

ZAGROŻENIE AWARIĄ ZADASZENIA Z DREWNA KLEJONEGO WARSTWOWO NAD OBIEKTEM REKREACYJNYM

JANUSZ BROL, e-mail: Janusz.Brol@polsl.pl
Katedra Inżynierii Budowlanej, Politechnika Śląska

ANDRZEJ AJDUKIEWICZ

Streszczenie: W artykule przedstawiono przyczyny projektowo-realizacyjne zagrożenia bezpieczeństwa konstrukcji zadaszenia obiektu rekreacyjnego wykonanej z drewna klejonego warstwowo, wynikające z niewłaściwego podejścia obliczeniowego i konstrukcyjnego oraz zmian założeń projektowych. Specyfika projektowania konstrukcji drewnianych różni się od projektowania konstrukcji żelbetowych lub stalowych w aspekcie materiałowym o czym często zapominają projektanci.

Słowa kluczowe: konstrukcje drewniane, drewno klejone, belki drewniane

1. Ogólny opis obiektu

Przedmiotem tego artykułu jest wykonane w 2004 roku drewniane przekrycie wiaty wspartej na żelbetowej konstrukcji, połączonej z trybunami i budynkiem zaplecza sanitarnego z szatniami. Konstrukcja o wymiarach ok. 35×62 m, pełni rolę zadaszenia powierzchni rekreacyjno-sportowej i jest wykonana z drewna klejonego warstwowo. W okresach letnich zlokalizowane są pod nią korty tenisowe, a w okresie zimowym lodowisko.

Główną drewnianą konstrukcję nośną obiektu stanowi jedenaście dźwigarów krzywoliniowych – w kształcie zbliżonym do litery S, płasko ułożonej w płaszczyźnie pionowej. Widok konstrukcji pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Widok konstrukcji zadaszenia lodowiska miejskiego

Przekrój dźwigarów jest stały na długości i wynosi $0,20 \times 2,0$ m. Rozpiętość między podpórami dźwigarów z drewna klejonego warstwowo wynosi ok. 33,5 m w rzucie, natomiast rozstaw dźwigarów wynosi 6,0 m. Dźwigary w części dolnej wsparto na stalowych wspornikach osadzonych w słupach żelbetowych, sztywno połączonych ze stopami fundamentowymi. W górnej części dźwigary wsparto za pośrednictwem stalowych marek na łukowych żelbetowych wspornikach ram widowni. W górnych markach wykonano otwory podłużne zapewniające możliwość

przemieszczenia równoległego do osi dźwigara. W związku z powyższym dźwigar zaprojektowano jako belkę o osi krzywoliniowej, w schemacie statycznym belki wolnopodpartej.

Pokrycie wiaty wykonano jako bitumiczne na pełnym deskowaniu (gr. 25 mm). Desko-
wanie ułożone jest na krokwiach wykonanych z drewna klejonego warstwowo o przekroju $0,08 \times 0,12$ m, w rozstawie co 1,0 m. Krokwie ułożone są równoległe do dźwigarów głównych i oparte na płatwiach wykonanych z drewna klejonego warstwowo o przekroju $0,12 \times 0,28$ m na środkowym odcinku prostoliniowym dźwigara oraz o przekrojach; $0,14 \times 0,28$ m; $0,16 \times 0,28$ m; $0,20 \times 0,28$ m; $0,24 \times 0,28$ m w obrębie fragmentów krzywoliniowych dźwigara. Rozstaw płatwi wynosi 2,5 m. Płatwie mocowane są za pośrednictwem zewnętrznych blach stalowych do pobocznic dźwigarów głównych.

Całość konstrukcji drewnianej stężono w górnej części dźwigarów, bezpośrednio pod płatwiami, prętami stalowymi $\phi 20$ mm, z wykorzystaniem płatwi drewnianych jako tężników. Stężenia pościowe wykonano w dwóch środkowych polach (rys. 2) oraz w polach skrajnych. Wzdłuż wiaty wykonano cztery tężniki z drewna klejonego (typu K) w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni dachu i dźwigarów, w rozstawie co 7,5 m (widoczne na rys. 1 i 2). Również wzdłuż wiaty pomiędzy skrajnymi płatwiami wykonano stężenia pościowe z wykorzystaniem prętów stalowych $\phi 20$ mm (rys. 2), na całej długości zadaszenia.



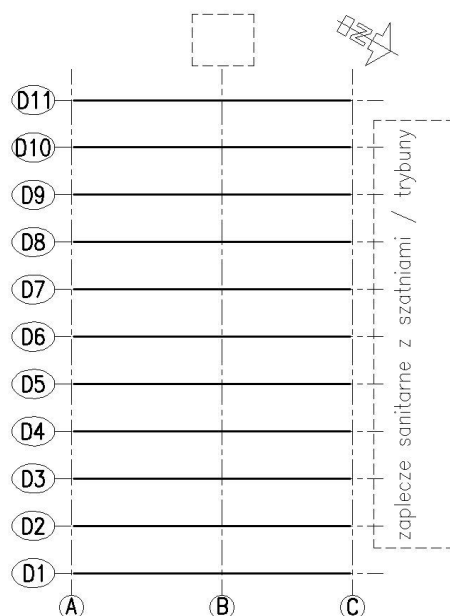
Rys. 2. Widok stężeń konstrukcji dachu

2. Stan techniczny drewnianej konstrukcji

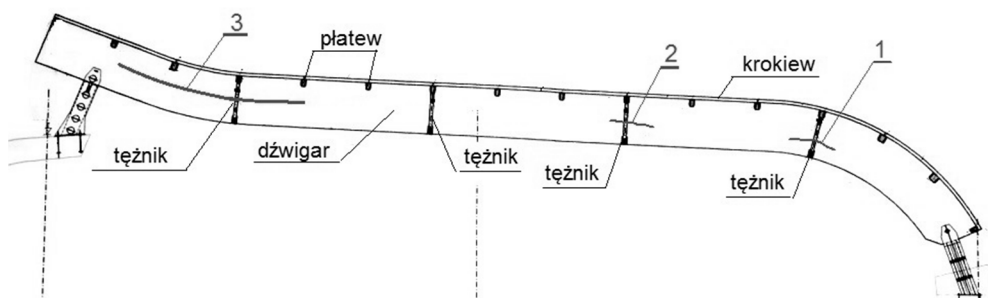
Jesienią 2014 roku dokonano przeglądu konstrukcji drewnianej. Przegląd został wykonany z wykorzystaniem podnośnika samochodowego i obejmował ocenę stanu technicznego dźwigarów, płatwi i krokwi oraz dolnej powierzchni deskowania (pokrycia dachu), łącznie z stanem technicznym stalowych łączników łączących płatwie z dźwigarami i stężeniami dachowymi. Powodem wykonanego przeglądu było zaobserwowane pęknięcie wzdłuż włókien występujące na pobocznic „A” dźwigara nr 5 (rys. 3), w trakcie oczyszczania konstrukcji z ptasich gniazd. Natomiast w trakcie przeglądu całej konstrukcji zaobserwowano na powierzchni pobocznic dźwigarów występowanie kolejnych pęknięć podłużnych. Lokalizację widocznych dominujących pęknięć pokazano na rysunku 4. Obserwację pęknięć utrudniała podwyższona wilgotność drewna jesienną porą z uwagi na dużą wilgotność otoczenia.

Dla ułatwienia orientacji dźwigary ponumerowano (rys. 3), oraz wprowadzono oznaczenie pobocznic: „A” – od strony dźwigara o numerze mniejszym i „B” – od strony dźwigara o numerze większym. Najczęściej obserwowano rysy występujące w sąsiedztwie podpory górnej i łuku

górnego na pobocznicę „B” dźwigarów D1, D2, D4, D5, D6, D7, D8, D10 (na rys. 4 oznaczone nr 3). Rysy te występują na pobocznicę „B”, w okolicach połowy wysokości dźwigarów. W dźwigarze nr D5 zaobserwowano również rysę podłużną w górnej części dźwigara, w bezpośrednim sąsiedztwie łuku górnego i tężnika podłużnego. Zaobserwowano również pęknięcia w miejscu zmiany prostoliniowości dźwigara w łuk dolny. Pęknięcia te zaobserwowano w dźwigarach nr D3, D7 i D8 na pobocznicę „B” oraz w D11 na pobocznicę „A”.



Rys. 3. Numeracja dźwigarów przyjęta w opracowaniu i usytuowanie względem stron świata

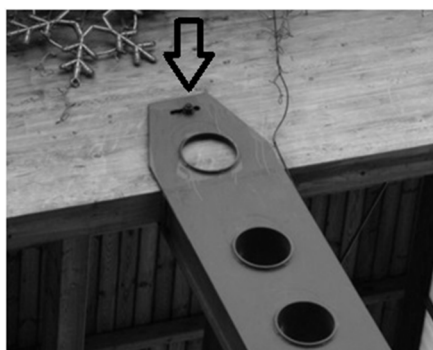


Rys. 4. Widok przykładowych pęknięć podłużnych i ich lokalizacja

Oprócz występujących pęknięć podłużnych, z daleka zauważalne było występowanie przebarwień powierzchni drewna (rys. 5), wskutek porażenia przez grzyba pleśniowego, na prawej całej powierzchni elementów drewnianych. Świadczy to o występowaniu wilgotności drewna powyżej 20%. Wilgotność jest jednym z podstawowych czynników określających warunki pracy drewna i jego wytrzymałość, decydujących o jego trwałości. Wilgotność powyżej 80% to tzw. wilgotny stan ochronny drewna, a wilgotność poniżej 20% to tzw. suchy stan ochronny drewna. Wilgotność drewna w przedziale od 20 do 80% to optymalne warunki do rozwoju grzybów powodujących zgnilizny [2].



Rys. 5. Widok przebarwień od spodu zadaszenia



Rys. 6. Przesunięcie dźwigarów skrajnych (w osi D1) na podporze górnej (widok od strony pobocznicy A)



Rys. 7. Przesunięcie dźwigarów środkowych na podporze górnej (widok od strony pobocznicy B)

Ponadto w trakcie oględzin stwierdzono co następuje:

- deskowanie, krokiewie i płatwie wykazywały dobry stan techniczny, chociaż na powierzchni elementów widoczne były przebarwienia i występowanie grzyba pleśniowego; wilgotność drewna zmierzona wilgotnościomierzem oporowym z głowicą igłową wynosiła od 23,6 do 28,2%,
- dźwigary główne wykazywały również dobry stan techniczny drewna; zaobserwowano (podobnie jak w pozostałych elementach drewnianych) występowanie na powierzchni przebarwień i obecność zarodników grzyba pleśniowego; wilgotność drewna dźwigarów wynosiła od 23,5 do 28,0%,
- zaobserwowano trwałe przesunięcie dźwigarów na podporze górnej przesuwnej (przy założeniu, że śruby w trakcie montażu były zamontowane w środku długości podłużnego otworu o długości 150 mm); wielkość przesunięć była różna i dla dźwigarów skrajnych wynosiła 10–20 mm (rys. 6), do około 50–60 mm dla dźwigarów w części środkowej, gdzie przesunięcie było największe (rys. 7),
- ponadto na powierzchni dźwigarów zaobserwowano zacieki, spowodowane skraplaniem się pary wodnej na powierzchni dolnej poszycia dachu (w okresie zimowym w obiekcie czynne było lodowisko) oraz powierzchnią korozję stalowych łączników (rys. 8) – co także świadczy o utrzymywaniu się podwyższonej wilgotności konstrukcji w dłuższych okresach czasu.



Rys. 8. Widoczna korozja główek gwoździ oraz powierzchni łącznika stalowego

3. Analiza dokumentacji projektowej

Do analizy dokumentacji projektowej otrzymano:

- projekt budowlany obiektu, wykonany w 2003 roku, który składał się, poza częścią architektoniczną (opis + 6 rysunków) i projektu oświetlenia, z części konstrukcyjnej obejmującej: opis techniczny, obliczenia statyczne i cztery rysunki,
- projekt wykonawczy zadania (z 2004 roku) składający się z: opisu technicznego, zestawienia stali kształtowej, zestawienia elementów drewnianych oraz rysunków (15 sztuk). W rozpatrywanym projekcie nie zamieszczono obliczeń statycznych, pomimo iż wykazano je w spisie treści projektu.

Do obliczeń elementów zadania obiektu z drewna klejonego warstwą, w projekcie budowlanym przyjęto drewno klejone klasy GL35 zgodnie z obowiązującą wtedy normą PN-B-03150:2000 [3], natomiast w opisie technicznym projektu wykonawczego, jak i na rysunkach zastosowane drewno opisano jako KL33 (GL30). Oznaczenie KL33 odnosi się do norm sprzed 2000. roku, natomiast klasa GL30 wskazuje na przyjęcie w projekcie wykonawczym niższej klasy drewna niż przyjęto w projekcie budowlanym (GL35). Potwierdzeniem zastosowania w konstrukcji przekrycia klasy drewna klejonego KL33 (GL30) są deklaracje zgodności zamieszczone w dokumentacji.

Jak już wspomniano wcześniej w analizowanym projekcie wykonawczym nie zamieszczono obliczeń statycznych (pomimo zamiany klasy drewna z GL35 na niższą, klasy GL30). Dlatego do analizy przyjętych w projekcie obciążeń i przeprowadzonych obliczeń statyczno-wytrzymałościowych wykorzystano tylko projekt budowlany.

Analizując obliczenia statyczno-wytrzymałościowe dźwigarów stwierdzono następujące uchybienia w zakresie zestawienia obciążeń:

- nie uwzględniono wszystkich warstw poszycia dachu – brak w zestawieniach warstwy papy termozgrzewalnej ułożonej pod pokryciem z gontów bitumicznych (papy dachówkopodobnej), uznanej za potrzebną z uwagi na niewielki spadek dachu, 3,5 stopnia, chociaż na rysunku przekroju wskazano zastosowanie ciężkiej papy bitumicznej przyklejonej do podłoża, pod gont bitumiczny,
- w zestawieniu obciążeń stałych wyznaczono uśrednioną wartość współczynnika bezpieczeństwa $\gamma_f = 1,17$, wynikającą ze zestawienia obciążeń, natomiast do programu obliczeniowego wprowadzono wartość mniejszą $\gamma_f = 1,10$. Ponadto obciążenie w modelu obliczeniowym

zdefiniowano jako „rzutowane”, a nie po długości elementów – co także skutkuje zmniejszeniem obciążenia w modelu,

- współczynnik jednoczesności obciążeń ψ w obliczeniach obwiedni sił wewnętrznych przyjęty był dwukrotnie, raz ujęto go w przygotowanych zestawieniach obciążeń, drugi raz w tworzeniu kombinacji w programie komputerowym. W przypadku równoczesnego uwzględniania wiatru (jako parcia) i śniegu skutkuje to w obliczeniach realnym współczynnikiem $\psi = 0,9 \times 0,9 = 0,81$.

- w obliczeniach nie uwzględniono możliwości zalegania zwiększonej grubości warstwy śniegu (wystąpienia tzw. worka śnieżnego) w miejscu zwiększenia się kąta pochylenia dachu.

Pomijając rozbieżność między założoną i zastosowaną klasą drewna, w zakresie założeń i obliczeń statyczno-wytrzymałościowych, stwierdzono następujące wady:

- Przyjęto klasę użytkowania 2 – odpowiada ona ustabilizowanej wilgotności w drewnie nieprzekraczającej 20%. Dla konstrukcji zlokalizowanej na wolnym powietrzu należy uwzględnić występowanie podwyższonej wilgotności drewna; jak podano powyżej, w przedmiotowym obiekcie występowała wilgotność drewna w granicach 24% do 28%, co oznacza konieczność przyjęcia klasy użytkowania 3. Za takim przyjęciem klasy przemawia również fakt, stwierdzenia występowania zacieków na konstrukcji spowodowanych skraplaniem się pary na powierzchni dolnej poszycia dachu oraz powierzchniową korozję stalowych łączników – co świadczy o utrzymywaniu się podwyższonej wilgotności w obiekcie, w dłuższych okresach czasu.
- W związku z tymi założeniami w analizowanym projekcie przyjęto $k_{mod} = 0,8$ (jak dla klasy użytkowania 2 i dla klasy trwania obciążenia – średniotrwale – śnieg). Poprawnie należało przyjąć $k_{mod} = 0,7$ (jak dla 3 klasy użytkowania i dla klasy trwania obciążenia – krótkotrwale – wiatr).
- Pomimo zamodelowania konstrukcji dźwigarów jako krzywoliniowej – nie uwzględniono w obliczeniach wytrzymałościowych, krzywoliniowego jej charakteru, a w związku z tym konieczności sprawdzenia dodatkowych naprężeń w krzywiznie łuku. Obliczenia ograniczono tylko do sprawdzenia naprężeń w prostoliniowym odcinku dźwigara.
- Nie uwzględniono również wpływu tężnika podłużnego na wielkość naprężeń rozciągających w poprzek włókien dźwigarów głównych, szczególnie w przypadku nadmiernego zalegania śniegu. Naprężenia te w miejscach krzywoliniowych dźwigarów sumują się z naprężeniami związanymi z jego krzywizną.

4. Obliczenia sprawdzające

Z uwagi na brak pełnych obliczeń statyczno-wytrzymałościowych w projektach budowlanym (PB) i wykonawczym (PW), wykonano obliczenia sprawdzające konstrukcji dachu w kilku wariantach, między innymi dla założeń odpowiadających zastosowanemu drewnie w konstrukcji – czyli klasy GL30 i warunkom pracy konstrukcji odpowiadającym klasie trwania obciążenia – krótkotrwale, klasie użytkowania 3 oraz możliwości występowania worków śnieżnych, jak również dla założeń odpowiadających założonej klasie drewna w PB. W związku z tym rozważono następujące warianty:

- wariant I – obliczenia kontrolne sprawdzające, przy założeniu klasy projektowej GL35 i pozostałych założeń przyjętych w PB z uwzględnieniem zauważonych usterek (omówionymi w punkcie 3), z uwagi na brakujące sprawdzenia nośności wg założeń PB,
- wariant II – obliczenia kontrolne sprawdzające jak wariant I, ale z uwzględnieniem właściwej klasy trwania obciążeń (krótkotrwale) i klasy użytkowania 3,
- wariant III – obliczenia kontrolne sprawdzające, przy założeniu klasy projektowej GL30 wg PW, z uwzględnieniem właściwej klasy trwania obciążeń (krótkotrwale) i klasy użytkowania 3 oraz występowania worków śnieżnych.

Sprawdzające obliczenia wytrzymałościowe poszczególnych elementów konstrukcji drewnianej wykonano w odniesieniu do zapisów normowych z okresu projektowania i wykonawstwa (lata 2003–2004), z uwagi na zastosowaną klasę drewna oznaczoną jako GL30, zgodnie z PN-B-03150:2000/Az1. W grudniu 2004 roku, poprawką do normy Az3: grudzień 2004, uległy zmianie oznaczenia klas drewna klejonego i zgodnie z PN-EN 1194:1999 oznaczono jako GL24h, GL28h, GL32h i GL36h oraz GL24c, GL28c, GL32c i GL36c (litera h – oznacza drewno jednorodne, litera c – oznacza tzw. „drewno kombinowane” – tzn. w części środkowej wykorzystuje się drewno o jedną klasę niższą – w drewnie klasy GL30 i lepszej zgodnie z PN-B-03150:2000 dopuszczano także taką możliwość dla elementów zginanych, ale czy tak wykonano – brak informacji).

Przeprowadzone analizy obliczeniowe dla wariantu I, wykazały spełnienie warunków SGN i SGU dla krokwi i płatwi. Stwierdzono przekroczenia naprężeń dopuszczalnych dźwigara tylko w niektórych przypadkach wytrzymałościowych. Przy założeniu w PB, niewłaściwej – wg autorów – klasy użytkowania 2 zamiast klasy użytkowania 3, pomimo spełnienia podstawowych warunków wytrzymałościowych, warunek dla dopuszczalnych naprężeń rozciągających w poprzek włókien w miejscu występowania łuku dolnego (w obliczeniach tzw. strefa kalenicowa) jest przekroczony sześciokrotnie z uwagi na mały promień krzywizny dźwigara – warunek ten nie został sprawdzony w PB.

- Poniżej przedstawiono wyniki analiz obliczeniowych wariantu III i można stwierdzić, że:
- dla krokwi – spełnione są warunki nośności – nawet w miejscach nadmiernego zalegania śniegu,
 - analizując wyniki obliczeń dla płatwi, stwierdzono przekroczenie nośności płatwi o 46% (w przypadku pominięcia wiatru jako parcia – tylko 2% przekroczenia) z uwagi na nośność przy zginaniu. Ugięcie płatwi dla takiego schematu obciążeń wyniosłoby 246% wartości dopuszczalnej, ale zgodnie z PN-82/B-02000 ugięcie sprawdzamy dla obciążeń stałych i jednego najbardziej niekorzystnego zmiennego. W przypadku pominięcia wiatru jako parcia, ugięcie wynosi 167% wielkości dopuszczalnej, czyli też jest przekroczone. W celu spełnienia warunków SGN (stałe + wiatr + śnieg) i SGU (stałe + śnieg) dla płatwi – wymagany przekrój płatwi, w miejscu możliwości zalegania worka śnieżnego, wynosi 210×280 mm (aktualnie 120×280 mm). Natomiast w celu spełnienia tylko warunku SGN (stałe + wiatr + śnieg) dla płatwi – wymagany przekrój płatwi powinien wynosić 180×280 mm. Poza strefą występowania worków śnieżnych istniejący przekrój płatwi o wymiarach 120×280 mm także nie spełnia wymagania SGN (stałe + wiatr + śnieg) stwierdzono przekroczenie nośności płatwi o 9%. Nie spełnia również SGU (stałe + wiatr) i SGU jest przekroczony o 30%. W celu spełnienia warunków SGN (stałe + wiatr + śnieg) i SGU (stałe + wiatr) dla płatwi, poza strefą oddziaływania worka śnieżnego – wymagany jest przekrój płatwi o wymiarach 175×280 mm. W celu spełnienia warunków tylko SGN (stałe + wiatr + śnieg) dla płatwi – wymagany przekrój płatwi wynosi 140×280 mm,
 - analizując wyniki obliczeń dla dźwigarów, stwierdzono przekroczenie naprężeń o ponad 10% przy równoczesnym zginaniu i ściskaniu w płaszczyźnie dźwigara. Wykonując analogiczne obliczenia z pominięciem parcia wiatru, stwierdzono że nośność dźwigara jest wykorzystana tylko w 70%, Procentowe wyniki przedstawione powyżej odnoszą się tylko do naprężeń normalnych w środku rozpiętości dźwigarów.
 - naprężenia normalne w strefach krzywoliniowych dźwigarów nie są przekroczone w stosunku do wielkości dopuszczalnych, ale naprężenia rozciągające w poprzek włókien występujące w dolnym łuku są kilkukrotnie przekroczone w stosunku do wielkości dopuszczalnych. Konieczne jest zatem wzmocnienie tych stref (łuk dolny) w celu ograniczenia naprężeń rozciągających prostopadłych do włókien w łuku dolnym.

5. Analiza przyczyn powstałych uszkodzeń w dźwigarach

W trakcie wizji lokalnej stwierdzono w kilku dźwigarach występowanie podłużnego rozwarstwienia w strefie połowy wysokości, w miejscu krzywizny górnej dźwigara (na rys. 4 oznaczone nr 3). W bezpośrednim sąsiedztwie uszkodzenia występuje tężnik podłużny oraz na dachu możliwość nadmiernego gromadzenia się śniegu, dlatego określono wpływ tego tężnika na dźwigar.

W wywiadzie uzyskano informację o nadmiernym zaleganiu śniegu na dachu w latach ubiegłych (2005–2006) i zauważonych nadmiernych ugięciach płatwi. Jak wynika z wywiadu, w wyniku zaobserwowania nadmiernego ugięcia wykonano obliczenia sprawdzające. Na podstawie obliczeń stwierdzono, że pomimo nadmiernego ugięcia nośność nie jest przekroczona. Brak jednak potwierdzenia tego zdarzenia w dokumentacji obiektu uzyskanej do analizy.

W celu potwierdzenia tej tezy wykonano obliczenia sprawdzające płatwi nie podpartej tężnikiem, jak dla wariantu III, z pominięciem oddziaływania wiatru. Przy założeniu klasy użytkowania 3 ($k_{mod} = 0,7$), nośność jest nieznacznie przekroczona (w zakresie błędów obliczeniowych), jednak ugięcie jest zdecydowanie przekroczone – 167% wielkości dopuszczalnej. Gdyby jednak przyjąć klasę użytkowania 2 ($k_{mod} = 0,8$), tak jak założono w PB, nośność obliczeniowa byłaby zachowana.

Jak już wcześniej wspomniano, w bezpośrednim sąsiedztwie uszkodzenia występuje tężnik podłużny o skartowaniu typu K (rys. 2), podpierający płatw w środku rozpiętości, tym samym przejmujący obciążenia z płatwi na dolną część dźwigara, powodując jego rozciąganie w poprzek włókien, co jest rozwiązaniem niekorzystnym dla dźwigara.

Drewno lite, jak również klejone ma bardzo małą wytrzymałość na rozciąganie prostopadłe do włókien, dodatkowo normowo zmniejszone z uwagi na możliwość tworzenia się naturalnych pęknięć. Dlatego w projektowaniu należy unikać rozwiązań powodujących powstawanie dodatkowych naprężeń rozciągających prostopadłych do włókien. Nie wolno dopuszczać do możliwości występowania równocześnie pęknięć schnięcia, pęknięć skurczowych i pęknięć zależnych od poprzecznych naprężeń rozciągających. W drewnie klejonym także mogą powstać naprężenia skurczowe (mimo suchego procesu wytwarzania oraz wbudowania w stanie suchym), które wywołane są przez późniejsze zmiany w otaczającym środowisku i nakładają się na naprężenia rozciągające prostopadłe do włókien. W omawianym zadaszeniu ma to szczególne znaczenie z uwagi na charakter przekrycia – wiatra, czyli środowisko jest bardzo dynamicznie zmienne.

Norma [3] nie podaje metodyki wyznaczenia naprężeń rozciągających w takim rozwiązaniu. W celu określenia wielkości naprężeń rozciągających od oddziaływania tężnika, a w szczególności teoretycznej powierzchni rozciąganej, posłużono się metodyką zawartą w [1] i porównano do wielkości naprężeń dopuszczalnych zgodnie ze wzorem (4.1.2.b) normy [3]. Weryfikację obliczeniową możliwej przyczyny wystąpienia pęknięć podłużnych, przy założeniu jako przyczyny nadmiernego zalegania śniegu, jak dla „worka śnieżnego” przyjętego w wariancie III obliczeń.

W wyniku obliczeń stwierdzono przekroczenie dopuszczalnych naprężeń rozciągających w poprzek włókien o 80%, uwzględniając nałożenie się naprężeń rozciągających w poprzek włókien i ścinających; wyłączenie przekroju wynosi 186%.

Przeprowadzona analiza obliczeniowa naprężeń rozciągających prostopadłych do włókien w dźwigarze, wynikających z oddziaływania tężnika podłużnego wykazała, że możliwą przyczyną pojawienia się pęknięć podłużnych w okolicy łuku górnego było przekroczenie naprężeń rozciągających prostopadłych do włókien w drewnie dźwigara, wskutek zalegania nadmiernego śniegu na dachu oraz niekorzystnie (dla naprężeń rozciągających prostopadłych

do włókien) ukształtowanych pionowych tężników dachowych (typ K), przekazujących znaczne siły prostopadłe do włókien na dolną część dźwigara, powodujące jego rozrywanie poprzeczne (czyli skutek mocowania krzyżulca tężnika blisko krawędzi obciążonej dźwigara).

Jednym z czynników składowych mającym także wpływ na pęknięcia podłużne na pobocznicy „B” w okolicach łuku górnego i podpory górnej były naprężenia wywołane szybkim skurczem, wskutek wysychania warstw powierzchniowych drewna, na które może oddziaływać bezpośrednio promieniowanie słoneczne (patrz rys. 3). Dlatego szczególną uwagę należy zwrócić na miejsca występowania tych naprężeń związanych z pracą konstrukcji i unikać rozwiązań konstrukcyjnych powodujących dodatkowe naprężenia rozciągające w poprzek włókien. Naprężenia skurczowe nakładają się na możliwe do wystąpienia w tym miejscu naprężenia od tężnika, naprężenia wywołane krzywizną dźwigara i naprężenia przy ścinaniu (bezpośrednie sąsiedztwo podpory górnej). Dlatego konieczne jest ograniczenie oddziaływania tężnika na dolną część dźwigara poprzez podwieszenie dolnego pręta tężnika, po obu stronach dźwigara, do płatwi powyżej, jak również wzmocnienie łuku i strefy przypodporowej w celu ograniczenia naprężeń rozciągających prostopadłych do włókien w łuku górnym i zabezpieczeniu przed ścięciem w płaszczyźnie równoległej do włókien.

6. Koncepcja napraw konstrukcji

Na podstawie obserwacji, analiz i obliczeń zaproponowano inwestorowi program naprawczy, obejmujący cztery działania: (1) zabezpieczenie dźwigarów przed rozwarstwianiem przez zespolenie przekrojów w obrębie zarysowań (już powstałych lub zagrażających); (2) odgrzybianie i impregnację całej powierzchni konstrukcji; (3) poprawne przejście sił od tężników pionowych; (4) lokalne wzmocnienie płatwi.

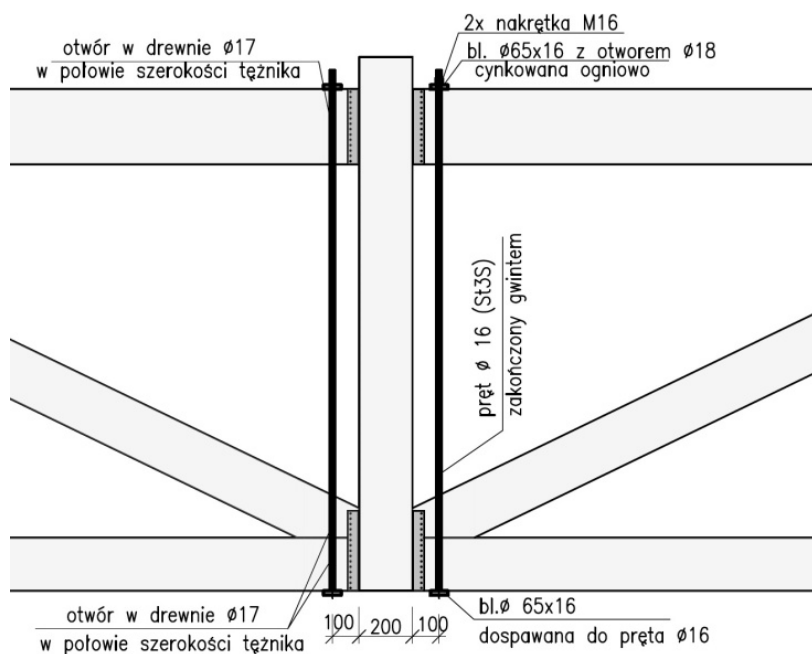
(1) Z uwagi na bardzo duże przekroczenie naprężeń rozciągających w poprzek włókien w strefach krzywoliniowych dźwigara należy wykonać wzmocnienie tych stref. Można tego dokonać poprzez wykonanie opasek wzmacniających (np. z płaskownika 6×60 mm), w rozstawie co ok. 0,5 m prostopadłe do osi dźwigara, ale jest to wzmocnienie zewnętrzne, a w związku z tym widoczne. Przekrój proponowanego płaskownika, dobrano tak by zrównoważyć obliczeniowe naprężenia w poprzek włókien drewna w strefie krzywoliniowej dźwigara. O rozstawie płaskowników decyduje również nośność zakotwienia oraz docisk w poprzek włókien do drewna. Wzmacniając opaskami stalowymi, zaleca się wykonanie opasek w kształcie litery U, kotwionych, z możliwością naciągnięcia, do marek przykręconych w górnej części dźwigara śrubami. Celowe byłoby także doklejenie tych płaskowników na klejach epoksydowych, do pobocznicy dźwigarów, w celu zmniejszenia ryzyka gromadzenia się zanieczyszczeń i wilgoci pod płaskownikami. Doklejenie również zwiększa wytrzymałość dźwigarów na siły ścinające.

Alternatywnym rozwiązaniem może być wykorzystanie prętów gwintowanych wklejanych lub wkręcanych (np. typu SPAX) w przekrój, prostopadłe do włókien. Jest to rozwiązanie praktycznie niewidoczne i niepogarszające estetyki konstrukcji, jednak trudne wykonawczo z uwagi na konieczność wykonania otworów pilotujących równoległe do pobocznicy, na 0,9 h wysokości dźwigarów, od spodu dźwigarów.

(2) Z uwagi na widoczne przebarwienia i powstałą powierzchnię korozję biologiczną w postaci punktowego, kulistego nalotu oliwkowo-czarnego, o różnej intensywności, prawie na całej powierzchni drewna w konstrukcji (rys. 5), pobrano próbki do oględzin makroskopowych i mikroskopowych. Stwierdzono występowanie owocników w postaci kępek otoczonych licznymi strzępkami w formie włosków koloru oliwkowo-brązowego i oliwkowo-czarnego, co odpowiada grzybowi pleśniowemu „Czupryńka kulista” (*Chaetomium globosum*). Grzyb ten powoduje szary (lub tzw. pleśniowy) rozkład drewna, mogący powodować biokorozję na głębokość 1–2 mm. Pojawienie się grzyba pleśniowego na powierzchni drewna świadczy

o konieczności wykonania impregnacji środkiem o działaniu grzybobójczym, a nie tylko ochronnym. W związku z tym zaproponowano zastosowanie środka BORAM C30 polskiej firmy Altax, który jest środkiem grzybobójczym: zwalcza występujące na drewnie grzyby pleśniowe oraz grzyby domowe. Również zabezpiecza przed grzybami domowymi, pleśniami, glonami, bakteriami oraz larwami owadów – technicznymi szkodnikami drewna. Odgrzybianie i impregnację drewna należy wykonać w odpowiedniej kolejności. Najpierw wykonuje się oprysk całej konstrukcji w celu zneutralizowania grzyba pleśniowego za pomocą preparatu grzybobójczego Boramon C30 (zużycie 400 ml/1m²), gdyż jego mykotoksyny są bardzo szkodliwe dla górnych dróg oddechowych (przy prowadzonych naprawach). Po obfitym spryskaniu preparatem porażonej grzybem powierzchni drewna należy odczekać 24 h i usunąć grzyb (oczyścić powierzchnię) za pomocą wody oraz szczotek. Po wyschnięciu nanosi się dwukrotnie preparat Boramon C30 w ilości 200 ml roztworu roboczego na 1 m², najlepiej poprzez wcieranie pędzlem (zawsze wzdłuż włókien). Po zastosowaniu, do czasu utwardzenia się Boramonu C30 w drewnie (ok. 2 dni od momentu naniesienia), należy chronić drewno przed opadami atmosferycznymi. Po czasie, w którym drewno osiągnie wilgotność powietrzno-suchą można wykonać zewnętrzną powłokę ochronną środkiem „Altax Lakierobejca do drewna”. Środek ten należy nałożyć w 2 warstwach za pomocą pędzla. Każdą kolejną warstwę nanosi się po wyschnięciu poprzedniej. Należy nakładać jak najcieńsze warstwy – tu nie działa zasada: „im więcej, tym lepiej”.

(3) Z uwagi na niekorzystne rozwiązanie tężników podłużnych powodujących zwiększenie naprężeń rozciągających w poprzek włókien należy wykonać podwieszenie tężnika do płatwi powyżej, za pośrednictwem ocynkowanych prętów stalowych. Koncepcję tego rozwiązania pokazano na rysunku 9.



Rys. 9. Koncepcja podwieszenia tężnika do płatwi

Ponadto, w strefie oddziaływania worka śnieżnego płatwie nie spełniają warunków nośności przy zginaniu i dopuszczalnych ugięć, a zatem powinny zostać wzmocnione (np. poprzez

dołożenie do płatwi istniejącej, płatwi o przekroju 90×280). Dotyczy to płatwi w odległości do 5 m włącznie od tężnika w bezpośrednim sąsiedztwie łuku górnego, przy czym płatwę tężnika nie wymaga wzmocnienia. Alternatywnie istnieje możliwość wzmocnienia przez doklejenie taśm CFRP.

7. Podsumowanie i wnioski

Z przeprowadzonych badań i kompleksowej oceny stanu technicznego obiektu, a w szczególności głównych elementów konstrukcji oraz dokumentacji projektowej, wynikają następujące wnioski:

Pomimo zauważonych błędów, obliczeniowe przekroczenie nośności dźwigarów głównych i płatwi (poza obszarem możliwości występowania worków śnieżnych) z uwagi na naprężenia normalne można uznać za dopuszczalne w granicach marginesu bezpieczeństwa modeli obliczeniowych – niemniej jednak wymusza to na zarządcy obiektu konieczność monitorowania dźwigarów w okresie zalegania śniegu, a w przypadku wystąpienia jego nadmiaru – bezwzględne jego usuwanie. Alternatywnym, jednak kosztownym rozwiązaniem jest wzmocnienie dźwigarów, np. z wykorzystaniem taśm CFRP (z włókien węglowych).

Niewłaściwym podejściem w projektowaniu tej konstrukcji narażonej na oddziaływanie powietrza atmosferycznego i wilgotności związanej z występowaniem lodowiska, mimo że zadana była klasa użytkowania 2 (odpowiadająca występowaniu wilgotności drewna do 20%), zamiast klasy użytkowania 3 – o czym świadczy rzeczywista wilgotność elementów, zmierzona w granicach od 23,5 do 28,0%. Potwierdzeniem utrzymywania się podwyższonej wilgotności otoczenia, w dłuższych okresach czasu, jest także stwierdzone występowanie zacieków na konstrukcji spowodowanych skraplaniem się pary na powierzchni dolnej poszycia dachu oraz powierzchniowej korozji stalowych łączników.

W projektowaniu nowych konstrukcji narażonych na oddziaływanie powietrza atmosferycznego, mimo jej zadania, należy zachować szczególną ostrożność w przyjmowaniu klasy użytkowania 2, ponieważ w budowlach zazwyczaj nie mamy wpływu na wilgotność otoczenia, a norma [3] dopuszcza w klasie użytkowania 2 przekroczenie wilgotności powietrza powyżej 85% tylko w krótkim okresie czasu. Takie podejście skutkuje zawyżonymi wielkościami naprężeń dopuszczalnych oraz niedoszacowaniem wielkości ugięć.

Traktowanie krzywoliniowych elementów z drewna jak prostoliniowych skutkuje niedoszacowaniem w zestawieniach obciążeń, jak również zagrożeniem bezpieczeństwa konstrukcji wobec braku weryfikacji obliczeniowych naprężeń dopuszczalnych w drewnie wynikających z krzywoliniowości elementów konstrukcji i anizotropowej budowy drewna. Pomijanie sprawdzenia nośności „stref kalenicowych” – miejsc gdzie występują naprężenia rozciągające w poprzek włókien – skutkuje koniecznością ponoszenia dodatkowych kosztów wykonania wzmocnień zmniejszających te naprężenia w strefach krzywoliniowych.

Złym rozwiązaniem okazało się przyjęcie tężnika typu K – w takim układzie jak zastosowano, czyli podpierające krokiew w środku rozpiętości. Rozwiązanie to negatywnie oddziałuje na dźwigary główne powodując przeniesienie sił z płatwi na zastrzały a w konsekwencji powodując nadmierne naprężenia rozciągające w poprzek włókien. W celu przeciwdziałania temu zjawisku konieczne jest podwieszenie pasa dolnego tężnika do płatwi. Odwracając o 180 stopni ukształtowanie tężnika – nie było by tego niekorzystnego zjawiska.

Literatura

1. Krajewski A., Witomski P.: Ochrona drewna. Wydanie I. Wydawnictwo SGGW. Warszawa, 2003.
2. Neuhaus H.: Budownictwa Drewniane. Tłumaczenie polskie. PWT Rzeszów, 2004.
3. PN-B-03150:2000 Konstrukcje z drewna i materiałów drewnopochodnych.

DAMAGE ENDANGERMENT OF THE ROOF MADE FROM GLUED LAMINATED TIMBER OVER RECREATIONAL FACILITY

Abstract: The paper presents design and construction reasons which caused safety impedency of the existing structure made from glued laminated timber. This structure creates the roof over the recreational area. Safety risk came from improper design and constructional approaches as well as from changes in design assumptions. Design of timber structures is different from design of reinforced concrete and steel structures in material aspect which is often neglected by designers

Keywords: timber structures, glued laminated timber, timber beams