Lepidla a lepené spoje

Konstrukční spoje
Václav Sebera, Jan Tippner, Jaromír Milch
Ústav nauky o dřevě

OBSAH

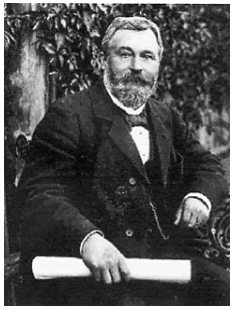
- Historie lepidel a lepení
- Koheze
- Adheze
- Základní adhezní principy
- Rozdělení lepidel
- Lepené spoje a normy
- GLULAM

Historie lepení

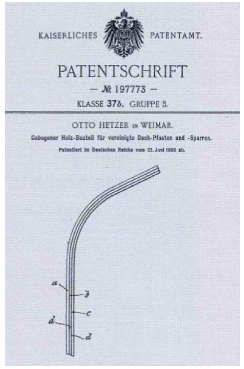
- 4000 p.n.l.: Babylon - lepivé živice.
- 1500 p.n.l.: Egypt - lepené dřevo v hrobkách doby Thutmose III.
- 200 p.n.l.: Písemné zprávy o klasickém klihu.
- 400 – 1600 n.l.: Období bez vývoje lepení a lepidel.
- 1690: Holandsko 1. továrna na živočišný klíh.
- 1754: Anglie – patent na rybí klíh.
- 1791: Anglie – patent na přírodní kaučuk.
- 1800: Švýcarsko a Německo – komerční výroba **kaseinového** lepidla
- 1843: USA – patent na lepidlo z přírodního kaučuku

Historie lepení

- 1860: Shromažďovací hala King Edward College (Southampton)
- 1859-1867: formaldehyd (Butlerov (1828-1886) a Hofmann (1818-1892)
- 1901: Anglie – patent na lepidla z fenolformaldehydových živic
- 1907-1916: bakelit (Baekeland (1863-1944))
- 1906: 22.6.1906 říšský patent č. 197773 k vynálezu zakřiveného lepeného dřevěného konstrukčního prvku – Otto Hetzer



Otto Hetzer
(1846-1911)



KAISERLICHES PATENTAMT.

PATENTSCHRIFT

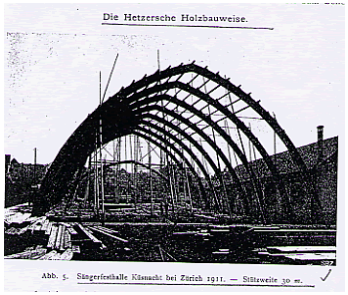
— № 197773 —

KLASSE 37b. GRUPPE 3.

OTTO HETZER zu WEIMAR.

Gebogener Holz-Binder für vereinigte Dach-Pfosten und -Sparren.

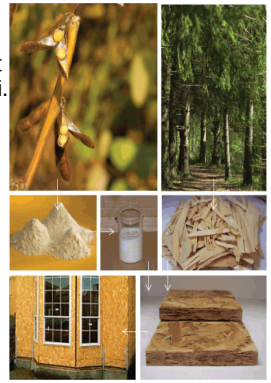
Patentiert im Deutschen Reiche vom 22. Juni 1906 ab.



Historie lepení

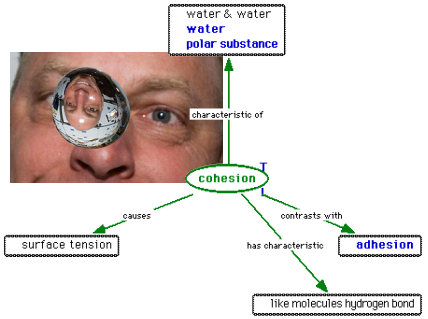
- 1860: Shromažďovací hala King Edward College (Southampton)
- 1859-1867: formaldehyd (Butlerov (1828-1886) a Hofmann (1818-1892)
- 1901: Anglie – patent na lepidla z fenolformaldehydových živic
- 1907-1916: bakelit (Baekeland (1863-1944))
- 1906: 22.6.1906 říšský patent č. 197773 k vynálezu zakřiveného lepeného dřevěného konstrukčního prvku – Otto Hetzer
- 1910: průmyslová výroba překližky pro letadla
- 1920: USA – patent na močovinoformaldehydové lepidlo.
- 1939: Dřevotřísková deska
- 1939-1944: Lepidla na bázi PVAc, epoxid a polyizokyanát
- 1975-1980: PVAc a směsná lepidla pro venkovní expozici.
- 2003 – lepidla ze sójových bobů (Soy-bean-based)

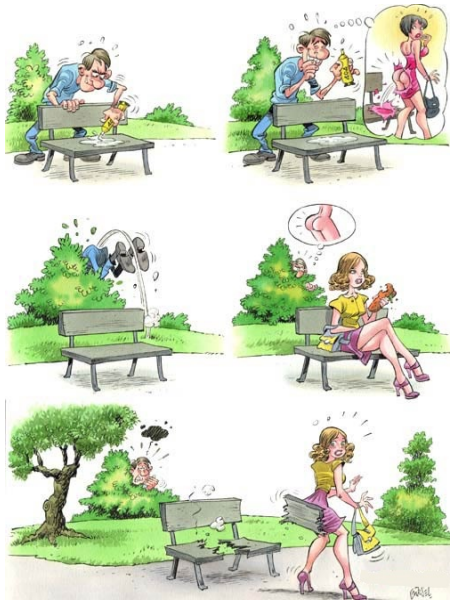
Oregon State University professor Kaichang Li shows off his secret formula for making a green form of adhesive.



Koheze

- neboli soudržnost



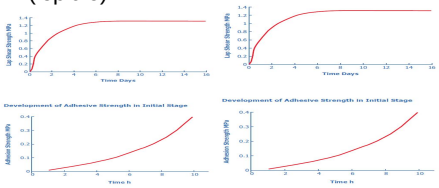


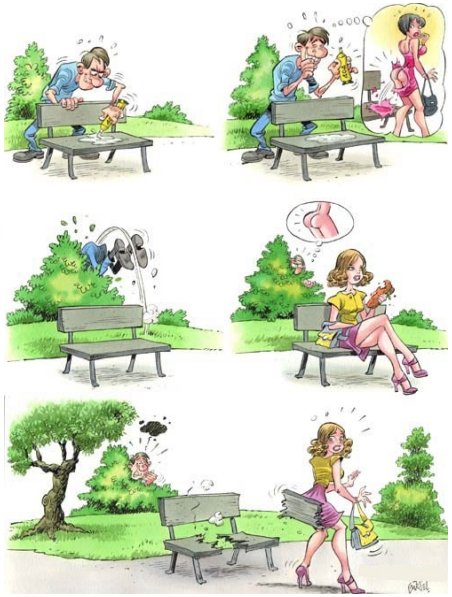
Principu koheze se používá i v humanitních vědách:

- Klepy
- Sociální vazby (střední třída, děti, práce apod.)
- Lingvistika – sémanticky kohézní diskurz

Adheze

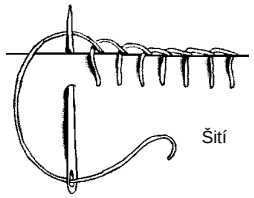
- neboli přilnavost k povrchu
- **Adherend** – substrát, spojovaný materiál (dřevo, plast...)
- **Adhezivum** – spojovací materiál (lepidlo)





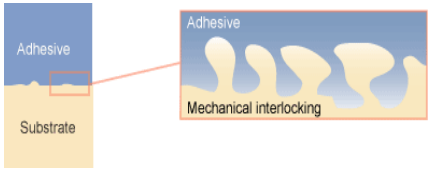
Základní adhezní principy

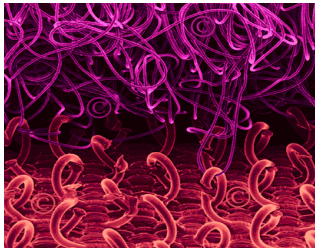
a) Mechanická
b) Chemická
c) Difuzní
d) Elektrostatická
e) Disperzní



a) Mechanická

- Adhezivní látka proniká a vyplňuje prázdná místa/póry substrátu a mechanicky drží obě látky dohromady - „interlocking“
- Suchý zip a stehy jsou makroskopické příklady čistého mechanického principu spojení





Suchý zip

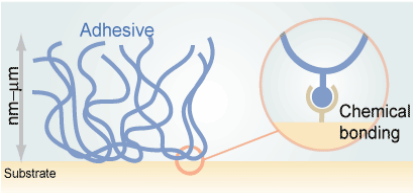
Základní adhezní principy

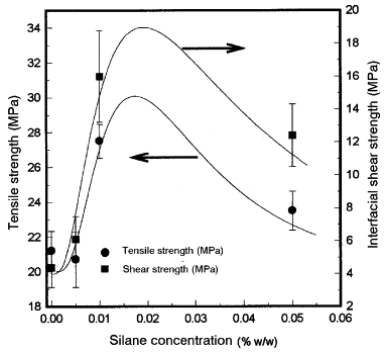
b) Chemická adheze (Chemosorpce)

- Adherent a adhezivum jsou drženy dohromady na svém rozhraní díky chemickým vazbám, které se vytvořily mezi jejími molekulami (iontové, kovalentní)
- tyto vazby jsou velmi silné (60-1100 kJ/mol) a významně se podílejí na celkové tuhosti spoje
- sekundární vazby H nejsou zas tak významné (0,08-0,5 kJ/mol)
- účinnost na velmi malé vzdálenosti (<1 nm)

Coupling agent

- přídavek na zvýšení adheze neorganického pojiva s organickým substrátem
- silany, $CaCO_2$ aj.

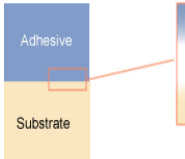


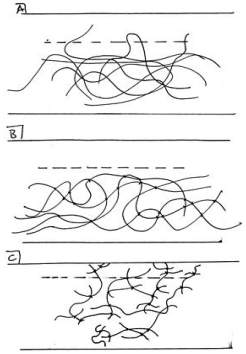


Základní adhezní principy

c) Difuzní adheze

- Adherend a adhesivum jsou drženy dohromady na svém rozhraní pomocí vzájemné interpenetrace – interdifuze – svých řetězců.
- Tento princip adheze je tedy zvláště pro polymerů (vysoký PS → vyšší pevnost)
- *de facto je to mechanická adheze na molekulární úrovni*





Faktory ovlivňující difuzni adhezi

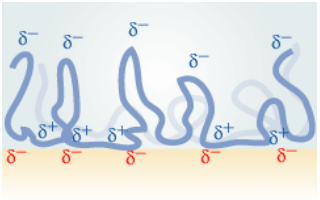
- čas kontaktu A. s A., kontaktní tlak, teplota, molekulární hmotnost, typ fáze (tekutá/pevná), příp. polarita

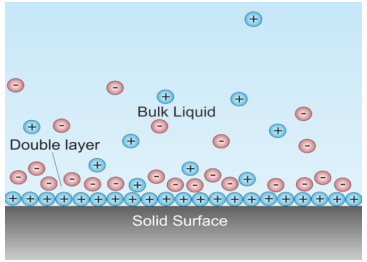
Základní adhezní principy

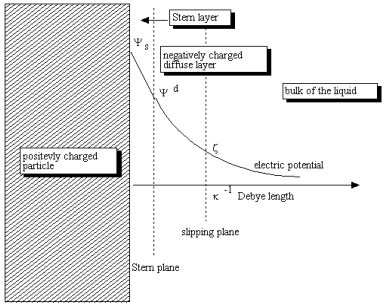
d) Elektrostatická adheze

- Adherend a adhesivum jsou drženy dohromady díky rozdílu v elektronegativitách
- Adhézní síla je tak dána transférem elektronů napříč rozhraním spoje tím že vytváří kladné a záporné náboje a tak přitahuje A&A k sobě.
- Electric double layer (EDL, DL) – na rozhraní kapalné a pevné látky (zpochybňovaná teorie)

1. vrstva = náboj na povrchu (ionty)
2. vrstva = přitahování vlivem Coulombových sil





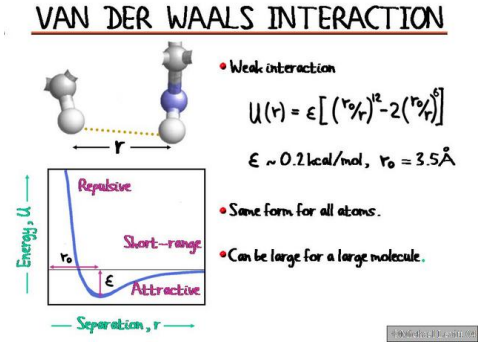


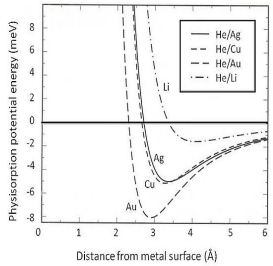
Základní adhezní principy

e) Disperzní adheze (Physisorption)

- Adherend a adhesivum jsou drženy dohromady díky slabé interakci – **Van der Waalsovy síly**
- Ač jsou to malé síly v rámci celého objemu se nasčítají a mají významný vliv (energie mezi 10-100 meV, chemická adheze 1-10eV)

Johannes Diderik van der Waals





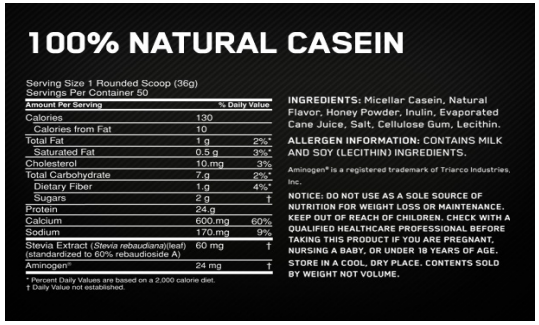
Klasifikace lepidel I

a) Podle původu: živočišné (glutin, kasein, albumin)
rostlinné (bílkovinové, škrobové, celulozové)
minerální
syntetické

b) Podle charakteru vytvrdnutí: vratné a nevratné

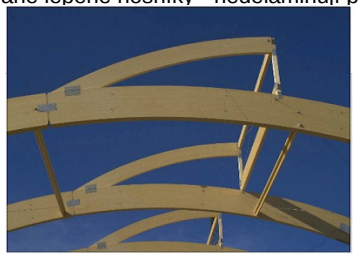
c) Podle formy a skupenství: kapalné, práškové, fólie

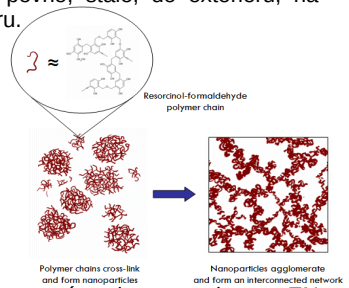
d) Podle vodovzdornosti: vysokovodovzdorné (i páře)
vodovzdorné (studené vod)
nevodovzdorné



Klasifikace lepidel II – dle složení

a) Resorcinol formaldehydové (RF) a **fenol-resorcinol formaldehydové** (PRF) – typ I (EN 301), tmavé barvy, odolné, pevné, stálé, do exteriéru, na namáhané lepené nosníky - nedelaminují při požáru.





b) Fenol-formaldehydové (PF) – za tepla vytvrzované: nejsou povoleny v EN 301, používají se na LVL desky, pekližky a DTD.

c) Fenol-formaldehydové (PF) – za studena vytvrzované: jsou povoleny v EN 301, používají se na nenosné prvky, nejsou odolné vůči kyselinám.

d) Močovino-formaldehydové (UF) – za tepla vytvrzované – pouze na nenosné překližky a desky, za studena vytvrzované – typ II (EN 301), málo odolné vůči vyšší teplotě a vlhkosti, použití na LLD do interiéru.

Klasifikace lepidel II – dle složení

e) Melamin-močovino formaldehydové (MUF) – za studena vytvrzované druhy – typ II (EN 301), některé druhy – typ I, výhody – levné, světlý odstín.

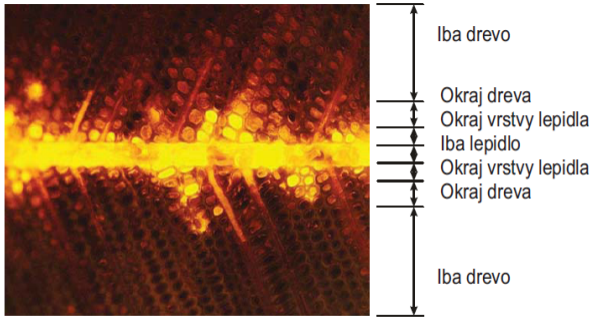
f) Kaseinové lepidlo – nejstarší – používá se od 20. let, do interiéru, nelze použít podle EN 301.

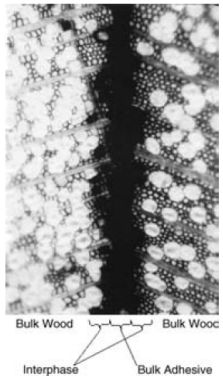
g) Epoxidové – typ I (EN 301), pevné, trvanlivé (mezi MUF a PRF), drahé, použití ve speciálních případech: lodě, opravy delaminovaných LL nosníků, lepení kovů, plastů, pryže ke dřevu, vlepované ocelové tyče.

h) Polyuretanové – 2 složkové, pevné, málo odolné vůči povětrnosti, drahé, nepoškozuje vlákna dřeva, použití pro speciální účely: spoje hliník-překližka, ocel. Plech- překližka, vlepované tyče.

Lepené spoje a normy

V důsledku velké šířky lepené spáry jsou požadavky na lepidla pro inženýrské konstrukce ze dřeva jiné než požadavky na lepidla pro lepení nenosných částí (např. okna, nábytek, dřevěné podlahy atd.). Při výběru lepidla musí být zohledněné a koordinované všecky parametry výroby. To znamená vlivy teploty, délky přesahu, vlhkosti vzduchu atp. V Eurokódu 5 jsou tyto podmínky definovány v třídách použití





Obr. 1 Detail lepenej škáry - použité PUR –lepidlo, fluorescentná mikroskopia
(Obrázok od: Dr. K. Richter, EMPA Dübendorf / CH)

Lepidla a normy

EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM

EN 301

June 1992

Lepidla a lepené spoje jsou ve dvou Evropských normách:

- EN 301 „Lepidla, fenolová a aminoplastová, pro nosné dřevěné konstrukce; klasifikace a požadavky na užitné vlastnosti“.
- EN 302 „Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – metody zkoušení, část 1-4“.

Norma povoluje použití pouze fenolických a aminoplastických lepidel:

a) Lepidlo typu I: pro použití ve venkovním prostředí a teploty nad 500 C.
b) Lepidlo typu II: pro použití v interiérech a chráněném venkovním prostředí, teploty do 500 C.

Požadavky na tahovou smykovou zkoušku

Treatment (see Annex A)	Adhesive type	
	I	II
	Minimum failing load (in N)	
A1	2 000	2 000
A2	1 200	1 200
A3	1 600	1 600
A4	1 200	NR[a]
A5	1 600	NR[a]

[a] NR = not required for this adhesive type.

Designation	Treatment
A1	7 days in standard atmosphere [20/65][a]
A2	7 days in standard atmosphere [20/65][a] 4 days in water (15 ± 5) °C Samples tested in the wet state
A3	7 days in standard atmosphere [20/65][a] 4 days in water (15 ± 5) °C Drying for 7 days in standard atmosphere [20/65][a] Samples tested in the dry state
A4	7 days in standard atmosphere [20/65][a] 6 h in boiling water 2 h in water (15 ± 5) °C Samples tested in the wet state
A5	7 days in standard atmosphere [20/65][a] 6 h in boilding water 2 h in water (15 ± 5) °C Drying for 7 days in standard atmosphere [20/65][a] Samples tested in the dry state

[a] The standard atmosphere [20/65] is defined as a temperature of (20 ± 2) °C and a relative humidity of (65 ± 5) %.

ASTM vs. EN

European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung

- Porovnání norem ASTM D905 (USA) s EN 302-1 (EU)
- Byla testována tato tři lepidla
  - Epoxidové (EP)
  - Fenol-Rezorcinol-formaldehydové (PRF) - křehké
  - Polyuretanové (PUR) – tažné/nejméně křehké
- Pro zjištění citlivosti daných norem na chyby byly vytvořeny záměrné chyby: 2x větší množství lepidla, 2 chyby v řezání vzorků a 2 módy excentrického namáhání během zkoušek
- Referenční počet zkoušek 20, každá z variant čítala 10 zkoušek

Výrobní tělíska

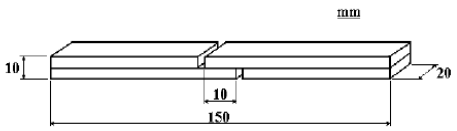


Figure 1. *EN 302-1 specimen.*

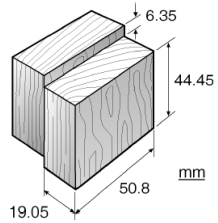


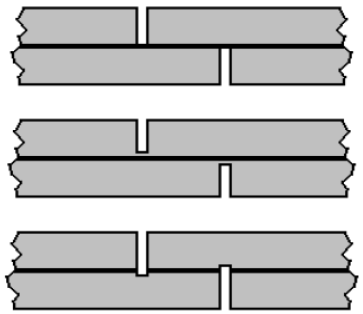
Figure 2. *ASTM D905 specimen.*

ASTM vs. EN

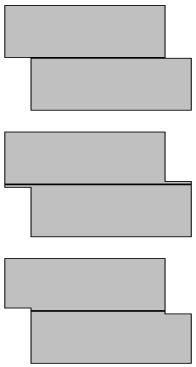
European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung

- záměrné geometrické chyby při přípravě vzorků

EN 302-1



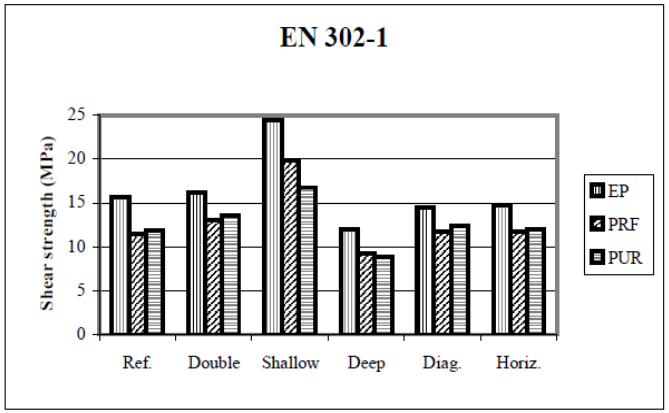
ASTM D905



Přesahy řezů byly cca 0,5 mm

ASTM v EN

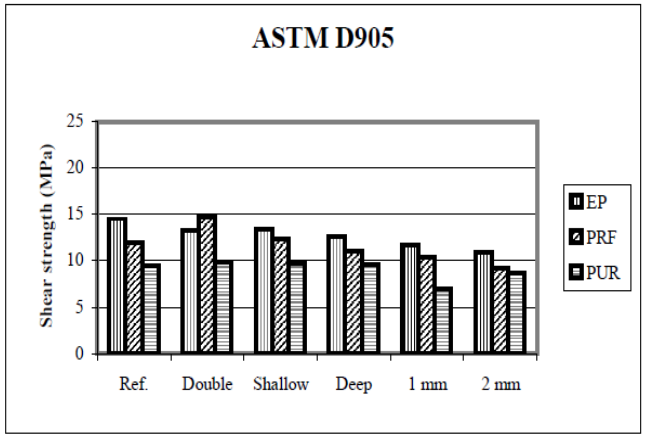
European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung



- EN 302-1 je citlivá na chyby řezání (shallow/deep)
- S 2x nánosem se pevnost mírně zvýšila
- Mírné vyosení zkoušky moc neovlivňuje naměřenou smykovou pevnost

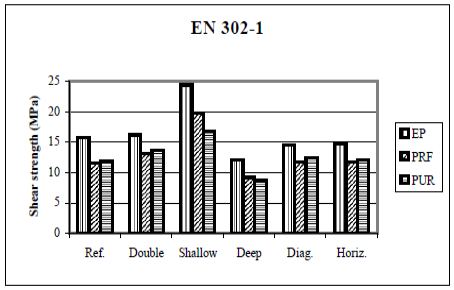
ASTM v EN

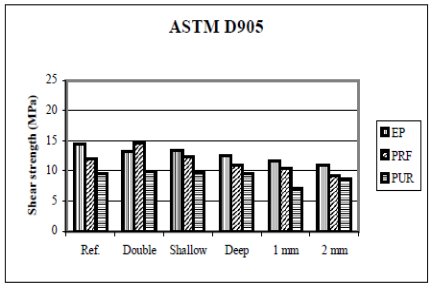
European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung



• U 2x nánosu má PRF větší pevnost, zatímco EP nižší

ASTM v EN – vizuální porovnání



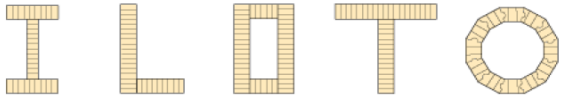


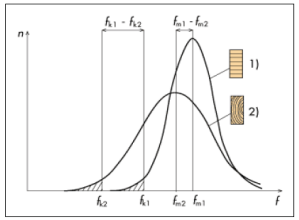
• Pevnost spoje měřena dle ASTM vykazuje obecně nižší hodnoty
• Lepidlové spoje reagují na chyby různě ve zkouškách dle různých norem
• Náročnost přípravy vzorků je téměř stejná
• Chyby řezání ovlivňují měření více při využití EN302-1

European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung

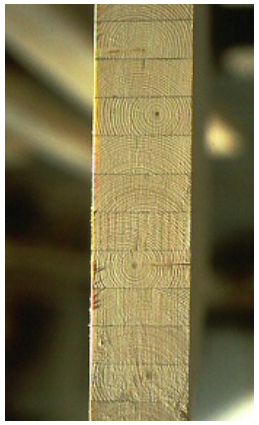
GLULAM – glued laminated timber

• Lepené lamelové dřevo (LLD), asi 4-5x dražší než hraněné řezivo
• Šířka 60-240mm
• Výška min. 105 mm (3 lamely po 35-50 mm), max. 2m
• Délka dle výrobní linky, až 60 m, de facto nekonečná lamela
• Různé průřezy

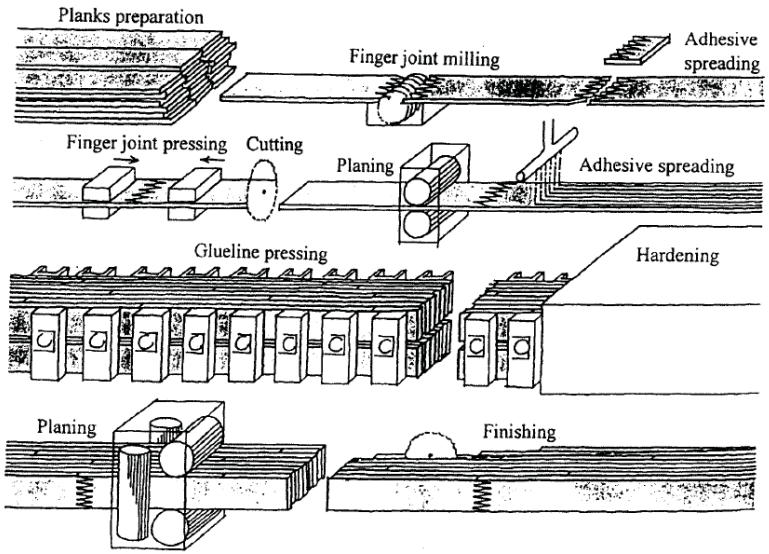




Obr. 2 Početnosť rozdelenia pevnosti pre LLD a rezivo
(Zobrazené s povolením Svenskt Limträ AB)

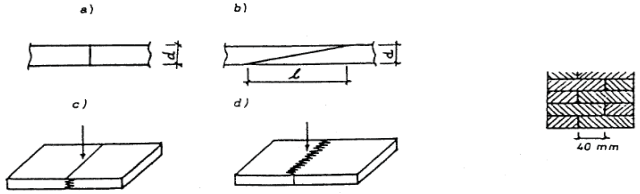


Výroba Glulamu

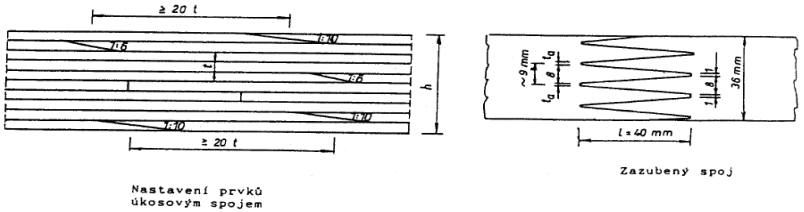


Spojení lamel Glulamu

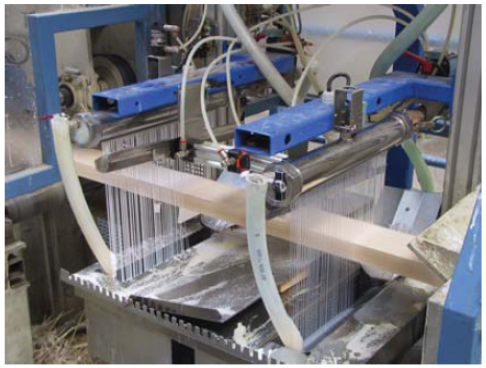
• Malá pevnost lepidla neumožňuje tupé spoje → fingerjoint, zvýšení účinné plochy + transfér normálových n. na smyková n.



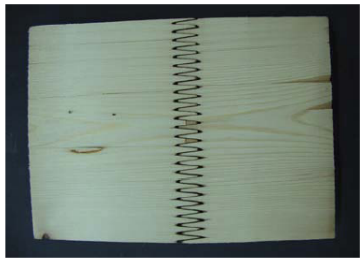
• IF je smyková pevnost spoje 10x nižší než tahová pevnost materiálu → lepená plocha by ideálně měla být 10x větší než průřez nosníkem



Výroba Glulamu



Pohled na spoj shora



Pokud spojujeme 2 kusy ve stejném směru vláken, nevyskytnou se problémy s vlhkostí (sesýchání a bobtnání)

GLULAM - podmínky pro výrobu lepených spojů

• Lepené plochy: opracované (hoblování, frézování), hladké, rovinné, čisté.
• Lisovací tlak: 0,4-1,2 MPa: lisy, stahováky, výjimečně vruty, svorníky, hebíky.
• Doba vytvrzování: 8 - 12 hod (200 C – 150 C)
• Doba dotvrzování: 36 - 72 hod (200 C – 150 C)

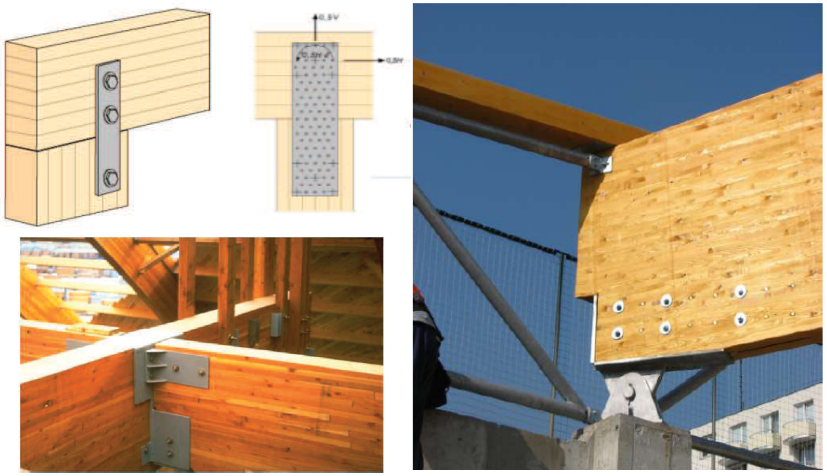
GLULAM – mechanické vlastnosti

Pevnosti materiálu: (charakteristické hodnoty pro lepené lamelové dřevo) ČSN EN 1194

Popis	Značka	Velič.	GL 24h	GL 28h	GL 32h	GL 36h
Pevnost v ohybu	$f_{m,g,k}$		24	28	32	36
Pevnost v tahu rov. s vlákny	$f_{t,0,g,k}$		16,5	19,5	22,5	26
Pevnost v tahu kol. k vláknům	$f_{t,90,g,k}$		0,4	0,45	0,5	0,6
Pevnost v tlaku rov. s vlákny	$f_{c,0,g,k}$		24	26,5	29	31
Pevnost v tlaku kol. k vláknům	$f_{c,90,g,k}$	[MPa]	2,7	3,0	3,3	3,6
Pevnost ve smyku	$f_{v,g,k}$		2,7	3,2	3,8	4,3
Modul pružnosti (stř. h. 0°)	$E_{0,g,mean}$		11600	12600	13700	14700
Modul pružnosti (5 % kv.)	$E_{0,g,05}$		9400	10200	11100	11900
Modul pružnosti (stř. h. 90°)	$E_{90,g,mean}$		390	420	460	490
Hustota	$\rho_{g,k}$	[kg/m³]	380	410	430	450

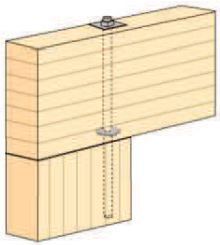
Spojování Glulamu

- Uložení na dřevěný sloup pomocí bočních ocelových plechů
- Uložení pomocí patek na betonový podklad

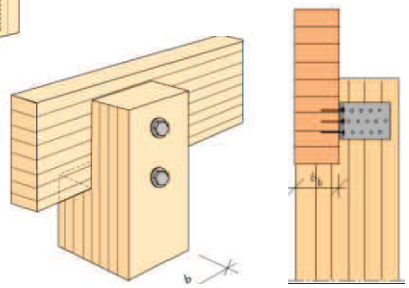


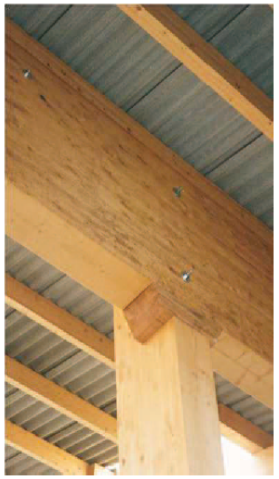
Spojování Glulamu

- Kloubové uložení pomocí vlepované tyče



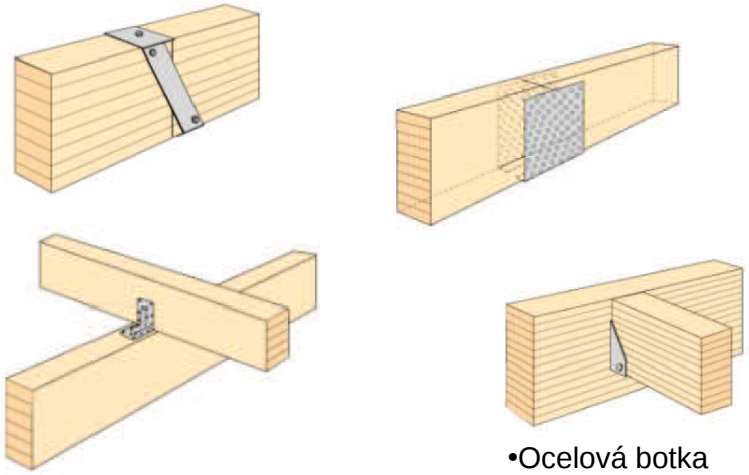
- Zapuštěný nosník





Spojování Glulamu

- Kratší nosníky lze nastavovat co do délky



- Ocelová botka

GLULAM – glued laminated timber

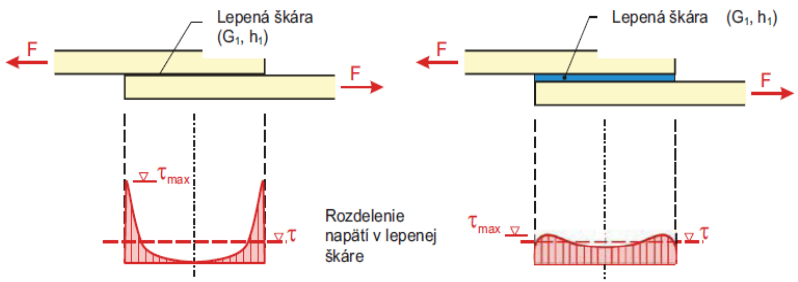
GLULAM – lední hala

The Disney ICE rink in Anaheim, California features glulam arches curved to a 75-foot radius to form the ice center's roof system.

Napětí v lepeném spoji

Lepidlový spoj s křehkým mechanickým chováním a tenkým nánosem

Lepidlo s houževnatým mechanickým chováním a hrubým nánosem

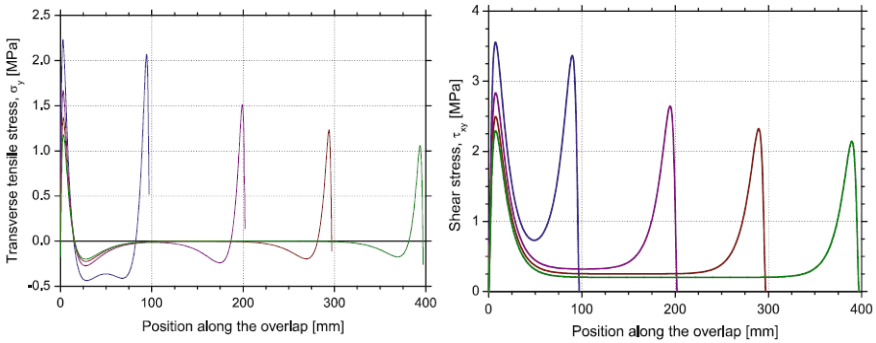


- Špičky napětí jsou místa s vyšší pravděpodobností vzniku trhliny
- Je nutné volit lepidlo, které je houževnaté („tažné“)
- V inženýrských k-cích je tloušťka lepidla: **tenký < 0,1mm < hrubý**.
- Chování lepeného spoje lze regulovat tloušťkou nánosu lepidla → „kvazituhý spoj“

Napětí ve sváru při různých přesazích

- Síla vyvozená na dané tělísko byla 10kN

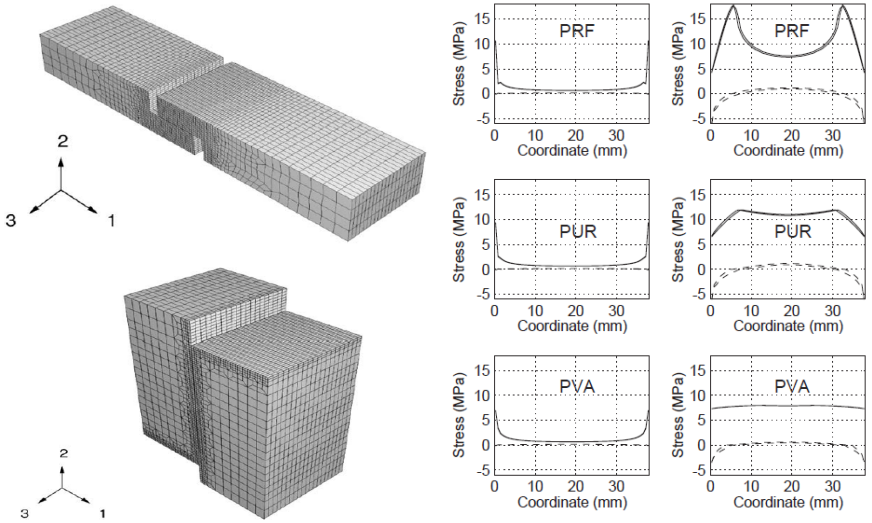
$$\sigma_X = \sigma_0 \cdot \cos^2 \alpha \quad \sigma_Y = \sigma_0 \cdot \sin^2 \alpha \quad \tau_{XY} = \sigma_0 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$



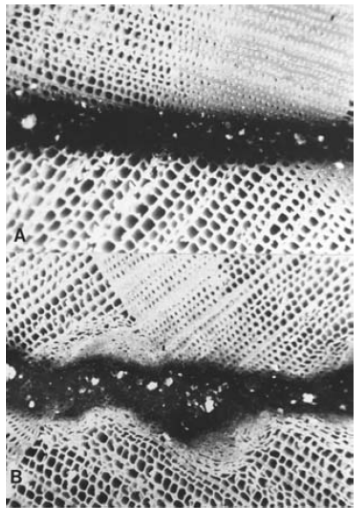
Vallee et al. 2012

Napětí ve spoji při různých lepidlech – MKP

- Síla vyvozená na dané tělísko byla 10kN



Vliv kvality povrchu a času na pevnost



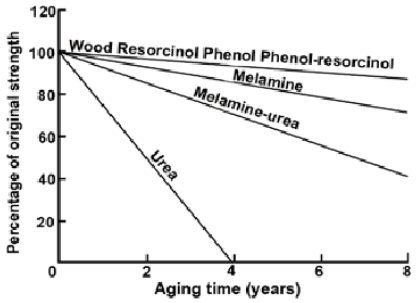
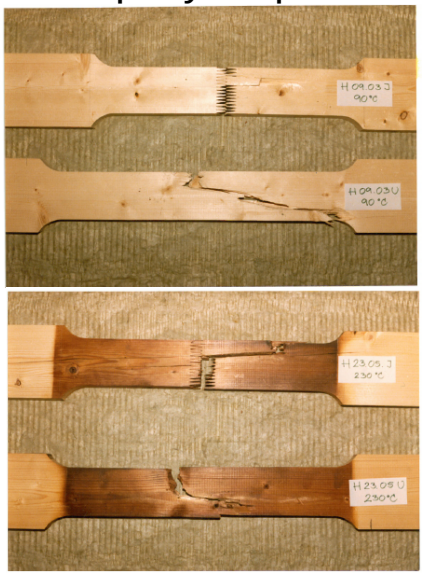
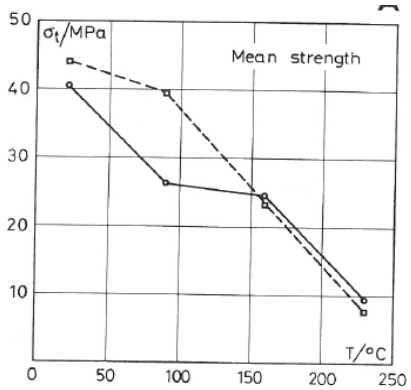


Figure 10–14. Relative rates of deterioration of bond strength of small specimens exposed directly to weather.

Vliv teploty na pevnost pevnost fingerjoint





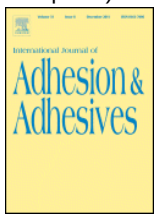
Závěr?

Výhody

- Možnost vytváření průřezů libovolné velikosti a tvaru
- Možnost vytvářet staticky výhodné tvary nosníků bez oslabení spojovacími prostředky.
- Vyšší homogenita průřezu – snížení vlivu přirozených imperfekcí.
- Možnost využití kratšího řeziva.
- Tovární výroba – nutnost kvalifikované pracovní síly a dodržování technologické kázně
- Materiál: jehličnaté řezivo, vodovzdorné pekližky, OSB desky, DTD lepené vodovzdornými lepidly, tvrdé DVD.
- Materiál neimpregnovaný (impregnace až hotového prvku).

Nevýhody

- V malých průřezech lze těžko dosáhnout požadované pevnosti spoje



International Journal of Adhesion and Adhesives

Journal of Adhesion

Použitá a doporučená literatura

- Přednášky doc. Lokaje (VŠB-TU Ostrava)
- Materiály dr. Dolejše (ČVUT v Praze)
- http://www.specialchem4adhesives.com/resources/adhesionguide/index.asp
- http://www.freepatentsonline.com/6679942.html
- http://csb.stanford.edu/levitt/demo_lectures/lec1/Lecture1/Fundamental_inte
-
-