

ГРАНИЧНО СТАЊЕ УПОТРЕБЉИВОСТИ ДРВЕНИХ МЕЂУСПРАТНИХ КОНСТРУКЦИЈА

Драгослав Стојић¹
Радован Цветковић²
Стефан Цонић³
Немања Марковић⁴

УДК: 692.5:534

DOI:10.14415/konferencijaGFS 2015.018

Резиме: У раду је приказана анализа граничних стања употребљивости-вибрација дрвених класичних међуспратних конструкција и савремених дрвених међуспратних конструкција од унакрсно лепљеног дрвета (ЦЛТ панела) према Еврокоду 5. На основу нумеричких анализа може се закључити да динамичко понашање међуспратних конструкција зависи од већег броја различитих фактора од којих су најзначајнија два: крутост ЦЛТ панела и маса. Мањи утицај на динамичке карактеристике, с обзиром на вибрације, имају гранични услови ослањања, дебљина ламела у панелу и врста дрвета. У зависности од крутости и масе, основна фреквенција дрвених међуспратних конструкција је најчешће већа од 9Hz, што је изузетно важно с обзиром да је људски организам изузетно осетљив на фреквенције у опсегу од 4 до 8Hz. Прорачун вибрација међуспратних конструкција од ЦЛТ панела може се поједноставити у појединим случајевима користећи само крутост панела и масу као меродавне параметре, што је кроз одговарајуће примере и показано.

Кључне речи: Вибрације, ЦЛТ панели, еврокод 5, крутост, маса.

1. УВОД

Међуспратне конструкције објеката свих врста и намена, најчешће су изложене динамичком оптерећењу одређеног карактера и интензитета односно силама које изазивају вибрације појединих конструкцијских елемената и објеката у целини.

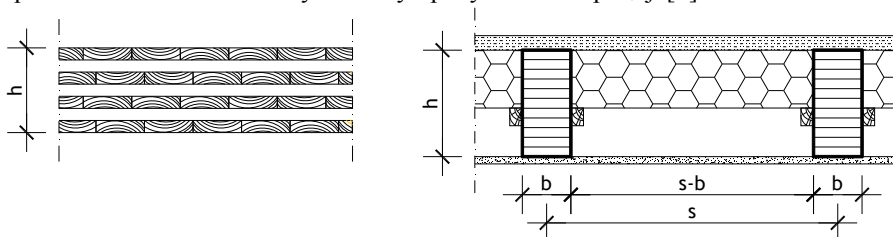
¹ Проф. др Драгослав Стојић, дипл.инж. грађ., Универзитет у Нишу, Грађевинско архитектонски факултет, Александра Медведева 14, Ниш, Србија, е – mail: dragoslav.stojic@gmail.com

² Асистент мр Радован Цветковић, дипл.инж. грађ., Универзитет у Нишу, Грађевинско архитектонски факултет, Александра Медведева 14, Ниш, Србија, е – mail: radovancvetkovic@yahoo.com

³ Сарадник Стефан Цонић, мастер инж. грађ., студент докторских студија, Стипендиста Министарства, Универзитет у Нишу, Грађевинско архитектонски факултет, Александра Медведева 14, Ниш, Србија, е – mail: stefanv1989@yahoo.com

⁴ Сарадник Немања Марковић, дипл. инж. грађ., студент докторских студија, Универзитет у Нишу, Грађевинско архитектонски факултет, Александра Медведева 14, Ниш, Србија, е – mail: nemanjamarovic85@gmail.com

Динамичко дејство на међуспратне конструкције најчешће је последица свакодневних људских активности, као и употреба различитих врста машина. Анализа и проучавање последица динамичког оптерећења се у прошлости углавном сводила на приближну апроксимацију и коришћење квази-статичких оптерећења као и одговарајућих еквивалентних статичких оптерећења, чиме су се занемаривали многи штетни ефекти динамичког дејства на конструкцију. Динамичко оптерећење, без обзира на интензитет, смер и карактер, проузрокује осцилације и вибрације које у одређеном опсегу могу бити штетне за конструкцију објекта, док у неким другим интервалима могу веома лоше утицати на људско здравље. У савременом грађевинарству се примењују различите врсте концепата пројектовања конструкција које се углавном заснивају на теорији граничних стања, док се за сам прорачун и динамичку анализу користе интардисциплинарни софтверски пакети који користе метод коначних елемената (МКЕ). Проблем граничних стања употребљивости (ГСУ) у савременом пројектовању конструкција постаје све значајнији с обзиром на све више и елегантније, а самим тим и лакше конструкције. Код конструкција од дрвета, с обзиром на малу запреминску тежину елеманата, поред основног захтева употребљивости, који се односи на угиб, морају се посебно анализирати и вибрације. Вибрације дрвених међуспратних конструкција најчешће настају индуковањем ударног оптерећења које настаје ходањем људи. Динамичке силе које настају ударом ноге приликом хода, могу се разложити на две компоненте према Ohlsson, 1991.[1]. Лабораторијским испитивањима као и тестовима *In situ* дошло се до закључка да се динамичке карактеристике међуспратних конструкција од унакрсно лепљеног дрвета веома разликују од динамичких карактеристика класичних дрвених као и од тешких бетонских међуспратних конструкција. Основна објашњења и разлози различитости у динамичким перформансама, огледају се пре свега у различитим запреминским масама као и у степену пригушења вибрација[1].



Слика 1. Међуспратна конструкција од унакрсно лепљеног дрвета и класична дрвена међуспратна конструкција

2. ПРОРАЧУН ВИБРАЦИЈА ДРВЕНИХ МСК ПРЕМА ЕВРОКОДУ 5

Европски правилник за дрвене конструкције [2] у делу 7, који се односи на гранично стање употребљивости, посебно третира вибрације индуковане машинама и људским ходом у стамбеним објектима. За основне фреквенције МСК стамбених објеката мање од 8Hz потребно је извршити посебна испитивања о штетности и утицају на људско здравље, међутим не прописује се начин тих посебних

испитивања, док се за случај већих фреквенција од 8 Hz захтева да испуне следеће критеријуме који се односе на ограничење максималног угиба као и на ограничење максималне почетне брзине вертикалне вибрације [2]:

1. Критеријум угиба од статичког концентрисаног оптерећења:

$$\frac{W}{F} \leq a \quad (\text{mm/kN}) \quad (1)$$

где је: W - максимални тренутни вертикални угиб услед вертикалне концентрисане силе аплициране у било којој тачки плоче узимајући у обзир дистрибуцију оптерећења; F - ветрикална концентрисана сила одређеног интензитета (1kN); a - представља величину угиба МСК конструкције за концентрисану силу $F=1\text{kN}$.

Граничне вредности угиба a директно зависе од распона МСК и те вредности су посебно дате у Националним анексима (НА) појединих земаља. Према Националном анексу Велике Британије [3], граничне вредности су дате:

- $a \leq 1.80\text{mm}$ за распоне МСК $l \leq 4000\text{mm}$
- $a \leq \frac{16500}{l^{1,1}}\text{mm}$ за распоне МСК $l > 4000\text{mm}$

Овако дефинисане вредности према [3], се упоређују са одговарајућим угибом:

$$\frac{1000k_{dist}k_{amp}l_{eq}^3}{48(EI)_{joist}} \leq a \quad (2)$$

где је: l_{eq} - еквивалентни распон греда МСК у (mm) у зависности од статичког система греда (за статички систем просте греде $l_{eq} = l$), $k_{amp} = 1,05$ - за МСК греде статичког система просте греде, $(EI)_{joist}$ - крутост на савијање међуспратних греда (Nmm^2), страчуната за средњу вредност модула еластичности E_{mean} .

$$k_{dist} = \max \left\{ \begin{array}{l} k_{strut} \left[0,38 - 0,08 \ln \left[\frac{14(EI)_b}{s^4} \right] \right] \\ 0,30 \end{array} \right\} \quad (3)$$

где је: k_{strut} - параметар који узима у обзир попречна укрућења међуспратних греда и најчешће је $k_{strut} = 1,0$, $(EI)_b$ - крутост на савијање међуспратне конструкције управно на правац носећих греда (Nmm^2/m), страчуната за средњу вредност модула еластичности E_{mean} , s - размак између носећих греда МСК у (mm).

2. Критеријум максималне брзине вертикалне вибрације проузроковане јединичним импулсом (1Ns)

$$v \leq b^{(f_i \zeta^{-1})} \quad (4)$$

где је: v - максимална почетна брзина вертикалне вибрације (m/s) проузрокована јединичним импулсом (1Ns) аплицираног на месту максималних утицаја, b - константа за контролу почетне брзине услед јединичног импулса. Еврокод 5 [2] даје граничне вредности ове константе у интервалу $50 \leq b \leq 150$, док за вредност угиба од јединичне силе даје граничне вредности $0 \leq a \leq 4$ (mm/kN), такође даје и

дијаграм који приказује функционалну везу између ових параметара. У напомени је дата опција да се ове вредности могу разликовати у зависности од Националног документа. Према НА Велике Британије [3]:

- $b = 180 - 60a$ за случај када је $a \leq 1.00mm$
- $b = 160 - 40a$ за случај када је $a > 1.00mm$

ζ - модално релативно пригушење вибрација који зависи од карактеристика саме међуспратне конструкције и најчешће износи 2% [3], f_1 - основна фреквенција међуспратне конструкције (Hz).

За правоугаоне дрвене међуспратне конструкције, димензија lxb , које су слободно ослоњене на све четири стране вредност v се може приближно одредити:

$$v = \frac{4(0,4 + 0,6n_{40})}{mbl + 200} \quad (5)$$

где је: b - ширина међуспратне конструкције (m), m - маса МСК по јединици површине (kg/m^2), l - распон носећих греда међуспратне конструкције.

$$n_{40} = \left\{ \left[\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left(\frac{b}{l} \right)^4 \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right\}^{0,25} \quad (6)$$

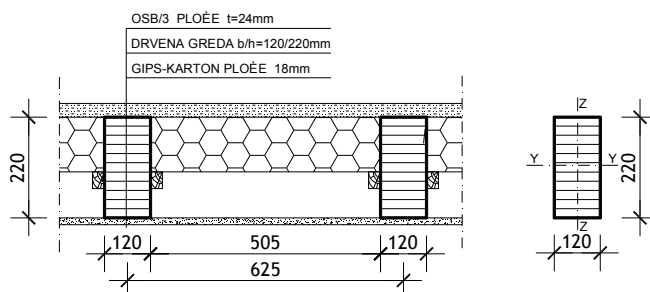
где је: $(EI)_l$ - крутост на савијање МСК конструкције око осе управне на правац носећих греда и $(EI)_b$ - крутост на савијање МСК око осе паралелне са гредама у (Nm^2/m), тј. $(EI)_b < (EI)_l$.

За правоугаоне дрвене МСК, димензија lxb , које су слободно ослоњене на све четири стране, Еврокод 5 [2] даје поједностављени израз за прорачун основних фреквенција:

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \quad (7)$$

3. НУМЕРИЧКИ ПРИМЕР

Анализирана је правоугаона класична међуспратна конструкција од дрвета димензија $lxb=4200 \times 5000mm$, слободно ослоњена на све четири стране. Сви носећи елементи (греде) су од лепљеног ламелираног дрвета класе чврстоће GL28h [2] на међусобном растојању од $s=625mm$, док је подна облога од OSB/3 плоча дебљине $t=24mm$, причвршћена одговарајућим завртњевима за греде (сл.2). На крају је за идентичне димензије плоче, а из услова да основна фреквенција буде иста, дата дебљина МСК од унакрсно лепљеног дрвета која је мања у односу на дебљину класичне МСК.



Слика 2. Геометријске карактеристике класичне дрвене МСК

1. Угиб од статичког концентрисаног оптерећења $P=1\text{kN}$

$$EI_{joist} = 12,6 \cdot 10^3 \cdot \frac{120 \cdot 220^3}{12} = 1,342 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2 \Rightarrow (EI)_l = \frac{E_{0,mean} \cdot I_{joist}}{s} = 2146636,80 \text{ Nm}^2$$

$$(EI)_b = 4,93 \cdot 10^3 \cdot \frac{1000 \cdot 24^3}{12} = 5,679360 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2, \quad s = 625 \text{ mm}, \quad k_{strut} = 1,0 \Rightarrow$$

$$k_{dist} = \max \left\{ k_{strut} \left[0,38 - 0,08 \ln \left[\frac{14(EI)_b}{s^4} \right] \right], 0,30 \right\} = \max \left\{ 0,43, 0,30 \right\} \Rightarrow k_{dist} = 0,43, \quad k_{amp} = 1,05,$$

$$l_{eq} = l = 4200 \text{ mm}, \quad l > 4000 \text{ mm} \Rightarrow a_p = \frac{16500}{l^{1,1}} = \frac{16500}{4200^{1,1}} = 1,71 \text{ mm}$$

$$a = \frac{1000 k_{dist} k_{amp} l_{eq}^3}{48(EI)_{joist}} \leq a_p \Rightarrow a = \frac{1000 \cdot 0,43 \cdot 1,05 \cdot 4200^3}{48 \cdot 1,342 \cdot 10^{12}} = 0,52 \text{ mm} < 1,71 \text{ mm}$$

2. Провера основних фреквенција

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{E_{0,mean} \cdot I_{joist}}{m}} = \frac{\pi}{2 \cdot 4,2^2} \sqrt{\frac{12,6 \cdot 10^9 \cdot \frac{1,0648 \cdot 10^{-4}}{0,625}}{35}} = 22,04 \text{ Hz} > 8 \text{ Hz}$$

3. Максимална брзина вертикалне вибрације услед јединичног импулса

$$\text{За } a \leq 1,00 \text{ mm} \Rightarrow b = 180 - 60a = 180 - 60 \cdot 0,52 = 148,80 \Rightarrow b = 148,80$$

$$v_p = b^{(f_1 \zeta^{-1})} \Rightarrow v_p = 148,80^{(22,04 \cdot 0,02^{-1})} \Rightarrow v_p = 0,06 \text{ m} / (\text{Ns}^2)$$

$$n_{40} = \left\{ \left[\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left(\frac{b}{l} \right)^4 \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right\}^{0,25} = \left\{ \left[\left(\frac{40}{22,04} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left(\frac{5,0}{4,2} \right)^4 \frac{2146636,8}{5679,36} \right\}^{0,25} = 6,46$$

$$v = \frac{4(0,4 + 0,6n_{40})}{mbl + 200} = \frac{4(0,4 + 0,6 \cdot 6,46)}{35 \cdot 5,0 \cdot 4,2 + 200} = 0,018m / (Ns^2) \Rightarrow v = 0,018m / (Ns^2) < v_p = 0,06m / (Ns^2)$$

На основу фреквенције $f_1 = 22,04Hz$ елементарним трансформацијама се може одредити дебљина плоче од унакрсно лепљеног дрвета у интервалу $d = 15,5cm \div 17cm$.

4. ЗАКЉУЧАК

Актуелни правилници [2],[4] који се базирају на концепту граничних стања у посебном делу третирају гранично стање употребљивости као неизоставни део прорачуна, где се поред угиба подразумева и контрола вибрација. Традиционалне контроле вибрација, које се углавном базирају на ограничењу максималног угиба, за случај великих рапона не могу дати поуздане резултате, с обзиром да не обухватају велики број фактора који утичу на понашање конструкције при динамичком оптерећењу. Савременим истраживањима доказано је да највећи утицај на динамичке карактеристике дрвених међуспратних конструкција имају подужна крутост МСК и маса, док су мање значајни утицаји као што су: гранични услови ослањања и врста дрвета. Основна фреквенција дрвених међуспратних конструкција стамбених објеката је најчешће већа од $9Hz$, што је изузетно важно с обзиром на удобност тј. комформност приликом свакодневних људских активности. Нумерички пример имао је за циљ да прикаже прорачун динамичких карактеристика према Еврокоду 5 као и упоредни приказ дебљине савремене међуспратне конструкције са истим динамичким карактеристикама. На основу тога може се закључити да савремене међуспратне конструкције од унакрсно лепљеног дрвета имају боље динамичке перформансе чак и за мање дебљине плоче, у односу на класичне МСК са носећим гредама од монолитног или лепљеног ламелираног дрвета.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] E. Karacabyli, B. Douglas, US.ed. *CLT handbook; cross-laminated timber*; Special publication, ISSN 1925-0495; SP-529E
- [2] Eurocode 5: *Design of timber structures* – Part 1-1:General - Common rules and rules for buildings. EN 1995-1-1:2004 (E).
- [3] UK National Annex to Eurocode 5 (BS EN 1995-1-1:2004+A1:2008): *Design of timber structures; BSI (2004)*.
- [4] DIN 1052:2004-08 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. (In German), Munchen, 2005.
- [5] TECHNICAL CHARACTERISTICS of CLT panels (KLH UK).

SERVICEABILITY LIMIT STATES OF TIMBER FLOOR STRUCTURES

Summary: *This paper presents a comparative analysis of serviceability limit states – vibrations of classic timber floor structures and modern timber floor structures of cross-laminated timber (CLT panels) according to Eurocode 5 (EC5). Based on the numerical analysis can be concluded that the dynamic behavior of CLT floor structures depends on a number of factors of which the most important are two: the longitudinal stiffness and mass of CLT panels. Less influence on the dynamic characteristics with regard to vibration, have factors such as: boundary conditions, thickness of the layers in panel and type of timber. Depending on the longitudinal stiffness and mass, fundamental natural frequency CLT floors structures is usually above 9Hz, which is important considering that the human body is extremely sensitive to frequencies in the range of 4 to 8Hz. Calculation of vibration flooring structures of CLT panels can be simplified in some cases using only the longitudinal stiffness of the panel and mass as authoritative parameters.*

Keywords: *Vibrations, CLT panels, Eurocode 5, longitudinal stiffness, mass.*