

**Česká zemědělská univerzita v Praze**  
Fakulta lesnická a dřevařská  
Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Posouzení kvality modifikovaného adhesiva termosetickým  
polymerem pro lepené lamelové dřevo metodou stanovení  
podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání**

Diplomová práce

Autor: Bc. Josef Bárta

Vedoucí práce: Ing. Přemysl Šedivka, Ph.D.

2023

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Josef Bárta

Dřevařské inženýrství

Název práce

**Posouzení kvality modifikovaného adhesiva termosetickým polymerem pro lepené lamelové dřevo metodou stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání**

Název anglicky

**Assessment of the quality of a modified adhesive with a thermosetting polymer for load-bearing wooden structures by the method of determining the longitudinal tensile strength under tensile stress**

---

### Cíle práce

Hlavním cílem práce je posouzení kvality vybraných typů PUR adhesiv s modifikací termosetického polymeru pro aplikace lepeného lamelového dřeva. Pro posouzení bude použita zkušební metoda stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání. Požadavkem je charakterizovat vhodnost použití vybraných typů adhesiv pro lepení lamelového dřeva buku, dubu a trnovníku akátu.

### Metodika

V rámci literární rešerše dojde k rozboru oblasti teorie lepení a lepeného lamelového dřeva buku, dubu a trnovníku akátu. Na základě výsledků literární rešerše bude stanoven vhodný metodický postup stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání pro charakterizování pevnostních vlastností vybraných PUR adhesiv s použitou modifikací polymerního termosetu.

Květen – srpen 2022:

- Literární rešerše teorie lepení a aktuálního stavu lepení dřeva buku, dubu a trnovníku akátu.

Září – říjen 2022:

- Stanovení metodického postupu procesu testování.

Listopad 2022 – leden 2023:

- Příprava zkušebních těles a realizace zkoušek.

Únor – březen 2023:

- Statistické vyhodnocení výsledků z realizovaných zkoušek.

Duben 2023:

- Závěr

- Odevzdání závěrečné práce.

---

**Doporučený rozsah práce**

60 – 80 stran

**Klíčová slova**

Adhesivum; lamelové dřevo; modifikace; termosetický polymer

---

**Doporučené zdroje informací**

- Bockela, S., Mayera, I., Konnerth, J., Harlingd, S., Niemz, P., Swaboda, C., Beyer, M., Bieria, N. Weiland, G., Pichelin, F. (2019). The role of wood extractives in structural hardwood bonding and their influence on different adhesive systems. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 91. pp. 43 – 53
- Bockel, S., Mayer, I., Konnerth, J., Niemz, P., Swaboda, C., Beyer, M., Harling, S., Weiland, G., Bieri N. (2018). PichelinInfluence of wood extractives on two-component polyurethane adhesive for structural hardwood bonding. *The Journal of Adhesion*. pp. 1545 – 5823 DOI: 10.1080/00218464.2017.1389279
- Boublík, V. Lepidla a jejich příprava. II. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury Praha, 1966. pp. 1 – 192. ISBN 04-952-66
- Brockmann, W. Adhesive bonding: materials, applications and technology. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. ISBN 978-3-527-31898-8
- Dodiuk, H. Handbook of Thermoset plastics, Oxford: Elsevier Inc. 2022. pp. 1 – 1071. ISBN 978-0-12-821632-3
- Ducháček, V. Základní pojmy z chemie a technologie polymerů, jejich mezinárodní zkratky a obchodní názvy. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemickotechnologická, 1996. pp. 1 – 56. ISBN 80-7080-265-0
- Král, P., Klímek, P., Děcký, D. (2015). Comparison of the bond strength of oak (*Quercus L.*) and beech (*Fagus sylvatica L.*) wood glued with different adhesives considering various hydrothermal exposures. *Journal of Forest Science* 61, pp. 189 – 192. DOI: 10.17221/95/2014-JFS
- Kumar, S. (1994). Chemical modification of wood. *Wood and Fiber Science* 26, pp. 270 – 280
- Ohnesorge, D., Henning, M., Becker, G. (2009). Importance of hardwood in the glulam production. [Bedeutung von Laubholz bei der Brettschichtholzherstellung]. *Holztechnologie* 6. pp. 47 – 49
- Roger, M.R. (2006). Chemical modification of wood: A short review. *Wood Material Science and Engineering* 01. pp. 29 – 33. DOI: 10.1080/17480270600670923
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2022/23 LS – FLD

**Vedoucí práce**

Ing. Přemysl Šedivka, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 11. 7. 2022

**doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.**

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 31. 8. 2022

**prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.**

Děkan

V Praze dne 21. 03. 2023

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Posouzení kvality modifikovaného adhesiva termosetickým polymerem pro lepené lamelové dřevo metodou stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Přemysla Šedivky, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom zveřejnění diplomové práce a souhlasím s jejím zveřejněním dle platného zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 20.4.2023

.....

Josef Bárta

### **Poděkování**

Rád bych poděkoval panu Ing. Přemyslu Šedivkovi, Ph.D. za odborné vedení práce, dále všem pracujícím na Katedře zpracování dřeva a biomateriálů, kteří mi pomohli během zpracování akademické práce. Děkuji také za přístup k laboratořím a jejího vybavení. Za odbornou konzultaci při zpracování také děkuji technikovi panu Ing. Tomáši Holečkovi a také panu Ing. Adamovi Sikorovi, Ph.D.

## **Abstrakt**

Tato práce je zaměřená na praktické využití PUR adhesiv při lepení lamelového dřeva zejména pro listnaté druhy dřeviny. PUR adhesivum bylo modifikováno s termosety v určitém poměru, jako první typ kombinace lepení bylo prosté lepení adhesivem, dále bylo využito adhesiva s penetrací, adhesiva s penetrací a termosetickým polymerem. Úprava povrchu pro zlepšení lepení byla provedena broušením a hoblováním. Praktická část byla tvořena výrobou vzorků pro zkoušku pevnosti ve smyku pro dřeviny buku lesního (*Fagus sylvatica*), dubu letního (*Quercus robur*) a trnovníku akátu (*Robinia pseudoacacia*). Dále byla měřena drsnost a smáčení povrchu.

## **Klíčová slova**

lepená spára, termoset, polymer, polyuretan, smáčení, drsnost, smykové vlastnosti

**Abstract**

This academic work is focused on the practical use of PUR adhesives in gluing laminated timber, especially for deciduous species. The PUR adhesive was modified with thermosetting polymers in a certain ratio, the first type of gluing combination was simple adhesive bonding, in addition, adhesive with penetration, and adhesive with penetration and with thermosetting polymer were used. Surface treatment to improve bonding process was carried out by sanding and planing. The practical part consisted of the manufacturing samples for the shear strength for beech (*Fagus sylvatica*), oak (*Quercus petraea*) and black locust (*Robinia pseudoacacia*). Furthermore, the roughness and wetting of surface was measured.

**Keywords**

glued joint, thermoset, polymer, polyurethane, wetting, roughness, shear properties

# Obsah

Seznam zkratk	9
Seznam tabulek	10
Seznam obrázků	11
Seznam grafů	12
Seznam rovnic	13
1 Úvod	14
2 Cíl práce	15
3 Rozbor problematiky	16
3.1 Historie lepeného lamelového dřeva	17
3.2 Využití listnatých dřevin v produkci LLD	18
3.3 Použité dřeviny a jejich vliv na lepení	21
3.4 Teorie lepení	26
3.5 Měření drsnosti povrchu	33
3.6 Faktory ovlivňující kvalitu lepeného spoje	34
3.7 Lepené spoje	36
3.8 Porušení lepeného spoje	38
3.9 Diverzifikace adhesiv	39
3.10 Jednosložkový polyuretan na dřevěné konstrukční účely	43
3.11 Složky adhesiv	43
3.12 Termosety	45
3.13 Modifikace povrchu broušení a hoblováním	46
3.14 Výhody a nevýhody lepení	46
3.15 Shrnutí literární rešerše	47
4 Metodika práce	48
4.1 1. fáze výroby vzorků	48
4.2 2. fáze výroby vzorků	51
5 Výsledky a diskuze	56
6 Závěr	69
Použité zdroje	70
Seznam příloh	77



## **Seznam zkratk**

LLD: Lepené lamelové dřevo

GLT: Glued laminated timber

PUR: Polyuretan (Polyuretanové adhesivum)

PRF: fenol-recorcinol formaldehydové adhesivum

MUF: melamin-močovino formaldehydové adhesivum

EPI: emulsní polymer síťovaný izokyanáty

PF: Fenolformaldehydové adhesivum

UF: Močovinoformaldehydové adhesivum

MEF: Melaminformaldehydové adhesivum

RF: Rezorcinoformaldehydové adhesivum

ČSN EN: Československé normy, Evropské normy

ISO: International Organization for Standardization, Mezinárodní organizace pro standardizaci

CLT: Cross laminated timber

EOS: European Organisation of the Sawmill Industry – Evropská organizace pilařského průmyslu

EOTA: European Organization for Technical Approvals – Evropská organizace pro technické posuzování

KU: Kontaktní úhel

OWRK: Metoda Owens-Wend-Rabel-Kaeble

A: Adhesivum

PA: Penetrace, adhesivum

PTA: Penetrace, termoset, adhesivum

b.k.: bez kůry

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Změna rozměrů dřevin při 1 % změně vlhkosti (převzato z Uzelac Glavinic a kol. 2020) .....	21
Tabulka 2 Rozdělení adhesiv dle použité suroviny (převzato z Kytka 2019 a Haškovec 2015) .....	41
Tabulka 3 Typy a doba podmínek ošetření pro zkoušku pevnosti ve smyku (dle normy ČSN EN 302-1).....	55
Tabulka 4 Korelace pro soubor klimatizované, broušené vzorky (zdroj vlastní) .....	67
Tabulka 5 Výsledky měření pro klimatizované vzorky lepené pouze adhesivem (zdroj vlastní).....	68
Tabulka 6 Výsledky měření pro klimatizované vzorky lepené adhesivem s modifikací povrchu penetrací (zdroj vlastní) .....	78
Tabulka 7 Výsledky měření pro klimatizované vzorky lepené adhesivem s modifikací termosetem a úpravou povrchu penetrací (zdroj vlastní).....	79
Tabulka 8 Výsledky měření pro máčené vzorky lepené pouze adhesivem (zdroj vlastní).....	80
Tabulka 9 Výsledky měření pro máčené vzorky lepené adhesivem s modifikací povrchu penetrací (zdroj vlastní) .....	81
Tabulka 10 Výsledky měření pro máčené vzorky lepené adhesivem s modifikací termosetem a úpravou povrchu penetrací (zdroj vlastní).....	82
Tabulka 11 Korelace pro soubor klimatizované, hoblované vzorky (zdroj vlastní) ..	93
Tabulka 12 Korelace pro soubor máčené, broušené vzorky (zdroj vlastní).....	93
Tabulka 13 Korelace pro soubor máčené, hoblované vzorky (zdroj vlastní) .....	93

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Wood Innovation and Design Center, Prince George v Kanadě .....	17
Obrázek 2 Průřez stavbou Wood Innovation and Design Center .....	18
Obrázek 3 Pět hlavních producentů tvrdého dřeva v Evropě.....	19
Obrázek 4 Pět hlavních konzumentů tvrdého dřeva v Evropě.....	19
Obrázek 5 Dub – tangenciální řez.....	23
Obrázek 6 Mikroskopická stavba dubu 40x zvětšeno (zleva příčný řez, radiální řez a tangenciální řez).....	23
Obrázek 7 Trnovník akát – tangenciální řez .....	24
Obrázek 8 Mikroskopická stavba akátu 40x zvětšeno (zleva příčný řez, radiální řez a tangenciální řez).....	24
Obrázek 9 Buk – tangenciální řez .....	25
Obrázek 10 Mikroskopická stavba buku 40x zvětšeno (zleva příčný řez, radiální řez, tangenciální řez).....	25
Obrázek 11 Zóny poruch vazby .....	27
Obrázek 12 Mechanické zámky .....	28
Obrázek 13 Kontaktní úhel a mezifázové rozhraní.....	31
Obrázek 14 Parametr drsnosti Ra.....	33
Obrázek 15 Parametr drsnosti Rz.....	34
Obrázek 16 Parametr drsnosti Rsm.....	34
Obrázek 17 Typy porušení lepeného spoje .....	39
Obrázek 18 Form Talysurf 50.....	50
Obrázek 21 Označení měřícího zařízení .....	50
Obrázek 22 Přístroj na měření smáčení a ukázka použitých kapalin.....	51
Obrázek 23 Schéma zkušebního tělesa .....	53
Obrázek 24 Vzorová podoba zkušebního tělesa .....	53
Obrázek 25 Přístroj UTS 50.....	54

## Seznam grafů

Graf 1	Parametr drsnosti Ra máčených vzorků broušených .....	57
Graf 2	Parametr drsnosti Rz máčených vzorků broušených .....	58
Graf 3	Parametr drsnosti Rsm máčených vzorků broušených .....	59
Graf 4	Kontaktní úhel vody klimatizovaných vzorků broušených .....	60
Graf 5	Kontaktní úhel diiodmethanu klimatizovaných vzorků broušených .....	61
Graf 6	Povrchová energie klimatizovaných vzorků hoblovaných .....	62
Graf 7	Pevnost ve smyku klimatizovaných vzorků broušených .....	63
Graf 8	Pevnost ve smyku klimatizovaných vzorků hoblovaných .....	64
Graf 9	Pevnost ve smyku máčených vzorků broušených .....	65
Graf 10	Pevnost ve smyku máčených vzorků hoblovaných .....	66
Graf 8	Parametr drsnosti Ra klimatizovaných vzorků broušených .....	83
Graf 10	Parametr drsnosti Rz klimatizovaných vzorků broušených .....	83
Graf 9	Parametr drsnosti Rsm klimatizovaných vzorků broušených .....	84
Graf 13	Povrchová energie klimatizovaných vzorků broušených .....	84
Graf 14	Parametr drsnosti Ra klimatizovaných vzorků hoblovaných .....	85
Graf 16	Parametr drsnosti Rz klimatizovaných vzorků hoblovaných .....	85
Graf 15	Parametr drsnosti Rsm klimatizovaných vzorků hoblovaných .....	86
Graf 17	Kontaktní úhel diiodmethanu klimatizovaných vzorků hoblovaných .....	86
Graf 18	Kontaktní úhel vody klimatizovaných vzorků hoblovaných .....	87
Graf 20	Kontaktní úhel diiodmethanu máčených vzorků broušených .....	88
Graf 21	Kontaktní úhel vody máčených vzorků broušených .....	88
Graf 22	Povrchová energie máčených vzorků broušených .....	89
Graf 23	Parametr drsnosti Ra máčených vzorků hoblovaných .....	90
Graf 25	Parametr drsnosti Rz máčených vzorků hoblovaných .....	90
Graf 24	Parametr drsnosti Rsm máčených vzorků hoblovaných .....	91
Graf 26	Kontaktní úhel diiodmethanu máčených vzorků hoblovaných .....	91
Graf 27	Kontaktní úhel vody máčených vzorků hoblovaných .....	92
Graf 28	Povrchová energie máčených vzorků hoblovaných .....	92

## Seznam rovnic

Rovnice 1 Vzorec kontaktního úhlu kapalin k pevným látkám .....	30
Rovnice 2 Povrchové napětí pevné látky .....	31
Rovnice 3 Odvození povrchové napětí povrchu 1 .....	32
Rovnice 4 Odvození povrchového napětí povrchu 2 .....	32
Rovnice 5 Výpočet povrchového napětí povrchu podle metody OWRK .....	32
Rovnice 6 Výpočet pevnosti ve smyku .....	54

# 1 Úvod

Lepení lamelového dřeva z listnatých dřevin by mohlo být odpovědí na poptávku trhu po nových konstrukčních výrobcích. V případě této akademické práce jde především o zkoumání lepení dubového řeziva do konstrukčních celků lepeného lamelového dřeva LLD (nebo GLT) a jeho porovnání s dalšími dřevinami, a to buku a trnovníku akátu. Prostý dřevěný nosník se vyznačuje řadou odlišných mechanických vlastností, naopak lepené lamelové dřevo by mělo zajišťovat standardní mechanické vlastnosti produktu. To je například jedna z výhod lepeného lamelového dřeva, a proto dochází k značnému využití tohoto konstrukčního prvku v průmyslu.

Do dnešní doby bylo používáno zejména jehličnaté řezivo pro lepené lamelové dřevo. Při posuzování budoucích požadavků pro tyto účely se jedná také o používání i jiných dřevin než pouze jehličnatých. V dnešní době vzrůstá zájem o technologické využití listnatých dřevin pro použití konstrukčních celků, zájem podporují vznikající studie, zabývající se využití listnatých dřevin rostoucích v Evropě. Tato akademická práce posuzuje vlastnosti lepení a snaží se najít zlepšení kvality lepeného spoje pro podporu využívání listnatých dřevin pro konstrukční účely (Uzelac Glavinić a kol. 2020).

V rámci této akademické práce došlo k otestování různých modifikací povrchu broušením a hoblováním pro lepení lamelového dřeva z listnatých druhů dřevin a k posouzení, která z nich vykazuje nejvýhodnější pevnostní charakteristiky. Dále se analyzovalo lepení pouze adhesivem, které sloužilo jako referenční typ lepení, další varianta bylo lepení adhesivem s chemickou úpravou povrchu hloubkovou penetrací a jako poslední bylo lepení adhesivem s přidáním termosetického polymeru a s chemickou úpravou povrchu hloubkovou penetrací.

## **2 Cíl práce**

Cílem práce je posouzení kvality lepeného spoje metodou pevnosti ve smyku při tahovém namáhání při použití PUR adhesiva a jeho modifikace termosetickým polymerem s kombinací úpravy povrchu adherendu broušením a hoblováním pro dřevo buku, dubu a trnovníku akátu.

K posouzení kvality lepeného spoje je dále stanovena drsnost povrchu, kontaktní úhly smáčení dvou druhů kapalin a povrchová energie. Dílčím cílem je charakteristika vhodnosti použití zvoleného typu adhesiva a jeho modifikace polymerním termosetem pro lepení lamelového dřeva buku, dubu a trnovníku akátu.

### 3 Rozbor problematiky

Popularita lepení lamelového dřeva (dále jen LLD) z listnatých dřevin roste. Ačkoliv se stále ve stavebnictví velmi používá beton a ocel, dřevo začíná být znovu velmi atraktivní alternativou. A to především z důvodů ekologických, estetických ad. Využití listnatých dřevin pro výrobu LLD je způsobeno z důvodu zvyšujících se cen jehličnatých dřevin. Proto je zde příležitost a snaha znovu začlenění listnatých dřevin jako suroviny pro výrobu konstrukčních a dalších produktů. Podle Národní inventarizace lesů z období 2016–2020 je zásoba jehličnatých dřevin odhadem 608,9 ± 13,4 mil. m<sup>3</sup> b.k. a zásoba listnatých dřevin je odhadem 254,1 ± 7,7 mil. m<sup>3</sup> b.k., mezi významnější zásobu listnatých dřevin patří právě buk (9,5 %) a dub (6,8 %). Tato čísla by mohla mít značný potenciál pro použití těchto dřevin jako suroviny pro další využití. Použití listnatého řeziva pro lepení LLD má několik důvodů:

- a) klimatické změny mají vliv na změnu druhové skladby lesů s cílem dosáhnout vyšší biodiverzity s uplatněním většího podílu listnatých druhů dřevin
- b) vybrané druhy listnatých dřevin mají v porovnání k jehličnatým zajímavou kresbu
- c) v důsledku zvýšené poptávky roste cena jehličnatého dřeva (Máslo a kol. 2023; Aicher a Stapf 2013)

Na rozdíl od prvků z rostlého dřeva je LLD zbaveno vad, které by snižovaly mechanické vlastnosti produktu. Kombinací výhod dřeva, jakožto přírodního materiálu a vhodně zvolené výrobě LLD lze vytvořit velmi kvalitní produkt. Aktuální norma pro lepení lamelového dřeva je ČSN EN 14080. Zároveň LLD umožňuje architektům a projektantům vytvářet větší rozpětí rovných, zakřivených a prostorových konstrukcí s vlastní nízkou váhou (Glavinic a kol. 2020).

Všechny tyto faktory tedy předurčují prosperitu vývoje zkoumání lepeného lamelového dřeva z listnatých dřevin dostupných v Evropských lesích, jak dokazují i články zabývající se touto problematikou v posledních letech. Je tedy důležité věnovat této oblasti dále pozornost.



### 3.1 Historie lepeného lamelového dřeva

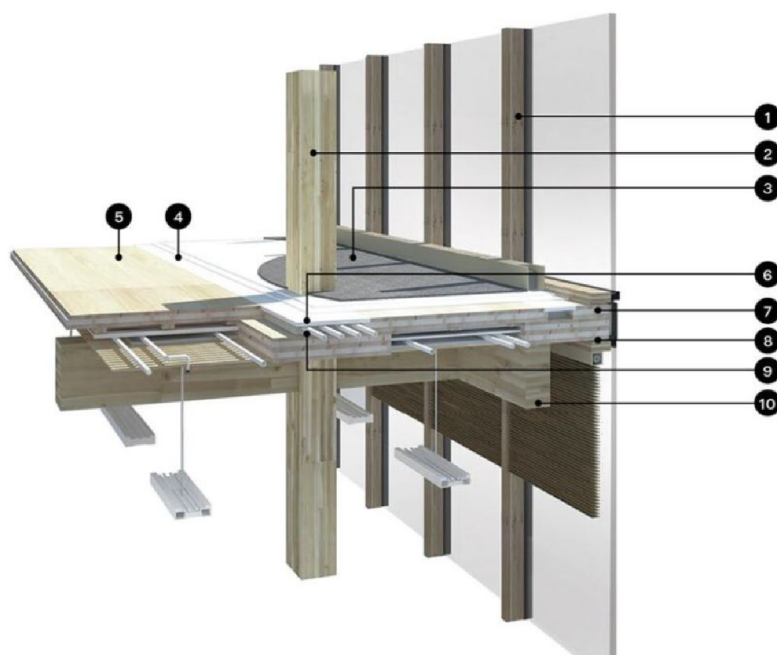
Rané stavby používající LLD na nosnou konstrukci se datují až do 19. století. První patent, který je vztahován k lepenému lamelovému dřevu patří švýcarskému truhláři Ottu Helzerovi. Ten ho získal roku 1906 ve Wiemaru. Patent byl pro výrobu lepeného lamelového dřeva, a tak byl nakonec i průmyslově využíván. Konstrukční prvek byl složen ze dvou či více vrstev a celý prvek byl zakřiven. Do severní Ameriky tuto technologii přináší Max Hanisch roku 1934, který byl bývalý zaměstnanec Otto Helzera. Důležité pro výrobu LLD byl rok 1942, tento rok byl důležitý proto, že díky používání fenol-resorcinového voděodolného adhesiva, mohlo být LLD používáno i v exteriéru, a to odstartovalo rozšíření do celého světa. Velký přelom používání je datován na pomezí 70. a 80. let 20. století. Od této doby jeho používání stále roste (Melzerová 2019).

Doklady používání LLD jsou známé stavby, například Wood Innovation and Design Center v Kanadě, Princeton Bridge v Kanadě, Sportovní centrum ve Švýcarsku, Crystal Bridges Museum of American Art ve Spojených státech amerických (Baldwin 2022).



Obrázek 1 Wood Innovation and Design Center, Prince George v Kanadě

*Zdroj: Hooper 2015*



**Obrázek 2 Průřez stavbou Wood Innovation and Design Center**

*Zdroj: podle Hooper 2015*

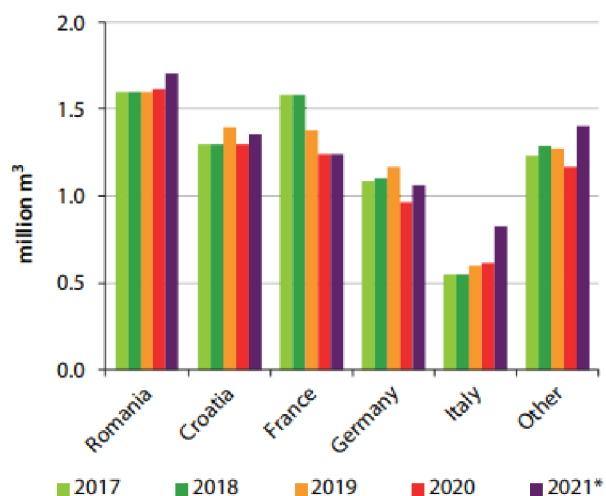
Popis obrázku č. 2:

- 1 je lepené vrstvené dřevo
- 2 a 10 jsou LLD
- 5 je třívrstvý CLT panel
- 6 je překližka
- 7 a 8 znovu CLT panel
- 3,4 a 9 jsou nedřevěné prvky v podobě koberce, izolací ad.

### **3.2 Využití listnatých dřevin v produkci LLD**

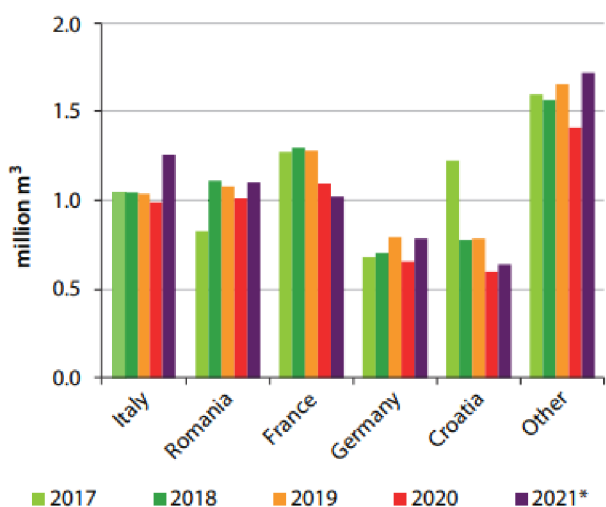
Jedny z posledních dat ukazují, že kvůli covidové krizi lze pozorovat snížení produkce a spotřeby listnatého dřeva v Evropě v řádech několik procent pro rok 2020. Zejména pro Francii a Německo. Nicméně další rok, 2021 se trh s listnatým dřevem začal vzpamatovávat z krize a produkce i spotřeba začala opět narůstat. Pro rok 2021 se produkce pro členy EOS zvýšila o 11 %. Tato data dávají předpoklad k tomu, že se

v blízké budoucnosti budou listnaté dřeviny v Evropě více využívat pro výrobu v průmyslu (UNECE průzkum 2021-2022, UNECE průzkum 2020-2021).



**Obrázek 3** Pět hlavních producentů tvrdého dřeva v Evropě

*Zdroj: UNECE průzkum 2021-2022*



**Obrázek 4** Pět hlavních konzumentů tvrdého dřeva v Evropě

*Zdroj: UNECE průzkum 2021-2022*

Pro obrázek 3 a 4 platí odkazová \* jako odhad pro rok 2021.

LLD s anglickou zkratkou GLT je produkt, který využívá kombinaci výhod dřevěného přírodního materiálu a řízenou průmyslovou výrobu stavebních produktů

ve formě GLT. Tento konstrukční prvek má výhodu například i v tom, že dovoluje designerům navrhovat větší rozpony plochých, zakřivených a prostorových konstrukcí s nízkou hmotností, jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole. Aktuálně se na severní polokouli nejvíce využívají jehličnany pro výrobu GLT. Zároveň v dnešní Evropě dochází ke změně klimatu a tím se zvyšuje podíl listnatých dřevin v evropských lesích. Za poslední dobu tedy roste i počet studií zaměřujících se na využití zvyšujícího se podílu listnatých dřevin, které rostou v Evropě. Výhoda listnatých dřevin obecně k jehličnatým dřevinám je ta, že mají lepší jak mechanické vlastnosti, tak i trvanlivost, požární odolnost a estetické vlastnosti (Uzelac Glavinić a kol. 2020, Aicher a kol. 2013).

V Evropě se na výrobu GLT používá z 90 % smrk a jedle a zbylé dřeviny které se nejčastěji využívají jsou borovice, modřín a douglaska. Zájem ale je nyní o lepší mechanické vlastnosti, které mohou nabídnou listnaté dřeviny jako buk, dub, kaštan či jasan. Problém je zatím ale v tom, že je nedostatek informací o tom, jak by se tyto dřeviny měly efektivně použít pro výrobu GLT. Proto je důležité snažit se vyvíjet nové technologie lepení pro dřeviny, ke kterým stále chybí přesně technologické postupy. Pro aktuální lepení listnatých dřevin se používá fenol-recorcinol formaldehydové adhesivum (PRF), melamin-močovino formaldehydové adhesivum (MUF), emulsní polymer síťovaný izokyanáty (EPI) a polyuretanová adhesiva (PUR). Použití bukové dřeva má svá úskalí, a to je například to, že bukové dřevo má poměrně vysokou rozměrovou nestabilitu vlivem bobtnání viz tabulka 1. Zvláštní pozornost si ovšem zaslouží lepení listnatých dřevin, a to proto, že s velkým množstvím adhesiv, které se používají pro lepení jehličnanů, se nedosahuje tak kvalitního lepeného spoje jako u listnatých dřevin. Z mnoha faktorů, které ovlivňují pevnost lepeného spoje, jsou u listnatých dřevin, hustota, kyselost povrchu a často vysoké zastoupení taninů (Uzelac Glavinić a kol. 2020).

**Tabulka 1 Změna rozměrů dřevin při 1 % změně vlhkosti (převzato z Uzelac Glavinić a kol. 2020)**

Druh dřeviny	Změna rozměru při 1 % změně vlhkosti [%]		
	Radiální plocha	Tangenciální plocha	Průměr
<b>Smrk</b>	0,16	0,32	0,24
<b>Dub</b>	0,16	0,32	0,24
<b>Buk</b>	0,20	0,40	0,30

Jedno z využití listnatých dřevin je například při výrobě hybridních lepených lamelových prvků v kombinaci listnatého a jehličnatého dřeva. Většinou se jehličnaté dřevo používá pro vnitřní vrstvy konstrukčního prvku a pro vnější vrstvy se používá listnaté dřevo, které má lepší mechanické vlastnosti, a to proto, že ve vrchních vrstvách nosníku dochází k limitním namáháním. Také bylo zjištěno, že při použití MUF adhesiv a při zvýšení lisovacího času ze 45 na 75 minut, se snížilo procento delaminace konstrukčního prvku o 5 %. Zkoumání lisovacího času by mohlo být také předmětem dalšího výzkumu. Důležité je také zmínit to, že některé státy z Evropy již schválily použití listnatých dřevin ve výrobě LLD (GLT), dokonce i EOTA předběžně schválila některé výrobky LLD z listnatého dřeva a použití adhesiv pro výrobu na které se nevztahují evropské normy (Uzelac Glavinić a kol. 2020).

### 3.3 Použité dřeviny a jejich vliv na lepení

V této práci byly použity tyto dřeviny: Dub letní (*Quercus robur*), buk lesní (*Fagus sylvatica*) a trnovník akát (*Robinia pseudoacacia*). Dub letní byl vybrán v rámci projektu, bylo zadáno zkoumat lepení této dřeviny pro použití v lepených konstrukčních prvcích. Trnovník akát byl vybrán jako další zástupce kruhovitě pórovité dřeviny k porovnání k dubu letnímu. A buk lesní byl vybrán jakožto referenční dřevina, která je průmyslově často využívána vzhledem k zastoupení mezi listnatými dřevinami v České republice.

Mezi nejdůležitější parametry ovlivňující kvalitu lepeného spoje patří: druh dřeviny, hustota, vlastnosti chemické a anatomické, fyzikální a pevnostní vlastnosti, opracování povrchu ovlivňující její drsnost, orientace vláken, vlhkost, ošetření

biocidními látkami a dalšími přísadami. Dále kvalitu lepeného spoje ovlivňuje chemická struktura adhesiva, viskozita, povrchové napětí a mechanismus vytvrzování. Jako poslední se zde nachází i parametry lepení, jako je například tlak, čas a teplota. Elementárními faktory ovlivňujícími lepší přilnavost adhesiva k povrchu adherendu, a tedy často i lepší kvalitu lepeného spoje jsou nízká hustota, vysoká propustnost a vysoká drsnost povrchu (Iždinský a kol. 2021, Bockel a kol. 2018).

Anatomie dřeva a způsob opracování povrchu ovlivňuje drsnost povrchu. Posuzování drsnosti povrchu je ale důležité i z hlediska následné určení způsobu úpravy povrchu, které by mělo vést k lepší kvalitě lepeného spoje. Chemické složení dřeva ovlivňuje kvalitu lepeného spoje, je to způsobeno zastoupením hydroxylových, karbonylových a karboxylových skupiny v lignin-polysacharidové matici dřeva buněčných stěn. Vysoká polarita a dobrá smáčivost dřevěného adherendu je dána zastoupením těchto skupin, ty zároveň tvoří silné fyzikální vazby s různými polárními adhesivy. Tedy povrch dřeva, který má vyšší polaritu smáčí lépe adhesiva na bázi vody, a to má za následek vyšší penetraci adhesiva skrz lumen buněčných prvků na povrchu adherendu. Extraktiva a další látky, které mohou být přidány, mají zásadní vliv na proces lepení. Negativně či pozitivně mohou ovlivnit smáčení povrchu, stabilitu adhesního systému a kvalitu výsledného lepeného spoje. Polární a nepolární extraktivní látky ovlivňují proces lepení především pro to, že ovlivňují pH povrchu, zejména kyselost a také smáčení povrchu ve smyslu kontaktního úhlu či povrchové energie. Dále tyto látky také ovlivňují propustnost povrchu a to tím, že mohou zamezovat prostupu látek lumeny svou přítomností (Iždinský a kol. 2021, Bockel a kol. 2019).

Složení dřeva lze rozdělit na makroskopickou stavbu dřeva, mikroskopickou stavbu dřeva a submikroskopickou stavbu dřeva. Rozdíly ve stavbě dřeva ovlivňují také po opracování povrchu vlastnosti povrchu. Tyto rozdílné vlastnosti povrchu následně ovlivňují drsnost a smáčení adherendu, což má za následek různou kvalitou lepeného spoje.

## **Dub**

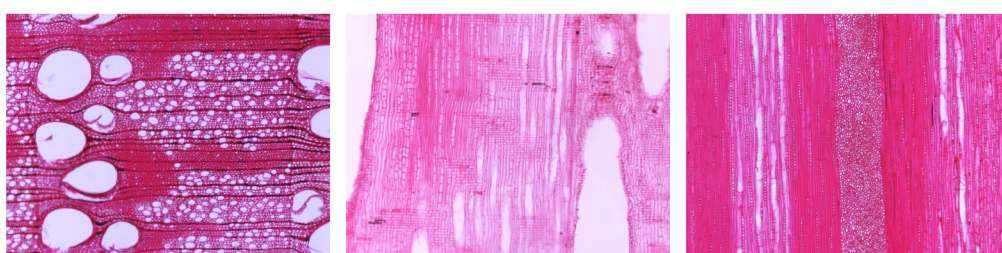
Dub je kruhovitě pórovitá dřevina, řadící se mezi listnaté dřeviny. Jeho důležitost dokládá procentuální zastoupení v produkci listnatých dřevin, kde se řadí na

druhé místo za buk, jak již bylo zmíněno na začátku rozboru problematiky. Jde tedy o důležitou dřevinu z hlediska jejího využití. Jeho vizuál je možno vidět na následujícím obrázku č. 5.



**Obrázek 5 Dub – tangenciální řez**

*Zdroj: www.patricny.com*



**Obrázek 6 Mikroskopická stavba dubu 40x zvětšeno (zleva příčný řez, radiální řez a tangenciální řez)**

*Zdroj: Zeidler a Böhm 2007*

Příčný řez na obrázku č. 6 obsahuje mikrocévy, makrocévy, libriformní vlákna a dřevové paprsky. Na radiálním řezu je možno vidět libriformní vlákna, lumeny makrocév a dřevový paprsek. Na posledním, tangenciálním řezu lze pozorovat lumen cév, libriformní vlákna, dřevové paprsky mnohvrstevný či jednovrstevný. Dub má perforace pouze jednoduché (Zeidler a Böhm 2007).

## Trnovník akát

Trnovník akát patří také mezi listnaté, kruhovitě pórovité dřeviny, stejně jako dub. Právě proto bylo dřevo akátu vybráno jako vhodný zástupce k porovnání se dřevem dubu. Pro střední Evropu má tato dřevina vhodné vlastnosti například z hlediska rychlého růstu, vysoké hustoty. Akát je vhodný pro zpracování na vlákninu či dřevovinu. Avšak z hlediska původu se jedná o invazivní dřevinu. Jak vypadá dřevo akátu lze pozorovat na následujícím obrázku č. 7 (Kuneš a kol. 2019).



**Obrázek 7** Trnovník akát – tangenciální řez

*Zdroj: [www.patricny.com](http://www.patricny.com)*



**Obrázek 8** Mikroskopická stavba akátu 40x zvětšeno (zleva příčný řez, radiální řez a tangenciální řez)

*Zdroj: Zeidler a Böhm 2007*

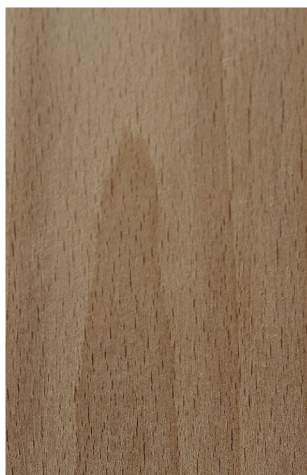
Na příčném řezu obrázku č. 8 lze pozorovat mikrocévy, makrocévy, libriformní vlákna a dřeňové paprsky, typické pro akát jsou shluky letních cév. Na radiálním řezu jsou libriformní vlákna, lumen makrocévy, thyly a také dřeňové paprsky. Na



tangenciální řezu jsou lumény mikro i makrocév libriformní vlákna a dřeňové paprsky. Perforace lze pozorovat také pouze jednoduché (Zeidler a Böhm 2007).

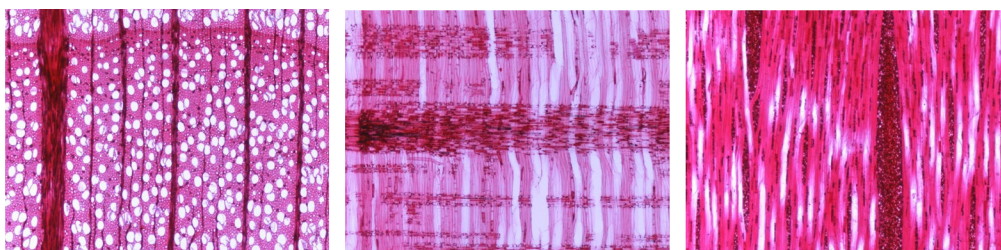
## **Buk**

Buk také patří mezi listnaté dřeviny, řadí se však do kategorie roztroušené pórovité dřeviny. Do této práce byla dřevina vybrána z hlediska prvního místa mezi zpracovávanými dřevinami v rámci České republiky. Jedná se tedy o ekonomicky velmi důležitou listnatou dřevinu. Dřevo buku je ukázáno na obrázku č. 9.



**Obrázek 9 Buk – tangenciální řez**

*Zdroj: [www.patricny.com](http://www.patricny.com)*



**Obrázek 10 Mikroskopická stavba buku 40x zvětšeno (zleva příčný řez, radiální řez, tangenciální řez)**

*Zdroj: Zeidler a Böhm 2007*

Na příčném řezu na obrázku č. 10 lze pozorovat typické rozšíření dřeňového paprsku na hranici letokruhu, libriformní vlákna, dřeňové paprsky, mnohvrstevný

dřeňový paprsek a radiální seskupení mikrocév. Radiální řez se skládá z libriformních vláken, dřeňových paprsků, a lumenů cév, které mohou obsahovat perforace jednoduché či žebříčkovité (Zeidler a Böhm 2007).

### **3.4 Teorie lepení**

O povrchu dřeva a jeho přilnavosti rozhodují především jeho anatomické, chemické a fyzikální vlastnosti. Dřevo lze totiž popsat jako heterogenní biopolymerní kompozit, složený z celulózy, hemicelulózy, ligninu a dalších doprovodných látek. Právě rozdíly mezi anatomii, chemií a fyzikálních vlastnostech určují heterogenní povahu dřeva. Proto je pro lepení velmi důležité, jaký druh dřeviny se bude lepit (Gardner 2016).

Pod pojmem lepení se rozumí spojení dvou různých ploch prostřednictvím adhesiva, které by se během lepení mělo nacházet nejlépe v kapalném stavu. Právě díky tomu je dosaženo lepšího přilnutí povrchů. Během lepení je využíváno fyzikálních a chemických sil. Obecně jde ale především o tyto 4 faktory:

- Mezimolekulární síly
- Adhezi
- Kohezi
- Smáčení povrchu

Dále ale také na:

- Velikosti nánosu
- Vlhkosti podkladu
- Lisovacím tlaku
- Kvalitě opracování (Ženatý 2016, Uhlíř 1997)

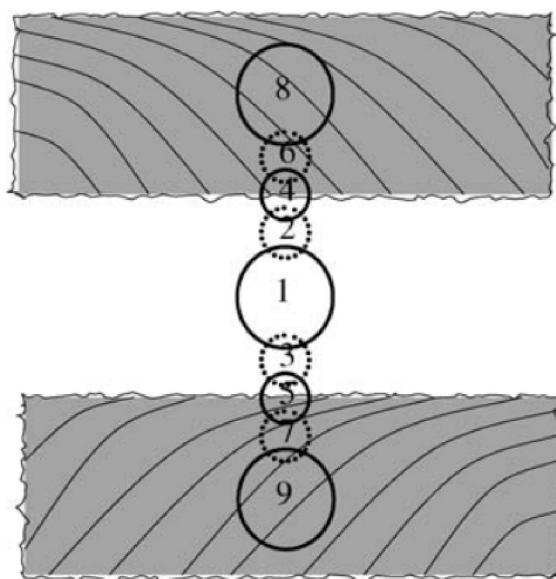
#### **Mezimolekulární síly**

Mezi adherendem a adhesivem vznikají dva druhy vazeb, a to mechanická a chemická. Mechanická vazba vzniká nejčastěji u materiálů, které mají hrubý povrch. Mechanická vazba může vznikat pro materiály jako je dřevo, to je dáno tím, že dřevo je členitý materiál, který je výhodný pro tvorbu mechanické vazby. Mechanická vazba je minimální u dokonale rovných, hladkých povrchů. Naopak je tomu u chemické

vazby, která se objevuje jak u porézních, tak u hladkých povrchů. Vznik chemické vazby dávají slabé van der Waalsovy síly. Vliv na chemickou vazbu mají i kovalentní vazby, velikost těchto vazeb je závislá především na kvalitě povrchu před lepením a chemických vlastnostech adhesiva. Kvalita povrchu je ovlivňována především stavbou dřeviny a také úpravou povrchu, která ovlivňuje následnou drsnost a smáčení povrchu (Ženatý 2016, Smékal 2017, Lee 1999).

## Adheze

Adheze je přilnavost. Chemické a fyzikální síly vznikají po přiblížení dvou materiálů (adherendu a adhesiva). Tyto síly určují sílu dané přilnavosti, adheze. Pokud se dva různorodé materiály dotýkají, dochází ke vzájemnému kontaktu jednotlivých atomů. Tyto atomy na sebe vzájemně působí vazbami, velikost přitažlivých sil, a tedy i velikost adheze ovlivňují tyto vzniklé vazby (Havránek 2017, Pokorný 2000).



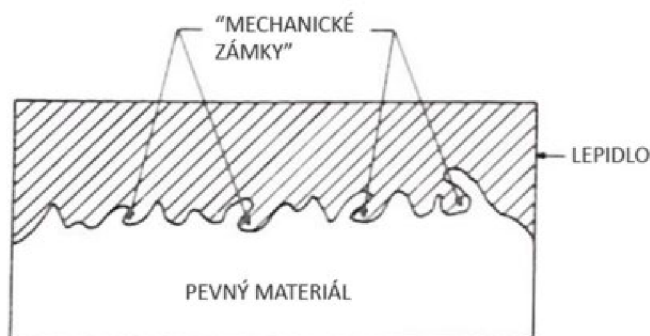
Obrázek 11 Zóny poruch vazby

*Zdroj: převzato z Marra 1992*

- Kde: 1 – Adhesivum  
 2,3 – mezifáze adhesiva  
 4,5 – rozhraní mezi adhesivem a dřevem  
 6,7 – mezifáze dřeva  
 8 – Adherend (dřevo)

## Mechanická teorie

Při různých způsobech opracování, vznikají různě velké vrcholky a prohlubně povrchu, které vytváří drsnost povrchu. Právě opracování ovlivňuje velikost těchto tvarů, a to následně ovlivňuje drsnost povrchu. Mechanická teorie adheze je způsob přilnutí dokonalého smáčejícího adhesiva do prohlubní adherendu. V tomto případě je tedy pevnost adhesiva závislá na počtu prohlubní, ve kterých dojde ke spojení adhesiva a adherendu (Havránek 2017, Osten 1996).



Obrázek 12 Mechanické zámky

*Zdroj: převzato z Smékal 2017 a Lee 1999*

## Chemická teorie

Tato teorie je založena na působení kovalentních vazeb a van der Waalsových sil. Aby byl spoj dostatečně pevný, musí vzniknout kovalentní vazby mezi adherendem a adhesivem na jejich rozhraní. Lze tedy říci, že kvalitní spoj vzniká, jestliže je povrch dostatečně reaktivní, popřípadě chemicky upravený. Kovalentní vazba je tvořena dvojicí elektronů, které spolu tvoří elektronový pár, každý atom přispívá jedním elektronem. Některé látky jako například dřevo, se relativně dobře lepí s volnými chemickými skupinami -O, -OH, -CO, -COCH<sub>3</sub>, -NH<sub>2</sub> a dalšími (tedy oxy-, hydroxy-, karbonyl-, karboxymethyl-, amino-). V případě lepení je důležité vybrat správné adhesivum, pro správný materiál a způsob lepení pro cílové použití. Většinou lepení probíhá při termodynamických podmínkách, tyto podmínky však nepodporují vznik chemických vazeb, i když se chemické vazby mají tendenci v některých případech tvořit (Kytka 2019, Havránek 2017, Ženatý 2016, Havelka 2011, Rowell 2006, Kumar 1996).

## **Molekulová teorie**

Molekulová teorie je založena především na principu smáčení, dále také na adhezi a kohezi. Zprv je důležité vzájemné působení adherendu a adhesiva a zároveň by měly obsahovat polární funkční skupiny. Kvalita lepení závisí na molekulárním kontaktu mezi adherendem a adhesivem. Je několik druhů sil, které se vytváří adhezi a kohezi. Nejdůležitější a nejvíce se uplatňující je ovšem van der Waalsova síla. Vznik tohoto adhezního spoje se skládá ze 2 částí. A to část první, při které by mělo dojít k přenosu molekul adhesiva k povrchu adherendu. A část druhou, při které vznikají van der Waalsových síly, a to do doby, než vznikne tzv. adsorpční rovnováha (Hejduk 2019, Havránek 2017, Havelka 2011).

## **Teorie slabé mezní síly**

Teorie popisuje selhání vazby mezi adherendem a adhesivem. Tento typ selhání způsobuje kohezní selhání nebo slabá mezní vrstva. Tato vrstva vzniká nejčastěji, pokud se mezi adhesivum a adherend dostane nečistota. Nečistota způsobí nedostatečné smáčení adhesiva vlivem toho, že se adhesivum a adherend k sobě nedostatečně přiblíží. Vzniklé vzduchové kapsy v nerovnostech vytvoří póry, které snižují pevnost lepeného spoje (Chlup 2016).

## **Difuzní teorie a elektrostatická teorie**

Difuzní a elektrostatická teorie nejsou s praxí lepení moc spojované. V případě difuzní teorie lze mluvit, pokud adhesivum i adherend jsou polymery. Teorie popisuje difundování látek napříč rozhraním, které je nejvíce závislé na čase a teplotě, dále na viskozitě, relativní molekulové hmotnosti polymerů, ale také na kompatibilitě adherendu a adhesiva. Nedostatek této teorie je ten, že nepopisuje spojení materiálů, které vzájemně nedifundují, ale dají se lepit (Hejduk 2019, Havelka 2011).

Podstatou teorie elektrostatické je, že se ve spoji vytváří dvojvrstva, která je tvořena na jedné straně více elektrony a na druhé straně méně elektrony. Teorie podporuje občasné pozorování elektrostatického výboje při odtržení adhesiva od adherendu. Avšak souvislost v pevnosti spoje nebyla nikdy prokázána (Hejduk 2019, Havránek 2017, Havelka 2011).

## Koheze

Koheze, soudržnost, je souhrn sil, které na sebe vzájemně působí částice adhesiva. Popisují jí tzv. kohezni síly. Tyto síly jsou definovány jako velikost energie, která je potřebná k odtržení jedné částice od ostatních. Kohezni pevnost je především charakterizována samotným adhesivem. Například některá jednosložková adhesiva jsou termoplasty, ty se zvýšenou teplotou měknou, dvousložková adhesiva mají zpravidla vysokou kohezi, naopak velmi nízkou kohezi mají měkké akryláty používané třeba na samolepící etikety (Havránek 2017, Pokorný 2000).

## Smáčení

Smáčení je důležité pro správné lepení, proto je často měřeno pro hodnocení povrchu materiálu, který ovlivňuje kvalitu lepeného spoje. Pokud je povrchová energie kapaliny vyšší než povrchová energie povrchu, kapalina se po povrchu nerozlije a povrch špatně smáčí. Pro naše účely lepení je tedy ideální situace, kdy povrchová energie kapaliny (adhesiva) je nižší než povrchová energie povrchu. Pro to je důležité zjišťovat smáčení kapalin lepeného povrchu, v případě této práce je třeba zjistit, jestli lze vhodnou úpravou povrchu změnit povrchovou energii, tedy i smáčení pro lepší vlastnosti na lepení (Šmíra 2012).

V roce 1805 Young představil vzorec pro vztah kontaktního úhlu kapalin k pevným látkám. Jeho vzniklý vzorec byl:

### **Rovnice 1 Vzorec kontaktního úhlu kapalin k pevným látkám**

$$\sigma_s = \gamma_{sl} + \sigma_l \cos \theta$$

$\sigma_s$  = pevná fáze, povrchové napětí (mN/m)

$\sigma_l$  = kapalná fáze, povrchové napětí (mN/m)

$\gamma_{sl}$  = mezipovrchové napětí (mN/m)

$\theta$  = kontaktní úhel (°)

V tomto případě, pokud byla známá povrchová energie kapalná fáze a byl změřen kontaktní úhel, stále v rovnici scházelo znát pevnou fázi a mezipovrchové

napětí. To vedlo například k nepřesným výsledkům v extrémních případech. Náročné je zjistit především mezipovrchové napětí (Thomsen 2008).

Kontaktní úhel (KU) smáčení je prakticky jedna z málo vlastností, které se dají přímo měřit u třífázového rozhraní pevná látka, kapalina a plyn. Jde o úhel, který svírá tečna k povrchu kapky, která vede v bodě dotyku kapky s rozhraním. Potom tedy úhel smáčení závisí na vztahu mezipovrchových energií a jejich rozhraních. Mezi tuhou a plynnou fází ( $\gamma_{sg}$ ) a mezi kapalnou a plynnou fází ( $\gamma_{lg}$ ) (Siegel 2014, Krásný 20).



**Obrázek 13 Kontaktní úhel a mezifázové rozhraní**

*Zdroj: Novák a kol. 2008*

### Fowkesova metoda

Během kontaktu dvou libovolných fází se uplatňuje Lifshitz – van der Waalsova složka mezipovrchového napětí a ta je tvořena třemi částmi. Coulombickými silami, indukčními silami a disperzními silami. Následnou úpravou se však došlo k tomu, že volná povrchová energie je tvořena disperzní a polární složkou, a to pro pevnou i kapalnou látku, viz následující vzorec (Krásný 2010).

### Rovnice 2 Povrchové napětí pevné látky

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p$$

$\gamma_s$  = povrchové napětí pevné látky, součet složek disperzních a polárních, (mN/m)

$\gamma_s^d$  = disperzní složka kapalně látky (mN/m)

$\gamma_s^p$  = polární složka kapalně látky (mN/m)

### Metoda Owens-Wend-Rabel-Kaeble (OWRK)

V této metodě je důležité použít dvě kapaliny, jednu polární a druhou nepolární. Vychází tedy z Fowkesovy metody, kdy povrchové napětí pevné látky je součtem disperzní a polární složky kapalné látky (Krásný 2010).

#### Rovnice 3 Odvození povrchové napětí povrchu 1

$$\gamma_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - 2 \left( \sqrt{\gamma_s^d \gamma_l^d} + \sqrt{\gamma_s^p \gamma_l^p} \right)$$

#### Rovnice 4 Odvození povrchového napětí povrchu 2

$$\frac{(1 + \cos\theta) * \gamma_l}{2\sqrt{\gamma_l^d}} = \sqrt{\gamma_s^p} \sqrt{\frac{\gamma_l^p}{\gamma_l^d}} + \sqrt{\gamma_s^d}$$

Výpočet pro povrchovou energii určující polární a nepolární látkou je viz následující rovnice (Holeček a kol. 2023).

#### Rovnice 5 Výpočet povrchového napětí povrchu podle metody OWRK

$$\sigma_{sl} = \sigma_s + \sigma_l - 2 \left( \sqrt{\sigma_s^D \sigma_l^D} + \sqrt{\sigma_s^P \sigma_l^P} \right)$$

$\sigma_{sl}$  = povrchové napětí povrchu (mN/m)

$\sigma_s$  = povrchové napětí pevné fáze (mN/m)

$\sigma_l$  = povrchové napětí kapalné fáze (mN/m)

$\sigma^D$  = geometrické rozpětí disperzní části (mN/m)

$\sigma^P$  = geometrické rozpětí polární části (mN/m)

Závěrem se dá tedy říci, že v případě této práce bude nejlepší použít OWRK metodu, která se mimo jiné používá nejvíce pro stanovení povrchové energie mezi pevnou látkou a kapalinou a také pro polymerní látky. Budou použity dvě kapaliny, jedna polární a druhá nepolární. Díky známým složkám polární a nepolární části kapalin a měřením kontaktního úhlu lze vypočítat celkovou povrchovou energii (Krásný 2010, Siegel 2014).

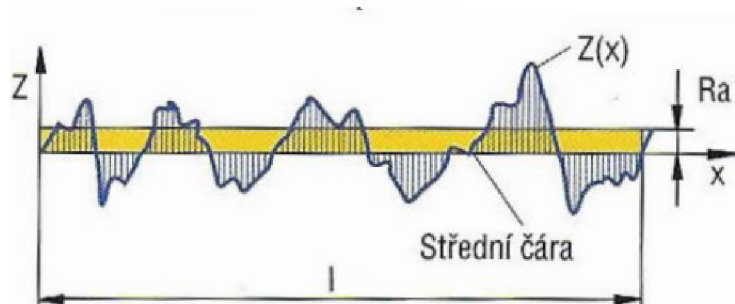


### 3.5 Měření drsnosti povrchu

K posouzení vlastností povrchu drsnosti byly vybrány parametry  $R_a$ ,  $R_z$  a  $R_{sm}$ . Je to z důvodu toho, že tyto parametry dlouhodobě slouží jako kvantifikační ukazatele drsnosti povrchu dalších prací. V této kapitole jsou tyto parametry popsány.

#### Parametr $R_a$

Parametr  $R_a$  udává střední aritmetickou úchylku, jde o aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky viz následující obrázek č. 14. Tento parametr vynáší čáru, která se porovnává od střední čáry. Problém s používáním toho parametru je ten, že dva povrchy s odlišnými vlastnostmi, mohou mít tu samou hodnotu  $R_a$ , proto se v porovnání o povrchu doplňuje tento parametr drsnosti dalšími parametry (Hron 2017, Gajdošík 2013).

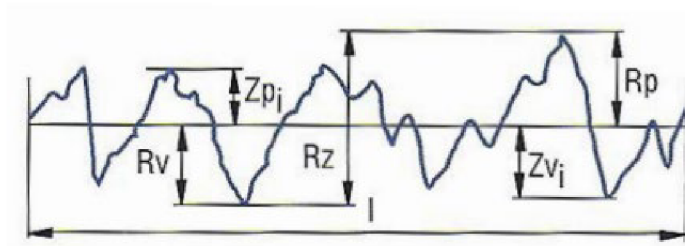


Obrázek 14 Parametr drsnosti  $R_a$

Zdroj: Hron 2017

#### Parametr $R_z$

Tento parametr je popisován jako výšková charakteristika drsnosti. Je dána součtem nejvyššího vrcholku a nejnižší rýhy v rozsahu základní délky měření. Tento parametr slouží jako doplňkový parametr k posouzení drsnosti povrchu. Parametr  $R_z$  viz následující obrázek č. 15 (Hron 2017).

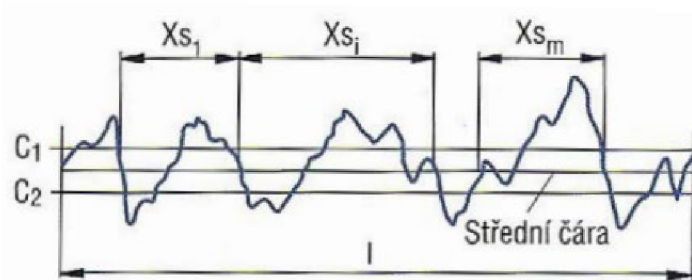


Obrázek 15 Parametr drsnosti Rz

Zdroj: Hron 2017

### Parametr Rsm

Parametr Rsm je aritmetickým průměrem šířek prvků v rozsahu základní délky měření, které vždy začínají a končí protnutím střední čáry osy X. Rsm definuje rozteč nerovností povrchu, které se používá pro délkové hodnocení drsnosti povrchu (Hron 2017, Gajdošík 2013).



Obrázek 16 Parametr drsnosti Rsm

Zdroj: Hron 2017

### 3.6 Faktory ovlivňující kvalitu lepeného spoje

Kvalitu a pevnost lepeného spoje ovlivňuje celá řada faktorů, které lze rozdělit na tři základní oblasti, a to:

- Faktory ovlivňující lepený povrch
- Faktory ovlivňující kvalitu adhesiva
- Faktory technologické

## **Faktory ovlivňující lepený povrch**

### **Vlhkost**

Vlhkost ovlivňuje míru nasákavosti dřeviny. Je důležité zmínit i fakt, že čím je vlhkost dřeva vyšší, tím méně rozpouštědla vsaje, toto zpomaluje nebo dokonce znemožňuje proces lepení a vytvrzování. Uvádí se, že ideální vlhkost dřeva pro lepení je  $8 \pm 2$  %, horní hranice je 12 % (Ženatý 2016).

### **Rovinnost**

Pro lepení je velmi důležitý kvalitně upravený a čistý povrch tak, aby docházelo k velmi dobré přilnavosti adhesiva k povrchu. Adhesivum by se mělo lépe dostávat do pórů a nerovností dřeva, kde po vytvrzení vytváří mechanické kotvy. Za jeden z nejlépe zvoleným způsobem opracování je považováno broušení povrchu lepeného materiálu (Havránek 2017, Ženatý 2016).

## **Faktory ovlivňující kvalitu adhesiva**

### **Typ adhesiva**

Před tím, než se vůbec začne s lepením, je důležité zvolit správný typ adhesiva s ohledem na vlastnosti lepeného materiálu. Pouze v případě správně zvoleného adhesiva lze dosáhnout kvalitního lepeného spoje (Kotálová 2017, Haškovec 2015).

### **Viskozita**

Viskozita adhesiva způsobuje rovnoměrné nanesení a zároveň brání nechtěné penetraci adhesiva do povrchu adherendu před vytvořením tenké vrstvy adhesiva na lepeném povrchu (Kotálová 2017).

### **System tvrzení**

System tvrzení lze rozdělit na vytvrzení na fyzikální bázi. V tomto případě se rozpouštědlo odpařuje nebo difunduje na základě změny teploty či tlaku. Dále lze system tvrzení vlivem chemické reakce. Chemická reakce může být v tomto případě aktivována teplem, katalyzátorem, anebo kombinací (Haškovec 2015).

## **Faktory technologické**

Vytvrzení, tedy polymeraci adhesiva také ovlivňují vnější podmínky, prostředí. Optimální relativní vlhkost vzduchu by měla být v rozmezí 40–60 %, ovšem neměla by klesnout pod 30 % nebo přesáhnout 90 % (Šmíra 2012).

Lisovací teplota, tlak a čas jsou nastaveny podle technologických předpisů druhu adhesiva. Dodržování těchto předpisů je závazné a důležité k zajištění požadované kvality lepeného spoje (Kotálová 2017, Bouška 2014).

### **Lisovací tlak**

Při lisování se vytlačuje přebytek adhesiva, vzniká tak rovnoměrná vrstva a adhesivum se lehčeji dostává do pórů dřeviny. Velikost lisovacího tlaku určuje druh dřeviny a adhesiva, ty také ovlivňují teplotou lisování a kvalitou opracování. V jedné lisovací etáži musí lisovací dílce mít stejnou tloušťku, to je důležité pro to, aby byl tlak při lisování rovnoměrně rozložen (Kotálová 2017, Ženatý 2016, Šmíra 2012).

### **Doba uzavírání**

Čas lisování záleží na druhu adhesiva a teplotě během lepícího procesu. Během této doby musí proběhnout fyzikálně-chemické děje. Doba vytvrzování je závislá na druhu dřeviny, vlhkosti dřeva, druhu adhesiva a jeho vlastnostech, velikosti nánosu a velikosti lepené plochy (Kotálová 2017, Bouška 2014).

### **Velikost nánosu**

Platí, že čím je vrstva menší, tím je spoj pevnější a naopak, čím je vrstva větší, tím pevnost spoje klesá. Velký nános adhesiva také negativně ovlivňuje lepící proces (Ženatý 2016, Šmíra 2012).

## **3.7 Lepené spoje**

V tomto případě je důležité zmínit typy spojení a vady, které mohou nastat během lepení, protože i v této práci bylo možné pozorovat různé druhy vady lepené spáry.

## **Rozdělení vad lepené spáry**

### **Dokonalý spoj**

Povrchy adherendu jsou těsně u sebe a adhesivum mezi nimi vykazuje tenký, rovnoměrný a homogenní film. Aby byl spoj porušen, je nutno použít velké množství síly a k porušení dochází mimo adhesivum, ve dřevní hmotě (Ženatý 2016, Mrňous 2010).

### **Chudý spoj**

V případě příliš vysoké pórovitosti může nastat tzv. chudý spoj, kdy lepené materiály drží pohromadě, ale k uvolnění spoje může dojít působením malých sil. Pórovitost zapříčiní přílišné vsáknutí adhesiva do lepeného materiálu, zároveň tento druh vadného spojení může způsobit také nerovnoměrný nános, který je příčinnou vysoké viskozity adhesiva, dále vysoká vlhkost materiálu či nadměrný tlak lisu (Ženatý 2016).

### **Rozlepený spoj**

Tento druh spoje je částečně nebo úplně v ploše volný, vadu lze pozorovat i ze strany jako viditelné spáry, či vzduchové kapsy. Tento typ spoje vzniká při předčasném vytvrdnutí adhesiva, nedostatečném tlaku při procesu lepení či vysoké vlhkosti dřeva, nedostatečnému opracování, zbylému prachu, či mastnotou na povrchu. Druh porušení v tomto případě je v okolí lepeného spoje (Ženatý 2016, Mrňous 2010).

### **Zrnitý spoj**

Pevnost tohoto spoje je nízká. Spoj má typickou krupicovitou strukturu, to je pravděpodobně způsobeno přílišným množstvím plnidel a nastavovadel, které zhustí lepící směs, která se hůře vsakuje do lepícího materiálu. Tento fakt může být také způsoben nedostatečným rozpuštěním práškového adhesiva, nebo příliš vysoké vlhkosti adherendu, která může způsobit vysrážení adhesiva v roztoku. (Ženatý 2016, Mrňous 2010).

### **Zmrzlý spoj**

Tento spoj je považován také za slabý. Při odlepení spoje lze pozorovat na jedné ploše adhesivum a na druhé čistý povrch bez adhesiva. Většinou k této vadě

lepení dochází při nízké vlhkosti dřeva nebo předčasném vytvrzení adhesiva (Kotálová 2017, Haškovec 2015).

#### **Nezakotvený spoj**

Pevnost spoje je relativně nízká. U této vady lze pozorovat, že adhesivum nedostatečně přilnulo k povrchu adherendu, to je často způsobeno znečištěným povrchem, nízkou vlhkostí dřeva či příliš vysokou viskozitou adhesiva (Kotálová 2017, Haškovec 2015).

#### **Zdánlivě pevný spoj**

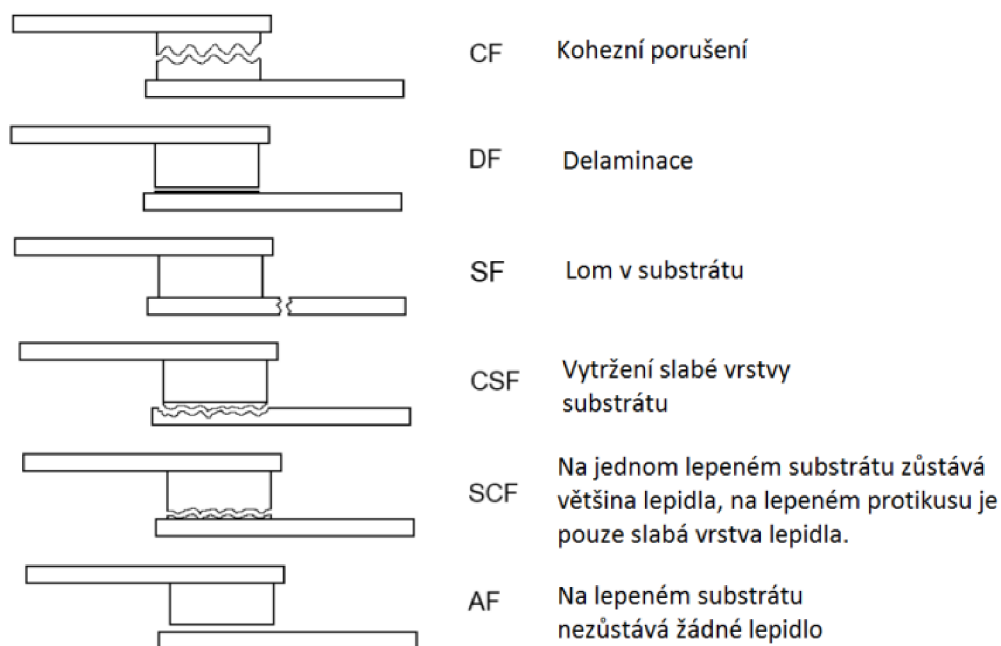
Taktéž nízká pevnost spoje, která se vyznačuje vlákny dřeva na odtrženém adhesivu, která lze pozorovat po rozdělení spoje mechanicky. Tento vadný spoj zapříčiňuje nevhodné opracování povrchu dřeva, nízká pevnost dřeva vlivem hniloby či napadení dřevokaznými houbami, či nechtěnému zaktivování složek adhesiva se dřevem vlivem pH povrchu (Haškovec 2015).

#### **Další vady**

Dalšími vadami mohou být například lepení různých dřevin, i když i to je dnes otázka, která se bere v potaz a je snaha najít řešení lepení pro různé dřeviny dohromady. Dále je to různá vlhkost materiálů, špatná volba adhesiv, nerovnost lepených ploch, například prohnuté dílce, ad. (Ženatý 2016, Haškovec 2015).

### **3.8 Porušení lepeného spoje**

Podle normy ČSN ISO 10365 se rozlišují jednotlivá porušení při zkoušce. Druhy porušení jsou znázorněny na následujícím obrázku č. 17.



Obrázek 17 Typy porušení lepeného spoje

Zdroj: Hejduk 2019

### 3.9 Diverzifikace adhesiv

Zprvu lze adhesiva rozdělit do několika skupin, a to adhesiva podle fyzikálního stavu, účelu a původu. Detailněji můžou být adhesiva rozdělena podle tvaru, způsobu zpracování, dosažení pevnosti spoje, chemického složení, obsahu rozpouštědel, teploty při zpracování ad. Rozdělení do těchto a dalších skupin existuje, protože adhesiva tvoří velmi rozsáhlou skupinu různých chemických látek (Kytka 2019, Červenka 2012, Havelka 2011).

#### Rozdělení adhesiv

##### Rozdělení podle fyzikálního stavu

Toto rozdělení je na základě stavu adhesivu při nanášení, či používání, a tak se podle svého stavu může jednat o adhesivum tekuté, polotuhé či pevné. Pevná adhesiva jsou například lepicí folie, film či prášek. Polotuhá jsou stále lepicí látky a tekutá

adhesiva jsou roztoky a disperze, anebo například adhesiva pastovitá, či pěnová (Kytka 2019, Havelka 2011, Jirák 2011, Zelinka 2008, Boublík 1964).

### **Rozdělení podle účelu**

V minulosti bylo toto rozdělení běžné, avšak dnes slouží pouze k hrubé orientaci použití adhesiva. Jde o rozdělení podle toho, na co bude použito, například na dřevo, papír, kámen, sklo, plast, kov, ad. Nedostatkem u tohoto rozdělení je to, že je nicneříkající o chemii adhesiva (Červenka 2012, Havelka 2011, Boublík 1964).

### **Rozdělení podle původu**

Rozdělení podle původu je jedno z nejběžnějších rozdělení, které se dnes používá. Rozdělení je založeno podle hlavní suroviny, která je použita při výrobě adhesiva, takto lze rozdělit adhesiva na přírodní a syntetická. Přírodní se dělí dále na rostlinná a živočišná. Syntetická adhesiva se dělí na termoreaktivní a termoplastická. **Termoreaktivní** adhesiva vytvrzují účinkem tepla. Za zvýšené teploty a pomocí katalyzátoru probíhá chemická reakce a vzniká makromolekulární látka, která je prostorově spojena pomocí jednotlivých řetězců molekul. Termoreaktivní adhesiva jsou po vytvrzení voděodolná. **Termoplastická** adhesiva vytvrzují na jiné bázi, a to na bázi fyzikální. Za zvýšené teploty tyto látky kapalní a tím umožňují správné přilnutí k lepenému podkladu. Přehledné rozdělení adhesiv je sepsáno v následující tabulce č. 2 (Haškovec 2015, Havelka 2011).



**Tabulka 2 Rozdělení adhesiv dle použité suroviny (převzato z Kytka 2019 a Haškovec 2015)**

<b>Adhesiva</b>	<b>Přírodní</b>	<b>Rostlinná</b>	Mouky
			Škroby
			Dextriny
			Pektiny
			Algináty
			Rostlinné gum
			Pryskyřice
			Kaučuky
			<b>Živočišná</b>
	Albuminové klišy (z krve jatečných zvířat)		
	Kaseinové klišy (z bílkovin)		
	<b>Termoreaktivní</b>	Fenolformaldehydová (PF)	
		Močovinoformaldehydová (UF)	
		Melaminformaldehydová (MEF)	
		Rezorcinoformaldehydová (RF)	
	<b>Syntetická</b>	Epoxidová	
		Polyuretanová	
		<b>Termoplastická</b>	Akrylátová
			Vinylická
Polyamidová			
Směšená			

Dalším rozdělením adhesiv je na adhesiva kapalná. Podle typu vytvrzení se dělí adhesiva s kapalnou fází na reaktivní adhesiva jedno a dvousložková. A kapalná adhesiva rozpouštědlová a vodná roztoková a disperzní (Miterga 2017, Kučera 2015).

**Dvousložková reaktivní** adhesiva fungují tak, že vytvrzují chemickou reakcí dvou složek. Do této kategorie patří například adhesiva epoxidová, polyuretanová a formaldehydová (PF a UF). **Jednosložková reaktivní** vytvrzují jiným způsobem, a to pomocí reakce vulkanizací vzdušné vlhkosti, v této kategorii jsou adhesiva silikonová, kyanoakrylátová a polyuretanová. Adhesiva rozpouštědlová, vodná roztoková a vodná disperzní vytvrzují na podobné bázi, vytvrzením části adhesiva. V případě **rozpouštědlových adhesiv** je to vytvrzení pomocí odpaření rozpouštědel. Rozpouštědlová adhesiva jsou adhesiva typu kaučuk, polyuraten, nitrocelulóza ad. Další adhesivum vytvrzující odpařením části adhesiva jsou **vodná roztoková adhesiva** vytvrzují odpařením vody. Do těchto adhesiv adhesiva škrobová, dextrinová, kaseinová, deriváty celulózy ad. Jako poslední jsou rozlišena adhesiva **vodná**

**disperzní**, tato adhesiva vytvrzují odpařením vody, ale zároveň se musí části polymeru spojit do souvislého filmu (Mitrenga 2017, Kučera 2015).

Adhesiva pevná lze rozdělit na dva typy, první typ jsou adhesiva tavná a druhý typ jsou adhesiva redispergovatelná (prášky). **Tavná adhesiva** se musí do stavu, aby lepila přivést, a to se zajišťuje roztavením. Nakonec tato adhesiva vytvrzují tím, že se ochladí. **Redispergovatelné prášky** se dávají do vody, kde se tento typ adhesiva rozptýlí rozmícháním. Takto vznikne disperze, která se vytvrdí odpařením rozpouštědla a tím se vytvoří souvislý film z částí polymerů (Mitrenga 2017, Kučera 2015).

### **Rozdělení podle teploty**

Podle teploty při zpracování se adhesiva dělí na zpracování:

- Za normální teploty 20-30 °C
- Za zvýšené teploty 30-100 °C
- Za horka nad 100 °C

Někdy je vyšší teplota výhodou ve smyslu zvýšení viskozity adhesiva, naopak ochlazením se snáze vytváří gel (Havelka 2011).

### **Další rozdělení**

Adhesiva se mohou dále dělit na adhesiva **bez rozpouštědel** nebo **s rozpouštědly**. Avšak adhesiv bez rozpouštědel je zatím malé množství. Vzhledem ke svým výborným schopnostem nachází využití pro obtížné způsoby spojování. Důležité je také zmínit fakt, že skladováním se vlastnosti těchto adhesiv nemění. To je tím, že neobsahují žádná rozpouštědla, která by mohla po čase z adhesiv dostat pryč. Nejčastěji jde o termoreaktivní adhesiva, které většinou tvoří silně viskózní kapaliny, nebo pevné kusy, které se teplem roztaví.

Používaná rozpouštědla v adhesivech jsou většinou organické povahy nebo se používá jako rozpouštědlo voda, tato rozpouštědla zlepšují vlastnosti adhesiva (Havelka 2011).

Dalším rozdělením je dle chemické reakce, která může být kyselá, neutrální, či zásaditá, dále polární nebo nepolární. V tomto případě je důležité myslet na lepený materiál, který může změnit barvu nebo může i jinak reagovat s lepeným materiálem podle typu chemické reakce adhesiva (Haškovec 2015, Havelka 2011).

### **3.10 Jednosložkový polyuretan na dřevěné konstrukční účely**

Adhesiva reaktivní se často používají pro nosné konstrukce ze dřeva. Tato adhesiva vytvrzují na principu chemické reakce, která začíná zpravidla v její filmotvorné složce. Chemickou reakci nejčastěji spouští zvýšená teplota nebo je vyvolána tvrdidlem (Mitrenga 2017).

Pro použití jednosložkového polyuretanového adhesiva se používá norma ČSN EN 15425. Tato norma rozděluje adhesiva typu 1 a 2. Typ 1 je využíván v podmínkách vysokých teplot nad 50 °C, nebo při teplotách do 50 °C a plném působení povětrnostních podmínek. Typ 2 se používá ve vytápěných a větraných budovách, ve venkovním prostředí chráněných proti povětrnosti nebo při krátkodobém působení povětrnosti při teplotách do 50 °C. Jednosložková polyuretanová adhesiva jsou předpolymery lineárních polyesterů a diisokyanátů s koncovými hydroxylovými skupinami v roztoku organických rozpouštědel neobsahujících vodu nebo alkohol (Kytka 2019, Mitrenga 2017).

### **3.11 Složky adhesiv**

Adhesiva obsahují jako elementární složky makromolekulární látky. Tyto látky musí být dispergované v koloidním stavu, jestliže původně nejsou již kapalné. Jako dobře fungující médium se používá například voda, ta je v hodná z hlediska svých polárních vlastností, a proto se také využívá i dalších jiných polárních látek. Dále se tedy používají polární, snadno se odpařující látka, například aceton, alkohol ad. Další důležité vlastnosti jsou dosaženy přidáním různých aditiv. Tyto látky jsou tvrdidla, plniva, nastavovadla a jiné zušlechťující látky, které se přidávají do těchto lepicích směsí z důvodů ekonomických a technických (Ženatý 2016, Chlup 2016, Drga 2015).

#### **Jednotlivé složky adhesiv**

##### **Pojiva**

Jedná se o elementární složku adhesní směsi. Tato složka zabezpečuje například pevnost, ale také i odolnost spoje, aby se nerozlepil. Dále také přilnavost adhesiva k podkladu a vnitřní soudržnost, tedy adhezi a kohezi (Ženatý 2016).

## **Tvrdidla**

Tvrdidla usnadňují reakci tuhnutí adhesiva zvýšením rychlosti reakce. Jedná se o sloučeniny kyselin a solí. Přidávají se na povrch adherendu, nebo do směsi adhesiva, či jsou již jeho součástí. (Ženatý 2016, Chlup 2016).

## **Plniva**

Jde o látky, které nedisponují lepícím charakterem, často bývají jemně namleté. Používají se ke zvýšení viskozity lepící směsi a tím snižují možnost vzniku chudého spoje. Pomáhají vyplnit nerovnosti lepeného povrchu adherendu a snižují vznik napětí v lepené spáře. Dále jsou benefitem pro lepení dřív, protože adhesivum nemá takovou tendenci prosakovat vrstvami. Používá se kaolin, plavená křída, dřevní moučka, bakelitová moučka, kaučuk, fenolplasty, dřevní mastek, ad. (Ženatý 2016, Chlup 2016).

## **Nastavovadla**

V tomto případě se jedná také o jemně namleté látky, nicméně tyto látky již disponují lepícím charakterem. Tyto látky jsou důležité z hlediska ekonomie adhesiva, snižují tedy jeho cenu. Zároveň jejím přidáním je možné regulovat viskozitu, ale i elasticitu spoje, tím se zvýší bezpečnost proti popraskání spoje. Udávané ideální množství se pohybuje kolem 20 % (Kotálová 2017, Ženatý 2016, Drga 2015).

## **Rozpouštědla**

Rozpouštědla jsou kapaliny nebo směsi kapalin, které způsobují rozpuštění nebo zředění pojiva, tedy svou přítomností upravují tokové vlastnosti lepidlových směsí. Často se jako rozpouštědlo používá voda. Dále se používají organická rozpouštědla, která jsou schopná rozpouštět látky, která voda rozpustit nedokáže, jako jsou oleje, tuky, vosky, kaučuk, přírodní pryskyřice a syntetické vysokomolekulární látky. Je ovšem důležité zmínit, že rozpouštěním látek výše zmíněných v organickém prostředí se jejich chemické vlastnosti nemění (Ženatý 2016, Vitešnicková 2007).

## **Ředidla**

Tyto látky se používají zejména pro úpravu tekutosti a rozlivu lepící směsi při nanášení (Ženatý 2016).

### **Zušlechťující látky**

Jde o látky zlepšující vlastnosti lepící směsi a tím i lepené spáry. Jde o látky, které chrání lepenou spáru i lepený materiál před biologickými činiteli, pokud jde o adhesiva živočišná či rostlinná. V tomto případě se používají chlorované fenoly, anorganické fungicidy, ad. Dále se používají látky s hydrofobními vlastnostmi, a to třeba vosk, parafin nebo asfalt. (Kotálová 2017, Ženatý 2016, Drga 2015).

### **3.12 Termosety**

V této akademické práci bylo využito termosetického prášku jako přísady do adhesiva během procesu lepení. Použití termosetů pro lepení není běžné a zatím neexistuje dostatek studií dokládajících vliv na proces lepení. Existuje však pár studií popisujících využití práškových epoxidových termosetů spolu s epoxidovým adhesivem. Výsledky naznačovaly zlepšení pevnosti v tahu, odolnost proti nárazu odolnost proti přetržení, lepší houževnatost a lepší odolnost lepeného spoje. Další studie také potvrzuje zlepšení vlastností pevnosti v tahu a tvrdosti lepeného spoje (Holeček a kol. 2023, Karak 2021, Kalita a kol. 2013).

Polymery lze rozdělit na dvě hlavní skupiny, a to termoplasty a termosety (reaktoplasty). Prakticky polymer, který lze změkčit přidáním tepla, se považuje za termoplast. Zatímco polymery, které jsou neporušeny přidáním tepla až do úplného rozkladu, se označují jako termosety. Termosety jsou odolné, protože jsou to zesíťované látky, to jim umožňuje být odolné vůči teplotám až do doby, dokud nedojde k přerušování vazeb a k úplnému rozkladu látky. Zesíťování zajišťuje těmto látkám taky vysokou stabilitu v rozpouštědlech, a to je tím, že termosety se v rozpouštědlech nerozpouštějí, ale spíše bobtnají. Jeden z nejčastějších termosetů na trhu je termoset na bázi epoxidové pryskyřice (Dodiuk 2021, Hambleton a kol. 2020, Ducháček 1996).

Fenolické pryskyřice se staly populární po objevu bakelitu Leo Baekelandem v roce 1907. Časem se ukázalo, že fenolické pryskyřice jsou také užitečné v nátěrech, adhesivech a tvarových výrobcích, jako jsou například kulečnickové koule (Hambleton a kol. 2020, Ducháček 1996).

### 3.13 Modifikace povrchu broušení a hoblováním

Proces lepení může zlepšit modifikace povrchu hoblováním nebo broušením. Těmito procesy se naruší povrch lepeného materiálu, čímž se zvýší schopnost adhesiva vytváření mechanických kotev. Zároveň také bylo potvrzeno, že použitím modifikace broušení by mělo být zajištěno lepšího výsledku než při použití hoblování. Ve zmíněné studii bylo potvrzeno, že při použití vyšší rychlosti posuvu broušeného materiálu bylo dosaženo vyšší pevnosti ve smyku (Kuljich a kol. 2012).

Dle výsledků z článku bylo zjištěno, že vhodnou úpravou povrchu lepeného materiálu, lze zajistit lepší vlastnosti lepeného spoje, a to nejen pro lepení během suché fáze, ale také pro mokrou fázi lepení, či pro lepení po opětovném sušení. (Nevím, zdali je to správně přeloženo). Nejlepší výsledky podélné pevnosti ve smyku byly zjištěny pro povrch broušení a povrch čelně frézovaný. Nejhorší výsledky byly pro povrch hoblovaný tupými noži během mokré fáze. Ve srovnání pro tupé a ostré nože v procesu hoblování pro opakovaně vyschnuté vzorky bylo zjištěno, že vyšší podélnou pevnost ve smyku měly vzorky upravené hoblováním s ostrými noži, je tedy doporučeno ve výrobě používat pro hoblování ostré nože v součástích stroje (Kläusler a kol. 2014).

### 3.14 Výhody a nevýhody lepení

Lepení se využívá v případech, kdy je žádáno, aby nebyla narušena celistvost spojovacích dílů. Zároveň při použití adhesiva nezvyšuje výrazně hmotnost lepeného souboru, spoj může tlumit vibraci v konstrukci a zvyšovat tuhost konstrukce. Ceněný je i estetický vzhled lepeného spoje. Velmi důležitý je i fakt, že při zatížení se napětí rozkládá po celé ploše a spoj má tedy schopnost rovnoměrně přenést statické i dynamické zatížení, které se nesoustředí na malou plochu, jako je to kupříkladu u šroubových spojů. (Kubista 2020, Kytka 2019, Havelka 2011, Jiráček 2011, Brockmann 2009)

Mezi negativní hodnocení lepených spojů patří, že povrch adherendu musí být důkladně čistý, zbavený od prachu a dalších nečistot, které by mohly negativně ovlivnit lepící proces. Pro některé povrchy, které jde hůře lepit, je doporučeno speciální úpravy povrchu. Za špatné vlastnosti lepeného spoje je brán i fakt, že spoj je nedemontovatelný a že spoje bývají často málo odolné proti odlupování. Některé

reaktivní složky adhesiv jsou časově omezeny. Lepení je někdy náročné pro průmyslové využití ve smyslu komplexního vybavení provozu (Kytka 2019, Červenka 2012, Havelka 2011, Brockmann 2009).

### **3.15 Shrnutí literární rešerše**

Na základě literární rešerše bylo zjištěno, že nejvhodnější variantou lepení listnatého dřeva je adhesivum na bázi PUR, které je prakticky vhodné pro lepení konstrukčního i nekonstrukčního dřeva. PUR adhesivum disponuje vysokou únosností, umožňuje jednoduchý systém aplikace a vytvrzování bez nutnosti zvýšené teploty. Avšak další parametry adhesiva by mohly být zlepšeny přidáním termosetu, a to je téma této akademické práce zjistit, zda a jak je toho možné dosáhnout. Typ použitého termosetu k těmto účelům byla epoxid-fenolová pryskyřice. Proces lepení lze zvýšit i vhodnou formou úpravy povrchu, jako je například hoblování či broušení.

## 4 Metodika práce

Metodika práce byla zpracována na základě norem odpovídajících ke stanovení podélné pevnost ve smyku, smáčení a drsnosti. Tedy norma ČSN EN 302-1. Dále pak norma pro měření drsnosti ČSN EN ISO 21920-2. Pro klasifikaci výsledků pevností použitých jednosložkových adhesiv byla použita norma ČSN EN 15425.

### 4.1 1. fáze výroby vzorků

Výroba vzorků byla provedena v laboratoři zpracování biomateriálů, Fakulty lesnické a dřevařské, České zemědělské univerzity v Praze. Z prizmy dubu, buku a akátu byly nejdříve řezány 1000 mm dlouhé kusy pomocí kotoučové zkracovací pily, následně byly tyto kusy řezány na úzké pásy o tloušťce 7 mm na kotoučové formátovací pile SCM si 400 Class (SCM Group S.P.A., Itálie). Soubor těchto polotovarů byl rozdělen na dvě skupiny, skupinu 1 pro hoblování na tloušťkovací frézce SCM s630 Class (SCM Group S.P.A., Itálie) z obou stran s úběrem 0,5-1 mm, dokud plochy nebyly správně opracované na tloušťku 4 mm. Rychlost podávacího pásu byla 4,5 m/min. Druhá skupina byla broušena na širokopásové brusce SCM sandya 300 (SCM Group S.P.A, Itálie) také z obou stran s úběrem 0,1-0,2 mm, dokud obě dvě plochy nebyly správně zbroušené na tloušťku 4 mm.

Broušené a hoblované lamely byly rozděleny na skupiny referenční, lamely ošetřené hloubkovou penetrací a na lamely ošetřené hloubkovou penetrací a s přidáním termosetického polymeru do adhesiva. Následně byly vzorky klimatizovány v klimatizační komoře alespoň po dobu 7 dnů, až poté byly vytaženy a byly použity k testování dle normy. Nastavené podmínky komory byly 20 °C a relativní vlhkost vzduchu 65 %, tělesa byla v komoře umístěna do ustálení hmotnosti. Tyto parametry odpovídají zhruba 12 % vlhkosti dřeva. Po klimatizování byly vzorky použity k měření smáčení povrchu a k měření drsnosti. Soubor lamel byl poté použit k lepení a pro výrobu vzorků pro testování pevnosti ve smyku.

Vzorky na referenční měření smáčení a drsnosti povrchu byly vyřezány paralelně za sebou z prizmy, ze které byly řezány vzorky na měření pevnosti ve smyku. Tato tělesa byla vyřezána ze dřevin dubu, akátu a buku. Pro referenční tělesa bez úpravy, hoblovaný a broušený vzorek, a pro tělesa s aplikací hloubkové penetrace,



poslední zkoumaný soubor byl s aplikací hloubkové penetrace a s přidáním termosetického polymeru do adhesiva.

### **Použitý termoset**

Parametry termosetu, který byl použit v této akademické práci jsou popsány v následující tabulce č. 4. Chemický název termosetu použitého v této akademické práci je epoxy-fenolová pryskyřice ( $-\text{CH}_2-(\text{C}_2\text{H}_3\text{O})$ ). Termoset byl použit ve formě prášku. Cena termosetu se neudává.

**Tabulka 4 Parametry použitého termosetu (podle Holeček a kol. 2023)**

<b>Parametr</b>	<b>Hodnoty</b>
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	1620
Barva	černá
Velikost částic [nm]	1–60

### **Použitá penetrace**

Penetrace, která byla použita k úpravě povrchu má chemický název metylester kyseliny akrylové ( $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_2$ ). Jedná se o penetraci NANO hloubkovou s cenou zhruba 55,21 Kč s DPH za 1 Kg ke dni 24.03.2023. (INVA Building Materials s.r.o., Česká republika)

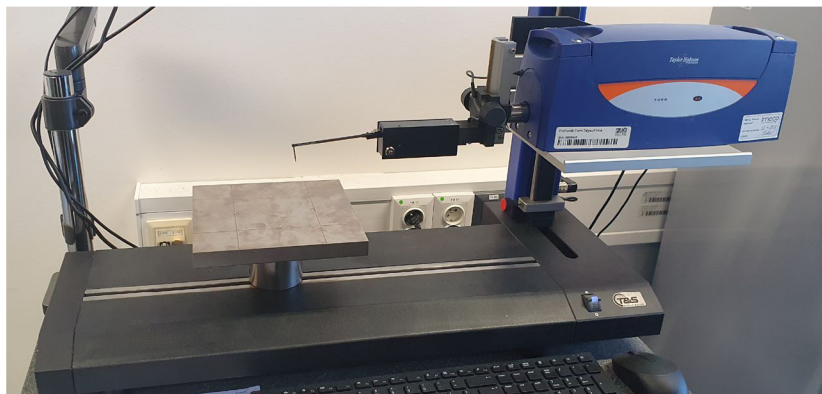
**Tabulka 5 Parametry použité penetrace (podle Holeček a kol. 2023)**

<b>Parametr</b>	<b>Hodnoty</b>
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	1050
Barva	bezbarvá
Viskozita [mPas]	1100-1600

### **Měření drsnosti**

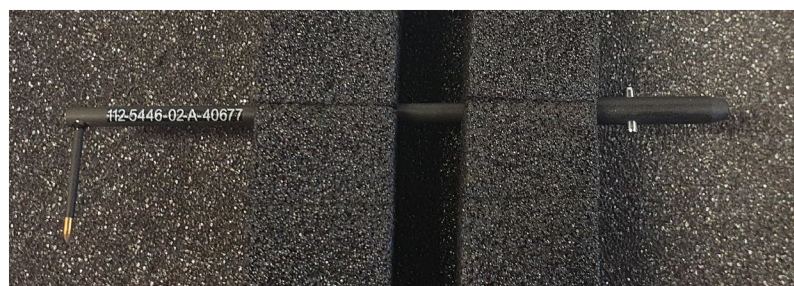
Měření drsnosti bylo provedeno na stroji Form Talysurf 50 (Ametek Inc., USA) viz obrázek č. 18, kde se měřila drsnost kontaktním způsobem, měřený úsek byl

20 mm a měřené místo bylo vždy označeno na jednotlivých lamelách v místech, která byla použita jako místa pro měření pevnosti ve smyku v následujících měřeních. Na obrázku č. 21 je vyfoceno a následně i popsán kód měřícího zařízení.



**Obrázek 18 Form Talysurf 50**

*Zdroj: vlastní*



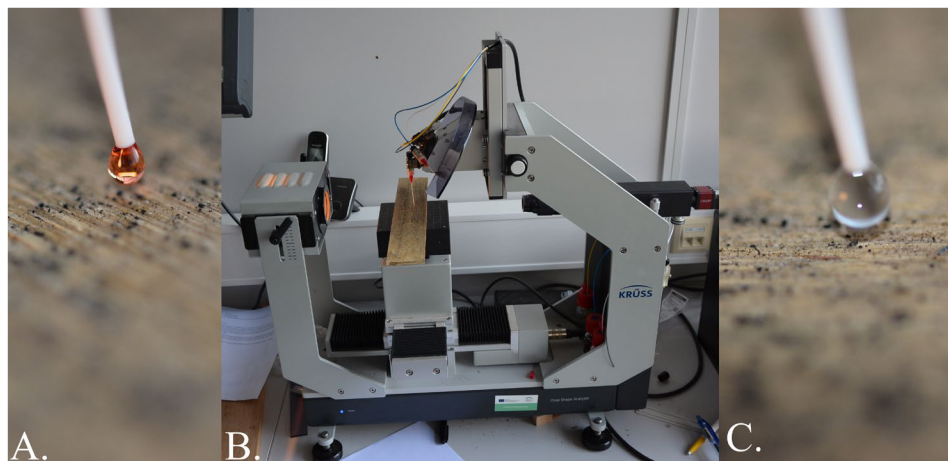
**Obrázek 19 Označení měřícího zařízení**

*Zdroj: vlastní*

Kód měřícího zařízení byl 112-5446-02-A-40667.

## **Měření smáčení**

Smáčení bylo měřeno na přístroji Krüss DSA30E (A. Krüss Optronic GmbH, Germany) metodou přisedlé kapky. Pro měření byly použity dvě kapaliny, polární kapalina, tedy voda a nepolární kapalina, diiodmethan. Kapka byla umístěna na povrch lamely a po 5 vteřinách se měřil opticky kontaktní úhly svírající mezi kapalinou a povrchem lamely. Ke stanovení celkového povrchového napětí byla použita metoda OWRK (Owens-Wend-Rabel-Kaeble).



**Obrázek 20 Přístroj na měření smáčení a ukázka použitých kapalin**

*Zdroj: vlastní*

Na obrázku číslo 22 je v levé části označené A ukázka aplikování diiodmethanu pro měření smáčení povrchu. Ve středu obrázku označeném B je samotný přístroj, na kterém se smáčení měřilo. Poslední část obrázku C demonstruje aplikování vody pro měření smáčení.

## **4.2 2. fáze výroby vzorků**

Lamely vyřezané v první fázi výroby byly očištěny od prachu a následně byly polotovary lepeny čistě polyuretanovým adhesivem, další část byla lepena adhesivem s aplikací hloubkové penetrace na povrch adherendu, poslední část byla lepení s aplikací hloubkové penetrace adherendu a pomocí adhesiva s 10 % přídavkem termosetu podle hmotnosti. Lepený soubor o 5 lamelách byl vložen do lisu a byl nechán k vytvrzení po dobu 120 minut.

Po vytvrzení byly takto dvě slepené lamely omítnuty na formátovací kotoučové pile SCM si 400 Class z jedné strany a následně byly vyřezány lišty o šířce 20 mm. Z jedné lišty dlouhé 1000 mm bylo vyřezáno 6 vzorků o celkové délce 900 mm (150 mm každý vzorek). Naposledy byly na stejné formátovací kotoučové pile prořezány kotoučem spáry ve vzdálenosti 10 mm tak, aby vzorek splňoval podmínky normy ČSN EN 302-1 o zkušební ploše vzorku 10 x 20 mm. Vzorky byly poté dány do sušící komory na 120 °C a 1 hodinu k aktivaci termosetického polymeru v adhesivu.

Kódování pro vzorky bylo pro dřeviny číselně 1 = akát, 2 = dub a 3 = buk, povrchová úprava 1 = hoblované, 2 = broušené, a způsob lepení A = adhesivum a PTA = penetrace, termoset a adhesivum a následně pozice v lamelě 1-6 levá strana, 7-12 pravá strana. Kód mohl mít například podobu 11A6, kdy 1 je pro akát, další 1 je pro hoblovaný povrch, A je referenční adhesivum a 6 je levá strana lamely, konec lamely. Počet kusů pro jeden testovací soubor byl 16, variabilní parametry byly 3 dřeviny, 2 modifikace povrchu, 3 druhy lepení a 2 typy podmínek odolnosti. Celkově tedy bylo 16 x 36, tedy 576 vzorků.

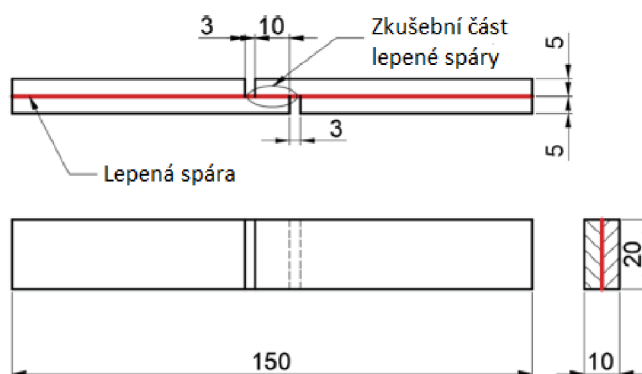
Vzorky byly vyrobeny o rozměrech  $150 \pm 2$  mm délka,  $20 \pm 0,2$  mm šířka a  $10 \pm 0,1$  mm tloušťka. Délka testovací spáry je 10 mm a její šířka je 20 mm, úhel svírající letokruhy s lepenou plochou lamely je mezi  $30-85^\circ$ . Vlhkost vzorků by měla být zhruba 12 % po klimatizování 7 dní při teplotě  $20^\circ\text{C}$  a relativní vzdušné vlhkosti 65 %. Adhesivum se nanáší na jednu lamelu z lepeného souboru a je rovnoměrně rozprostřeno po celé ploše lepené spáry, dle normy ČSN EN 302-1.

### **Použité adhesivum PUR (Kestopur 1030)**

Pro lepení bylo použito jednosložkové polyuretanové adhesivum (PUR) s obchodním názvem Kestopur 1030 (Kiilto Family Oy, Finland). Adhesivum má chemický název polymerní methylen-difenyl diisokyanát ( $\text{C}_{15}\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}_2$ ). Toto adhesivum bylo použito pro lepení jednotlivých polotovarů k vytvoření zkušebního tělesa viz následující obrázky č. 21 a 22. Parametry adhesiva jsou popsány v následující tabulce č. 3.

**Tabulka 3 Parametry adhesiva Kestopur 1030 (podle Holeček a kol. 2023)**

Parametr	Hodnoty
Třída odolnosti	D4
Barva	běžová
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	1100
Viskozita [mPas]	7000
Spotřeba [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]	150–300
Otevřený čas	max. 30 min., pro 20 °C
Lisovací čas	90–120 min., pro 20 °C
<b>Potřebný tlak</b>	0,5 – 1 $\text{N}/\text{mm}^2$
<b>Vlhkost dřeva [%]</b>	10–20 (doporučená 14)



**Obrázek 21 Schéma zkušebního tělesa**

*Zdroj: převzato z Holeček a kol. 2023*



**Obrázek 22 Vzorová podoba zkušebního tělesa**

*Zdroj: vlastní*

## Podélná pevnost ve smyku při tahovém namáhání

Tato zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 302-1. Zkouška byla provedena na přístroji UTS 50 (UTS Testsysteme GmbH & Co. KG, Německo) viz obrázek č. 23. Zkušební vzorek byl upnut v přístroji tak, že 50 mm vzorku bylo upnuto v čelistech. Vzorek byl uchycen tak, že podélná osa vzorku byla rovnoběžná se silou zatěžování. Rychlost posuvu byla nastavena na 50 mm/min. Zkouška byla ukončena porušením vzorku a byla změřena maximální použitá síla v Newtonech (N). Po dosazení do vzorce pro výpočet pevnosti ve smyku, byla dosazena hodnota maximálního napětí vyvinutého ve vzorku.

### Rovnice 6 Výpočet pevnosti ve smyku

$$\tau = \frac{F_{\max}}{l_2 * b}$$

$\tau$  pevnost ve smyku v Newtonech na milimetr čtvereční (N/mm<sup>2</sup>)

$F_{\max}$  nejvyšší vyvinutá síla v Newtonech (N)

$l_2$  délka zkušební povrchu tělesa v milimetrech (mm)

$b$  šířka zkušební povrchu tělesa v milimetrech (mm)

Dle normy byly lepené vzorky testovány dle následující tabulky podle podmínek A1 a A2 viz následující tabulka č. 3. Zkouška těchto dvou podmínek je dostačující ke stanovení pevnosti lepeného spoje pro konstrukční účely. Další typy podmínek mohou být v rámci doplnění této práce.



Obrázek 23 Přístroj UTS 50

**Tabulka 3 Typy a doba podmínek ošetření pro zkoušku pevnosti ve smyku (dle normy ČSN EN 302-1)**

Označení	Podmínky ošetření pro vzorky
A1	Klimatizování vzorků do doby ustálení vlhkosti ve vzorku za podmínek v komoře (20 °C a rel. vlhkost vzduchu 65 %)
A2	4 dny namočení vzorků ve vodě o teplotě (20 ± 5) °C Zkouška ještě vlhkých vzorků
A3	4 dny namočení vzorků ve vodě o teplotě (20 ± 5) °C Klimatizování vzorků do doby ustálení vlhkosti ve vzorku za podmínek v komoře (20 °C a rel. vlhkost vzduchu 65 %) Zkouška suchých vzorků
A4	6 hodin ponoření vzorků ve vařící vodě 2 hodiny dny namočení vzorků ve vodě o teplotě (20 ± 5) °C Zkouška ještě vlhkých vzorků
A5	6 hodin ponoření vzorků ve vařící vodě 2 hodiny dny namočení vzorků ve vodě o teplotě (20 ± 5) °C Klimatizování vzorků do doby ustálení vlhkosti ve vzorku za podmínek v komoře (20 °C a rel. vlhkost vzduchu 65 %)
A6	72 hodin v 50 °C a vzorky zabalené v hliníkové folii Vzorky testovány za tepla ve zkušební komoře s řízenou teplotou (50 ± 2) °C
A7	72 hodin v 70 °C a vzorky zabalené v hliníkové folii Vzorky testovány za tepla ve zkušební komoře s řízenou teplotou (70 ± 2) °C
A8	72 hodin v 90 °C a vzorky zabalené v hliníkové folii Vzorky testovány za tepla ve zkušební komoře s řízenou teplotou (90 ± 2) °C

## 5 Výsledky a diskuze

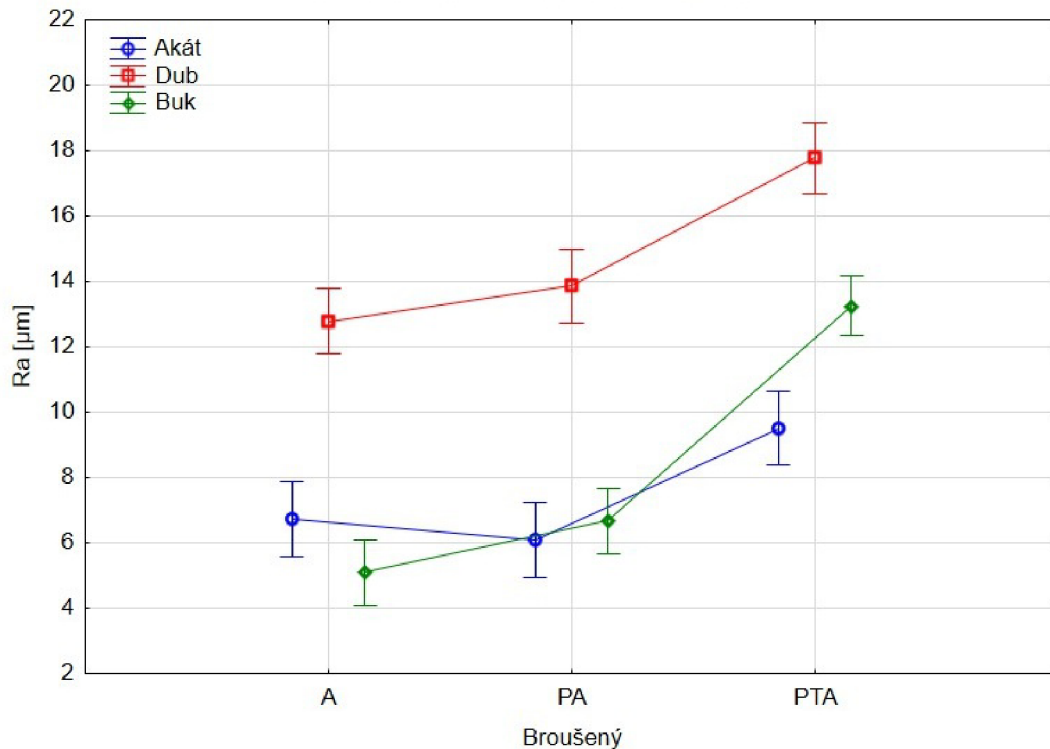
Tato práce má za cíl posouzení úpravy PUR adhesiva s termosetickým polymerem s kombinací úpravy povrchu adherendu broušením a hoblováním pro použití lepeného lamelového dřeva. Zkoušky byly provedeny na dřevu buku, dubu a trnovníku akátu. V rámci závěrečné práce bylo využito statistických nástrojů vícefaktorové analýzy ANOVA pro stanovení vlivu jednotlivých faktorů na výslednou pevnost ve smyku. Dále byly provedeny korelace pro pevnost ve smyku, způsobu lepení a použitých druhů dřevin. V poslední řadě byly statistické soubory, každý zvlášť, vyhodnoceny z hlediska aritmetických průměrů a jejich variabilit směrodatnou odchylkou.

Výsledky byly zpracovány v programu Statistica 14 (StatSoft Inc., USA). Předtím, než se začalo s vypracováním jednotlivých dat pro tvorbu grafů, byl použit Grubbsův test pro vyloučení extrémních hodnot.

Statistika je rozčleněna pro skupiny vzorků, které byly klimatizovány a máčeny a pro úpravu povrchu broušením a hoblováním. Rozdělení bylo provedeno z důvodu toho, že pevnost ve smyku byla vypočtena pro výše zmíněné skupiny, a tak statistika byla rozčleněna do stejných skupin. Toto rozdělení je výhodnější pro analýzu povrchu před lepením a pro srovnání pevnostní charakteristiky s vlastnostmi úpravy povrchu. Statistika byla tedy rozdělena pro drsnost parametrů Ra, Rz, Rsm, dále kontaktní úhel vody a diiodmethanu a jako poslední povrchová energie.

Základní výsledky jsou popsány v této kapitole, zbylé výsledky jsou součástí přílohy taktěž s tabulkami všech měření, jejich aritmetické průměry a směrodatná odchylka daných souborů měření.

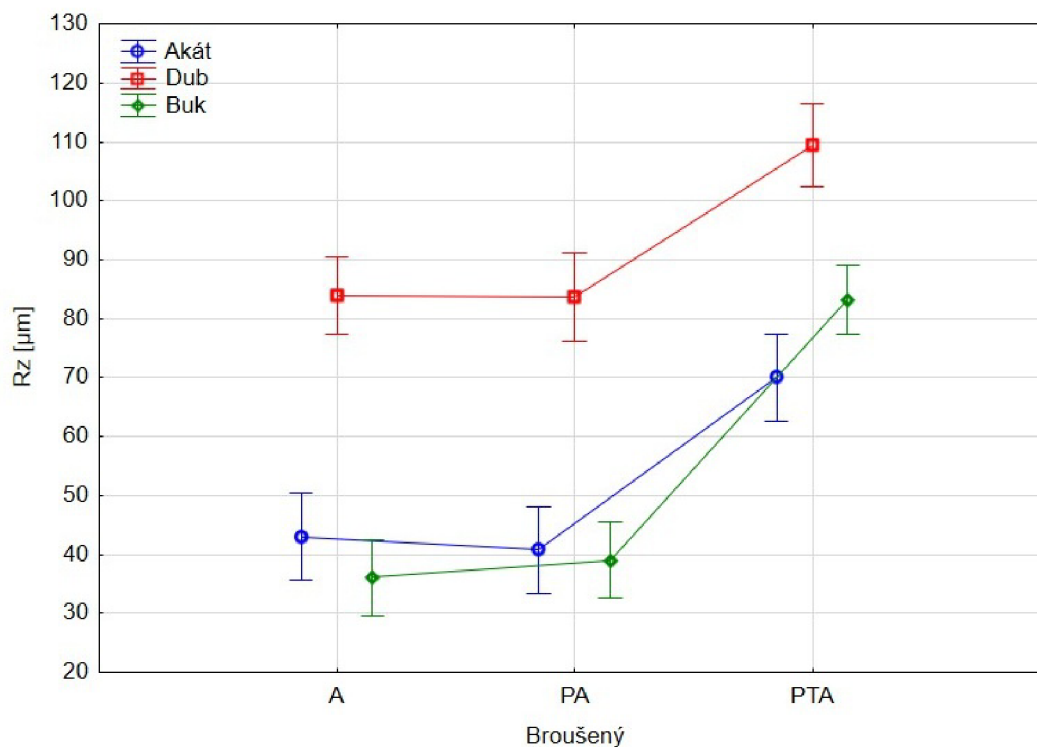




**Graf 1 Parametr drsnosti Ra máččených vzorků broušených**

Vysvětlivky pro zkratky nacházející se v následujících grafem jsou A – Referenční adhesivum, PA – Hloubková penetrace a adhesivum a PTA – Hloubková penetrace a modifikované adhesivum termosetickým polymerem. Jedná se o způsoby lepení ležící na ose X v grafech.

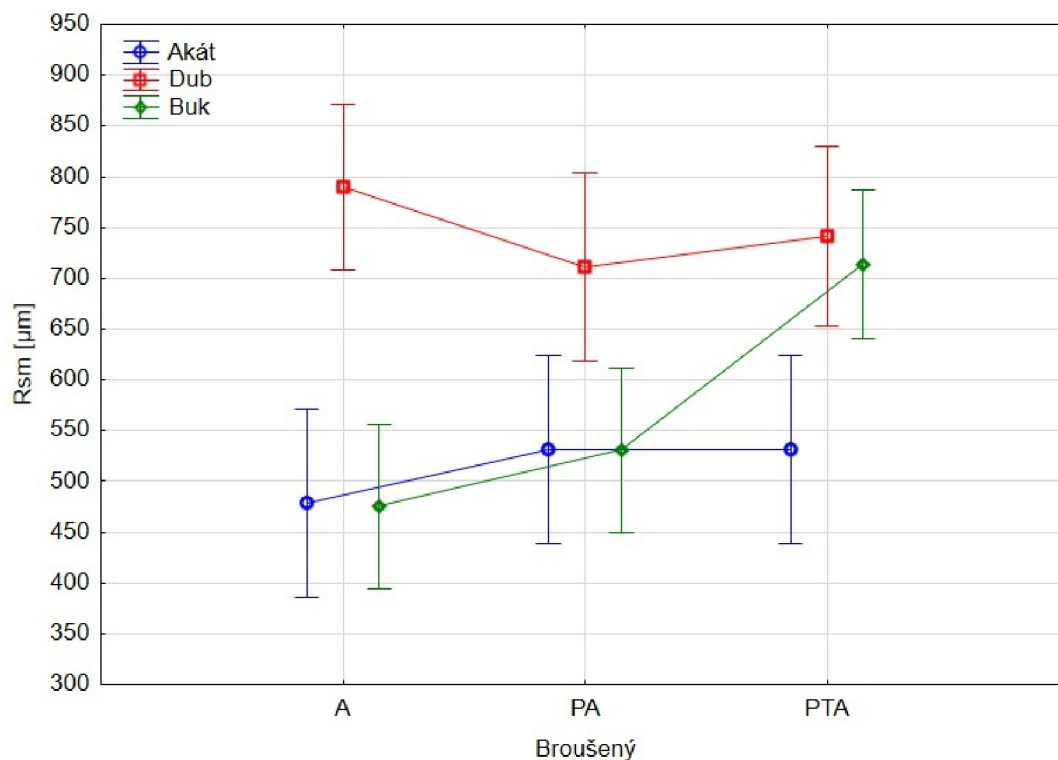
V případě parametru drsnosti povrchu Ra lze říci, že parametr Ra zřetelně vzrostl pro typ lepení s modifikací povrchu hloubkovou penetrací a s podílem termosetického polymeru v adhesivu oproti lepením pouze adhesivem na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Významné je tedy modifikování adhesiva termosetickým polymerem, protože v některých případech je zaznamenám pokles parametru Ra vlivem hloubkové penetrace povrchu jak broušeného, tak hoblovaného.



**Graf 2 Parametr drsnosti Rz máččených vzorků broušených**

Parametr drsnosti Rz prokazatelně vzrostl ve všech případech při způsobu lepení s modifikací povrchu hloubkovou penetrací s podílem termosetického polymeru v adhesivu oproti lepením pouze adhesivem na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . To je pravděpodobně způsobeno obsahem termosetického polymeru, protože pouhou chemickou modifikací se výrazně neměnil parametr drsnosti povrchu, až na případ klimatizovaného, hoblovaného vzorku dubu, který měl po aplikaci hloubkové penetraci klesající tendenci, ale aplikováním modifikovaného adhesiva termosetickým polymerem jeho hodnota vzrostla nad úroveň referenční hodnoty.

Jelikož má graf podobný trend pro oba dva parametry drsnosti Ra i Rz, lze tento jev popsat podobně. Zřejmě přidáním termosetického polymeru došlo k významnému nárůstu drsnosti povrchu.

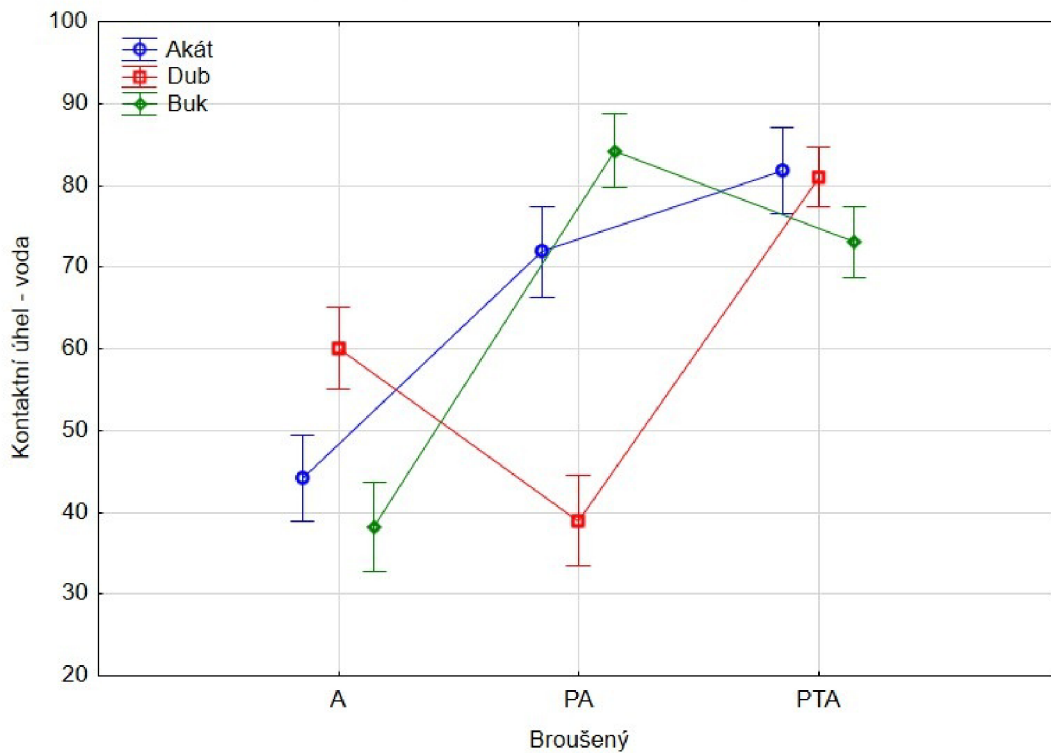


**Graf 3 Parametr drsnosti Rsm máčených vzorků broušených**

Pro parametr drsnosti Rsm je změna vlivem modifikace broušeného povrchu nevýznamná pro většinu případů až na povrch buku, na který byla aplikována hloubková penetrace s přidáním termosetického polymeru. V tomto případě je nárůst parametru drsnosti Rsm významný s porovnáním broušeného povrchu bez modifikace. Další grafy pro parametry drsnosti Ra, Rz a Rsm pro jednotlivé soubory (broušené, hoblované, klimatizované a máčené) lze najít v příloze 2 až 5 této práce.

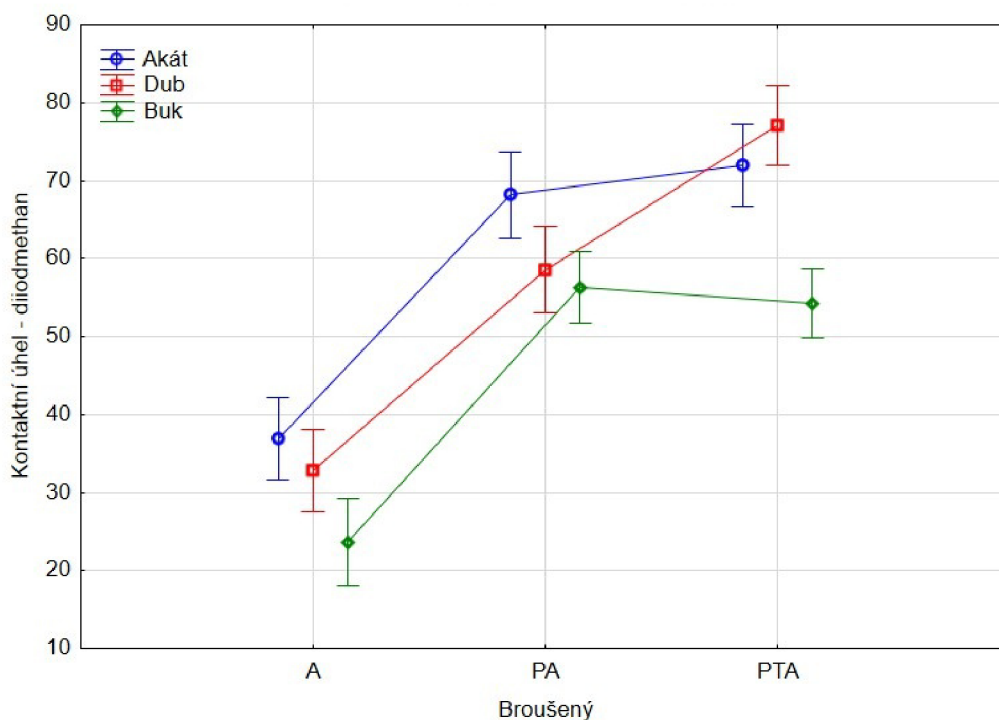
Pro parametry drsnosti Ra, Rz a Rsm pro soubor vzorků, které byly lepeny pouze adhesivem platí, že všechny tyto 3 parametry nabývají nižších hodnot pro úpravu broušením. Hodnoty těchto parametrů jsou vyšší pro tělesa, která byla hoblována. Je to dáno tím, že broušení, které bylo vytvořeno menším úběrem, vytváří kvalitněji opracovaný povrch než povrch, který byl vytvořen hoblováním. Hoblovací nože totiž ubírali větší množství hmoty a tyto nože občas mačkaly vrstvy dřeva a tím vytvářely hrubší povrch, který ovšem nemá takové kvalitativní parametry jako povrch vytvořený broušením.

Tyto výsledky jsou potvrzeny jiným výzkumem, který potvrzuje, že parametry Ra a Rz mají nižší hodnoty pro úpravu povrchu broušením než pro úpravu povrchu hoblováním (Kilic a kol. 2006).



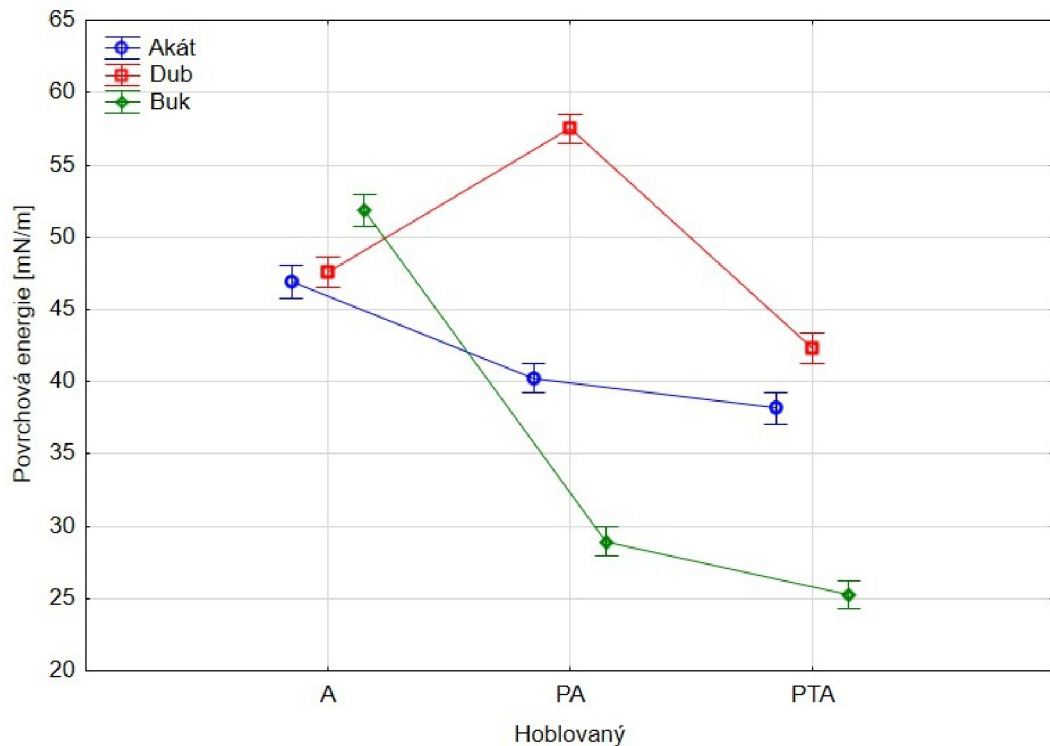
**Graf 4 Kontaktní úhel vody klimatizovaných vzorků broušených**

Výsledky kontaktního úhlu vycházejí příznivě pouze v případě dubu při aplikaci hloubkové penetrace povrchu dřeva dubu vzhledem k referenčnímu lepení. Lze konstatovat, že dřevo dubu, je nejlepší pouze aplikace hloubkové penetrace pro zlepšení smáčení polárních kapalin. Aplikací termosetického polymeru dochází ke zhoršení schopnosti materiálu vsakovat polární kapaliny až na dřevo buku, které smáčí polární kapaliny lépe po přidání termosetického polymeru. Po aplikaci hloubkové penetrace dřevo dubu lépe smáčí polární kapaliny vzhledem k referenčnímu povrchu. Avšak téměř ve všech případech bylo smáčení horší než bez úpravy povrchu.



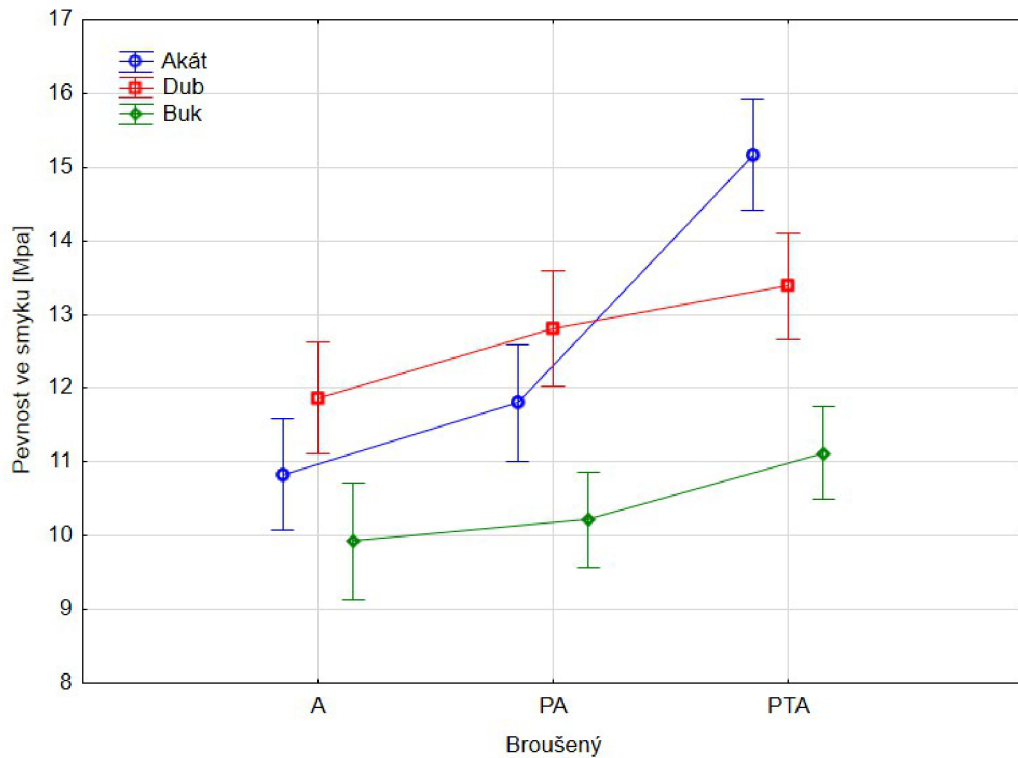
**Graf 5 Kontaktní úhel diiodmethanu klimatizovaných vzorků broušených**

V rámci smáčení nepolární kapaliny diiodmethanu je tendence podobná. Vlivem hloubkové penetrace dochází ke zhoršení smáčení povrchu oproti referenčnímu povrchu lepeném bez úpravy. Pro dřevo buku dochází k mírnému zlepšení smáčení povrchu vlivem modifikace adhesiva termosetickým polymerem. Lze tedy říci, že v obou případech měření polární i nepolární kapalinou pro broušený povrchu buku platí, že aplikací modifikovaného adhesiva termosetickým polymerem, dochází ke zlepšení smáčení povrchu kapalinami oproti povrchu modifikovaného hloubkovou penetrací.



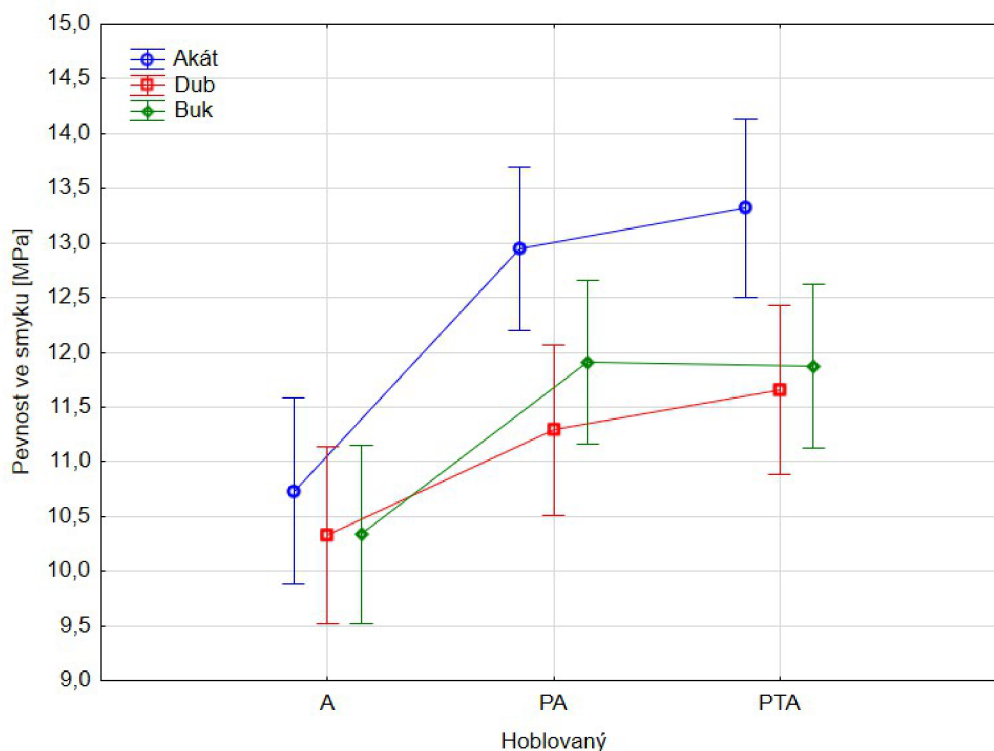
**Graf 6 Povrchová energie klimatizovaných vzorků hoblovaných**

Vlivem hloubkové penetrace povrchová energie pouze v případě dubu měla ve všech lepených souborech tendenci růstu. Vlivem přidání termosetického polymeru do adhesiva ovšem povrchová energie klesala nicméně přidáním termosetického polymeru bylo zabráněno výrazným změnám povrchové energie ve většině případů na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Pro použití do praxe je tedy vhodná úprava dřeva dubu pouze hloubkovou penetrací, pokud je hledána schopnost povrchu zvýšení povrchové energie. Vlivem modifikovaného adhesiva termosetickým polymerem a hloubkovou penetrací povrchu se povrchová energie dubu a akátu významně neliší od referenčního povrchu bez úpravy.



**Graf 7 Pevnost ve smyku klimatizovaných vzorků broušených**

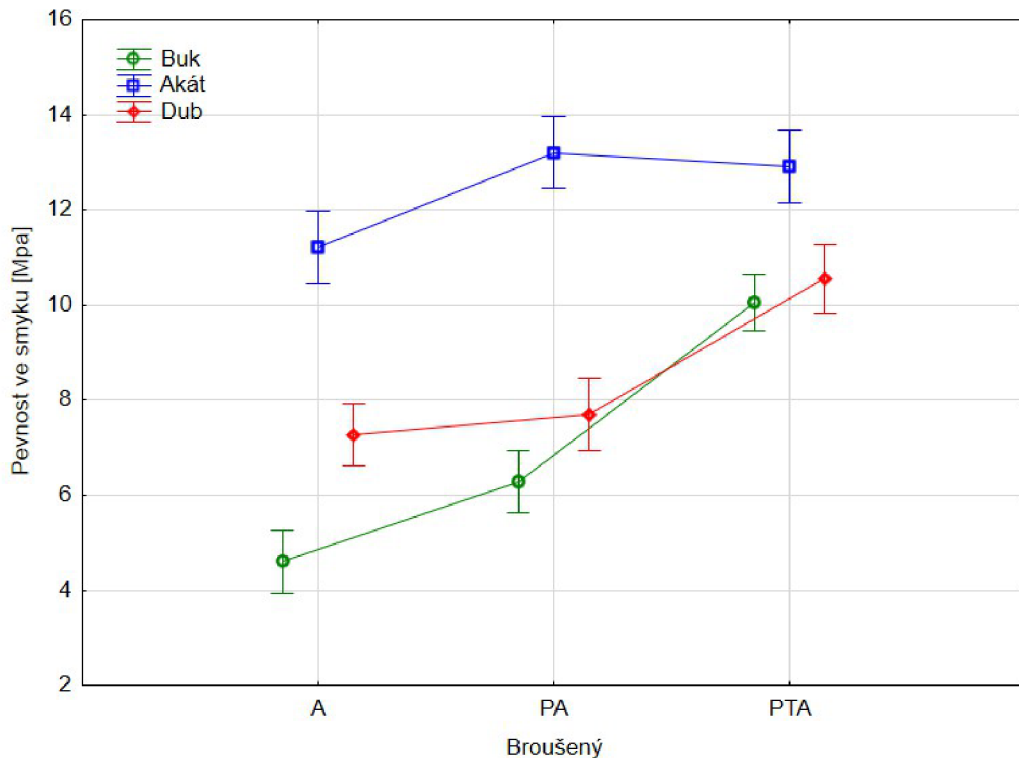
Závislost pevnosti ve smyku na typu opracování povrchu dřeva před lepením prezentují grafy 7 a 8. Z grafů 7 a 8 je patrné, že penetrací povrchu roste pevnost spoje ve smyku jak pro broušené, tak i pro hoblované vzorky za využití podmínek zkoušení A1 dle normy ČSN EN 302-1. Při použití hloubkové penetrace povrchu a modifikací adhesiva termosetickým polymerem roste také ve všech případech pevnost ve smyku, kromě vzorků hoblovaného buku. V případě hoblovaných vzorků buku s modifikací povrchu hloubkovou penetrací a přidáním termosetického polymeru do adhesiva je pevnost ve smyku nižší ve srovnání s pevností ve smyku vzorků buku bez přidání termosetického polymeru, ale s modifikací hloubkovou penetrací. Pevnost lepeného spoje ve smyku u broušeného povrchu dřeva v porovnání k pevnosti u hoblovaného povrchu je statisticky významně vyšší ve většině případů na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Například pro lepení modifikovaným adhesivem termosetickým polymerem a aplikací hloubkové penetrace je hodnota pevnosti ve smyku pro broušené vzorky dřeva dub 13,39 MPa a pro vzorky dubu o stejném typu lepení, ale hoblovaném povrchu je průměrná pevnost 11,66 MPa. Další hodnoty k porovnání výsledků jsou obsahem přílohy č. 1.



**Graf 8 Pevnost ve smyku klimatizovaných vzorků hoblovaných**

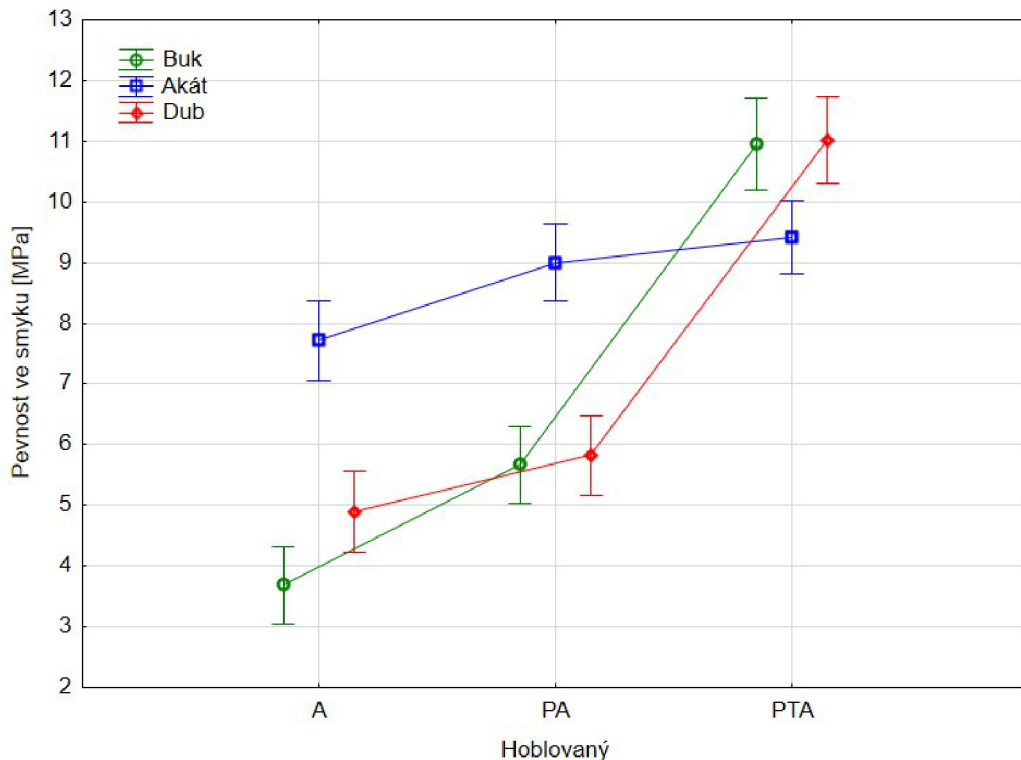
Akát vykazuje lepší vlastnosti lepeného spoje hoblovaných vzorků pro typ lepení s hloubkovou penetrací povrchu, avšak pro typ lepení penetrace povrchu s přidáním termosetického polymeru, jsou lepší výsledky pevnosti pro akát broušený. Buk má vyšší hodnotu smyku při úpravě povrchu hoblováním. Všechny vzorky vykazují ovšem větší rozptyl výsledků pro hoblování povrchu než pro broušení. Lze tedy usoudit, že ve většině případů je vhodnější úprava broušením, jelikož má nižší rozptyl výsledků a pro modifikaci adhesiva termosetickým polymerem a úpravou povrchu penetrací má lepší výsledky pro akát i dub. Vliv hloubkové penetrace na pevnost ve smyku vlivem neutralizace povrchu jádrového dřeva od taninů dokládá článek z roku 2021 od Blanchet a Pepin (Blanchet a Pepin 2021)





**Graf 9 Pevnost ve smyku máčených vzorků broušených**

V porovnání grafů č. 9 a č. 10 lze pozorovat, že pro vzorky máčené podle kategorie zkoušky A2 dle normy ČSN EN 302-1, je pevnost ve smyku vyšší ve všech případech pro broušené vzorky, až na vzorek akátu. Akát má ve všech případech nevýznamný nárůst, či pokles pevnosti ve smyku vlivem úpravy povrchu hloubkovou penetrací, či úpravou povrchu i modifikací adhesiva termosetickým polymerem. Ve všech případech pevnost ve smyku roste při použití hloubkové penetrace povrchu oproti referenčnímu lepení adhesivem. Pevnost ve smyku roste významně pro dřevo buku a dubu při aplikaci hloubkové penetrace a modifikací adhesiva termosetickým polymerem oproti referenčnímu lepení. Například pro dub je průměrná hodnota pevnosti ve smyku referenčního lepení máčených vzorků 7,27 MPa a po aplikaci povrchu hloubkovou penetrací a modifikací adhesiva termosetickým polymerem, je hodnota pevnosti ve smyku 10,55 MPa. Dokonce buk, jehož průměrný výsledek pevnosti ve smyku máčených vzorků byl pro referenční lepení pouze 4,60 MPa, vzrostla hodnota pevnosti ve smyku po aplikaci hloubkové penetrace a modifikací adhesiva termosetickým polymerem na průměrnou hodnotu pevnosti ve smyku 10,04 MPa.



**Graf 10 Pevnost ve smyku máčených vzorků hoblovaných**

Významný nárůst pevnosti ve smyku vykazovaly vzorky dubu a buku, jenž měly úpravu povrchu hoblováním. Tyto vzorky měly s přidáním termosetického polymeru nárůst pevnosti ve smyku o více než 100 %. Průměrná hodnota pevnosti ve smyku vzorků dubu, máčených a hoblovaných pro referenční lepení je 4,90 MPa a výsledek pevnosti ve smyku po hloubkové penetraci povrchu a modifikaci adhesiva termosetickým polymerem je 11,02 MPa. Pro máčené, hoblované vzorky buku je referenční hodnota 3,69 MPa a průměrná hodnota pevnosti ve smyku pro vzorky s hloubkovou penetrací a modifikací adhesiva termosetickým polymerem je 10,95 MPa.

Podobné výsledky v rozdílu pevnosti ve smyku hoblovaných a broušených vzorků potvrzují výsledku článku, který úpravu povrchu rozšiřuje o čelní frézování, které má ještě lepší vlastnosti než broušení. V článku autoři potvrzují, že broušením povrchu je lepší povrchová úprava pro lepení než hoblování. Avšak článek porovnával vzorky pro podmínky A1 (klimatizované), A4 (podmínky pro mokré vzorky ve vařící vodě) a A5 (pro typ podmínek A4 doplněn o znovu klimatizování vzorků) dle stejné normy, jako byla použita v této práci, EN 302-1 (Kläusler a kol. 2014).

**Tabulka 4 Korelace pro soubor klimatizované, broušené vzorky (zdroj vlastní)**

	Druh dřeva	Způsob lepení	Pevnost ve smyku [MPa]
Druh dřeva		0,527	0,000
Způsob lepení	0,527		0,000
Pevnost ve smyku [MPa]	0,000	0,000	

Tato tabulka č. 4 ukazuje vzájemnou korelaci mezi dílčími parametry, které jsou zaznamenány v tabulce. Červená barva označuje korelaci významnou a modrá barva korelaci nevýznamnou. Škála korelace je 0–1 hodnoty p pro korelaci, kde 0 je velmi významné (červená barva), nad 0,1 (světle modrá) už je korelace méně významná až po 1 zcela nevýznamná korelace (modrá barva).

Z tabulky lze říct, že pevnost ve smyku závisí na druhu dřeva a způsobu lepení, a to zcela významně na hodnotě  $p = 0,000$  pro soubor vzorků klimatizovaných broušených. Další tabulky korelace pro jiné lepené soubory jsou obsahem přílohy č. 6.

Tabulka 5 Výsledky měření pro klimatizované vzorky lepené pouze adhesivem (zdroj vlastní)

	Výpočet pevnosti [Mpa]	Ra [μm]	Rz [μm]	RSm [μm]	Kontaktní úhel voda	Kontaktní úhel diiodo- methane	Povrchová energie [mN/m]	
<b>Aritmetický průměr</b>	10,83	5,75	39,51	539,47	44,23	36,95	61,78	Akát broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	0,64	0,84	6,29	169,22	13,24	10,39	9,85	
<b>Aritmetický průměr</b>	10,73	6,23	45,24	1051,46	68,61	46,51	46,89	Akát hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,31	0,74	3,37	128,46	6,96	6,92	0,24	
<b>Aritmetický průměr</b>	11,87	12,00	77,42	637,99	58,72	32,89	53,66	Dub broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,04	1,56	8,75	178,78	5,71	4,53	0,90	
<b>Aritmetický průměr</b>	10,33	12,96	87,74	1742,50	67,58	41,34	47,56	Dub hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,10	3,91	23,57	939,36	7,31	8,46	1,54	
<b>Aritmetický průměr</b>	10,34	4,75	31,37	789,55	60,68	37,87	51,85	Buk hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	2,07	0,33	3,89	309,44	5,71	4,01	1,36	
<b>Aritmetický průměr</b>	9,92	4,30	29,64	508,04	38,24	23,63	67,41	Buk broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	0,95	0,33	3,42	131,66	10,21	9,34	1,24	

Tabulka č. 5 zřehledňuje veškeré výsledky měření pro daný lepený soubor. V tomto případě pro soubor vzorků klimatizovaných, lepených pouze adhesivem. Tabulka obsahuje aritmetické průměry hodnot měření a jejich směrodatnou odchylku k ukázce míry variability daného měření. Další tabulky s výsledky měření ve stejném formátu jsou obsahem přílohy č. 1 této práce, kde se nachází tabulky dalších souborů vzorků.

## 6 Závěr

V této práci je posouzena kvalita lepeného spoje metodou pevnosti ve smyku u dřeva buku, dubu a trnovníku akátu při použití PUR adhesiva modifikovaného termosetickým polymerem s kombinací úpravy povrchu adherendu broušením a hoblováním pro použití lepeného lamelového dřeva.

Z výsledků testů vyplývá, že vyšší pevnosti bylo často dosaženo při opracování povrchu dřeva před lepením broušením oproti úpravě povrchu hoblováním, avšak to neplatí pro všechny výsledky. Pro dřevo akátu je zvýšení pevnosti nejvýznamnější pro úpravu povrchu broušením pro vzorky klimatizované. Významný nárůst pevnosti ve smyku je zaznamenán pro vzorky buku a dubu s opracováním povrchu hoblováním pro máčené vzorky, i když výsledná hodnota pevnosti ve smyku je jen o kousek vyšší než pro vzorky povrchově upravené broušením. Vhodné využití modifikace adhesiva termosetickým polymerem je tedy nutno posoudit z hlediska toho, jak bude daný lepený konstrukční výrobek používán. Akát vykazuje lepší pevnost ve smyku ve všech případech pro lepení adhesivem modifikovaným termosetickým polymerem a úpravou povrchu hloubkovou penetrací s mechanickým opracováním broušením. Pokud jde tedy o použití pro dřevo dubu a buku, je vhodná modifikace povrchu hloubkovou penetrací s přidáním termosetického polymeru do adhesiva s mechanickou úpravou povrchu hoblováním.

Vyšší pevnosti ve smyku bylo dosaženo při aplikaci modifikovaného adhesiva polymerním termosetem v porovnání k adhesivu nemodifikovaného. Modifikace adhesiva termosetickým polymerem byla pozitivní pro lepení dřeva buku, dubu i trnovníku akátu oproti lepením adhesivem nemodifikovaným ve všech případech měření.

Závěrem lze sumarizovat výsledky měření tak, že modifikováním adhesiva termosetickým polymerem lze docílit lepších vlastností lepeného spoje vzhledem k pevnosti ve smyku spoje nemodifikovaného, referenčního. Tato práce je ojedinělá ve způsobu modifikace adhesiva termosetickým polymerem, a proto pro široký záběr problematiky využití modifikace adhesiva lze doporučit další výzkum v této oblasti. PUR adhesivum má předpoklady pro použití pro lepené lamelové dřevo a zároveň ho lze vhodnými způsoby modifikovat pro aplikaci pro širší spektrum využití lepení konstrukčních prvků.

## Použité zdroje

1. AICHER, Simon a Gordian STAPF. *Glulam from European White Oak: Finger Joint Influence on Bending Size Effect* [online]. 2013, 1-17 [cit. 2022-07-02]. Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/publication/261871394\\_Glulam\\_from\\_European\\_White\\_Oak\\_Finger\\_Joint\\_Influence\\_on\\_Bending\\_Size\\_Effect](https://www.researchgate.net/publication/261871394_Glulam_from_European_White_Oak_Finger_Joint_Influence_on_Bending_Size_Effect)
2. BALDWIN, Eric.  *Holding Their Own: 9 Glulam Projects That Transcend Tradition* [online]. 2022 [cit. 2022-07-03]. Dostupné z:  
<https://architizer.com/blog/inspiration/collections/glued-laminated-timber/>
3. BOCKEL, Stean, I. MAYER, J. KONNERTH, et al. The role of wood extractives in structural hardwood bonding and their influence on different adhesive systems, 2019.
4. BOCKEL, Stean, I. MAYER, J. KONNERTH, et al. Influence of wood extractives on two-component polyurethane adhesive for structural hardwood bonding, 2018.
5. BOUBLÍK, Vlastimil. *Lepidla a jejich příprava*. SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1964. ISBN 04-952-66
6. BOUŠKA, Martin. *Vliv lepidla na pevnost lepených spojů za nízkých teplot*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně.
7. BROCKMANN, Walter. *Adhesive bonding: materials, applications and technology*. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. ISBN 978-3-527-31898-8.
8. ČERVENKA, Martin. *Lepení kovů*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
9. ČSN EN 14080 (732831). *Dřevěné konstrukce - Lepené lamelové dřevo a lepené rostlé dřevo – Požadavky*. 2013
10. ČSN EN 15425 (668505) *Lepidla - Jednosložková polyurethanová (PUR) lepidla pro nosné dřevěné konstrukce - Klasifikace a funkční požadavky*. 2017
11. ČSN EN 302-1 (668531) *Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce - Zkušební metody - Část 1: Stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání*. 2013
12. ČSN EN ISO 10365 (668509) *Lepidla - Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. 2022

13. ČSN EN ISO 21920–2 (014457) *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Struktura povrchu: Profil - Část 2: Termíny, definice a parametry struktury povrchu*
14. DODIUK, Hanna. *Handbook of Thermoset plastics*. 4. SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 2021. ISBN 978-0-12-821632-3.
15. DRGA, Tomáš. *Porovnání metod hodnocení pevnosti desek z masivního dřeva*. Brno, 2015. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně.
16. DUCHÁČEK, Vratislav. *Základní pojmy z chemie a technologie polymerů, jejich mezinárodní zkratky a obchodní názvy*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1996. ISBN 80-7080-265-0.
17. *Forest Products Annual Market Review 2020-2021* [online]. 2021 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://unece.org/forests/publications/forest-products-annual-market-review-2020-2021>
18. *Forest Products Annual Market Review 2021-2022* [online]. 2022 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://unece.org/forests/publications/forest-products-annual-market-review-2021-2022>
19. GAJDOŠÍK, David. *Měření drsnosti povrchů se zaměřením na měřicí techniku Mytutoyo SJ 210*. [online]. České Budějovice, 2013 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/xoi08h/5060891>. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích Pedagogická fakulta.
20. GARDNER, Douglas J. *Wood: Surface Properties and Adhesion* [online]. 2016 [cit. 2022-09-11]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.03301-4>
21. GLAVINIC, Ivana Uzelac, Ivica BOKO, Neno TORIC a Jelena Lovrić VRANKOVIĆ. *Application of hardwood for glued laminated timber in Europe* [online]. 2020 [cit. 2022-07-02]. Dostupné z: <file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/JCE-72-2020-7-4-2741-EN.pdf>
22. Hambleton, Kelli Marie, "Synthesis and characterization of thermosetting epoxy resins from lignin-inspired phenolics" (2020). *Theses and Dissertations*. 2841. <https://rdw.rowan.edu/etd/2841>
23. HAŠKOVEC, Ivo. *Vliv složení směsi UF lepidla a disperzního PVAc lepidla na pevnost lepeného spoje*. Brno, 2015. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně.

24. HAVELKA, Štěpán. Lepení sendvičových střešních panelů při výrobě autobusů v podmínkách SOR Libchavy. Pardubice, 2011. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
25. HAVRÁNEK, Tomáš. *Vizualizace normálového a tečného napětí u lepených spojů*. Brno, 2017. Diplomová práce. MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ.
26. HEJDUK, Dominik. *Problematika adheze lepeného spoje s polyuretanovými lepicími systémy*. Liberec, 2019. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
27. HOLEČEK, Tomáš, Adam SIKORA, Přemysl ŠEDIVKA, Daniel CVEJN, Dominik SLÁDEK, Josef BÁRTA a Rastislav LAGAŇA. *Novel hybrid polymer adhesives for laminated materials based on hardwood* [online]. 2023 [cit.2023-02-19].Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822323000284>
28. HOOPER, Emily. *Innovative Detail: Wood Innovation and Design Centre* [online]. 2015 [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: [https://www.architectmagazine.com/technology/architectural-detail/innovative-detail-wood-innovation-and-design-centre\\_o](https://www.architectmagazine.com/technology/architectural-detail/innovative-detail-wood-innovation-and-design-centre_o)
29. HRON, Tomáš. *Měření drnosti povrchu pro průmyslové aplikace* [online]. Praha, 2017 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70869/F2-BP-2017-Hron-Tomas-BP\\_Hron\\_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70869/F2-BP-2017-Hron-Tomas-BP_Hron_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. České učení technické v Praze.
30. CHLUP, David. *KOMPLEXNÍ STUDIUM INTERFÁZOVÉHO ROZHRANÍ LEPENÉHO DŘEVĚNÉHO SPOJE*. Brno, 2016. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
31. IŽDINSKÝ, Ján, Ladislav REINPRECHT, Ján SEDLIČIK, Jozef KÚDELA a Viera KUČEROVÁ. *Bonding of Selected Hardwoods with PVAc Adhesive: Applied Sciences* [online]. 2021 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.3390/app11010067>
32. JIRÁK, Jan. Lepení bočních plechů a předního/zadního panelu při výrobě autobusů v podmínkách SOR Libchavy. Pardubice, 2011. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.



33. KALITA, Hemjyoti a Niranjan KARAK. *Epoxy modified bio-based hyperbranched polyurethane thermosets* [online]. 2012 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/15685551.2012.747163>  
KARAK N. Sustainable epoxy thermosets and nanocomposites. American Chemical Society In: Washington, DC: ACS Symposium Series; Oxford University Press; 2022. p. 1–373. ISBN: 0841298319.
34. KILIC, Murat, Salim HIZIROGLU a Erol BURDURLU. *Effect of machining on surface roughness of wood* [online]. 2006 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.008>
35. KLÄUSLER, O., K. REHM, F. ELSTERMANN a Peter NIEMZ. Influence of wood machining on tensile shear strength and wood failure percentage of one-component polyurethane bonded wooden joints after wetting [online]. 2014 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1179/2042645313Y.0000000039>
36. KOTÁLOVÁ, Veronika. *Vliv použité báze lepidla na kvalitu dýhovaných nábytkových dílců*. Brno, 2017. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně.
37. KRÁSNÝ, Ivo. *Měření kontaktních úhlů smáčení a určování povrchové energie plastů*. Zlín, 2010. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
38. KUBISTA, Kryštof. Posouzení kvality vybraných fenolických a aminových lepidel pro nosné dřevěné konstrukce metodou stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání. Praha, 2020. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
39. KUČERA, Vít. *VYUŽITÍ MIKROSKOPICKÉ ANALÝZY PRO HODNOCENÍ LEPENÝCH DŘEVĚNÝCH MATERIÁLŮ*. Brno, 2015. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
40. KULJICH, Svetka, Julie COOL a Roger E. HERNANDEZ. *Evaluation of two surfacing methods on black spruce wood in relation to gluing performance* [online]. 2012 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10086-012-1318-y>
41. KUMAR, Satish. *Chemical Modification of Wood* [online]. 1994 [cit. 2023-03-03]. Dostupné z: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1584>

42. KUNEŠ, Ivan, Martin BALÁŠ, Josef GALLO, Miroslav ŠULITKA a Channa SURAWEERA. *TRNOVNÍK AKÁT (ROBINIA PSEUDOACACIA) A JEHO ROLE VE STŘEDOEVROPSKÉM A ČESKÉM PROSTORU: REVIEW* [online]. 2019 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/341831671>
43. KYTKA, Tomáš. Posouzení kvality PUR lepidla pro nosné dřevěné konstrukce metodou stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání. Praha, 2019. Diplomová práce. Česká Zemědělská Univerzita v Praze.
44. LEE, Lieng-Huang. Adhesive bonding. New York: Plenum Press, 1991. ISBN 0306434717.
45. MARRA, A.A., Technology of Wood Bonding: Principles in Practice. Van Nostrand Reinhold, New York, NY (1992).
46. MÁSLA, Jan, Radim ADOLT, Miloš KUČERA a Ivo KOHN. *Národní inventarizace lesů v České republice: Výsledky třetího cyklu 2016–2020* [online]. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem. 2023 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://nil.uhul.cz/aktuality/48-vysledky-tretiho-cyklu-narodni-inventarizace-lesu-v-ceske-republice-2016-2020>
47. MELZEROVÁ, Lenka. *STUDIE PŘETVÁŘENÍ A PORUŠOVÁNÍ NOSNÍKŮ ZLEPENÉHO LAMELOVÉHO DŘEVA*. Praha, 2019. Habilitační práce. České vysoké učení technické v Praze.
48. MRŇOUS, Vladimír. *Pevnost lepených spojů listnatých druhů dřev, vystavených extrémním podmínkám* [online]. Brno, 2010 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18762912-Mendelova-univerzita-v-brne-lesnicka-a-drevarska-fakulta-pevnost-lepenych-spoju-listnatych-druhu-drev-vystavenych-extremnim-podminkam.html>. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně.
51. NOVÁK J. a kol.: Fyzikální chemie – bakalářský a magisterský kurz. 1. vydání, VŠCHT Praha, 2008. ISBN 978-80-7080-675-3
52. OBERHOFNEROVÁ, Eliška. *Barevné změny a povrchové degradace vybraných druhů dřeva po expozici v exteriéru*. Praha, 2018. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
53. OSTEN, Miloš. Práce s lepidly a tmely. Praha: Grada, 1996. 129 s. ISBN 80-7169-338-3.

54. PATŘIČNÝ, Martin. *Vzorník dřev: Akát* [online]. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://www.patricny.com/akat/>
55. PATŘIČNÝ, Martin. *Vzorník dřev: Buk* [online]. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://www.patricny.com/buk/>
56. PATŘIČNÝ, Martin. *Vzorník dřev: Dub* [online]. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://www.patricny.com/dub/>
57. PECHÁČKOVÁ, Pavlína. *Rozměrová stabilita a borcení konstrukčního masivního a lepeného dřeva z buku*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně.
58. POKORNÝ, Jiří. *Lepení a tmelení v dílně i domácnosti: [dřevo, kovy, plasty, sklo, další materiály a výrobky]*. Praha: Grada, 2000. 104 s. ISBN 80-7169-857-1.
59. ROWELL, Roger M. *Chemical modification of wood: A short review* [online]. 2006 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/228868971\\_Chemical\\_modification\\_of\\_wood\\_A\\_short\\_review](https://www.researchgate.net/publication/228868971_Chemical_modification_of_wood_A_short_review)
60. SIEGEL, Jakub. *Měření smáčivosti plazmaticky modifikovaných polymerů jako substrátů pro růst buněk* [online]. 2014, 10 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: [https://ipl.vscht.cz/files/uzel/0024345/Kasalkova\\_VL2.pdf?redirected](https://ipl.vscht.cz/files/uzel/0024345/Kasalkova_VL2.pdf?redirected)
61. SMÉKAL, Aleš. *VLIV STÁRNUTÍ NA VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH MATERIÁLŮ*. Brno, 2017. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
62. ŠMÍRA, David. *Analytické metody určující kvalitu lepeného spoje dřevěného adherendu*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
63. THOMSEN, F. *Practical contact angle measurement* [online]. 2008, 6 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: [https://warwick.ac.uk/fac/cross\\_fac/sciencecity/programmes/internal/themes/am2/booking/dropshapeanalyser/practical\\_contact\\_angle\\_measurement\\_5.pdf](https://warwick.ac.uk/fac/cross_fac/sciencecity/programmes/internal/themes/am2/booking/dropshapeanalyser/practical_contact_angle_measurement_5.pdf)
64. UHLÍŘ, A. *Technologie výroby nábytku II*. 2. aktualiz. vyd. Praha: Informatorium, 1997, 255 s. ISBN 80-86073-09-2
65. UHÚL BRANDÝS NAD LABEM. *LISTNATÉ DŘEVINY TVOŘÍ 38,7 % ČESKÝCH LESŮ* [online]. 2022 [cit. 2022-07-02]. Dostupné z:

<http://www.uhul.cz/rychle-informace/940-listnate-dreviny-tvori-38-7-ceskych-lesu>

66. Uzelac Glavinić, I., Boko, I., Torić, N., Lovrić Vranković, J.: Application of hardwood for glued laminated timber in Europe, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 7, pp. 607-616, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2741.2019>
67. VITEŠNIKOVA, Anna. *VLASTNOSTI LEPIDEL POUŽÍVANÝCH V MUZEJNÍ PRAXI*. Brno, 2007. Bakalářská práce. Masarykova Univerzita.
68. ZEIDLER, Aleš a Martin BÖHM. *Mikroskopická stavba dřeva: Atlas dřevin* [online].2007[cit.2023-03-18]. Dostupné z: [https://r.fld.czu.cz/vyzkum/multimedia/atlas\\_drev/index909b.html?sekce=atlas](https://r.fld.czu.cz/vyzkum/multimedia/atlas_drev/index909b.html?sekce=atlas)
69. ZEIDLER, Aleš a Martin BÖHM. *Mikroskopická stavba dřeva: Klíč* [online]. 2007 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: [https://r.fld.czu.cz/vyzkum/multimedia/atlas\\_drev/indexe5ab.html?sekce=klíč](https://r.fld.czu.cz/vyzkum/multimedia/atlas_drev/indexe5ab.html?sekce=klíč)
70. ZELINKA, Jindřich. *Rozdělení lepidel používaných v automobilovém průmyslu*. Liberec, 2008. Bakalářská práce. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI.
71. ŽENATÝ, Petr. *Posouzení kvality lepení kombinovaných masivních materiálů na bázi dřeva*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně.

## Seznam příloh

Příloha 1 Aritmetické průměry a směrodatné odchylky jednotlivých souborů měření .....	78
Příloha 2 Statistické výsledky klimatizovaných, broušených vzorků .....	83
Příloha 3 Statistické výsledky klimatizovaných, hoblovaných vzorků .....	85
Příloha 4 Statistické výsledky máčených, broušených vzorků .....	88
Příloha 5 Statistické výsledky máčených, hoblovaných vzorků .....	90
Příloha 6 Tabulky korelace .....	93

## Příloha 1 Aritmetické průměry a směrodatné odchyly jednotlivých souborů měření

Tabulka 6 Výsledky měření pro klimatizované vzorky lepené adhesivem s modifikací povrchu penetrací (zdroj vlastní)

	Výpočet pevnosti [Mpa]	Ra [μm]	Rz [μm]	RSm [μm]	Kontaktní úhel voda	Kontaktní úhel diiodo- methane	Povrchová energie [mN/m]	
<b>Aritmetický průměr</b>	11,81	5,98	39,84	530,43	71,89	68,16	35,43	Akát broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	2,73	0,49	6,56	0,00	5,44	7,95	0,27	
<b>Aritmetický průměr</b>	12,95	6,26	46,62	530,43	66,51	66,20	40,24	Akát hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,68	1,67	12,60	0,00	9,84	7,15	2,13	
<b>Aritmetický průměr</b>	12,81	13,67	81,62	623,48	38,95	58,61	60,24	Dub broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,67	1,70	13,82	114,89	13,38	12,88	3,81	
<b>Aritmetický průměr</b>	11,29	8,96	67,85	1596,15	44,14	60,38	57,52	Dub hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,15	1,56	10,03	652,33	8,34	5,76	3,27	
<b>Aritmetický průměr</b>	11,69	4,96	32,04	559,04	87,89	63,79	29,06	Buk hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,79	1,64	8,22	87,86	4,55	8,96	1,78	
<b>Aritmetický průměr</b>	10,21	7,49	44,00	530,43	84,70	56,63	31,93	Buk broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	0,69	0,91	8,15	0,00	6,17	3,52	2,40	

**Tabulka 7 Výsledky měření pro klimatizované vzorky lepené adhesivem s modifikací termosetem a úpravou povrchu penetrací (zdroj vlastní)**

	Výpočet pevnosti [Mpa]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	RSm [ $\mu\text{m}$ ]	Kontaktní úhel voda	Kontaktní úhel diodo- methane	Povrchová energie [mN/m]	
<b>Aritmetický průměr</b>	15,17	14,46	89,36	530,43	81,82	71,98	28,58	Akát broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,08	3,68	18,80	0,00	5,81	13,60	0,31	
<b>Aritmetický průměr</b>	13,32	6,78	54,80	1327,57	68,69	65,19	38,15	Akát hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,00	2,35	12,65	520,91	5,30	7,73	1,48	
<b>Aritmetický průměr</b>	13,39	18,08	116,46	936,96	83,76	77,09	26,19	Dub broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,21	2,39	14,39	207,56	7,56	7,39	0,91	
<b>Aritmetický průměr</b>	11,66	11,34	89,84	1634,27	62,67	65,56	42,33	Dub hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	0,41	2,90	20,12	446,02	5,93	6,10	1,18	
<b>Aritmetický průměr</b>	11,88	4,31	29,05	576,16	93,51	70,62	25,27	Buk hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	0,80	0,82	5,56	123,42	3,94	7,38	1,21	
<b>Aritmetický průměr</b>	11,12	9,46	62,61	646,64	73,03	54,29	40,52	Buk broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	0,56	1,06	8,20	365,19	7,33	7,55	2,62	

Tabulka 8 Výsledky měření pro máčené vzorky lepené pouze adhesivem (zdroj vlastní)

	Výpočet pevnosti [Mpa]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	RSm [ $\mu\text{m}$ ]	Kontaktní úhel voda	Kontaktní úhel diiodo- methane	Povrchová energie [mN/m]	
<b>Aritmetický průměr</b>	11,21	6,72	43,07	478,39	36,58	32,44	66,81	Akát broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	0,64	0,92	6,50	83,71	10,48	9,80	0,26	
<b>Aritmetický průměr</b>	7,72	6,01	47,80	1187,38	60,92	47,78	49,22	Akát hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,34	1,34	7,06	372,64	6,15	6,93	2,29	
<b>Aritmetický průměr</b>	7,27	12,79	83,93	789,16	61,59	25,51	56,02	Dub broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	0,96	0,96	14,59	171,87	7,45	11,20	0,56	
<b>Aritmetický průměr</b>	4,90	9,48	72,04	2292,34	70,97	38,14	47,68	Dub hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,33	1,33	17,43	934,58	4,89	6,52	0,80	
<b>Aritmetický průměr</b>	3,69	4,46	30,09	595,70	61,40	33,95	53,58	Buk hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,42	1,42	3,31	99,34	2,44	5,95	0,90	
<b>Aritmetický průměr</b>	4,60	5,09	36,07	521,29	46,94	27,86	62,66	Buk broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,16	1,16	4,06	66,68	4,87	8,16	1,68	



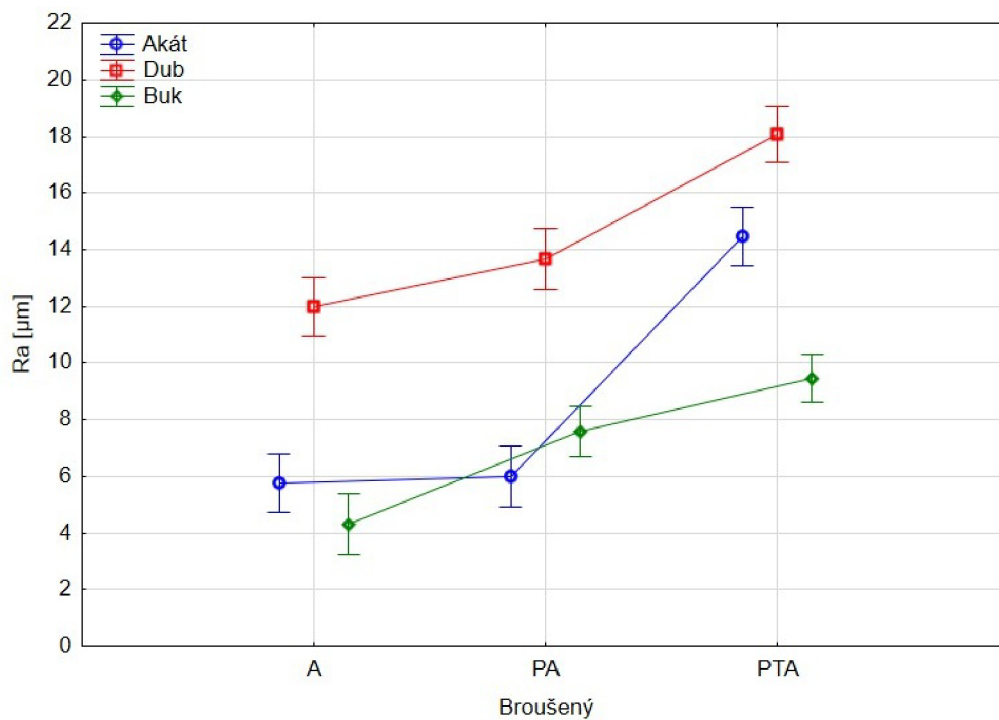
**Tabulka 9 Výsledky měření pro máčené vzorky lepené adhesivem s modifikací povrchu penetrací (zdroj vlastní)**

	Výpočet pevnosti [Mpa]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	RSm [ $\mu\text{m}$ ]	Kontaktní úhel voda	Kontaktní úhel diiodo- methane	Povrchová energie [mN/m]	
<b>Aritmetický průměr</b>	13,21	6,09	40,75	530,43	74,91	62,78	36,04	Akát broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,78	0,97	7,98	0,00	6,45	6,28	1,63	
<b>Aritmetický průměr</b>	9,00	5,35	39,94	530,43	74,35	67,55	35,23	Akát hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,41	1,41	9,74	0,00	4,00	9,51	2,83	
<b>Aritmetický průměr</b>	7,70	13,86	83,70	711,21	34,73	64,35	62,22	Dub broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,14	2,12	13,85	95,27	10,37	5,36	3,42	
<b>Aritmetický průměr</b>	5,82	9,42	68,31	1877,16	39,04	65,22	58,88	Dub hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,24	1,24	12,06	1033,35	10,27	5,82	1,39	
<b>Aritmetický průměr</b>	5,67	5,51	32,98	495,50	86,53	61,81	31,23	Buk hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,17	1,17	6,35	122,32	5,42	6,07	2,86	
<b>Aritmetický průměr</b>	6,28	6,67	39,09	575,75	86,24	65,13	34,43	Buk broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	0,71	0,71	5,58	10,72	5,34	5,24	1,42	

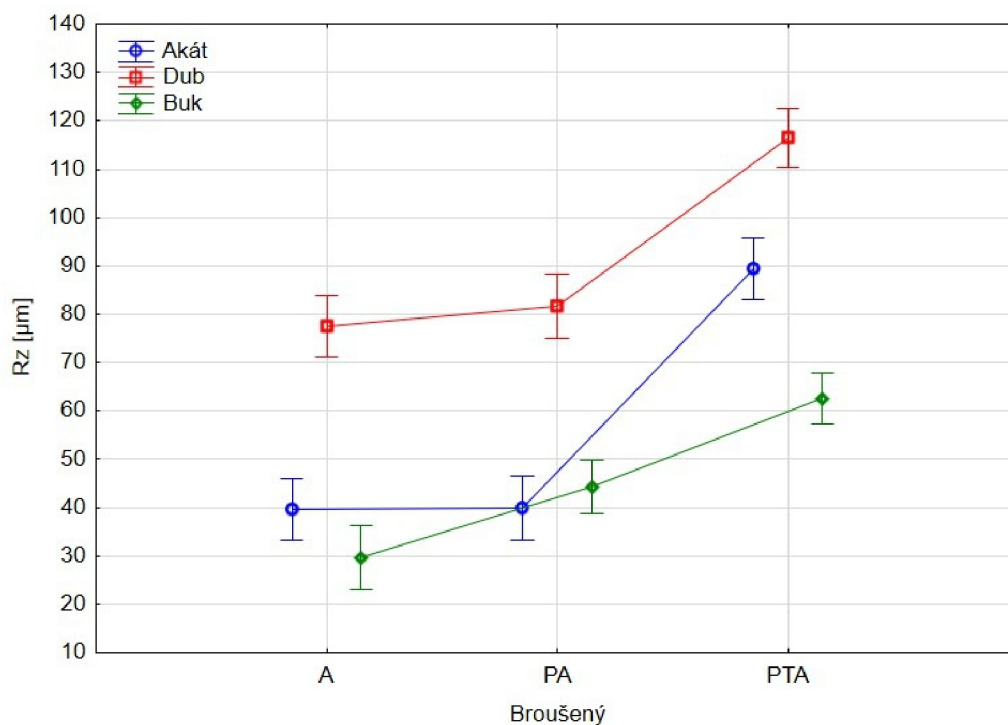
**Tabulka 10 Výsledky měření pro máčené vzorky lepené adhesivem s modifikací termosetem a úpravou povrchu penetrací (zdroj vlastní)**

	Výpočet pevnosti [Mpa]	Ra [μm]	Rz [μm]	RSm [μm]	Kontaktní úhel voda	Kontaktní úhel diiodo- methane	Povrchová energie [mN/m]	
<b>Aritmetický průměr</b>	12,91	9,51	70,08	530,43	78,77	78,57	29,28	Akát broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	0,81	1,88	12,83	0,00	5,86	10,63	0,88	
<b>Aritmetický průměr</b>	9,42	7,40	60,69	530,43	58,39	49,33	30,86	Akát hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	0,62	0,62	13,19	0,00	6,48	7,26	3,40	
<b>Aritmetický průměr</b>	10,55	17,78	109,50	741,71	73,20	73,23	33,28	Dub broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	2,03	1,95	13,55	141,62	12,49	6,48	3,31	
<b>Aritmetický průměr</b>	11,02	14,90	116,32	1605,10	78,07	72,80	32,00	Dub hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,04	5,46	39,81	449,67	9,10	11,17	2,59	
<b>Aritmetický průměr</b>	10,95	4,50	29,95	618,37	93,61	73,12	25,11	Buk hoblovaný
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,09	1,39	8,54	79,51	6,04	7,90	1,87	
<b>Aritmetický průměr</b>	10,04	13,26	83,14	714,30	58,49	41,78	33,75	Buk broušený
<b>Směrodatná odchylka</b>	1,06	1,06	17,01	216,80	7,75	4,87	2,30	

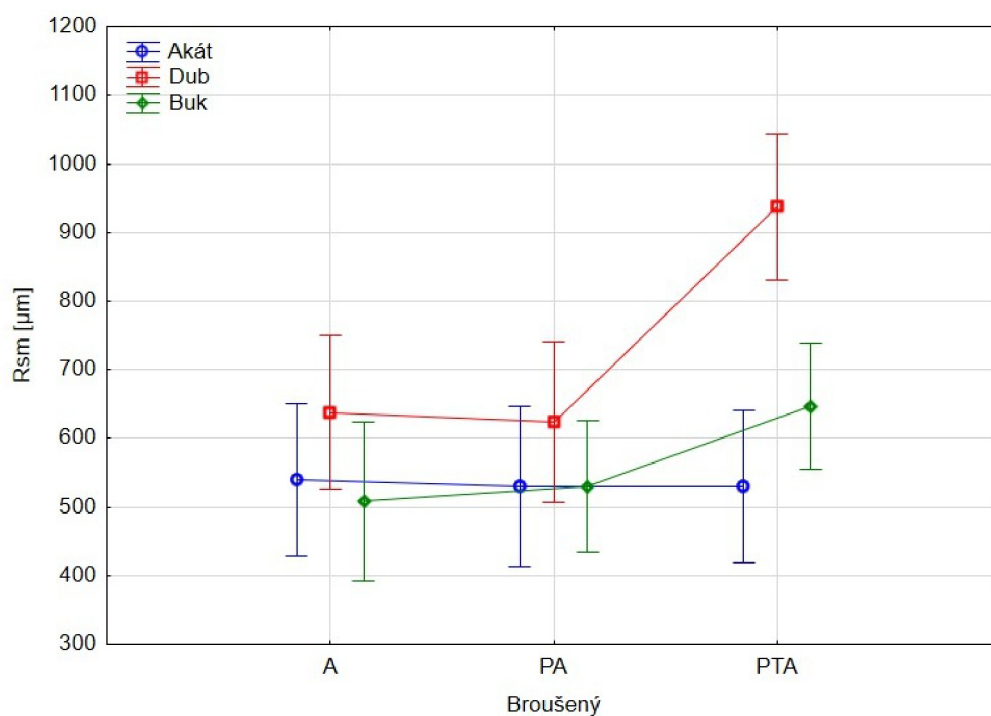
## Příloha 2 Statistické výsledky klimatizovaných, broušených vzorků



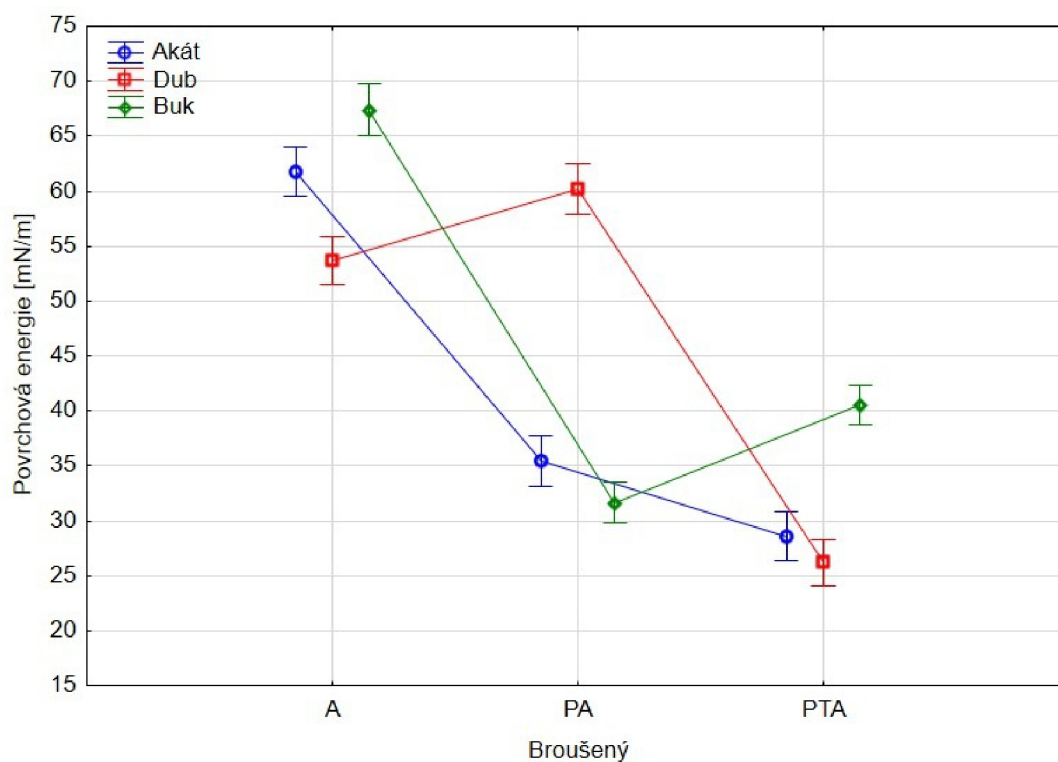
**Graf 11** Parametr drsnosti Ra klimatizovaných vzorků broušených



**Graf 12** Parametr drsnosti Rz klimatizovaných vzorků broušených

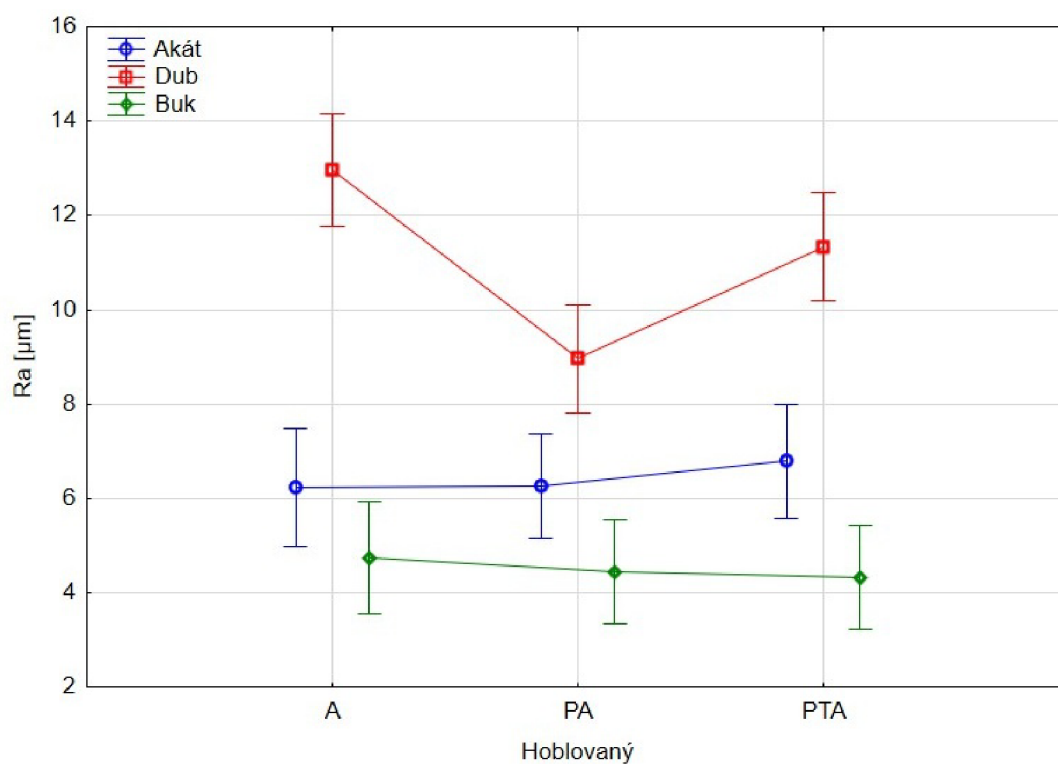


**Graf 13** Parametr drsnosti Rsm klimatizovaných vzorků broušených

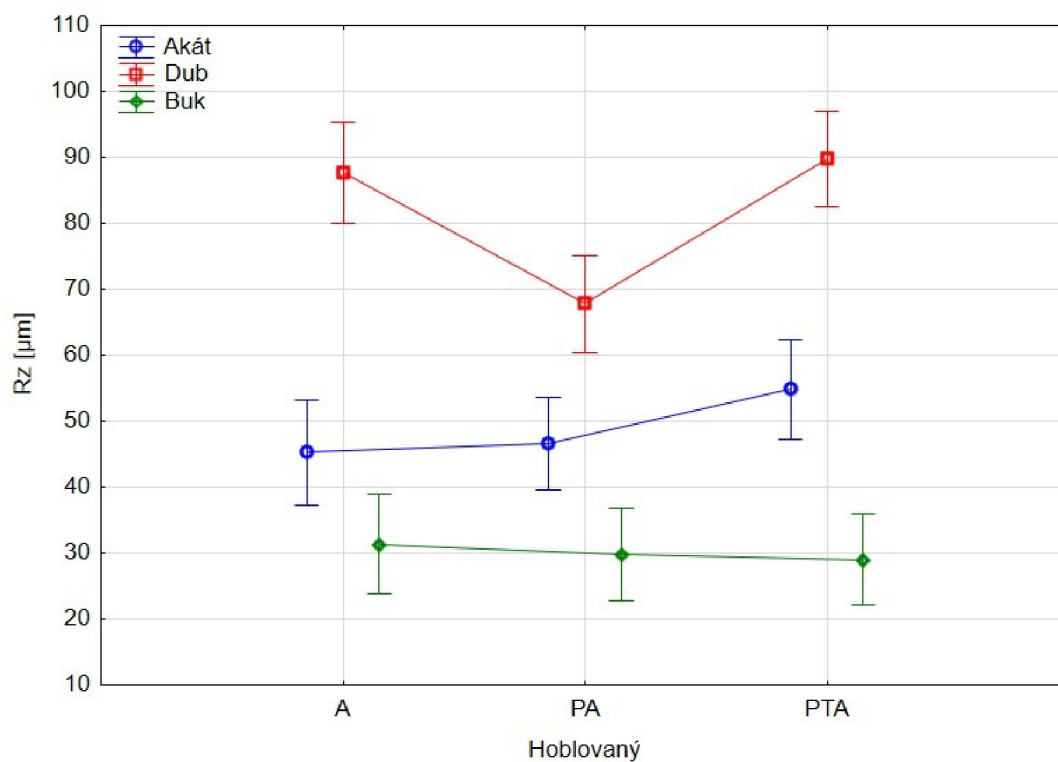


**Graf 14** Povrchová energie klimatizovaných vzorků broušených

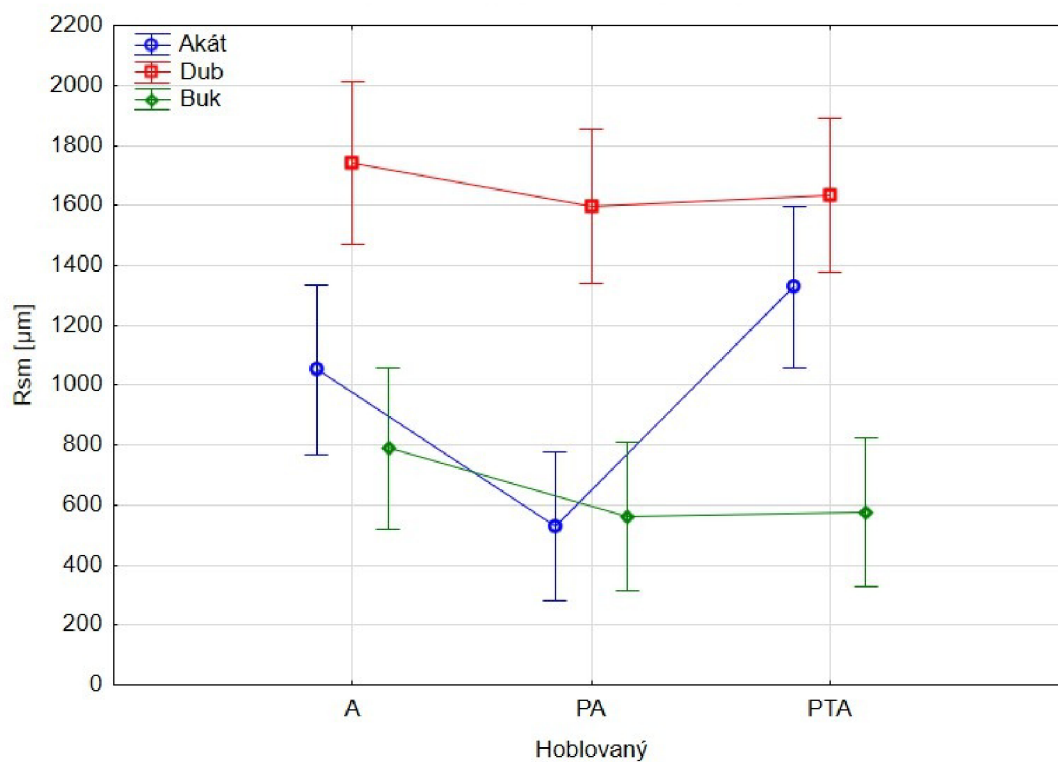
### Příloha 3 Statistické výsledky klimatizovaných, hoblovaných vzorků



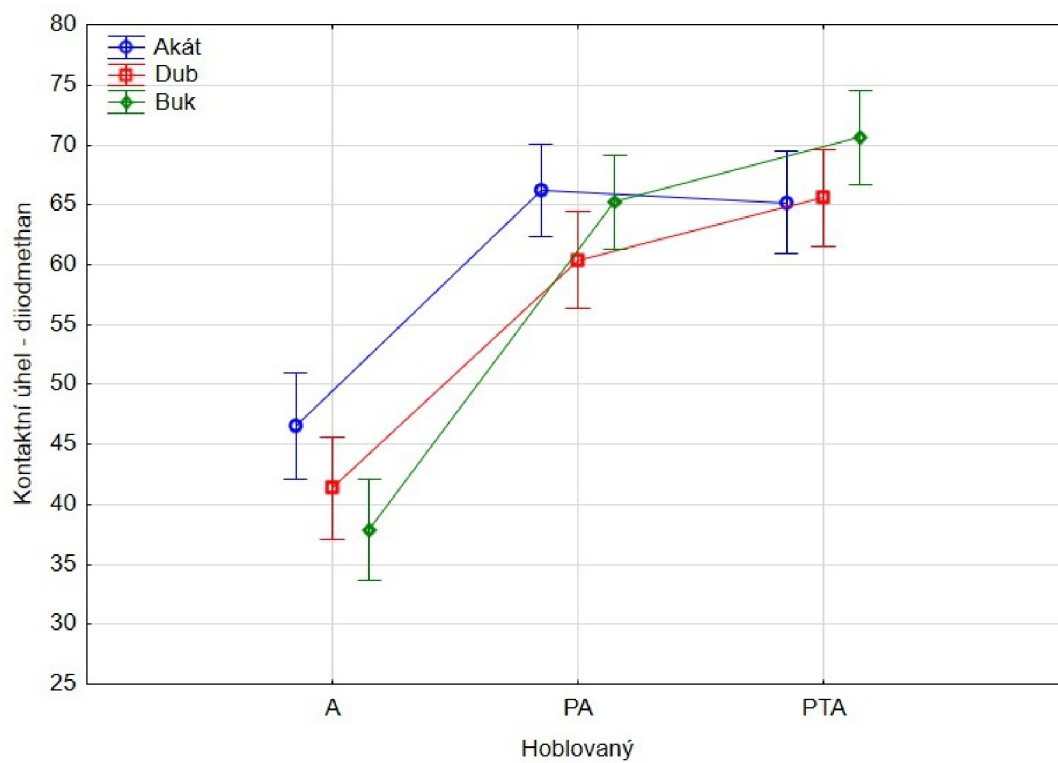
Graf 15 Parametr drsnosti Ra klimatizovaných vzorků hoblovaných



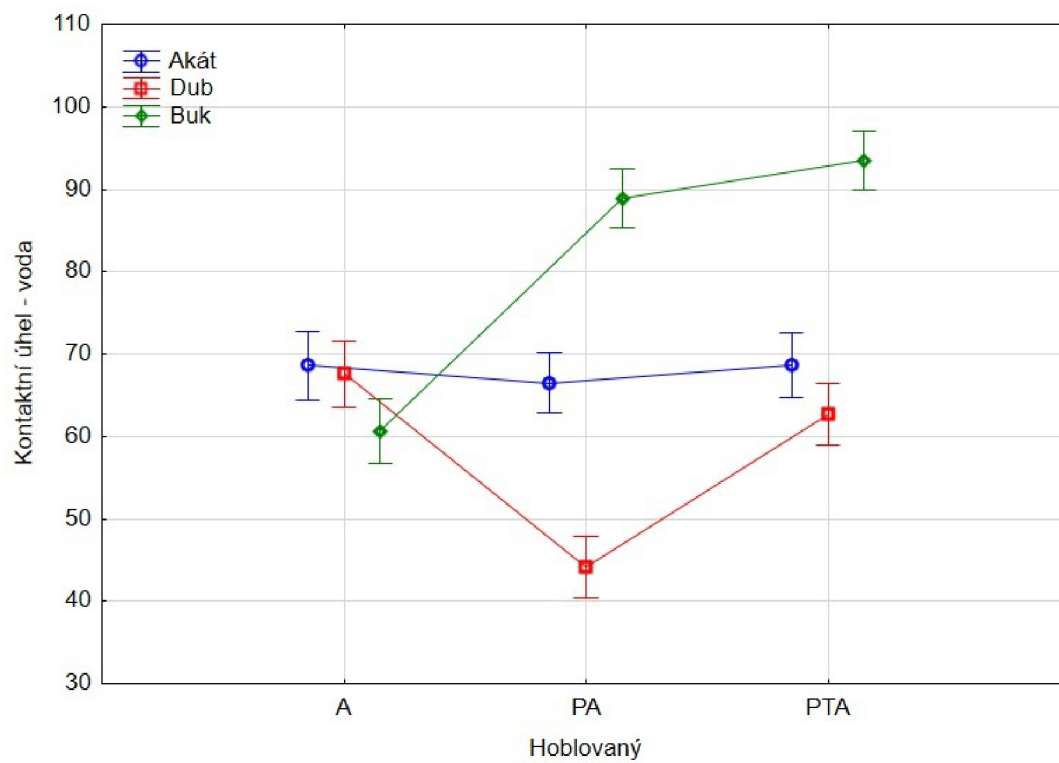
Graf 16 Parametr drsnosti Rz klimatizovaných vzorků hoblovaných



**Graf 17** Parametr drsnosti  $R_{sm}$  klimatizovaných vzorků hoblovaných

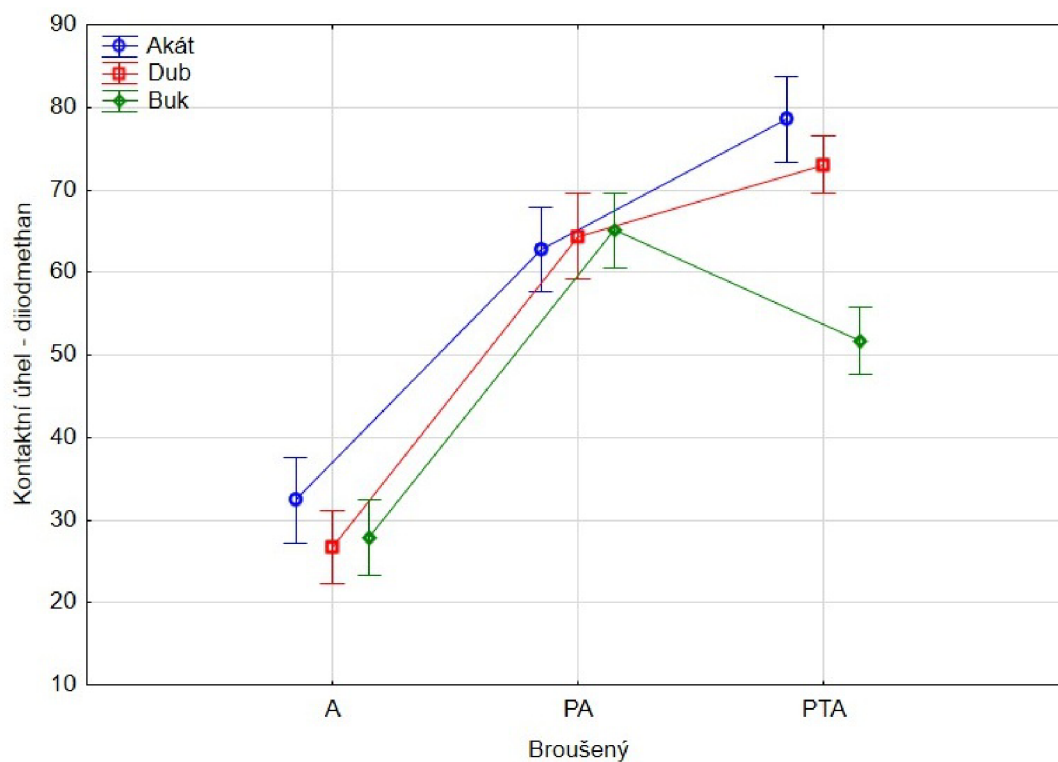


**Graf 18** Kontaktní úhel diiodmethanu klimatizovaných vzorků hoblovaných

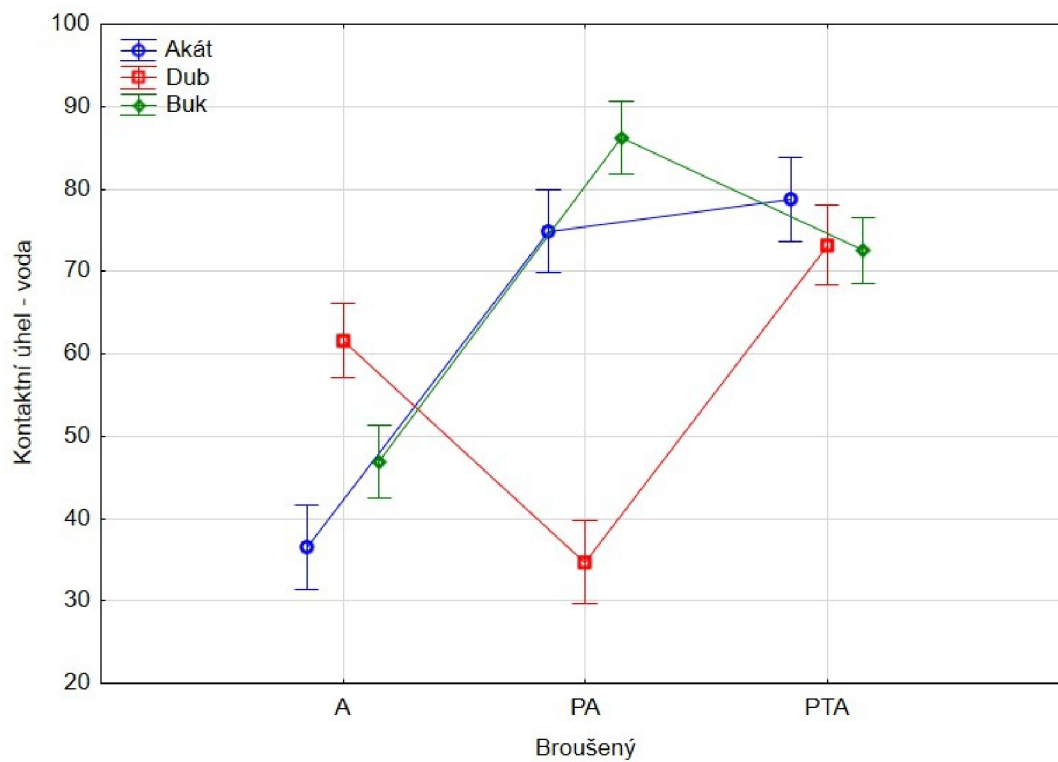


**Graf 19 Kontaktní úhel vody klimatizovaných vzorků hoblovaných**

**Příloha 4 Statistické výsledky máčených, broušených vzorků**

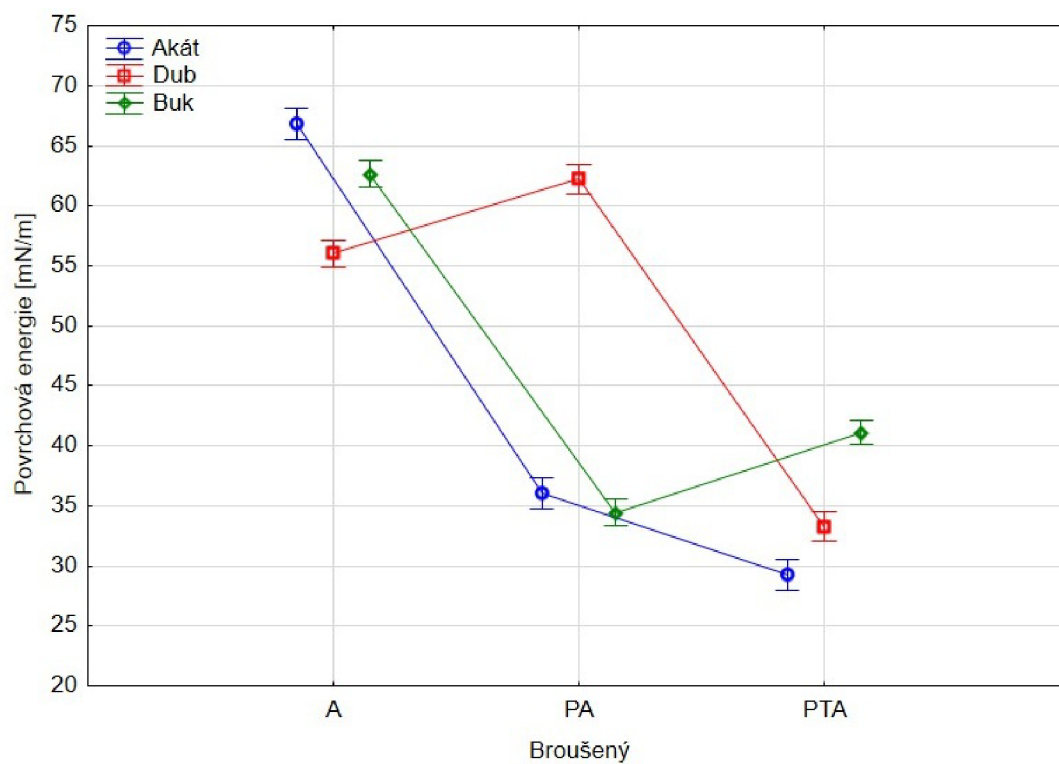


**Graf 20 Kontaktní úhel diiodmethanu máčených vzorků broušených**



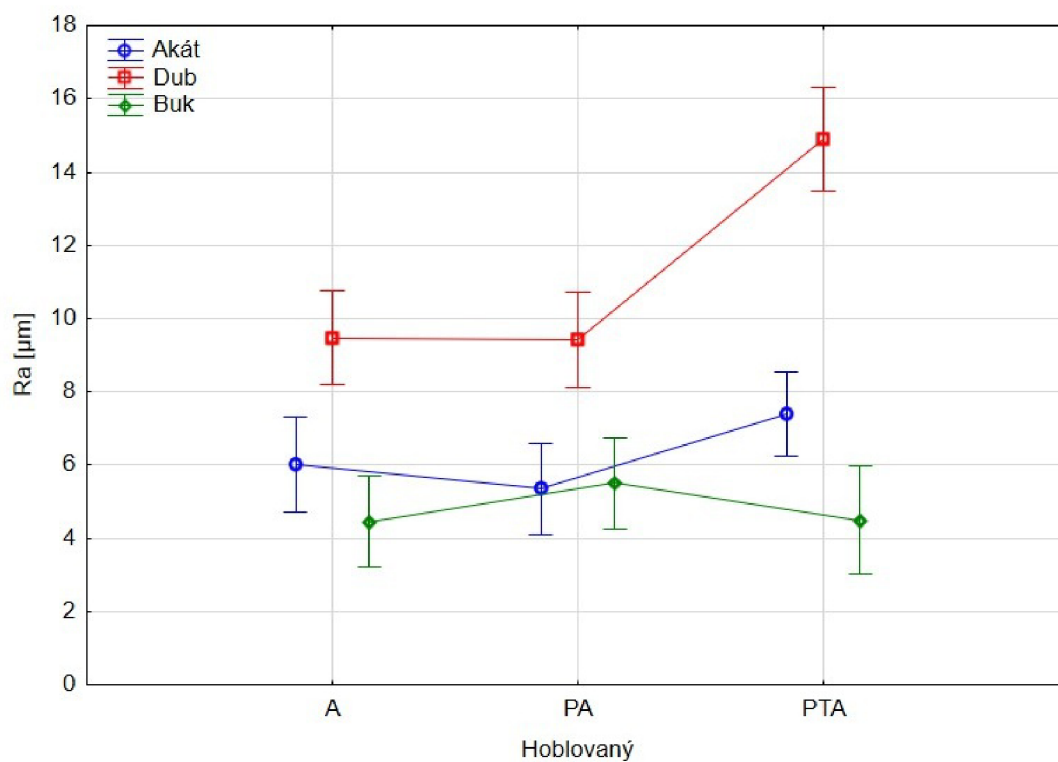
**Graf 21 Kontaktní úhel vody máčených vzorků broušených**



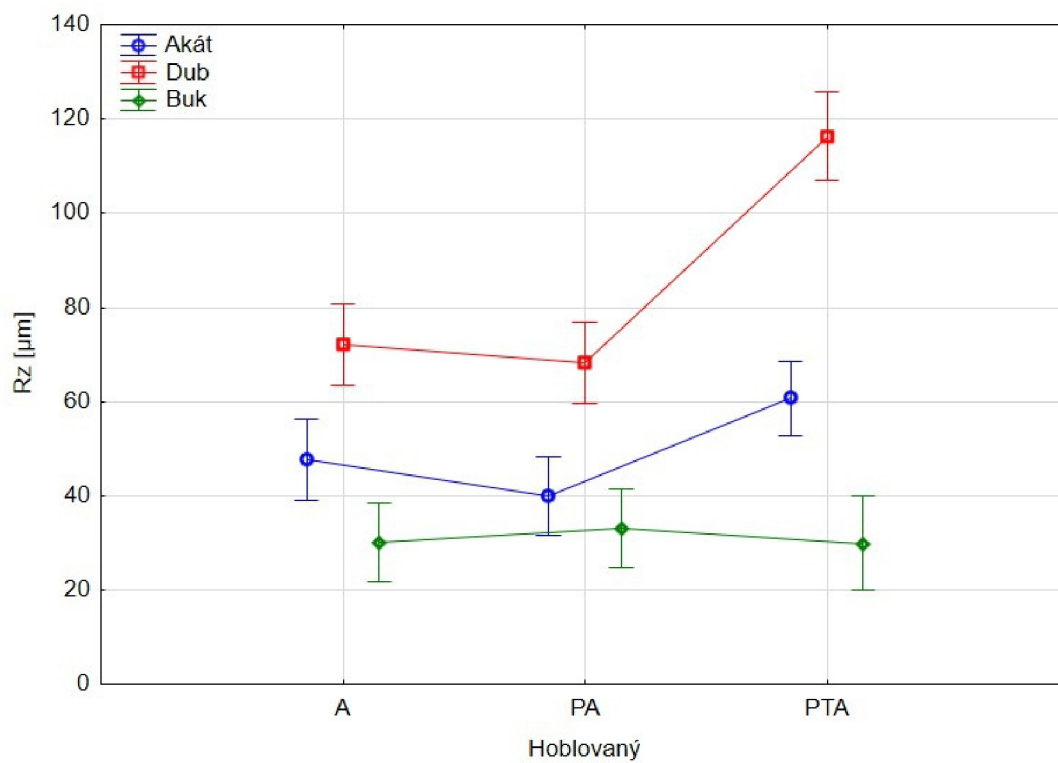


**Graf 22 Povrchová energie máččených vzorků broušených**

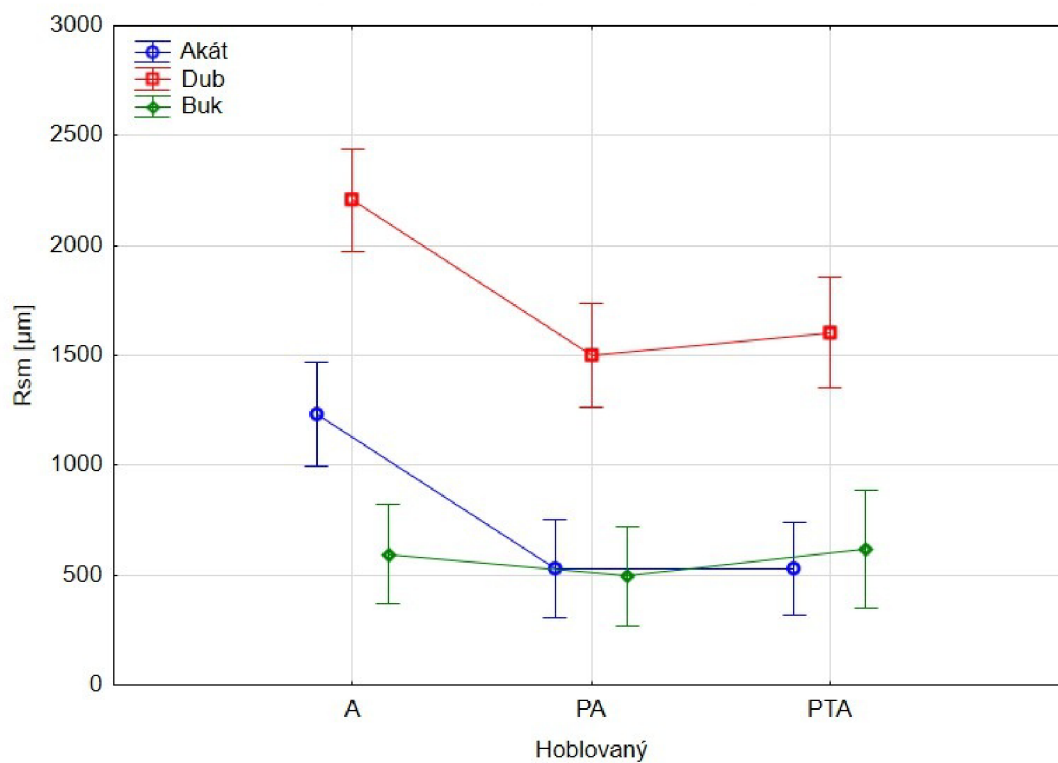
## Příloha 5 Statistické výsledky máčených, hoblovaných vzorků



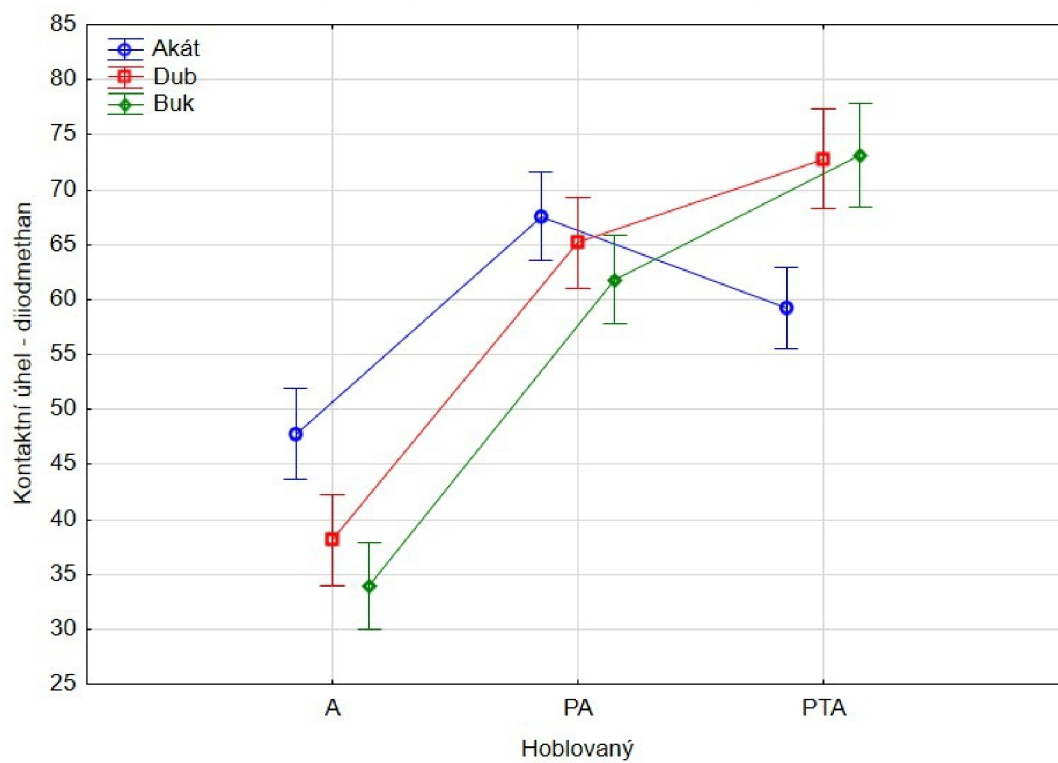
Graf 23 Parametr drsnosti  $R_a$  máčených vzorků hoblovaných



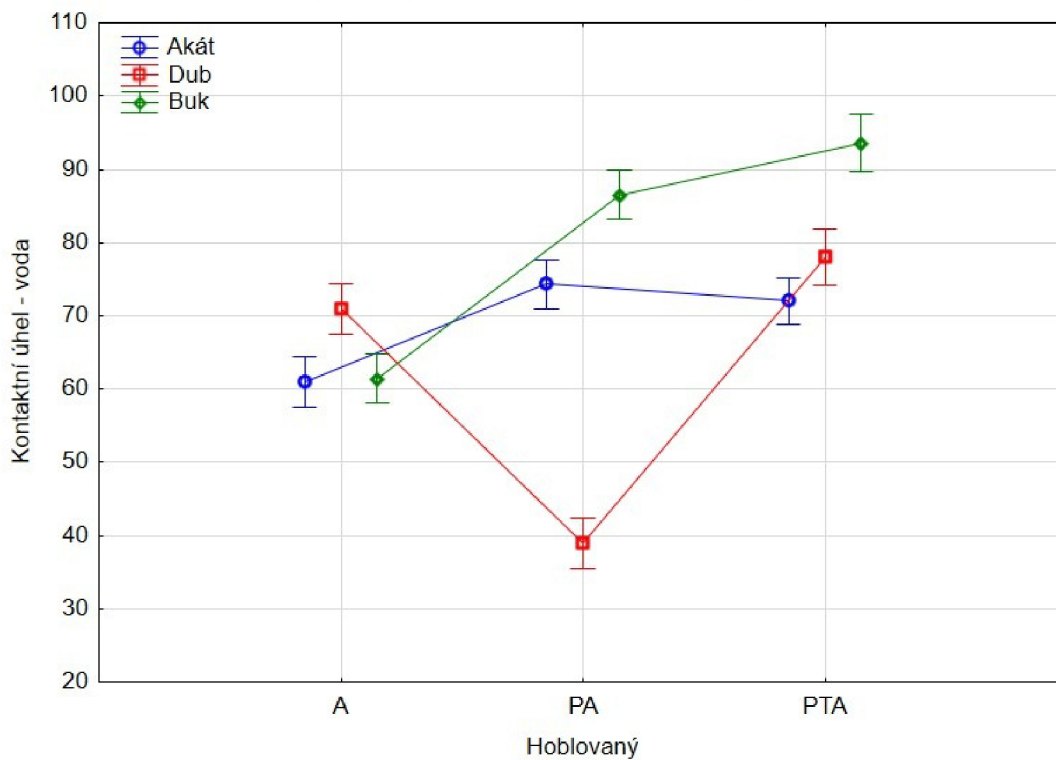
Graf 24 Parametr drsnosti  $R_z$  máčených vzorků hoblovaných



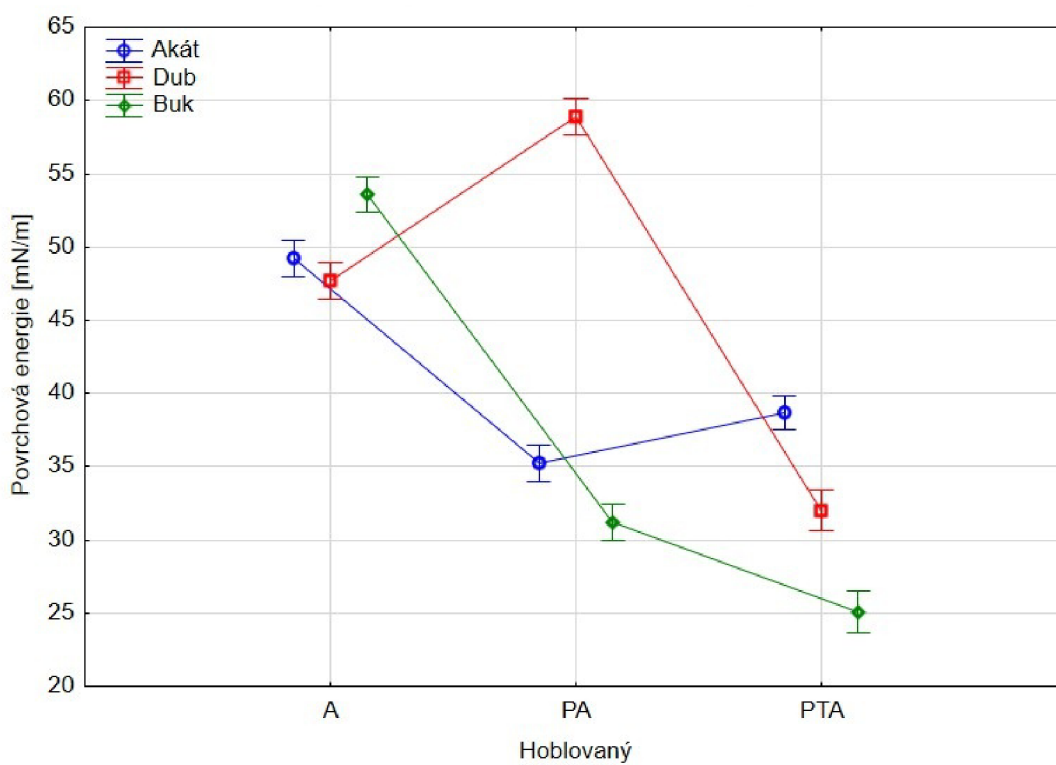
**Graf 25** Parametr drsnosti  $R_{sm}$  máččených vzorků hoblovaných



**Graf 26** Kontaktní úhel diiodmethanu máččených vzorků hoblovaných



**Graf 27 Kontaktní úhel vody máčených vzorků hoblovaných**



**Graf 28 Povrchová energie máčených vzorků hoblovaných**

## Příloha 6 Tabulky korelace

Tabulka 11 Korelace pro soubor klimatizované, hoblované vzorky (zdroj vlastní)

	Druh dřeva	Způsob lepení	Pevnost ve smyku [MPa]
Druh dřeva		0,893	0,443
Způsob lepení	0,893		0,000
Pevnost ve smyku [MPa]	0,443	0,000	

Tabulka 12 Korelace pro soubor máčené, broušené vzorky (zdroj vlastní)

	Druh dřeva	Způsob lepení	Pevnost ve smyku [MPa]
Druh dřeva		0,499	0,026
Způsob lepení	0,499		0,000
Pevnost ve smyku [MPa]	0,026	0,000	

Tabulka 13 Korelace pro soubor máčené, hoblované vzorky (zdroj vlastní)

	Druh dřeva	Způsob lepení	Pevnost ve smyku [MPa]
Druh dřeva		0,025998	0,107344
Způsob lepení	0,025998		0,723307
Pevnost ve smyku [MPa]	0,107344	0,723307	