CZASOPISMO TECHNICZNE B
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

z. 1-B/2007
ISSN 0011-4561
ISSN 1897-628X

AGATA LACHIEWICZ-ZŁOTOWSKA*, ROMAN ORŁOWICZ**

ZACHOWANIE SIĘ STREF PRZYPODPOROWYCH DŹWIGARÓW ŁUKOWYCH I BELKOWYCH Z DREWNA KLEJONEGO

SUPPORT SPHERE REACTION OF GLUELAM ARCH AND BEAM GIRDER

Streszczenie

W ostatnich latach w Polsce coraz częściej obiekty użyteczności publicznej buduje się z drewna klejonego. Przybywa pływalni czy dużych hal sportowych, których konstrukcje nośne są wykonane z tego materiału. Natomiast w niektórych obiektach pojawiły się problemy ze strefami podporowymi w dźwigarach. W niniejszym artykule przedstawiona jest analiza stanu naprężeń stref przypodporowych belek oraz łuków wykonanych z drewna klejonego. Omówiono również możliwe rozwiązania konstrukcyjne zwiększające nośność tych stref.

Słowa kluczowe: dźwigary łukowe, belki z drewna klejonego, strefy podporowe

Abstract

Recently the gluelam is more popular in Poland and plenty of public buildings are built from this material. There are plenty of swimming pools or sport halls, which constructions are made from gluelam. In some of those buildings there are problems with support spheres of girders. In this article the analysis of support spheres of girders and aches is made. There are also some proposals how to increase the load capacity of support spheres of such constructions.

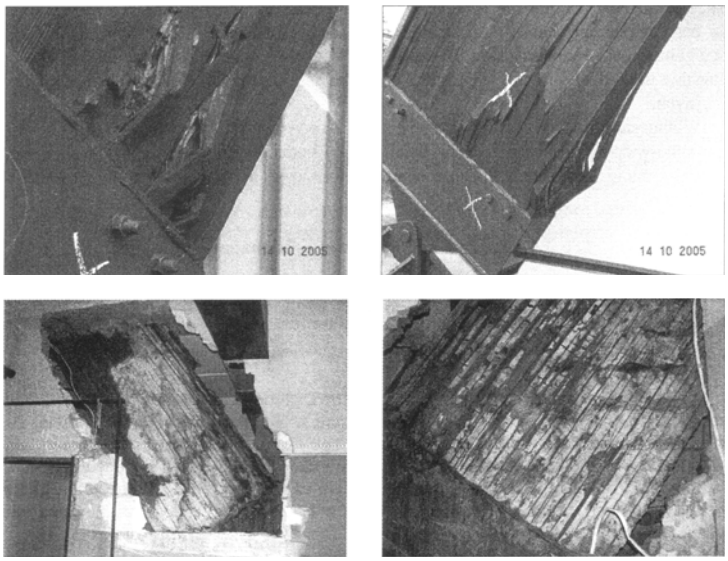
Keywords: gluelam, support spheres of girders

* Dr inż. Agata Lachiewicz-Złotowska, Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy.
** Prof. dr hab. inż. Roman Orłowicz, Katedra Budownictwa Ogólnego i Konstrukcji Drewnianych, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Szczecińska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Pracownicy Politechniki Łódzkiej przeprowadzili przegląd techniczny hal wybudowanych w latach 70. XX w. [1, 2]. Niemal we wszystkich stwierdzono poważne uszkodzenia stref przypodporowych drewnianych konstrukcji łukowych. Uszkodzenia te występują w postaci korozji biologicznej drewna oraz jego rozwarstwienia (ryc. 1). Przyczyny korozji biologicznej szczegółowo opisano w wymienionych pracach. Znane są również przypadki spękań i rozwarstwień łuków zarówno w strefach przypodporowych, jak i w strefach przegubowego połączenia półłuków w kalenicy. Tego rodzaju uszkodzenia związane są z panującym w tych strefach złożonym stanem naprężeń, gdyż poza naprężeniami docisku powstają bardzo niebezpieczne dla drewna, rozciągające w poprzek włókien, naprężenia normalne. W przypadku dźwigarów belkowych z drewna klejonego w strefach ich oparcia na słupach mogą powstać zbyt duże naprężania dociskowe wraz z naprężeniami rozwarstwiającymi (ryc. 2). Związane to jest z faktem, iż często powierzchnie przekazywania obciążenia oblicza się bez uwzględnienia odkształceń dźwigara, obrotu w przypadku podpory swobodnie opartej. Wówczas ta powierzchnia może zmniejszyć się nawet o połowę. Charakter i przebieg tego zniszczenia analizowano między innymi podczas badań doświadczalnych belek klejonych w pracy [6]. Ze względu na obszerność tematu w niniejszym artykule zostaną przedstawione wybrane zagadnienia związane z przekazywaniem sił skupionych na belki i dźwigary łukowe.



Ryc. 1. Przykłady uszkodzeń stref podporowych klejonych konstrukcji łukowych

Fig. 1. Examples of support point damage defects of gluelam arch girder

2. Stan naprężeń stref węzłowych konstrukcji łukowych

Największe zastosowanie w praktyce znalazły trójprzegubowe konstrukcje łukowe. Przy dużych rozpiętościach połączenie półłuków z drewna klejonego na podporach i kalenicy reali-

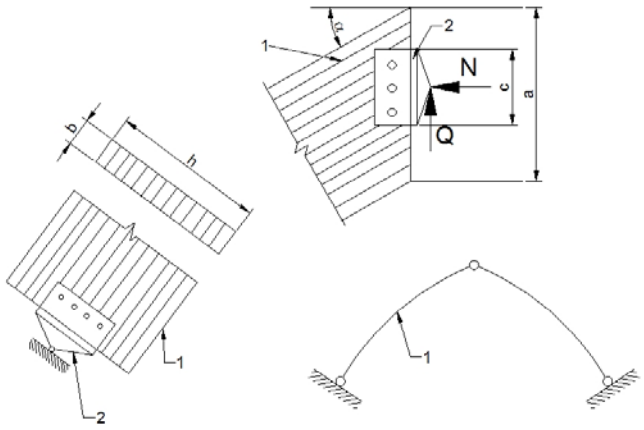
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

zowane są za pomocą specjalnych przegubów stalowych. Przy wysokości przekroju powyżej 100 cm przeguby stalowe wykonywane są w taki sposób, że ich połączenie z czołami półłuków wykonuje się nie na całej powierzchni czół, a na ich części o długości C (ryc. 3). W tym przypadku siły normalne N przekazywane są na czoła półłuków przez pole docisku o wymiarach $A = b \cdot c$, natomiast siły poprzeczne Q poprzez śruby mocujące przeguby do drewna.



Ryc. 2. Zmiażdżenie i rozwarstwienie drewna w strefach podporowych belek z drewna klejonego w hali sportowej w Bydgoszczy

Fig. 2. Gluelam failure and delamination in support sphere of beam in the sport hall in Bydgoszcz



Ryc. 3. Schemat przegubowych połączeń węzłowych konstrukcji łukowych z drewna warstwowo klejonego: 1 – element łukowy, 2 – przegub stalowy

Fig. 3. Scheme of pivot bearing connections of arch construction made from gluelam

Według ustaleń normowych [7] powinien być spełniony następujący warunek

$$\sigma_{c\alpha d} = \frac{N}{A} \leq f_{c\alpha d} \tag{1}$$

gdzie:

$f_{c\alpha d}$ – wytrzymałość obliczeniowa drewna przy ściskaniu pod kątem α do włókien.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

W warunku tym nie uwzględnia się, że w strefie kontaktu przegubu stalowego z czołami elementu klejonego panuje złożony, niejednorodny stan naprężeń. Na rycinach 4 i 5 podano wykresy naprężeń uzyskane metodą elementów skończonych (MES) oraz w sposób doświadczalny. W obliczeniach numerycznych drewno modelowano jako materiał anizotropowy, posiadający następujące cechy odkształcalności: E_x = 10 000 MPa, E_y = 400 MPa, μ_x = 0,5, μ_y = 0,03, G = 500 MPa. Naprężenia doświadczalne określono na podstawie pomiarów odkształceń czujnikami elektrooporowymi wg wzorów [4]

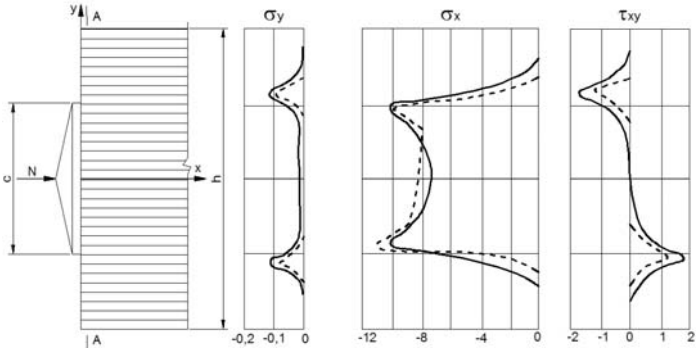
$$\sigma_x = E_x \frac{\varepsilon_x + \mu_{xy} \cdot \varepsilon_y}{1 - \mu_{xy} \cdot \mu_{yx}} \tag{2}$$

$$\sigma_y = E_y \frac{\varepsilon_y + \mu_{yx} \cdot \varepsilon_x}{1 - \mu_{xy} \cdot \mu_{yx}} \tag{3}$$

$$\tau_{xy} = G\left[2\varepsilon_{45} - \left(\varepsilon_x - \varepsilon_y\right)\right] \tag{4}$$

gdzie:

E_x, E_y – moduły Younga, odpowiednio w poprzek i wzdłuż włókien drewna,
G – moduł postaciowy,
μ_{xy}, μ_{yx} – współczynniki Poissona,
ε_x, ε_y, ε_{45} – pomierzone odkształcenia wzdłuż, w poprzek i pod kątem 45° do kierunku włókien.



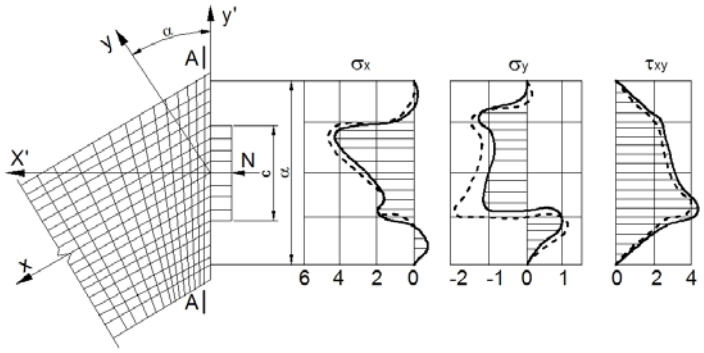
Ryc. 4. Wykresy naprężeń σ_y, σ_x i τ_{xy} [w MPa] w pobliżu czoła strefy przypodporowej półluku (przekrój A–A) od działania siły N (linie ciągłe – wg obliczeń MES, linie przerywane – wg danych doświadczalnych)

Fig. 4. Diagram of stresses σ_y, σ_x and τ_{xy} [MPa] in front of semiarch support sphere (section A–A) against force N (constant lines – calculations MES, break lines – experiment dates)

Z analizy przedstawionych wykresów naprężeń wynika, że ich największa koncentracja występuje pod krawędziami przegubów stalowych. Do bardzo niebezpiecznych zaliczane są naprężenia styczne, a τ_{xy}, a zwłaszcza naprężenia rozciągające σ_y, działające w kierunku minimalnej wytrzymałości drewna (w poprzek włókien). Naprężenia te wywołują rozwarstwienie

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

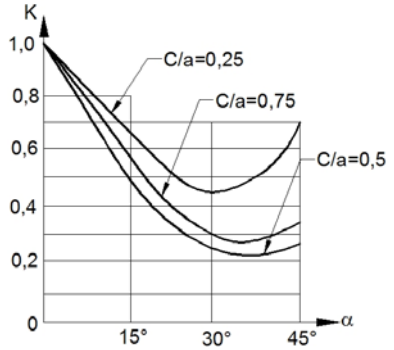
drewna w obszarze czół półłuków. W przypadku gdy strefy podporowe konstrukcji łukowych znajdują się na zewnątrz budynku, ulegają one pęcznieniu lub skurczowi na skutek nawilżania lub wysychania. Odkształceniom tym przeciwdziałają siły tarcia występujące między blachą oporową przegubu a czołem łuku oraz śruby mocujące przeguby do drewna. W wyniku tego w drewnie powstają naprężenia rozciągające w poprzek włókien, które mogą przyczynić się do poważnych rozwarstwień stref przypodporowych.



Ryc. 5. Wykresy naprężeń σ_y, σ_x i τ_{xy} [w MPa] wg obliczeń MES w pobliżu czoła strefy kalenicowej półłuku (przekrój A–A) od działania siły *N* (linie przerywane – obciążenie doraźne, linie ciągłe – obciążenie długotrwałe)

Fig. 5. Diagram of stresses σ_y, σ_x, τ_{xy} [MPa] against force *N* in front of the roof ridge of the semiarch according to MES calculations (break line – temporary load, constant line – permanent load)

Na rycinie 6 za pracą [3] przytoczone zostały wykresy współczynnika *K*, redukującego wytrzymałość f_{cad} w wzorze (1), który uwzględnia wpływ naprężeń σ_y i τ_{xy} na nośność stref czołowych półłuków drewnianych. Z wykresów tych wynika, że w porównaniu z obliczoną wg wzoru (1) nośnością *N* jej rzeczywista wartość może być kilkakrotnie mniejsza, zwłaszcza dla kątów działania siły *N* względem kierunku włókien drewna α = 20°–40°.



Ryc. 6. Wykresy współczynnika korekcyjnego *K* w zależności od stosunku *C*/*a* i kąta α (oznaczenia na ryc. 4 i 5)

Fig. 6. Diagram of correction factor *K* in dependence of relation *C*/*a* and the α-angle

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

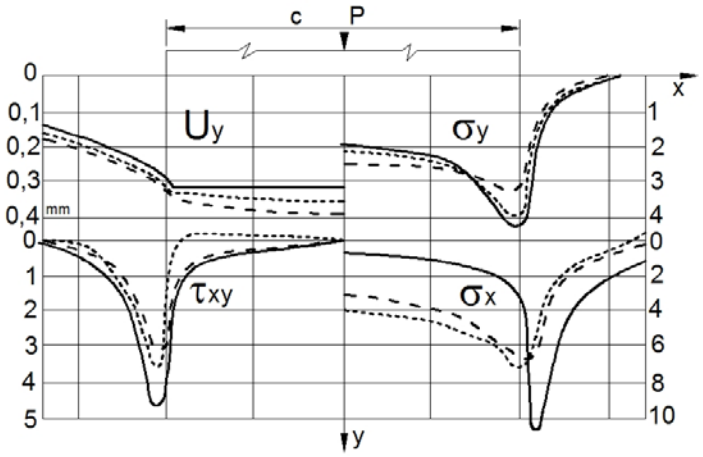
Poza zwiększeniem długości kontaktu C przegubów stalowych z czołami półłuków w tym obszarze można zwiększyć nośność drewna za pomocą specjalnych rozwiązań konstrukcyjnych, np. stosując zbrojenie, odpowiedni kształt przegubów itp. [3].

3. Stan naprężeń stref podporowych belek

W belkach z drewna klejonego o dużych rozpiętościach powstaje problem oparcia ich na słupach, zwłaszcza stalowych lub żelbetowych. Wymiary przekrojów głowic tych słupów niekiedy są o 1,1–1,8 razy mniejsze niż wymagana wg obliczeń normowych [7] powierzchnia oparcia A

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{P}{A} \le k_{c,90} f_{c,90,d} \tag{5}$$

Warto zaznaczyć, że wartości współczynnika $k_{c,90}$ nie są sprecyzowane dla przypadku gdy naprężenia miejscowe w poprzek włókien działają bezpośrednio w strefach czołowych belek. Poza tym nie uwzględnia się faktu, iż poza obszarem docisku w belkach mogą powstać naprężenia rozwarstwiające, działające w poprzek włókien [4]. Na rycinie 7 podano wykresy przemieszczeń i naprężeń występujące w elemencie drewnianym od oddziaływania siły P przekazywanej prostopadle do włókien poprzez stempel o szerokości C. Dane uzyskane metodą elementów skończonych dla przypadków gdy stempel wykonano ze stali lub z drewna, którego włókna zorientowane są równolegle lub prostopadle do kierunku działania siły P.



Ryc. 7. Wykresy przemieszczeń U_y [w mm] i naprężeń σ_y, σ_x i τ_{xy} [w MPa] przy obciążeniu siłą P przekazywaną przez stempel o szerokości C wykonany ze stali (linie ciągłe), z drewna z orientacją włókien prostopadle do płaszczyzny docisku (linie punktowe) i z drewna z orientacją włókien równolegle do płaszczyzny docisku (linie przerywane)

Fig. 7. Diagrams of displacements U_y [in mm] and stresses σ_y, σ_x, τ_{xy} [MPa] by force P loading by steel made stamp with wide C (constant lines) in the wooden part – grains perpendicular to plain pressure (point line), grains parallel to plain pressure (break line)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Z analizy rozkładu naprężeń widać, że ich największą koncentrację obserwuje się pod krawędziami stempla. Im sztywniejszy jest stempel względem podłoża (belki drewnianej), tym są większe wartości maksymalnych naprężeń. W rozpatrywanym przypadku bardzo niebezpieczne są naprężenia rozciągające σ_x działające wzdłuż włókien. Mogą one w stanie granicznym przyczynić się nawet do rozerwania drewna wzdłuż włókien nad podporą (ryc. 2). Warto nadmienić, że nierównomierny rozkład naprężeń w obrębie podpory zwiększa się podczas ugięcia belki w wyniku obrotu przekroju. Może to wywołać znaczącą redukcję długości oparcia C belki, a co za tym idzie wzrostu naprężeń σ_y i zmiażdżenie drewna (ryc. 2). Efektu tego, po raz pierwszy opisanego w pracy [6], jak na razie nie uwzględnia się w normowych obliczeniach stref podporowych belek z drewna klejonego.

Stan naprężeń stref przypodporowych belek poza obszarem podpory szczegółowo analizowano w pracy [4]. Ustalono, że w obszarze tym o długości ok. dwóch wysokości przekroju belek powstają naprężenia rozciągające, działające pod kątem α do kierunku włókien

$$\alpha = 0{,}5 \operatorname{arctg}[2\tau_{xy}/(\sigma_x - \sigma_y)] \tag{6}$$

W tym przypadku wytrzymałość strefy przypodporowej należy określić wg wzoru

$$0{,}5\left(\sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^{\ 2}}\right) \le f_{t\alpha} \tag{7}$$

w którym wytrzymałość drewna na rozciąganie pod kątem α do kierunku włókien

$$f_{t\alpha} = \frac{f_{t0}}{\cos^4\alpha + b\sin^2\alpha + c\cos^4\alpha} \tag{8}$$

gdzie:

$$b = \frac{f_{t0}}{f_{t45}} - \frac{1+c}{4},\ c = \frac{f_{t0}}{f_{t90}} \tag{9}$$

f_{t45} – wytrzymałość na rozciąganie pod kątem 45° w stosunku do włókien,
f_{t0} – wytrzymałość na rozciąganie w poprzek włókien,
f_{t90} – wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż włókien.

Przykładowe wartości obliczeniowe wytrzymałości drewna za pracą [5] podano w tablicy 1.

Tablica 1

Wytrzymałości dla drewna klejonego iglastego klasy GL30

Rodzaj naprężenia	Wartość naprężenia
Wytrzymałość na zginanie	14 MPa
Rozciąganie wzdłuż włókien	10,5 MPa
Rozciąganie w poprzek włókien	0,2 MPa
Ściskanie wzdłuż włókien	10 MPa
Docisk w poprzek włókien	3,0 MPa
Ścinanie	0,9 MPa

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Jeżeli chodzi o wartości naprężeń σ_y, σ_x i τ_{xy}, to we wzorach (6) i (7) można je określić w sposób numeryczny, np. metodą elementów skończonych. Zwiększenie nośności stref przypodporowych belek drewnianych możliwe jest za pomocą redystrybucji naprężeń dociskowych $\sigma_{c,90}$ wzdłuż dolnej krawędzi belek lub po wysokości ich przekroju. W pierwszym przypadku stosuje się podkładki z twardszego drewna, np. dębowego, które mogą być wklejane podczas produkcji belek. Natomiast redystrybucja reakcji oporowych po wysokości przekroju dokonuje się za pomocą wklejonych sworzni, bocznych nakładek lub wkładek itp. [3].

4. Podsumowanie

Przy projektowaniu belek i łuków z drewna klejonego należy szczególną uwagę zwracać na ich strefy przypodporowe. W strefach tych panuje złożony stan naprężeń, gdyż poza naprężeniami normalnymi docisku powstają naprężenia rozciągające w poprzek włókien i naprężenia styczne. W wyniku działania tych naprężeń można często zaobserwować spękania i zarysowania konstrukcji. W przypadku stref podporowych mających kontakt ze środowiskiem zewnętrznym uszkodzenia te potęgują naprężenia skurczowe, powstające na skutek zmiany wilgotności i temperatury otoczenia. Gdy są przekroczone naprężenia na docisk, należy również liczyć się z dużymi wgnieceniami drewna nad podporami, a zatem i przemieszczeniami całego dźwigara. Aby zapobiec powstaniu wymienionych uszkodzeń, można wzmocnić strefy przypodporowe.

Literatura

[1] Jeruzal J., *Uszkodzenia stref przypodporowych w łukach z drewna klejonego warstwowo*, Konferencja Naukowa: „Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych”, Szczecin 1999.
[2] Jeruzal J., *Problemy eksploatacyjne w obiektach sportowych wykonanych z dźwigarów z drewna klejonego warstwowo*, Konferencja Naukowa: „Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i zabytkowym”, Wrocław 2006.
[3] Orłowicz R., *Wytrzymałość i odkształcalność konstrukcji drewnianych przy długotrwałych oddziaływaniach*, rozprawa habilitacyjna, Leningrad 1991.
[4] Sierov E., Orłowicz R., *Wytrzymałość konstrukcji drewnianych w złożonym stanie naprężenia*, Konferencja Naukowa: „Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych”, Szczecin 1999.
[5] Neuhas H., *Budownictwo drewniane*, PWT, Rzeszów 2004.
[6] Lachiewicz-Złotowska A., *Wstępne wyniki badań belek z drewna klejonego warstwowo poddanych działaniu obciążeń wielokrotnie powtarzalnych*, Konferencja Naukowa: „Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych”, Szczecin 2006.
[7] PN-B-03150 Konstrukcje drewniane. Obliczenia statyczne i projektowanie.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ