

Mariusz POŃSKI (id orcid 0000-0002-5173-0930),
Jarosław PALUSZYŃSKI (id orcid 0000-0002-2434-3812)
Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

WYMIAROWANIE ELEMENTÓW ZGINANYCH WYKONANYCH Z DREWNA KLEJONEGO KRZYŻOWO (CLT) W UJĘCIU PN-EN 1995-1-1

W artykule przedstawiono sposób wymiarowania elementów zginanych wykonanych z drewna klejonego krzyżowo CLT w ujęciu normy PN-EN 1995-1-1. Do wymiarowania wykorzystano adaptację normowej metody opartej na teorii belek zespolonych mechanicznie. Jako uzupełnienie opisanej metody przedstawiono przykład obliczeniowy wykorzystujący pokazane podejście.

Słowa kluczowe: drewno klejone krzyżowo CLT, wymiarowanie, metoda gamma

WPROWADZENIE

W nowoczesnym budownictwie podczas projektowania obiektu budowlanego należy brać pod uwagę czynniki decydujące o wpływie stosowanego materiału oraz rozwiązań konstrukcyjnych na środowisko naturalne. Wiąże się to głównie z analizą efektywności energetycznej, zużycia energii w całym cyklu życia obiektu oraz z minimalizacją czasu wznoszenia obiektu. Takie podejście narzuca konieczność poszukiwania nowych rozwiązań oraz materiałów mogących sprostać stawianym im wymaganiom. Materiałem spełniającym powyższe wymogi, który w ciągu ostatnich lat zyskał duże zainteresowanie, jest drewno klejone krzyżowo CLT (cross laminated timber). Materiał ten, konkurencyjny pod względem ekonomicznym oraz przodujący pod względem czasu realizacji obiektu, z powodzeniem stosowany do projektowania domów jednorodzinnych, obecnie zaczyna być wykorzystywany do projektowania budynków wielorodzinnych oraz użyteczności publicznej. Rozwiązanie to łączące zalety lekkich konstrukcji szkieletowych oraz konstrukcji z drewna litego z powodzeniem może konkurować z rozwiązaniami wykorzystującymi stal oraz beton zbrojony, o czym świadczą powstające w Europie i na świecie budynki średnie i wysokie. Warto również nadmienić, że trwają prace związane z adaptacją CLT do wykorzystania w budynkach wielokondygnacyjnych, polegające na zespoleniu CLT z betonem [1].

Materiał ten łatwo poddający się obróbce posiada inne, pożądane cechy, takie jak: bardzo dobra odporność ogniowa - CLT zwęglą się powoli i w przewidywalny sposób, pozwalając na utrzymanie wytrzymałości i bezpieczeństwa podczas pożaru, izolacyjność termiczna - współczynnik przewodnictwa cieplnego wyznaczony zgodnie z EN ISO 10456 wynosi $\lambda = 0,12$ W/mK, wysokie parametry izolacyjności

akustycznej. CLT zawiera wszystkie korzystne cechy materiałów drewnianych pod względem efektywności energetycznej w całym cyklu życia, co powoduje, że materiał ten w kwestii wpływu na środowisko naturalne deklasuje beton zbrojony [2]. W Polsce CLT jest materiałem stosunkowo nowym. W publikacjach krajowych brakuje zwięzłego przedstawienia sposobu projektowania i wymiarowania elementów konstrukcyjnych z tego materiału. Niniejsza publikacja ma na celu częściowe uzupełnienie tych braków.

1. METODY WYZNACZANIA SIŁ WEWNĘTRZNYCH W ELEMENTACH CLT

Jak do tej pory nie powstało jednolite, powszechnie zaakceptowane podejście do analizy drewna klejonego krzyżowo. W literaturze światowej istnieje kilka podejść obliczeniowych, do których należą m.in.: metoda gamma (teoria belek zespolonych mechanicznie, załącznik B - Eurokod 5 [3]), teoria kompozytu (metoda-k, ang. *k-method*), analogia ścinania (metoda Kreuzingera), teoria belki Timoszenki. Z przeprowadzonej analizy przez Bogenspergera i współpracowników [4] wynika, że dla stosunku rozpiętości przęsła do grubości elementu $l_{CLT}/t_{CLT} \geq 15$ nie zaobserwowano znacznych różnic w otrzymywanych wynikach z ww. metod i mogą być one stosowane równoważnie. W niniejszej pracy omówiona zostanie pierwsza z wymienionych, tj. metoda gamma.

1.1. Metoda gamma (γ - method)

Metoda ta została opracowana w 1955 roku przez profesora Karla Möhlera. Polega ona na zdefiniowaniu własności mechanicznych belek przy użyciu sztywności efektywnej zginania będącej funkcją parametrów geometryczno-mechanicznych przekroju oraz współczynnika efektywności połączenia γ . Współczynnik γ zależy od charakterystyki poślizgu elementów złącznych (od stosunku s/K , gdzie: s - odległość między łącznikami, K - podatność łączników mechanicznych). Współczynnik ten przyjmuje wartość zero w przypadku braku połączenia mechanicznego pomiędzy belkami oraz wartość równą jeden dla sztywno połączonych belek. Ponieważ elementy CLT wykonane są z płyt sklejonych w dwóch kierunkach, należy zastosować pewną modyfikację metody przedstawionej w PN-EN 1995-1-1 [3]. Modyfikacja ta polega na wprowadzeniu tzw. łączników wirtualnych w postaci poprzecznie ustawionych paneli do kierunku zginania. Sztywność takich łączników odpowiada ich sztywności na ścinanie walcowe. W każdej i -tej płaszczyźnie stykowej dwóch paneli pracującej na rozciąganie stosunek s/K_i (moduł poślizgu między warstwami) można wyznaczyć za pomocą zależności [2]:

$$\frac{s}{K_i} = \frac{t_{90,i}}{G_R \cdot b} \quad (1)$$

gdzie:

G_R - moduł ścinania walcowego (ang. *rolling shear modulus*),

$t_{90,i}$ - grubość warstw o kierunku prostym do kierunku zginania,

b - szerokość belki.

Teoria belek zespolonych mechanicznie (metoda gamma) jest oparta na teorii zginania belek jednoprzęsłowych obciążonych sinusoidalnie lub paraboliczne, ale różnice rozwiązania otrzymanego z zastosowania obciążenia równomiernego lub punktowego z rozwiązaniem ścisłym są niewielkie. W normie PN-EN 1995-1-1 podano szereg założeń dotyczących analizy elementów z wykorzystaniem tej metody, z których pierwsze dopuszcza analizę belek wieloprzęsłowych.

W celu wyznaczenia sztywności zastępczej przy zginaniu należy posłużyć się zależnością [2, 3]:

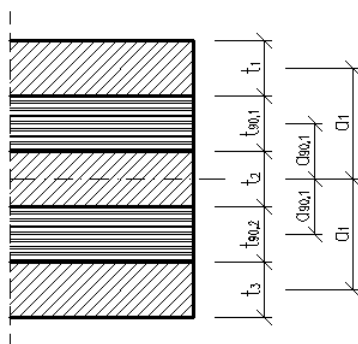
$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (2)$$

gdzie:

n - liczba warstw rozciąganych,

A_i - pole przekroju i -tej warstwy rozciąganej,

a_i - odległość środka ciężkości i -tej warstwy rozciąganej od środka ciężkości przekroju całego elementu (rys. 1).



Rys. 1. Przekrój poprzeczny CLT w układzie 5 warstw (wg [2])

Współczynnik efektywności połączenia γ_i oraz parametr a_i , przy założeniu symetrii przekroju względem osi poziomej, można wyznaczyć z następujących wzorów [2]:

$$\gamma_i = \left[1 + \left(\pi^2 \frac{E_i A_i}{I_{CLT}} \cdot \frac{t_{90,i}}{G_R \cdot b} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

$$a_i = \frac{t_i}{2} + t_{90,i} + \frac{t_{i+1}}{2}, \quad a_{90,i} = \frac{t_{90,i}}{2} + \frac{t_{i+1}}{2} \quad (4)$$

przy czym dla warstwy środkowej $\gamma_i = 1$ oraz $a_i = 0$ m, t_i to grubość i -tej warstwy rozciąganej. Moduł ścinania walcowego można wyznaczać na podstawie zależności [2]:

$$G_R \cong G_0 / 10 \quad (5)$$

gdzie G_0 to moduł ścinania poprzecznego, prostopadłego do kierunku głównego.

Na podstawie wzoru (2) można wyznaczyć maksymalne naprężenia normalne oraz maksymalne naprężenia ścinające (gdzie naprężenia normalne są równe zero), korzystając z następujących zależności [2, 3]:

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 + \sigma_{m,1} \quad (6)$$

$$\tau_{\max} = \frac{EQ}{(EI)_{ef} \cdot b} \cdot V \quad (7)$$

gdzie:

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i A_i}{(EI)_{ef}} \cdot M \quad (8)$$

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 E_i t_i}{(EI)_{ef}} \cdot M \quad (9)$$

EQ - ekwiwalentny moment statyczny,

V - siła ścinająca w miejscu zerowania się naprężeń normalnych,

M - moment zginający.

Przykładowo dla przekroju o 5 warstwach współczynnik EQ może być wyznaczony w następujący sposób:

$$EQ = \gamma_1 E_1 A_1 a_1 + E_{90,1} A_{90,1} a_{90,1} + \gamma_2 E_2 \frac{A_2 t_2}{2} \quad (10)$$

gdzie parametry warstw o kierunku głównym prostopadłym do kierunku zginania można wyznaczyć następująco: $E_{90,i} = E_i/30$ [6], a $a_{90,1} = t_2/2 + t_{90,1}/2$, $A_{90,i} = A_i$.

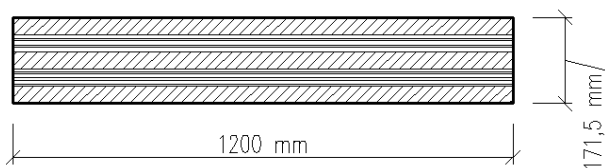
Dalsze obliczenia opierają się na standardowym podejściu PN-EN 1995-1 [3], przyjmując współczynnik modyfikujący wytrzymałość k_{mod} oraz współczynnik odzwierciedlający wpływ pełzania k_{def} jak dla sklejki [5]. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że norma PN-EN 1995-1-1 [3] wymaga aktualizacji w przypadku ww. współczynników - wprowadzenia osobnej rubryki dla CLT.

2. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

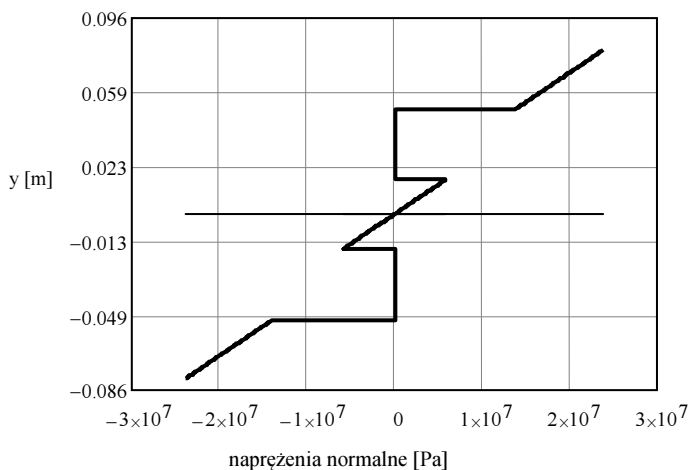
W niniejszym rozdziale przedstawiono przykład obliczeniowy, poddając analizie panel z drewna klejonego krzyżowo CLT (rys. 2) o następujących parametrach geometrycznych i materiałowych: $E = 1400$ MPa, $G_0 = 880$ MPa, $t_{CLT} = 0,1715$ m, $b = 1,2$ m, $n = 5$, $l_{CLT} = 3,05$ m. Przyjęto, że schemat statyczny układu to belka swobodnie podparta obciążona równomiernie siłą $q = 100$ kN/m. Dla powyższych założeń otrzymano maksymalny moment zginający $M = 116,3$ kNm oraz maksymalną siłę ścinającą $V = 152,5$ kN.

Wyznaczając sztywność zastępczą z zależności (2), tj.: $(EI)_{ef} = 4694,447$ kNm² oraz współczynnik efektywności połączenia $\gamma_1 = \gamma_3 = 0,834$ ($\gamma_2 = 1$), można otrzymać z zależności (6) i (7) naprężenia maksymalne przekroju:

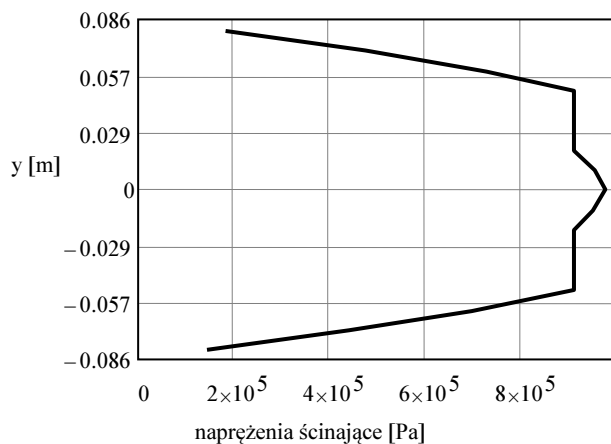
$\sigma_{\max} = 25,795 \text{ MPa}$, $\tau_{\max} = 0,978 \text{ MPa}$. Rezultaty obliczeń przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny analizowanego elementu



Rys. 3. Wykres naprężeń normalnych wg zależności (6)



Rys. 4. Wykres naprężeń ścinających wg zależności (7)

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono sposób wymiarowania elementów zginanych wykonanych z drewna klejonego krzyżowo CLT w ujęciu normy Eurokod 5. Do wymiarowania wykorzystano adaptację normowej metody, ujętej w Załączniku B, tj. metodę gamma. Jako uzupełnienie opisanej metody przedstawiono przykład obliczeniowy wykorzystujący pokazane podejście. Zaprezentowany sposób wymiarowania jest istotnym uzupełnieniem literatury krajowej, ale z pewnością nie wyczerpuje prezentowanego tematu. Uzupełnienia oraz dalszego rozwoju wymagają procedury dotyczące elementów dwukierunkowo zginanych, ściskanych i rozciąganych w płaszczyźnie płyty, nieujętych w normie PN-EN 1995-1-1, oraz procedury związane z elementami zespolonymi CLT-beton jedno- i dwukierunkowo zginanych i/lub ścinanych.

LITERATURA

- [1] Barbosa A.R., Blank C., Structural Tests of Concrete Composite-Cross-Laminated Timber Floors Final Report, Report No. 17-01.
- [2] Gagnon S., Pirvu C., CLT Handbook. Cross-Laminated Timber, C.A. Edition, FPInnovations, 2013.
- [3] PN-EN 1995-1-1. Eurokod 5. Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-1: Postanowienia ogólne. Reguły ogólne dotyczące budynków.
- [4] Bogensperger T., Silly G., Schickhofer G., Comparison of methods of approximate verification procedures for cross laminated timber, Research report, holz.bau forschungs gmbh, Graz 2012.
- [5] Thiel A., ULS and SLS design of CLT and its implementation in the CLTdesigner, European Conference on Cross Laminated Timber, 2013.
- [6] Jeleč M., Varevac D., Rajčić V., Cross-laminated timber (CLT) - a state of the art report, Građevinar: časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera 2018, 70, 75-95.

CALCULATION OF ELEMENTS SUBJECTED TO BENDING MOMENTS MADE OF CROSS LAMINATED TIMBER (CLT) ACCORDING TO PN-EN 1995-1-1

The article presents the method of calculating elements subjected to bending moments made of cross laminated timber CLT according to PN-EN 1995-1-1. The modification of the standard method based on the theory of mechanically joined beams is used for calculations. A calculation example using the shown approach is presented.

Keywords: cross laminated timber CLT, cross section calculation, gamma method