

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Grbec, G. 2012. Uporaba sodobnih lesenih proizvodov pri lesenih konstrukcijah. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Lopatič, J.): 35 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Grbec, G. 2012. Uporaba sodobnih lesenih proizvodov pri lesenih konstrukcijah. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Lopatič, J.): 35 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVA

Kandidat:

GREGOR GRBEC

**UPORABA SODOBNIH LESNIH PROIZVODOV PRI
LESENIH KONSTRUKCIJAH**

Diplomska naloga št.: 7/B-GR

**THE USE OF MODERN WOODEN PRODUCTS IN
TIMBER LOAD-BEARING STRUCTURES**

Graduation thesis No.: 7/B-GR

Mentor:

izr. prof. dr. Jože Lopatič

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Član komisije:

doc. dr. Drago Saje

Ljubljana, 21. 09. 2012

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Gregor Grbec izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom: »Uporaba sodobnih lesnih proizvodov pri lesenih konstrukcijah«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Ljubljana, 7. 9. 2012

Gregor Grbec

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.011.1 (053.2)
Avtor:	Gregor Grbec
Mentor:	izr. prof. dr. Jože Lopatič
Naslov:	Uporaba sodobnih lesnih proizvodov pri lesenih konstrukcijah
Tip dokumenta:	Diplomska naloga - univerzitetni študij
Obseg in oprema:	35 str., 8 pregl., 18 sl., 2 pril.
Ključne besede:	LVL, PSL, LSL, OSB, leseni I-nosilci, lameliran lepljen les, križno lepljene plošče

Izvleček

V sodobnih lesenih konstrukcijah zaradi lažjega izpolnjevanja številnih funkcij, ki jih morajo danes opravljati gradbeni elementi, klasičen masivni les vse pogosteje nadomeščajo prefabricirani lesni proizvodi. V Sloveniji pri inženirskih konstrukcijah prevladujejo lamelirane lepljene lesene konstrukcije, v svetu pa se uveljavljajo tudi konstrukcije iz ostalih vrst konstrukcijskega kompozitnega lesa (Structural composite lumber – SCL), ki nadomešča klasične linijske elemente iz žaganega lesa. V diplomski nalogi so predstavljeni najpogostejši predstavniki sodobnih lesnih proizvodov. Analizirane so njihove lastnosti in izpostavljene prednosti in slabosti. Opisane so njihove možnosti uporabe tako v gradbeništvu kot tudi na drugih področjih. V skladu s standardi iz družine Evrokod 5 je povzet pregled osnovnega dimenzioniranja nosilnih elementov nekaterih izmed opisanih proizvodov.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.011.1 (053.2)
Author: Gregor Grbec
Supervisor: Assoc. Prof. dr. Jože Lopatič,
Title: The use of modern wooden products in the timber load-bearing structures
Document type: Graduation Thesis – University studies
Notes: 35 p., 8 tab., 18 fig., 2 ann.
Key words: LVL, PSL, LSL, OSB, wood I-joists, glulam, cross laminated timber

Abstract

In modern wooden structures classic solid wood is increasingly being replaced by prefabricated timber products. They are fulfilling many of the functions that construction elements are now required to do. In Slovenia glued laminated wooden structure dominates in engineering structures however on the other hand around the world other types of engineered wood composite (Structural composite lumber - SCL) which replaced the classical line elements from solid wood, have also been introduced in construction. In the thesis most frequent representatives of modern wood products are represented. Their properties are analyzed along with their strengths and weaknesses. Possibilities for their use in construction as well as in other areas are described. In accordance with the standards from Eurocode 5 overview of the basic dimensioning of load-bearing elements of some of the described products is summarized.

KAZALO VSEBINE

POPRAVKI.....	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	IV
1 UVOD.....	1
2 LESNI KOMPOZITI.....	2
3 KONSTRUKCIJSKI KOMPOZITNI LES.....	3
3.1 Slojnat furnirni les	3
3.1.1 Splošno	3
3.1.2 Proizvodnja.....	4
3.1.3 Prednosti in slabosti	5
3.1.4 Uporaba.....	6
3.1.5 Mehanske lastnosti	6
3.1.6 Tehnične karakteristike	7
3.1.7 Dimenzioniranje	7
3.2 Lepljeni na pasove razrezani furnirji	8
3.2.1 Splošno	8
3.2.2 Proizvodnja.....	8
3.2.3 Prednosti in slabosti	9
3.2.4 Uporaba.....	10
3.3 Kompozitni les iz dolgih usmerjenih iveri.....	10
3.3.1 Proizvodnja.....	11
3.3.2 Prednosti in slabosti	12
3.3.3 Uporaba.....	12
3.3.4 Mehanske lastnosti	12
4 PLOŠČA Z USMERJENIM IVERJEM.....	13
4.1 Splošno	13
4.2 Proizvodnja.....	14
4.3 Prednosti in slabosti.....	14
4.4 Uporaba.....	15
4.5 Mehanske lastnosti	15
5 LESENI I - NOSILCI	16
5.1 Splošno	16
5.2 Proizvodnja.....	16
5.3 Prednosti in slabosti.....	17
5.4 Uporaba.....	18

5.5	Mehanske lastnosti.....	18
5.6	Dimenzioniranje	19
6	ELEMENTI LEPLJENI IZ MANJŠEGA ŠTEVILA DELOV.....	19
6.1	Splošno	19
6.2	Proizvodnja	20
6.3	Prednosti in slabosti	20
6.4	Uporaba	20
6.5	Mehanske lastnosti.....	21
6.6	Tehnične karakteristike	22
6.7	Dimenzioniranje	22
7	LEPLJEN LAMELIRAN LES.....	22
7.1	Splošno	22
7.2	Proizvodnja	23
7.3	Prednosti in slabosti	24
7.4	Uporaba	25
7.5	Mehanske lastnosti.....	25
7.6	Tehnične karakteristike	26
7.7	Dimenzioniranje	26
8	PLOŠČE IZ KRIŽNO LEPLJENEGA LESA.....	26
8.1	Splošno	26
8.2	Prednosti in slabosti	28
8.3	Uporaba	29
8.4	Mehanske lastnosti.....	29
8.5	Tehnične karakteristike	30
8.6	Dimenzioniranje	30
9	Zaključek.....	33
	VIRI.....	34
	SEZNAM PRILOG.....	

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Mehanske lastnosti proizvoda Kerto-LVL	7
Preglednica 2: Tehnične karakteristike proizvoda LVL, ki so podane s strani proizvajalcev	7
Preglednica 3: Mehanske lastnosti proizvoda TimberStrand® LSL	13
Preglednica 4: Mehanske lastnosti elementov lepljenih iz manjšega števila delov po podatkih proizvajalca Stora Enso	22
Preglednica 5: Tehnične karakteristike elementov lepljenih iz manjšega števila delov	22
Preglednica 6: Tehnične karakteristike lameliranega lepljenega lesa	26
Preglednica 7: Mehanske lastnosti križno lepljenega lesa po podatkih proizvajalca KLH	30
Preglednica 8: Tehnične karakteristike po podatkih proizvajalca KLH.....	30

KAZALO SLIK

Slika 1: Shema razdelitve lesnih kompozitov (Ščernjavič, 2008)	2
Slika 2: Shematski prikaz kontinuirane proizvodnje LVL (Šernek, 2008)	5
Slika 3: Proizvod LVL in prikaz njegove uporabe (www.kerto.de)	6
Slika 4: Shematski prikaz proizvodnje PSL (Šernek, 2008)	9
Slika 5: Izgled proizvoda PSL in primer njegove uporabe (www.structuremag.org)	10
Slika 6: Shematski prikaz proizvodnje LSL (Šernek, 2008)	11
Slika 7: Proizvod LSL in primer njegove uporabe (http://lpcorp.com)	12
Slika 8: Plošče OSB in primer uporabe (www.pegydom.si)	15
Slika 9: Shematski prikaz proizvodnje I-nosilcev (www.woodaware.info)	17
Slika 10: Primer uporabe I-nosilcev (www.structuremag.org)	18
Slika 11: Proizvoda Duo in Trio (www.kvh.eu)	21
Slika 12: Primer uporabe dvoslojnih nosilcev z utorom in peresom (www.storaenso.com)	21
Slika 13: Shematski prikaz proizvodnje in lepljenje lameliranega lesa (Kitek Kuzman in Hrovatin, 2006)	24
Slika 14: Most iz lameliranega lepljenega lesa - Apple Valley Road Bridge (www.flickrriver.com)	25
Slika 15: Postopek izdelave križno lepljene plošče (www.en.brettsperrholz.org)	27
Slika 16: Križno lepljene plošče in primer uporabe elementov (http://cn.europeanwood.org)	28
Slika 17: Prikaz orientacije slojev v križno lepljeni plošči (www.mm-kaufmann.com)	32
Slika 18: Potek napetosti po prečnem prerezu upogibno obremenjene križno lepljene plošče (www.mm-kaufmann.com)	32

1 UVOD

S kombinacijo materialov lahko dosežemo zahtevane lastnosti v primerih, ko lastnosti posameznih materialov niso zadovoljive. V zadnjem času je prišlo do hitrega razvoja na področju novih materialov, vendar je njihova uporaba v Sloveniji še vedno dokaj skromna in omejena.

Les je eden izmed najstarejših gradbenih materialov, poleg naravnega kamna in opeke. Prvotno so ga uporabljali predvsem zaradi njegove dostopnosti in enostavne obdelave. Služil je predvsem za prevzem upogibnih obremenitev, danes pa se ga z različnimi tehnološkimi postopki obdela in proizvede v velikih formatih, ki se lahko uporabljajo tudi kot stenski, strešni ali stropni elementi. Les v taki obliki lahko prenaša različne vrste obremenitev, hitrost gradnje objektov pa se je občutno povečala. Bivanje v leseni zgradbi prinaša občutek toplote in udobja.

Splošna uporaba lesa kot konstrukcijskega materiala prinaša določene prednosti, ima pa tudi nekaj slabosti. Če primerjamo les z drugimi konstrukcijskimi materiali, so njegove prednosti predvsem v majhni porabi energije za obdelavo lesa, velika nosilnost glede na lastno težo, toplotna izolativnost, enostavno obdelovanje, hkrati pa je ekološko prijazen in obnovljiv material. Ko posekamo drevesa, jih lahko ponovno zasadimo, s tem pa ohranimo gozdne površine in nivo proizvedenega kisika. Čeprav je les gorljiv material, so raziskave pokazale, da ima dobro požarno odpornost, saj pri gorenju na svoji površini ustvari zoglenelo plast, torej neko vrsto samozaščite, hkrati pa jedro ohranja mehanske lastnosti.

Slabosti lesa izvirajo iz njegove narave. Les je anizotropen, nehomogen in dimenzijsko nestabilen material, saj ob spremembi vlažnosti spreminja svojo obliko in dimenzije. Ker je naravni material, je izpostavljen različnim biološkim škodljivcem kot so lesne glive, mikroorganizmi, bakterije in insekti (M. Premrov in P. Dobrila, 2008). V naravi je težko pridobiti debla večjih premerov za izdelavo konstrukcijskega masivnega lesa večjih dimenzij, poleg tega pa les vsebuje napake. Prednostna raba masivnega lesa v lesenih konstrukcijah je upravičena iz ekološkega vidika, vendar pri njegovi uporabi velikokrat ne zadostimo konstrukcijskim zahtevam. Prav zaradi teh razlogov so se razvili sodobni lesni kompoziti. Izboljšane mehanske lastnosti, manjše število napak in nizka vsebnost vlage v lesu, vodoodpornost in večje dimenzije so le nekatere od prednosti sodobnih lesnih proizvodov.

V diplomski nalogi so predstavljeni najpogostejši predstavniki sodobnih lesnih proizvodov, ki se množično uporabljajo po svetu. Po standardu SIST EN 1995-1-1 (Evrokod 5) je povzet pregled postopkov za osnovno dimenzioniranje nekaterih sodobnih lesnih kompozitov, ki se uporabljajo tudi v Sloveniji.

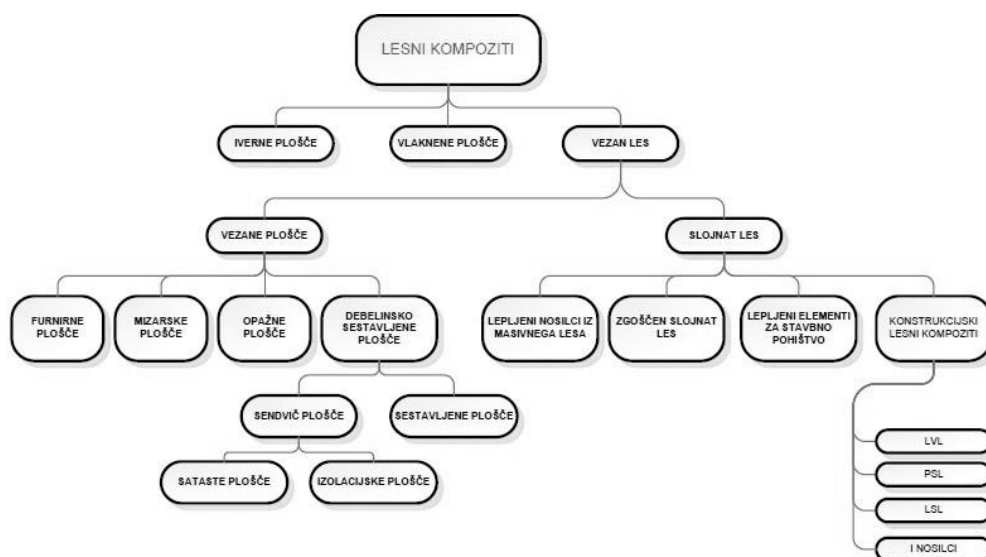
2 LESNI KOMPOZITI

Z razvojem sintetičnih lepil in ustreznih tehnoloških postopkov izdelave so se v 20. stoletju pojavili lesni kompoziti. Glavni razlog za njihov razvoj je, da ima les v njegovi naravni obliki neenakomerne in nepredvidljive lastnosti, zato ga je potrebno za uporabo v gradbeništvu primerno obdelati. Z ustrežno obdelavo lahko zmanjšamo ali povsem izločimo napake v lesu, hkrati pa izboljšamo njegove lastnosti. Za lesne kompozite je značilno tehnično sušenje surovine, kar je ključno za zagotavljanje kakovosti proizvodov, saj če je površina lesa prevlažna, lepilo počasneje ali sploh ne prehaja v samo strukturo lesa.

Kompoziti so materiali, ki so sestavljeni iz dveh ali več komponent. Lesne kompozite izdelujemo iz dezintegriranega lesa (iveri, vlakna), furnirjev, ali letev, ki jih z ustreznimi lepili spojimo pod vplivom tlaka in temperature. Razlike med različnimi vrstami lesnih kompozitov se pojavljajo v načinu izdelave, toplotni in zvočni izolativnosti, sestavi, fizikalnih lastnostih, mehanskih lastnostih, namembnosti, reoloških in estetskih lastnostih.

V primerjavi z masivnim gradbenim lesom imajo lesni kompoziti veliko prednosti, kot so dimenzijska stabilnost, skoraj neomejena dimenzija, visoka nosilnost glede na težo, estetski videz lesa, s pomočjo tehnoloških postopkov sušenja lesa in ustreznih kemijskih sredstev pa je dosežena visoka odpornost na biološke škodljivce in vremenske ter nezgodne pojave (požar).

Nenadomestljivost lesnih kompozitov se kaže predvsem v njihovi vsestranski uporabi v gradbeništvu, kot je uporaba v konstrukcijske namene, za stavbno in stanovanjsko pohištvo, itd. Kompozitni les se v gradbeništvu vse bolj uveljavlja za izdelavo nosilnih konstrukcij in uspešno konkurira klasičnim gradbenim materialom zaradi njegovih odličnih lastnosti.



Slika 1: Shema razdelitve lesnih kompozitov (Ščernjavič, 2008)

3 KONSTRUKCIJSKI KOMPOZITNI LES

Pod imenom konstrukcijski kompozitni les ali SCL (ang. structural composite lumber) označujemo skupino lesnih proizvodov, ki so sestavljeni iz listov furnirja, trakov furnirja ali dolgih in tankih ploščatih iveri. Ti so običajno zlepljeni z vodoodpornim lepilom pod visokim pritiskom in pri predpisani temperaturi v obliko določenega konstrukcijskega elementa. Proizvodi SCL imajo nekaj skupnih lastnosti in prednosti kot so dobra dimenzijska stabilnost, visok izkoristek lesne surovine (do 80 % ali več), boljše mehanske lastnosti, različne vrste oblik in dimenzij, z izločanjem in distribucijo napak lesa pa dosežemo bolj enakomerne lastnosti proizvodov. Osnovni lesni gradniki so usmerjeni v vzdolžni smeri proizvoda, lepljeni so z lepili za konstrukcijsko uporabo, ki imajo visoko trdnost in trajnost ter so odporna proti biološkim škodljivcem, temperaturi, vodi in vlagi (Šernek, 2004).

Proizvodi so bili razviti v Severni Ameriki, kjer jih še danes množično uporabljajo za gradnjo lesenih hiš, stanovanjskih in poslovnih objektov ter hal.

Predstavniki SCL proizvodov so:

- Slojnat furnirni les (LVL - laminated veneer lumber),
- Lepljeni na pasove razrezani furnirji (PSL - parallel strand lumber) in
- Kompozitni les iz dolgih usmerjenih iveri (LSL - laminated strand lumber).

3.1 Slojnat furnirni les

3.1.1 Splošno

Slojnat furnirni les (LVL - laminated veneer lumber) je bil prvi lesni inženirski proizvod iz skupine SCL. Proizvod predstavlja novo tehnologijo uporabe lesa, njegova proizvodnja in uporaba pa se po svetu stalno povečujeta. V zadnjih dvajsetih letih je postal pomembna novost, ki je na gradbenem področju ustvarila veliko zanimanja in s tem postal resna konkurenca drugim lesnim proizvodom.

Uvrščamo ga med lesne kompozite. Sestavljen je iz najmanj petih slojev furnirja različnih debelin, ki so tanjši od 6 mm. Usmerjenost furnirjev je vzporedna z vzdolžno smerjo lesnih vlaken v zunanem furnirju lepljenca, določeno število furnirnih listov pa je lahko usmerjenih pravokotno na smer zunanega furnirja. Furnirni listi so med seboj zlepljeni z vodoodpornim lepilom, vzdolžni spoji pa so med seboj zamaknjeni za 100 do 120 mm. Poznamo več vrst dolžinskega spajanja furnirnih listov. V sodobni proizvodnji je najpogostejša izvedba poševnega spoja, saj je trdnostno najugodnejša, vendar tehnološko zahtevna. Najenostavnejši in najcenejši dolžinski spoj lahko izvedemo s čelno sestavo, vendar imamo na mestu spoja luknjo, ki vpliva na porazdelitev napetosti in na trdnost celotnega elementa. Ta vrsta spoja se malo uporablja, lahko pa ga izboljšamo s trakovi iz grafitnih vlaken

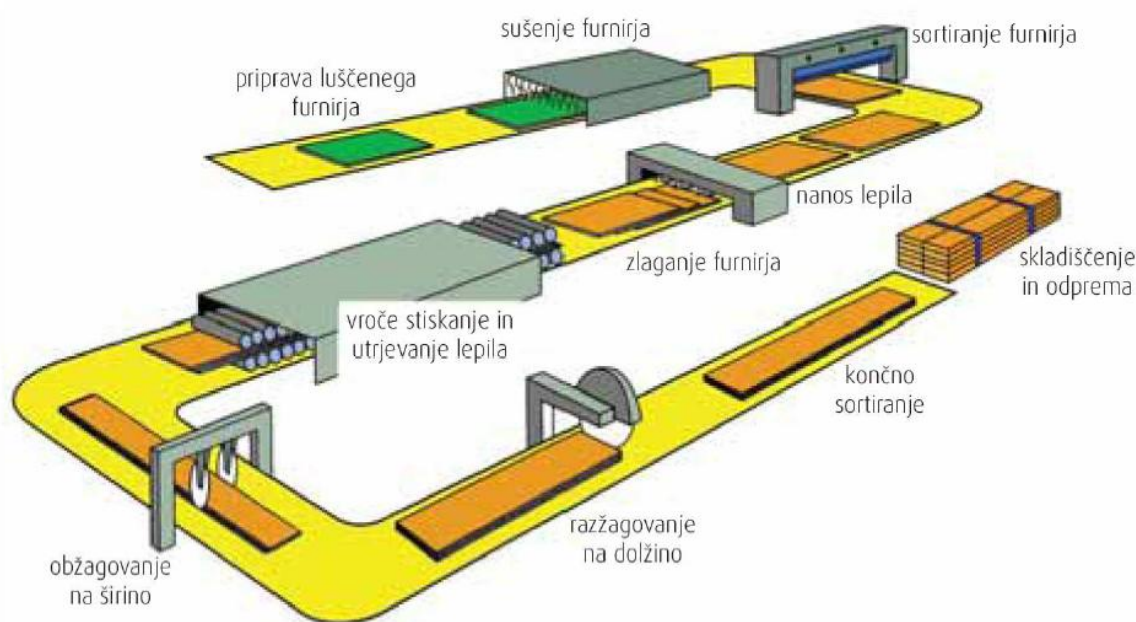
prepojenih s fenol-formaldehidno smolo. Način dolžinskega spajanja s prekrivanjem je enostaven, vendar imamo na mestu spoja visoko zgostitev lesa, kar pa je lahko zelo neugodno pri uporabi proizvoda v okolju z nihajočo vlažnostjo (prekomerno nabrekanje).

LVL velja za zanesljiv in kakovosten proizvod predvsem zaradi tehnološkega postopka, ki izloči ali razprši napake v lesu. Množično se ga uporablja v ZDA, medtem ko je proizvod v Sloveniji poznan, vendar se ga na tržišču zelo redko uporablja (Šernek, 2004).

3.1.2 Proizvodnja

Slojnat furnirni les so začeli proizvajati okrog leta 1960 v ZDA. Takrat tržno ni uspel, vendar je od leta 1968 ponovno zaživel, ko ga je ameriško podjetje Trus Joist Corporation začelo proizvajati na kontinuiran način pod tržnim imenom MicrollamTM. Danes večino LVL proizvajajo v ZDA, Avstraliji, Novi Zelandiji in na Japonskem, v Evropi pa je najbolj razširjena proizvodnja na Finskem pod tržnim imenom KertoTM.

Poznamo dva načina industrijske proizvodnje in sicer diskontinuiran in kontinuiran. V nadaljevanju bo povzet slednji tehnološki postopek (slika 2). Predhodno razžagano hlodovino predpisane dolžine oluščijo in namočijo v vročo vodo. Po celodnevem namakanju s pomočjo rotacijske žage iz hlodovine pridobijo furnirne liste debeline okoli 3 mm, ki jih nato strojno posušijo na vlažnost približno 5 %. Furnirne liste so v preteklosti pridobivali izključno iz hlodovine iglavcev (bor, duglazija, jelka in smreka), dandanes pa tudi iz listavcev nizke ali srednje gostote (topol). Ostanek jedra hlodovine običajno uporabijo za izdelavo lesnih briketov. V naslednji fazi liste furnirja razvrstijo glede na trdnost in kvaliteto ter odstranijo tiste, ki ne ustrezajo standardom. Na furnirje strojno nanesejo vodoodporno lepilo (fenol-formaldehidna lepila) in jih zložijo tako, da so v jedru lepljenca furnirni listi nižje kvalitete, na zunanji strani pa so furnirni listi z boljšimi lastnostmi, saj se s tem izboljšajo upogibne lastnosti proizvoda. Ustrezno debelino dobimo z večjim številom furnirjev, vendar je iz ekonomskih razlogov debelina omejena na okoli 80 mm. Vzдолžno sestavljanje furnirja je izvedeno z ustreznim in natančnim dolžinskim spojem, hkrati pa je potrebno zagotoviti predpisano dolžino zamika spoja glede na sosednje furnirne liste. Sestavljeni lepljenec nato obdelajo v vroči stiskalnici na temperaturi okrog 180 °C in pod pritiskom do 15 barov. V teh pogojih lepilo poveže furnirne liste med sabo. V zadnji fazi proizvod razžagajo na zelene dimenzije. Širina proizvoda LVL je omejena s konstrukcijo stiskalnice (do 2 m), medtem ko je dolžina omejena s transportom nosilca (približno 25 m). S hladnim lepljenjem LVL proizvodov med seboj je mogoče izdelati debelejšee nosilce.



Slika 2: Shematski prikaz kontinuirane proizvodnje LVL (Šernek, 2008)

3.1.3 Prednosti in slabosti

Slojnat furnirni les ima v primerjavi z masivnim lesom veliko prednosti, ki izvirajo iz njegove specifične proizvodnje. LVL ima v vzdolžni smeri boljše mehanske karakteristike (modul elastičnosti, upogibna, strižna, natezna in tlačna trdnost) zaradi usmerjenosti lesnih vlaken furnirja v smeri dolžine nosilca in zaradi odstranitve napak oziroma njihove razpršitve med procesom proizvodnje. Proizvod odlikuje konsistentna kakovost oziroma predvidljivost, saj so razlike trdnostnih lastnosti proizvoda manj variabilne. LVL velja za dimenzijsko stabilen proizvod, saj so dimenzijske spremembe zaradi vlage manjše kot pri žaganem lesu. Ker so furnirni listi tehnično posušeni relativno nizke vlažnosti, se proizvod po vročem stiskanju ne skrči več, zato se v LVL ne pojavijo razpoke. Z različnimi zaščitnimi sredstvi lahko proizvod kvalitetno impregniramo. Izkoristek lesne surovine je večji kot pri žaganem lesu (do 80% ali več). Za izdelavo nosilca večjih dimenzij lahko pri proizvodnji uporabimo tudi hlodovino manjšega premera. LVL odlikuje dimenzijska pestrost in dolžinska neomejenost.

Slabost proizvoda je omejena debelina, ki jo lahko dosežemo zaradi procesa proizvodnje, čeprav lahko s hladnim lepljenjem proizvodov med seboj sestavimo debelejšje nosilce. Velike investicije v tehnologijo, dodana lepila in lesne surovine, ki morajo biti kvalitetne in primerne za luščenje povzročijo zahtevno in drago proizvodnjo LVL. Ob neprimerni uporabi lahko pride do problema usločenja LVL po širini, ki ga preprečimo z vodo nepropustnimi premazi ali pa z dodatnim prečnim slojem furnirja tik pod površino proizvoda LVL (Šernek, 2004).

3.1.4 Uporaba

LVL se danes uporablja na področjih, kjer je zahtevana dimenzijska stabilnost in velika trdnost materiala. Standard EN 14279 razvršča LVL v štiri razrede:

- LVL za splošno uporabo v suhih pogojih (LVL),
- nosilni LVL za uporabo v suhih pogojih (LVL/1),
- nosilni LVL za uporabo v vlažnih pogojih (LVL/2),
- nosilni LVL za uporabo v zunanjih pogojih (LVL/3).

V gradbeništvu LVL lahko uporabimo za konstrukcijske namene, in sicer kot samostojen nosilec, kot element paličja, kot strešne tramove, kot nosilne plošče, kot pasnice pri različnih tipih sestavljenih nosilcev (I-nosilci, COMPLY™, ...), kot okvir v stenskih panelih, kot tudi za ojačitev nateznega dela pri lepljenih nosilcih ali kot plošče za zidarske odre.

V splošnem lahko LVL uporabimo tudi za okvirje oken in vrat, stopnice, železniške pragove, električne in telefonske drogove, sredice smuči, stranice pri tovornjakih, pode kontejnerjev, itd.



Slika 3: Proizvod LVL in prikaz njegove uporabe (www.kerto.de)

3.1.5 Mehanske lastnosti

Mehanske lastnosti proizvoda LVL se razlikujejo od pri različnih proizvajalcih in so odvisne od tehnoloških postopkov izdelave ter botanične vrste lesa, ki jo uporabijo za proizvodnjo. V preglednici 1 so podane karakteristične vrednosti, ki jih podaja evropski proizvajalec Metsäliitto Cooperative Finforest, Kerto. Proizvod Kerto-Q se razlikuje od Kerto-S po tem, da ima določeno število furnirnih listov prečno usmerjenih glede na zunanji furnir. Narejena sta iz drevesnih vrst iglavcev (smreka, bor).

Element lahko obremenimo po debelini (edgewise) ali po širini (flatwise). Njune karakteristične vrednosti so podane v Preglednica 1. Natezna in upogibna trdnost sta odvisni od velikosti dimenzij proizvoda (debelina, dolžina). Vpliv dimenzij zajamemo s faktorjema k_h in k_l , ki sta podana v Evrokodu 5, pri izračunu le-teh pa upoštevamo vrednost parametra $s = 0,12$ MPa.

Preglednica 1: Mehanske lastnosti proizvoda Kerto-LVL

		Kerto-S®	Kerto-Q®	
Karakteristične trdnosti [MPa]				
Upogibna trdnost	d = 300 mm	$f_{m,0,edge,k}$	44	32
		$f_{m,0,flat,k}$	50	36
Natezna trdnost, paralelno ($l=3000$ mm)		$f_{t,0,k}$	35	26
Natezna trdnost, pravokotno		$f_{t,90,k}$	0,8	6
Tlačna trdnost, paralelno		$f_{c,0,k}$	35	26
Tlačna trdnost, pravokotno		$f_{c,90,edge,k}$	6	9
		$f_{c,90,flat,k}$	1,8	1,8
Strižna trdnost, paralelno		$f_{v,0,edge,k}$	4,1	4,5
		$f_{v,0,flat,k}$	2,3	1,3
Togosti [MPa]				
Povprečni modul el., paralelno		$E_{0,mean}$	13800	10500
Povprečni modul el., pravokotno		$E_{90,edge,mean}$	430	2400
		$E_{90,flat,mean}$	130	130
Povprečni strižni modul, paralelno		$G_{0,mean}$	600	600
Gostota (kg/m^3)				
Gostota, karakteristična		ρ_k	480	
Gostota, povprečna		ρ_{mean}	510	

3.1.6 Tehnične karakteristike

Preglednica 2: Tehnične karakteristike proizvoda LVL, ki so podane s strani proizvajalcev

Hitrost gorenja [mm/min]	β_0	0,60 – 0,70
Vlažnost	v	10 % ($\pm 2\%$)
Specifična toplotna kapaciteta [J/kgK]	c	1700
Koeficient toplotne prevodnosti [W/mK]	λ	0,11 - 0,2

3.1.7 Dimenzioniranje

Konstrukcijski elementi iz slojnatega furnirnega lesa morajo ustrezati zahtevam SIST EN 14374:2005 (Lesene konstrukcije – Furnirni slojnat les za konstrukcije – Zahteve). Nosilnost, stabilnost in požarno odpornost preverjamo v skladu s standardom Evrokod 5 (SIST EN 1995-1-1 - Splošna pravila in pravila za stavbe in SIST EN 1995-1-2 - Splošna pravila – Projektiranje požarnovarnih konstrukcij).

Pri dimenzioniranju lahko uporabimo nacionalne dodatke posameznih držav, če so le ti del Evrokoda 5. Za delni materialni varnostni faktor privzamemo vrednost $\gamma_m = 1,20$, moramo pa biti pozorni tudi na druge spremembe vrednosti posameznih parametrov, ki so odvisne od vrste materiala (npr. pri izbiri modifikacijskega faktorja k_{mods} itd.). Pri računskih dokazih nosilcev s spremenljivo višino uporabljamo enake dodatne zahteve in pravila kot pri lepljenih lameliranih nosilcih. Posebna pravila za dimenzioniranje lukenj vzdolž nosilca in priključevanje konstrukcijskih elementov z veznimi sredstvi so lahko navedena v nacionalnih dodatkih posameznih držav.

3.2 Lepljeni na pasove razrezani furnirji

3.2.1 Splošno

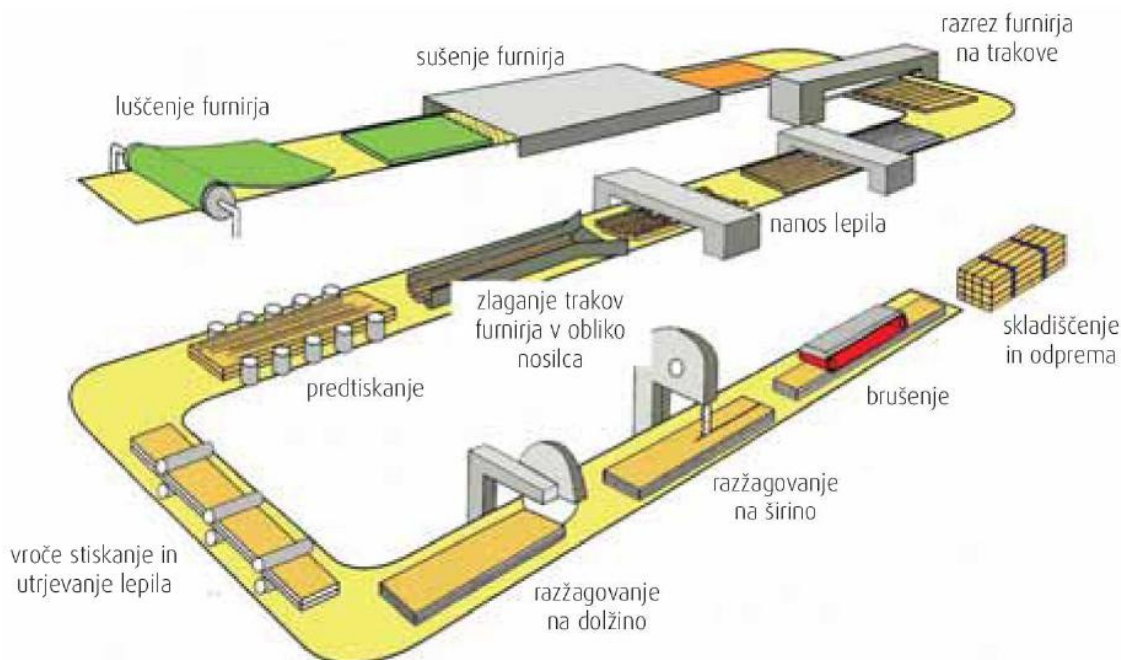
Lepljeni na pasove razrezani furnirji (PSL - parallel strand lumber) je eden od sodobnih lesnih kompozitov. Razvoj PSL sega v sedemdeseta leta prejšnjega stoletja, ko se je pojavila ideja uporabiti ostanke dreves iz proizvodnje žaganega lesa in ostalih vrst konstrukcijskega lesa. Kot že ime pove je proizvod sestavljen iz vzporedno usmerjenih trakov luščenega furnirja, ki so pod pritiskom zlepljeni z vodoodpornim lepilom (fenol-formaldehidna ali fenol-rezorcinol-formaldehidna lepila) v obliko nosilca s prerezom dimenzij do 280 x 500 mm in dolžine do 20 m. Odkar se je proizvod pojavil na trgu, se v svetu trend uporabe vztrajno povečuje, medtem ko je v Sloveniji proizvod še dokaj nepoznan.

3.2.2 Proizvodnja

Proizvod PSL je začelo proizvajati kanadsko podjetje Trus Joist MacMillan po patentiranem postopku. Na trgu je na voljo od leta 1984 pod tržnim imenom Parallam® PSL.

Za proizvodnjo PSL se uporablja drobna hlovovina bora, duglazije, tulipanovca in trobelike. Hlovovino oluščijo na 3,2 mm debele furnirne liste, jih tehnično posušijo do vlažnosti okoli 11 % ter razrežejo na trakove širine od 10 do 20 mm in dolžine od 0,6 do 2,4 m. Trakovi furnirja so razrezani tako, da so lesna vlakna vzporedna z dolžino trakov. V naslednji fazi sledi sortiranje trakov, saj niso vsi trakovi enaki. Prekratki trakovi padejo skozi prekinjen tekoči trak v odpadni koš, prešibki pa se zlomijo pod lastno težo in se prav tako izločijo. Na primerne trakove furnirja nanesejo lepilo in jih poravnajo tako, da so vzdolžno usmerjeni. Oblikovan proizvod potuje v predstiskalnico, kjer ga pod pritiskom zgostijo, s tem pa dobijo boljše trdnostne lastnosti proizvoda. Proces proizvodnje se nadaljuje v visokofrekvenčni stiskalnici, kjer proizvod s pomočjo mikrovalovne energije segrejejo na temperaturo okoli 150 °C. Pri tej temperaturi začne lepilo vezati. Proizvod nato dokončno zlepijo v kontinuirani stiskalnici in ga kasneje razžagajo na končne dimenzije. Z lepljenjem več PSL nosilcev

med seboj lahko dobijo elemente z večjim prečnim prerezom, s katerimi lahko premagujejo daljše razpone.



Slika 4: Shematski prikaz proizvodnje PSL (Šernek, 2008)

3.2.3 Prednosti in slabosti

Trdnostne lastnosti so podobne ali celo boljše od trdnostnih lastnosti masivnega lesa, proizvod pa je lahko tudi daljši in večjih dimenzij. V primerjavi z masivnim lesom nosilci PSL lahko prenašajo večjo obremenitev, uporabimo pa jih lahko tudi tam, kjer je potreben velik razpon. PSL velja za konsistenten in predvidljiv material, saj se med procesom proizvodnje večje napake lesa izločijo oziroma se razpršijo. Za izdelavo PSL je možno uporabiti tudi manj kakovosten furnir in manjše furnirske formate ter ostanke pri luščenju furnirja. S povezovanjem proizvodnih linij za izdelavo LVL in PSL lahko dosežemo visok izkoristek lesne surovine. Končan proizvod ima nizko vsebnost vlage, zato je odporen proti krčenju, krivljenju in upogibanju. Proizvod PSL lahko s kemijskimi sredstvi dobro zaščitimo pred plesnijo, glivami in insekti.

Slabost proizvoda je, da je težji kot žagan les ali lepljeni nosilci podobnih dimenzij. Končni izdelek je dražji, saj je proizvodnja zahtevna in omejena na lesno surovino, ki jo je mogoče luščiti v furnir. Povezave PSL z drugimi konstrukcijskimi elementi ne smejo biti žebljane ampak so lahko izvedene s pomočjo pomožnih kovinskih plošč (Šernek, 2004).

3.2.4 Uporaba

Proizvod PSL se za konstrukcijske namene uporablja tam, kjer je potrebna visoka upogibna trdnost in kjer je končni videz pomemben, saj so elementi vizualno privlačni. V gradbeništvu se uporabljajo predvsem za razne nosilce, grede, preklade, lege in stebre. Za široko uporabo je namenjen predvsem za izdelavo srednjih in večjih gradnikov pri večjih in težjih konstrukcijah (dolga paličja, skeletne konstrukcije). V materialu se pojavljajo tehnološke pore, zato lahko uporabijo različna zaščitna sredstva, ki lahko pronicajo globoko v notranjost elementa. Tako impregniran proizvod uporabljajo tudi za izdelavo manjših mostov (Šernek, 2004).



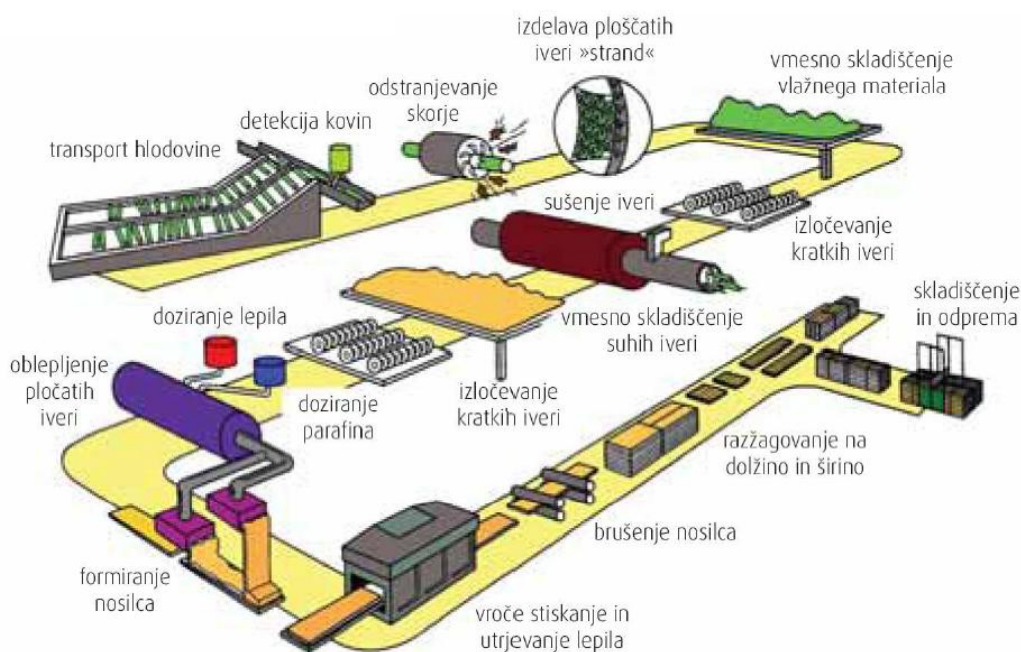
Slika 5: Izgled proizvoda PSL in primer njegove uporabe (www.structuremag.org)

3.3 Kompozitni les iz dolgih usmerjenih iveri

Kompozitni les iz dolgih usmerjenih iveri (LSL - laminated strand lumber) je eden izmed najnovejših lesnih inženirskih proizvodov. Razvit je bil v Kanadi, na trgu pa je na voljo od devetdesetih let 20. stoletja. Ideja razvoja proizvoda LSL je bila izraba odvečnih ostankov lesa in dreves, ki niso bila ravna ali dovolj velika za izdelavo običajnih lesnih proizvodov. Proizvod LSL je sestavljen iz dolgih ploščatih iveri, ki so usmerjene vzporedno dolžini elementa in zlepljene z vodoodpornim lepilom. Za proizvodnjo uporabljajo hitro rastoče vrste dreves kot so tulipanovec in različne vrste topola, predvsem trepetliko. V Severni Ameriki je proizvod znan pod tržnim imenom TimberStrand® LSL, v Evropi pa kot Intrallam™.

3.3.1 Proizvodnja

Proizvodnja LSL izhaja iz razširjene tehnologije, ki se uporablja za proizvodnjo OSB plošč (oriented strand board). Proizvodni proces se začne s pregledom kakovosti hlodovine, ki jo nato razžagajo na primerno dolžino in ji odstranijo skorjo. Hlodovino transportirajo do velikih bazenov, kjer jo namočijo v vročo vodo, s tem pa preprečijo, da v naslednji fazi ne nastane preveč majhnih delcev. Po nekaj urah namakanja hlodovino transportirajo do posebnega iverilnika, ki iz nje izdelava iveri širine do 25 mm, dolžine do 300 mm in debeline med 0,7 in 1,3 mm. Na novo izdelane iveri vmesno shranijo v vlažnih zabojih, nato pa s sejanjem izločijo premajhne delce, ki jih kasneje uporabijo kot kurivo. V posebnih rotacijskih sušilnih strojih iveri posušijo na primerno vlažnost, kar je ključno za stabilnost končnega proizvoda. V posebnem mešalniku na posušene iveri brizgajo poliuretantsko lepilo. Pri proizvodnji se običajno uporablja lepila brez vsebnosti snovi prostega formaldehida, ki lahko povzroči nelagodno počutje, draženje oči in dihal. Na tekoči trak enakomerno natresejo mešanico lepila in iveri ter formirajo proizvod tako, da se večina iveri poravna z vzdolžno osjo. Med tem postopkom natančno kontrolirajo gostoto materiala. Oblikovan proizvod razrežejo na želeno dolžino in ga transportirajo v vročo stiskalnico, kjer ga utrdijo na visoki temperaturi in pod velikim pritiskom. Med tem procesom s posebnimi iglami vbrizgavajo paro v jedro LSL, s tem pa pospešijo proces vezanja in izboljšajo mehanske lastnosti zaradi zgojitve lesa. Ta metoda omogoča izdelavo debelejših proizvodov in znižanje stroškov proizvodnje. Toplotno obdelane proizvode LSL obrusijo in razžagajo na končne dimenzije. Te so omejene, in sicer debelina na 140 mm, širina na 2,4 m in dolžina na 15 m. (Šernek, 2004). Kakovost izdelave LSL preverjajo z destruktivnimi metodami pri naključno izbranih proizvodih.



Slika 6: Shematski prikaz proizvodnje LSL (Šernek, 2008)

3.3.2 Prednosti in slabosti

Prednost proizvoda LSL lahko vidimo v uporabi manj kvalitetne lesne surovine za proizvodnjo materiala. Izraba lesne surovine je izredno visoka (nad 80%) in je največja med vsemi SCL proizvodi. Posebna prednost LSL je uporaba hitro rastočih vrst dreves, ki so kot surovina uporabna že ko dosežejo majhen premer debla. Specifični proces proizvodnje zagotavlja, da je proizvod brez napak kot so grče in razpoke, ki bi jih lahko srečali v masivnem lesu. Poseben sistem vbrizgavanja pare omogoča zgostitev lesa, s tem pa izboljšanje mehanskih lastnosti. Proizvod je odporen na upogibanje, krivljenje in krčenje zaradi strojnega sušenja iveri na tehnično vlažnosti. Zaščitna sredstva je možno dodati med samim proizvodnim procesom, zato ni potrebna kasnejša impregnacija kot pri LVL, PSL in žaganem lesu. V primerjavi z masivnim lesom je proizvod LSL bolj predvidljiv, konsistenten, trden in večjih dimenzij.

Slabost proizvoda LSL je draga in zahtevna proizvodnja. Pomanjkljivost LSL lahko najdemo še v večjem debelinskem nabrekanju, zaradi večje zgostitve lesa v primerjavi z LVL in PSL (Šernek, 2004).

3.3.3 Uporaba

Proizvod LSL uporabljamo v gradbeništvu za stebre, nosilce, tramove, stopnice, špirovce, preklade in druge lažje veznike.



Slika 7: Proizvod LSL in primer njegove uporabe (<http://lpcorp.com>)

3.3.4 Mehanske lastnosti

Mehanske lastnosti so odvisne od drevesne vrste, iz katere so narejene ploščate iveri in od samega postopka izdelave. V Preglednica 3 so podane karakteristične vrednosti proizvoda TimberStrand® LSL.

Preglednica 3: Mehanske lastnosti proizvoda TimberStrand® LSL

		1,5 E	1,7 E
Karakteristične trdnosti [MPa]			
Upogibna trdnost	$f_{m,0, \text{edge}, k}$	32,4	37,6
	$f_{m,0, \text{flat}, k}$	36,3	42
Natezna trdnost, paralelno	$f_{t,0, k}$	24,4	28,9
Tlačna trdnost, paralelno	$f_{c,0, k}$	25,4	31
Tlačna trdnost, pravokotno	$f_{c,90, \text{edge}, k}$	8,9	10,1
	$f_{c,90, \text{flat}, k}$	5,4	5,9
Strižna trdnost, paralelno	$f_{v,0, \text{edge}, k}$	8,6	8,6
	$f_{v,0, \text{flat}, k}$	3,2	3,2
Togosti [MPa]			
Povprečni modul el., paralelno	$E_{0, \text{mean}}$	10300	11700
Povprečni modul el., pravokotno	$E_{90, \text{edge}, \text{mean}}$	430	2400
	$E_{90, \text{flat}, \text{mean}}$	130	130
Povprečni strižni modul, paralelno	$G_{0, \text{mean}}$	645	730
Gostota (kg/m³)			
Gostota, karakteristična	ρ_k	420	
Gostota, povprečna	ρ_{mean}	650	690

4 PLOŠČA Z USMERJENIM IVERJEM

4.1 Splošno

Plošča z usmerjenim iverjem (OSB - Oriented Strand Board) je lesni ploščni kompozit, ki je izdelan iz rezanih ploščatih iveri zlepljenih skupaj z vodoodpornim lepilom. Osnovni element OSB plošč so iveri, ki so približno enakih dimenzij in so dolge do 200 mm, široke do 50 mm in debele do 2 mm. Iveri so pridobljene predvsem iz hlodovine iglavcev (smreka in bor), lahko pa se uporablja tudi hitro rastoče drevesne vrste listavcev (topol). OSB plošče so narejene iz več plasti, njihovo število pa je določeno z debelino plošče. Običajno so OSB plošče izdelane iz treh plasti. V zunanjih plasteh so iveri večje in usmerjene v daljši smeri plošče, v notranjih pa so iveri manjše in usmerjene naključno ali prečno na zunanji sloj. Različna velikost delcev po plasteh je posledica usmerjanja iveri v zunanjem sloju. Ime OSB je nastalo ravno zaradi postopka usmerjanja iveri (Medved, 2008).

Predhodnica OSB plošč je bila iverna plošča izdelana iz malih, naključno usmerjenih iveri. OSB plošče so leta 1978 razvili v ZDA, kjer so jih tudi začeli proizvajati. V gradbeništvu so OSB plošče že skoraj povsem nadomestile večino podobnih plošč (vezane plošče, furnirne plošče, panelne in iverne plošče). V zadnjih letih se te plošče proizvajajo tudi v Evropi, kjer se vse bolj uveljavljajo (Žrnič, 2005).

4.2 Proizvodnja

Postopek izdelave se prične s transportiranjem razžagane hlodovine v proizvodni obrat. Tam jo sortirajo in namočijo v bazene z vročo vodo. Pri tem postopku se hlodovina zmehča in pripravi za nadaljnjo obdelavo. Iz hlodovine strojno odstranijo lubje, ki se kasneje uporabi kot gorivo. V posebnem rotacijskem stroju iz hlodovine izdelajo iveri. Te nato presejejo in posušijo v rotacijskem sušilcu na želeno tehnično vlažnost. V posebnem mešalcu oblepijo iveri, kjer se preko šob na njih razprši lepilo in vosek, ki izboljša voodpornost proizvoda. Kot vezivno sredstvo po navadi uporabljajo fenol-formaldehidna lepila, v zadnjem času pa tudi metilendifenil diizocianatna (MDI) lepila, ki so zdravju manj škodljiva. Te uporabljajo za vmesne sloje, saj je čas vezanja krajši. Ker se MDI lepila lepijo na kovinske površine, jih ne moremo uporabiti za lepljenje zunanjih slojev. Proizvodni proces se nadaljuje z večplastnim oblikovanjem plošč, kjer s posebnimi usmerjevalnimi krožnimi ploščami dosežejo različno usmeritev iveri v plasteh. Iverno pogačo razrežejo po dolžini in jo po tekočem traku transportirajo do stiskalnice. Stiskanje plošč poteka pri tlaku med 3 in 7 N/mm² in pri temperaturi med 180 in 220° C. Nato plošče ohladijo, obdelajo in razrežejo na končne dimenzije. Za boljši izgled lahko plošče lakirajo ali obarvajo. Običajne dimenzije plošč so debeline od 6 do 40 mm, širine do 2,8 m in dolžine do 5 m (Medved, 2008).

4.3 Prednosti in slabosti

Prednost OSB plošč je njihova vsestranska uporabnost. OSB plošče odlikuje relativno visoka specifična trdnost, zato se vse pogosteje uporabljajo kot strižno nosilne obloge v okvirnih lesenih konstrukcijah, kjer skupaj z okvirjem tvorijo potresno odporno konstrukcijo (Žarnič, 2005). Plošče so dimenzijsko stabilne in so odporne na zvijanje in krčenje. Odlikuje jih homogenost, saj so zaradi proizvodnega procesa brez grč, vozlov in razpok. Izkoristek lesne surovine je izredno visok, hkrati pa so lahko izdelane iz hitro rastočih drevesnih vrst. Zaradi tehnološke obdelave lesa je OSB plošča zaščitena pred biološkimi škodljivci. Plošče imajo dobre mehanske lastnosti, so trajne, imajo dober oprijem pri uporabi običajnih lepil in so ekološko sprejemljiv material, saj omogočajo dobro toplotno in zvočno izolativnost.

Slabosti plošč izvirajo predvsem iz drage in zahtevne proizvodnje. V stiku z vodo OSB plošče debelinsko nabreknejo. Za proizvodnjo uporabljajo lepila na osnovi formaldehida, vendar je njihova vsebnost majhna. V primerjavi z masivnim lesom imajo slabšo požarno odpornost.

4.4 Uporaba

Standard EN 300 OSB razvršča v štiri razrede glede na njihovo sestavo in mehanske lastnosti:

- OSB/1 – plošče za splošno uporabo v notranjih suhih prostorih,
- OSB/2 – konstrukcijske plošče za uporabo v suhem okolju,
- OSB/3 – konstrukcijske plošče za uporabo v vlažnem okolju,
- OSB/4 – konstrukcijske plošče z izboljšanimi mehanskimi lastnostmi za uporabo v vlažnem okolju.

OSB plošče imajo zelo širok spekter uporabe. V gradbeništvu se uporabljajo tako za konstrukcijske kot tudi nekonstrukcijske namene. Predvsem se uporabljajo pri izdelavi montažnih hiš, kot stojine pri sestavljenih lesenih nosilcih, za nosilne in predelne stene, stropne konstrukcije, pokrivanje ostrešij, za podlago finalnim talnim oblogam, strešne konstrukcije, notranje stopnice, talne in stenske obloge, za izdelavo lop, stropne obloge, za izdelavo konstrukcijskih panelov, itd.

Splošno se uporabljajo tudi za notranja vrata, embalažo, ograje, v pohištveni industriji in drugo.



Slika 8: Plošče OSB in primer uporabe (www.pegydom.si)

4.5 Mehanske lastnosti

Mehanske lastnosti proizvoda OSB so odvisne od izbrane drevesne vrste hlodovine in tehnološkega postopka izdelave. Slednji je pomemben predvsem iz vidika kvalitete izdelave proizvoda, ta pa je odvisna od nadzora proizvodnega procesa, vlažnosti iveri po sušenju, orientiranosti in razporeditve iveri, tlaka, temperature in hitrosti stikanja, itd. Standard Evrokod 5 ne navaja mehanskih lastnosti za

proizvod OSB, saj so le te odvisne od proizvajalcev. Minimalne karakteristične vrednosti, ki so podane v prilogi, pa podaja standard BS EN 12369-1:2000 v skladu s standardom EN 300:1997.

5 LESENI I - NOSILCI

5.1 Splošno

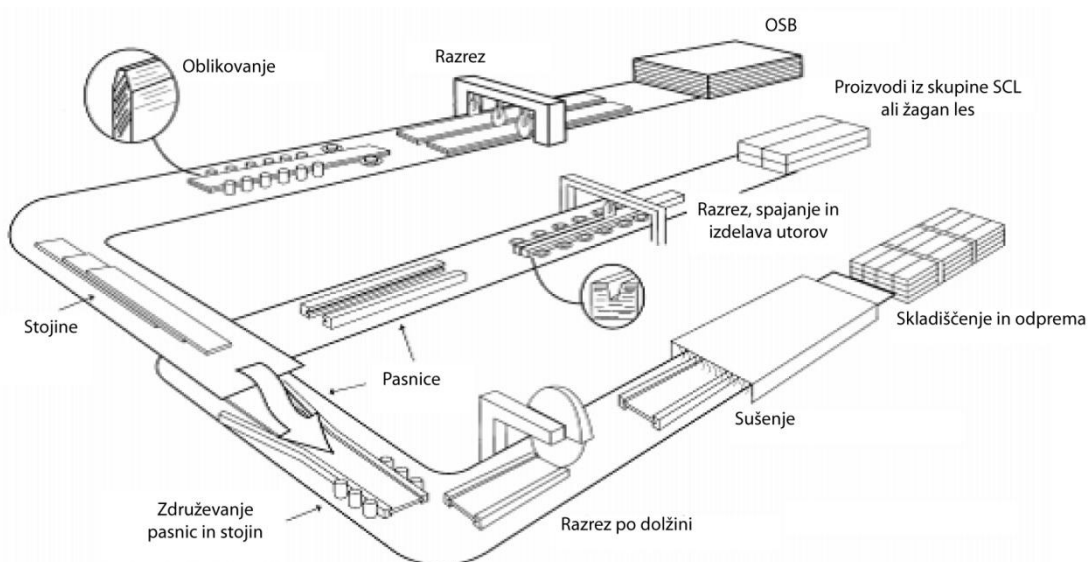
Leseni I-nosilci so bili predstavljeni že v 20. letih prejšnjega stoletja, vendar se je njihova zasnova razvila šele tekom 2. svetovne vojne za potrebe lesenih vojaških letal. S tem so dosegli lahko konstrukcijo letal, hkrati pa privarčevali pri materialu (Sherman, 1997).

I-nosilci so inženirski lesni kompoziti, ki so bili razviti v konstrukcijske namene za nadomestitev nosilcev iz žaganega lesa. Izdelani so z medsebojnim lepljenjem različnih lesnih kompozitov ali žaganega lesa. Proizvod je konstruiran v obliko črke I, s tem pa izkoriščamo prednostne lastnosti elementov, ki sestavljajo nosilec. Narejen je iz dveh vodoravnih elementov, ki ju imenujemo pasnici in navpičnega, ki je imenovan stojina. Pri enostavnih prostoležečih upogibno obremenjenih I-nosilcih se v pasnici pojavita dvojici sil, in sicer je zgornja pasnica obremenjena na tlak, spodnja pa na nateg. Pri tem se izkoriščajo materiali, ki imajo odlične trdnostne lastnosti v vzdolžni smeri. Za izdelavo pasnic se uporabljajo elementi iz žaganega lesa ali lesni kompoziti iz skupine SCL (LVL,PSL in LSL). Za izdelavo stojin se običajno uporabljajo vezane ali OSB plošče, ki imajo dobre strižne lastnosti, lahko pa se uporabljajo tudi drugi proizvodi kot so furnirne plošče, valovita pločevina ali vlaknene plošče. Za povezavo pasnice in stojine se uporabljajo trajna lepila, ki so odporna na temperaturo, povišano vlago in vodo, saj je njihov spoj zelo pomemben za kompatibilnost nosilca. Odkar so se pojavili na trgu, njihova uporaba vztrajno raste, proizvajalci pa lahko izdelajo nosilce dolžin vse do 15 m.

5.2 Proizvodnja

Industrijsko proizvodnjo na kontinuirani način so v poznih šestdesetih letih prejšnjega stoletja razvili v kanadskem podjetju Trus Joist Corporation. V nadaljevanju je opisan najpogostejši postopek izdelave lesenih I-nosilcev. V proizvodni obrat dobavijo in razvrstijo različne lesne kompozite ali posušen žagan les. Proizvodni proces se prične z izdelavo stojine. Dobavljene lesne kompozitne plošče razžagajo na ustrezno širino, robove stojin obrusijo in jih oblikujejo tako, da ustrezajo utoru v pasnici. Na obdelane robove stojin nanesejo lepilo, ki je ponavadi fenolno (fenol-formaldehidna lepila) ali pa uporabijo polimerna metilendifenil diizocianatna (MDI) lepila. Vzporedno se na drugi proizvodnji liniji pripravlja material za izdelavo pasnice. Material razžagajo na primerno širino in izdelajo ustrezen utor vzdolžno na smer pasnice. Če je potrebno izdelati daljši nosilec, lahko pasnice zlepijo skupaj z uporabo zobčastega spoja. Pripravljene pasnice in stojine združijo skupaj, da tvorijo nosilce v obliko črke »I« in jih nato stisnejo v stiskalnici. Sestavljene I-nosilce lahko razžagajo na končno dolžino in

jih nato posušijo v posebnih pečeh ali ogrevanih skladiščih. S tem zagotovijo, da lepilo razvije popoln sprijem med pasnico in stojino. V zadnji fazi nosilce pregledajo (predvsem je pomemben spoj med pasnico in stojino) in jih skladiščijo ali dostavijo končnim naročnikom.



Slika 9: Shematski prikaz proizvodnje I-nosilcev (www.woodaware.info)

5.3 Prednosti in slabosti

Leseni I-nosilci imajo v primerjavi z žaganim lesom veliko prednosti. Odlikuje jih oblikovna fleksibilnost, saj so nosilci lahko večji in daljši. So dimenzijsko stabilni, saj so narejeni iz lesnih kompozitov, ki so posušeni na tehnično vlažnost lesa. Nosilci so lažji, imajo večjo nosilnost in boljše mehanske lastnosti, hkrati pa so te bolj predvidljive, saj uporabljeni lesni kompoziti nimajo napak v lesu ali pa so te razpršene. Med proizvodnim procesom se lahko v stojini izdelajo odprtine za namestitev napeljav, vendar se s tem posegom poslabša požarna odpornost nosilcev. Raziskave so pokazale, da so nosilci izgubili svojo nosilnost že po petih minutah.

Slabosti teh proizvodov je njihova cena, saj je proizvodnja draga, za izdelavo pa se uporabljajo dražji lesni kompoziti. Kritični del elementa je spoj med pasnico in stojino, zato je potrebno temu mestu nameniti največ pozornosti. Požarno nezaščiteni I-nosilci se slabo obnašajo v stiku z ognjem. Pri montaži daljših I-nosilcev je potrebno te bočno podpreti, da ne pride do bočne zvrnitve elementa.

5.4 Uporaba

Lesene I-nosilce uporabljamo tam, kjer je potrebna velika upogibna nosilnost za premagovanje daljših ali krajših razponov. V gradbeništvu jih uporabljamo kot strešne nosilce (špirovce), stebre in nosilce za konstrukcijo stropov ali talnih nosilnih površin.



Slika 10: Primer uporabe I-nosilcev (www.structuremag.org)

5.5 Mehanske lastnosti

Proizvajalci določijo mehanske lastnosti na podlagi empiričnih ali teoretičnih računskih metod. Na začetku je bila bolj primerna uporaba računskih metod, saj so bili I-nosilci narejeni iz materialov, katere mehanske lastnosti so bile dobro poznane. Z razvojem industrijske proizvodnje in posledično uporabe drugih konstrukcijskih materialov za izdelavo I-nosilcev, so proizvajalci začeli uporabljati empirične metode, kjer so za določitev mehanskih lastnosti nosilce obremenjevali do porušitve. Danes večina proizvajalcev uporablja empirične metode ali kombinacijo obeh. Pri slednji nosilec obremenijo, izmerijo njegov povos in računsko ocenijo upogibno in strižno trdnost ter deformabilnost (Sherman, 1997). Mehanske lastnosti I-nosilcev so odvisne predvsem od uporabljenih konstrukcijskih materialov za izdelavo pasnic in stojin.

5.6 Dimenzioniranje

Proizvajalci ponavadi podajajo pripomočke za dimenzioniranje lesenih I-nosilcev v obliki preglednic, kjer so navedene njihove dimenzije glede na predvideno obtežbo. Računsko analizo sestavljenih upogibnih nosilcev obravnava tudi standard Evrokod 5 (SIST EN 1995-1-1) v poglavju Komponente in sestavi in v dodatku B. Ker so sestavni elementi medsebojno zlepljeni, v priključnih ravninah teoretično ne pride do zdrsov. Element se obnaša kot togo povezan, zato je potek vzdolžnih normalnih napetosti po prerezu linearen. Evrokod 5 zajame podajnost veznih sredstev s koeficientom γ_i . V primeru medsebojno zlepljenih prerezov so vse vrednosti γ_i enake 1,0. Efektivno upogibno togost zajamemo z izrazom:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \rightarrow (EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + E_i A_i a_i^2), \quad (5.1)$$

kjer pomenijo:

A_i – površino posameznega elementa v prerezu,

E_i – povprečni elastični modul posameznega elementa,

I_i – lokalni vztrajnostni moment posameznega elementa,

γ_i – koeficient togosti veznih sredstev,

a_i – oddaljenost težišča elementa od skupnega težišča prereza.

V nadaljevanju se izvajajo kontrole normalnih napetosti v i -tem elementu, strižne napetosti, ki so največje v osnovnem elementu (stojina) oz. tam, kjer so vzdolžne normalne napetosti enake nič. Da zadostimo kriterijem mejnega stanja uporabnosti preverimo velikost povesa v začetnem in končnem času. Posebno pozornost je potrebno nameniti lokalni stabilnosti elementa, saj je zelo občutljiv na bočno zvrnitev.

6 ELEMENTI LEPLJENI IZ MANJŠEGA ŠTEVILA DELOV

6.1 Splošno

Lepljeni nosilci narejeni iz manjšega števila delov so linijski elementi, ki so sestavljeni iz tehnično sušenih in po trdnosti (C24 po evropskih standardih) razvrščenih lamel. Lamelle so dolžinsko spojene z zobčastim spojem in po površini medsebojno zlepljene v dveh, treh ali štirih slojih. Najpogosteje se izdelujejo nosilci iz dvo – ali troslojnega lesa (ang. Duo and Trio laminated beams). Narejeni so iz drevesnih vrst iglavcev (smreka, jelka, bor, macesen ali duglazija). Les je tehnično posušen na vsebnost vlage pod 15 %, majhna velikost prečnih prerezov lamel pa omogoča bolj gospodarno sušenje v primerjavi s KVH (konstrukcijski masivni les). Zaradi estetskega videza naravne površine se

uporablja barvno nevtralna lepila, s tem pa se doseže skoraj nezaznavne linije stikovanja (www.kvh.eu).

6.2 Proizvodnja

Žagan les posušimo na ustrezno vlažnost (približno 12%). S tem zagotovimo dimenzijsko stabilnost lesa med njegovo kasnejšo uporabo v gradbenih konstrukcijah. Posušeni les predskobljamo in ga kasneje vizualno ali strojno pregledamo. Pri tem se večje napake v lesu označijo in izrežejo. Različno dolge lamele potujejo do stroja, ki na obeh koncih lamel izdelava zobčasti spoj. Lamele pod pritiskom zlepijo in s tem tvorijo teoretično neskončno dolge lamele. Te nato razrežejo na željeno dolžino, jih štiristransko poskobljajo in nanesejo lepilo na ploščato površino. Lamele zložijo v dvo – , tro – ali štirislojne nosilce in jih spojijo tako, da je sredica lesa obrnjena navzven, lesna vlakna pa so vzporedna z njegovo dolžino. Ko se lepilo posuši, sestavljeni nosilec poskobljajo in mu posnamejo robove, s tem pa izboljšajo kvaliteto površine (www.weinig.com).

6.3 Prednosti in slabosti

V primerjavi z masivnim lesom imajo nosilci iz dvo – , tro – ali štirislojnega lesa podobne mehanske lastnosti, vendar pa imajo veliko drugih prednosti. Ker so tehnično posušeni, imajo nizko vsebnost vlage, zato imajo večjo togost, so dimenzijsko stabilni, zmanjšano občutljivost materiala na krivljenje in na tvorjenje razpok, poleg tega pa imajo dobro odpornost proti biološkim škodljivcem. Zaradi obdelane površine je izdelek vizualno privlačen in primeren za uporabo na vidnih mestih. Nosilci imajo manj napak v lesu in so lahko daljši od linijskih elementov iz masivnega lesa, njihova dolžina lahko sega do 18 m.

V primerjavi z masivnim lesom nosilci praktično nimajo slabosti.

6.4 Uporaba

Nosilce iz dvo – , tro – ali štirislojnega lesa uporabljamo predvsem takrat, ko so potrebni večji prečni prerezi za prenašanje visokih obremenitev in/ali za premoščanje velikih razponov. Dimenzije prečnega prereza se gibljejo vse do širine 240 mm in višine 260 mm. V gradbeništvu jih uporabljamo tudi za posebne namene, kjer so potrebe po estetskem videzu in dimenzijski stabilnosti lesa. Pri uporabi proizvoda se moramo izogibati okolju z močno spreminjajočo se vlažnostjo, podobno kot pri žaganem lesu, vendar pa jih lahko uporabimo v kemijsko agresivnem okolju. Primerni so za uporabo v pasivnih in energijsko varčnih hišah, predvsem za izdelavo nosilnih konstrukcij stropov in streh (npr. lege, špirovce, sohe, podpornike in prečnike), uporabljajo pa se tudi za izdelavo nadstreškov, skeletnih konstrukcij, itd.

Iz dvoslojnih nosilcev s peresom in utorom lahko z zlaganjem teh enostavno naredimo tudi nosilno steno ali stropno površino (www.kvh.eu).



Slika 11: Proizvoda Duo in Trio (www.kvh.eu)



Slika 12: Primer uporabe dvoslojnih nosilcev z utorom in peresom (www.storaenso.com)

6.5 Mehanske lastnosti

Nosilci so narejeni iz lamel, ki so pri mnogih proizvajalcih razvrščene v trdnosti razred C24 po standardu EN 338:1995. V Preglednica 4 so prikazane vrednosti materialnih karakteristik nosilcev, ki jih podaja proizvajalec Stora Enso.

Preglednica 4: Mehanske lastnosti elementov lepljenih iz manjšega števila delov po podatkih proizvajalca Stora Enso

C24		
Karakteristične trdnosti [MPa]		
Upogibna trdnost, paralelno	$f_{m,k}$	24
Natezna trdnost, paralelno	$f_{t,0,k}$	14
Natezna trdnost, pravokotno	$f_{t,90,k}$	0,5
Tlačna trdnost, paralelno	$f_{c,0,k}$	21
Tlačna trdnost, pravokotno	$f_{c,90,k}$	2,5
Strižna trdnost, paralelno	$f_{v,k}$	2,5
Togosti [MPa]		
Povprečni modul el., paralelno	$E_{0,mean}$	11600
Povprečni modul el., pravokotno	$E_{90,mean}$	370
Povprečni strižni modul, paralelno	G_{mean}	690
Gostota (kg/m³)		
Gostota, karakteristična	ρ_k	350
Gostota, povprečna	ρ_{mean}	450

6.6 Tehnične karakteristike

Preglednica 5: Tehnične karakteristike elementov lepljenih iz manjšega števila delov

Hitrost gorenja [mm/min]	β_o	0,7
Vlažnost	v	$\leq 15 \%$
Specifična toplotna kapaciteta [J/kgK]	c	1600
Koeficient toplotne prevodnosti [W/mK]	λ	0,13

6.7 Dimenzioniranje

Pri dimenzioniranju nosilcev uporabljamo enake računske metode kot pri masivnem lesu v skladu s standardi iz družine Evrokod 5.

7 LEPLJEN LAMELIRAN LES

7.1 Splošno

Lepljen lameliran les (angl. glued laminated timber ali glulam) je eden od najstarejših inženirskih lesnih kompozitov. Lepljen lameliran les v današnjem pomenu je leta 1906 patentiral Otto Hetzer. Z razvojem vodoodpornih sintetičnih lepil se je od šestdesetih let 20. stoletja začel preporod lameliranih lepljenih konstrukcij in s tem lesenih konstrukcij na splošno. Pri nas je dobro uveljavljen

konstrukcijski material, naš največji proizvajalec lesenih konstrukcij iz lepljenega lameliranega lesa je podjetje Hoja.

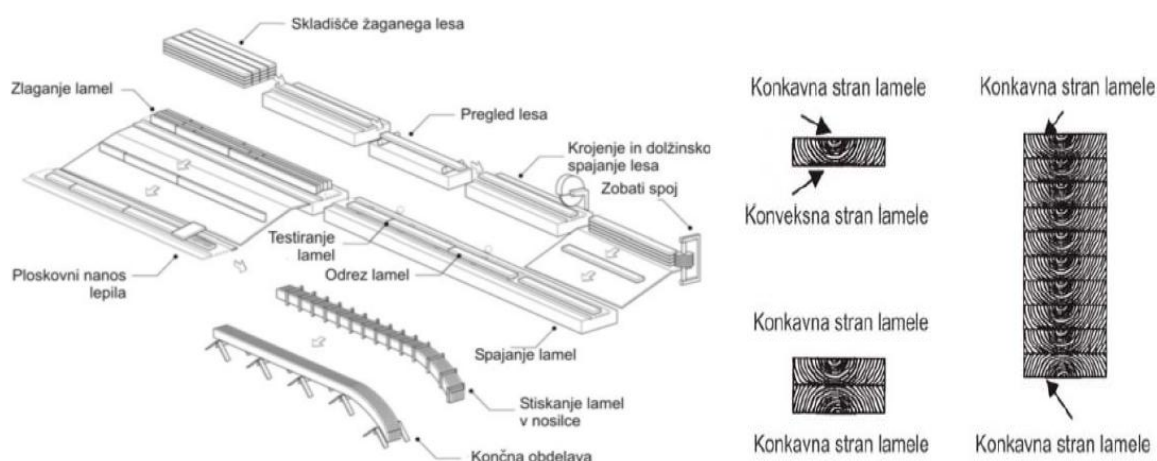
Lepljen lameliran les je definiran kot konstrukcijski material, ki je sestavljen iz več medsebojno zlepjenih lamel. Za lepljenje se uporabljajo visokokvalitetna lepila (resorcinolna, fenolna, melaminska ali poliuretanska), ki so odporna proti vodi, vlagi, temperaturi in biološkimi škodljivcem ter imajo visoko trdnost in trajnost. Lamelle so tehnično posušene na vsebnost vlage med 8 in 12 %. Neto širina lamele je praviloma manjša ali enaka 20 cm, njihova debelina pa običajno ne presega 50 mm. Lahko so dolžinsko spojene, pri čemer se najpogosteje uporablja zobati spoj, ali pa prečno stikovane, če želimo izdelati nosilec s širino večjo od 20 cm. Lamelle lahko tudi ukrivimo, vendar morajo biti v tem primeru ustrezno tanke. Lesna vlakna v lamelah so usmerjena vzporedno z vzdolžno osjo elementa. Za izdelavo elementov iz lepljenega lameliranega lesa uporabljajo predvsem drevesne vrste iglavcev (smreka, bor, macesen, jelka in duglazija), lahko pa uporabijo tudi les listavcev (topol).

Tehnologija izdelave elementov iz lepljenega lameliranega lesa omogoča veliko svobodo pri oblikovanju njihove geometrije, lahko so ravni ali poljubno ukrivljeni, s konstantno ali s spremenljivo višino. Nosilci lahko premostijo daljše razpone, tudi do 100 m, omejitve pri oblikovanju takšnih elementov pa predstavljajo konstruktorjeva kreativnost, transport elementov in v manjši meri tehnološki postopek njihove izdelave (Lopatič, 2012).

7.2 Proizvodnja

Klasičen postopek izdelave se prične z ustrezno pripravo žaganega lesa. Les tehnično posušijo na želeno stopnjo vlažnosti (pod 12%) in ga nato v posebnem stroju obojestransko predskoblajo. Sledi proces ugotavljanja fizikalnih in mehanskih lastnosti (strojni ali vizualni pregled) in označevanje ter izžagovanje večjih napak v lesu (večje grče). Različno dolge lamelle dolžinsko spojijo z zobatimi spoji, ki jih izdelajo posebni stroji. Ta postopek izdelave omogoča teoretično neskončno dolge lamelle. Te nato razžagajo na želeno dolžino in sortirajo po določenih kriterijih, pri čemer se upošteva trdnost lamel in njihov predviden položaj v oblikovanem elementu. Sledi proces obojestranskega skoblanja lamel, ploskovni nanos lepila in sestavljanje lepljenca. Najpogosteje se uporablja tehnologija hladnega lepljenja elementov, v sodobnih proizvodnjah pa le-te lahko vroče lepijo s pomočjo mikrovalovnega segrevanja, vendar je ta proces izdelave primeren za ravne in dimenzijsko tipizirane elemente. Pri sestavljanju večslojnega elementa morajo lamelle zlepiti tako, da so konveksni deli letnic v stiku lepljenja, s tem pa zmanjšajo nezaželene napetosti v ravnini lepljenja. Standard SIST EN 386:2002 določa, da razlika v vlažnosti med posameznimi lamelami v času lepljenja ne sme biti večja od 4 %, saj se les pri kasnejših spremembah vlažnosti širi in krči, izrazito različno v različnih smereh. Standard

prav tako predpisuje pogoje okolja (relativna vlažnost in temperatura zraka) v katerem so izdelani elementi. Lepljenec sestavijo v posebnih šablonah, kjer ga oblikujejo in stisnejo pod pritiskom med 6 in 10 barov in pri temperaturi nad 20 °C. Tlak stiskanja je odvisen od vrste lesa in debeline lamel ter od vrste uporabljenega lepila. Pri oblikovanju ukrivljenih elementov je potrebno izbrati ustrezno debelino lamel, saj ta vpliva na pojav notranjih napetosti v elementu. Po stiskanju sledi kondicioniranje in končna obdelava elementov, ki jih lahko dodatno zaščitijo s fungicidi, insekticidi in ognjevarnimi premazi (Šernek, 2012).



Slika 13: Shematski prikaz proizvodnje in lepljenje lameliranega lesa (Kitek Kuzman in Hrovatin, 2006)

7.3 Prednosti in slabosti

Elementi iz lameliranega lepljenega lesa imajo vse prednosti masivnega gradbenega lesa. Lepljen lameliran les ima enake ali celo boljše in manj variabilne mehanske lastnosti, te pa lahko izboljšamo tako, da zmanjšamo število nezaželenih napak. Takšni elementi imajo veliko nosilnost glede na lastno težo, na bolj obremenjenih mestih v elementu pa lahko uporabimo kvalitetnejši les. Zaradi tehničnega sušenja lesa imajo elementi večjo dimenzijsko stabilnost prereзов pri spremembi vlažnosti, so bolj togi in bolj odporni na krivljenje ter tvorjenje razpok. Nosilni elementi so lahko poljubnih dimenzij in oblik, imajo dober estetski videz, sam tehnološki postopek pa omogoča večjo natančnost izdelave. Ustrezno zaščitene lesene lepljene lamelirane konstrukcije imajo dobro požarno odpornost in se ne porušijo hipoma.

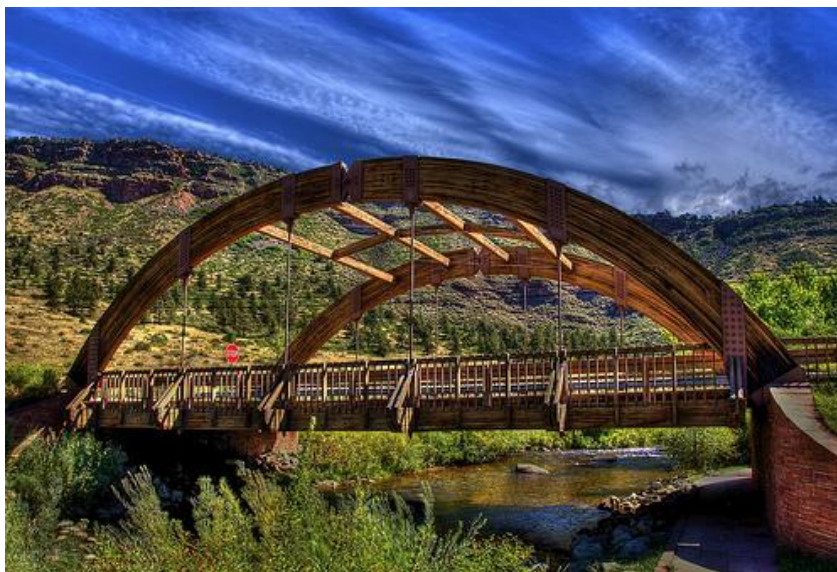
Slabosti konstrukcij iz lameliranega lepljenega lesa izvirajo predvsem iz kemičnih snovi, ki jih uporabimo za zaščito elementov pred zunanjimi vplivi in insekti. Zaščitna sredstva in sintetična lepila so zdravju škodljiva. Za izdelavo lepljenega lameliranega lesa se uporablja sintetična lepila z vsebnostjo prostega formaldehida, ki obremenjuje okolje, draži kožo, oči in dihala. Mehanske lastnosti lepljenega lameliranega lesa so močno odvisne od lastnosti in obnašanja lepila, ki mora biti časovno

obstojno, zagotavljati odpornost v težkih klimatskih pogojih in ohraniti trdnost in strukturo v primeru požara (Lopatič, 2012). Cena osnovnega proizvoda je višja od cene masivnega gradbenega lesa, vendar je lahko gradnja konstrukcij iz lameliranega lepljenega lesa na koncu za 15 do 20% cenejša kot enakovredna armiranobetonska ali jeklena gradnja (Kitek Kuzman in Hrovatin, 2006).

7.4 Uporaba

Lamelirane lepljene elemente uporabljamo predvsem tam, kjer je potrebna večja trdnost, dimenzijska stabilnost, premagovanje velikih razponov in dober estetski videz lesenega proizvoda. Lepljeni konstrukcijski elementi so lahko enostavni ali sestavljeni nosilci, stebri, okvirji, različna vešala, palični nosilci in paneli. V gradbeništvu jih uporabljamo za najrazličnejše konstrukcijske namene, in sicer za strešne konstrukcije, ravninske in prostorske konstrukcije velikih razponov, monolitne konstrukcije, stropne konstrukcije, sestavljene lepljene profile, sovprežne konstrukcije in drugo. Na področju gradbeništva se uporabljajo v stanovanjskih, športnih, industrijskih, kulturnih in šolskih objektih, v poslovnih stavbah, za gradnjo mostov, bazenov, skladišč, itd.

Za nekonstrukcijske namene se uporabljajo za drogove, stavbno pohištvo, železniške pragove in drugo (Kitek Kuzman in Hrovatin, 2006).



Slika 14: Most iz lameliranega lepljenega lesa - Apple Valley Road Bridge (www.flickriver.com)

7.5 Mehanske lastnosti

Standard SIST EN 1994:2000 predpisuje razvrstitev tako homogenega kot kombiniranega lameliranega lepljenega lesa v štiri trdnostne razrede. Homogen prečni prerez je sestavljen iz lamel enake kvalitete, medtem ko je kombiniran prečni prerez sestavljen iz dveh različnih kvalitet lesa iste

vrste. Pri slednjem so v zunanjih slojih prereza lamele iz kvalitetnejšega lesa, v jedru pa iz slabšega lesa. Pri tem mora biti izpolnjena zahteva, da je debelina pasu iz kvalitetnejših lamel najmanj šestina višine prečnega prereza. Tako imamo v bistvu skupaj osem trdnostnih razredov. Homogen lepljen les je dodatno označen s črko **h** (GLh), kombinirani lepljen les pa s črko **c** (GLc). Karakteristične trdnosti, togostne lastnosti in gostote lameliranega lepljenega lesa lahko eksperimentalno določimo s preiskavami lepljenih elementov po predpisanih postopkih v SIST EN 408:2004, lahko pa te določimo tudi na podlagi preiskav lesa lamel ali pa le na osnovi osnovi empirično podanih izrazov, ki jih predpisuje SIST EN 1994:2000. Vrednosti materialnih karakteristik so podane v prilogi.

7.6 Tehnične karakteristike

Preglednica 6: Tehnične karakteristike lameliranega lepljenega lesa

Hitrost gorenja [mm/min]	β_o	0,65
Vlažnost	v	10% (+/- 2 %)
Specifična toplotna kapaciteta [J/kgK]	c	1600
Koeficient toplotne prevodnosti [W/mK]	λ	0,13

7.7 Dimenzioniranje

Pri dimenzioniranju ravnih elementov iz lepljenega lameliranega lesa opravljamo enake računske kontrole kot pri nosilnih elementih iz masivnega lesa po standardih Evrokod 5. Posebnost lameliranih lepljenih elementov predstavljajo elementi s spremenljivo višino, z ukrivljeno osjo ali kombinacijo obeh. Evrokod 5 navaja dodatna pravila in zahteva, ki veljajo za te nosilce. Posebno pozornost je potrebno nameniti napetostnemu stanju v kritičnem prerezu in v temenskem območju, kjer je v obeh primerih potek vzdolžnih normalnih napetosti po prerezu nelinearen, hkrati pa se pojavijo prečne normalne napetosti v smeri pravokotno na vlakna. Upoštevati moramo različne vrednosti posameznih parametrov, ki so odvisni od vrste materiala (npr. vrednost delnega materialnega varnostnega faktorja γ_m je enaka 1,25, koeficient β_c za določitev uklonskega koeficienta k_c je enak 0,1, itd.)(Lopatič, 2012).

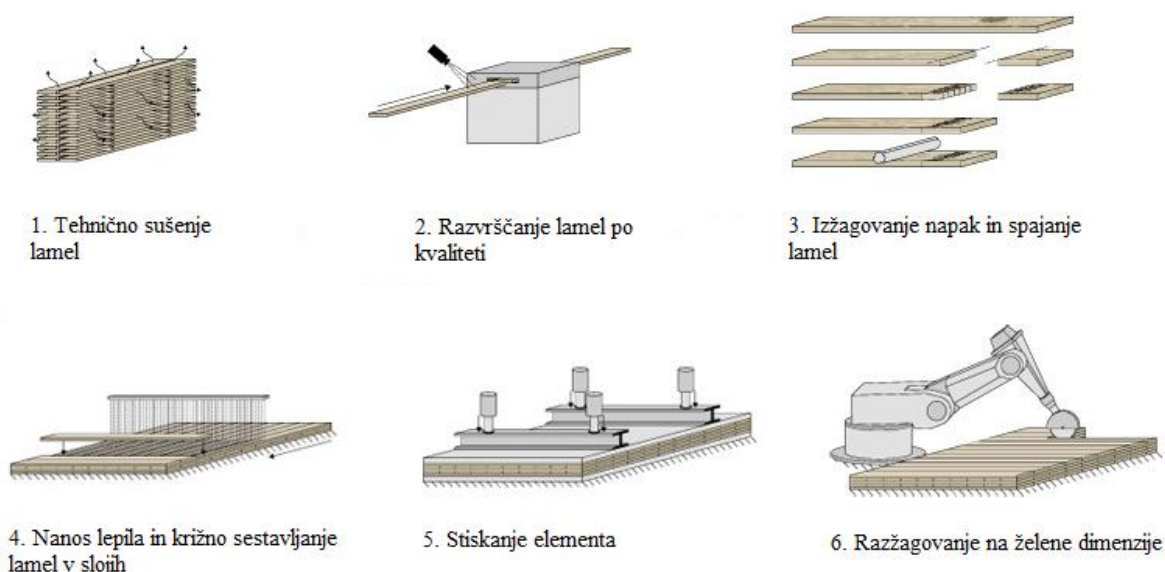
8 PLOŠČE IZ KRIŽNO LEPLJENEGA LESA

8.1 Splošno

Križno lepljen les je sodobni lesni kompozit, ki je bil razvit v Avstriji sredi 90. let prejšnjega stoletja. Konstrukcijski elementi iz križno lepljenega lesa (ang. Cross laminated timber – CLT ali X-lam ali nem. Kreuzlagenholz – KLH) so vse bolj prisotni v sodobnem gradbeništvu, saj so paneli lahko

izdelani v velikem formatu, njihova montaža je enostavna, poleg tega pa se konstrukcije iz takšnega materiala zelo dobro obnašajo v primeru potresa in požara. Konstrukcijski material je pripeljal do inovativnega sistema gradnje z lesom, saj z njegovo uporabo lahko izdelujemo zelo zahtevne in kompleksne konstrukcije ter arhitekturne zasnove objektov, ki smo jih do sedaj lahko izvedli le z uporabo drugih konstrukcijskih materialov, kot sta armirani beton in jeklo (Dujič, 2009). Njihova proizvodnja in uporaba je začela strmo naraščati po letu 2000, največji proizvajalec masivnih panelnih elementov iz križno lepljenega lesa pa je podjetje KLH iz Avstrije. Iz križno lepljenega lesa lahko izdelajo plošče velikih dimenzij, in sicer debeline do 50 cm, širine do 2,95 m in dolžine do 16,5 m.

Konstrukcijski elementi iz križno lepljenega lesa so narejeni iz lesenih lamel ali desk, debeline od 10 do 40 mm, ki so križno zložene v plasteh in pod visokim pritiskom ploskovno zlepljene v masiven element. Za izdelavo se uporablja les iglavcev (predvsem smreka), ki je tehnično posušen do 12 % (± 2 %) vlažnosti, s tem pa je omogočena naravna zaščita lesa pred biološkimi škodljivci. Lamele so razvrščene po trdnosti (C24 po standardu EN 338) in so dolžinsko spojene z uporabo zobatega spoja. Za lepljenje lesenih križno lepljenih plošč se uporablja poliuretantsko lepilo Purbond®, ki je brez vsebnosti zdravju škodljivega formaldehida. Na plasti lamel se nanese približno 200 g/m² lepila, ki za proces vezanja izkorišča naravno vlago v lesu. Plošče so stisnjene v stiskalnici pod tlakom približno 6 N/mm². V podjetju KLH uporabljajo opremo, ki sloni na tehnologiji CNC, ki omogoča natančen razrez plošč po sestavnih načrtih konstrukcije. Razrez lahko opravijo tudi usposobljena podjetja za obdelavo lesenih elementov. Proizvodna tehnologija omogoča hitro montažo in sestavljanje panelov iz križno lepljenega lesa na gradbišču, s čimer lahko zgradimo objekt v relativnem kratkem času (www.klh.at).



Slika 15: Postopek izdelave križno lepljene plošče (www.en.brettsperholz.org)

Križno lepljene plošče so izdelane iz lihega števila slojev (3, 5, 7 ali več), njihov prečni prerez pa je simetričen. Orientiranost lesnih vlaken je vzporedna z vzdolžno smerjo lamel. Medsebojni zasuk smeri lamel v posameznih slojih znaša 90°, pri čemer imata lahko največ dva zaporedna sloja enako usmerjenost. Za doseganje višjih upogibnih trdnosti se izdelajo plošče z dvojnimi zunanji nosilnim slojem, za doseganje višjih strižnih trdnosti pa se izdelajo z dvojnimi osrednjim slojem. Ob ustrezni vgraditvi plošč lahko dosežemo visoko življenjsko dobo teh, ki znaša več kot 50 let (Dujič, 2009).



Slika 16: Križno lepljene plošče in primer uporabe elementov (<http://cn.europeanwood.org>)

8.2 Prednosti in slabosti

Prednost lesenih križno lepljenih plošč je v inovativnem sistemu gradnje, ki omogoča gradnjo tako enostanovanjskih kot tudi večnadstropnih stavb. V primerjavi s klasično gradnjo, proizvodni postopek omogoča hitri proces izdelave in montažo teh elementov na gradbišču ter omogoča hitro vselitev v objekt. Križno lepljene plošče imajo boljše mehanske lastnosti in so manj variabilne v primerjavi z masivnim lesom. Imajo veliko trdnost in togost v ravnini ne glede na kvaliteto lesa, zato se lahko za izdelavo uporabi tudi les slabše kvalitete. Velika stopnja prefabrikacije vpliva na natančnost izdelave elementov. Plošče so lahko velikih formatov in prinašajo arhitekturno svobodo pri gradnji, saj se lahko uporabljajo kot nosilni stenski ali stropni elementi. Križno lepljenje omogoča obojesmerno nosilnost lesenih elementov, preprečuje cepitev v smeri pravokotno na vlakna in zagotavlja dimenzijsko stabilnost elementov, pri čemer je delovanje lesa (krčenje, nabrekanje) precej zmanjšano. Tako so deformacije zaradi spremembe vlažnosti v ravnini plošče zanemarljive, medtem ko pravokotno na ravnino plošče te znašajo do 2,4 mm/m za vsak procent spremembe vlažnosti. Z ustrezno povezavo elementov v celotno konstrukcijo lahko dosežemo, da plošče prevzamejo veliko vodoravno obtežbo zaradi vetra in potres. V primerjavi z ostalimi konstrukcijskimi materiali imajo križno lepljene plošče majhno lastno težo, dobro toplotno izolativnost in visoko požarno odpornost. Med gorenjem ne spreminjajo oblike in mehanskih lastnosti ampak zunanja površina zogljeni in počasi napreduje proti

notranjosti, saj les zelo slabo prevaja toploto. V primerjavi z jeklom les prevaja toploto od tristo do štiristo krat počasneje. Običajna požarna odpornost 3-slojne plošče znaša 30 min, z večslojnimi ploščami pa je možno zagotoviti tudi višje vrednosti požarne odpornosti. Tehnično posušene deske zagotavljajo naravno zaščito pred biološkimi škodljivci, s čimer se poveča trajnost proizvoda. Prednost plošč v primerjavi z drugimi inženirskimi lesnimi kompoziti je tudi uporaba zdravju neškodljivega poliuretanskega lepila, ki ne vsebuje formaldehida, ki je kancerogen (Dujič, 2008).

Tehnologija proizvodnje križno lepljenih plošč je draga zaradi večje količine izpustov ogljikovega dioksida (CO₂). V standardih za projektiranje nosilnih konstrukcij (Evrokod) trenutno še ni pravil in zahtev za dimenzioniranje elementov iz križno lepljenega lesa. Za transport in montažo teh elementov je potrebna uporaba težke mehanizacije.

8.3 Uporaba

Plošče iz križno lepljenega lesa uporabljamo kot stenske, stropne in strešne elemente v velikem formatu. Lahko jih uporabljamo kot nosilne ali nenosilne elemente ter jih lahko kombiniramo z drugimi gradbenimi materiali kot sta jeklo in steklo. Na področju gradbeništva jih uporabljamo za gradnjo enostanovanjskih ali večstanovanjskih objektov, industrijskih in skladiščnih hal, poslovnih objektov, prednapetih konstrukcij večjih razponov ter mostnih konstrukcij. Plošče iz križno lepljenega lesa lahko uporabljamo tudi za izdelavo stopnišč, balkonov, predelnih sten, idr.

V Londonu stoji devet nadstropna poslovno stanovanjski objekt, od tega je 8 etaž narejenih izključno iz križno lepljenih plošč. Murray Grove Tower predstavlja najvišjo moderno stavbo z leseno nosilno konstrukcijo. Primer uporabe tehnologije gradnje z križno lepljenimi ploščami lahko zasledimo tudi v Sloveniji, in sicer je trenutno največji objekt trietažna poslovna stavba Eltima v Komendi. Uporaba tega konstrukcijskega materiala se v Sloveniji povečuje.

8.4 Mehanske lastnosti

Križno lepljene plošče so narejene iz lamel razvrščenih v trdnostni razred C24, nekaj lamel pa je lahko iz lesa slabše kvalitete trdnostega razreda C16 (po standardu SIST EN 308:2004). V Preglednica 7so podane karakteristične vrednosti mehanskih lastnosti različno obremenjenih elementov (stena, plošča), ki jih podaja proizvajalec KLH.

Preglednica 7: Mehanske lastnosti križno lepljenega lesa po podatkih proizvajalca KLH

		Obremenitev je vzporedna z dolžino elementa (plošča)	Obremenitev je v ravnini prečnega prereza (stena)
Karakteristične trdnosti [MPa]			
Upogibna trdnost, paralelno	$f_{m,k}$	24	23
Natezna trdnost, paralelno	$f_{t,0,k}$		16,5
Natezna trdnost, pravokotno	$f_{t,90,k}$	0,12	
Tlačna trdnostost, paralelno	$f_{c,0,k}$		24 - 30
Tlačna trdnostost, pravokotno	$f_{c,90,k}$	2,7	
Strižna trdnost, paralelno	$f_{v,k}$	2,7	5,2
Strižna trdnost, pravokotno	$f_{r,v,k}$	1,5	
Togosti [MPa]			
Povprečni modul el., paralelno	$E_{0,mean}$	12000	12000
Povprečni modul el., pravokotno	$E_{90,mean}$	370	
Povprečni strižni modul, paralelno	G_{mean}	690	250
Povprečni strižni modul, pravokotno	$G_{r,mean}$	50	
Gostota (kg/m³)			
Gostota, povprečna	ρ_{mean}	480	

8.5 Tehnične karakteristike

Preglednica 8: Tehnične karakteristike po podatkih proizvajalca KLH

Hitrost gorenja - zgornji sloj [mm/min]	β_0	0,67
Hitrost gorenja - ostali sloji [mm/min]	β_0	0,76
Vlažnost [%]	v	12 % ($\pm 2\%$)
Specifična toplotna kapaciteta [J/kgK]	c	1600
Koeficient toplotne prevodnosti [W/mK]	λ	0,13

8.6 Dimenzioniranje

Pri dimenzioniranju elementov iz križno lepljenih plošč lahko postopamo po različnih računskih postopkih. Proizvajalci največkrat podajajo možnost osnovnega dimenzioniranja elementov z modifikacijo izrazov za običajno sestavljene elemente, ki so podani v standardu Evrokod 5 (SIST EN 1995-1-1) v poglavju Komponente in sestavi in v dodatku B. Postopamo po računski metodi za dimenzioniranje sestavljenih upogibnih nosilcev. Potek vzdolžnih normalnih napetosti je linearen, vendar pa upoštevamo samo sloje, katerih lamele so usmerjene vzdolžno z dolžino plošč. Potrebno je upoštevati vpliv strižne deformacije («rolling shear») prečno ležečih slojev (v ravnini pravokotno na vlakna), pri določitvi koeficienta togosti priključne ravnine.

Spodnji izrazi opisujejo postopek dimenzioniranja i-slojne upogibno obremenjene plošče iz križno lepljenega lesa. Efektivna upogibna togost je podana z izrazom:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2). \quad (8.1)$$

Podajnost veznih sredstev je podana s koeficienti γ_i , pri katerem izraz $\frac{S_i}{K_i}$ nadomestimo z $\frac{h_i^*}{G_r \cdot b}$. Tako dobimo sledečo enačbo za izračun koeficienta γ_i :

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_i A_i h_i^*}{L^2 G_r b}}, \quad (8.2)$$

pri tem so:

$A_i = b_i h_i$ – površina prečnega prereza posameznega nosilnega sloja v prerezu,

E_i – povprečni elastični modul posameznega sloja,

I_i – lokalni vztrajnostni moment posameznega nosilnega sloja,

γ_i – koeficient togosti veznih sredstev,

G_r – povprečni strižni modul v ravnini pravokotno na smer vlaken, standard EN 1995-1-1 navaja ramerje $G_{r,mean}/G_{mean} = 0,10$ za mehak les ali pa je vrednost $G_{R,mean}$ podan s strani proizvajalca (običajno znaša 50 MPa),

a_i – oddaljenost težišča nosilnega sloja od skupnega težišča prereza,

h_i^* – višina nenosilnega (prečnega) sloja,

h_i – višina nosilnega (vzdolžnega) sloja,

b_i – debelina plošče,

L – učinkovita dolžina plošče, kjer se za prostoležeči nosilec vzame vrednost $1,0 \cdot L$, za kontinuirni nosilec čez več polj vrednost $0,8 \cdot L$, za konzolni nosilec pa vrednost $2,0 \cdot L$.

Za dokaz nosilnosti prečnega prereza je potrebno zadostiti naslednjim kriterijem:

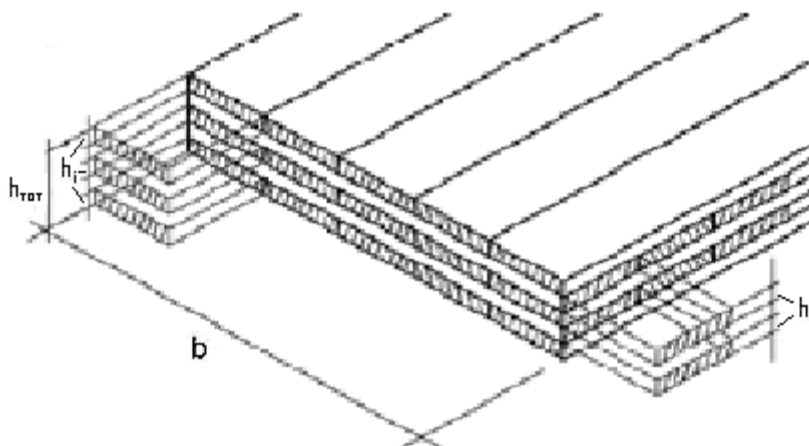
$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{y,d} \cdot \sum_{i=1}^n (h_i^* + h_i)}{2 I_{ef}} \leq f_{m,d}, \quad (8.3)$$

$$\tau_{xz,d} = \frac{V_{zd} \cdot (ES)_{ef}}{b \cdot (EI)_{ef}} \leq \tau_{v,d} \quad (8.4)$$

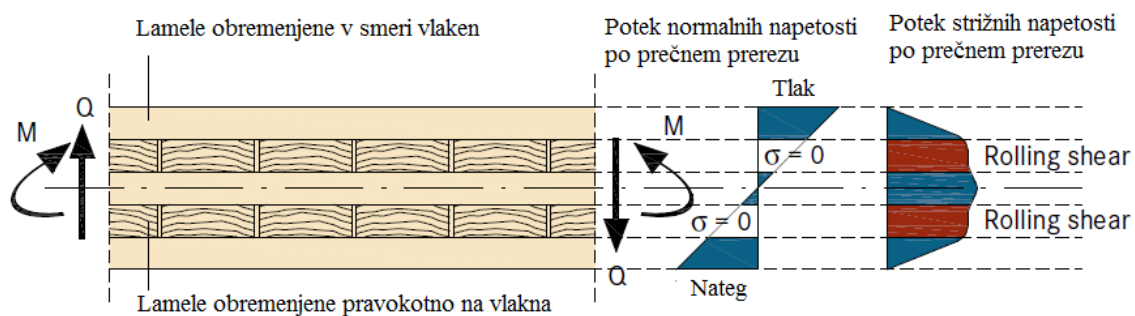
oziroma po priporočilih proizvajalcev:

$$\tau_{xz,d} = \frac{1,5 \cdot V_{zd}}{b \cdot \sum_{i=1}^n (h_i^* + h_i)} \leq \tau_{v,d}. \quad (8.5)$$

Nadaljnjo preverimo povos v začetnem in končnem času z izračunano efektivno upogibno togostjo.



Slika 17: Prikaz orientacije slojev v križno lepljeni plošči (www.mm-kaufmann.com)



Slika 18: Potek napetosti po prečnem prerezu upogibno obremenjene križno lepljene plošče
(www.mm-kaufmann.com)

9 Zaključek

Nekateri izmed sodobnih lesnih kompozitov (SCL – Structural composite lumber) so se prvotno pojavili v Severni Ameriki. V nekaterih deželah so v preteklosti skoraj popolnoma iztrebili gozdove zaradi vse višjega povpraševanja po kvalitetnem lesu. Rešitev krčenja gozdov je bila zasaditev hitrorastočih drevesnih vrst, vendar te dosegajo majhnen premer debel. Ker so bila debela drevesa teh neuporabna za konstrukcijske namene, so razvili nove tehnologije predelave lesa. Odgovor na primanjkljaj lesa visoke kvalitete in vedno večje povpraševanje po njem ter posledično rast njegove cene, je bil prehod iz uporabe izključno masivnega žaganega lesa na uporabo inženirskih lesnih proizvodov.

Razvoj lesnih kompozitov, ki se je v večjem delu odvil v obdobju zadnjih petdesetih let, lahko smatramo za revolucijo v lesni industriji. K razvoju so pripomogla tudi ustrezna lepila, ki so danes odporna proti zunanjim vplivom. Zaradi lepil je smotrna raba sodobnih lesnih kompozitov vprašljiva iz ekološkega vidika, vendar drugi prednostni faktorji to izpodbijajo. Visok izkoristek lesne surovine, boljše mehanske lastnosti, estetski videz in njihova funkcionalnost so le nekateri od ključnih faktorjev, ki opravičuje uporabo sodobnih lesnih proizvodov. Povpraševanje po teh se je v zadnjem času še povečalo, saj je lesena gradnja vse bolj aktualna zaradi nižje cene in hitrejše gradnje v primerjavi s klasično gradnjo z uporabo drugih materialov.

V diplomski nalogi so bile opisane možnosti uporabe sodobnih lesnih kompozitov, ki so danes skorajda neomejene. Nove tehnologije proizvodnje omogočajo izdelavo lesnih proizvodov v najrazličnejših oblikah in dimenzijah, kar včasih ni bilo možno. V prihodnosti si lahko obetamo nove oblike inženirskih lesnih proizvodov, saj se pojavljajo vse večje zahteve po drznih konstrukcijah in vzdrževanju večjih pomembnih objektov.

VIRI

Šernek, M. 2008. Konstrukcijski kompozitni les. V: Kitek Kuzman M. et al. 2008. Gradnja z lesom izziv in priložnost za Slovenijo. 1. izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: str. 84-88.

Medved, S. 2008. Lesni ploščni kompoziti v gradbeništvu. V: Kitek Kuzman M. et al. 2008. Gradnja z lesom izziv in priložnost za Slovenijo. 1. izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: str. 90-94.

Kitek Kuzman M., Hrovatin J. 2006. Lesene lepljene konstrukcije v arhitekturi. Ar: arhitektura, raziskave, 2006, št. 1, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo: str. 44-49.

Nelson, S. P. E. 1997. Wood I-joists. V: Smulski, S.; Engineered wood products: a guide for specifiers, designers and users. Madison, PFS Research Foundation: str. 91-122.

Kitek Kuzman, M. 2012. Lesene konstrukcije v stanovanjski in javni gradnji. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: str. 34 – 48.

Šernek, M., Jošt, M. 2004. Konstrukcijski kompozitni les. Les, 56, 7/8: str. 230-235.

Lopatič J. 2012. Lesene konstrukcije UNI-B. Študijsko gradivo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Žarnić R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodzijo, Katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij

Beg, D., Pogacnik, A. 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije.

Premrov, M., Dobrila, P. 2008. Lesene konstrukcije. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo: 347 str.

Elektronski viri:

Šernek, M. 2012. Lesni kompoziti za gradnjo.

www.carlesa.si/Files/2012/Posvet/04_M._Sernek-Lesni_kompoziti_za_gradnjo.pdf (20. 7. 2012)

Dujič, B. 2009. Konstrukcije iz križno lepljenih lesenih panelov – Nova pot sodobnega gradbeništva
www.lesena-gradnja.si/html/img/pool/Kri_no_lepljene_konstrukcije.pdf (16. 8. 2012)

KLH Massivholz GmbH. Statics. 2008.
www.klh.at (14. 8. 2012)

Cross-laminated timber panels.
www.mm-kaufmann.com/fileadmin/ablage/dokumente/dokumente/MMK_M1_BSP_crossplan_En.pdf
(14. 8. 2012)

OSB Technical information sheet.
www.osb-info.org/technical.html (22. 7. 2012)

Duobalken® / Triobalken®.
www.kvh.eu/fileadmin/downloads/kvh_folder_SLO_2009_web3.pdf (22. 7. 2012)

Structural laminated veneer lumber.
http://www.metsawood.fi/tuotteet/kerto/Documents/Kerto_VTT_CertificateNo184-03_Revision_24_March_2009.pdf (2. 9. 2012)

Ščernjavič, D., 2008. Lepljen les za konstrukcijske namene. Diplomsko delo,
Ljubljana Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: str. 4-15.

Jerman, M., 2009. Konstrukcijski kompozitni les. Diplomaska naloga.
Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Univerzitetni študij, Konstrukcijska smer: 90 str.

Standardi:

SIST EN 1995-1-1:2005. Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – 1-1.del: Splošna pravila in pravila za stavbe: 124 str

SIST EN 14279:2005. Laminiran furnir (LVL) – Definicije, klasifikacija in specifikacije: Laminated Veneer Lumber (LVL) – Definitions, classification and specifications: 23 str.

SEZNAM PRILOG

Priloga A: Mehanske lastnosti proizvoda OSB povzete po standardu BS EN 12369-1:2000

Priloga B: Mehanske lastnosti lameliranega lepljenega lesa

Priloge so priložene v mapi diplomske naloge.