Svařování dřeva

Konstrukční spoje
Václav Sebera, Jan Tippner
Ústav nauky o dřevě

OBSAH

- Historie svařování dřeva
- Základní princip svařování dřeva
- Proces svařování
- Tření
- Mechanické vlastnosti svárů v různých aplikacích
- Mikrostruktura sváru
- Různé
- Závěr
- Použitá a doporučená literatura
- *„Svařované dřevo a vlhkost...“*

Historie svařovaní dřeva

- Úplně na začátku se tím myslelo spojování dřeva pomocí termoplastického pojiva (podobně jako u plastů a kovů)
- V 1993 ve Švýcarsku spuštěn výzkum na svařování dřeva (SWOOD), ještě s pojivem

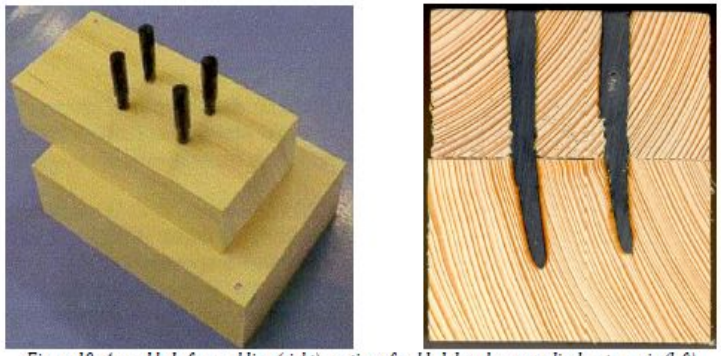
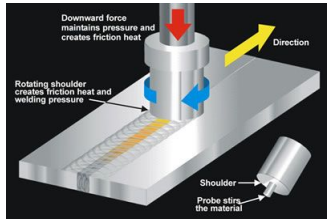
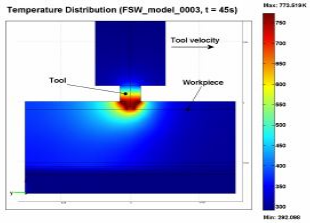


Figure 10: Assembly before welding (right), section of welded dowels perpendicular to grain (left)

Historie svařovaní dřeva

- Úplně na začátku se tím myslelo spojování dřeva pomocí termoplastického pojiva (podobně jako u plastů a kovů)
- V 1993 ve Švýcarsku spuštěn výzkum na svařování dřeva (SWOOD), ještě s pojivem
- 1. svaření dřeva bez pojiva bylo provedeno v Německu (Sutthoff 1996), podařilo se jim spojit dvě dřeva pomocí rotačního svařování
- Pizzi et al. 2004 svařili bukové a smrkové dřevo
- Od 2003 se většina výzkumu svařování soustředuje v Německu, Švýcarsku, Francii, Austrálii a USA.
- Nedávno se též podařilo aplikovat tzv. Microfriction stir welding – (z patentu pro kovy) – ocelová hlava rozpouští polymery dřeva ještě před samotným dotykem obou kusů (technologie nelimituje co do délky tělesa)





Fusion Bonding - tavící spojování

• Svařování dřeva má své počátky v technikách „tavícího spojování“
• Frikční svařování je často používáno v automobilovém a leteckém průmyslu (plasty, kovy)

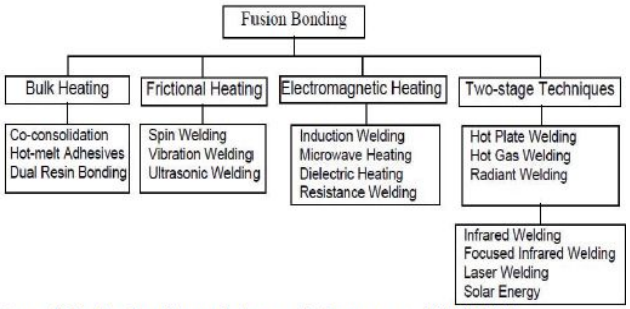
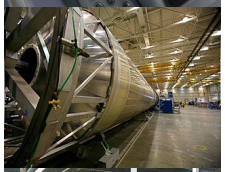


Figure 8. Fusion bonding techniques, C. Ageorges et al.2001 [37].



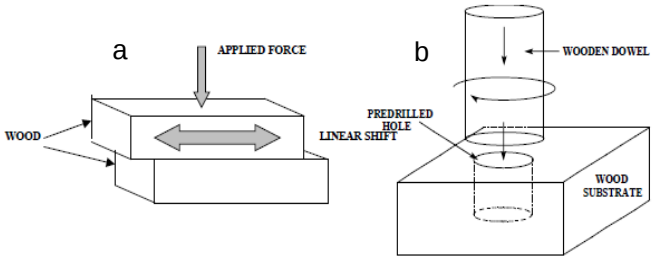
http://www.youtube.com/watch?v=51Zs8iaydt0

Základní princip svařování dřeva

• Svařovaní dřeva bylo vynalezeno na konci 20. století (kovy o 100 let dříve)
• Stále ještě dost neprozkoumáno, nicméně princip spočívá v roztavení polymerů dřeva (ligninu a hemicelulóz) pomocí vysoké teploty vyvolané třením svařovaných dílců
• Dřevní buňky se oddělí a jsou znovu stmeleny v nové matrici z roztavených polymerů, která posléze zatvrdne. Tímto se vytvoří pevný spoj mezi dvěma spojovanými povrchy.

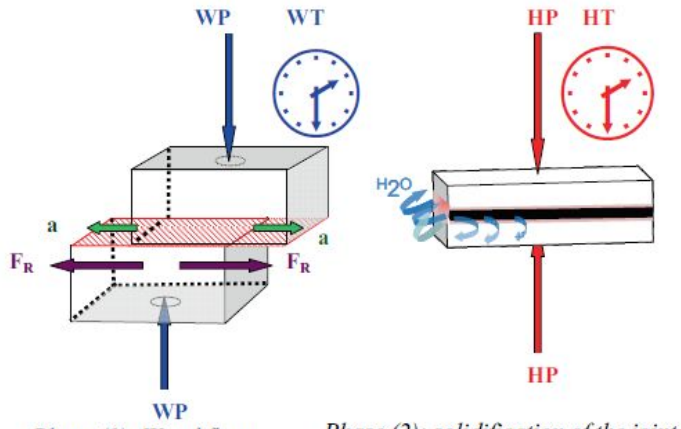
Základní princip svařování dřeva

• Svařovaní dřeva bylo vynalezeno na konci 20. století (kovy o 100 let dříve)
• Stále ještě dost neprozkoumáno, nicméně princip spočívá v roztavení polymerů dřeva (ligninu a hemicelulóz) pomocí vysoké teploty vyvolané třením svařovaných dílců
• Dřevní buňky se oddělí a jsou znovu stmeleny v nové matrici z roztavených polymerů, která posléze zatvrdne. Tímto se vytvoří pevný spoj mezi dvěma spojovanými povrchy.
• Rozlišují se dva základní způsoby svařování:
  a) lineární, vibrační (plošné)
  b) vysoko-otáčkové rotační (kolíkové svařování)



Základní princip svařování dřeva

Dvě základní fáze:



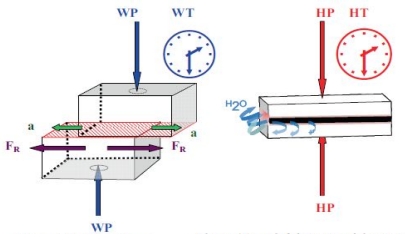
Phase (1): Wood flow *Phase (2): solidification of the joint*

Parametry svařování dřeva

• Základní typy pevnosti a vodě odolnost je často zkoumáná ve vztahu k základním parametrům svařování dřeva:

WP – svařovací tlak (MPa)
WT – čas svařování (s)
WF – svařovací frekvence (Hz)
L – délka oscilace (amplituda)

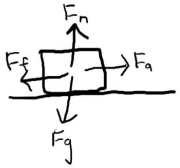
HP – tlak sevření (MPa)
HT – čas sevření (s)



• Co dále ovlivňuje proces svařování: druh dřeva, EMC, rozměry tělesa

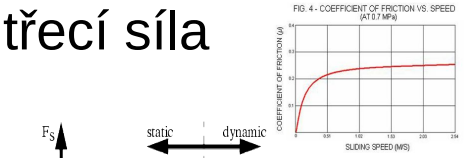
Smykové tření, třecí síla

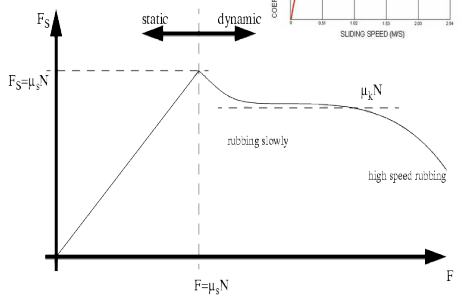
• Smykové tření
  - statické
  - dynamické



$$F_t = f\,F_n$$

f je součinitel smykového tření, Fn je kolmá tlaková síla

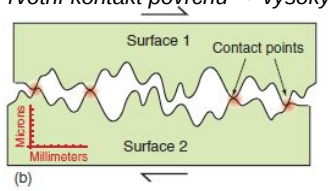




• *f pro různé kombinace se dřevem*

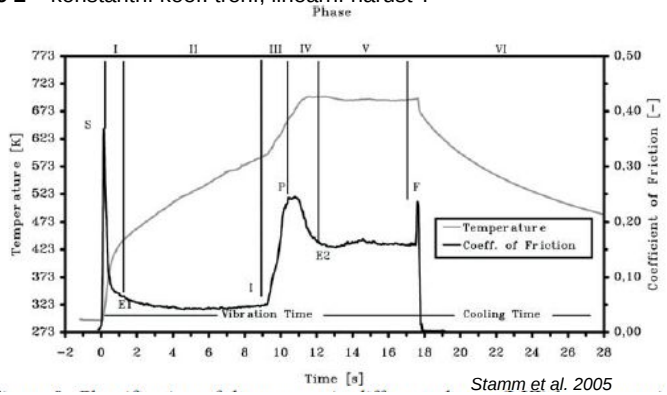
Wood Wood(clean) 0.25 - 0.5
Wood-Wood (Wet) 0.2
Wood-Metals(Clean) 0.2-0.6
Wood-Metals (Wet) 0.2
Wood-Brick 0.6
Wood-Concrete 0.62

Prvotní kontakt povrchů → vysoký f



Svařovací proces

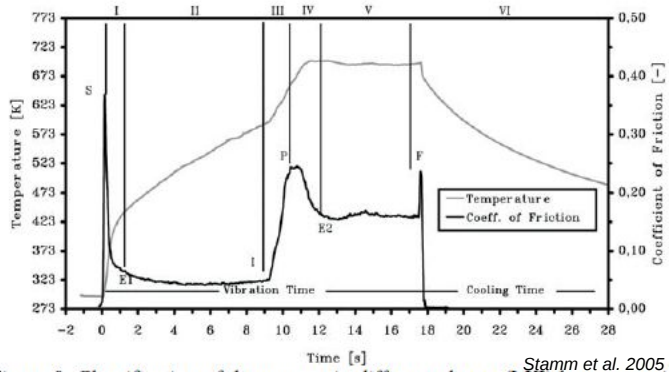
• **Fáze 1** – svařované kusy se k sobě přitlačí. Povrchy se o sebe začnou třít, protože jsou ještě poměrně drsné, zvyšuje se rychle teplota na cca 120 °C. Asi po 1 s již teplota tak neroste – vypařování vody, snížení koef. tření vyhlazením povrchů
• **Fáze 2** – konstantní koef. tření, lineární nárust T



Stamm et al. 2005

Svařovací proces

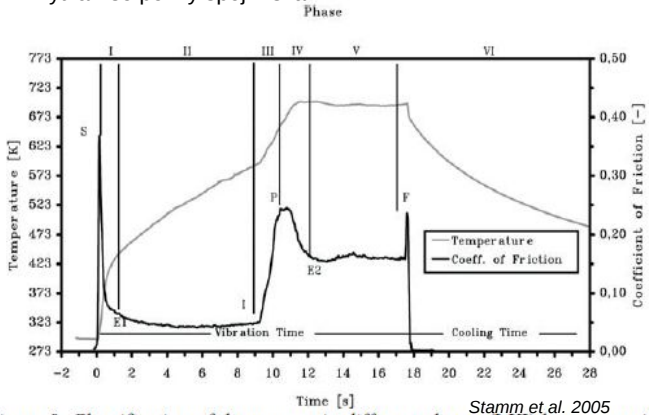
• **Fáze 3** – náhlý nárůst třecí síly (doprovázen vznikem kouře). Během této fáze se povrchy začínají rozkládat – roztavení intercelulární hmoty (zejména ligninu), T roste až na 320 °C
• **Fáze 4** – dosažení max. T (320-440 °C) vede k dosažení konstantní T a třecí síly



Stamm et al. 2005

Svařovací proces

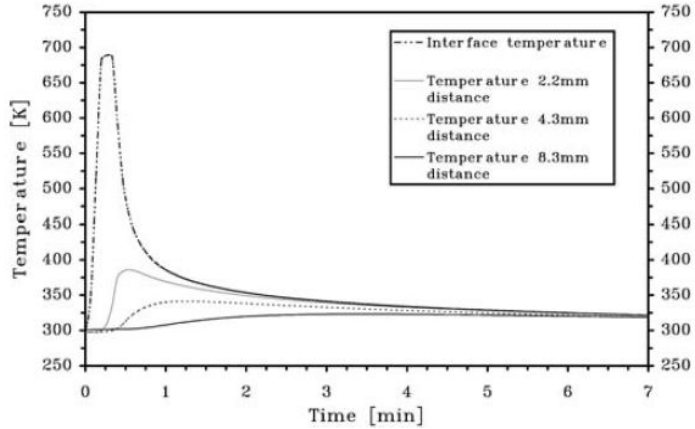
• **Fáze 5** – dosažení stavu rovnováhy síly a T. To je způsobeno rovnováhou mezi rychlým odpařováním a pyrolýzou, která může nastat mezi 300 a 500 °C
• **Fáze 6** – konec vibrací (Ft=0), T postupně klesá. Roztavaný materiál znovu tuhne --> vytváří se pevný spoj = svár



Stamm et al. 2005

Teplota sváru v čase

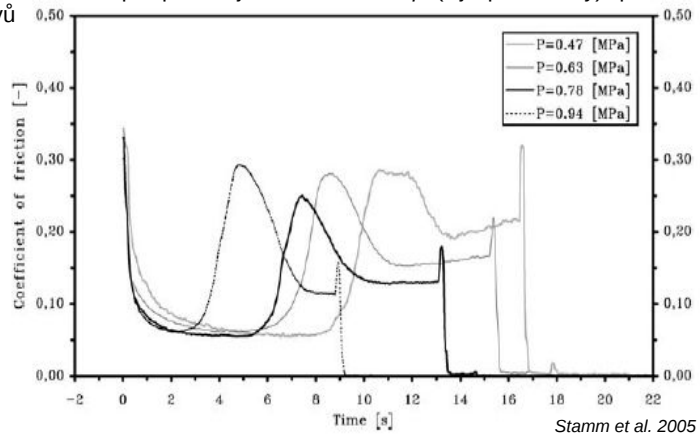
• Průběh teplot v různé vzdálenosti od svařované plochy
• Dřevo je dobrý izolant → 2,2 mm od sváru je T < 110 °C
• Teplo je koncentrované do sváru (manipulace), malé ztráty energie (úspornost)



Stamm et al. 2005

Vliv svařovacího tlaku na *f*

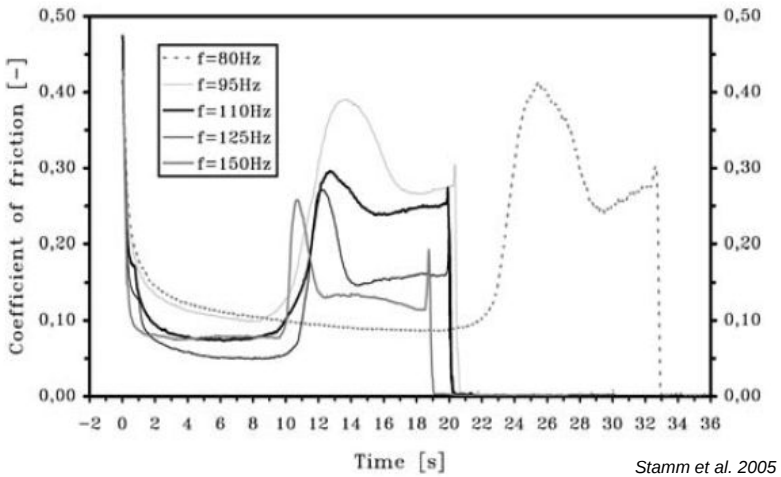
• Průbeh koef. tření v čase při různých svařovacích tlacích
• Čím větší svař. Tlak, tím nižší svařovací čas (např. tlak 0,31 MPa → nevyhovující pevnost spoje)
• Maximální teploty byly dosaženy při všech testech stejné (cca 430 °C) → pro nezbytné množství tepla potřebujeme určitou *f* a *p* (*t* je proměnlivý), podobně jako u kovů



Stamm et al. 2005

Vliv svařovací frekvence na *f*

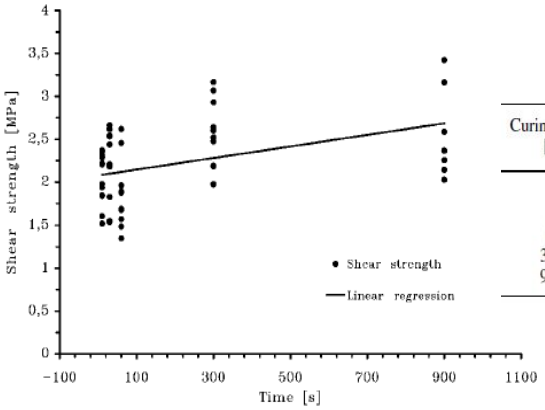
• Průběh *f* během svařování při různých frekvencích
• Ve fázi 2 až 5 je koef. tření vyšší čím nižší je frekvence.



Stamm et al. 2005

Mechanické vl. - smyková pevnost sváru

- Měření pevnosti po 10, 30, 60, 300 a 900 s po svaření
- Hned po svaření má spoj pevnost cca 2 MPa, po 15 min. vzroste na 2,6 MPa → po svaření **77 %** své pevnosti
- Průměrná maximalní pevnost pro buk byla 3,2 MPa, pro smrk 2,1 MPa

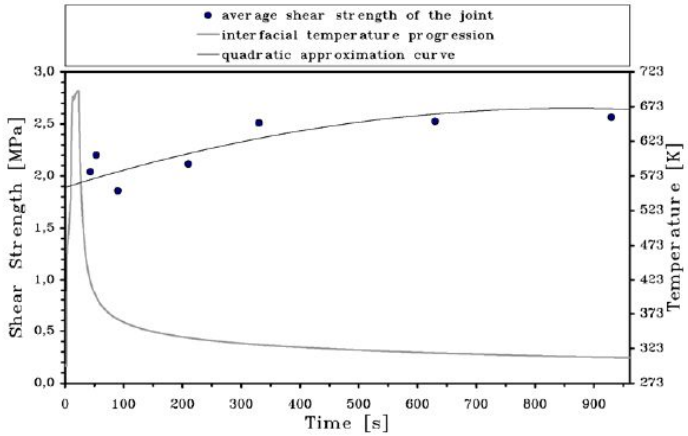


Curing Time [s]	Number of Specimens tested	Shear Strength [MPa]
10	10	2.04
30	10	2.21
60	10	1.86
300	10	2.51
900	10	2.57

Stamm et al. 2005

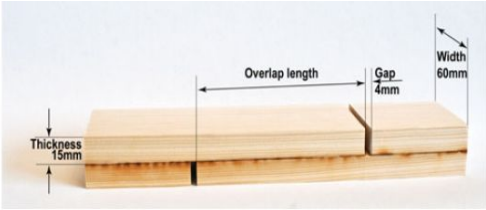
Mechanické vl. - smyková pevnost sváru

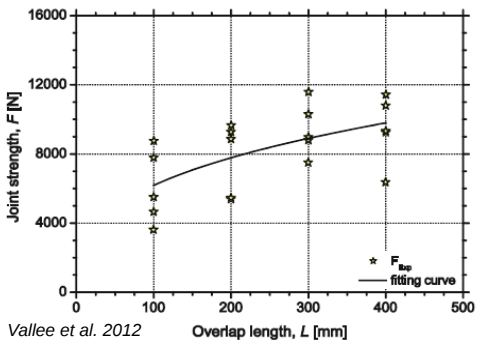
Smrk



Stamm et al. 2006

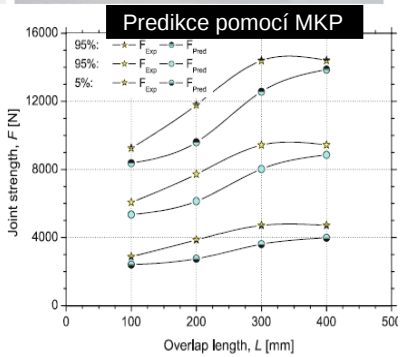
Vliv délky přesahu plošného spoje na jeho pevnost





Vallee et al. 2012

Predikce pomocí MKP



Vliv úhlu sváru na pevnost sváru

- Tělíska byla vyřezána tak, aby svár svíral různý úhel ke hraně tělíska, ale zůstal stejný vůči vláknům

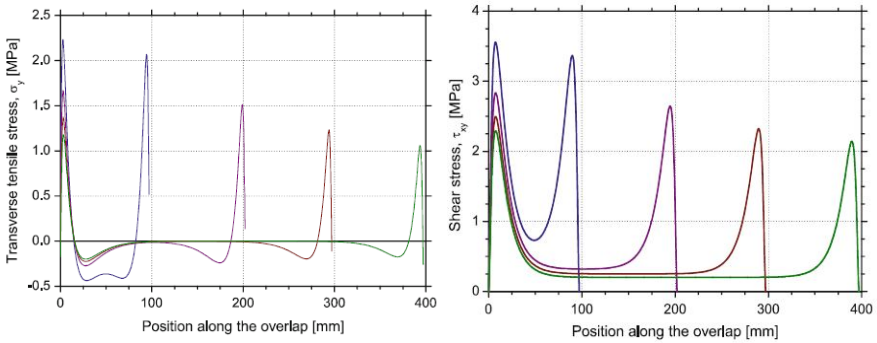
Off-axis angle α	0°	15°	30°	45°	60°
Number	60	49	55	49	48
Mean [MPa]	0.610	0.461	0.853	1.041	2.076
Variance	21%	38%	32%	44%	25%
Weibull modulus k	3.905	3.866	3.888	3.742	3.863
Characteristic stress σ_0	0.567	0.399	0.748	0.834	1.815

Vallee et al. 2012

Napětí ve sváru při různých přesazích

- Síla vyvozená na dané tělísko byla 10kN

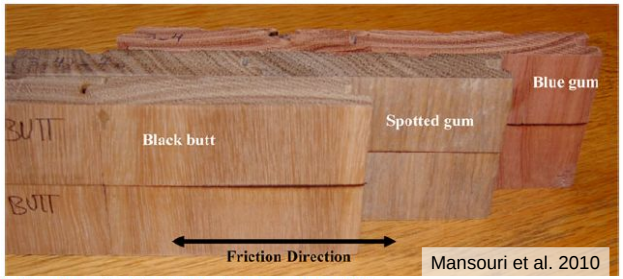
$$\sigma_X = \sigma_0 \cdot \cos^2\alpha \quad \sigma_Y = \sigma_0 \cdot \sin^2\alpha \quad \tau_{XY} = \sigma_0 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha$$



Vallee et al. 2012

Mechanické vlastnosti svárů z eukalyptu

- Svařovány byly tři vysokohusté druhy eukalyptu (800-900 kg/m3)
- 150 Hz, proměnlivý tlak 0,25, 0,75 MPa, svař. čas 4-6 s.



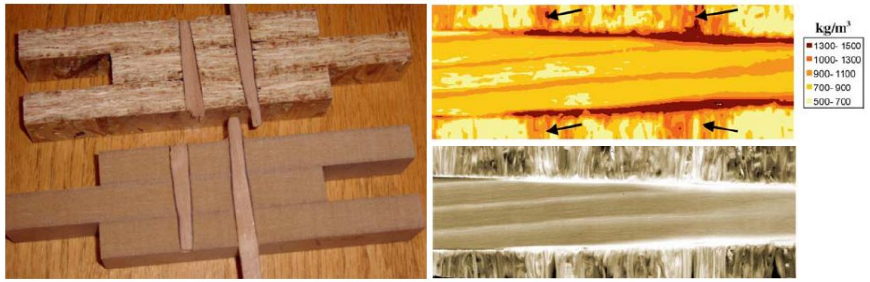
Mansouri et al. 2010

Table 1 Strength results of welded Australian eucalyptus joints

	Welding cycle			Average welded joint strength (MPa)
	Time (s)	Pressure (MPa)	Displacement (mm)	
Sidney blue gum	1/1/4	0.25/0.25/1.75	1/2/2	6.6 ± 0.4
Spotted gum	1/1/6	0.25/0.25/1.75	1/2/2	8.6 ± 0.5
Black butt	1/1/4	0.25/0.25/1.75	1/2/2	5.3 ± 0.4

Mechanické vlastnosti při svařování WBCs kolíky

- Svařit lze i dřevokompozity jako je MDF (UF), DTD (MUF), OSB a PDP (PF)
- Testováno: odolnost proti vytržení kolíku dle Eurocode 5 a tuhost spoje

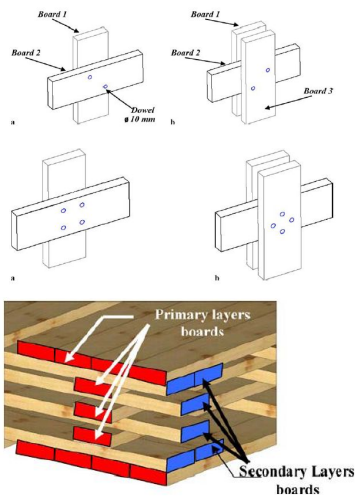


	Solid timber Beech	OSB	Particleboard	MDF	Plywood	OSB steel nailed
Dowel withdrawal Average strength (N)	9500	8800	8800	9000	7100	10500
Stiffness (N/mm)						
In charging	3300	5100	4000	4300	4800	3800
In discharging	3950	6600	5300	5650	6600	4950
In recharging	4200	7050	5800	6200	7100	5000

Resch et al. 2006

Využití svařování pro složitější konstrukce - podlaha

- Statický a dynamický test různých konfigurací konstrukce podlahy

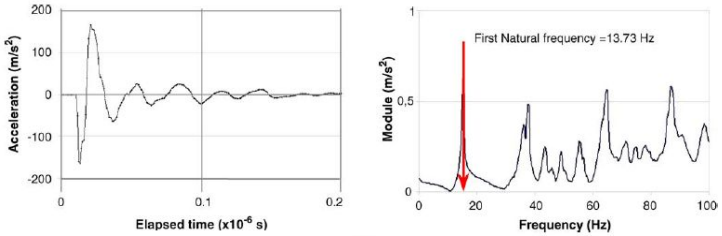


Sample	Assembly configuration	F_{max} (kN)	Displacement at F_{max} (mm)	Stiffness K by regression (kN/mm)
1		6.089	5.460	control for critical force
2		6.220	2.900	5.487
3	2 × 2 at 90°	7.420	2.500	4.464
4	(Fig. 1)	7.511	2.060	6.723
Average		*6.810*	*3.230*	*6.225*
5		8.837	2.940	7.131
6	2 × 4 at 60°	8.617	3.140	6.915
7		8.701	2.640	6.848
Average		*8.718*	*2.907*	*6.965*
8		15.520	3.020	8.872
9	2 × 4 at 90°	13.540	2.520	9.121
10	(Fig. 2)	13.850	2.640	9.213
Average		*13.763*	*3.230*	*9.069*
11 manual*		12.140	4740	7.010

- Úhel kolíku 90° má výšší pevnost
- Vhodný poměr průměrů kolík/díra je 8/10
- Optimální rychlost sváření byla stanovena na 2200 rpm

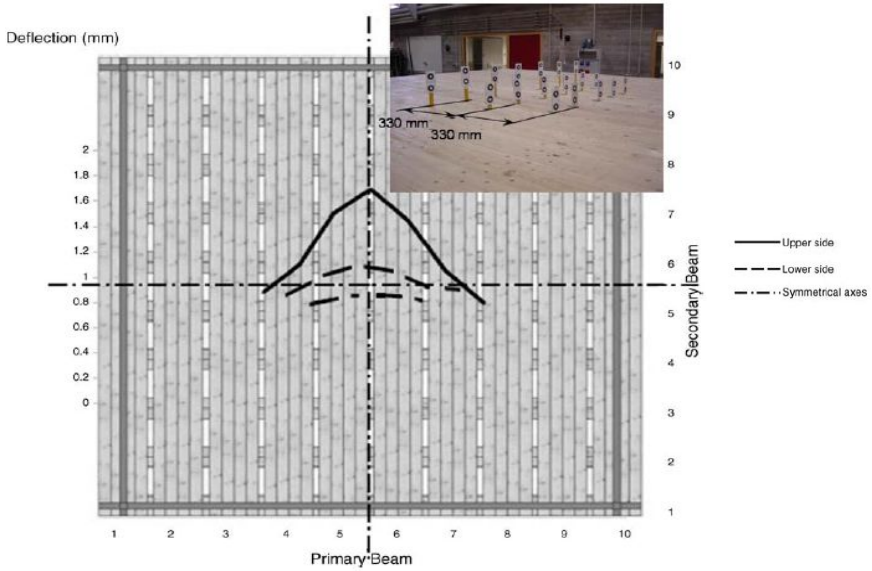
Bocquet et al. 2007

• První vlastní frekvence 13,7 Hz (o 5 Hz více než požaduje Eurokód 5)

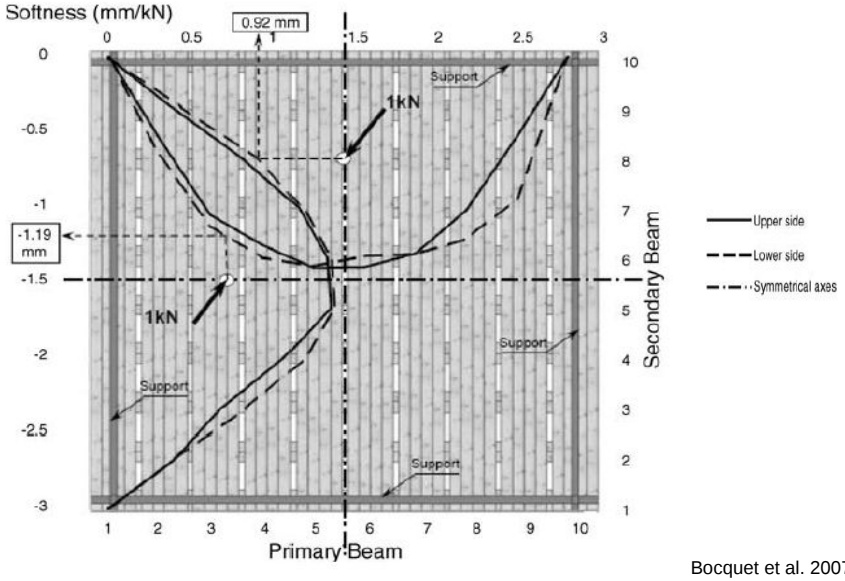


Bocquet et al. 2007

• Průhyb měřen opticky (trackování terčíků)



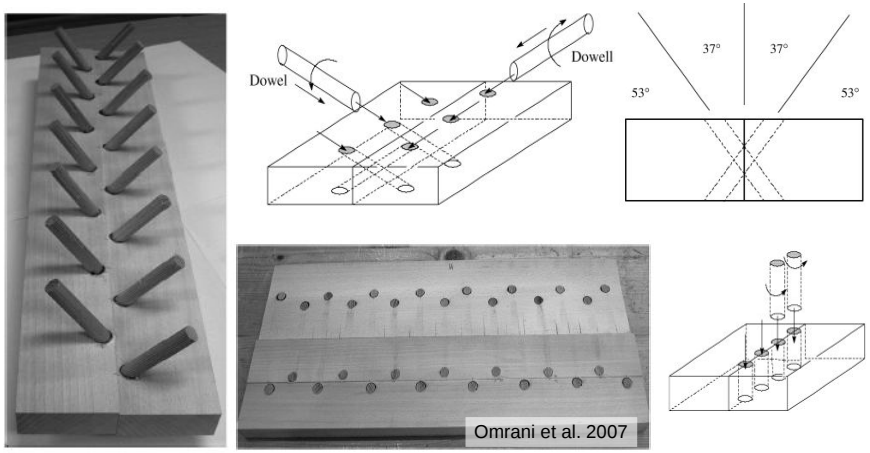
Bocquet et al. 2007



Bocquet et al. 2007

Zig-zag kolíkové spoje pro exteriér

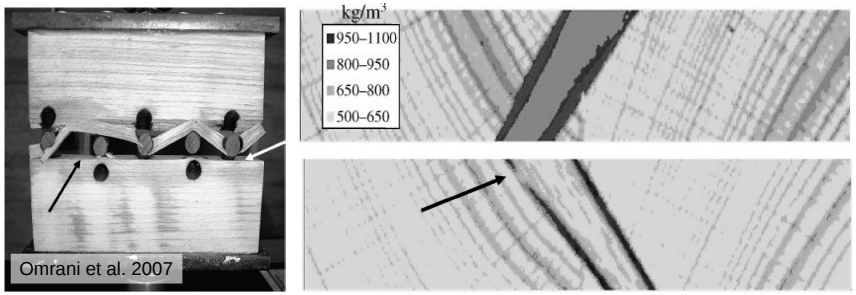
• Kolíkový spoj zig-zag charakteru byla testován za sucha, mokra (2 hodiny vaření) a vysušen po vaření. Dále byl porovnán s klasickým lepeným spojem (UF)
• Kolík o průměru 10 mm, 1600 rpm, svařovací doba 2-3 s



Omrani et al. 2007

Zig-zag kolíkové spoje pro exteriér

• Kolíkový spoj zig-zag charakteru byla testován za sucha, mokra (2 hodiny vaření) a vysušen po vaření. Dále byl porovnán s klasickým lepeným spojem (UF)
• Kolík o průměru 10 mm, f =1600 rpm, svařovací doba 2-3 s

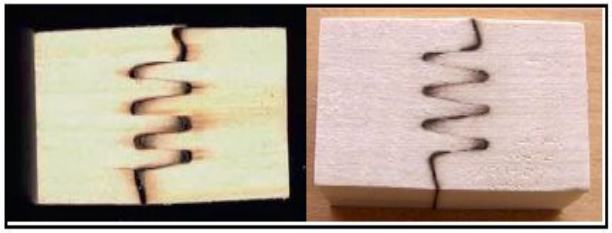


Omrani et al. 2007

	Tensile strength (MPa)	Stiffness (kN/mm)
UF-glued butt-joint control, dry	1.42 ± 0.11	10.08
UF-glued butt-joint control, 2 h boil	0.0	–
5 welded dowels butt joint, dry	0.77 ± 0.07	4.20
5 welded dowels butt joint, 2 h boil, tested wet	0.33 ± 0.01	1.60
5 welded dowels butt joint, 2 h boil, tested re-dried	0.37 ± 0.02	0.96

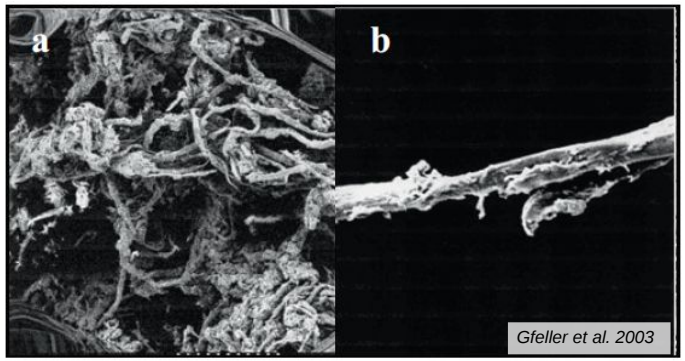
Finger joints

• Ganne-Chedeville (2006) testovali spoje fingerjoint z javoru (*Acer campestre*) a smrku (*Picea abies*).
• Zjistili, ze tyto spoje je težké svařovat z důvodu jejich křehkosti (tenké zuby). Proto vyvinuli spoj s tlustými ozuby, který svařit šel



A section of a welded finger joint of two samples of Norway spruce (left) and Maple (right). C. Ganne-Chedeville, (2006) [31].

Struktura sváru - SEM

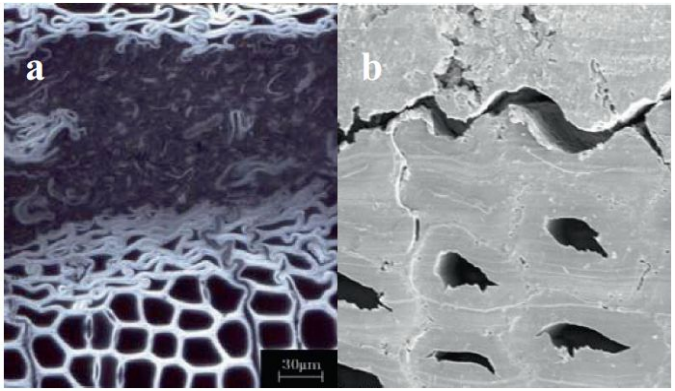


Gfeller et al. 2003

a) dlouhé buňky, vlákna (tracheidy) ponořené v roztaveném polymeru (mezibuněčná hmota a střední lamela)
b) vlákno ze sváru, je nepoškozené, na svém povrchu má roztavené kusy ligninu ze střední lamely

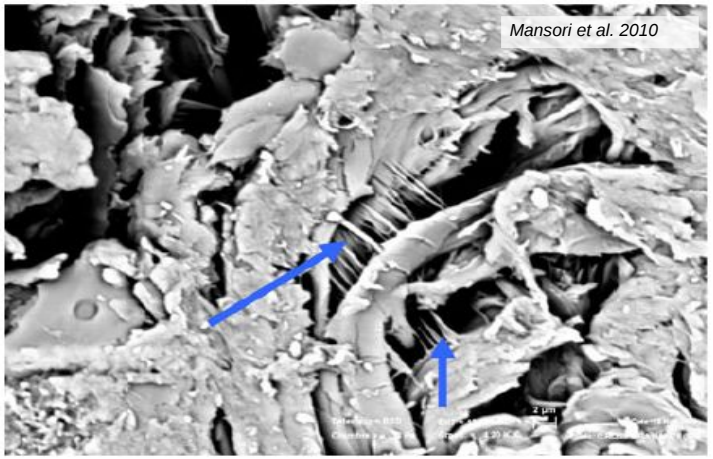
• Snímky potvrzují „kompozitní“ charakter sváru

Mikrostruktura sváru



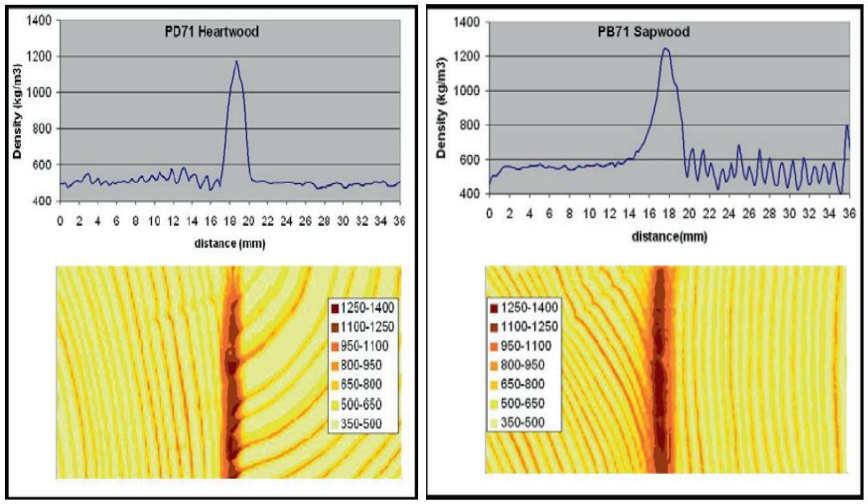
a) Mikroskopický snímek ukazující třecím teplem zasažené oblasti, v kterých proběhl kolaps buněk vlivem tlaku, vysoké T a smyku.
b) SEM snímek ukazující že tlustší buňky letního dřeva vykazují menší poškození

Mikrostruktura sváru



Šipky ukazují filamenta termoplastických reziduí (ligninu a hemicelulóz) z mezibuněčného materiálu, které se uchytají na jiná vlákna (4200x zvětšeno)

Hustota spoje – X-ray densitometrie

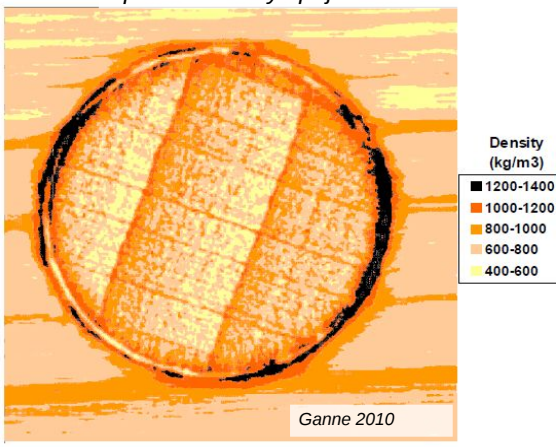


Hustota dřevní substance je cca 1440 kg/m3

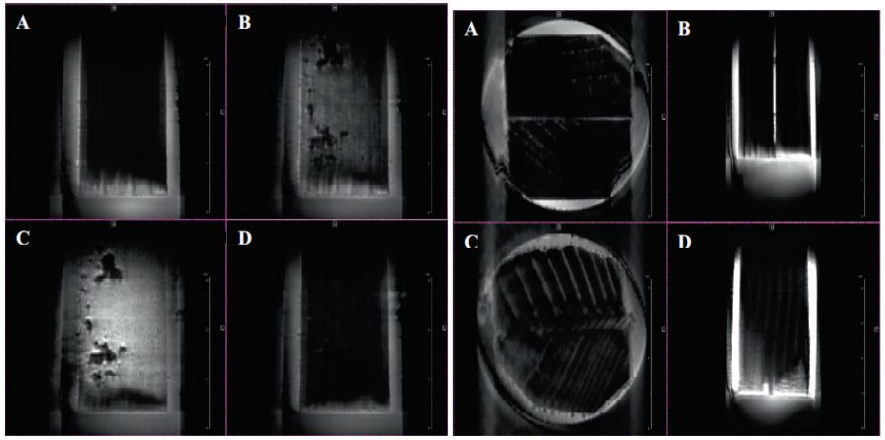
Vaziri 2010

Hustota spoje – X-ray microdensitometrie

Špatně svařený spoj



MRI svárů jako inspekce vlhkosti?



Vaziri 2010

Svářečka na plošné svařování

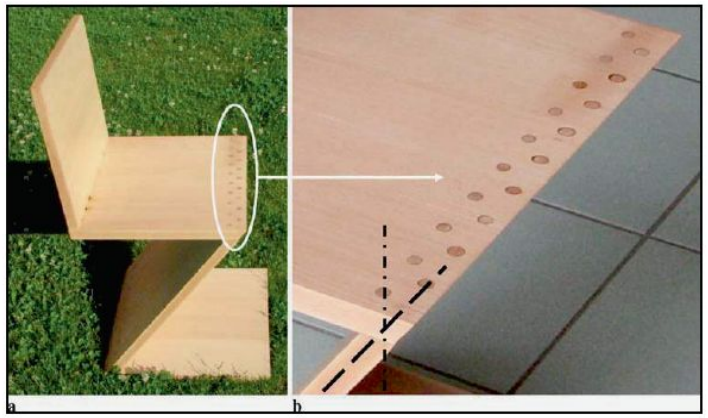
16 : linear vibration welding machine (LVW 2061 Mecasonic Annemasse, France), M.Vaziri et al. 2010 [46, paper II].

Svářečka na plošné svařování

Vznik kouře je běžná součást svařování dřeva (od 3. fáze svařování)

Židle Z

- T.A Renauld postavil minimalistickou židli Z, kterou navrhl Holandský architekt Gerrit T. Rietveld (1888-1964)
- Židle je postavena naprosto bez železných prvků nebo jiných dřevených podpěr



Renauld 2008

Svařování dřeva a zimní radovánky

- Ganne-Chedeville vytvořila pomocí svařování laminované dřevo – blok svařených desek, který by následně mohla použít v nějakém produktu – snowboardu
- Přes velké potíže (vlivem velkých rozměrů) podařilo topolový blok a následně i snowboard vytvořit (snowboard splňoval kritéria)

Ganne-Chedeville 2006

Svaření různých druhů dřev

- Střídání vrstev z různých dřevin je taky možné
- Na obrázku je smrk a buk

6.3x4.5x9.1 cm^3

Stamm et al. 2005

Cool video!

http://www.directindustry.com/prod/fischer-kunststoff-schweisstechnik/friction-welding-machines-for-wood-52910-485660.html

Závěr?

Výhody

- Svařování poskytuje pevný spoj jak pro plošné spoje, tak pro kolíkové
- Je možné spojovat i dřevokompozity
- Je možné spojovat různé dřeviny (evropské i tropické) i modifikovaná dřeva
- Rychlost spojení (tvrdnutí, nízká teplota spoje ihned po svaření)
- Nevyžaduje lepidla
- Ekologické i ekonomické (v porovnání s lepidly)
- Co dále? (brainstorming)
-

Nevýhody

- Sváry jsou velmi neodolné vodě → interiérové aplikace
- Sváry snižují estetiku spoje (narušují texturu)
- Nestandardizovaný spoj
- Je nutné jej systematicky prozkoumat (zatím ve fázi „objevné“)
- Plochy musí být rovnoběžné
- Je problém s velkými tělesy
-
-

Stamm et al. 2005

Použitá a doporučená literatura

•B. Stamm, Development of Friction Welding of Wood – Physical, Mechanical and Chemical Studies. PhD thesis, Ecole Fédérale de Lausanne, Switzerland (2006).
• C. Ganne-Chedeville, A. Pizzi, A. Thomas, J-F. Leban, J-F. Bocquet, A. Despres and H. R. Mansouri, Parameter interactions in two-block welding and the wood nail concept in wood dowel welding. J. Adhesion Sci. Technol.19,1157-1174 (2005).
•A. Pizzi, A. Despres, H. R. Mansouri, J-M. Leban and S. Rigolet, Wood joints by through-dowel rotation welding Microstructure, 13 C NMR and water resistance, J. Adhesion Sci. Technol. 20, 427-436 (2006).
•P. Omrani, J.-F. Bocquet, A. Pizzi, J-M. Leba and H. R. Mansouri, Zig-zag rotational dowel welding for exterior wood joints, J. Adhesion Sci. Technol. 21,923-933 (2007).
•P. Omrani, H. R. Mansouri and A. Pizzi, Water exposure durability of welded dowel joints, Holz. Roh. Werkstoff. 66, 161-162 (2008).
• G. Tondi, S. Andrews, A. Pizzi and J-M. Leban, Comparative potential of alternative wood welding systems, and microfriction stir welding, J. Adhesion Sci. Technol. 21, 1633–1643 (2007).
•http://www.engr.wisc.edu/groups/LAMSML/research.html

-
-

Svařování dřeva a voda

Gfeller et al. 2003 – dosahl pomoci linearniho svarovani pevnosti v tahu u buku 8-10 Mpa, pro smrk 2-5 Mpa. Téměř nulova pevnost spoje při nalhnuti → pouze vnitrni pouziti
Harms 2004 – pouzil pro testovani spoje rakouskou normu pro zkouseni oken [3hod ve vode o 20C, 3 hodiny v 60 C a 3 hodiny v 20C, pote kklimatizoval po 72 hodin na RH 65% a 20C], svary se rozpadly diky na bobtnani/sesychani, pevnost 0 MPa
Stamm 2005 – smykova pevnost po cyklech zmen vlhkostnich podminek byla v prumeru 20% → zaver byl nepouzivat svarene spoje ve venkovnich podminkach (ani pod strechou)
Wieland et al. 2005 – se snazil zjistit zda by do svaru nepomohlo pridat nejake prirodni latky.
Slunecnicovy olej na zvyseni vode-odolnosti [ve skutecnosti to bylo ještě horsi]
roztok polyflavonoidu Taninu z borovice [Pinus Radiata] pro zvyseni pevnosti spoje autokondenzaci taninu. Pridal pevnost spoje ve studene vode
polybutyl snizit oblast skelneho prechodu ligninu [nefungoval vubec] – cenna zkusenost aneb cimrmanova metoda slepych ulicek – vidime jak je to ve vede cenne!
Furfural (odpadovy produkt v zemedelstvi) jakozto agent zvysujici kondenzaci i podpurujici reakci s ligninem [pridal pevnost ve studene vode.]
Mansouri et al. 2008 zkoumali odolnost proti vlhkosti na linearne svarenych vzorcich z buku ponorenych ve studene vode [15C]. Vysledky ukazaly, ze kratka treci draha 2mm a vyssi frekvence 150 Hz a kratky svarovaci cas 1.5 s zvysil