

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Урбано инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Предмет: Металне и дрвене конструкције

Број индекса: 924/2014

Ивана Ј. Спасојевић

Савремене дрвене конструкције од лепљеног ламелираног дрвета дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Весна Марјановић, ванр.проф. -
ментор
2. _____
3. _____

Датум
одбране: _____

Оцена: _____

Оквирни садржај дипломског рада:

- Увод
- Карактеристике дрвета и елемената од лепљеног ламелианог дрвета (ЛЛД),
- Предности, примена у савременим констукцијама,
- Типови, монтажа и транспорт ЛЛД,
- Примери реализованих конструкција од ЛЛД,
- Пример прорачуна ових конструкција,
- Закључак

Препоручена литература:

[1] Митровић С.,: Металне и дрвене конструкције 2, Висока грађевинско геодетска школа у Београду, Београд 2011.

[2] Гојковић М.,: Дрвене конструкције, Научна књига и Грађевински факултету Београду, Београд 1983.

[3] Кујунџић В.,:Дрвене конструкције у мојој архитектонској пракси, аутомонографија, ЛКВ центар Београд, Архитектонски факултет у Београду и ИАС, Београд 2014.

Крагујевац,
Октобар , 2018

Предметни наставник:
Др Весна Марјановић, ванредни професор

Садржај

Увод:	6
1. Дрво	7
1.1. Унутрашња грађа дрвета	8
1.2. Физичке особине дрвета	8
2. Лепљено ламелирано дрво (ЛЛД)	10
2.1. Историјат конструкција лепљеног ламелираног дрвета	10
2.2. Процес производње лепљеног ламелираног дрвета	11
2.2.1. Лепкови	12
2.2.2. Противпожарна заштита	13
2.3. Предности ЛЛД-а	14
2.4. Крстасто ламелирано дрво (КЛД)	15
3. Конструктивни елементи од ламелираног дрвета	17
3.1. Линијски носачи	18
3.2. Панели од ламелираног дрвета	26
3.3. Транспорт	27
3.4. Монтажа	28
4. Прорачун лепљених ламелираних конструктивних елемената	30
4.1. Прорачун лепљених ламелираних носача	30
4.1.1. Основни допуштени напони	30
4.1.2. Прорачун деформација	31
4.1.3. Редослед прорачуна просте греде са константном висином	32
4.2. Димензионисање панела од ламелираног дрвета	33
4.2.1. Gamma метод	33
4.2.2. К-метод	34
4.2.3. Kreuzinger-ова аналогија	37
4.2.4. Прорачун зидних панела	38
5. Објекти од лепљеног ламелираног дрвета	39
5.1. Спортски објекти	39
5.2. Базени	39
5.3. Комерцијални објекти	40
5.4. Стамбени објекти	41
5.5. Индустијски и пољопривредни објекти	42
5.6. Пешачки мостови	43
6. Примери савремених конструкција изведених од лепљеног ламелираног дрвета	44
6.1. Стамбена зграда Forte у Мелбурну	44
6.2. Заштитна конструкција над Виминацијумом	44
6.3. Средња школа у Норичу	46
Пример прорачуна	47
Поставка задатка	47
Закључак	50
Литература	51

Abstract:

The wood is one of the oldest construction materials and thanks to his extraordinary abilities has large uses in modern architecture. Using new technologies of wood processing making new goods which structural characteristics are significantly improved. On that way were obtained glued laminated timber (glulam) and cross-laminated timber (CLT). This work are included basic wood characteristics as construction material, than history of using wood, production process and benefits of glued laminated timber. Special attention dedicated to constructive elements and their using in building of modern construction. Here are described transport and montage mentioned elements and a way of their dimensioned. According to the topic are described objects whose structural assemblies made of glued laminated timber or cross-laminated timber, as well as the reasons for which is the use of glulam and CLT in the construction is preferred. Also, examples of some of the realized constructions are given in this work.

Key words:

Wooden structures
Glued laminated timber
Cross-laminated timber
Structural elements
Glulam carrier
CLT panels
Modern construction

Резиме:

Дрво се сматра једним од најстаријих грађевинских материјала, а захваљујући својим изузетним својствима велику примену има и у савременој архитектури. Применом нових технологија обраде дрвета настају нови производи чије су структурне карактеристике значајно побољшане. На тај начин добијени су лепљено ламелирано дрво (ЛЛД) и крстасто ламелирано дрво (КЛД). Кроз рад обухваћене су основне карактеристике дрвета као грађевинског материјала, затим историјат, процес производње, као и предности лепљеног ламелираног дрвета. Посебна пажња посвећена је конструктивним елементима и њиховој примени при изградњи савремених конструкција. Описани су транспорт и монтажа поменутих елемената, као и начин на који се димензионишу. У складу са темом описани су објекти чији се конструктивни склопови израђују од лепљеног ламелираног и крстасто ламелираног дрвета, као и разлози због којих је примена ЛЛД-а и КЛД-а при њиховој изградњи пожељна. Такође су дати примери неких од реализованих конструкција.

Кључне речи:

Дрвене конструкције
Лепљено ламелирано дрво
Крстасто ламелирано дрво
Конструктивни елементи
Ламелирани носачи
КЛД панели
Савремене конструкције

Увод:

Савремено зградарство захтева употребу пре свега одрживих материјала. Што значи да поред тога што морају да задовоље захтеве у погледу стабилности, трајности, естетике, економичности и сл. њихов утицај на животну средину би требало да буде што мањи. Управо једним таквим материјалом се сматра дрво. Пре свега дрво је биоразградив материјал, спада у групу обновљивих ресурса, а у процесу раста упија угљен-диоксид из атмосфере.

Дрво се као грађевински материјал користи још од најстаријих времена и дуги низ година је, поред камена, представљао основни материјал за грађење. Иако су се временом смењивали разни материјали од којих су прављени објекти, дрво је опстало, а у задњих пар деценија поново добија на популаризацији и све чешће се представља као основни конструктивни материјал. Дрво се одликује низом особина који су изузетно цењени у зградарству и то је основни разлог због ког опстаје толики временски период. Поред тога што га карактеришу мала тежина, постојаност, велика чврстоћа, добра изолациона својства и тако даље поседује и изузетна естетска својства, каква се не могу наћи код других материјала, па се често може уочити на значајним архитектонским делима широм света. Међутим дрво није идеалан материјал, па поред широког спектра позитивних особина, поседује и мане. Како би се те мане сузбиле, развијају се разни облици технологије прераде дрвета, заштите и одржавања. Како би механичке особине дрвета биле што уједначеније развио се нови производ од дрвета, лепљено ламелирано дрво или скраћено ЛЛД. Он се добија спајањем дрвених елемената подједнаке ширине коришћењем различитих врста лепкова. Из лепљеног ламелираног дрвета се нешто касније развио производ под именом крстасто ламелирано дрво (КЛД). И лепљено и крстасто ламелирано дрво су настали из тежње да се побољшају карактеристике дрвета. Велику примену имају у изради конструктивних елемената, у виду носача и панела, који омогућују лаку и брзу градњу, а настали објекти се сматрају изузетно трајним и стабилним. За изградњу објеката коришћењем ЛЛД-а или КЛД-а потребно је знатно мање времена, али и енергије у поређењу са објектима од бетона. Како су објекти монтажни, врло лако их је, уколико је то потребно, демонтирати. Носачи се обликују у складу са захтевима функције објеката, па се тако од овог материјала могу градити готово све врсте објеката, укључујући стамбене, индустријске, комерцијалне, спортске и сл. Дрво се релативно лако обрађује, па се носачи могу производити у разним облицима, а пројектовани објекти могу имати најразличитије форме.

1. Дрво

Дрво је природни материјал који се сматра изузетно вредним и квалитетним материјалом у грађевинарству. Расте из семенке или из изданака корена исте врсте и под повољним условима се развија у стабло. Стабло се састоји из три дела: корена (са жилама у земљи), дебла (масивни део стабла над земљом) до прве веће гране, где почиње крошња. Карактеришу га изузетно повољна биолошка својства, која се у том облику не могу наћи ни код једног другог материјала. Структурни састав дрвета чине целулоза и лигнин (до 80%), вода (17%) и излучујуће супстанце (најмање 3%). Хемијски састав дрвета варира у зависности од врсте, али се оквирно може усвојити да дрво као материјал садржи око 50% угљеника (C), 42% кисеоника (O), 6% водоника (H), 1% азота (N) и 1% других елемената (углавном натријум, калијум, калцијум, магнезијум, манган итд.) [1].

Дрво се као грађевински материјал јавља још у праисторији када се користило као један од основних конструкционих елемената за израду првенствено склоништа, а нешто касније и сојеница поред воде, док се изградња првих озбиљнијих објеката везује за појаву првих цивилизација. Данас овај органски материјал има веома широку примену, а посебно значајну улогу има у грађевинарству, где се користи при изради кровних конструкција, ентеријера, унутрашњег степеништа итд. Разлози због којих се дрво примењује нашироко се углавном везују за његове особине, као што је:

- мала тежина
- релативно лака обрадивост,
- велика чврстоћа,
- постојаност,
- добра изолациона својства,
- висок степен еластичности,
- реалтивно лако се може обрадити или поново употребити,
- нема отпада при обради и сл.

Иако се дрво одликује читавим низом повољних карактеристика, не може се сматрати идеалним материјалом обзиром да поседује одређене недостатке:

- запаљиво је,
- трули услед присуства влаге,
- може доћи до његовог оштећења услед изложености инсектима и бактеријама,
- ортотропно је (ортотропан или ортогонално изотропан - материјал који има различите особине у два или три међусобно управна правца).

Обзиром да претходно поменуте мане могу озбиљно да утичу на трајност и сигурност конструкције, неопходно је да се оне максимално ублаже, што се данас углавном постиже коришћењем одговарајућих премаза за прве три поменуте мане.

Маном дрвета се сматра и његова особина да је ортотропно. Ово је са друге стране разлог настанка лепљених ламелираних конструкција и крстасто ламелираних (ЛЛД и КЛД).

У зависности од намене и тражених карактеристика користе се различите врсте дрвета, које могу бити из породице четинара (јела, бор, смрека, ариш и сл.) или лишћара (храст, буква, брест, јасен, бреза итд.). Понекад се могу користити и неке егзотичне врсте, које углавном расту у тропским пределима: махагони, кедар, абонос итд., које честу примену имају при изради намештаја и ентеријера, због својих естетских својстава.

1.1. Унутрашња грађа дрвета

Грађа дрвета се најбоље може видети на одређеним пресецима и различито изгледа у трансверзалном, радијалном и тангенцијалном пресеку [1].

Трансверзални пресек се другачије назива попречним (слика 1) и на њему се могу уочити три зоне:

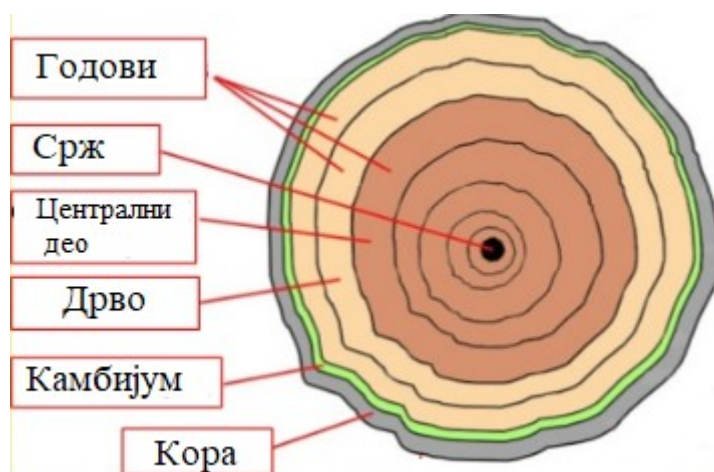
- централни део
- средњи део
- омотач

Централни део који представља срж заузима свега неколико центиметара у пречнику и по правилу је тамније боје од околне грађе дрвета.

Средњи део у виду концентричних кругова, година, се налази око сржи. Годови или годишњи прстенови се међусобно разликују по ширини и другим детаљима, тако на пример годови који су ближе сржи су тамније боје и они се називају срчевима, док се светлији део, ближи периферији дебла, назива белјика или белјиковина.

Омотач се састоји из камбијума, лике и спољашње мртве коре. Камбијум представља слој који омотава белјиковину и састоји се од ћелија које сваке године деобом стварају нови год белјиковине. Кроз тај слој пролазе непрерађени сокови, ћелије са друге стране стварају појас лике кроз који пролазе прерађени сокови. Камбијум и лика су са спољне стране заштићене кором, која у зависности од врсте дрвета може бити глатка или испуцала.

Радијални пресек представља уздужни пресек по средини дрвета, а пресек паралелан радијалном се назива тангенцијални пресек.



Слика 1. Унутрашња грађа дрвета [19]

1.2. Физичке особине дрвета

Физичке особине дрвета зависе пре свега од врсте дрвета, али и од низа других фактора као што су земљиште на коме је дрво расло, клима, старост влажност итд. [1].

- Оптичко дејство је одређено бојом и текстуром дрвета. Боја у зависности од врсте може ићи од беличасте до црне боје. Текстура може бити правилна, пругаста, таласаста, неправилна и чворновата. Она зависи од врсте дрвета, али и од места пресека. Најразличитије естетско дејство дрвета постиже се управо комбинацијом различитих боја и текстуре.

- Специфична маса представља масу чисте дрвене супстанције, без пора и шупљина и код свих врста је приближно иста – између 1500 и 1560 kg/m³.
- Запреминска маса обухвата и поре и њихов садржај. Може бити добар показатељ многих особина дрвета, на пример: чврстоће на притисак, тврдоће и еластичности. Запреминска маса зависи од старости дрвета, места са ког је узет узорак, влажности, правилности грађе итд.
- Порозност представља проценат пора у односу на запремину потпуно сувог дрвета. Најчешће зависи од врсте дрвета и његове старости. Дрво се сматра порозним материјалом, али поре нису равномерно распоређене, тако да порозност зависи од места са ког је узет узорак.
- Добре акустичне особине дрвета су нашироко познате, те се оно често користи при изради музичких инструмената и у концертним салама, ради постизања просторне акустике. Обзиром да је дрво порозан материјал, добро прима и преноси звук, не сматра се повољним материјалом у погледу звучне изолације. Али се оваква слабост дрвета може ублажити испунама за звучну изолацију.
- Проводљивост топлоте – с обзиром на порозну структуру, дрво је добар топлотни изолатор. Дрво боље проводи топлоту у правцу влакана него попречно на поменути правац. Такође проводљивост се повећава повећањем запреминске масе и влажности.
- Однос према пожару – дрво представља запаљив материјал, али се применом различитих заштитних средстава може учинити теже запаљивим. Одређени грађевински дрвени елементи, великих пресека, се боље понашају у пожару од многих незапаљивих материјала, као што је на пример челик. Услед слабе проводљивости топлоте, спољни слојеви дуж не преносе топлоту на унутрашњост пресека. Због минималних промена у димензијама, греде и стубови се при промени температуре једва деформишу. Насупрот металима и пластичним масама повећањем температуре механичке чврстоће дрвета опадају полако и континуално.

2. Лепљено ламелирано дрво (ЛЛД)

Лепљено ламеларно дрво (слика 2) представља грађевински материјал који се добија од танких дрвених елемената подједнаке ширине (дасака) постављених један преко другог, слепљених у међусобним спојним равнима одговарајућом врстом лепка под одређеним условима. Овакав материјал има механичке карактеристике које су уједначеније од механичких карактеристика масивног дрвета-материјала од којег је лепљено ламелирано дрво настало. Углавном све врсте дрвета које се користе за израду класичних дрвених конструкција се могу применити и за израду лепљених конструкција, али са пуно више пажње приликом избора. Дрво које је намењено изради лепљених ламелираних конструкција мора бити здраво и без грешака, суво са максимално 15% влажности. Процес производње се обавља у фабрикама тако да конструктивни елементи од лепљеног ламелираног дрвета представљају индустријске производе стандардизованих квалитета. Овакви конструктивни елементи се одликују изузетним инжењерским, економским и естетским квалитетима. Применом ЛЛД-а у савременом зградарству стварују се конструкције изузетне трајности и стабилности. Поред тога објекти се карактеришу изузетном естетиком, суптилном конструкцијом и топлином ентеријера.



Слика 2. Лепљено ламелирано дрво [20]

2.1. Историјат конструкција лепљеног ламелираног дрвета

Лепљене конструкције од дрвета су биле познате још у Старом Египту, о чему сведоче трагови лепљених предмета и цртежа који су откривени у гробницама фараона. На основу историјских списа, грчке и римске културе су за лепљење дрвета користиле лепак биљног и животињског порекла. Масивна производња конструкција од лепљеног дрвета се везује тек за почетак XX века. Наиме 1906. године је пријављен патент од стране Otto-a Hetzer-a који се односио на дрвене елементе састављене казеинским лепком. Међутим патент бива откупљен од стране швајцарских инжењера Terner-a и Chopard-a 1909. године који пројектују и изводе

многе објекте користећи управо ЛЛД конструкције, једна од најпознатијих је бивши институт за хигијену у Цириху, данашња зграда ректората, на којој се и данас може видети ова кровна купола у облику звона [3].

У Америци у Чикагу 1920. године започиње примена лепљеног ламелираног дрвета. Прво се користило за израду појасних штапова решетке, док су дијагонале израђиване од резане грађе. Већ тридесетих година направљена је прва лепљена ламелирана конструкција, чиме започиње нова епоха историје грађења дрветом у Америци.

Прва оваква конструкција у СССР-у направљена је 1938. године и за њену израду је било потребно пуно времена и труда, без посебне гаранције квалитета. Њихова шира примена почиње тек педесетих година.

У периоду од 1930. до 1941. године лепљене ламелиране конструкције се користе као лучни носачи за изградњу фарми. Међутим њихова примена у овом периоду је ретка. За време Другог светског рада, услед несташице челика и све већих захтева за новим војно индустријским објектима, јавља се потреба за дрвеним конструкцијама. Како класичне дрвене конструкције нису могле да задовоље новонастале потребе појачана су истраживања у проналажењу адекватног решења, што резултира успешном применом водоотпорних лепкова. У Канади се производе прве лепљене ламелиране конструкције 1941. године, у ратним условима. Војна складишта у близини Торонта распона око 13 m, садржала су око 545 лепљених везача. У Базелу, у Швајцарској, је 1941/1942. године изграђена изложбена хала од ЛЛД-а распона 45 m, што је за то време био рекорд.

Конструкције од лепљеног дрвета у данашњем облику постају познате тек 50-их година, настале у складу са развојем синтетичких лепкова, прво у Северној Америци, а потом и у Западној Европи [5].

2.2. Процес производње лепљеног ламелираног дрвета

Производња лепљеног ламелираног дрвета се изводи у халама и радионицама које морају бити специјално опремљене за овакву врсту послова. Поред тога радници који обављају овакав посао морају да буду адекватно обучени и упознати са поменутом врстом посла. Температура унутар производних хала треба бити константна и то тако да је мања или једнака 20°C, али никако мања од 17°C. Такође је потребно омогућити релативну влажност ваздуха од око 60%, али и довољно велики простор за смештај машина [4].

Резана грађа која се користи при изради лепљеног ламелираног дрвета се разврстава према врсти, димензијама, квалитету и сл., након тога се транспортује до сушаре где се процесом сушења влажност грађе доводи до вредности < 20%. То се постиже у специјалним затвореним просторима, струјањем ваздуха, прегрејном паром или неким другим поступком. Бар седам дана пре лепљења елементи ламината (дрво) се преносе из сушаре и лагерију на адекватан начин у радионици, тј у простору у коме ће се вршити лепљење. Површине ламела се пре почетка лепљења морају квалитетно очистити од прашине и сличних штетних материја, а такође се не смеју допустити ни масне мрље, па из тог разлога, радници морају имати чисте рукавице. Уколико се приликом припремања ламела утврде одређене грешке, које могу бити биолошког или механичког карактера, исте се одстрањују одсецањем и замењују исправним уметцима. Приликом убацивања уметака треба водити рачуна да уметци буду од исте врсте дрвета, као и да се правци влакана поклапају са влакнима ламела. Обрађене површине морају бити равне и глатке, неравнине од откинутих комада и зарези од алатки нису допуштени. Зато се на ове површине не утискују никакве ознаке. Израда једне

лепљене конструкције изводи се на унапред припремљеном равном поду просторије. Наношење претходно припремљеног лепка се врши машински. Лепљење ламела после слегања у пакет пројектованих димензија и облика изводи се под притиском. Притисак се реализује помоћу посебно конструисаних преса и стега и мора бити равномерно распоређен. Да би се остварио равномерни притисак испод стега односно преса се постављају довољно велики подметачи. Потребно време за држање слепљеног елемента под притиском зависи од врсте и квалитета употребљеног лепка и микроклиматских услова у просторији у којој се ради. Надпритисак приликом лепљења може да се оствари и уз помоћ ексера, али се овакво стварање притиска само у одређеним случајевима, на пример код сандучастих и I носача. Када се процес слепливања заврши следи контрола тачности димензија, што се односи на упоређивање димензија формираног носача са пројектованим. Након тога ламеле се транспортују до блањалице специјалним колицима. Машине за блањање у пракси имају радну ширину отприлике 2200 mm. Обоостраним блањањем носачи се доводе на пројектовану ширину пресека. Површине ламела након обављеног процеса морају бити равне и глатке. Следи контрола квалитета лепљења и наношење заштитног средства. Поред заштите као основног циља, заштитни премази дају и жељени тон носачима. У погону се наносе најмање два слоја адекватног премаза, а трећи односно завршни слој се наноси након монтаже. Завршним премазом дрво се штити од гљивица и инсеката, али се такође тиме спречава повећање влажности, односно смањује се ризик од пропадања дрвета [4].

2.2.1. Лепкови

Лепкови представљају супстанце које поседују способност трансформације из лепљивог у чврсто стање, при чему спојене елементе монолитизује. Управо ове супстанце се користе као спојно средство за настављање ламела, попречно и подужно, и међусобно спајање у монолитан пресек. Спајање елемената се врши наношењем лепка на додирне површине дрвета. Захваљујући механичким својствима лепка, деформација слоја у спојној равни је толико мала да се спој изведен коришћењем лепка може сматрати готово круто-недеформабилним. Управо ово својство представља основну и најважнију разлику између лепка и других спојних средстава, код којих се јавља извесна померљивост у спојним равнима.

Лепкови који се користе као спојно средство код дрвених конструкција морају поседовати задовољавајућу чврстоћу током времена, али исто тако морају бити отпорни на органске и неорганске материје, пожар, хемијске утицаје и сл. У зависности од врсте лепка примењују се и различити технолошки поступци производње. За потребе лепљеног ламелираног дрвета користе се искључиво лепкови који одговарају важећим стандардима и Прописима за дрвене конструкције.

Подела лепкова се може извршити у односу на различите посматране критеријуме, нпр. према агрегатном стању, материјалу који се лепи, саставу, начину лепљења, еластичности и др. Тако на пример према начину лепљења у зависности од температуре лепљења постоји подела на:

- хладне лепкове, који везују при температури од 15 до 20 °C
- темперирани лепкове, са радном температуром од 20 до 25°C
- топле лепкове, чија је радна температура 50-80°C
- вруће лепкове, када радна температура износи од 80 до 160°C.

Код лепљених ламелраних конструкција примењују се синтетички лепкови, односно лепкови на бази синтетичких смола; фенолни, резорцински, меламински лепкови и сл [4].

2.2.2. Противпожарна заштита

Приликом загревања дрвета из површинских слојева се издваја влага у виду водене паре, а након тога почиње процес хемијског разлагања органских материја при чему се излучују лако запаљива угљоводонична једињења, најчешће етан и метан. Како се дрво даље загрева тако се јављају производи пиролизе, а на крају остаје само чврсти угљенични остатак, односно дрвени угаљ. Како би се овакве негативне особине дрвета свеле на што мању меру користе се хемијска средства заштите. Дрво се штити тако што се утицај деловања нискокалоричних извора горења смањи у највећој мери или пак у потпуности искључи, чиме се неконтролисани развој пожара спречава. Заштитна хемијска средства представљају индустријске производе који се у условима пожара распадају при врло ниским температурама. Њиховим распадањем се на површини ствара повећана количина тврдог остатка горења, чиме се смањује излучивање нових количина горивих гасова. Током одређеног времена се развијају гасови који нису гориви и који смањују концентрацију излучених гасова, при чему се ствара незапаљива смеша. Заштитни премази се морају одликовати следећим особинама:

- Добра постојаност
- Неосетљивост на влагу
- Нерастворљивост у води
- Не смеју испаравати
- Не смеју бити токсични.

Користе се две врсте заштите хемијским средствима:

1. Површинска заштита, која се односи на заштиту бојењем и
2. Дубинска заштита, односно заштита импрегнацијом.

Средства за заштиту дрвета се још називају и антипири и у пракси се најчешће користе следећа хемијска средства, која се могу примењивати самостално или у комбинацији:

- БОРАКС, натријумова со борне киселине, приликом сагоревања се претвара у стакласту масу. Користи се у комбинацији са другим материјалима.
- БОРНА КИСЕЛИНА се сматра добром заштитом од пожара. Као и боракс, приликом сагоревања се претвара у стакласту масу.
- ДИАМОНИЈУМ ФОСФАТ штити дрво од прихватања пламена, нарочито код продуженог тињања након уклањања пламена.
- АМОНИЈУМ СУЛФАТ се топи при температури од 357°C када се распада на инертне гасове. Може бити опасан по окове, обзиром да на метале делује разорно.
- ЦИНК ХЛОРИД се користи у комбинацији са другим средствима.
- АМОНИЈУМ ХЛОРИД већ при температури од 385°C постаје запаљив уз излучивање многих гасова, па се мора користити искључиво у смеси са другим материјалима.

Поменута заштитна средства се наносе у количини од 300 до 500 gr/m^2 , штите дрвену конструкцију од нискокалоричних извора пожара тако што омогућују одлагање

прихватања пламена који може бити изазван електричним кваровима, грејањем објеката или услед расуте мање количине бензина.

Дубинска заштита дрвета се врши импрегнацијом у аутоклавима под притиском од 8 до 18 бара, у временском трајању од 2 до 20 h, при чему се добија тешко горив материјал. Овакав вид заштите се ретко примењује због високе цене [5].

2.3. Предности ЛЛД-а

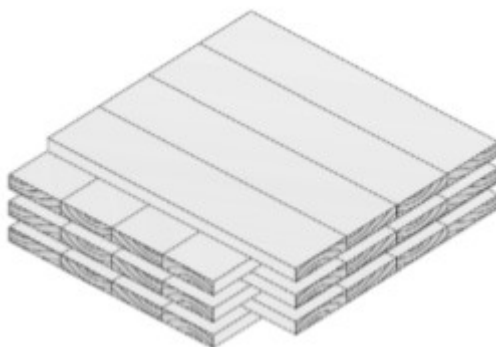
Лепљено ламелирано дрво поседује низ повољних карактеристика, неке од њих су:

- Велики распони, због добрих карактеристика лепљеног ламелираног дрвета могуће је извођење конструкција распона чак и преко 100m.
- Бројне могућности обликовања, што омогућује већу флексибилност и слободу при пројектовању,
- Велика отпорност на пожар. Дрво је једини грађевински материјал који горењем не мења битно своја механичка својства. Брзина горења дрва износи од 0,4 - 0,8mm/min. У случају пожара лепљено ламелирано дрво је сигурније од незаштићене челичне конструкције. Када ватра захвати лепљено ламелирано дрво спољни део нагорева тако да штити саму средину греде. Тако долази до смањења дотока ваздуха што резултира лаганим гашењем ватре. Најчешће није потребна додатна заштита противпожарним премазима.
- Постојаност, лепљено ламелирано дрво је потпуно стабилан и постојан грађевински материјал. Дрво од којег се производи се посебним поступком сушења доводи до нивоа влажности на приближно 12%. Тај постотак је пропорционалан количини влаге при температури од 20°C и влажности ваздуха од 65%. Као резултат се добија лепљено ламелирано дрво чија је природна појава исушивања и упијања сведена на минимум. Дрво остаје потпуно слободно чиме се спречава настанак пукотина и савијања у просторима где је влажност ваздуха мала.
- Велике механичке чврстоће, сматра се да је ЛЛД један од најјачих материјала по јединици тежине.
- Отпорност, лепљено ламелирано дрво је отпорно на агресивне хемијске супстанце. Па је изузетно прикладно за градњу складишних простора у којима ће се чувати материје и материјали попут киселина, соли, гнојива. Отпорно је на амонијак па има врло широку примену у изградњи пољопривредних објеката - фарми.
- Еколошка прихватљивост, лепљено дрво ламеларне структуре је изврсно у чувању и складиштењу штетних гасова стаклене баште попут CO₂, прикупљених из атмосфере током дугог раста дебла. Па се употребом ЛЛД доприноси смањењу гасова стаклене баште.
- Обновљиви извори, сировина која се користи у производњи се углавном добавља из Хрватске, Аустрије, Немачке и Швајцарске. Те шуме се експлоатишу строгим планинским сечама, чиме се поштује начело да се сади више него што се сече. Дакле материјал је стално доступан будући да се шуме стално пошумљују.

2.4. Крстасто ламелирано дрво (КЛД)

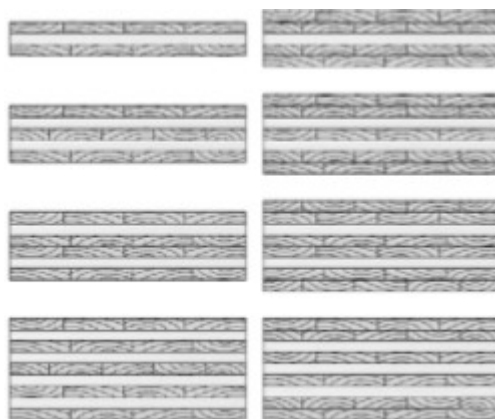
Крстасто или унакрсно ламелирано дрво представља једну од последњих иновација када је реч о дрвним производима намењених градитељству. Настало је релативно скоро, почетком садашњег века, у Аустрији, али је за кратко време освојило Западну Европу, док се у Америци, Канади, Новом Зеланду и Аустралији успешно развија.

Унакрсно ламелирано дрво је модеран производ који је у многоне унапредио физичке карактеристике монолитног дрвета. Добија се слојевитим унакрсним лепљењем и тако настали материјал поседује уједначеније механичке карактеристике у односу на монолитно дрво. Слојеви меког дрвета се постављају тако да влакна дрвета буду међусобно под правим углом. Унакрсним слагањем се пружа стабилност и уз већу дебљину слојева се добијају панели који су довољно јаки да се користе као конструктивни елементи без додатног ојачања (слика 3) [6].



Слика 3. Шематски приказ унакрсног слагања ламела [7]

Попречни пресеци (слика 4) садрже најмање три ламеле, а најчешће пет или седам. Висина ламела може варирати и оквирно се креће од 16 mm до 51 mm. Овакви елементи се могу употребљавати као плоче или као зидови. Своју примену налазе у стамбеним, пољопривредним објектима, објектима намењеним одмору и сл. Користе се код изградње нових објеката, али и приликом санације већ постојећих. Важно је напоменути да се примењују у свим задатим условима, па чак и у сеизмичким зонама високог ризика. Сам материјал се сматра еколошким, обзиром да представља изузетно ефикасно складиште CO₂. У поређењу са бетоном представља скупљи материјал, међутим уколико се у обзир узме брзина и начин градње, сматра се повољнијим избором, чак и са економског становишта [7].



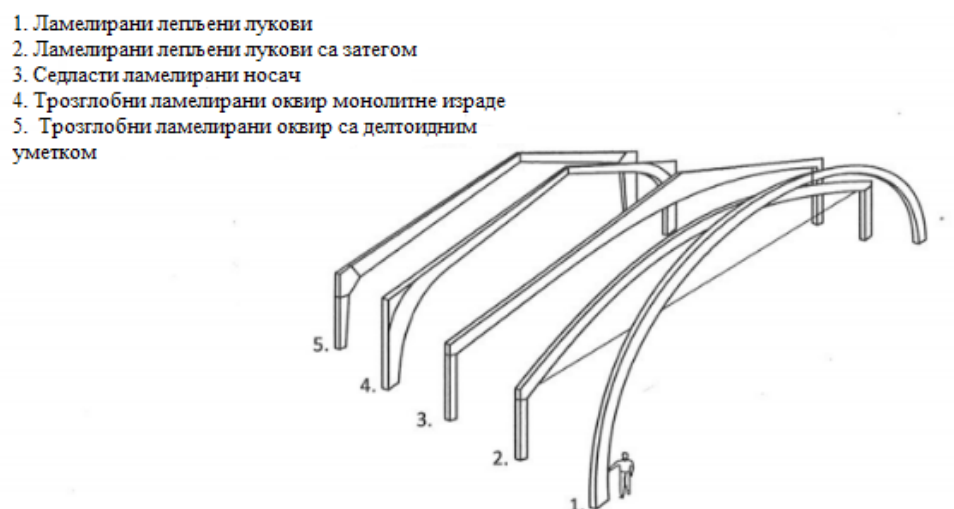
Слика 4. Попречни пресеци КЛД ламела [7]

3. Конструктивни елементи од ламелираног дрвета

Како би задовољили све захтеве било да се тичу естетике, функционалности, стабилности, трајности, утицаја на околину, савремени конструктори непрестано трагају за новим материјалима, техникама и технологијама како би конструкције испуниле сва очекивања уз што мање трошкове. Обзиром да лепљено ламелирано дрво поседује широк спектар предности над другим конструктивним материјалима све чешће има доминантну улогу приликом изградње модерних конструкција. Савремени конструктивни системи од лепљеног ламелираног дрвета дају велики број могућности пројектантима при проналажењу оптималних решења за конструкције објеката. Објекти сачињени од оваквих конструктивних система су монтажни, јер се елементи транспорју до места градње као готови производи, а везе између њих се изводе под тренутним условима на самом градилишту. Транспорт и монтажа представљају кључне параметре од чега зависи реализација пројеката. Најчешће примењивани конструктивни системи за израду носивих и кровних структура су по правилу линијски носачи, који морају бити прилагођени условима и технолошким захтевима, а такође и захтевима транспорта. Најпростијим линијским носачем се сматрају они са попречним пресеком у виду правоугаоника са простим штаповима. Нешто сложенијим се сматрају носачи трапезног, седластог и закривљеног облика, приказани сликама 5 и 6. Трапезном геометријом се одликују носачи чије су висине попречних пресека променљиве дуж уздужне осе. Овакви облици се добијају закошавањем екстрадоса, односно горње стране носача или интрадоса, доње стране или у одређеним случајевима обе стране. Код оваквих носача се ламеле полажу паралелно распону. Седласти носачи могу бити константног или променљивог попречног пресека и имају различиту висину по целом распону или само у слемени. Уз типске геометријске облике веже се појам сложеног напрезања као последица њиховог обликовања. Како транспорт елемената зависи од саобраћајних услова и прописа, за конструкције већих распона се морају предвидети монтажни наставци или на одређеним местима појава зглобних веза штапова.



Слика 5. Примери носача од лепљеног ламелираног дрвета [3]



Слика 6. Примери носача од лепљеног ламелираног дрвета [3]

Са развојем крстастог ламелираног дрвета појављују се нови носећи елементи у виду плоча и панела, који такође представљају монтажне готове производе. Због брзе и релативно лаке монтаже имају све чешћу примену у пракси, а нарочито приликом изградње стамбених објеката.

3.1. Линијски носачи

Типски ламелирани носачи могу бити различите израде и облика, естетски врло занимљиви и врло захтевни у конструктивном смислу. Штапови од лепљеног ламелираног дрвета не морају бити равни, већ могу бити изведени са једноструком или вишеструком кривином, а то не утиче на технолошки процес производње или начин уградње, који је увек монтажан. Ова чињеница омогућава пројектантима да креирају објекте најразличитијих облика и форми. Код лепљених ламелираних конструкција тешко је одвојити системе кровних структура од конструктивног склопа објекта. Конструктивни елементи су такви да један елемент конструкције представља спој стуба и кровног носача или спој кровног и плафонског носача, а такође може бити такав да је делимично у функцији стуба, а делимично у функцији кровног носача.

Могуће је извршити поделу носећих конструкција на више карактеристичних конструктивних система:

1. Гредни системи
2. Двоводни двозглобни и трозглобни системи конструкција
3. Полигонални двозглобни и трозглобни системи конструкција
4. Двозглобни и трозглобни лучни системи
5. Конзолни системи
6. Затегнути гредни системи
7. Системи висећих конструкција

Сваки од поменутих система се даље могу поделити на подсистеме, групе и подгрупе конструктивних елемената у зависности од посматраних критеријума. У пракси се најчешће примењују кровне конструкције настале комбинацијом различитих статичких система.

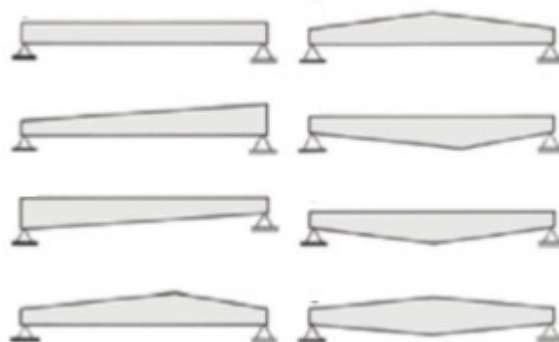
Најчешће примењивани у пракси су следећи облици носача:

- Проста греда
- Континуални носачи, линијски носачи преко више ослонаца
- Герберова греда
- Решеткасти носачи
- Дрвени стубови
- Двозглобни и трозглобни системи оквирних конструкција
- Двозглобни и трозглобни лучни системи конструкција
- Конзолне конструкције

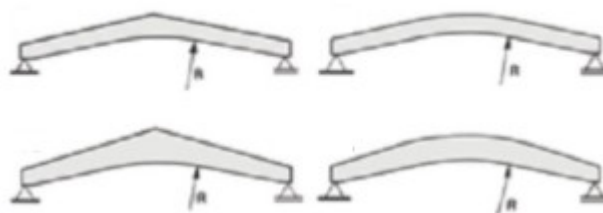
Проста греда

Најједноставнији статички систем је проста греда која представља носач са два ослонаца, од којих је један покретан у хоризонталном правцу. У зависности од облика системне линије могу се формирати:

- Прави штапови (слика 7)
- Полигонални штапови (слика 8)
- Закривљени штапови (слика 9)



Слика 7. Шематски приказ правих штапова [5]



Слика 8. Шематски приказ полигоналних штапова [5]



Слика 9. Шематски приказ закривљених штапова [5]

Проста греда од ЛЛД-а се за нормална кровна оптерећења и размаке између носача од 4,0 m изводи до дужине од 30 m.

Када је реч о кровној структури, проста греда често има улогу рожњаче која посредно или непосредно прихвата оптерећење од кровног покривача и климатска оптерећења (оптерећења од ветра и атмосферских падавина). Може се изводити као права или коса рожњача, која се ослања на главне носаче или може бити упуштена. Упуштеном рожњачом се сматра рожњача чија је горња површина у равни или испод горње површине главних носача.

Главни носачи који припадају систему просте греде, било да је реч о кровној или међуспратној конструкцији, се ослањају на зидове или стубове. Сви ослонци се пројектују тако да одговарају претпоставкама статичког прорачуна.

Код израде међуспратних конструкција проста греда се најчешће користи као тавањача. Због прихватања подне конструкције тавањаче се изводе на малом међусобном растојању [4].

Континуални носач

Континуални или непрекидни носачи представљају гредне носаче који су ослоњени на три или више ослонаца постављених на истој равни. Међутим ови носачи израђени од лепљеног ламелираног дрвета се нерадо примењују због своје велике укупне дужине, која отежава транспорт и манипулацију.

Герберова греда

Под Герберовим носачем или Герберовом гредом (слика 10) како се још назива, подразумева се линијски носач преко више поља, односно ослоњен на више ослонаца који се декомпозицијом може раставити на више простих греда или греда са препустом.



Слика 10. Герберов носач од лепљеног ламелираног дрвета [5]

Решеткасти носачи

Решеткасти носачи од ЛЛД-а се сматрају изузетно добрим носачима због могућности да премосте велике распоне, а да при томе поднесу велика оптерећења. У поређењу са другим савременим облицима дрвених структура сматрају се неекономичним. Наиме израда чворних веза веома утиче на цену. У чворовима који су веома оптерећени, веза се изводи помоћу класичних и специјалних спојних средстава, чија уградња мора бити пажљиво и педантно изведена, што изискује скуп људски рад, посебан алат и изузетну контролу остварених веза. Изглед конструкције од решеткастих носача и детаљ везе у чвору приказани су сликама 11 и 12 [5].



Слика 11. Решеткаста кровна конструкција од ЛЛД-а [18]

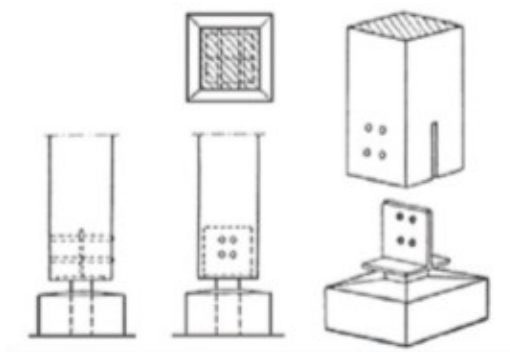


Слика 12. Детаљ везе у чвору [22]

Дрвени стубови

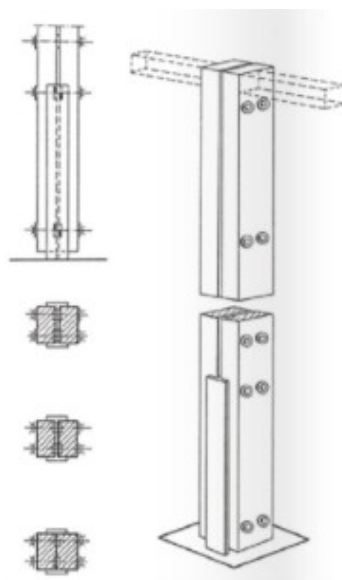
Сви кровни или међуспратни носачи се ослањају на зидове или стубове. Веома често се користе дрвени стубови који за циљ имају прихватање вертикалних оптерећења која преносе до темељне конструкције. Обзиром да дрво доста добро прихвата подужне притиске, па се у конструкцији јавља као центрично или ексцентрично напрегнут елемент. Стубови могу бити зглобно ослоњени или укљештени.

Зглобна веза се сматра најприроднијом и најефикаснијом када је реч о вези дрвених елемената у конструкцији објеката. Најчешћу примену има код веза између стуба и темељне конструкције. Најелементарнијим обликом овакве везе се сматра коришћење металног окова, који је са једне стране везан за стуб, а са друге за темељну конструкцију. Добра и лагана веза стуба са поменутиим оковом се изводи помоћу две плочице; хоризонталне, која прихвата притисак, и вертикалне, уграђене у дрво и коришћењем вијака или трнова. Употребом челичног профила или кратке квадратне цеви се изводи веза између металног окова и темељног ступца. У случају примене квадратне цеви веза се изводи тако што се са једне стране завари за хоризонталну металну плочицу, а са друге убетонира у темељну конструкцију [5].



Слика 13. Зглобна ослањачка веза стуба [5]

Дрво због својих физичких особина, утезања и бубрења, под утицајем влаге може мењати димензије попречног пресека, те сходно томе укљештење дрвених стубова никада неће бити потпуно. Код мање оптерећених стубова укљештење се најефикасније изводи применом челичног I профила, који се уграђује у бетон, а за чије ребро се вежу елементи дводелног дрвеног стуба, помоћу можданика или вијака [5].



Слика 14. Извођење укљештене везе дводелног стуба [5]

Двозглобни и трозглобни системи оквирних конструкција

У геометријском смислу ови носачи могу имати закривљену системну линију, када се називају луковима или могу бити састављени од правих штапова, познатији као оквирни носачи (слика 15). Код оваквих носача попречни пресек може бити сандучаст, али је најчешће правоугаони. Висина попречног пресека зависи од величине момента савијања и нормалне сије који делују у том пресеску и може бити променљива вредност. Разлика између лучних и оквирних носача постоји само у геометријском смислу, док се са статичког аспекта они не разликују. Сликаом 16 је приказана трозглобна оквирна конструкција.



Слика 15. Основни облици трозглобних оквирних конструкција [5]



Слика 16. Трозглобна оквирна конструкција [5]

Двозглобни и трозглобни лучни системи конструкција

Лук на два ослонца (слика 17) припада групи статички неодређених носача са закривљеном системном линијом, који је у ослоначким тачкама зглобно везан. Овакав конструктивни елемент се сматра изузетно моћним и његовом применом могу се премостити велики распони. Због велике стреле која се том приликом јавља није могуће извести овакав носач од само једног комада лепљеног ламелираног дрвета, из разлога што транспортни услови то недозвољавају. Зато се овакав лук производи из више елемената, што омогућује лакши транспорт. Лук се формира помоћу монтажних наставка који се поствљају на местима најмањих момената.

Лук на три зглоба такође је закривљене системне линије, али представља статички одређен носач. Састоји се из две круте плоче које су међусобно зглобно везане у чвору, односно теменом зглобу. Поменуте плоче су у ослоначким тачкама зглобно везане, што значи да се ослонци пројектују и изводе као код двозглобних лукова. Код изградње објеката од ЛЛД-а, трозглобни лукови имају честу примену захваљујући извандредним карактеристикама које се махом односе на лаку монтажу и транспорт. Иако облик лучне линије трозглобног лука може бити произвољан, најчешће се користе параболични и кружни облици. У поређењу са двозглобним луком имају веће попрелне пресеке за исти распон и под једнаким оптерећењем. Када је реч о кровним структурама, лепљени ламелирани носачи се најчешће налазе у улози кровних везача. Сви ови носачи су економични при распонима већих од 20,0 m, што је њихов распон већи сматрају се већом конкуренцијом осталим грађевинским конструкцијама [5].



Слика 17. Двозглобна лучна конструкција [23]

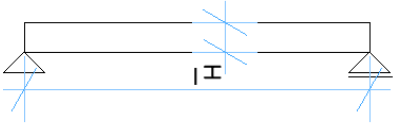
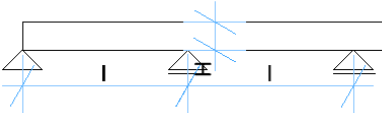
Конзолне конструкције

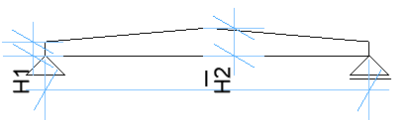
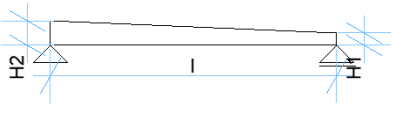
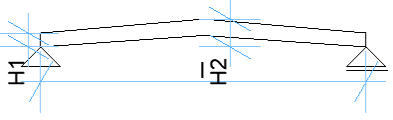
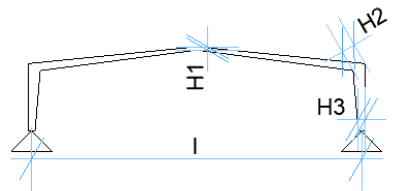
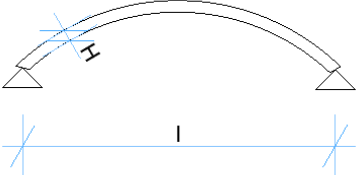
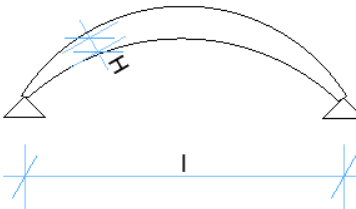
Конзолни носачи, препусти, се сматрају врло осетљивим конструктивним системом који на сваки пропуст при пројектовању или извођењу бурно реагује.

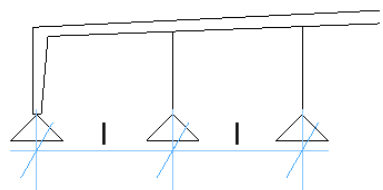
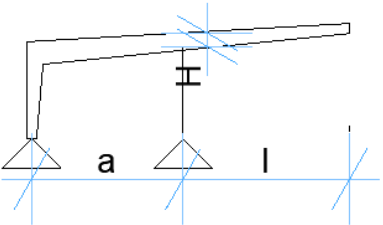
За изградњу надстрешнице над гледалиштем Велодрома Олимпијског стадиона у Минхену за игре одржане 1972. године, коришћени су конзолни носачи од лепљеног ламелираног дрвета. Ови носачи се одликују импозантним препустом до 24,0 m. Попречни пресек двојног носача на месту ослањања конзоле износио је 2 x 23/220 cm. Обзиром да су носачи трибина, али и сама велодромска писта израђени од лепљеног ламелираног дрвета, овај објекат се сматра значајним достигнућем када је реч о конструкцијама од ЛЛД-а.

Шеметски приказ најчешће коришћених носача са дужином распона израженим у метрима, дати су табелом 1.

Табела 1. Често примењивани носачи од ЛЛД-а са дужином распона

Врста носача	Статички систем	Распон l [m]
Проста греда константне висине		10-30
Континуална греда преко више поља		10-30

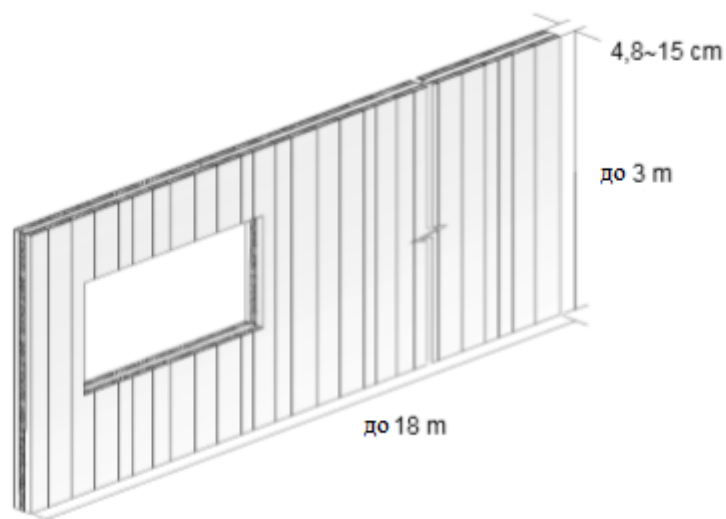
Симетрична трапезаста проста греда		10-35
Несиметрична трапезаста проста греда		10-30
Закривљена проста греда		10-30
Трозглобни рамови са заобљеним или оштрим преломима конт. ивица		15-60
Двозглобни или трозглобни лук са или без затеге		20-100
„Српаст“ лук на два зглоба са или без затеге		40-100

Континуални рам		10-30
Конзола		5-20

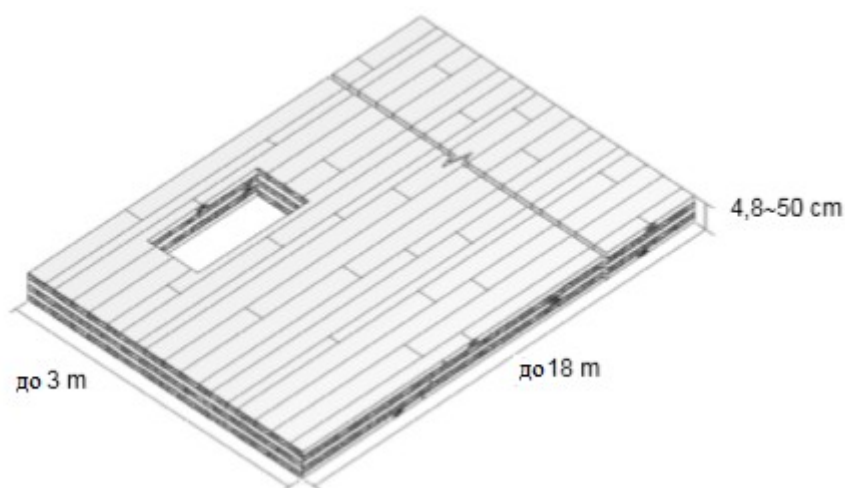
3.2. Панели од ламелираног дрвета

Унакрсно ламелирано дрво је производ новијег датума, који поседује напредније физичке карактеристике од монолитног дрвета. Састоји се од више ламела постављених унакрсно и спојених. Слојеви меког дрвета су постављени тако да су им влакна међусобно под правим углом. У зависности од дебљине и броја ламела, варираће и дебљина панела, а са већом дебљином слоја добија се такав конструктивни елемент који може бити довољно јак да се користи без додатног ојачања. Овакви елементи се могу употребљавати као плоче или као зидови. Може се користити за изградњу различитих објеката, а најчешће за стамбене објекте и објекте намењене одмору. Основна предност плоча од ламелираног дрвета је мала сопствена тежина, која је неколико пута мања од тежине бетона. Производња оваквих плоча се врши у посебним радионицама и то по мери. Захваљујући малој тежини и прецизној изради, монтажа се изводи релативно брзо и једноставно. Још једна предност плоча од ламелираног дрвета је та што је дрво „сув“ грађевински материјал те није потребно време за његово очвршћавање или сушење као што је случај са бетоном или опеком. Потребно је мање енергије за уградњу већ готових плоча у односу на изливање бетонских плоча. Поред тога дрво је добар изолатор, сматра се да поседује изолациона својства пет пута боља од бетона и 350 пута од челика.

Спољни делови панела се могу услед побољшања естетских својстава, ватроотпорности или звучне изолације могу обложити погодном облогом, нпр. гипс-картонским плочама. У Европи се ова врста панела најчешће израђује од четинара влажности $12 \pm 2\%$. Зидни панели се на градилиште испоручују са већ формираним отворима, који су унапред утврђени пројектом. Примери зидног и подног панела са типичним димензијама дати су сликама 18 и 19 [7].



Слика 18. Зидни панел [7]



Слика 19. Подни и кровни панел [7]

3.3. Транспорт

Конструкције од лепљеног ламелираног дрвета се у 95 % случајева транспортују друмским саобраћајем, поред тога могуће је користити железнички и ваздушни саобраћај, али се они користе тек у изузетним случајевима. За потребе превоза друмским саобраћајем, користе се следећа транспортна средства:

1. Возила са приколицом или полуприколицом, за транспорт равних и лучних носача распона до 14 m,
2. Возила са полуприколицом на развлачење, приколице се развлаче до дужине од 35 m и оваква транспортна средства се користе код превоза лучних и равних носача дужине до 35 m,
3. Вучна возила са приколицом на развлачење; у пракси се срећу два типа: KARELA и BILG. Ова транспортна средства служе за транспорт равних и лучних носача највећих

димензија и код њих је карактеристично то што је вучно возило са приколицом спојено помоћу челичних сајли.

Транспорт помоћу возила описана тачкама 2 и 3, спада у групу вандредног превоза. Вандредни превоз представља кретање возила или скупа возила са теретом или без, која премашују законом прописане норме у погледу димензија, највеће дозвољене укупне масе или осовинског оптерећења. Овакав вид превоза је могуће обавити само уз посебну дозволу коју издаје управљач пута, а којом се одређују посебни услови под којим ће се транспорт обавити [16].

Носачи се транспортују, по правилу, у истом положају у ком ће бити уграђени. У хоризонталном положају носачи се могу превозити само уколико је такав положај узет при статичком прорачуну или ако се поставе на довољно круту подлогу, која за циљ има спречавање штетног понашања носача при транспорту. Утовар, транспорт и истовар морају бити обављени тако да не дође до оштећења лепљених ламелираних носача. Из тог разлога се често за подизање носача користе ланене гуртне довољне ширине или челичне сајле уз примену челичних подметача.

Посебан изазов при транспорту носача од ЛЛД-а могу представљати сводови, посебно они високих зидова и кровова са ниским слеменом. Зарад олакшаног транспорта понекад је неопходно извођење полулукова са спојницама на краковима, које се обично постављају на местима инфлексције или другим местима са малим обртним моментом.

Компоненте ширине до 3,6 m се могу превозити без проблема, док транспорт већих ширина зависи од удаљености места производње до места испоруке, као и од услова на путу. Зарад смањења укупне ширине лукова, они се могу производити са одвојеним коленом.

Примери транспорта носача од ЛЛД-а приказани су сликама 21 и 22.



Слика 20. Транспорт носача од ЛЛД-а [18]



Слика 21. Транспорт носача од ЛЛД-а [18]

3.4. Монтажа

Монтажа елемената од лепљеног ламелираног дрвета се мора изводити према унапред утврђеном плану монтаже, који израђује извођач радова. План монтаже се заједно са планом транспорта доставља надзорној служби на сагласност и у њему мора бити доказано:

- да током планираног начина монтаже неће доћи до напрезања у елементима конструкције већих од дозвољеног

- да током планираног начина монтаже неће доћи до деформација елемената већих од допуштених
- да неће доћи до губитка стабилности елемената за време монтаже.

Конструктивни елементи од ЛЛД-а се најчешће испоручују из више делова, односно растављени, те се они састављају на градилишту пре подизања. Лукови се најчешће достављају као половине и они се могу саставити на земљи или се састављају након што сваки део заузме коначни положај. Сви делови конструкције се морају саставити тако да спојеви пашу и без општећења. Уколико је потребно варење структурних спојева на градилишту, то треба извести у складу са стандардима за металне конструкције и варење истих. Правилно изведени спојеви су важни зарад структурних својстава носивости код било којих дрвених конструкција. Спојеви се дизајнирају тако да би се приликом преноса оптерећења са структурних носача избегла локализована концентрација напрезања.

Подизање је неопходно претходно планирати и изводи се тако да сви спојеви легну на своје место. Како би се одабрала одговарајућа опрема и метода подизања претходно се одређује тежина и тачке равнотеже елемента. Пошто се приликом подизања из хоризонталног у вертикалан положај могу јавити напрезања која су другачија од оних за која су конструктивни елементи дизајнирани, понекад је потребно додатно учвршћивање носача. Колико то учвршћење мора бити и на којим местима се поставља зависи од низа фактора који се обавезно разматрају пре доношења коначне одлуке.

За подизање лепљених ламелираних носача се најчешће користе мобилне дизалице (слика 22), јер у поређењу са бетонским конструкцијама знатно су лакши и процес подизања траје краће.



Слика 22. Подизање носача мобилном дизалицом

4. Прорачун лепљених ламелираних конструктивних елемената

4.1. Прорачун лепљених ламелираних носача

Лепљени ламелирани носачи се прорачунавају као хомогени пресеци одређене геометрије према усвојеним начелима и принципима Отпорности материјала. Основне претпоставка Отпорности материјала је да се прорачун врши за континуалне, хомогене и изотропне материјала. Међутим дрво није континуалан, хомоген ни изотропан материјал, те се о овој чињеници, као и у класичним дрвеним конструкцијама, мора водити рачуна. Прорачун је заснован на допуштеним напонима уз поделу оптерећења на основна, допунска и нарочита.

Приликом прорачунавања треба обратити пажњу на карактеристике лепљеног дрвета:

- основни допуштени напони, за одређивање потребних димензија пресека или проверу напона у већ усвојеним контурама пресека
- модул еластичности и модул клизања коришћени приликом прорачуна деформација, зависни од влажности дрвета и времена трајања оптерећења [4].

Почетком 21. века са појавом и применом Еврокодових стандарда и његових препорука за прорачун и дрвених конструкција, у нашој земљи је процес преласка на овај тип прорачуна у току. Поглавље које се односи на дрвене конструкције има ознаку EVROKOD 5 - (EN 1995): Пројектовање дрвених конструкција.

4.1.1. Основни допуштени напони

Основни допуштени напони код лепљених конструкција представљају оне напоне који су допуштени за основну групу оптерећења приликом димензионисања. Допуштени напони зависе од врсте и класе дрвета, за најчешће коришћене врсте дати су табелом 2.

Табела 2. Допуштени напони у зависности од врсте и класе дрвета [4]

Врста напрезања	Ознака	Јела, бор, смрека		Храст, буква	
		I кл.	II кл.	I кл.	II кл.
Савијања	σ_{md}	1400	1100	1620	1370
Затезање	$\sigma_{t d}$	1050	850	1800	1080
Притисак	$\sigma_{c d}$	1100	850	1500	1200
Притисак управно на влакна	$\sigma_{c\perp d}$	200 250	200 250	490	430
Смицање	$\tau_{ d}$	90	90	150	150
Смицање од попречне силе	$\tau_{m d}$	120	120	130	110

У случајевима заједничког деловања основног и допунског оптерећења допушта се повећање основних допуштених напона за 15%. А услед заједничког деловања основног, допунског и нарочитог оптерећења допуштено је повећање основних допуштених напона за 50%.

Допуштени напони на попречно затезање зависе од врсте дрвета, па су за:

- четинаре и меке лишћаре $\leq 25 \text{ N/cm}^2$
- тврде лишћаре $\leq 35 \text{ N/cm}^2$ [4].

4.1.2. Прорачун деформација

Прорачун деформација у зависности од влажности дрвета и времена трајања оптерећења се може спровести:

а) за укупно најнеповољније оптерећење и за влажност дрвета испод 15% коришћењем основних вредности модула еластичности и модула клизања. У случајевима када је влажност дрвета већа од 15% при прорачуну деформација се користе редуковани - прорачунски модули $E_R = \alpha E$ и $G_R = \alpha G$. Где Е и G представљају вредности основних модула (вредности за четинаре дати у табели 3), а α коефицијент чија вредност зависи од влажности дрвета и дат је табелом 4.

Табела 3. Модул еластичности и модул клизања четинара [4]

Врста дрвета	Модул еластичности Е		Модул клизања G
	Паралелно влакнима	Управно на влакна	
Четинари	1100	30	50

Табела 4. Вредност коефицијента α у зависности од релативне влажности [4]

α	Релативна влажност	
	15-18%	18-22%
	0,85	0,75

б) узимајући у обзир време трајања оптерећења, приликом чега се разматрају случајеви:

за краткотрајно оптерећење у трајању краћем од три месеца, величина угиба (f_0) се рачуна користећи основне вредности модула еластичности независно од процента влажности дрвета.

За дуготрајна оптерећења, односно она чије је трајање дуже од три месеца, величина угиба (f_t) се рачуна са реолошким модулима према изразима:

$$E_\varphi = \frac{E}{1+\varphi} \quad G_\varphi = \frac{G}{1+\varphi}$$

Укупна деформација се добија суперпозицијом угиба од краткотрајног оптерећења и угибом од дуготрајног оптерећења, односно:

$$f = f_0 + f_t$$

Величине $1+\varphi$ представљају коефицијент течења дрвета, који зависи од степена искоришћености пресека ($\frac{\sigma_{stv}}{\sigma_{dop}}$) и повећаног процента влажности $\Delta\Phi$ и може се израчунати коришћењем обрасца [4]:

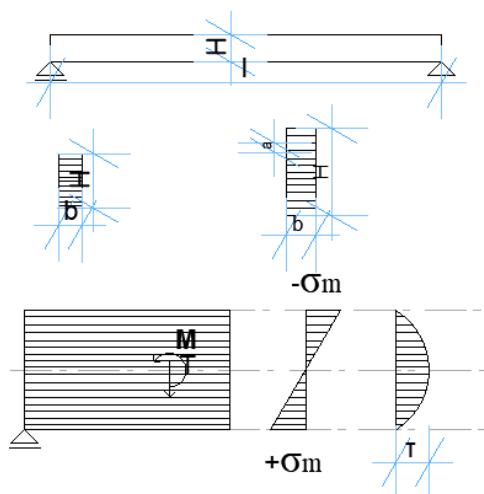
$$1+\varphi = 1 + \left(\frac{\Phi + \Delta\Phi}{12} \right) \left(\frac{\Delta\Phi + 15}{20} \right) \left(\frac{\sigma_{stv}}{\sigma_{dop}} - 0,2 \right)$$

4.1.3. Редослед прорачуна просте греде са константном висином

У познате податке спадају:

оптерећење, статички систем, што укључује и статичке утицаје,
квалитет материјала ($\sigma_{md}, \tau_{m||d}, E_{||}, G$)

величина допуштеног угиба (који се најчешће изражава као m-ти део распона, $f = \frac{l}{m}$)



Критеријум за бирање ширине пресека (b) је

$$b = \left(\frac{1}{4} \text{ до } \frac{1}{10} \right) H, \text{ са тим да је } b \leq 20 \text{ cm (за}$$

$$H \approx \frac{1}{17} l \rightarrow b = \left(\frac{1}{4} \text{ до } \frac{1}{10} \right) \frac{l}{17} = \frac{l}{68} \text{ до } \frac{l}{170}$$

За усвојено b:

$$\sigma_m = \frac{M}{W} = \frac{M}{bH^2} 6 \rightarrow H = \sqrt{\frac{6M}{b \cdot \sigma_{md}}}$$

Допуштени угиб једнак је:

$$f = \frac{l}{m} \quad (m=200 \text{ до } 300)$$

За греду која је оптерећена континуалним оптерећењем q:

$$f_{max} = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EJ} \leq f_{dop} = \frac{l}{m}$$

одавде за m=200 и $E_{||} = 1,1 \cdot 10^6 [N/cm^2]$

$$J_{potr} = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{E_{||}} \frac{m}{l} = \frac{5}{48} \frac{ql^2}{8} \frac{l \cdot 200}{1,1 \cdot 10^6} = \frac{2,08}{11} Ml$$

за m=300 и $E_{||} = 1,1 \cdot 10^6 [N/cm^2]$

$$J_{potr} = \frac{3,13}{11} Ml$$

Потребна висина носача (H) се може добити из три услова:

1. према допуштеним напонима на смицање

$$\tau_{m||d} = \frac{3}{2} \frac{T}{bH} \rightarrow H_{potr} = 1,5 \frac{T_{max}}{\sigma * \tau_{m||d}}$$

2. према допуштеном напону на савијање

$$\sigma_m \frac{M}{W} \rightarrow H_{potr} = \sqrt{\frac{6 * M}{b * \sigma_{md}}}$$

3. према J_{potr} срачунато на основу допуштеног угиба

$$J = \frac{b H^3}{12} = J_{potr} \rightarrow H = \sqrt[3]{\frac{12 * J_{potr}}{b}}$$

Од три добијене вредности за H најмеродавнијом се сматра она највећа тј. H_{max} . За усвојену дебљину ламела (a) изражену у см, број потребних ламела (n) се рачуна према обрасцу:

$$n = \frac{H_{max}}{a}$$

добијена вредност се заокружује на први већи цео број. Коначно усвојена висина носача ће бити

$$H = n * a$$

4.2. Димензионисање панела од ламелираног дрвета

За димензионисање оваквих панела који се користе као међуспратне конструкције најчешће се примењују Гамма метод, К-метод, Kreuzinger-ова аналогија и Упрошћен поступак прорачуна. Зидни панели се димензионишу као притиснути штапови сложеног пресека, спојени механичким спојним средствима.

4.2.1. Гамма метод

Гамма метод се заснива на Анексу В Еврокода 5. Приликом прорачуна у обзир се узимају само ламеле у правцу деловања оптерећења. Оне се димензионишу као гредни носачи повезани (имагинарним) механичким спојним средствима, чија је крутост једнака модулу смицања управно на влакна попречних ламела. Уколико је однос распона и висине ламеле већи од 30, смицање подужних ламела се може занемарити. Овај метод прорачуна се препоручује код кровних или међуспратних панела са три или пет ламела, који су слободно ослоњени.

За израчунавање ефективне крутости на савијање користи се израз:

$$(EI)_{ef} = \sum (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$

γ представља меру ефикасности везе и има вредност од 0 до 1. Тако да услед непостојаности спојног средства у вези γ има вредност 0, док је $\gamma=1$ код потпуно круте везе.

Према Еврокоду 5, γ се дефинише као:

$$\gamma_i = \left[1 + \frac{\pi^2 E_i A_i s_i}{K_i l^2} \right]^{-1}$$

Узимајући у обзир да је крутост „имагинарних“ спојних средстава једнака модулу смицања управно на влакна попречних ламела

$$\frac{s_i}{K_i} = \frac{h_i}{G_R * b}$$

где је са b означена ширина панела, најчешће 1- 1.5 m. h_i представља висину попречне ламеле, а G_R модул смицања управно на влакна попречних ламела.

Нормални напон се рачуна као:

$$\sigma_{imax} = \sigma_{iglobal} + \sigma_{ilocal}$$

Где су:

$$\sigma_{iglobal} = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{(EI)_{ef}}$$

$$\sigma_{ilocal} = \frac{0,5 E_i h_i M}{(EI)_{ef}}$$

4.2.2. К-метод

Прорачун заснован на К-методи у обзир узима крутост свих ламела. Модул еластичности попречних ламела се израчунава као:

$$E_{90} = E_0 / 30$$

Принцип прорачуна је сличан прорачуну шперплоча. Ефективне вредности напона и крутости се рачунају коришћењем коефицијента k (табела 5).

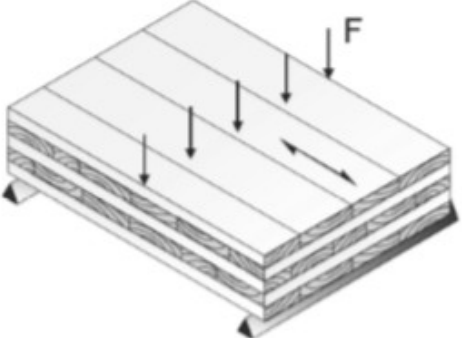
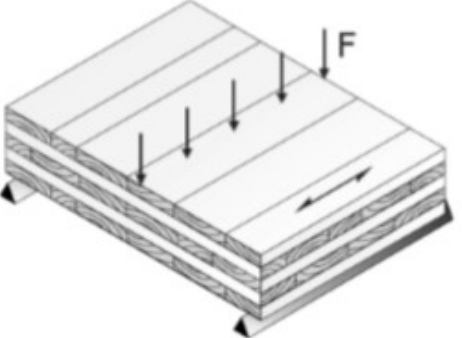
Табела 5. Одређивање ефективног напона и ефективне крутости у зависности од врсте оптерећења [7]

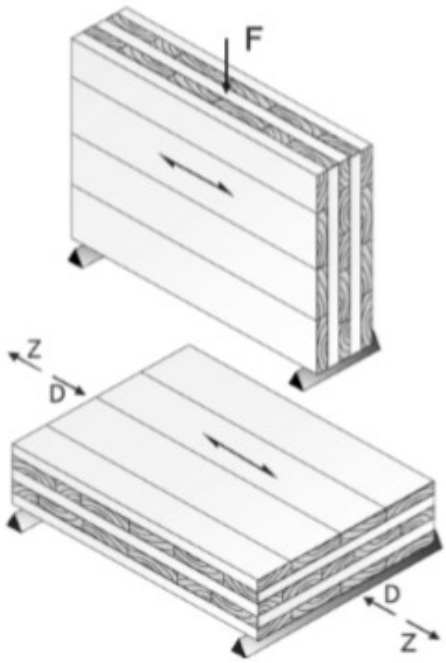
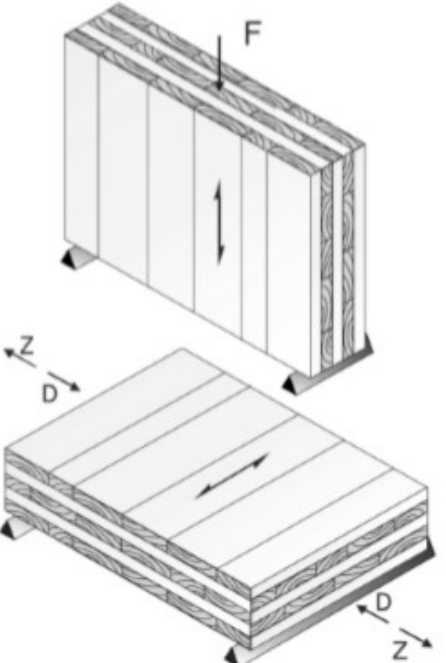
Оптерећење	Правац влакана	Ефективни напон	Ефективна крутост
Оптерећење нормално на раван панела			
Савијање	Паралелно са влакнима	$f_{m,0,ef} = f_{m,0} * k_1$	$E_{m,0,ef} = E_0 * k_1$
	Управно на влакна	$f_{m,90,ef} = f_{m,0} * k_2 * a_m / a_t$	$E_{m,90,ef} = E_0 * k_2$
Оптерећење у равни панела			
Савијање	Паралелно са влакнима	$f_{m,0,ef} = f_{m,0} * k_3$	$E_{m,0,ef} = E_0 * k_3$
	Управно на влакна	$f_{m,90,ef} = f_{m,0} * k_4$	$E_{m,90,ef} = E_0 * k_4$
Затезање	Паралелно са влакнима	$f_{t,0,ef} = f_{t,0} * k_3$	$E_{t,0,ef} = E_0 * k_3$

	Управно на влакна	$f_{t,90,ef} = f_{m,0} * k_4$	$E_{t,90,ef} = E_0 * k_4$
Притисак	Паралелно са влакнима	$f_{c,0,ef} = f_{c,0} * k_3$	$E_{c,0,ef} = E_0 * k_3$
	Управно на влакна	$f_{c,90,ef} = f_{c,0} * k_4$	$E_{c,90,ef} = E_0 * k_4$

Коефицијенти k зависе од оптерећења, а обрасци по којима се рачуна су дати табелом 6.

Табела 6. Одређивање коефицијента k у зависности од оптерећења [7]

Оптерећење	k
	$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$
	$k_2 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$

	$k_3 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m}$
	$k_4 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m}$

Растојање а панела са пет панела ($m=5$) се одређује као на слици 23.

Ефективна крутост на савијање од оптерећења управно на раван панела јесте:

- Паралелно са влакнима

$$(EI)_{ef} = E_0 \frac{b * a_m^3}{12} * k_1$$

- Управно на влакна

$$(EI)_{ef} = E_0 \frac{b * a_m^3}{12} * k_2$$

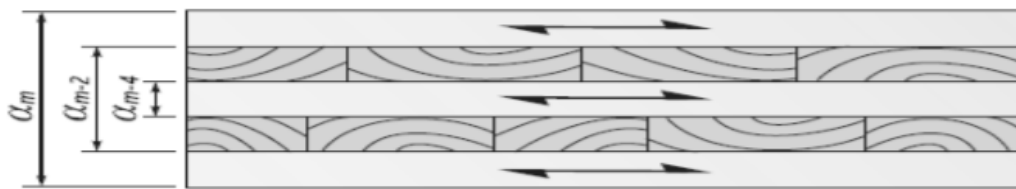
Нормални напон савијања од оптерећења управно на равана панела јесте:

- Паралелно са влакнима

$$\sigma_m = \frac{M}{(EI)_{ef}} E_0 \frac{a_m}{2}$$

- Управно на влакна

$$\sigma_m = \frac{M}{(EI)_{ef}} E_0 \frac{a_{m-2}}{2}$$



Слика 23. КЛД панел са пет ламела [7]

4.2.3. Kreuzinger-ова аналогија

Применом оваквог вида прорачуна узимају се различити модули еластичности и модули смицања подужних и попречних ламела. Смицање подужних ламела се не занемарује, а аналогија није ограничена бројем ламела у панелу.

Kreuzinger-овом аналогијом панел се дели на две виртуелне греде, приказане сликом 24.



Слика 24. Панел подељен на две виртуелне греде [7]

Ефективна крутост се израчунава према следећем обрасцу:

$$(EI)_{ef} = (EI)_A + (EI)_B = \sum E_i * b_i \frac{h_i^3}{12} + \sum E_i * A_i * Z_i^2$$

Где b означава ширину панела,

h висину ламеле,

а Z растојање од тежишта ламеле до неутралне осе.

4.2.4. Прорачун зидних панела

Као што је већ поменуто зидни панели се димензионишу као притиснути штапови сложеног пресека, спојени механичким спојним средствима. Прорачун се заснива на следећим претпоставкама:

- елементи су просте греде, дужине l
- елементи сложеног пресека иду континуално дуж штапа.

Ефективна виткост се рачуна као:

$$\lambda_{ef} = l \sqrt{\frac{A_{tot}}{I_{ef}}}$$

A_{tot} представља укупну површину попречног пресека панела,

l је висина панела, односно дужина извијања,

I_{ef} се односи на ефективни момент инерције, који се добија изразом:

$$I_{ef} = \frac{(EI)_{ef}}{E_{mean}}$$

где су:

$(EI)_{ef}$ ефективна крутост

E_{mean} средња вредност модула еластичности вертикалних панела.

5. Објекти од лепљеног ламелираног дрвета

Лепљено ламелирано дрво налази примену у областима високоградње и нискоградње. Користи се код конструкција које захтевају велику чврстоћу, димензијску стабилност и одговарајући естетски квалитет. Када је реч о објектима високоградње чешће се користи при изградњи нестамбених објеката, попут спортских хала, комерцијалних, индустријских објеката, зграда намењених култури и сл. У нискоградњи се користи за израду пешачких мостова. Све већу примену лепљено ламелирано дрво има захваљујући својим импресивним карактеристикама, услед којих је могуће извођење конструкција распона чак и преко 100 m. Због неограничених могућности обликовања, отпорности на пожар и агресиван утицај средине, може се користити при изградњи објеката најразличитије намене. Овакве конструкције се такође сматрају еколошки прихватљиве, што проистиче из чињенице да је ЛЛД изврсно у складиштењу и чувању штетних гасова стаклене баште, попут CO_2 , сакупљених из атмосфере током дугог раста самог дебла. Па се може рећи да се применом ламелираног дрвета придоноси смањењу гасова стаклене баште.

5.1. Спортски објекти

Све чешћа примена конструктивних елемената од ЛЛД-а приликом изградње спортских објеката (слика 25) проистиче из могућности оваквих носача да премосте велике распоне. Поред тога омогућују креирање интересантних форми. Приликом изградње поменутих објеката најчешће се користе лучни и оквирни носачи.



Слика 25. Спортски објекат са конструкцијом од ЛЛД-а [18]

5.2. Базени

Како је развој технологије производње лепљеног ламелираног дрвета омогућио савладавање све већих распона, све чешћу примену налази као конструктивни материјал за наткривање базена (слике 26 и 27). Наткривени базени могу бити намењени спортском или рекреативном пливању. Безобзира о каквом типу базена је реч, просторија у којој се исти налази ће бити са

повишеном концентрацијом хлора. Лепкови који се користе при производњи ламелираног дрвета се одликују водоотпорношћу, ватроотпорношћу и отпорношћу на већину хемијских утицаја, па се ламелирано дрво сматра добрим избором конструктивног материјала за наткривање базена.



Слике 26 и 27. Примери наткривне конструкције базена [18]

5.3. Комерцијални објекти

Поред добре отпорности на пожар и могућности савладавања великих распона, ЛЛД се одликује бројним могућностима обликовања и високим естетским квалитетима, због чега се све више користи при изградњи комерцијалних објеката, као што су ресторани, кафићи, продајни центри, банке и сл. Примери употребе лепљених ламелираних носача за изградњу угоститељских објеката дати су сликама 28 и 29.



Слика 28. Примена конструкције од ЛЛД-а за потребе угоститељског објекта [18]



Слика 29. Примена конструкције од ЛЛД-а за потребе угоститељског објекта [18]

5.4. Стамбени објекти

Код стамбених објеката ламелирано дрво се може користи за израду само кровне конструкције или за израду комплетне конструкције (слика 30), што укључује зидове и међуспратну конструкцију. Сви елементи се израђују у производним халама, одакле се транспортују до места градње где се само монтирају (слика 31). За израду зидова и плоча користе се ламелирани панели. Димензије панела, тачна места и димензије отвора се унапред утврђују пројектом. Овакав начин градње се одликује бројним повољностима, што укључује и краће време градње које махом не зависи од временских услова, мање трошкове градње и сл. Новонастали објекти се сматрају изузетно удобним за живот, јер је температура површина готово једнака температури просторије, а и сама конструкција не заузима пуно простора. Услед измене пројекта или других околности такође је могућа и демонтажа објекта. Осим као конструктивни материјал, лепљено ламелирано дрво се користи и при изради прозора и врата.



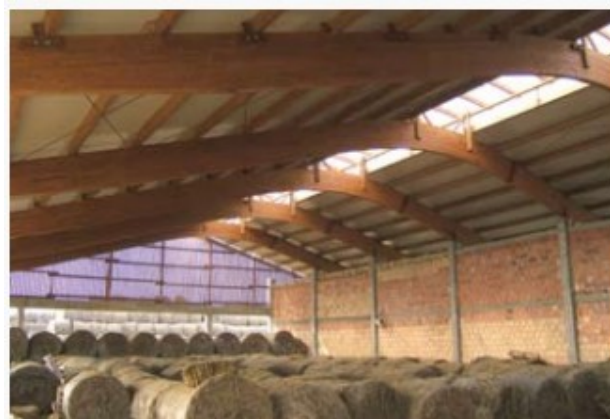
Слика 30. Пример стамбеног објекта од КЛД панела [5]



Слика 31. Изградња савременог стамбеног објекта од ББС плоча (крстасто ламелирано дрво) [25]

5.5. Индустијски и пољопривредни објекти

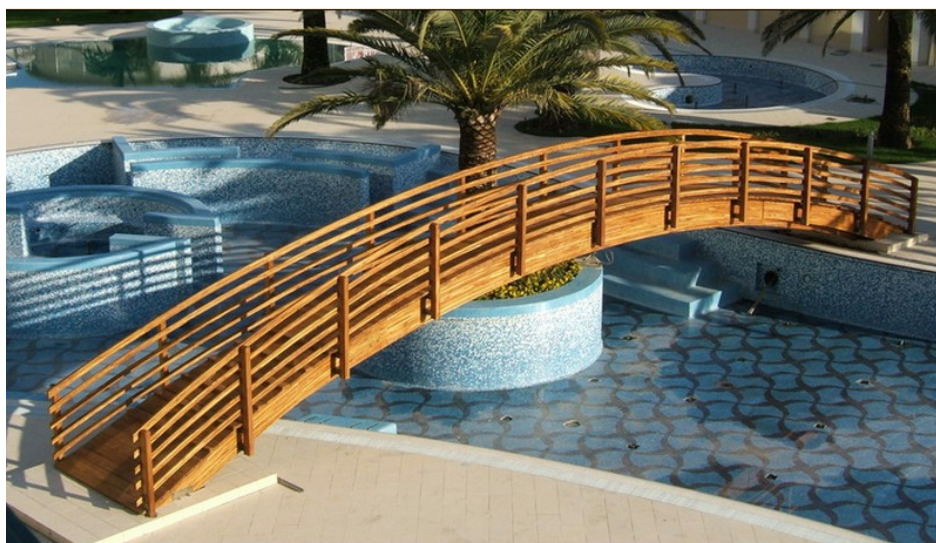
Лепљено ламелирано дрво је као материјал отпоран на хемијске утицаје, што га чини врло пожељним конструктивним материјалом за изградњу индустријских (слика 32) и пољопривредних објеката (слика 33). Габарити индустријских хала не представљају никакав проблем, те се оне захваљујући монтажном начину градње, изводе релативно лако и брзо. Када је реч о пољопривредним објектима лепљени ламелирани носачи се користе за изградњу штала, телећарника, складишта вештачког ђубрива, хангара за пољопривредне машине и других објеката у оквиру фарми. Без обзира на врсту фарми лепљено ламелирано дрво се одлично уклапа у амбијент захваљујући свом природном пореклу.



Слика 32. Производна хала са носачима од ЛЛД [18] Слика 33. Штала са носачима од ЛЛД-а [18]

5.6. Пешачки мостови

Избор материјала за обликовање простора у градским срединама захтева велику пажњу. Велика примена бетона као основног материјала за изградњу саобраћајница, стамбених и јавних објеката, мостова, надвожњака и сличног, може довести до отуђења људи од здравог природног окружења. Примена дрвета за изградњу појединих елемената може у многоме оплеменили градски простор и допринети повећању квалитета живота људи. Неки од поменутих елемената могу бити објекти пешачког саобраћаја - мостови, који служе за премошћавање саобраћајних или природних препрека. Овакви објекти од дрвета се одлично уклапају у градски амбијент и оплеменењу простор различитим облицима и формама. У одређеним случајевима могу поседовати надстешнице или кровове (са дрвеном конструкцијом) чиме се функција објекта чини још комфорнијом. Примена ламелираних конструкција при изградњи мостова се одликује лакошћу градњом и брзом монтажом (слика 35), без значајнијег ремећења саобраћајних токова. Са аспекта сигурности и трајности, мостови од ЛЛД-а нимало не заостају за оним од челика и бетона [5].



Слика 34. Пример пешачког моста израђеног од лепљеног ламелираног дрвета [18]



Слика 35. Монтажа пешачког моста [18]

6. Примери савремених конструкција изведених од лепљеног ламелираног дрвета

6.1. Стамбена зграда Forte у Мелбурну

Зграда је изграђена 2013. године, а пројектовала је и извела компанија Lend Lease. Призмеље је намењено пословном простору, док се на спратовима налазе двадесет и три стана. Укупна висина зграде износи 32,17 m. Основни конструктивни елементи су зидни панели и подне плоче од крстастог ламелираног дрвета. За изградњу објекта употребљено је 759 оваквих панела, односно 485 тона дрвене грађе. Зграда Форте (слика 36) је први објект у Аустралији оцењен са пет звездица програма Green Star As Built. Познато је да је крстасто ламелирано дрво добро у складиштењу угљен диоксида, а дрвена грађа од које је сачињен објект складишти 761 тону угљеника. Одабиром овакве конструкције количина CO_2 у атмосфери смањила се за 1451 тону, јер би се додатни угљен диоксид испустио у атмосферу при изградњи сличне зграде од бетона и челика [24].



Слика 36. Зграда Forte у Мелбурну [24]

6.2. Заштитна конструкција над Виминацијумом

Виминацијум је археолошко налазиште у близини Костолца. На 12 km од Пожаревца. Овај археолошки парк је од великог туристичког значаја и поседује седам објеката који су покривени и намењени посетиоцима:

- Северна Главна капија легијског логора

- Римске терме
- Римски амфитеатар
- Маузолеј
- Мамут парк
- Domvs Scientiarvm Viminacium/ Научно истраживачки и туристички центар
- Занатски центар са пећима за производњу керамике и опеке [14].

Поменути објекти су покривени лаком конструкцијом од ламелираног дрвета (слика 38) и посебним покривачем тзв. француским тендама. Конструкција од ЛЛД је изабрана због могућности премошћавања великих распона и постављена је тако да ни на који начин није угрозила археолошке слојеве. Објекти су постављени на великим бетонским блоковима и анкерима везани за покриваче.

Маузолеј је пирамидалне форма и сматра се најрепрезентативнијим археолошким објектом у овом делу Европе. Заштитна конструкција која покрива маузолеј је изведена од носача у лепљеном ламелираном дрвету. Основна конструкција се састоји из осам закривљених и четири прва ЛЛД носача. Везе између носача су зглобне. Остали елементи дрвене конструкције су израђени од лепљеног ламелираног или масивног дрвета, док је метална конструкција присутна са затегама између ЛЛД носача. Закривљени носачи су распона 20m у основи чине квадрат са зарубљеним угловима, димензија 32 x 32 m. Својим обликом заштитна конструкција прати простор који покрива, истичући најважније елементе и на тај начин пружа објектима највише естетске квалитете [15].



Слика 37. Монтажа заштитне конструкције [15]



Слика 38. Заштитна конструкција над Виминацијумом [15]

6.3. Средња школа у Норичу

Објекат (слика 39) је изграђен крајем 2009. године, а пројектовао га је Sheppard Robson. Корисна површина објекта износи 9500 m². За изградњу овог троспратног објекта искоришћено је 3065 m³ панела од крстастог ламелираног дрвета. Обзиром да је реч о монтажном начину градње, сама изградња се одвијала веома брзо, па је комплетна конструкција завршена за свега шеснаест недеља. За монтажу фискултурне сале површине 600 m², која се налази у склопу објекта, било је потребно четири дана и четири радника. Монтирање једног зидног панела димензија 3 m x 6 m, дебљине 15 cm трајало је свега три сата. Панели од КЛД-а су коришћени за зидове и подове, док су гредни носачи израђени од лепљеног ламелираног дрвета. Просечан распон међуспратних плоча од крстастог ламелираног дрвета износи 7,5 m [7].

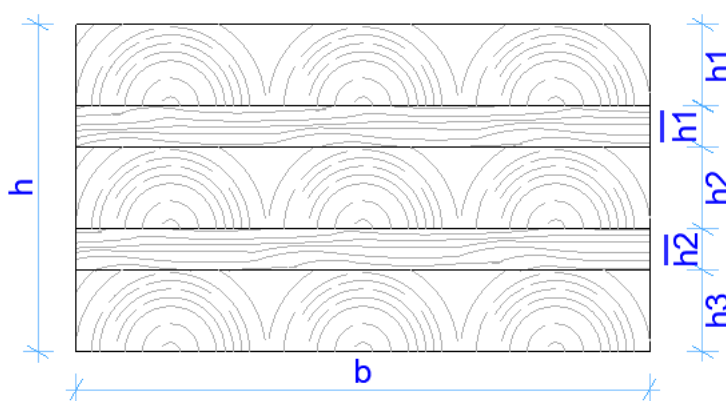


Слика 39. Средња школа у Норичу [7]

Пример прорачуна

Поставка задатка:

Применом Гамма метода израчунати ефективну крутост слободно ослоњеног КЛД панела дужине 5m и ширине 1,5m. Попречни пресек панела дат је сликом 40. Укупна висина панела износи 14,5 cm. Оптерећење делује управно на раван панела паралелно са влакнима спољних ламела.



Слика 40. Попречни пресек панела

Улазни подаци:

$$h_1 = h_2 = h_3 = 35 \text{ mm}$$

$$\bar{h}_1 = \bar{h}_2 = 20 \text{ mm}$$

$$h = 145 \text{ mm}$$

$$l = 5 \text{ m} = 5000 \text{ mm}$$

$$b = 1,5 \text{ m} = 1500 \text{ mm}$$

Физичко – механичке карактеристике подужних ламела:

$$E_0 = 11000 \text{ MPa}$$

$$E_{90} \approx \frac{E_0}{30} = \frac{11000}{30} = 366,67 \text{ MPa} \approx 370 \text{ MPa}$$

$$G_0 \approx \frac{E_0}{16} = \frac{11000}{16} = 687,5 \text{ MPa} \approx 690 \text{ MPa}$$

$$G_r \approx \frac{G_0}{10} = \frac{690}{10} = 69 \text{ MPa}$$

Физичко – механичке карактеристике попречних ламела:

$$E_0 = 9000 \text{ MPa}$$

$$E_{90} \approx \frac{E_0}{30} = \frac{9000}{30} = 300 \text{ MPa}$$

$$G_0 \approx \frac{E_0}{16} = \frac{9000}{16} = 562,5 \text{ MPa} \approx 560 \text{ MPa}$$

$$G_r \approx \frac{G_0}{10} = \frac{560}{10} = 56 \text{ MPa}$$

Однос распона и висине ламеле износи:

$$\frac{l}{h} = \frac{500}{14,5} = 34,5 > 30$$

па се смицање подужних панела занемарује.

$$h_1 = h_2 = h_3 = 35 \text{ mm}$$

$$\bar{h}_1 = \bar{h}_2 = 20 \text{ mm}$$

$$h = 145 \text{ mm}$$

$$E_1 = E_2 = E_3 = 11000 \text{ MPa}$$

$$G_R = 56 \text{ MPa}$$

Ефективна крутост се рачуна по једначини:

$$(EI)_{ef} = \sum (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$

Ако су: $\gamma_1 = \gamma_3 = \gamma$, $\gamma_2 = 1$,

Ефективна крутост ће бити једнака

$$(EI)_{ef} = (E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2) + (E_2 I_2) + (E_3 I_3 + \gamma_3 E_3 A_3 a_3^2)$$

Где је:

$$A_1 = A_3 = A$$

$$E_1 = E_2 = E_3 = E$$

$$I_1 = I_2 = I_3 = I = \frac{bh^3}{12}$$

$$a_2 = 0$$

$$a_1 = a_3 = a = \frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_1}{2} = \frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2}$$

Па се за ефективну крутост добија:

$$(EI)_{ef} = EI \left[3 + \frac{2\gamma A a^2}{I} \right]$$

Ако је:

$$\gamma = \frac{1}{\left[1 + \frac{\pi^2 EA}{l^2} \frac{\bar{h}}{G_R * b} \right]} = \frac{1}{\left[1 + \frac{\pi^2 * 11000 * (1500 * 35)}{5000^2} \frac{20}{56 * 1500} \right]} = 0,9486$$

$$A = bh = 1500 * 35 = 52\,500 \text{ mm}^2$$

$$a = a_1 = a_3 = \frac{h_1}{2} + \bar{h}_1 + \frac{h_1}{2} = \frac{h_2}{2} + \bar{h}_2 + \frac{h_3}{2} = \frac{35}{2} + 20 + \frac{35}{2} = 55 \text{ mm}$$

$$I = \frac{b h_1^3}{12} = \frac{1500 * 35^3}{12} = 3,573 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Ефективна крутост ће износити:

$$(EI)_{ef} = 11000 * 3,573 \times 10^6 \left[3 + \frac{2 * 0,9486 * 52500 * 55^2}{3,573 \times 10^6} \right] = 3432 \times 10^9 \text{ Nmm}^2$$

Закључак

Конструктивни елементи од лепљеног ламелираног дрвета имају све чешћу примену захваљујући својим изузетним карактеристикама. Премошћавање великих распона, велика механичка чврстоћа, отпорност на пожар, изузетна естетска својства су само неки од квалитета које поменути елементи поседују. Ова изузетна својства производа од лепљеног ламелираног дрвета се постижу квалитетним избором дрвета, а затим и изузетно прецизним поступком производње, што подразумева обраду, лепљење и проверу квалитета. Захваљујући брзој и релативно лакој монтажи време потребно за изградњу објеката је много краће у односу на бетонске конструкције. Обзиром да је лепљено ламелирано дрво изузетно отпоран материјал може се користити и у агресивнијим срединама, што му даје предност над другим конструктивним материјалима. Објекти саграђени од лепљених ламелираних носача и/или панела представљају стабилне и отпорне конструкције које се такође карактеришу и изузетном естетиком, па савременој архитектури даје посебну ноту. Са аспекта животне средине ЛЛД се може сматрати еколошким, јер представља материјал који је природно разградив, рециклабилан и одличан у чувању и складиштењу гасова стаклене баште, као што је CO_2 . Наравно, еколошким се може сматрати само у случајевима када се сече шума за добијање сировине одвија плански, засади бар толико нових стабала колико се посече.

Прорачуни су релативно једноставни, јер ови елементи могу да се сматрају хомогеним са довољном тачношћу. Последњих деценија и у нашој земљи прорачуни се врше према препорукама ЕВРОКОД стандарда чији део са ознаком Еврокод 5 (EN1995) се односи на пројектовање дрвених конструкција.

Литература

- [1] Мурављов М.:Грађевински материјали, Грађевинска књига, Београд 2007.
- [2] Митаг М.:Грађевинске конструкције, Грађевинска књига, Београд 2003.
- [3] Митровић С.: Металне и дрвене конструкције 2, Висока грађевинско геодетска школа у Београду, Београд 2011.
- [4] Гојковић М.: Дрвене конструкције, Научна књига и Грађевински факултету Београду, Београд 1983.
- [5] Кујунџић В.:Дрвене конструкције у мојој архитектонској пракси, аутомонографија, ЛКВ центар Београд, Архитектонски факултет у Београду и ИАС, Београд 2014.
- [6] Козарић Љ., Прокић А., Бешевић М., Војнић Пурчар М.: Прорачун угиба унакрсно ламелираног дрвеног међуспратног панела, Зборник радова грађевинског факултета бр. 30, Суботица 2016
- [7] КозарићЉ., Прокић А., Бешевић, М.:Унакрсно ламелирани дрвени елементи у савременим дрвеним конструкцијама зграда – примена и прорачун, Грађевински материјали и конструкције 58, Београд 2015.
- [8] Миливојевић Д.: Зградарство 1, Академска мисао, Београд 2014. године
- [9] Ћировић М.:Отпорност материјала I, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац 2008. године
- [10]American Institute of Timber Construction, editor: Jeff D. Linville (2012): Timber Construction Manual 6th Edition, New Jersey: Wiley
- [11] ENV 1995 Еврокод 5: Прорачун дрвених конструкција
- [12] <http://drvene-konstrukcije.hr/karakteristike-llld/> , приступљено: 09.09.2018.
- [13] <http://drvene-konstrukcije.hr/wp-content/uploads/2013/09/DRVENE-KONSTRUKCIJE-Katalog-2013.pdf>, приступљено: 09.09.2018.
- [14] <http://viminacium.org.rs/arheoloski-park/>, приступљено: 11.09.2018.
- [15] <http://viminacium.org.rs/arheoloski-park/zastitne-konstrukcije/>, приступљено: 12.09.2018.

[16] <http://ltablice.com/pravila-saobracaja/ostala-pravila-saobracaja/108-vanredni-prevoz>, приступљено: 16.09.2018.

[17] <http://www.piramidasm.rs/meni.php?id=projLLD>, приступљено: 19.09.2018.

[18] <http://www.piramidasm.rs/Piramida-Katalog2012.pdf>, приступљено: 21.09.2018.

[19] <http://bonsai-zen.hr/presjek-drva/>, приступљено: 19.09.2018.

[20] <http://drvene-konstrukcije.hr/karakteristike-llld/>, приступљено: 21.09.2018.

[21] <http://www.piramidasm.rs/meni.php?id=resetke>, приступљено: 21.09.2018.

[22] <https://www.mali-g.com/resetkaste-krovne-konstrukcije/>, приступљено: 22.09.2018.

[23] <http://www.dbs-engineering.com/sr/hale-sa-drvenom-konstrukcijom.php>, приступљено: 22.09.2018.

[24] <https://www.victoriaharbour.com.au/live-here/forte-living>, приступљено: 24.09.2018.

[25] https://www.binderholz.com/fileadmin/PDF/Services_Kontakt/Videos_Download/Prospekte/BS%20Verarbeitungsrichtlinie%20GB%20FIN.pdf, приступљено 21.10.2018.