i użyteczności.

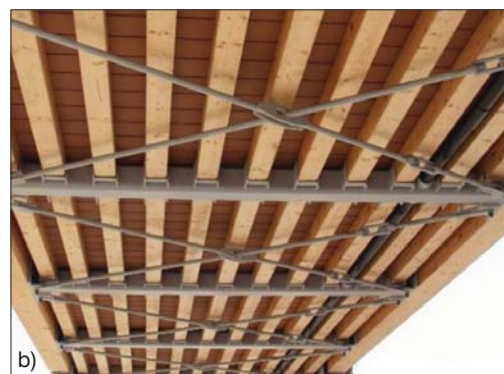
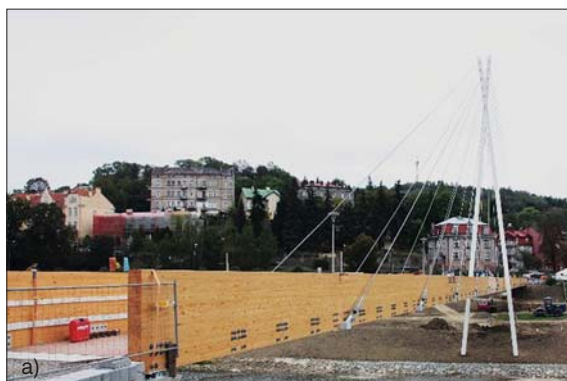
Oprócz kładek dla pieszych, głównie w Skandynawii, zachodniej Europie, USA i Kanadzie, zbudowano wiele mostów drogowych z drewna klejonego. Ciekawym przykładem jest obiekt w miejscowości Flåm, w Norwegii o rozpiętości przęsła równej 40 m. Dźwigary mostu to łuki 3-przegubowe ze ściągiem (fot. 5a), pomost to płyta z bali drewnianych sprężonych poprzecznie, oparta na stalowych poprzecznicach. Zwraca uwagę proporcja szerokości chodnika do szerokości jezdni – fot. 5b).

Mosty drogowie z drewna klejonego to często konstrukcje belkowe, zespolone drewniano-betonowe. Betonowy pomost chroni dźwigary drewniane przed słońcem i deszczem, a elementy wyposażenia, w tym nawierzchnia i balustrady, to standardowe rozwiązania stosowane w mostach stalowych czy betonowych. Rozpiętości przęseł tego typu mostów mieszczą się zwykle w przedziale 15–24 m.

Fot. 2. Kładka nad Dunajcem w Sromowcach Niżnych: a) widok z boku, b) segment przęsła przed montażem (fot. M. Arendarczyk)



Fot. 3. Kładka na Sanie w Przemyślu: a) widok z boku, b) widok od spodu





Fot. 4. Badania odbiorcze kładki w Przemysłu pod obciążeniem dynamicznym: a) przejście grupy 80 osób, b) synchroniczne podskoki

Zespolecie drewna z betonem uzyskuje się dzięki wcięciom (wrębom) w belkach drewnianych i sworzniom, śrubom lub prętom wklejonym w drewno i zagłębionym w płycie żelbetowej. Konstrukcję tego typu badano m.in. w Politechnice Rzeszowskiej. W pierwszej kolejności testowano zespolecie drewna z betonem na małych próbkach (fot. 6a). Analizowano trzy rodzaje połączeń: zspolecie śrubowe bez wcięć (wrębów), zspolecie śrubami i wcięciami trójkątnymi, zspolecie śrubami i wcięciami prostokątnymi. Wyniki badań były podstawą projektu dźwigara, który został wykonany i również przebadany (rys. 6b). Oczywiście zspolecie korzystnie wpływa na nośność – ogólnie można stwierdzić, że dzięki połączeniu dwóch materiałów uzyskano dźwigar zespolony o nośności o ok. 50% większej od nośności dźwigara drewnianego.

Rekordowym mostem z drewna klejonego jest trzyprzęstowy łukowy obiekt, zbudowany w 2001 r. w miejscowości Tynset w Norwegii. Rozpiętość najdłuższego przęsła wynosi 70 m, całkowita długość 125 m, szerokość jezdni 7 m,

a szerokość chodnika 3 m. Ze względu na charakterystyczną konstrukcję przęsła głównego, obiekt z pewnością można uznać za „landmark” [7].

## Projektowanie

Obiekty mostowe wykonane z drewna klejonego można obecnie projektować wg Eurokodu 5, który składa się z części ogólnej [3], części dotyczącej projektowania z uwagi na warunki pożarowe [4] i części dotyczącej mostów [5]. W części dotyczącej mostów [5] nie powołano się na część pożarową [4] a w części pożarowej [4] zaznaczono, że dotyczy ona projektowania budynków. Można zatem pominąć sprawdzenie warunków pożarowych przy w projektowaniu obiektów mostowych z drewna.

Część dotycząca mostów [5] jest uzupełnieniem części ogólnej [3]. W części [5] nie znajdziemy właściwości wytrzymałościowych i sprężystych drewna ani zasad sprawdzenia



Fot. 5. Most łukowy w miejscowości Flåm, w Norwegii: a) widok z boku, b) widok dojazdu do mostu (fot. D. Rewers)



Fot. 6. Badanie: a) zespolenia drewna z betonem, b) belki zespolonej drewno-betonowej

Fot. 7. Przykłady zabezpieczenia dźwi-garów drewnianych przed działaniem czynników atmosferycznych: a) szalówką i blachą miedzianą (most w m. Flâm, fot. D. Rewers), b) blachą nierdzewną (kładka w Brodnicy, fot. C. Oracz)



podstawowych stanów granicznych. Obowiązuje zasada cyt. *jeżeli nie zaznaczono tego specjalnie to ma zastosowanie norma 1995-1-1*, czyli część ogólna [3]. Sięgając do normy [3] znajdziemy odpowiednie odwołania do części z parametrami drewna oraz zasad wymiarowania konstrukcji i połączeń. Swego rodzaju ciekawostką jest fakt, że w normie dotyczącej mostów z drewna klejonego [5], w rozdziale poświęconym właściwościom materiałowym znajdziemy tylko jedno zdanie: *„Stale sprężające powinny być zgodne z... To nie jest pomyłka – stal sprężająca może służyć np. do sprężania drewnianych płyt pomostu.*

W części mostowej [5] zwrócono uwagę na konieczność takiego projektowania, aby zapewnić trwałość konstrukcji drewnianej. Efekt starzenia norma zaleca zmniejszać przez stosowanie drewna z wystarczającą naturalną trwałością. Mogą być też stosowane zabiegi ochrony konstrukcyjnej, np. szalówka, osłony z blach (fot. 7), zadaszenie, pomosty betonowe. Oczywiście wskazane jest stosowanie impregnacji. Trwałość można też zwiększyć m.in. przez stosowanie odpowiednich pochyleń, przyjęcie odpowiednio dużej odległości od gruntu, dobranie geometrii tak, aby była zapewniona naturalna wentylacja.

Wymiarowanie mostów drewnianych w stanach granicznych nośności i użyteczności jest standardowe, przy czym w części mostowej pojawia się wymaganie sprawdzenia na zmęczenie i sprawdzenia drgań. Sprawdzenie na zmęczenie możemy pominąć w przypadku projektowania kładek dla pieszych. W przypadku mostów należy zastosować odpowiednią procedurę podaną w załączniku A do normy [5]. Warto zwrócić uwagę na współczynnik  $t_L$  podany w tej normie, który oznacza obliczeniowy okres eksploatacji konstrukcji z drewna klejonego. Eurokod [5] sugeruje przyjęć  $t_L = 100$  lat.

W stanach granicznych użyteczności należy oczywiście sprawdzić ugięcia. Sprawdzenie to odbywa się na ogólnie znanych zasadach, a zalecane graniczne ugięcie od obciążenia ruchomego ustalono na poziomie 1/400 rozpiętości w przypadku obciążeń kołowych i 1/200 w przypadku obciążenia pieszymi.

Nowym wymaganiem jest konieczność sprawdzenia przyspieszeń drgań kładek. W Eurokodzie [5] podano stosunkowo proste wzory, z których te przyspieszenia możemy wyznaczyć. Obliczone wartości zależą od liczby osób na kładce, masy kładki i współczynnika tłumienia, który

proponuje się przyjąć 0,01 lub 0,015. Osoby, które zajmują się problematyką drgań mostów z pewnością uznają te wzory za zbyt uproszczone, niemniej jednak w obliczeniach inżynierskich można je stosować.

## Podsumowanie

Dotychczasowe doświadczenia pozwalają stwierdzić, że dobrze zaprojektowane konstrukcje mostowe z drewna klejonego nie różnią się od konstrukcji wykonanych z innych materiałów pod względem nośności, funkcjonalności, komfortu użytkowania, bezpieczeństwa oraz trwałości. Konstrukcje te mogą być atrakcyjne z punktu widzenia kosztów budowy i estetyki. Potwierdzeniem przydatności drewna klejonego do budowy kładek są nie tylko liczne obiekty zbudowane zagranicą, ale także obiekty w Brodnicy, gdzie po kilkudziesięciu latach użytkowania dwóch konstrukcji, zdecydowano zbudować dwie koleje, również z tego materiału.

Zachętą do projektowania kładek i mostów drewnianych jest system norm europejskich, który obecnie umożliwia stosunkowo łatwe i kompleksowe projektowanie tego typu konstrukcji. Ważne jest aby pamiętać nie tylko o spełnieniu stanów granicznych nośności i użyteczności ale również o zapewnieniu trwałości, w tym przede wszystkim o ochronie konstrukcji przed niekorzystnym oddziaływaniem czynników atmosferycznych.

## Bibliografia

- [1] Biliszczuk J., Hawryszków P., Węgrzyniak M., Maury A., Sułkowski M.: „Podwieszona kładka dla pieszych z drewna klejonego w Sromowcach Niżnych”. Inżynieria i Budownictwo, nr 1-2/2008,
- [2] Mettem Ch.: Timber Bridges, Trada 2011.
- [3] PN-EN 1995-1-1:2010 Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych – Część 1-1: Postanowienia ogólne – Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków
- [4] PN-EN 1995-1-2:2010 Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych – Część 1-2: Postanowienia ogólne – Projektowanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe
- [5] PN-EN 1995-2:2007 Eurokod 5: Projektowanie konstrukcji drewnianych – Część 2: Mosty
- [6] Siwowski T.: Współczesne mosty podkarpacia. Drogownictwo nr 3/2016, s. 75-82
- [7] Zobel H., Alkhaftaji T.: Mosty drewniane. WKŁ Warszawa 2008
- [8] www.holzbau.pl/realizacje