

# Konstrukcije iz križno lepljenih lesenih panelov – Nova pot sodobnega gradbeništva

dr. Bruno Dujič, univ. dipl. inž. grad.

## Povzetek

V sodobnem gradbeništvu so vse bolj prisotni konstrukcijski elementi iz križno lepljenih lesenih panelov, ki so lahko izdelani tudi v formatu velikosti 50 m<sup>2</sup>. Takšne velikosti panelov so ob visoki specifični nosilnosti in križno zlepljeni strukturi lesa prinesle preporod v graditeljstvu. Z njihovo uporabo lahko rešujemo zelo zahtevne in kompleksne konstrukcijske ter arhitekturne zasnove objektov, ki z uporabo klasičnih konstrukcijskih elementov iz enosmerno lepljenega in masivnega lesa niso bile rešljive. Ravno zaradi teh omejitev so se do sedaj v takšnih primerih prednostno uporabljali drugi konstrukcijski materiali, kot sta armirani beton in jeklo.

V prispevku so predstavljene križno lepljene lesene plošče KLH, ki imajo mnogo bolj enakomerne in boljše mehanske lastnosti kot enosmerno lepljeni leseni elementi ali elementi iz masivnega lesa.

Opisan je njihov postopek izdelave, proces lepljenja s poliuretanskim lepilom Purbond®, mehanske lastnosti plošč in njihova uporabnost v različne konstrukcijske namene ter način sestavljanja in mehanskega povezovanja v konstrukcijsko celoto. Predstavljeni so tudi različni primeri izvedenih objektov.

## Cross Laminated Wooden Panels – A new way of Modern Construction Industry

## Summary

In modern construction industry structural elements in the form of cross laminated timber panels, which may be done in the format size of 50 m<sup>2</sup>, all increasingly present. Such size of cross laminated timber plate elements have brought with their high-specific load-bearing capacity and cross laminated structure of wood revival in civil engineering. By using them we can solve very difficult and complex construction tasks and architectural designs of buildings, such that could not be solved by using classic construction elements from one-directional laminated timber and solid wooden elements. Due to these restrictions of classical timber elements, in such cases priority has been given to other construction materials, such as reinforced concrete and steel.

The paper presents KLH cross laminated timber panels, which have much more uniform and better mechanical properties than one-directional glued wooden elements or elements from solid wood. It describes their manufacturing process, the process of gluing with polyurethane glue Purbond®, the mechanical properties of panels and their adequacy for various construction purposes, the assembly methods and their mechanical integration in the construction whole. Presented are also various completed constructions and buildings. >

## 1. UVOD

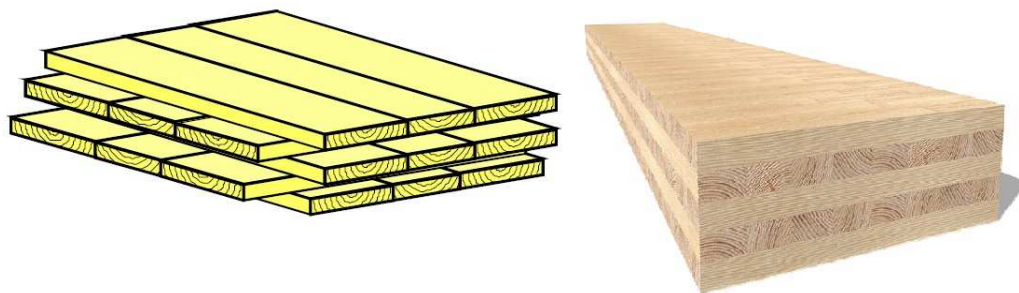
Vizionarske ideje o gradnji z lesom prinašajo nova raziskovalna spoznanja za njegovo uporabo in s tem tudi nove sisteme gradnje. Veliko le teh se poskuša uveljaviti v sodobnem gradbeništvu, saj les zaradi vračanja človeka k naravnim materialom nudi ob ekološki osveščenosti takšnega ravnanja tudi najboljše bivalno klimatske razmere. Tako les kot gradbeni material doživlja izjemno renesanso. Eden izmed takšnih inovativnih sistemov gradnje z lesom so konstrukcije iz križno lepljenih lesenih plošč KLH, ki so v zadnjih desetih letih povzročile preporod tako v ekološkem smislu kakor tudi v gradbeniškem, arhitekturnem in nenazadnje tudi ekonomskem smislu. KLH plošče imajo namreč mnogo bolj enakomerne in boljše mehanske lastnosti kot enosmerno lepljeni leseni elementi ali elementi iz masivnega lesa. Njihovo nosilnost lahko v proizvodnem procesu zasnujemo z ustreznim številom slojev, njihovo debelino in usmerjenostjo lesenih lamel v posameznih slojih. Zaradi vseh prednosti, njihova uporaba narašča tako pri gradnji večnadstropnih stavb kakor tudi pri gradnji objektov večjih dimenzij. Vse to je posledica odličnih lastnosti, ki jih izkazuje les kot gradbeni material, poleg tega pa sistem odlikuje še visoka stopnja prefabrikacije, ekonomičnost in hitrost gradnje. Z večjo uporabo lesa kot konstrukcijskega materiala sledimo tudi ekološkim smernicam in ohranjamo naravo. Tako naprimer že z samo izvedbo celotne konstrukcije stavbe iz križno lepljenih lesenih panelov opravimo večino potrebne za nizkoenergijsko oz. energetske varčno gradnjo.

Glede na obdobje svetovne energijske krize in s tem povezanih prepotrebni sprememb tudi v klasičnem gradbeništvu omogočajo konstrukcije in objekti iz križno lepljenih lesenih panelov pravo pot v sodobnem gradbeništvu, predvsem zaradi odličnih ekoloških lastnosti, hitre in enostavne gradnje ter človeku prijaznega bivalnega okolja, ki ga sistem nudi. Tako postajajo večnadstropni objekti iz križno lepljenega lesa dan za dnem vse močnejša in ekonomsko upravičena alternativa tudi betonskim in zidanim konstrukcijam po vsej Evropi (Šturs in Dujič, 2008).

## 2. KRIŽNO LEPLJENI LESENI PANELI – KLH

Konstrukcijski elementi iz križno lepljenega lesa so sodobno kompozitno gradivo, ki imajo bolj enakomerne in boljše mehanske ter deformacijske lastnosti kot konstrukcijski elementi iz masivnega in enosmerno lepljenega lesa predvsem v smeri pravokotno na vlakna lesa. Križno lepljene elemente sestavljajo križno zložene lesene lamele oziroma deske, ki so pod visokim pritiskom ploskovno zlepljene v večji masivni element. Za osnovno surovino se najpogosteje uporablja les iglavcev, ki je tehnično posušen do 12% ( $\pm 2\%$ ) vlažnosti, s čimer je omogočena naravna zaščita lesa pred škodljivci kot so glive, insekti in plesni (KLH Massivholz GmbH, 2006).

Odvisno od vrste uporabe in zahtev po nosilnosti so plošče izdelane v lihem številu slojev – 3, 5, 7 ali več, vse do maksimalne debeline 60 cm. Medsebojna orientiranost lamel v posameznih slojih znaša 90°, prečni prerez plošče pa je simetričen.

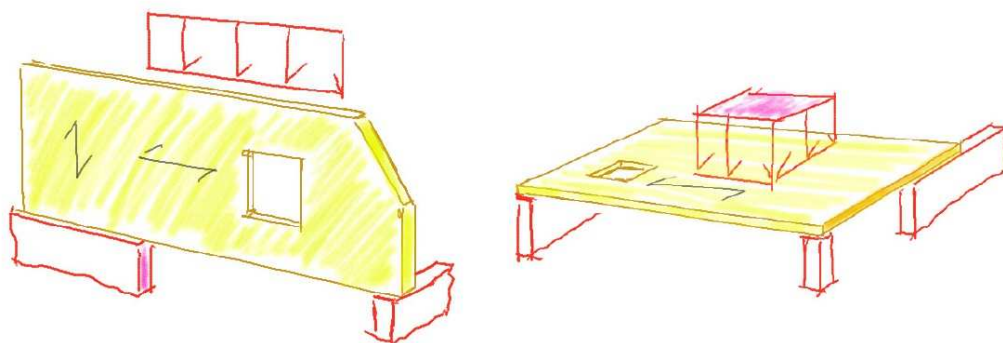


Slika 1: Križno zlepljene lamele v konstrukcijski element – leseno vezano ploščo (»jumbo plywood«).

Za specifične potrebe po nosilnosti v posamezni smeri, imata lahko največ dva zaporedna sloja enako orientiranost lamel. Takšne plošče se običajno izdelajo na zahtevo naročnika in serazlikujejo od standardnih proizvodnih plošč. Tako se lahko v posebnih primerih za doseganje višjih upogibnih trdnosti izdelajo plošče z dvojnimi zunanji nosilnim slojem, za doseganje višjih strižnih trdnosti pa plošče z dvojnimi osrednjim slojem. Pri tem je potrebno na stiku s prvim prečnim slojem upoštevati računsko strižno trdnost. S kombinacijo tankih vzdolžnih nosilnih slojev in debelejših prečnih slojev lahko dosežemo višjo nosilnost tudi v prečni smeri (KLH Massivholz, 2007).

Materialne karakteristike križno lepljenih panelov so nekoliko težje določljive predvsem zaradi lastnosti lesa kot nehomogenega naravnega materiala. Eksperimentalno dobljene zveze med napetostmi in deformacijami se namreč pri lesu zaradi njegove anizotropije zelo razlikujejo glede na način obremenitve (tlak, nateg) in glede na smer delovanja napetosti (vzporedno z vlakni, pravokotno na vlakna ali pod določenim kotom glede na smer vlaknen). S križnim lepljenjem lesenih lamel dosežemo, da imajo leseni elementi enakomernejše mehanske lastnosti ter se pri obremenitvah bolj homogeno obnašajo, zaradi česar se prerezi tudi manj krivijo in ne pokajo. Materialne karakteristike plošč lahko določimo ali eksperimentalno ali z ustrežno računsko metodo (Blass in Fellmoser, 2004).

Križno lepljenje omogoča obojesmerno nosilnost lesenih ploskovnih elementov, povečuje nosilnost in preprečuje cepitev v smeri pravokotno na vlakna lesa, poleg tega pa zagotavlja dimenzijsko stabilnost plošč, kar pomeni, da je delovanje lesa (krčenje, nabrekanje) zmanjšano na zanemarljivo vrednost. Tako so deformacije v ravnini takšne plošče dejansko zanemarljive, medtem ko pravokotno na ravnino plošče znašajo približno 2,4mm/m za vsak % spremembe vlažnosti lesa. Zaradi križno orientiranih lamel lahko elementi obtežbo prenašajo v dveh pravokotnih smereh, kar omogoča njihovo uporabo tako za stenske kot stropne elemente, primarna smer prenosa obtežbe pa ustreza orientaciji vlaken zunanjih plasti desk, kar je shematično prikazano na sliki 2. Paneli lahko dosežajo dimenzije, ki so primerne tudi za gradnjo etažnih sten v enem kosu s predhodno izrezanimi odprtinami in pripravljenimi površinami za stikovanje, največje dolžine elementov pa so prilagojene transportu.



Slika 2: Raznos vertikalne obtežbe v ravnini stene (levo) in raznos vertikalne obtežbe v ravnini plošče (desno).

Z ustrežno povezavo elementov v celotno konstrukcijo lahko dosežemo, da plošče, ki se uporabljajo za stenske elemente, prevzamejo veliko vodoravno obtežbo tako v ravnini stene kot pravokotno nanjo. S primerno arhitekturno in staticno zasnovo objekta, ustrežno nosilnostjo KLH panelov ter primerno izvedbo stikov med stenami in ploščami lahko torej zagotovimo odlično odpornost konstrukcije iz križno lepljenih plošč tudi na delovanje vodoravnih obtežb kot sta veter in potres.

Masivne križno lepljene lesene plošče imajo tudi bistveno višjo požarno odpornost, kot jo običajno pripisujemo lesenim konstrukcijskim elementom, ter lahko presegajo požarno odpornost jeklenih in armiranobetonskih elementov. Sposobnost lesa za prevajanje toplote je namreč zelo majhna, saj jo prevčaja 300 do 400 krat počasneje

kot jeklo. Elementi zoglejijo počasi od površine proti notranjosti, ustvarjena zoglenelost pa zmanjšuje prevajanje toplote in onemogoča dostop kisika do lesa. V nezoglenelem preseku ohranjajo elementi polno nosilnost in med gorenjem ne spreminjajo oblike, zaradi česar ne povzročajo pritiska oz. prenosa obtežbe na ostale konstrukcijske elemente, kar je večinoma vzrok za porušitev konstrukcije.

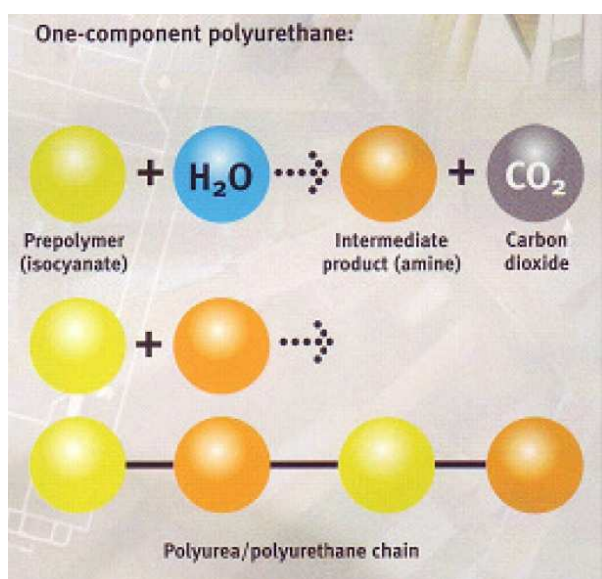
Glede na hitrosti gorenja lesa, lahko pri križno lepljenih ploščah računsko ugotovimo, da znaša običajna požarna odpornost 3-slojne plošče 30min, s 5-slojnimi ploščami je mogoče doseči požarno odpornost 60min, pri večjih debelinah in večslojnih stenah pa tudi 90min in več. V skladu z zahtevami požarnih predpisov so računsko dokazljive tudi višje vrednosti požarne odpornosti (90min, 120min, itd.), ki pa so odvisne predvsem od debeline in slojevitosti plošč ter njihovih oblog.

Življenjska doba plošč znaša ob ustrezni vgraditvi tudi več kot 50 let (KLH Massivholz, 2006).

### 3. LEPILA ZA LEPLJENJE LESA V KRIŽNO STRUKTURO

Vsestransko uporabo lepljenih lesenih konstrukcij moramo delno pripisati tudi razvoju sintetičnih lepil. Zahteve, ki jih morajo izpolnjevati, podajajo ustrezni evropski standardi. Uporaba lepil, ki se odlikujejo po odpornosti na temperaturo, klimatske spremembe, kemikalije in mikroorganizme, zagotavljajo lesenim lepljenim konstrukcijam v določenih primerih prednost pred armiranobetonskimi in jeklenimi konstrukcijami. Lepilo poveže les v nov material, pri tem pa mora imeti stik boljše mehanske lastnosti od okolišnjega lesenega medija. Pogoji, ki jih morajo takšna lepila izpolnjevati so: konstantna trdnost, trdnost na stiku mora biti večja ali vsaj enaka, kot je trdnost lesa na strig vzporedno ali pa pravokotno na vlakna, odpornost na anorganske in organske snovi, odpornost na kemijske vplive, strjevanje pri temperaturi do 25°C, požarna odpornost in ustrezen odprti čas lepila - čas od takrat, ko naneseemo lepilo, pa do takrat, ko lamele stisnemo (Kitek Kuzman in sod., 2006).

Večinoma proizvajalci lesenih križno lepljenih plošč uporabljajo za lepljenje enokomponentno poliuretansko lepilo Purbond®, ki izkorišča naravno vlago v lesu za povezovanje elementov v celoto brez potrebe po topilih in formaldehidu. Lepilo se po celotni površini nanese na lesene deske v kolicini okoli 200 g/m<sup>2</sup>, popolno zlepljenje pa se doseže v stiskalnici.



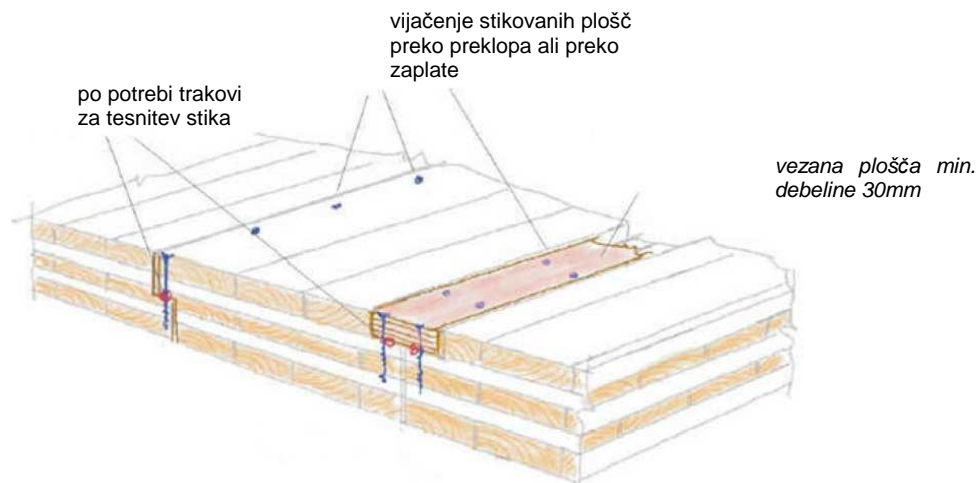
Slika 3: Shema kemijske reakcije lepila Purbond (Bayer Material Science - Purbond®, 2006).

V prvem koraku povezovalnega procesa voda, ki jo vsebujejo lesene lamele v obliki vlage, reagira z delom izocianatov v lepilu in tvori amin kot vmesni produkt, izločati pa se začne ogljikov dioksid, kar povzroči rahlo penjenje lepila. Amin nato zelo hitro reagira s preostalim delom izocianatne skupine, ki rezultira v križno povezani strukturi podobni tistim pri dvokomponentnih sistemih lepil. Ker lepilo med lepljenjem oddaja majhne količine CO<sub>2</sub> in ne vsebuje formaldehida ali topil, nima škodljivega vpliva na človekovo zdravje in okolje kot lepila na drugačnih kemičnih osnovah. Lepilo je brez vonja, zaradi visoke sposobnosti povezovanja pa je tudi njegova poraba majhna. Uporaba je dokaj enostavna, saj se material nanaša direktno iz pločevinke, zaradi česar ni odpadka, prav tako pa ni potrebno mešanje. V strjeni obliki je popolnoma inertno in toksikološko varno, kar dokazujejo desetletja izkušenj pri uporabi na stanovanjskih, medicinskih in drugih površinah (tapecirano pohištvo, ležišča, športni tekstil, medicinski implantati). Ker so vsa uporabljena lepila brez formaldehida, so lepljene konstrukcije popolnoma primerljive z naravnim masivnim lesom (Bayer Material Science - Purbond®, 2006).

## 4. VEZNA SREDSTVA

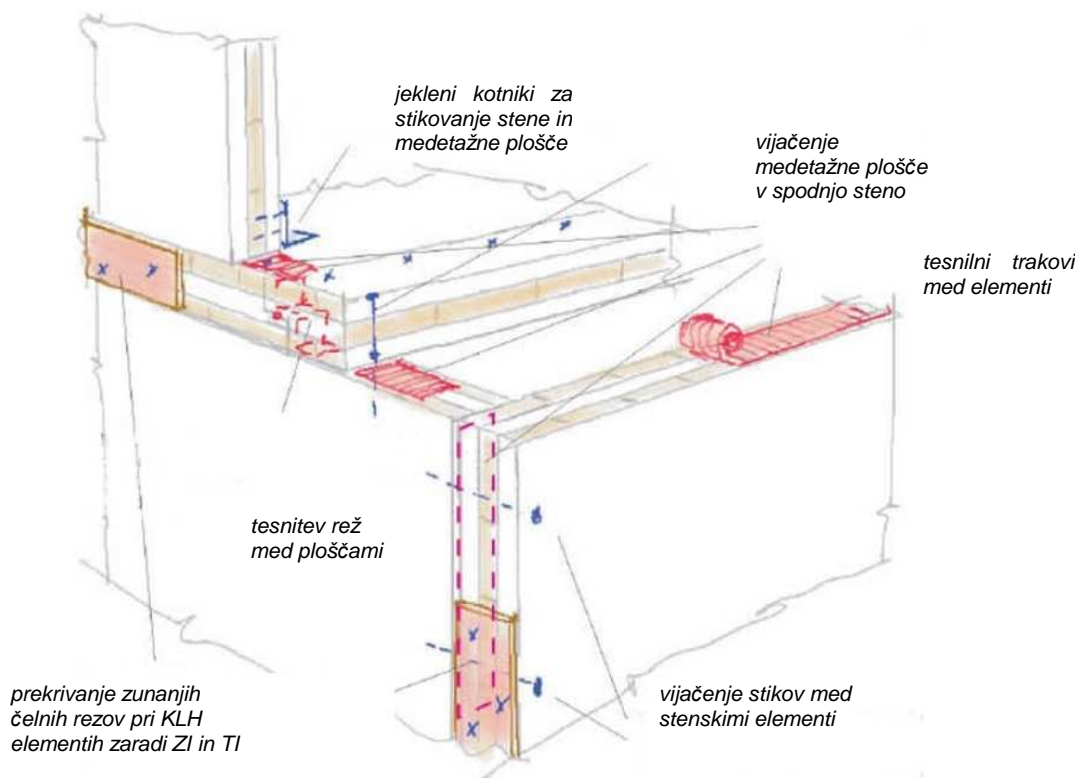
Križno lepljeni stenski paneli se v talno oziroma temeljno konstrukcijo sidrajo s pomočjo kovinskih sider. Pri tem se za prevzem dvizžne sile, ki nastane kot posledica rotacije stene v primeru vodoravne obremenitve, uporabljajo t.i. dvizžna sidra, za prevzem strižnih sil, ki se pojavijo ob zdrsu stene, pa t.i. strižna sidra. V temeljno konstrukcijo so sidra vijačena oz. pritrjena s sidrnimi vijaki, v lesene plošče pa običajno pritrjena z lesnimi vijaki ali obročastimi žebliji premera vsaj 4mm in dolžine med 40 in 60mm. Podobno se pritrjujejo tudi stene na medetažne plošče, le da se tu uporabljajo samo lesni vijaki ali obročasti žebliji, s katerimi kovinski kotnik pritrdimo tako na steno kot tudi na medetažno ploščo. Stiki med posameznimi paneli se običajno izvedejo kot preklonni vijačeni spoji. Vrste uporabljenih sider, dimenzije vijakov in žebeljev ter priporočila glede same konstrukcijske izvedbe se nekoliko razlikujejo med različnimi proizvajalci križno lepljenih plošč.

Tako proizvajalci v sistemu povezovanja križno lepljenih lesenih panelov predlagajo določene stike in detajle, ki jih mora računsko ovrednotiti in potrditi statik. Nekateri ne uporabljajo posebej dvizžnih in strižnih sider, ampak za prevzem vseh sil uporabljajo isti kotnik z ustreznim številom vijakov in/ali žebeljev ter razdaljo med njimi, kar se določi v skladu s statičnim izračunom. Računska nosilnost vijakov in žebeljev se določi v skladu z veljavnimi standardi za projektiranje mehanskih stikov v lesenih konstrukcijah in tehničnimi predpisi oziroma dovoljenji proizvajalcev mehanskih veznih sredstev. Tipični primeri spajanja plošč v KLH konstrukcijskem sistemu so prikazani na slikah 4, 5 in 6.

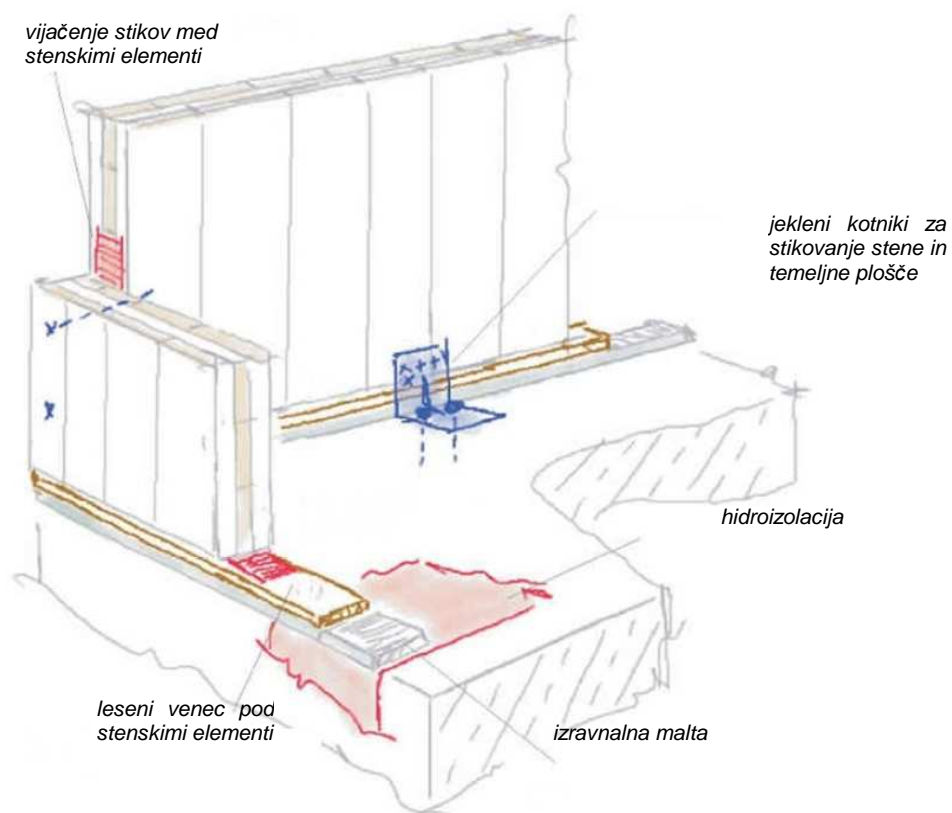


Slika 4: Detajl 5-slojne plošče z vijačnim preklpom (KLH Massivholz, 2001).





Slika 5: Detajl stikovanja v medetaži (KLH Massivholz, 2001).



Slika 6: Detajl stikovanja s temeljno ploščo (KLH Massivholz, 2001)

## 5. PREDNOSTI GRADNJE S KRIŽNO LEPLJENIMI LESENIMI PANELI

Dejstvo je, da se konstrukcije iz križno lepljenih lesenih plošč v Evropi med nosilnimi sistemi vse bolj uveljavljajo. Tako sistemi gradnje iz lesenih križno lepljenih plošč pokrivajo vse večji delež med montažnimi stanovanjskimi objekti (Slika 7), hkrati pa njihova uporaba narašča tudi med večnadstropnimi stavbami in objekti večjih dimenzij (Slika 8, 9, 10 in 11).



Slika 7: Endružinski hiši z nosilno konstrukcijo iz križno lepljenih lesenih KLH plošč.



Slika 8: Večnadstropni stavbi z nosilno konstrukcijo iz križno lepljenih lesenih KLH plošč (levo 4-etažni stanovanjski blok v Avstriji in desno 3-etažni v Liechtensteinu).



Slika 9: Objekti večjih dimenzij in razponov z nosilno konstrukcijo iz križno lepljenih lesenih KLH plošč (levo proizvodna hala v Avstriji in desno hipodrom na Švedskem).



Slika 10: Večnadstropni stavbi z nosilno konstrukcijo iz križno lepljenih lesenih KLH elementov, ki sta bili zgrajeni v ožjih mestnih jedrih (levo hotel Lamm v Italiji in desno render že zgrajene 9-nadstropne stavbe v centru Londona, v kateri je 8 zgornjih etaž iz KLH plošč).

Uspeh konstrukcijskega sistema iz križno lepljenega lesa temelji na več razlogih, med katerimi pa moramo vsekakor izpostaviti naslednje:

- metoda križnega lepljenja lamel zagotavlja material visoke stabilnosti, dobrih splošnih mehanskih lastnosti in toplotne izolativnosti, poleg tega pa se konstrukcije iz takšnega materiala zelo dobro obnašajo tudi v primeru potresa in požara
- paneli iz križno lepljenega lesa imajo veliko trdnost in togost v ravnini ne glede na kvaliteto lesa, zaradi česar omogočajo tudi uporabo domačega lesa slabše kvalitete
- konstrukcijski sistem izkazuje veliko duktilnost oz. sposobnost plastičnega obnašanja pred porušitvijo in dobre splošne lastnosti disipacije oz. sipanja energije v odvisnosti od sistema in načina mehanskih povezav
- sistem omogoča gradnjo tako enostanovanjskih kot tudi večnadstropnih stavb
- proces obdelave in izgradnje je izjemno hiter, pri čemer ne potrebujemo visoko kvalificirane delovne sile, predvsem pa je uporabnikom, ki so sicer bolj naklonjeni betonskim in zidanim konstrukcijam, sistem gradnje s križno lepljenimi masivnimi ploščami kot alternativa klasični gradnji, bližje kot okvirni leseni sistem, zato se bodo zanj tudi lažje odločili.



Slika 11: Poslovni stavbi z nosilno konstrukcijo iz križno lepljenih lesenih KLH elementov zgrajeni v zelo kratkem času –nosilna konstrukcija je bila postavljena v manj kot tednu dni (levo poslovni KLH objekt pri Katschu v fazi montaže in desno zaključen biro v Celovcu).





Slika 12: Premostitveni nosilec in most iz križno lepljenih lesenih KLH elementov.

## 6. ZAKLJUČEK

Značilnost sistema gradnje iz križno lepljenih lesenih masivnih KLH plošč je vsekakor tudi visoka stopnja predizdelanosti, saj so konstrukcijski elementi v celoti izdelani v delavnici pod

kontroliranimi pogoji, odlikujejo pa ga tudi ekonomičnost in prijaznost okolju.

Križno lepljene plošče se lahko uporabljajo kot nosilni in nenosilni elementi, dopuščajo pa tudi možnost kombiniranja z jeklom, steklom in vsemi ostalimi tradicionalnimi gradbenimi materiali, s čimer ponujajo največjo možno svobodo v arhitekturi. Poleg uporabe v eno in več etažni stanovanjski gradnji, je konstrukcijski sistem iz križno lepljenega lesa v svoji kratki zgodovini že dokazal izredno uporabnost tudi v gradnji poslovnih, industrijskih, servisnih, komunalnih, sakralnih ter inženirskih objektov, kot so na primer mostovi (Slika 12). Sistem ponuja tudi velike možnosti pri dozidavah in nadzidavah obstoječih zgradb.

Z različno površinsko obdelavo konstrukcije iz križno lepljenega lesa lahko ustvarimo videz zidane stavbe, pri tem pa ohranimo zdravo bivalno okolje, ki ga ponuja les. Sistem tudi v notranjosti s svojo konstrukcijsko zasnovo ne kvari funkcionalnosti prostora in ima pri statično zahtevnejših konstrukcijah celo določene prednosti pred klasično grajenimi objekti.■

## 7. LITERATURA

[1] Bayer Material Science - Purbond®, 2006. Adhesives for modern timber construction. Predstavitvena brošura.

[2] Blass H.J., Fellmoser P., 2004. Design of Solid Wood Panels with Cross Layers. V: Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering, WCTE 2004, June 14-17, 2004, Lahti, Finland; pp: 543-548.J.

[3] Kitek Kuzman M., Hrovatin J., Kušar J., 2006. Lesene lepljene konstrukcije v arhitekturi. <http://predmet.arh.uni-lj.si/ar/2006-1/ar2006-1-09.pdf> (15.12.2007)

[4] KLH Massivholz GmbH, 2006. Križno lepljen les – dostopno na: [http://www.klh.m2online.at/fileadmin/klh/bilder/2007/Prospekte/PDF/071018\\_KLH\\_slow\\_A4.pdf](http://www.klh.m2online.at/fileadmin/klh/bilder/2007/Prospekte/PDF/071018_KLH_slow_A4.pdf) (10.9.2007)

[5] KLH Massivholz GmbH, 2007. Statika, slovenska verzija.

[6] KLH Massivholz GmbH, 2006. European Technical Approval - ETA-06/0138.

[7] KLH Massivholz GmbH, 2001. Construction guidelines , V.2.0, dec 2001.

[8] Štrus K., Dujič B., 2008. Križno lepljeni leseni paneli - KLH inovativnost v sodobnem gradbeništvu, zbornik 30. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, oktober 2008, str. 133-144.