

dr hab. inż. Grażyna Łagoda, prof. PW¹⁾
dr hab. inż. Marek Łagoda, prof. IBDiM²⁾*

Zastosowanie szkła w budownictwie infrastrukturalnym

DOI: 10.15199/33.2015.07.22

Historia mostów ze szkła zaczęła się od konstrukcji, w których szkło pełniło wyłącznie funkcje dekoracyjne. Następnie pojawiły się szklane schody, pomosty, zadaszenia (fotografia 1), potem elementy nośne ze szkła i stali oraz całe konstrukcje kładek.

Szkło w konstrukcjach mostowych zaczęło stosować głównie ze względów estetycznych. Oświetlone czy zabarwione wywołuje pozytywne wrażenia. Szklane tafle jako elementy pomostu oraz balustrad kładek, najczęściej stosowane są we współpracy z elementami stalowymi typu pręty, które przenoszą siły rozciągające, a szklane tafle siły ścisające. Element nośny składa się zazwyczaj z tafli szkła laminowanego, zbrojenia z okrągłych prętów stalowych oraz łączników zapewniających połączenie stalowych prętów ze szklanymi tafelami i poszczególnych tafli ze sobą. Łączniki umożliwiają odpowiednie rozłożenie nacisku i w efekcie konstrukcja jest dość giętka pomimo kruchości szkła. Tafle szklane z prętami stalowymi mogą pracować jak tarcze i płyty. Obecnie pomimo wysokiej ceny jednostkowej i trudności realizacyjnych szkło budzi coraz większe zainteresowanie.

Przykłady konstrukcji

Przykłady konstrukcji mostowych, wybudowanych w XX i XXI w., w których zastosowano szkło konstrukcyjne oraz dekoracyjne, pokazano na fotografiach 2 i 3. **Ponte della Costituzione** (fotografia 2), jak nazwano czwartą przeprawę przez kanał Grande, otwarto na początku XX w., gdy Włochy świętowały 60. rocznicę uchwalenia konstytucji. Część płyt pomostu wykonano ze szklanych tafli oraz z płyt szarego trachitu z Montemerlo, często stosowanego w tamtejszych budynkach. Aby nie przesłaniać widoków na miasto, balustrady również wykonano ze szkła. Wewnątrz poręczy umieszczono diody, które tworzą nocą niezwykłą iluminację. Podczas opadów zmoczone płyty szklane stają się jednak śliskie i niezbyt bezpieczne. Obiekt nie jest dostatecznie przystosowany również dla osób niepełnosprawnych.

¹⁾ Politechnika Warszawska
²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów
*) Autor do korespondencji:
e-mail: m.lagoda@ibdim.edu.pl



Fot. 1. Most Pokoju w Tbilisi (Gruzja) z zadaszeniem ze szkła i stali [7]



Fot. 2. Ponte della Costituzione – kładka nad kanałem Grande w Wenecji [7]



Fot. 3. Fragment konstrukcji przeszła kładki w Wenecji [Fot. T. Zylski – „Focus” www.wp.pl]

Szkło jest bardzo często stosowane do budowy łączników między dwoma budynkami nad ruchliwymi ulicami w centrach zatłoczonych miast, np. w Paryżu, w Waszyngtonie, w Schwäbisch Hall czy Karlsruhe. Pozwala na uzyskanie bardzo wyrafinowanych konstrukcji, harmonizujących ze środowiskiem. W zależności od otoczenia mogą one przybierać formę dość skomplikowaną (Paryż) lub niemal ascetyczną (Schwäbisch Hall i Waszyngton), czy futurystyczną (Karlsruhe).

Szklane elementy stosowane są także w części konstrukcji pomostu. Na fotografii 4 przedstawiono most w Dublinie zaprojektowany przez hiszpańskiego architekta Calatravę. Szklane konstrukcje powstają także nad znanymi kanionami czy urwiskami. W celu podkreślenia niezwykłego wrażenia obiekty mają przezroczyste pomosty. Podłogę i balustrady pomostu widokowego



Fot. 4. Most w Dublinie wg projektu Calatravy [7]

nad Wielkim Kanionem w USA wykonano z matowego szkła, osadzonego w metalowych ramach (fotografia 5). W środkowej części Chin w prefekturze Zhangjiajie wzniesiono wzdłuż stromej ściany klifu szklaną kładkę na wysokości 1430 m, z pomostem z 6-centrymetrowej fałi przezroczystego szkła (fotografia 6).

Hitem wśród obiektów mostowych jest szklana kładka w prowincji Hunan (fotografia 7). Spektakularna konstrukcja długości 300 m, zawieszona 180 m nad ziemią, łączy dwa skaliste szczyty. Nie tylko wysokość wywołuje dreszcz emocji. Obiekt jest szkla-



Fot. 5. Grand Canyon Skywalk – pomost widokowy [7]



Fot. 6. Kładka w górach Tianmen w Zhangjiajie [7]



[Fot. Imaginethina]

Fot. 7. Szklany most w prowincji Hunan budzący strach i wyzwający adrenalinę

ny, więc gdy spojrzymy w dół, pod stopami jest przepaść. Ponadto konstrukcja nie jest stabilna podczas wiatrów i mocno się kołysze. W okolicy czuwa specjalna ekipa, pomagająca przedostać się na drugą stronę osobom, które paraliżuje strach.

Wyrafinowane rozwiązania można spotkać również w Europie. Nad słynnym londyńskim mostem Tower Bridge zawieszono na wysokości 42 m nad poziomem wody **kładkę dla pieszych**. Przebiega ona wzdłuż górnych przęseł, łączących dwie wieże mostu ruchomego. W pomoście zastosowano 6 płyt o masie 530 kg, z hartowanego szkła składającego się z 5 warstw szkła klejonego. Płyty mają długość 11 m, szerokość 1,8 m i grubość 68 mm (fotografia 8).



[Fot. P. Gordon]

Fot. 8. Kładka nad Tower Bridge w Londynie

Właściwości szkła

Szkło jako materiał budowlany charakteryzuje się wieloma zaletami [1, 2, 6], z których najważniejsze to: odporność na działanie czynników atmosferycznych oraz chemicznych; nieprzepuszczalność gazów; gładkość; twardość; stosunkowo mała ścieralność; bardzo duża wytrzymałość na ściskanie; odporność pożarowa; przezroczystość oraz zdolność przepuszczania światła; łatwość formowania [3].

Szkło ma jednak również wady, do których można zaliczyć: kruchość, jeżeli nie było poddane odpowiedniej obróbce; podatność na uderzenia; rozpryskliwość; wrażliwość na szybkie zmiany temperatury.

Wytrzymałość na ściskanie szkła jest bardzo duża i wynosi 300 ÷ 1000 MPa. Pod tym względem swoimi parametrami bardzo przypomina betony bardzo wysokowytrzy-

małe (BBWW). W praktyce jednak mikrowady i wady makroskopowe powierzchni szkła, powstające w czasie jego użytkowania, znacznie zmniejszają jego wytrzymałość. Naprężenia w ściskanym szkłe zwykle nie przekraczają 30 ÷ 100 MPa. **Wytrzymałość na rozciąganie** jest o wiele mniejsza i wynosi 30 ÷ 70 MPa. W znacznym stopniu zależy od rodzaju szkła, jego kształtu oraz liczby karbów technologicznych. Z tego powodu współczynniki bezpieczeństwa stosowane w obliczeniach wytrzymałości na rozciąganie są duże. **Wytrzymałość na zginanie** szkła zwykłego to 30 ÷ 60 MPa, a hartowanego 120 ÷ 150 MPa. Przykładowo, tafla szklana grubości 6 mm może bezpiecznie przenieść obciążenia przy ugięciu 30 mm i 1 m rozpiętości. **Współczynnik sprężystości** szkła jest bardzo duży i zależy przede wszystkim od jego składu chemicznego (wartości graniczne to 50 i 80 GPa). Ważną cechą jest zmniejszanie się sprężystości wraz ze wzrostem temperatury. **Współczynnik przewodności cieplnej** szkła zwykłego wynosi $\lambda = 1,0 \div 1,16 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, a szkła warstwowego ok. $0,5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. **Rozszerzalność cieplna**, wyrażana współczynnikiem rozszerzalności liniowej α_T , oznacza wydłużenie krawędzi elementu szklanego długości 1 m przy wzroście temperatury o 1 °K. Zazwyczaj α_T podawana jest w temperaturze 20 – 300 °C. Rozszerzalność szkła zwykłego $\alpha_T = 9 \div 10 \cdot 10^{-6}/\text{K}$, a kwarcowego $\alpha_T = 0,5 \cdot 10^{-6}/\text{K}$. Rozszerzalność szkła wynosi ok. 1 mm na długości 1 m przy różnicy temperatury 100 °C. Jest więc 1,4 razy większa niż stali i 2,5 razy większa niż aluminium [5].

Twardość, jak na materiały budowlane, jest bardzo duża, co przekłada się na dużą odporność na zarysowanie i ścieralność. Mikrotwardość szkła wynosi 4 ÷ 12 GPa, twardość wg skali Mohsa 6 ÷ 7. **Kruchość** (odporność na uderzenia) stanowi największą wadę szkła. Zależy od składu chemicznego, stanu powierzchni, temperatury, szybkości obciążania, naprężeń wewnętrznych oraz niejednorodności. **Odporność szkła na uderzenia zwiększa się przez jego hartowanie**, natomiast wytrzymałość przez zwiększenie grubości warstwy [5].

Ciepło właściwe szkła wynosi 0,72 ÷ 0,79 kJ/(kg·°K). **Odporność na zmianę temperatury** jest zdolnością szkła do przenoszenia naprężeń pochodzących od nagłych zmian temperatury bez oznak zniszczenia. Jednostronne szybkie ogrzanie szkła powoduje jego pęknięcie, co dowodzi małej odporności na zmianę temperatury. Pęknięcie szkła płaskiego zwykłego następuje już przy różnicy temperatury ok. 70 °K, szkła boro-

-krzemowego przy różnicy 200 °K, a szkła kwarcowego 800 °K. Zdecydowanie lepsze jest nagłe ogrzanie niż szybkie oziębienie szkła. Hartowanie (także zbrojenie) zwiększa 2 ÷ 4 razy jego odporność na zmianę temperatury.

Odporność hydrolytyczna szkła, czyli odporność **na działanie wody** zarówno w postaci ciekłej, jak i gazowej, jest bardzo duża. Długotrwałe działanie wody powoduje mętnienie szkła w wyniku tworzenia się ługu sodowego. Większa ilość wody spowoduje produkty reakcji i jej efektów praktycznie nie widać. Ze względu na odporność hydrolytyczną szkło dzielimy na 5 klas. Szkło budowlane powinno mieć przynajmniej III klasę odporności hydrolytycznej.

Szkło jest w zasadzie odporne na działanie kwasów. Wyjątkiem jest kwas fluorowodorowy (HF), który rozkłada je już w temperaturze pokojowej oraz kwas fosforowy, rozpuszczający szkło w 100 °C. Odporność szkła na działanie ługów jest o wiele mniejsza niż odporność hydrolytyczna. Zasady rozpuszczają obecną w szkłe krzemionkę, tworząc krzemiany, zmieniając powierzchnię w bardziej chropowatą i mniej przezroczystą. Wyróżnia się trzy klasy odporności ługowej szkła.

Podsumowanie

Rozwój materiałów konstrukcyjnych i innowacyjnych technologii budowy konstrukcji inżynierskich wywiera istotny wpływ na architekturę nowo wznoszonych obiektów mostowych. Szkło jest bardzo intrygującym materiałem budowlanym, pozwalającym na kształtowanie ciekawych konstrukcji i estetycznych elementów wyposażenia. Stosowanie go w praktyce wymaga jednak rozpoznania wielu zjawisk i opracowania technologii pozwalających na uzyskanie niezawodnego i trwałego materiału oraz kształtowanie konstrukcji zgodnie z nowoczesnymi trendami.

Literatura

- [1] Haldimann M., Luible A., Overend M.: Structural Use of Glass. IABSE (Doc. 10) May 2008.
- [2] Klindt L. B., Klein W.: Szkło jako materiał budowlany. Arkady, Warszawa 1982.
- [3] Praca zbiorowa. Aleksander Dobrzański i inni. Technologia Szkła. Arkady, Warszawa 1972.
- [4] Siwiński P., Meller M.: Szkło budowlane. Politechnika Koszalińska, Koszalin 2002.
- [5] PN-EN ISO 12543 Szkło w budownictwie – Szkło warstwowe i bezpieczne szkło warstwowe.
- [6] Osiecka E.: Materiały budowlane. Kamień, ceramika, szkło. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010.
- [7] Grażyna i Marek Łagodowie: Piękno Mostów/Beauty of Bridges. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa. 2014

Przyjęto do druku: 19.05.2015 r.