

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



Diplomová práce

**Interakce teploty termické modifikace, druhu dřeva a
parametrů obrábění na hodnoty kvality povrchu
termicky modifikovaného dřeva**

Bc. David Khol

© 2022 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. David Khol

Dřevařské inženýrství

Název práce

Interakce teploty termické modifikace, druhu dřeva a parametrů obrábění na hodnoty kvality povrchu termicky modifikovaného dřeva.

Název anglicky

Interaction of thermal modification temperature, type of wood and machining parameters on surface quality values of thermally modified wood.

Cíle práce

Cílem práce je zhodnocení účinků jednotlivých parametrů charakterizujících technologii obrábění termicky modifikovaného dřeva (teploty termické modifikace, druhu dřeva a parametrů obrábění) a jejich interakce na hodnoty kvality povrchu.

Jde zejména o zjištění účinků jednotlivých faktorů:

- Obráběný materiál
- Teplota termické modifikace
- Podávací rychlost
- Řezná rychlost
- Úhel řezného čela nástroje

na sledované parametry:

- Změny v chemické struktuře všech čtyř dřevin během všech stupňů termické modifikace a vliv chemického složení na řezný příkon při rovinném frézování.
- Kvalita námi opracovaného povrchu, která byla vyhodnocena pomocí vybraných parametrů drsnosti a vlnitosti povrchu.
- Vzájemná interakce uvedených parametrů a stanovení optimálních parametrů při rovinném frézování.

Metodika

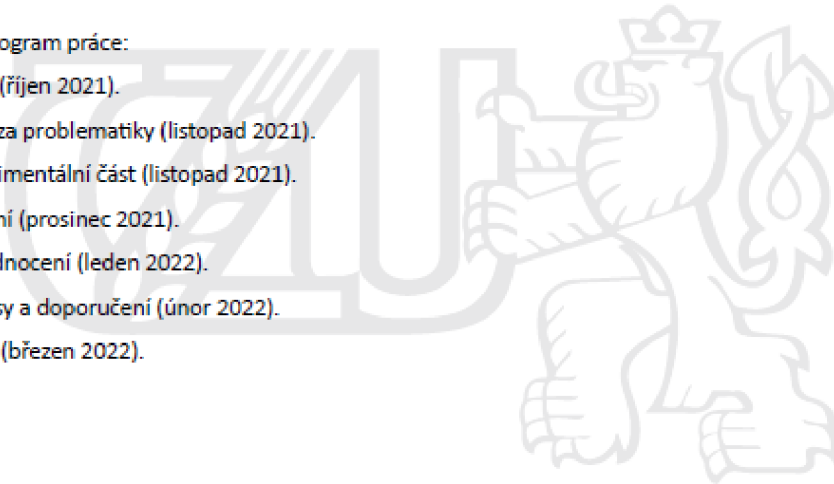
V souladu s uvedeným cílem práce je možné metodiku práce rozdělit do následujících bodů:

- Analýza literárních poznatků k předmětné problematice.
 - Návrh metodiky stanovení parametrů obrábění pro vybrané termicky modifikované domácí i tropické dřeviny.
 - Na základě zvolené metodiky stanovit vhodné parametry obrábění.
 - Vyhodnocení.
-

5. Výsledky a diskuse.
6. Závěry a doporučení pro vědu a praxi.

Harmonogram práce:

1. Úvod (říjen 2021).
2. Analýza problematiky (listopad 2021).
3. Experimentální část (listopad 2021).
4. Měření (prosinec 2021).
5. Vyhodnocení (leden 2022).
6. Přínosy a doporučení (únor 2022).
7. Závěr (březen 2022).



Doporučený rozsah práce

80 stran

Klíčová slova

Kvalita povrchu, drsnost, vlnitost, parametry obrábění, podávací rychlost, řezná rychlost, úhel řezného čela nástroje, termická modifikace

Doporučené zdroje informací

- Aghakhani, Mohammad and Khazaeian, Abolghasem. 2014. The Effect of Machining Parameters on Surface Roughness of of Alder Wood. *Asian Journal of Agriculture and Food Sciences*. 2014, Vol. 2, 6, pp. 548-533.
- Allegretti, Ottaviano, et al. 2012. Thermo-vacuum modification of spruce (*picea abies karst.*) and fir (*abies alba mill.*) wood. *BioResources*. 2012, Vol. 7, 3, pp. 3656-3669.
- Ayata, Umit, Gurleyen, Levent and Esteves, Bruno. 2017. Effect of heat treatment on the surface of selected exotic wood species. *Drewno*. 2017, Vol. 60, 199, pp. 105-116.
- Barcik, Š., et al. 2010. The effect of selected factors on energy requirements for plain milling of beech wood. *Journal of Forest Science*. 2010, Vol. 56, 5, pp. 243-250.
- Drápela, Jindřich, a další. 1980. Výroba nábytku. [editor] Dušan Straňák. Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1980. str. 488. 04-827-80.
- Gaff, Milan, et al. 2015. Effect of selected parameters on the surface waviness in plane milling of thermally modified birch wood. *BioResources*. 2015, Vol. 10, 4, pp. 7618-7626.
- Gochev, Zhivko and Vukov, Georgi. 2018. Factors influencing the cutting power in longitudinal milling of solid wood. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Land Reclamation*. 2018, Vol. 102, pp. 103-111.
- Halabala, Jindřich. 1982. Výroba nábytku tvorba a konstrukce. [editor] Milena Spurná. Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1982. str. 320. 04-823-82.
- Jamberová, Zuzana, et al. 2016. Influence of Processing Factors and Species of Wood on Granulometric Composition of Juvenile Poplar Wood Chips. *BioResources*. 2016, Vol. 11, 4, pp. 9572-9583.
- Petterson, Roger C. 1984. The Chemical Composition of Wood. [autor knihy] Roger Rowell. *The Chemistry of Solid Wood*. místo neznámé : U.S. Department of Agriculture, 1984, Sv. 207, 2, stránky 57-126.
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Adam Sikora, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Ing. Miroslav Sedlecký, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 22. 9. 2021

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 09. 04. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma "Interakce teploty termické modifikace, druhu dřeva a parametrů obrábění na hodnoty kvality povrchu termicky modifikovaného dřeva" vypracoval samostatně, a to pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Adama Sikory, Ph.D. a s použitím odborné literatury, pramenů a dalších informačních zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce a také citovány v samotné práci. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne:

Poděkování

Chtěl bych touto cestou poděkovat panu Ing. Adamu Sikorovi, Ph.D. za jeho odborné vedení práce, připomínky, trpělivost a cenné rady, které mi pomohly zkompletovat tuto práci. Rád bych také poděkoval panu Ing. Miroslavu Sedleckému, Ph.D. a paní Ing. Kateřině Hájkové, Ph.D. za jejich nesmírnou ochotu, se kterou mi odpovídali na všechny mé dotazy. Moje poděkování taktéž patří i vysoké škole, zejména katedře FLD za poskytnutí přístrojů a laboratoří a všem profesorům, praktikantům a učitelům, kteří mi pomáhali během mého studia získávat znalosti, dovednosti a zkušenosti v oboru dřevařského inženýrství. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině, za to, že mi umožnila studovat, a za jejich podporu v průběhu studia.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá ve své první polovině teoretickou částí, v níž je čtenář uveden do tématu a seznámen s odbornou terminologií formou literární rešerše zabývající se zkoumanými dřevinami, jejich rozdělením a vlastnostmi, dále pak způsoby jejich obrábění zejména frézováním a jejich termickou modifikací. V druhé polovině diplomové práce se pak řeší její praktická část, která pojednává o interakcích teplot termické modifikace nejen na kvalitu povrchu vybraných druhů tuzemského a exotického dřeva, ale i sledování vlivu termování na základní chemické složky dřeva. Pro účely výzkumu byly použity dřeva smrku, dubu, teaku a padouku, z nichž byly vymanipulovány tělesa, které byly termicky modifikovány při teplotách 160°, 180° a 210 °C, ale zároveň byly použity referenční vzorky, které posloužily k porovnání termicky modifikovaných vzorků. Během experimentálního zkoumání byla použita jedno-vřetenová frézka doplněná o podávací zařízení a na zjištění – změření kvality povrchu byl použit kontaktní profilometr. Kontaktní metodou měření na zmiňovaném kontaktním profilometru byly zjištěny drsnost (Ra) a vlnitost (Wa) povrchu, které nám umožňují díky zjištěným průměrných aritmetických úchylek vyhodnotit kvalitu povrchu obráběného vzorku. Konečné výsledky nám napomohou určit, jaké bychom měli zvolit ideální frézovací parametry.

Klíčová slova: Kvalita povrchu, drsnost, vlnitost, parametry obrábění, podávací rychlost, řezná rychlost, úhel řezného čela nástroje, termická modifikace

Abstract

This diploma thesis deals in its first half with the theoretical part, in which the reader is introduced to the topic and acquainted with professional terminology in the form of literary research dealing with the studied types of wood, its distribution and properties, thermal modification and methods of their machining especially milling. The second half of the diploma thesis deals with its practical part, which deals with the interactions of thermal modification temperatures not only on the surface quality of selected species of domestic and exotic woods but also monitoring the effect of therming on the basic chemical components of wood. Spruce, oak, teak and paduk woods were used for the research, from which bodies were manipulated, which were heat-treated at temperatures of 160°, 180° a 210 °C but at the same time reference samples were used, which were used to compare heat-treated samples. During the experimental research a single-spindle milling machine supplemented with a feeding device was used and a contact profilometer was used to determine the surface quality. The surface roughness (Ra) and waviness (Wa) of the surface were determined by the contact method of measurement on the mentioned contact profilometer, which allow us to evaluate the surface quality of the machined sample thanks to the detected average arithmetic deviations. The final results will help us determine what ideal milling parameters we should choose.

Keywords: Surface quality, roughness, waviness, machining parameters, feed rate, cutting speed, tool cutting face angle, thermic modification.

Obsah

1	Dřevní surovina a rozdělení	22
1.1	Smrk (<i>Picea abies</i> L.).....	23
1.2	Dub (<i>Quercus robur</i> L.)	24
1.3	Teak (<i>Tectona grandis</i> Linn).....	25
1.4	Padouk (<i>Pterocarpus soyauxii</i>)	26
1.5	Ochrana a úprava dřeva.....	27
2	Termická modifikace dřeva	29
2.1	Historie a vývoj	29
2.2	Technologie výroby	30
2.3	Fáze termické modifikace – ThermoWood®.....	33
2.4	Klasifikace tepelných úprav ThermoWood®	34
2.5	Změny v chemické struktuře	35
2.5.1	Změny v ligninu.....	36
2.5.2	Změny v hemicelulózách	36
2.5.3	Změny v celulóze.....	37
2.5.4	Změny extraktivních látek	38
2.6	Vlastnosti a použití.....	38
3	Rozbor problematiky obrábění – frézování.....	39
3.1	Frézování	40
3.1.1	Válcové	41
3.1.2	Čelní	42
3.1.3	Kuželové	43
3.1.4	Čelně-kuželové	44
3.2	Kinematika frézování	44
3.2.1	Výpočet řezné rychlosti	45
3.2.2	Výpočet posuvné rychlosti.....	45
3.2.3	Výpočet posuvu na zub	46
3.3	Nástroje pro frézování	46
3.3.1	Úhlová geometrie nástroje – břitu	46
3.4	Kvalita povrchu	47
3.4.1	Definování průměrných aritmetických úchylek profilu drsnosti a vlnitosti.....	49
3.4.2	Faktory ovlivňující kvalitu povrchu	52
4	Metodika práce.....	55
4.1	Použitý materiál	56
4.1.1	Sušení vzorků.....	56
4.1.2	Zjištění vlhkosti	56
4.2	Termická modifikace vzorků	57

4.2.1	Zjištění hustoty	57
4.3	Obrábění	58
4.3.1	Stroje a nástroje	58
4.3.2	Nastavení frézovacích parametrů.....	60
4.4	Zkušební vzorky	61
4.5	Měření	61
4.5.1	Nastavení kontaktního profilometru	62
4.6	Chemická metodika.....	63
4.7	Statistické vyhodnocení naměřených dat	66
5	Výsledky a diskuse	68
5.1	Změny v chemické struktuře všech čtyř dřevin během všech stupňů termické modifikace a vliv chemického složení při rovinném frézování	68
5.2	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti (<i>Ra</i>) – kontaktní metoda	72
5.2.1	Čtyřfaktorové interakce	72
5.2.1.1	Smrk (<i>Picea abies L.</i>)	72
5.2.1.2	Dub (<i>Quercus robur L.</i>).....	74
5.2.1.3	Teak (<i>Tectona grandis</i>)	75
5.2.1.4	Padouk (<i>Pterocarpus soyauxii</i>)	77
5.3	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti (<i>Wa</i>) – kontaktní metoda.....	80
5.3.1	Čtyřfaktorové interakce	80
5.3.1.1	Smrk (<i>Picea abies L.</i>)	80
5.3.1.2	Dub (<i>Quercus robur L.</i>).....	82
5.3.1.3	Teak (<i>Tectona grandis</i>)	83
5.3.1.4	Padouk (<i>Pterocarpus soyauxii</i>)	85
5.4	Vzájemná interakce uvedených parametrů a stanovení optimálních parametrů při rovinném frézování	88
5.4.1	Optimální kombinace parametrů pro rovinné frézování smrku.....	88
5.4.2	Optimální kombinace parametrů pro rovinné frézování dubu.....	90
5.4.3	Optimální kombinace parametrů pro rovinné frézování teaku	93
5.4.4	Optimální kombinace parametrů pro rovinné frézování padouku	95
6	Závěr.....	100
6.1	Přínos pro vědu	101
6.2	Přínos pro praxi	102
	Seznam použitých zdrojů	103
	Přílohy.....	115

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vývoj produkce ThermoWood (www.thermowood.fi, 2022)	31
Obrázek 2: Fáze výroby Thermo-D a Thermo-S (Mayes, Oksanen, 2003).....	34
Obrázek 3: Technologické způsoby frézování (Kvietková, 2015)	41
Obrázek 4: Válcové frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a)	42
Obrázek 5: Čelní frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a).....	43
Obrázek 6: Kuželové frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a)	43
Obrázek 7: Čelně-kuželové frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a)	44
Obrázek 8: Kinematické schéma válcového frézování (Kvietková, 2015).....	45
Obrázek 9: Úhlová geometrie nástroje (Siklienka a Kminiak, 2013a).....	47
Obrázek 10: Pracovní úhlová geometrie nástroje (Siklienka a Kminiak, 2013a).....	47
Obrázek 11: Profil povrchu (ČSN EN ISO 4287, 1999)	49
Obrázek 12: Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti (ČSN EN ISO 4287, 1999)	50
Obrázek 13: Vývojový diagram pro posuzování povrchu (ČSN EN ISO 4287, 1999).....	51
Obrázek 14: Parametry P, W, R na profilu povrchu (https://eluc.kr-olomoucky.cz , 2019) 51	
Obrázek 15: Faktory ovlivňující kvalitu povrchu v rámci této práce (Autor, 2022).....	53
Obrázek 16: Všechny možné proměnné faktory pro parametry R_a a W_a (Autor, 2022)	55
Obrázek 17: Spodní jedno-vřetenová frézka Tuttlingen vybavena přestavitelným univerzálním stojanem a podávacím zařízením STEFF 2034 (Autor, 2022)	59
Obrázek 18: Použitá frézovací hlava s úhlem řezného čela 15° - s detailem na nůž (Autor, 2022)	59
Obrázek 19: Naměření a rozdělení vzorku dubu, na 10 oblastí pro následné měření kontaktním profilometrem, popis vzorku obsahující: zkratku dřeva DB-Dub, stupeň tepelné úpravy 20°C , řeznou rychlost 30 m/s, úhel řezného čela nástroje 15° , podávací rychlost 4 m/min (Autor, 2022)	61
Obrázek 20: Kontaktní profilometr vybavený o raménko kontaktního profilometru s kuželovým diamantovým hrotem (Autor, 2022)	62
Obrázek 21: Princip indukčního snímače kontaktního profilometru (Havelková a Hiklová, 2014)	62
Obrázek 22: Extrakce za použití Soxhletova přístroje, ukázka vzorku padouku (Autor, 2022)	66
Obrázek 23: Výstupy hodnot R_a a W_a z měření kontaktním profilometrem (Autor, 2022)	67

Obrázek 24: Změny extraktivních látek u zkoumaných druhů dřeva vlivem termické modifikace (Autor, 2022)	71
Obrázek 25: Změny ligninu u zkoumaných druhů dřeva vlivem termické modifikace (Autor, 2022)	71
Obrázek 26: Změny celulózy u zkoumaných druhů dřeva vlivem termické modifikace (Autor, 2022)	71
Obrázek 27: Změny holocelulózy u zkoumaných druhů dřeva vlivem termické modifikace (Autor, 2022)	71
Obrázek 28: Změny hemicelulóz u zkoumaných druhů dřeva vlivem termické modifikace (Autor, 2022)	71
Obrázek 29: Drsnost (<i>Ra</i>) po frézování Smrku (<i>Picea abies L.</i>) T = 20 °C (Autor, 2022)..	72
Obrázek 30: Drsnost (<i>Ra</i>) po frézování Smrku (<i>Picea abies L.</i>) T = 160 °C (Autor, 2022)	73
Obrázek 31: Drsnost (<i>Ra</i>) po frézování Smrku (<i>Picea abies L.</i>) T = 180 °C (Autor, 2022)	73
Obrázek 32: Drsnost (<i>Ra</i>) po frézování Smrku (<i>Picea abies L.</i>) T = 210 °C (Autor, 2022)	73
Obrázek 33: Drsnost (<i>Ra</i>) po frézování Dubu (<i>Quercus robur L.</i>) T = 20 °C (Autor, 2022)	74
Obrázek 34: Drsnost (<i>Ra</i>) po frézování Dubu (<i>Quercus robur L.</i>) T = 160 °C (Autor, 2022)	74
Obrázek 35: Drsnost (<i>Ra</i>) po frézování Dubu (<i>Quercus robur L.</i>) T = 180 °C (Autor, 2022)	75
Obrázek 36: Drsnost (<i>Ra</i>) po frézování Dubu (<i>Quercus robur L.</i>) T = 210 °C (Autor, 2022)	75
Obrázek 37: Drsnost (<i>Ra</i>) po frézování Teaku (<i>Tectona grandis</i>) T = 20 °C (Autor, 2022)	76
Obrázek 38: Drsnost (<i>Ra</i>) po frézování Teaku (<i>Tectona grandis</i>) T = 160 °C (Autor, 2022)	76
Obrázek 39: Drsnost (<i>Ra</i>) po frézování Teaku (<i>Tectona grandis</i>) T = 180 °C (Autor, 2022)	76
Obrázek 40: Drsnost (<i>Ra</i>) po frézování Teaku (<i>Tectona grandis</i>) T = 210 °C (Autor, 2022)	77
Obrázek 41: Drsnost (<i>Ra</i>) po frézování Padouku (<i>Pterocarpus soyauxii</i>) T = 20 °C (Autor, 2022)	77

Obrázek 42: Drsnost (R_a) po frézování Padouku (<i>Pterocarpus soyauxii</i>) T = 160 °C (Autor, 2022)	78
Obrázek 43: Drsnost (R_a) po frézování Padouku (<i>Pterocarpus soyauxii</i>) T = 180 °C (Autor, 2022)	78
Obrázek 44: Drsnost (R_a) po frézování Padouku (<i>Pterocarpus soyauxii</i>) T = 210 °C (Autor, 2022)	78
Obrázek 45: Vlnitost (W_a) po frézování Smrku (<i>Picea abies L.</i>) T = 20 °C (Autor, 2022)	80
Obrázek 46: Vlnitost (W_a) po frézování Smrku (<i>Picea abies L.</i>) T = 160 °C (Autor, 2022)	81
Obrázek 47: Vlnitost (W_a) po frézování Smrku (<i>Picea abies L.</i>) T = 180 °C (Autor, 2022)	81
Obrázek 48: Vlnitost (W_a) po frézování Smrku (<i>Picea abies L.</i>) T = 210 °C (Autor, 2022)	81
Obrázek 49: Vlnitost (W_a) po frézování Dubu (<i>Quercus robur L.</i>) T = 20 °C (Autor, 2022)	82
Obrázek 50: Vlnitost (W_a) po frézování Dubu (<i>Quercus robur L.</i>) T = 160 °C (Autor, 2022)	82
Obrázek 51: Vlnitost (W_a) po frézování Dubu (<i>Quercus robur L.</i>) T = 180 °C (Autor, 2022)	83
Obrázek 52: Vlnitost (W_a) po frézování Dubu (<i>Quercus robur L.</i>) T = 210 °C (Autor, 2022)	83
Obrázek 53: Vlnitost (W_a) po frézování Teaku (<i>Tectona grandis</i>) T = 20 °C (Autor, 2022)	84
Obrázek 54: Vlnitost (W_a) po frézování Teaku (<i>Tectona grandis</i>) T = 160 °C (Autor, 2022)	84
Obrázek 55: Vlnitost (W_a) po frézování Teaku (<i>Tectona grandis</i>) T = 180 °C (Autor, 2022)	84
Obrázek 56: Vlnitost (W_a) po frézování Teaku (<i>Tectona grandis</i>) T = 210 °C (Autor, 2022)	85
Obrázek 57: Vlnitost (W_a) po frézování Padouku (<i>Pterocarpus soyauxii</i>) T = 20 °C (Autor, 2022)	85
Obrázek 58: Vlnitost (W_a) po frézování Padouku (<i>Pterocarpus soyauxii</i>) T = 160 °C (Autor, 2022)	86

Obrázek 59: Vlnitost (W_a) po frézování Padouku (<i>Pterocarpus soyauxii</i>) T = 180 °C (Autor, 2022)	86
Obrázek 60: Vlnitost (W_a) po frézování Padouku (<i>Pterocarpus soyauxii</i>) T = 210 °C (Autor, 2022)	86
Obrázek 61: Energetická náročnost po frézování u Smrku (<i>Picea abies L.</i>) T = 20 °C (Autor, 2022)	90
Obrázek 62: Energetická náročnost po frézování u Smrku (<i>Picea abies L.</i>) T = 160 °C (Autor, 2022)	90
Obrázek 63: Energetická náročnost po frézování u Smrku (<i>Picea abies L.</i>) T = 180 °C (Autor, 2022)	90
Obrázek 64: Energetická náročnost po frézování u Smrku (<i>Picea abies L.</i>) T = 210 °C (Autor, 2022)	90
Obrázek 65: Energetická náročnost po frézování u Dubu (<i>Quercus robur L.</i>) T = 20 °C (Autor, 2022)	92
Obrázek 66: Energetická náročnost po frézování u Dubu (<i>Quercus robur L.</i>) T = 160 °C (Autor, 2022)	92
Obrázek 67: Energetická náročnost po frézování u Dubu (<i>Quercus robur L.</i>) T = 180 °C (Autor, 2022)	93
Obrázek 68: Energetická náročnost po frézování u Dubu (<i>Quercus robur L.</i>) T = 210 °C (Autor, 2022)	93
Obrázek 69: Energetická náročnost po frézování u Teaku (<i>Tectona grandis</i>) T = 20 °C (Autor, 2022)	95
Obrázek 70: Energetická náročnost po frézování u Teaku (<i>Tectona grandis</i>) T = 160 °C (Autor, 2022)	95
Obrázek 71: Energetická náročnost po frézování u Teaku (<i>Tectona grandis</i>) T = 180 °C (Autor, 2022)	95
Obrázek 72: Energetická náročnost po frézování u Teaku (<i>Tectona grandis</i>) T = 210 °C (Autor, 2022)	95
Obrázek 73: Energetická náročnost po frézování u Padouku (<i>Pterocarpus soyauxii</i>) T = 20 °C (Autor, 2022)	97
Obrázek 74: Energetická náročnost po frézování u Padouku (<i>Pterocarpus soyauxii</i>) T = 160 °C (Autor, 2022)	97

Obrázek 75: Energetická náročnost po frézování u Padouku (<i>Pterocarpus soyauxii</i>) T = 180 °C (Autor, 2022)	98
Obrázek 76: Energetická náročnost po frézování u Padouku (<i>Pterocarpus soyauxii</i>) T = 210 °C (Autor, 2022)	98

Seznam tabulek

Tab. 1: Základní rozdělení dřevin a někteří jejich zástupci (Gandelová, Šlezingerová, 2014)	23
Tab. 2: Základní způsoby modifikace rostlého dřeva (Reinprecht, 2008).....	28
Tab. 3: Změna vlastností u vybraných druhů tvrdého a měkkého dřeva Thermo-S, Thermo-D (www.thermowood.fi, 2022).....	35
Tab. 4: Dělení profilu na dlouhovlnné a krátkovlnné komponenty (ČSN EN ISO 4287, 1999)	50
Tab. 5: Názvosloví geometrických parametrů (ČSN EN ISO 4287, 1999).....	51
Tab. 6: Hustota zkoumaného dřeva při daných teplotách termické úpravy (Autor, 2022)..	57
Tab. 7: Časy jednotlivých fází termické modifikace zkoumaného dřeva (Autor, 2022).....	58
Tab. 8: Technické parametry spodní frézky (Autor, 2022)	59
Tab. 9: Výsledný přepoččet otáček na řeznou rychlost (Autor, 2022).....	60
Tab. 10: Technické parametry frézovací hlavy (Autor, 2022)	60
Tab. 11: Technické parametry podávacího zařízení (Autor, 2022)	60
Tab. 12: Parametry měření podle normy ČSN EN ISO 4287 (ČSN EN ISO 4287, 1999) .	63
Tab. 13: Vyhodnocení testovaných faktorů na základě hodnoty “P“ (Gaff, Gáborik, 2009)	67
Tab. 14: Chemická analýza přírodního a termicky modifikovaného dřeva (Autor, 2022)..	68
Tab. 15: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu <i>Ra</i> u Smrku (<i>Picea abies L.</i>) (Autor, 2022).....	88
Tab. 16: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu <i>Wa</i> u Smrku (<i>Picea abies L.</i>) (Autor, 2022).....	89
Tab. 17: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu energetické náročnosti procesu u Smrku (<i>Picea abies L.</i>) (Autor, 2022).....	89
Tab. 18: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu <i>Ra</i> u Dubu (<i>Quercus robur L.</i>) (Autor, 2022).....	91
Tab. 19: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu <i>Wa</i> u Dubu (<i>Quercus robur L.</i>) (Autor, 2022).....	91
Tab. 20: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu energetické náročnosti procesu u Dubu (<i>Quercus robur L.</i>) (Autor, 2022).....	92
Tab. 21: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu <i>Ra</i> u Teaku (<i>Tectona grandis</i>) (Autor, 2022).....	93

Tab. 22: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu <i>Wa</i> u Teaku (<i>Tectona grandis</i>) (Autor, 2022)	94
Tab. 23: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu energetické náročnosti procesu u Teaku (<i>Tectona grandis</i>) (Autor, 2022)	94
Tab. 24: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu <i>Ra</i> u Padouku (<i>Pterocarpus soyauxii</i>) (Autor, 2022).....	96
Tab. 25: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu <i>Wa</i> u Padouku (<i>Pterocarpus soyauxii</i>) (Autor, 2022).....	96
Tab. 26: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu energetické náročnosti procesu u Padouku (<i>Pterocarpus soyauxii</i>) (Autor, 2022)	97

Seznam použitých zkratek

ANOVA – Analysis of variance (analýza rozptylu)

apod. – a podobně

atd. – a tak dále

cca – cirka

el. – elektrické

et al. – Et alii (kolektiv)

MDF – Medium Density Fibreboards

m. n. m. – metrů nad mořem

např. – například

obr. – obrázek

OHT – Oil Heat Treatment

Pozn. – poznámka

p. b. – procentní bod

rad. – radiálního

st. – století

Tab. – tabulka

tzv. – tak zvaně

tang. – tangenciálního

tj. – to je

Úvod

Dřevo je jedním z nejstarších materiálů, které doprovází člověka po celá tisíciletí a jako obnovitelný zdroj je pro lidskou společnost nenahraditelné. V počátcích lidské společnosti se dřevo využívalo zejména k energetickým účelům, postupem času a vývojem lidské společnosti nacházelo dřevo mnohá uplatnění téměř ve všech odvětvích. V současné době se dřevo díky svým fyzikálním a mechanickým vlastnostem využívá k výrobě konstrukčních prvků, interiérového a exteriérového nábytku, sportovních potřeb, lodí, hraček, paliva ke spalování apod..

Pro širší využití dřeva a jeho výrobků je potřeba volit vhodné ochranné prostředky proti napadení biotickými a abiotickými činiteli. Tomuto riziku se lze vyvarovat, nebo jej úplně odstranit správnou úpravou a ochranou, a proto se na dřevo aplikují různé nátěrové hmoty. Dříve než světlo světa spatřily tyto ochranné nátěrové prostředky, tak se prováděla ochrana dřeva zuhelnatěním. Jedná se o japonský způsob ochrany dřeva technikou Shou-sugi-ban, která v japonštině znamená spálená cedrová prkna. Životnost takto ošetřeného dřeva je minimálně 80.let. Tato metoda se dá přirovnat k termické modifikaci dřeva (Kvietková, 2015; Gandelová, Šlezingerová, 2014; Jirout, 1928).

V dnešní době je kladen důraz na ekologické způsoby ochrany dřeva, a protože některé z používaných způsobů negativně působily na životní prostředí bylo potřeba vyvinout nové metody ochrany. Mezi takové metody řadíme termickou modifikaci, která byla vyvinuta v průběhu 20. století. Největším zástupcem v oblasti termické úpravy dřeva je metoda ThermoWood, která se od samého počátku zabývala úpravou měkkých a tvrdých domácích dřevin. Společnosti provádějící termickou modifikaci stále častěji využívají jako materiál dřevo tropických stromů, neboť se jedná o materiál velmi žádaný, i když tato oblast není příliš probádaná. Stejně tak i my jsme v našem výzkumu použili kromě smrku a dubu i dřeva exotická, teak a padouk, abychom mohli porovnat nastalé změny po termické modifikaci s vlivem na kvalitu obrábění i přesahem do změn v chemickém složení.

Tropické dřevo je většinou velmi tvrdé a odolné, což je dáno chemickou a anatomickou stavbou, ale i podmínkami růstu. Je tedy otázkou, zda a do jaké míry bude mít termická modifikace vliv na vybraná dřeva a ovlivní proces obrábění.

Z ekonomických důvodů se pro proces obrábění využívají technologie shodné jako pro dřevo tuzemského původu. Jedná se o kvalitní a výkonné stroje se snadným nastavením požadovaných parametrů jako je řezná a posuvná rychlost a úhel čela nástroje. V našem výzkumu jsou v průběhu rovinného frézování posuzovány veličiny profilu drsnosti (Ra) a

profilu vlnitosti (Wa), aby bylo možné stanovit optimální parametry pro co nejlepší výslednou kvalitu povrchu.

Doprovodnou součástí tohoto výzkumu je posouzení změn v chemické struktuře modifikovaného dřeva. Vyhodnocení získaných výsledků nám umožní posoudit působení vlivu jednotlivých faktorů na kvalitu povrchu a nalezení nejvhodnějších kombinací parametrů při rovinném frézování.

Cíl práce

Progresivní úpravou dřeva, kterou nazýváme termická modifikace lze zlepšit či zachovat dosavadní vlastnosti materiálu. Jedna část této práce se zabývá sumarizováním již dosud známých informací a poznatků z hlediska zkoumané problematiky a samotnou prací s odborným textem.

Hlavním cílem této diplomové práce je zejména zanalyzování účinků parametrů charakterizujících technologii obrábění termicky modifikovaného dřeva (druhů dřeva, teplot termické modifikace, parametrů obrábění) a jejich interakce na hodnoty kvality povrchu s přesahem do změn chemického složení dřeva vlivem termické modifikace, kde jsme se zaměřili na změny v obsahu zastoupení ligninu, celulózy, hemicelulóz, holocelulózy a extraktivních látek, které jsme následně vyhodnotili a porovnali s výsledky z jiných, podobných výzkumů. Kvalita povrchu se může v závislosti na druhu zkoumaného dřeva, stupni termické úpravy, způsobu a nastavení parametrů obrábění měnit. Kontaktní metodou měření byly zjištěny průměrné aritmetické úchytky profilu drsnosti (Ra) a profilu vlnitosti (Wa) obrobeného povrchu vybraných druhů dřeva, ze zjištěných výsledků budeme volit optimální parametry pro rovinné frézování. Vedlejším cílem, bylo sledování vlivu chemického složení na řezný příkon při rovinném frézování.

Na základě výsledků statisticky analyzovat účinky mezi jednotlivými faktory:

- 1) Obráběný materiál smrk, dub, teak, padouk
- 2) Teploty termické modifikace: 160 °C, 180 °C, 210 °C
- 3) Podávací rychlost: 4, 8, 11 [m/min]
- 4) Řezná rychlost: 20, 30, 40 [m/s]
- 5) Úhel řezného čela nástroje: 15°, 20°, 25°

na sledované parametry, kterými jsou:

- 1) Změny v chemické struktuře všech čtyř dřev během všech stupňů termické modifikace a vliv chemického složení na řezný příkon při rovinném frézování.
- 2) Kvalita opracovaného povrchu zjištěná kontaktní metodou, hodnocenou pomocí:
 - Ra – průměrná aritmetická úchytky posuzovaného profilu drsnosti,
 - Wa – průměrná aritmetická úchytky posuzovaného profilu vlnitosti.
- 3) Vzájemná interakce uvedených parametrů a stanovení optimálních parametrů při rovinném frézování.

1 Dřevní surovina a rozdělení

Dřevo je jedním z nejstarších stavebních materiálů. Lidstvo používalo dřevo k úkrytu a ochraně již od pradávna. Dnes dřevo nabývá na hodnotě v důsledku úbytku lesů z různých důvodů, nemožnosti pěstovat nové stromy místo vykácených nebo v důsledku pozdního růstu stromů. Dřevo se dnes využívá jako stavební (střešní konstrukce), nosný nebo dekorativní materiál. Dále jsou to stavební materiály jako dřevotříska, MDF a překližka, které se vyrábějí z dřevěných třísek, pilin a prachu, které jsou vedlejšími produkty zpracování dřeva. Dřevo, které bylo nařezáno a zpracováno do standardních rozměrů, se nazývá řezivo (Tsoumis, 1991; Gandelová, Šlezingerová, 2014).

Dřevo je organický materiál s vláknitou, heterogenní a anizotropní texturou, který se získává z polokeřů, keřů a stromů a je určeno k dalšímu zpracování. V základním dělení můžeme dřeviny rozdělit na tuzemské, které řadíme mezi stromy mírného pásma a exotické rostoucí v Africe, Americe, Asii a Austrálii. Obě tyto skupiny mají zastoupení v podobě stromů jehličnatých a listnatých. Dále můžeme dřeviny dělit na nahosemenné a krytosemenné. Nahosemenné jsou ty dřeviny, které nevytvářejí květy ani plody a řadí se mezi ně jehličnaté stromy. Oproti tomu krytosemenné vytvářejí květy i plod a ty dále dělíme na jednoděložné (palmy) a dvouděložné (jabloň, hrušeň) (Jirout, 1928; Gandelová, Šlezingerová, 2014).

V tropických oblastech nalezneme mnohonásobně vyšší zastoupení druhů stromů než v oblastech mírného pásma. Tyto dřeviny mají odlišné vlastnosti než tuzemské, díky absenci zimního období a růstu v neustálé horkém tropickém či subtropickém klimatu. U tuzemských dřevin můžeme v období zimy pozorovat tzv. klidovou fázi. U tropických dřevin může být tato fáze způsobena pouze suchem. Ve stále vlhkých oblastech je pravidelný růst řízen samotnou rostlinou, v ostatních oblastech pak podle srážek. Nepřetržité přirůstání dřeva je jev spíše ojedinělý, neboť takový strom by měl neustále mladé listy a byl by snáze ohrožen napadením škůdci. Dřevo tropických stromů je velmi husté (až 1000 kg /m³), odolné vůči teplotním změnám, vlhkosti, hnilobě nebo napadení parazitního rázu. Díky svým vlastnostem nevyžaduje dřevo tropických stromů žádnou speciální ochranu impregnací. Exotické dřevo se vyznačuje svým ojedinělým zabarvením od žluto-zelené, šedé až po červenou. Většina tropických stromů za přítomnosti přírodní látky zvané phytoncides ve dřevě má antibakteriální vlastnost (Rohwer, 2002; Ulrich, 2008; Josten, 2010).

Stavbu dřeva lze rozdělit na čtyři strukturální hladiny a to hladinu: chemickou, submikroskopickou, mikroskopickou a makroskopickou. Na základě těchto hladin můžeme

posoudit druh dřeva a jeho vlastnosti. Na úrovni chemického složení sledujeme obsah hlavních složek, které tvoří vnitřní hmotu buněk v zastoupení ligninu, celulózy, hemicelulózy, extraktivních látek a doplňujících složek. Submikroskopická stavba definuje stavbu a vrstvy buněčných stěn ve dřevě za použití mikroskopů. Mikroskopická struktura se posuzuje na třech základních řezech dřevem (příčném, radiálním a tangenciálním). Dřevo jehličnatých a listnatých dřevin se od sebe významně liší svou anatomickou stavbou, kde dřevo jehličnanů má pravidelnou a relativně jednoduchou strukturu složenou ze dvou základních elementů (cévic a parenchymatických buněk.) Na makroskopické úrovni pozorujeme pouhým okem charakteristické znaky a stavbu dřeva, stromů. Nejčastěji se jedná o letokruhy, jádro, běl, pryskyřičné kanálky, dřeňové paprsky, ale i barvu a vůni dřeva (Čunderlík, 2009; Gandelová, Šlezingerová, 2014).

Tab. 1: Základní rozdělení dřevin a někteří jejich zástupci (Gandelová, Šlezingerová, 2014)

Základní rozdělení dřevin a někteří jejich zástupci		
Tuzemské		Exotické (tropické)
jehličnaté	listnaté	
smrk	buk	teak
borovice lesní	dub	padouk
modřín opadavý	bříza	mahagon
jedle, apod..	javor, apod..	meranti
		cedr, iroko, apod..

1.1 Smrk (*Picea abies* L.)

Smrk se řadí mezi stálezelené jehličnaté stromy a mezi s jednu z nejběžnějších a z hospodářského hlediska nejvýznamnějších dřevin střední a severní Evropy, kde tvoří souvislé plochy, v jižní Evropě roste spíše ostrůvkovitě. Na území České republiky se vyskytoval již v době ledové a dodnes se vyskytuje v nadmořské výšce od 900 m n. m. v podobě klimaxových a azonálních smrčín. Tyto původní (klimaxové), přirozené smrčiny najdeme na hřebenech Šumavy v nadmořské výšce 1200 m n. m., jsou stálé a neměnné již po staletí. Azonální smrčiny se přizpůsobily prostředí, například rašelinové smrčiny, které jsou zakrnělé díky nedostatku živin a nízkému pH a obsahu kyslíku v půdě. Ve větší míře se na našem území vyskytují nepůvodní smrkové monokultury, vyznačující se svou stejnověkostí, ale díky nepůvodním stanovištím jsou náchylnější na různé choroby a napadení škůdci. Na našem území smrkové porosty zauímají plochu téměř 14000 ha. Smrk se vyznačuje vzpřímenou stavbou výhonů s pravidelným, přeslenitým větvením a korunou

kuželovitého tvaru. Dorůstá výšky až 50–60 metrů s průměrem kmene až 1,5 metru a stáří 350–400 let. Velmi dobře snáší nadbytečnou vlhkost, oproti tomu nedostatek vláhy má vliv na dobrý růst. (Jirout, 1928; Musil a Hamerník, 2007; Úřadníček *et al.*, 2009; Walker, 2009; Josten, 2010).

Smrkové dřevo je bělové, má žluto bílou až nahnědlou barvu a voní pryskyřicí. Na řezu má výrazné letokruhy s jasně viditelným rozlišením jarní a letní přírůstkové vrstvy dřeva. Smrkové dřevo řadíme mezi měkká dřeva s hustotou do 550 kg/m³. Přesto smrkové dřevo vyniká svou houževnatostí, pružností a relativní pevností. Je snadno opracovatelné, velice dobře se suší, řeže a hobluje, avšak se hůře impregnuje. Taktéž je méně odolné vůči biotickým činitelům. Nejběžněji se využívá na krokve při stavbě střech, trámy, bednění a k výrobě papíru (Jirout, 1928; Gandelová *et al.*, 2009; Horáček, 2008).

Smrkové dřevo obsahuje zhruba: 50 % celulózy, 30 % ligninu, 16,5 % hemicelulózy, 3 % tuků a pryskyřic a 0,5 % popele. Dřevo smrku má četné, jasně charakteristické pryskyřičné kanálky, které jsou viditelné jak na příčném, tak i tangenciálním řezu. Dřeňové paprsky mají uprostřed pryskyřičný kanálek a mohou být jednořadé a vícevrstevnaté. Zcela chybí nebo se ojediněle vyskytuje podélné dřevní pletivo (parenchym). Obvodové tracheidy (cévice) dřeňových paprsků obsahují drobné dvojtečky se šikmými šterbinovými póry, buňky nemají pryskyřici a steny jsou spíše bezbarvé (Jirout, 1928; Klika a Černošský, 1953).

1.2 Dub (*Quercus robur L.*)

Dub řadíme mezi dřeviny listnaté a na našem území má největší zastoupení. V celosvětovém měřítku je nejoblíbenějším druhem a díky svým vlastnostem se stal nevhodnějším materiálem v nábytkářském průmyslu, ve stavebnictví, na výrobu člunů, sudů v oboru bednářství, sochařství a v neposlední řadě pro výrobu podlahových krytin. Jednotlivé druhy dubů jsou rozšířeny zejména v mírných a subtropických oblastech severní polokoule, v Americe a Asii zasahují i do tropů. Duby jsou dřeviny dlouhověké dosahující stáří 400–500 let, s pevným, tvrdým a těžkým dřevem. Dub dosahuje velkých rozměrů s mohutným kmenem a košatou korunou rostoucí do výšky 40 m, s 1,5metrovým průměrem kmene. Na celém světě nalezneme více jak 200 druhů dubů, na našem území má zastoupení Dub letní a zimní (Jirout, 1928; Úřadníček a Chmelař, 1995; Josten, 2010).

Dubové dřevo má jasně rozlišitelné jádro a běl, jádro je světlé až tmavohnědé barvy a běl úzká nažloutlé barvy. Dub letní má letokruhy širší, dřevo je tvrdší a těžší, hůře

opracovatelné. Kdežto u dubu zimního jsou letokruhy spíše užší, dřevo je měkčí a snadněji opracovatelné. Dub je strom jádrový s kruhovitě pórovitou stavbou se zřetelnou hranicí mezi letokruhy. (Jirout, 1928; Šlezingerová a Gandelová, 2012).

Dřevo dubu obsahuje: 38 % celulózy, 29 % hemicelulózu, 25 % ligninu a 8 % ostatních látek. Na všech řezech má jasně viditelné dřevné paprsky, které jsou kolmé k letokruhům. Na příčném řezu nestejně široká, ale zřetelně ohraničená, která jsou kruhovitě pórovitá s velkými póry v 1–3 řadách. Na podélných řezech můžeme jasně pozorovat hluboké rýhy, které vytváří široké jarní cévy (makropóry) v místech jarního dřeva. Letní cévy jsou převážně uspořádány v radiálním seskupení, jarní se nacházejí jednotlivě. Lumény cév bývají vyplněny thylami a proděravění mezi cévními články je jednoduché. Dřevné paprsky jsou homogenní jednovrstevnaté a mnohvrstevnaté. Buňky parenchymu nejsou ve spojení s trachejemi, v tangenciálním směru jsou síťovitě rozptýleny (Jirout, 1928; Šlezingerová, Gandelová, 2012).

1.3 Teak (*Tectona grandis* Linn)

Teak pochází z tropických lesů jižní a jihovýchodní Asie, kde může tvořit téměř čisté porosty. Přírodní porosty se nacházejí v Myanmaru, Přední a Zadní Indii, Jávě, Thajsku a Laosu, také v malých oblastech Číny a Kambodže. Roste v polohách od 400–800 metrů nad mořem, převážně v monzunových lesích, také se pěstuje na plantážích, kde je jedním z nejčastěji vysazovaných druhů. Je to dřevo vhodné pro námořní stavby, prvky lodních trupů a lodních mostů pro svou extrémní odolnost vůči rozkladu a korozivní aktivitě vody. Teak je vhodný pro nejrůznější použití od luxusních truhlářských výrobků, sudů a kádě na kapaliny, ale i žíravé látky, po schodiště a další konstrukce ve styku s vodou, popř. zemí. Při procesu krájení teakového dřeva vzniká pěkně tvarovaná dýha. Mimo jiného se jako většina dřevin používá jako palivové dříví. Teak je opadavý středně velký až velký strom dosahující výšky 40–50 metrů, jeho koruna je zaoblená a otevřená. Kmen je obecně rovný a dorůstá do průměru 150–200 cm, kůra podélně rozpukaná a jemně šupinatá, šedá až hnědá (Jirout, 1928; Wagenführ *et al.*, 2021; Josten, 2010; <https://ldf.mendelu.cz>, 2022).

Jádrové dřevo se vyznačuje hnědožlutou nebo šedohnědou barvou, která postupným stárnutím tmavne a získává zlatavý lesk. Někdy je béžové vyplněné tmavšími žilkami, příležitostně zcela hnědočerné. Ono hnědočerné ojedinělé zbarvení je způsobeno pravidelným vystavením požárů z buše, přičemž tento stav není v dřevozpracujícím

průmyslu oceňován. Bělové dřevo se od jádra jasně rozlišuje a je široké 2–6 cm. Dřevo je na dotek mastné a v čerstvém stavu má charakteristickou vůni staré kůže. Teak je dřevo střední hmotnosti, při obsahu vlhkosti 12 % je hustota v rozmezí 610–730 kg/m³ (Jirout, 1928; Wagenführ *et al.*, 2021; <https://ldf.mendelu.cz>, 2022).

Dřevo obsahuje 38–47,5 % celulózy, 30–33 % ligninu, 12,5–14,5 % pentózanů, 1,1–1,14 % popela, z čehož převážnou většinu tvoří oxid křemičitý. Teakové dřevo je polokruhovitě až kruhovitě porézní se zřetelnou hranicí růstových prstenců, ohraničené velkými ranými cévami a okrajovým parenchymem. Na radiálním řezu jsou patrné cévy znatelné jako rýhy, občas vyplněné tenkostěnnými thylami. Dřeňové paprsky jsou převážně homogenní, někdy heterogenní a jsou stejně jako cévy viditelné na radiální řezu (Wagenführ *et al.*, 2021; <https://ldf.mendelu.cz>, 2022; Cardoso, Sousa, Quilhó *et al.* 2015; <https://www.prota4u.org/>, 2022).

1.4 Padouk (*Pterocarpus soyauxii*)

Padouk se vyskytuje od jihovýchodní Nigérie na východ po východní DR Kongo a na jih po severní Angolu. Padouk je stálezelený, někdy opadavý velký strom až 55 m vysoký s přímým válcovitým kmenem dosahující průměru 140–200 cm s kupolovitou otevřenou korunou. Kůra stromu má šedohnědou až hnědou barvu, která se odlupuje v tenkých nepravidelných vločkách, při sekání hojně vylučující červenou gumu. Dřevo padouku je cenné víceúčelové tvrdé dřevo. Pro svou odolnost vůči vodě se lokálně používá k výrobě kánoí a pro svou krásnou načervenalou barvu je oblíbený nejen na výrobu nábytku a hudebních nástrojů, ale i pro obory řezbářství a sochařství. Dřevo má vysokou rezonanční kvalitu, protože jeho tlumení vibrací je nízké a dříve se z něj vyráběly velké štěrbinové bubny a také xylofony. Pro svou vysokou odolnost je dřevo vynikající pro stavebnictví, truhlářství, stavbu lodí, ale také pro výrobu dýhy, kulečnickových stolů a sportovních potřeb např. pádel. Jádrové dřevo je také zdrojem tzv. pravého barviva barwood, které se v Africe stále používá k barvení látek, vláken, oděvů a ozdob (Jirout, 1928; <https://www.prota4u.org/>, 2022; Josten, 2010).

Dřevo padouku je středně těžké, hustota se pohybuje okolo 675–810 kg/m³ při 12 % vlhkosti. Jádrové dřevo je v čerstvém řezu jasně červené, po expozici přechází do oranžovočervené a tmavne do purpurově hnědé barvy. Jádro je zřetelně ohraničené od bělavého až hnědožlutého bělového dřeva o šířce 6–15 cm. Čerstvě nařezané dřevo má

slabou aromatickou vůni a textura dřeva hrubá. Dřevo schne dobře, ale středně pomalu, s malým rizikem deformace, po vyschnutí je velmi stabilní. Míra sesychání při jeho sušení je v tang. a rad. směru nízká. Jádrové dřevo je trvanlivé a také odolné proti houbám, hůře impregnovatelné konzervačními prostředky jako bělové dřevo, které je méně odolné (Kukachka, 1969; <https://www.prota4u.org/>, 2022).

Dřevo je difúzně porézní, jádrové dřevo bohaté na extraktivní látky, obsah popela, ligninu a celulózy je mírný a hranice růstových prstenců jsou nezřetelné nebo chybí. Tracheidy a vlákna padouku jsou s jednoduchými až drobně ohraničenými jamkami a přítomná vlákna jsou tenkostěnná až silnostěnná. Dřevo padouku obsahuje výhradně jednořadé paprsky, přítomné jsou i prizmatické krystaly v komorových buňkách axiálního parenchymu. (Jirout, 1928; <https://www.prota4u.org/>, 2022).

1.5 Ochrana a úprava dřeva

Pokud se dřevo nachází v optimálních podmínkách, je jeho životnost vysoká a vesměs srovnatelná s různými stavebními materiály. Cílem ochrany dřeva je vytvoření materiálů s prodlouženou životností a trvanlivostí, včetně omezení vlivů okolního prostředí ze strany biotických a abiotických činitelů. Tito činitelé mají největší vliv na degradaci dřeva. Jejich působením dochází k narušení mechanických vlastností dřeva a estetického vzhledu. V případech napadení plísněmi mohou způsobovat alergické reakce či vznik vážnějších chorob. Biotické faktory jsou živé organismy a mezi nejvýznamnější patří dřevokazné houby, plísně, bakterie a hmyz. Jejich dlouhodobější působení dokáže dřevo v poměrně krátkém čase znehodnotit. Abiotické faktory jsou vlivy neživé přírody, jako jsou povětrnostní vlivy, vítr, mráz, sníh, důsledky záplav či dlouhodobého sucha a v neposlední řadě požáry bez vlivu člověka. Abychom zabránili degradaci dřeva, provádíme preventivní ochranu dřeva či úpravu (Reinprecht, Vidholdová, 2008).

Použitím správné ochrany, modifikace neboli úpravy dřeva můžeme prodloužit jeho životnost, trvanlivost, čehož lze dosáhnout několika druhy ochrany – úpravy:

- **Konstrukční (stavebně – fyzikální) ochrana dřeva**

Cílem je zvolit takové postupy, za účelem preventivní ochrany, které omezí kontakt, nebo dlouhodobější působení vlhkosti na dřevo a dřevěné konstrukce. Což znamená zajistit

pro dřevo a v jeho okolí takové podmínky, které by neumožňovali napadení biotickými a abiotickými škůdci a jejich rozvoj (Josten, 2010).

- **Chemická ochrana dřeva**

Je preventivní nástroj ochrany zejména proti biotickým činitelům, nebo expozici dřevu vůči povětrnostním vlivům. Během chemické ochrany se aplikují na dřevo chemické přípravky podle hloubkové úpravy nátěrem, máčením, postřikem nebo jinými impregnačními technologiemi (Josten, 2010; Reinprecht, 2008).

- **Modifikační ochrana dřeva**

Cílem je ponechání nebo zlepšení pozitivních vlastností jako je pružnost, pevnost, atd... a zároveň snaha o odstranění vlastností negativních, zejména rozměrové stability nebo opotřebitelnosti. K modifikaci dřeva se využívají metody mechanické, chemické, biologické a termické. Pro dřevo upravené modifikací je typická úmyslná změna struktury s cílem zdokonalení jeho vlastností např. odolnosti – termické, biologické nebo vůči agresivním chemikáliím, dále je typické zvýšení pevnosti, tvrdosti, barevné stálosti, odpudivosti vůči vodě a v neposlední řadě rozměrové stability apod. I přes poměrně vysoké náklady a náročnost technologicko-výrobního procesu, našlo termicky upravené dřevo své uplatnění na trhu, protože takto upravené dřevo získává stejné, někdy i lepší vlastnosti než dřevo tropického původu (<https://www.n-i-s.cz/>, 2022; Reinprecht, 2008; Hill, 2006).

Tab. 2: Základní způsoby modifikace rostlého dřeva (Reinprecht, 2008)

MODIFIKAČNÍ METODA	ZMĚNA STRUKTURY DŘEVA		
	Geometrická a morfologická	Anatomická	Molekulární
Mechanická	+	+	-
Chemická - vyplnění lumenů	-	+	-
- blokace OH skupin	-	(+)	+
Termická	-	(+)	+
Biologická	-	-	+

Pozn.: (+) → nevýrazná změna, + → výrazná změna, - → beze změny

2 Termická modifikace dřeva

Termická modifikace dřeva je komerční výrobou tepelného zpracování dřeva, která obvykle probíhá při teplotách 160 až 240 °C. Jedná se o technologický proces, téměř šetrný k životnímu prostředí, který za přítomnosti působení vyšších teplot, páry a podtlaku způsobuje úmyslnou úpravu stavby dřeva, bez použití chemických látek a předchozí impregnace (Yasuda, Minato, 1994). V samotném procesu tepelné úpravy dřeva dochází k částečnému odbourávání a rozkladu i těch látek, které jsou termicky odolné. Cílem termické modifikace dřeva je vytvoření materiálu s vyšší rozměrovou stabilitou, zvýšenou odolností zejména vůči biotickým škůdcům, zachováním případně zlepšením mechanických vlastností (pevnost, tvrdost, tuhost) a estetického vzhledu (lesk, textura). Mimo jiné dosažení materiálu s nižší hydroskopicitou, získání materiálu použitého jako náhrada za některé druhy tropického dřeva s vysokou trvanlivostí a rozměrovou stabilitou (Reinprecht, 2008; Reinprecht, Vidholdová, 2008; Yasuda, Minato, 1994).

Výsledkem je materiál, který je tmavší barvy, má zlepšenou rozměrovou stálost a odolnost ve srovnání s neupraveným dřevem, ale může také docházet ke snížení pevnosti, zejména odolnosti proti lomu. Pro proces termické modifikace se nevyužívají teploty nad 240 °C, protože degradace dřeva se stává příliš závažnou na to, aby byl proces komerčně užitečný (Reinprecht, 2008; Reinprecht, Vidholdová, 2008; <https://www.thermowood.fi>, 2022).

Ve dřevu vystavenému teplotám nad 150–170 °C dochází v chemické struktuře dřeva k podstatným změnám, a to za normálních podmínek časových, tlakových či expozičních. Při teplotách od 180 do 280 °C nastávají ve struktuře dřeva zřetelné a podstatné změny. K degradaci materiálu dochází u teplot přesahujících hodnotu 300 °C, kdy dochází k uvolňování hořlavých plynů, což vede k požáru, jehož výsledkem je zuhelnatělé dřevo. Nejvíce změn, které jsou způsoby termickou úpravou, se týkají jeho chemické struktury (Reinprecht, 2008; Reinprecht, Vidholdová, 2008; Yasuda, Minato, 1994).

2.1 Historie a vývoj

Tepelná úprava není revoluční nápad například již Vikingové před stovkami let opalovali trupy svých lodí, aby zabránili hnilobě. Domorodí Američané využívali oheň k tvrzení svých šípů a dalších dřevěných nástrojů, které používali pro každodenní život. V 18. století Japonci vyvinuli to, co nazývají shou sugi ban, techniku konzervace dřeva

zuhelnatěním ohněm. První zprávy o tepelné úpravě dřeva jako takové pocházejí z roku 1915, kdy laboratoř Forest Products Laboratory v Madison Wisconsinu pod vedením Harryho Tiemanna zahřívala vzduchem vysušené dřevo v přehřáté páře na 150 °C a v tomto výzkumu pokračovali i nadále ve 30. a 40. letech 20. st. První pokusy o využití této technologie se uskutečnily v USA a zahrnovaly ohřev dřeva, které bylo ponořeno pod roztavený kov při teplotách mezi 160 až 260 °C. V 90. letech však došlo k obnovení zájmu o tepelné úpravy a komerční prostředí bylo konečně příznivé pro využití této technologie. Tento obnovený zájem, zejména v Evropě, byl veden obavami o životní prostředí a zavedením právních předpisů, jako je evropská směrnice o biocidech. V reakci na to byly vyvinuty komerční procesy ve Francii (retifikace), Finsku (Thermowood), Německu (Menz Hölz) a Nizozemsku (Plato Wood). Ve dvacátém prvním století nachází termická modifikace stále větší uplatnění ve venkovních obkladech, terasách a truhlářských výrobcích a je dobře zavedenou komerční technologií, přičemž evropská produkce termicky modifikovaného dřeva nyní přesahuje 500 000 m³ (Charles, Frihart, 2005; Mayes, Oksanen, 2003; <https://www.thermowood.fi>, 2022; <https://iforest.sisef.org/>, 2022).

2.2 Technologie výroby

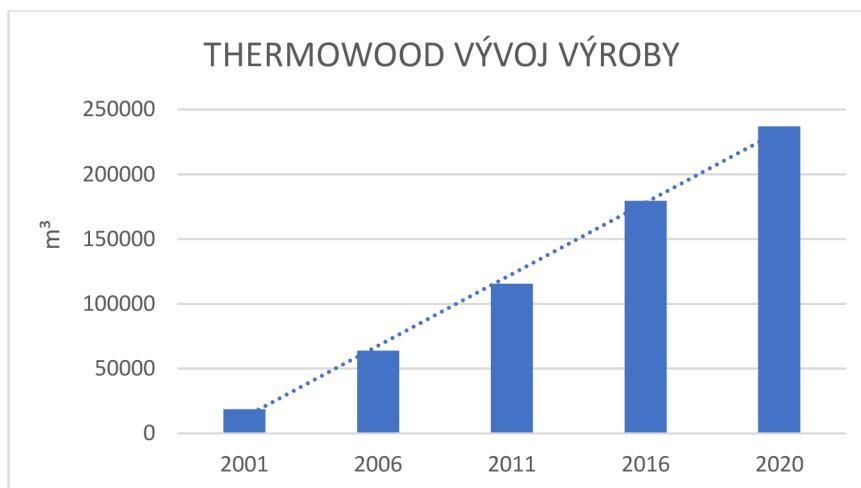
V převážné části technologických procesů při výrobě termodřeva dochází k zabarvení dřeva do odstínů od žluté po tmavohnědou. Vlivem těchto procesů nastává snížení rázové houževnatosti dřeva, pevnosti v tahu a ohybu. Naopak se minimálně mění modul pružnosti, který může i narůstat do vyšších hodnot. Celková změna znaků termicky modifikovaného dřeva včetně rozsahu jejich změny je závislá na podmínkách úpravy (Reinprecht, Vidholdová, 2008).

V současnosti využívají nejrůznější vyspělé technologie termické úpravy dřeva finské, francouzské, holandské, německé, dánské a americké společnosti (Bondar, 2015).

- **ThermoWood®**

ThermoWood® je výsledkem inovativního procesu, zajišťující zvýšenou odolnost dřeva a zlepšení jeho kvality. První tepelně upravené dřevo vyrobili ve 30. letech minulého století němečtí vědci Stamm a Hansen a ve 40. letech americký vědec White. Bavendam, Runkel a Buro pak pokračovali ve výzkumu v 50. letech 20. století. Termín ThermoWood®

se poprvé objevil počátkem 90. let 20. st., kdy VTT (Technické výzkumné centrum ve Finsku) dále rozšířilo výzkum na tepelné zpracování, a tak vznikla metoda ThermoWood®. Výrobní proces ThermoWood® využívá teplo, páru a vodu. Dřevo se zahřívá po dlouhou dobu při teplotách až 208 °C. Toto tepelné zpracování vytváří specifické chemické změny dřeva, což vede k dlouhodobému a stabilnímu produktu. ThermoWood® je registrovanou ochrannou známkou, kterou mohou používat pouze členové Finnish ThermoWood Association. Asociace má auditovaný systém kontroly kvality materiálů ThermoWood® vyráběných ve všech částech světa včetně Finska. Na obrázku 1 lze vidět rostoucí trend zájmu o termicky modifikované dřevo od roku 2001 (Hill, 2006; <https://www.thermowood.fi>, 2022; <https://iforest.sisef.org/>, 2022).



Obrázek 1: Vývoj produkce ThermoWood (www.thermowood.fi, 2022)

- **RetificatWood**

Principem výroby je zahřívání předem vysušeného dřeva na vlhkost 12 % atmosférou dusíku, při teplotách okolo 180–260 °C. Díky nižší termooxidační reakci probíhající ve dřevě je zachována původní pevnost. Jedná se o francouzský postup výroby a jeho průmyslovým zpracováním se zabývá od roku 1995 společnost NOW (New Option Wood) (Reinprecht, Vidholdová, 2008; Hill, 2006; Vernois, 2001).

- **Le Bois Perdure**

Technologie, vyvinutá ve Francii, využívá teploty sušení mezi 180 a 230 °C. Produktem je přírodní dřevo ošetřené tepelnou úpravou v řízené atmosféře, bez přidání chemikálií. Takto ošetřené dřevo získává pro hotové výrobky zajímavé zabarvení, výrazně se zvyšuje jeho tvrdost a rozměrová stálost a vyvíjí se lepší odolnost proti degradaci a

odolnost vůči hmyzu a mikroorganismům. Dřevo, ale ztrácí část své elasticity, což omezuje jeho použití v oblasti stavebnictví, zejména pro konstrukce. Výrobní proces probíhá ve třech fázích. Nejprve je dřevo zbaveno volné vody, poté se složitějším způsobem odstraní voda vázaná a v poslední fázi dochází k makromolekulární modifikaci dřeva působením teploty na povrch dřeva. Takto upravené dřevo má podobné vlastnosti jako dřevo upravené dřevo metodou Retifikace (Navi, Sandberg, 2012; Hill, 2006).

- **Plato®Wood**

Historie společnosti sahá do počátku 80. let 20. století, kdy společnost Shell Research zabývající se těžbou dřeva v Jižní Americe vyvinula technologický proces Plato. V roce 1988 projekt skončil a spolu s novým majitelem se výzkum a vývoj přestěhoval do Wageningenu. V roce 2001 byl v holandském Arnhemu otevřen závod na výrobu PlatoWood. V roce 2002 společnost zkrachovala a přesunem do komoditní společnosti restartovala své podnikání. PlatoWood používá jedinečný tepelný proces při teplotách 170–210 °C ke zpevnění měkkého dřeva podle specifikace dřeva tvrdého. Délka výrobního procesu je zhruba 5–8 dní a je závislá na druhu zpracovávaného dřeva, tloušťce a rozměrech materiálu. Výsledný produkt je vhodný zejména pro použití v okenních rámech a prostředích bohatých na vlhkost (Reinprecht, 2008; Hill, 2006; Chanrion *et. al.*, 2003; Rapp, Sailer, 2001; Militz, Tjeerdsma, 2001, <https://www.platowood.com/>, 2022).

- **OHT-Wood**

OHT-Wood je ekologický proces kanadské společnosti, která spojuje mezinárodní lesnické znalosti s německým inženýrstvím. Celý proces je šetrný k životnímu prostředí, protože se používají pouze přírodní, netoxické úpravy bez kompromisů v estetice a funkcích. OHT je jedinečná a inovativní metoda tepelné úpravy dřeva, jejímž cílem je zvýšit odolnost domácího dřeva. Procedura OHT probíhá ve třech fázích: zahřátí, ošetření a zchlazení. Nádoba OHT je ve fázi zahřívání téměř zcela zaplavena přehřátým přírodním řepkovým olejem. Dřevo je poté zahříváno v různé době, aby bylo možné dosáhnout různé intenzity ošetření pro různé druhy dřeva a požadované výsledky. Po ošetření se dřevo ochladí, výsledkem tak je dřevo méně náchylné k napadení hmyzem a proti hnilobě. Takto upravené dřevo se vyznačuje zvýšenou odolností proti opotřebení s nízkou absorpcí vody (Kačíková, Kačík, 2011; Reinprecht, Vidholdová, 2008; Hill, 2006; Gsöls *et. al.*, 2003; Rapp, Sailer, 2001).

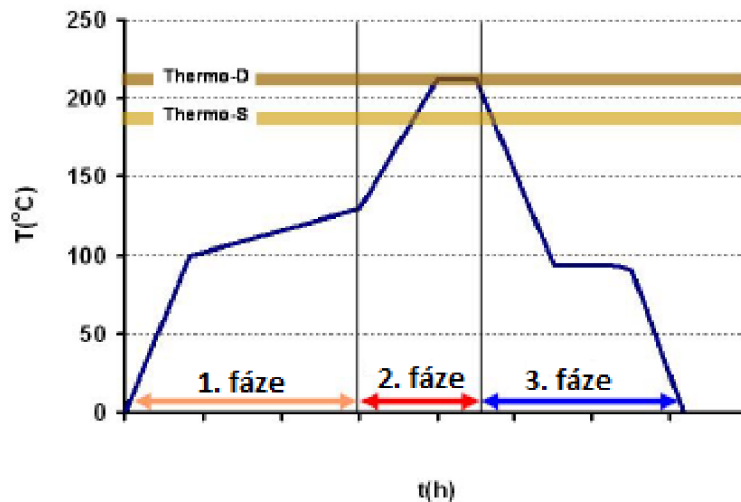
- **Royal Process**

Royal Process nebo také Královský proces je dvoustupňová metoda zpracování dřeva, dřevo se nejprve impregnuje pod tlakem impregnační soli. Tím se dřevo chrání před znehodnocením plísněmi a hmyzem. Ve druhé fázi se dřevo ošetří horkým olejem ve vakuu po dobu 3 hodin o teplotě cca 62 °C. Póry dřeva jsou vyplněny olejem 1–3 mm do hloubky povrchu dřeva. Výrobky ze dřeva s úpravou Royal (zahradní nábytek, obklady, terasy a jiné) se používají pro venkovní aplikace kvůli vysoké rozměrové stálosti a odolnosti (Reinprecht, Vidholdová, 2008; Hill, 2006, <https://www.graswoodwide.com/>, 2022).

2.3 Fáze termické modifikace – ThermoWood®

Během procesu tepelné úpravy ThermoWood® se využívá teplo, pára a voda. Proces termické modifikace dělíme do tří fází:

1. Dřevo uložené v termické komoře se nejprve rychleji zahřívá na teplotu 100 °C a poté se pozvolně až na teplotu 130–140 °C. Celý proces je závislý na druhu dřeva a jeho tloušťce a obsahu vlhkosti ve dřevě. Tato fáze je nejdelší v celém procesu výroby. Vlhkost dřeva se během této fáze sníží na téměř nulovou hodnotu (Pétrissans *et. al.*, 2005; Mayes, Oksanen, 2003).
2. Samotná tepelná modifikace probíhá při teplotách 180–240 °C, podle požadovaného stupně modifikace. Teplota se zvýší na požadovanou úroveň a je konstantně udržována 2–3 hodiny. Do komory je vstříkována pára, aby komora zůstala bez kyslíku, ovlivnila chemické změny ve dřevě a zabránila spálení dřeva. ThermoWood® dělíme do dvou tříd na Thermo-S a Thermo-D (Pétrissans *et. al.*, 2005; Mayes, Oksanen, 2003).
3. Poslední fáze je proces chlazení a regenerace, trvající 5–15. hodin. Rekondiční fáze vrátí vlhkost dřeva na požadovanou úroveň, obvykle kolem 5 % vlhkosti, a to díky postupnému zavlažování dřeva a poklesu teploty na 80–90 °C (Pétrissans *et. al.*, 2005; Mayes, Oksanen, 2003).



Obrázek 2: Fáze výroby Thermo-D a Thermo-S (Mayes, Oksanen, 2003)

2.4 Klasifikace tepelných úprav ThermoWood®

ThermoWood® je ochranná známka vlastněná společností International ThermoWood Association určená pro značení dřevěných výrobků vyrobených postupem vyvinutým ve Finsku. Pouze členové této mezinárodní asociace mohou používat název ThermoWood® u tepelně upraveného dřeva. Protože druhy měkkého a tvrdého dřeva mají odlišené vlastnosti, existují dvě standardní třídy ošetření Thermo-S a Thermo-D. Ve standardní třídě ošetření ThermoWood® jsou jako klíčové vlastnosti zdůrazněny bobtnání a smršťování dřeva vlivem vlhkosti, změna barvy a biologická odolnost. Třída taktéž určuje, k jakému účelu lze dané termicky upravené dřevo použít (<https://www.thermowood.fi/>, 2022; Mayes, Oksanen, 2003).

- **Thermo-D**

V názvu Thermo-D označujeme písmenem D durability neboli v češtině trvanlivost. Vzhled a biologická odolnost jsou klíčovými vlastnostmi při konečném použití produktů v této třídě ošetření. Průměrné tangenciální bobtnání a smršťování v důsledku vlhkosti je v této třídě ošetření 5–6 %. Ošetřené dřevo má přirozenou odolnost vůči rozkladu, splňuje požadavky třídy 2 a podle normy EN 113 je klasifikováno jako odolné. Výsledný produkt se využívá na okenice, podlahy a vybavení saun a koupelen (<https://www.thermowood.fi/>, 2022; Mayes, Oksanen, 2003).

- **Thermo-S**

U Thermo-S písmenem S značíme stabilitu. Průměrné tangenciální bobtnání a smršťování v důsledku vlhkosti u dřeva ošetřeného Thermo-S činí 6–8 %. Ošetřené dřevo je podle normy EN 113 klasifikováno jako relativně odolné, jehož přirozená odolnost vůči rozkladu splňuje požadavky třídy 3. Takto ošetřené dřevo se nejčastěji využívá pro výrobu nábytku, komponentů oken a dveří a konstrukčních prvků interiéru (<https://www.thermowood.fi/>, 2022; Mayes, Oksanen, 2003).

Tab. 3: Změna vlastností u vybraných druhů tvrdého a měkkého dřeva Thermo-S, Thermo-D

(www.thermowood.fi, 2022)

	Měkká dřeva (smrk)		Tvrdá dřeva (dub)	
	<i>Thermo-S</i>	<i>Thermo-D</i>	<i>Thermo-S</i>	<i>Thermo-D</i>
Teplota ošetření	190 °C	212 °C	185 °C	200 °C
Odolnost vůči povětrnostním vlivům	+	++	žádná změna	+
Prostorová stabilita	+	++	+	+
Pevnost v ohybu	žádná změna	-	žádná změna	-
Barva	+	++	+	++

Pozn.: (+) změna, (++) výrazná změna

2.5 Změny v chemické struktuře

Proces termické modifikace dřeva doprovází změny fyzikálních a mechanických vlastností dřeva, ale největší změny nastávají v chemické struktuře. K méně významným změnám v chemické struktuře dochází při teplotě okolo 100 °C, které jsou doprovázeny dehydratačními procesy malého charakteru. Při teplotách mezi 150–170 °C dochází k většímu zásahu do polymerové struktury složek dřeva a nastávají významnější termolytické a termooxidační reakce. Odbourávání ligninu a hemicelulózy nastává při vyšších teplotách v rozmezí od 150 do 260 °C. Tento proces je doprovázen vznikem vody, kyselin, oxidem uhličitým, 2-furaldehydu a jiných látek. Tyto doprovodné látky se mohou zapojit do následných kondenzačních reakcí. V procesu termické modifikace dochází ke změně elektronů v kovalentních vazbách, přeměnu ligninu a polysacharidů ze základního do

excitovaného stavu. Homolytická reakce nastává při teplotách nad 200 °C. Chemické složení dřeva se liší druh od druhu, ale obsahuje přibližně 50 % uhlíku, 42 % kyslíku, 6 % vodíku, 1 % dusíku a 1 % dalších prvků (hlavně vápník, draslík, sodík, hořčík, železo a mangan). Dřevo také obsahuje síru, chlór, křemík, fosfor a další prvky v malém množství. Hlavními složkami dřeva jsou lignin, celulóza a hemicelulózy. Z chemického hlediska se rozdíl mezi tvrdým a měkkým dřevem odráží ve složení ligninu. Chemické složení dřeva nelze přesně definovat pro dané dřevo, a dokonce ani pro daný strom. Chemické složení se liší podle části stromu (kořen, stonek-kmen nebo větev) typu dřeva (tj. normální, tah nebo tlak) geografické polohy, klimatu a půdních podmínek (Gandelová, Šlezingerová, 2014; Kačíková, Kačík, 2011; Reinprecht, Vidholdová, 2008; Chow, Mukai, 1972).

2.5.1 Změny v ligninu

Ze všech složek dřeva je lignin nejlépe odolný vůči teple a je jednou z nejstabilnějších složek dřeva. Lignin drží dřevěné buňky pohromadě a nachází se v primární a sekundární části buněčné stěny. Lignin je soubor komplexních aromatických polymerů zvláště důležitých při tvorbě buněčných stěn, zejména ve dřevě a kůře. Lignin přispívá ke struktuře, podpoře a obraně rostlin proti škůdcům a patogenům. Primárně je lignin složen z uhlíku, vodíku a kyslíku a jeho podíl ve dřevě se liší u listnatých a jehličnatých dřevin. I u dřevin stejného druhu se obsah ligninu může lišit, což je způsobeno rozdílným vlivem světla a tepla. V procesu termické modifikace nastávají chemické reakce v molekulách ligninu při teplotách od 180 do 260 °C. Jeho hmotnost začíná klesat až při teplotách vyšších než 200 °C, když se vazby začnou lámat (Gandelová, Šlezingerová, 2014; Reinprecht, Vidholdová, 2008; Blažej *et al.*, 1975).

2.5.2 Změny v hemicelulózách

Celulóza a hemicelulózy jsou sacharidy, které jsou strukturálními složkami dřeva. Hemicelulózy tvoří 25–35 % dřeva a má relativně nižší molekulovou hmotnost a stavbu řetězce než celulóza. Hemicelulózy jsou tvořeny různými monosacharidy, složení a obsah hemicelulóz se liší od druhu dřeva. Složky hemicelulóz zahrnují galaktózu, manózu, xylózu, arabinózu a malá množství L-rhamnózy. Při tepelné úpravě prochází hemicelulózy změnami, ale většina změn se vyskytuje u hemicelulóz s vysokým obsahem kyslíku. Při nižších

teplotách termické modifikace podléhají hemicelulózy změnám jako první, dřevo po tepelné úpravě obsahuje podstatně nižší množství hemicelulóz. V důsledku toho je množství materiálu citlivého na plísně významně nižší, což je jeden z důvodů, proč tepelně ošetřené dřevo zlepšuje odolnost proti hnilobě houbami ve srovnání s normálním dřevem. Jak se ohřívá dřevo, počátek degradace začíná deacetylací, během které vzniká kyselina octová, která urychluje rozklad polysacharidů. Uvolněná kyselina slouží jako katalyzátor při hydrolýze hemicelulóz na rozpustné cukry. Kyselina hydrolyzuje vazby spojující jednotky glukózy, štěpí celulózu na kratší řetězce. S degradací hemicelulóz, koncentrace hydroxylových skupin absorbujících vodu klesá a zvyšuje se rozměrová stabilita. Rozklad hemicelulóz nastává při teplotách asi 170–280 °C. Přerušením hemicelulózových řetězců se však tolik nesníží pevnost dřeva jako by to bylo v případě přetržení celulózových řetězců. Hemicelulózové řetězce zlepšují lisovatelnost dřeva a snižují tvorbu namáhání a pružnost dřeva (Kačíková, Kačík, 2011; Reinprecht, Vidholdová, 2008; Čunderlík, 2009).

2.5.3 Změny v celulóze

Celulóza je komplexní sacharid nebo polysacharid, který tvoří základní strukturální složku rostlinných buněčných stěn, tvoří asi 50 % dřeva a zodpovídá za vysokou pevnost dřeva. Celulóza je v důsledku své krystalické struktury odolnější proti dlouhodobějším vyšším teplotám termické úpravy než hemicelulózy. Dehydratační a depolymerizační reakce související s degradací celulózy nastávají při úmyslné termické úpravě celulózy v rozsahu teplot 170 +/- 60 °C. Důsledkem depolymerizačních reakcí je zhoršení mechanických vlastností dřeva, zejména snížení pevnosti v ohybu a tahu. Zmiňovanou reakci uskutečňující se v lineárních řetězcích amorfni celulózy je potřeba při výrobě termodřeva omezit, toho lze docílit například ohříváním dřeva v atmosféře dusíku (inertní), nebo pod hladinou olejů či ve vakuu. Vzájemný podíl amorfni a krystalické celulózy je ovlivněn ohřevem dřeva v průběhu termické modifikace. Nejen ohřevem dřeva při teplotách 120–160 °C, ale i přítomností vody dochází k nárůstu krystalického podílu celulózy, naopak snížení tohoto podílu nastává při dlouhodobějším působení vyšších teplot. Změny v krystalickém podílu mohou společně s určitým technologickým způsobem výroby zvyšovat modul pružnosti (Kačíková, Kačík; 2011; Reinprecht, Vidholdová, 2008; Čunderlík, 2009).

2.5.4 Změny extraktivních látek

Extrakty tvoří méně než 5 % dřeva. Do této skupiny patří např. terpeny, tuky, vosky a fenoly. Výtažky jsou heterogenní povahy v různých druzích dřeva a počet sloučenin je velmi vysoký. Působení vyšších teplot má vliv na extraktivní látky, které jsou tak vystaveny fyzikálně-chemickým změnám. Výtažky nejsou strukturálními složkami dřeva a většina sloučenin se během tepelného zpracování snadno odpaří. Termicky modifikované dřevo obsahuje více kyseliny octové a méně prchavých látek (Reinprecht, Vidholdová, 2008).

2.6 Vlastnosti a použití

Pojem trvanlivost u dřeva v podstatě vyjadřuje jeho odolnost proti expozici a výskytu biotických a abiotických činitelů. Termicky upravené dřevo je díky svým zlepšeným vlastnostem odolné nejen vůči napadení těmito činiteli, ale vyznačuje se i zvýšenou odolností proti požáru, opotřebení či jinému mechanickému poškození. ThermoWood® je ekologický materiál, jehož největší výhodou je dlouhá životnost, která i bez následné impregnace nebo jiného chemického ošetření dosahuje nejméně 30 let. Úprava dřeva je v celém jeho objemu trvalá, a proto i vlastnosti dřeva ThermoWood® jsou neměnné po dobu životnosti materiálu. ThermoWood® se vyznačuje širokým spektrem výhod. U jehličnanů dochází vlivem termické úpravy k odstranění pryskyřice, což umožňuje na dřevo snadněji impregnovat a aplikovat tak povrchovou úpravu. Dřevo ThermoWood® se vyznačuje zvýšenou odolností jen proti hnilobě, ale i dřevokazným škůdcům, neboť po procesu úpravy neobsahuje živiny a výživné látky pro plísně a houby. Další vlastností, která může pro někoho být vlastností negativní je tmavé zbarvení dřeva do hněda, které není pouze povrchové, ale v celém jeho objemu. Materiál ThermoWood® se mimo jiné vyznačuje vylepšenou rozměrovou a tvarovou stabilitou, lepšími tepelně-izolačními vlastnostmi a řadou výhod jako například:

- snížení tang. a rad. bobtnání
- snížená tepelná vodivost o 20–25 %
- snížený průhyb až o 90 %
- nízká rovnovážná vlhkost materiálu 5–7 %
- snížená absorpce vlhkosti o 30–50 % (Reinprecht, 2008; Yildiz *et al.*, 2006; Mayes, Oksanen, 2003; <https://www.prokom.cz/>, 2022).

Tepelně upraveného dřeva lze použít takřka všude v exteriéru díky svým vylepšeným vlastnostem, zejména zvýšené odolnosti a životnosti. Je ekologickou alternativou pro běžné impregnované dřevěné materiály, které lze použít v oborech truhlářství, stavitelství, podlahářství apod. Výrobky z termodřeva můžeme nalézt jak v exteriéru, tak v interiéru, a to v podobě zahradního, saunového nábytku, teras, dětských hřišť, obkladů v exteriéru i interiéru, hudebních nástrojů, dveří a dalších vnitřních i venkovních výrobků (Syrjänen, Oy, 2001).

3 Rozbor problematiky obrábění – frézování

Člověk už po několik tisíciletí obrábí nejen dřevo a jeho sub-výrobky, avšak i další materiály za použití od nejjednodušších nástrojů, přes základní stroje až po postupně se zdokonalující, efektivnější, výkonnější a vysoce bezpečná obráběcí centra využívající nejmodernější technologie dnešní doby. Obrábění je výrobní proces, při kterém se úběrem materiálu mění tvar, rozměry, ale i kvalita obráběného povrchu polotovaru. Výsledkem obrábění je hotový výrobek. Obrábění můžeme podle zvoleného pohonu dělit na ruční, strojní a podle zvoleného způsobu oddělování materiálu z polotovaru členit na třískové a beztřískové (Kvietková, 2015; Lisičan *et al.*, 1996; <https://www.zsmitusova16.cz/>, 2022).

- **Ruční obrábění** – jeho přední výhodou je nezávislost na zdroji energie, neboť zdrojem energie v tomto případě je lidská síla, čímž ruku v ruce navazujeme na další výhodu ručního obrábění, a to přímý kontakt člověka s obráběcím nástrojem a obráběným materiálem, výsledkem jsou pak vysoce originální výrobky (Kvietková, 2015).
- **Strojní obrábění** – nahradilo to ruční zejména v té oblasti výroby, kde je hleděno na rychlost a zároveň přesnost výroby. Výsledkem strojního obrábění je koncový výrobek požadovaného tvaru a rozměrů, u kterého úběrem materiálu za pomoci řezného nástroje vznikají vedlejší produkty jako například třísky, piliny či dýha (Kvietková, 2015).
- **Beztřískové obrábění** – je druh obrábění, při jehož procesu nevzniká odpad v podobě hoblin, třísek ani pilin. Oddělovaný materiál se stává samotným výrobkem, tím může být například tenký plátek dřeva zvaný dýha. Dýha vzniká procesem

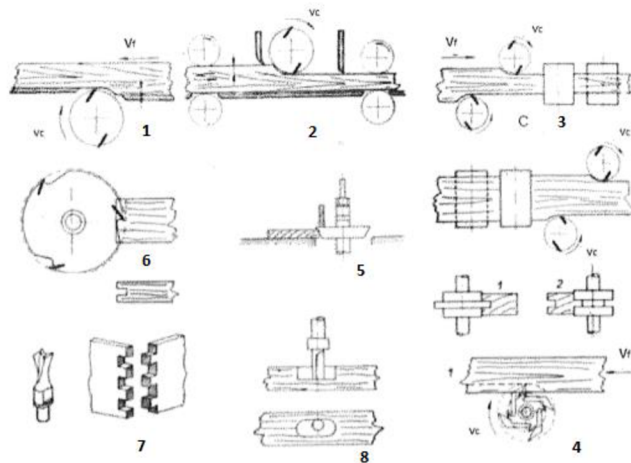
loupáním nebo krájením výřezů z kulatiny. Mimo těchto dvou způsobů beztrískového obrábění zde můžeme zařadit i hlazení, tvarování (ohýbání, lisování) a v neposlední řadě obrábění vodním paprskem nebo laserem (koncentrovanou energií) (Lisičan *et al.*, 1996, Kvietková, 2015).

- **Třískové obrábění** – je opakem beztrískového, neboť během tohoto procesu vznikají vedle výsledného produktu i vedlejší produkty v podobě pilin, třísek nebo hoblin, a to ve formě odpadu po obrábění. Výsledný povrch požadovaného tvaru, rozměrů a kvality je výstupem po obrábění. Do skupiny třískového obrábění zařazujeme procesy broušení, vrtání, dlabání, soustružení, frézování a další (Lisičan *et al.*, 1996, Kvietková, 2015, <https://www.zsmitusova16.cz/>, 2022).

3.1 Frézování

Jedním z nejčastěji používaných procesů obrábění dřeva a materiálů na bázi dřeva je proces frézování. Pod procesem frézování si můžeme představit řezání dřeva rotujícím nástrojem, jenž má na svém obvodu řezné hrany, pro tyto účely se používají například vícebřité nástroje frézy. Při procesu frézování vykonávají frézy hlavní řezný (otáčivý) pohyb na obráběný materiál. Obrobek za použití lidské síly nebo podávacího zařízení vykonává na pracovním stole vedlejší pohyb ať už kruhový nebo přímočarý. Posuv obrobku směrem na osu rotace nástroje je obvykle kolmý nebo přibližně kolmý. Frézování řadíme do kategorie třískového obrábění, kde třískovým úběrem materiálu z dílce získáme požadovaný tvar, přesné rozměry a kvalitní povrch obrobku. Při tomto procesu opracování dílce se úběr třísky mění v závislosti na požadované tloušťce od minimální po maximální, avšak šířka odebraného materiálu musí být menší, než je šířka obrobku a poloměr nástroje. Vhodný výběr nástroje, ale i jeho vibrace a další faktory mají vliv na výslednou kvalitu a profil obrobku (Kvietková, 2015; Siklienka, Kminiak, 2013a; Lisičan *et al.*, 1996; Prokeš, 1982).

Dle Prokeše (1982) lze rozdělit frézování z hlediska použití na následující technologické způsoby, které jsou vyobrazeny na obrázku 3: 1) srovnávání, 2) tloušťkování, 3) dvoustranné frézování (tloušťkování), 4) frézování pera a drážky, 5) frézování úhlovou frézou, 6) čepování, 7) frézování stopkovou frézou, 8) frézování vrchní frézou.



Obrázek 3: Technologické způsoby frézování (Kvietková, 2015)

Pozn.: v_c = řezná rychlost, v_f = rychlost posuvu

Frézování dělíme v závislosti na poloze osy otáčení a ploch, které opisují řezné břity nástroje do čtyř skupin, a to na válcové, čelní, kuželové a čelně-kuželové frézování (Kvietková, 2015; Lisičan *et al.*, 1996).

3.1.1 Válcové

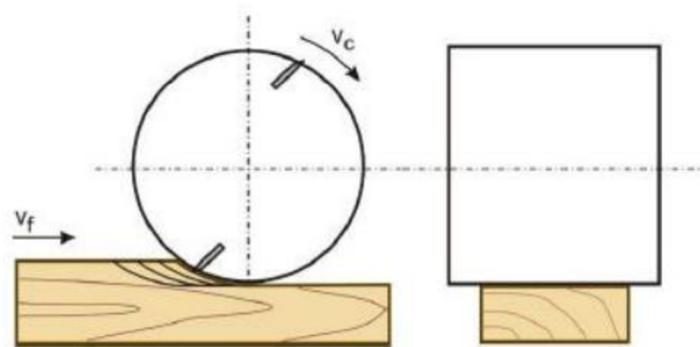
U tohoto typu frézování vykonávají nože, břity umístěné na obvodu nástroje (frézové hlavy) pohyb opisující kružnici ve vztahu k opracovávanému povrchu. Osa rotace pohybu je během válcového frézování vzhledem k obráběné ploše rovnoběžná. Vlivem nerovnoměrného zatížení frézy může vzniknout vlnitý povrch obrobku zapříčiněnými vibracemi. V závislosti na vzájemném pohybu nástroje a obrobku můžeme u válcového frézování rozlišovat sousledný a nesousledný způsob obrábění materiálu (Kvietková, 2015; Barcík *et al.*, 2013; Lipták *et al.*, 1979).

- **Sousledné frézování**

U sousledného frézování se můžeme setkat v různých pramenech s pojmy souměrné či souběžné frézování, jedná se však o stejný proces, během kterého válcová fréza vykonává otáčivý pohyb a posuv obrobku je veden po směru rotace nástroje. Vlivem menšího namáhání břitů během frézování způsobeným vzájemným směrem pohybu nástroje a obrobku vzniká lepší kvalita obrobku. Při tomto procesu frézování klesá tloušťka odebírané třísky od maximální po minimální (Kvietková, 2015; Prokeš, 1982).

- Nesousledné frézování

Při nesousledném frézování válcová fréza vykonává otáčivý pohyb a posuv obrobku je veden proti směru rotace nástroje, což způsobuje větší průřez. U tohoto typu frézování se úběr třísky mění od nejtenčí po maximální, můžeme se s ním setkat například u srovnávacích či tloušťkovacích frézek nebo na hoblovacích centrech. Ačkoliv je tento způsob frézování plynulejší a klidnější, výsledný povrch obrobku je naopak drsný, se známkami po obrábění. Nevýhodou nesousledného frézování je zahřívání a větší otupení břitu, nože, neboť zub nástroje po materiálu zprvu klouže, nebo materiál před sebou přímo hrne, což má za následek deformaci povrchu (Kvietková, 2015; Prokeš, 1982).

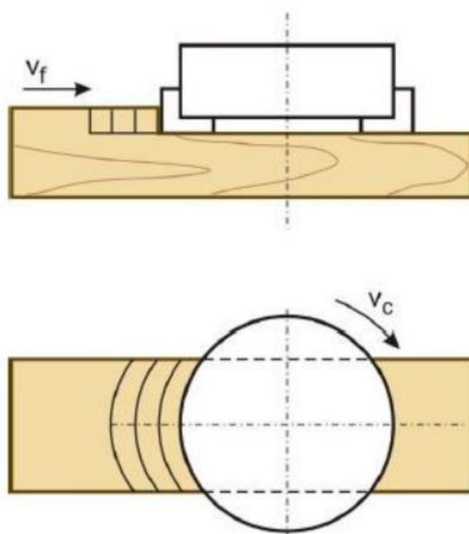


Obrázek 4: Válcové frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a)

Pozn.: v_c – řezná rychlost, v_f – rychlost posuvu

3.1.2 Čelní

Čelní frézování se nejčastěji využívá na opracování rovné plochy a rozlišujeme částečné a plné frézování. U plného čelního frézování je překrytá celá šířka opracovávané plochy plochou nástroje. Během procesu se osa rotace nástroje nachází v kolmé poloze směrem k obráběné ploše, kde za se za pomoci břitů odřezávají třísky stejného průřezu. Vzhledem k rovnoměrnému zatížení frézy je zaručena vyšší kvalita plochy obrobku. Čelní fréza je osazena břity jak na čele, tak plášti. Břity na plášti mají podobnou kinematiku pohybu a úběr materiálu z obrobku jako břity u frézování válcového, kdežto břity na čele opisují dráhu pohybu po kružnici (Kvietková 2015; Prokeš, 1982.).

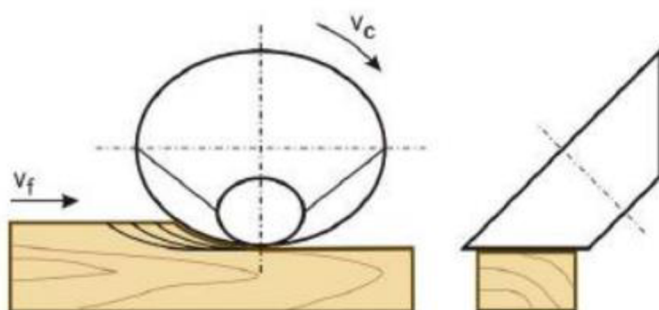


Obrázek 5: Čelní frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a)

Pozn.: v_c – řezná rychlost, v_f – rychlost posuvu

3.1.3 Kuželové

U kuželového frézování se osa rotace nástroje nachází ve vztahu k obráběné ploše skloněná pod doporučeným úhlem v rozsahu o 10° – 12° . Tloušťka úběru třísky je v případě tohoto procesu frézování menší než u frézování válcového. Vzhledem k zmiňovanému menšímu úběru třísky je možné rychlost posuvu navýšit až o trojnásobek, což z kuželového frézování dělá velmi produktivní a efektivní proces zachovávající žádanou kvalitu povrchu (Kvietková, 2015; Prokeš, 1982).

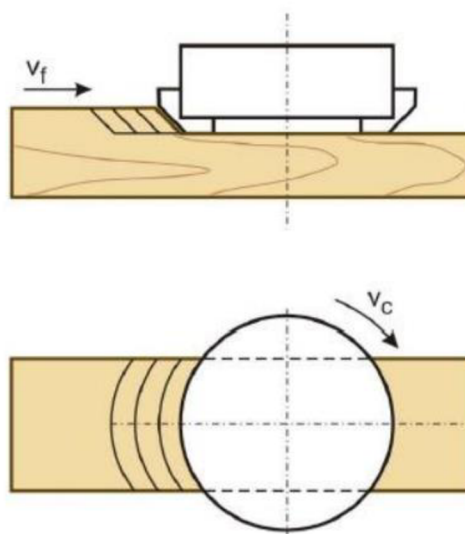


Obrázek 6: Kuželové frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a)

Pozn.: v_c – řezná rychlost, v_f – rychlost posuvu

3.1.4 Čelně-kuželové

U tohoto typu frézování se osa rotace nástroje v průběhu procesu frézování nachází v kolmé poloze k opracované ploše. Na obvodu nástroje jsou umístěny břity, které svírají vůči opracovávanému povrchu určitý úhel. Čelně kuželové frézování negativně ovlivňuje kvalitu opracovaného povrchu konkrétně drsnost, což je zapříčiněno podélným až příčným frézováním. Nesmírnou výhodou čelně kuželového frézování je bez pochyb energetická nenáročnost procesu, která je o 30 % efektivnější oproti válcovému frézování (Kvietková, 2015; Prokeš, 1982; Krjažev, 1963).



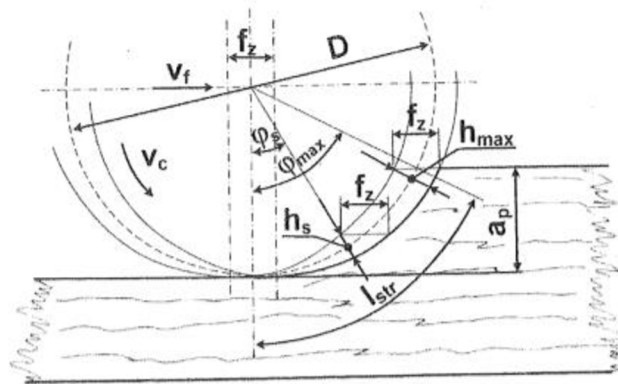
Obrázek 7: Čelně-kuželové frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a)

Pozn.: v_c – řezná rychlost, v_f – rychlost posuvu

3.2 Kinematika frézování

Na obrázku 8 je vyobrazena kinematika frézovacího procesu s úběrem třísky. Při procesu frézování vykonává řezný nástroj hlavní rotační pohyb okolo své vlastní osy, a současně proti směru rotace nástroje vykonává obráběný materiál vedlejší přímočarý pohyb. V závislosti na výše zmíněných pohybových faktech lze konstatovat, že pohyb hrany nástroje má tvar cykloidy. Naproti tomu v praxi je řezná rychlost frézovacích nástrojů oproti rychlosti posuvu materiálu příliš vysoká, tudíž zjednodušíme dráhu pohybu hrany nástroje na pohyb po kružnici. Proces frézování ovlivňuje řada faktorů, jako například druh obráběného materiálu, velikost a tvar úběru třísky, hloubka řezu, vlastnosti řezného nástroje

a jeho geometrie, ale i samotná podávací a řezná rychlost (Kvietková, 2015; Barcík, 2009; Lisičan *et al.*, 1996; Prokeš, 1982).



Obrázek 8: Kinematické schéma válcového frézování (Kvietková, 2015)

Pozn.: v_c – řezná rychlost (m/s), v_f – rychlost posuvu (m/min), f_z – posuv na zub (mm), D – průměr nástroje – frézy (mm), h_s – tloušťka odřezané vrstvy (mm), h_{max} – maximální tloušťka (mm), a_p – hloubka řezu, φ_s – středový úhel ($^\circ$), φ_{max} – úhel záběru zubu ($^\circ$)

3.2.1 Výpočet řezné rychlosti

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot 1000} \text{ [m/s]} \quad (1)$$

Kde: v_c – řezná rychlost [m/s],
 D – průměr frézy [mm],
 n – otáčky frézy [ot/min].

3.2.2 Výpočet posuvné rychlosti

$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} = \frac{f_z \cdot n \cdot z}{1000} \text{ [m/s]} \quad (2)$$

Kde: v_f – rychlost posuvu [m/s],
 f – posuv na otáčku frézy [mm],
 f_z – posuv na zub (řeznou hranu frézy) [mm/zub],
 n – otáčky frézy [ot/min],
 z – počet řezných hran frézy [ks].

3.2.3 Výpočet posuvu na zub

$$f_z = \frac{v_f * 1000}{n * z} \text{ [mm]} \quad (3)$$

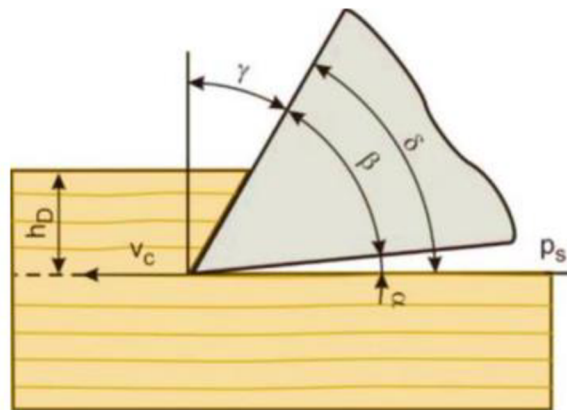
Kde: f_z – posuv na zub (řeznou hranu frézy) [mm/zub],
 v_f – rychlost posuvu [m/s],
 n – otáčky frézy [ot/min],
 z – počet řezných hran frézy [ks].

3.3 Nástroje pro frézování

Obecně nástroje mají významný vliv na jakýkoliv proces obrábění. Nástroj je podle Lisičan (1996) formulován jako těleso osazeno jedním nebo několika břity, který slouží k opracování povrchu materiálu. Předem stanoveným úběrem materiálu, třísky z obrobku vznikne nová plocha, kterou nazýváme obrobenou plochou nesoucí vlastnosti požadovaného tvaru a kvality povrchu i s případnými odchylkami. Tyto nástroje svými vlastnostmi (složením nožů, velikostí zrn), drsností a opotřebením řezného klínu významně ovlivňují nejen kvalitu – jakost povrchu, ale i samotnou energetickou náročnost celého procesu. Zmiňovanou energetiku mimo jiné ovlivňuje i nastavení řezných úhlů. Darmawan *et al.* (2011) uvádí, že zvýšení energetické náročnosti procesu a taktéž zvýšení drsnosti výsledného povrchu je způsobeno vlivem otupeného nástroje. Dnes se poměrně často obrábí materiál výměnnými nástroji, kam řadíme například břitové destičky či žiletkové nože, které se po svém otupení nijak dále neostří. Takové nástroje lze v souvislosti s počtem řezných hran použít 1–4krát (Kubš *et al.*, 2017; Siklienka a Šustek, 2013b; Holubář *et al.*, 2011a; Holubář *et al.*, 2011b)

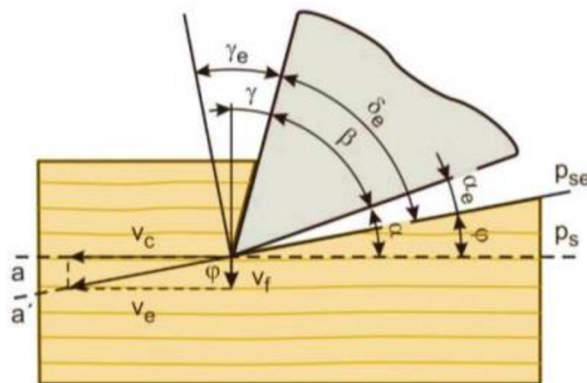
3.3.1 Úhlová geometrie nástroje – břitu

K procesu frézování je nezbytná úhlová geometrie břitu, která je potřebná z hlediska určení geometrické polohy řezného čela, hřbetu a hrany nástroje ve vztahu k základní rovině. Z následujících obrázků 9 a 10 je patrné rozlišení úhlů na dvě základní skupiny, a to na úhly nástrojové a pracovní.



Obrázek 9: Úhlová geometrie nástroje (Siklienka a Kminiak, 2013a)

Pozn.: h_D – nominální tloušťka třísky (mm), v_c – řezná rychlost (m/s), p_s – základní nástrojová rovina, α – nástrojový úhel hřbetu ($^\circ$), β – nástrojový úhel řezného klínu ($^\circ$), γ – nástrojový úhel čela ($^\circ$), δ – nástrojový řezný úhel ($^\circ$)



Obrázek 10: Pracovní úhlová geometrie nástroje (Siklienka a Kminiak, 2013a)

Pozn.: v_c – řezná rychlost (m/s), v_e – pracovní rychlost, v_f – rychlost posuvu (m/min), φ – úhel posuvného pohybu ($^\circ$), α – nástrojový úhel hřbetu ($^\circ$), α_e – pracovní úhel hřbetu ($^\circ$), β – nástrojový úhel řezného klínu ($^\circ$), β_e – pracovní úhel řezného klínu ($^\circ$), γ – nástrojový úhel čela ($^\circ$), γ_e – pracovní úhel čela ($^\circ$), δ – nástrojový řezný úhel ($^\circ$), δ_e – pracovní řezný úhel ($^\circ$), p_s – základní nástrojová rovina, p_{se} – základní pracovní rovina

3.4 Kvalita povrchu

Kvalita obrobeneho povrchu je ovlivněna mnoha faktory, jedním z nich je i proces obrábění, jehož hlavním úkolem je získání výsledného materiálu o požadované kvalitě povrchu. Dříve stačilo použití porovnávacích metod k vyhodnocení kvality povrchu,

z důvodu nízkých nároků na výslednou kvalitu povrchu. Naproti tomu dnes se nároky na přesnost a kvalitu povrchů výrazně zvýšily, a to i v důsledku vývoje nových strojů, zařízení, nástrojů na obrábění, ale i vývojem materiálů. Výsledkem toho jsou kontroly a měření výsledného povrchu a jeho kvality, za použití různých přístrojů například dotykovými či bezdotykovými profilometry. Rousek *et al.* (2010) uvádí, že lze kvalitu vyhodnotit třemi metodami zkoumání a to metodou: porovnávací, bezdotykovou a dotykovou (Tiryaki *et al.*, 2015; Rousek *et al.*, 2010).

- **Porovnávací metoda**

Zahrnuje vedle porovnávací metody i metodu vizuální, pomocí které se povrchy jednotlivých vzorků zkoumají a vyhodnocují zrakem. U porovnávací metody pak hodnotící osoba srovnává vzorky hmatem a snaží se vzorek přiřadit co nejbližší stupnici etalonu. Obě tyto metody porovnání jsou velmi nepřesné a subjektivní, poněvadž vycházejí z lidských smyslů, z tohoto důvodu by měli vyhodnocování provádět pouze osoby odborně zkušení z oboru pro získání věrohodnějších a lepších výsledků (Rousek *et al.*, 2010; Whitehouse, 2004).

- **Bezdotyková metoda**

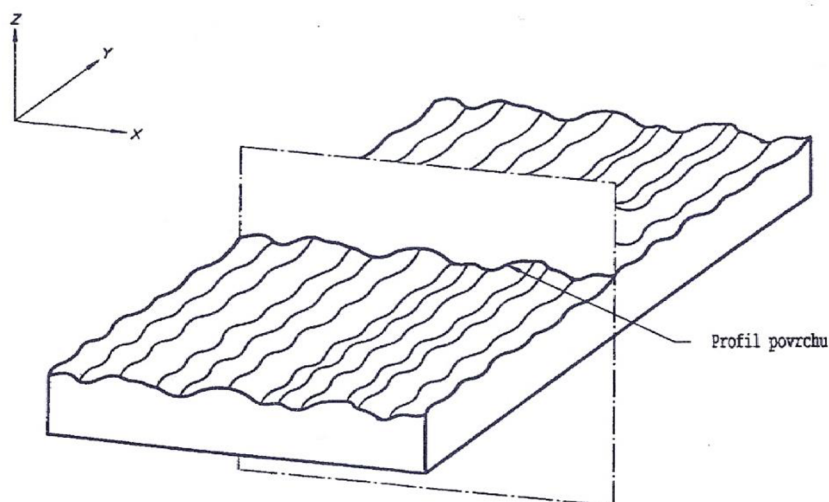
V dnešní době patří bezdotykové metody mezi jedny z nejpřesnějších a nejvyužívanějších metod pro měření a vyhodnocení kvality povrchu. U této metody registrujeme řadu postupů, které pracují na základě různých systémových měření využívající například laserové, elektronové či fotometrické měření a další... (Rousek *et al.*, 2010; Whitehouse, 2004).

- **Dotyková metoda**

Měření kvality povrchu u této metody probíhá za pomoci přístrojů nazývaných drsnoměry. Negativní stránkou použití dotykové metody a těchto přístrojů je možnost vzniku případného poškození povrchu, a to například poškrábáním či zapříčiněním jiného defektu měřeného povrchu v důsledku vyvinutí větší síly na zkoumaný povrch (Rousek *et al.*, 2010; Whitehouse, 2004).

3.4.1 Definování průměrných aritmetických úchylek profilu drsnosti a vlnitosti

Normou ČSN EN ISO 4287 (1999) lze vyjádřit průměrné aritmetické úchyly profilu drsnosti (Ra) a vlnitosti (Wa) jako výškové parametry profilu, které je možné definovat aritmetickým průměrem absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky. Profil povrchu je stejnou normou vyjádřen souřadnicovým systémem a skutečným povrchem. Norma stanovuje souřadnicový systém jako systém, v němž jsou vyjádřeny parametry struktury povrchu. Skutečný povrch je pak normou definován jako povrch, jenž omezuje a odděluje těleso od okolního prostředí. Průsečnicí skutečného povrchu a dané roviny vzniká profil povrchu.



Obrázek 11: Profil povrchu (ČSN EN ISO 4287, 1999)

Pozn.: X je osa na povrchu materiálu – rovnoběžná se střední čarou ve směru snímání, Y je osa také ležící na povrchu profilu, Z je osa směřující ven z povrchu profilu

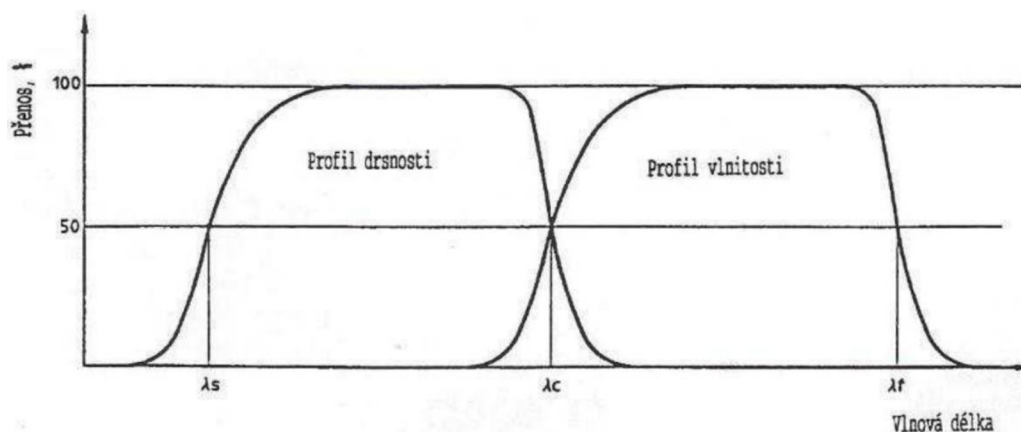
Norma ČSN EN ISO 4287 (1999) stanovuje terminologii jednotlivých profilů odvozených profilem povrchu na:

- Základní profil – na jeho základě lze vyhodnotit parametry základního profilu,
- Profil drsnosti – na jeho základě lze vyhodnotit parametry profilu drsnosti, profil je ze základního profilu odvozen potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru λ_c
- Profil vlnitosti – na jeho základě lze vyhodnotit parametry profilu vlnitosti, profil je odvozen z postupné aplikace profilového filtru λ_c a filtru profilu λ_f na základní profil.

V níže uvedené tabulce 4 jsou profily charakterizující jednotlivé parametry, které za pomoci profilového filtru rozdělují jednotlivé komponenty, složky profilu na krátkovlnné a dlouhovlnné napomáhající vyhodnocení struktury povrchu.

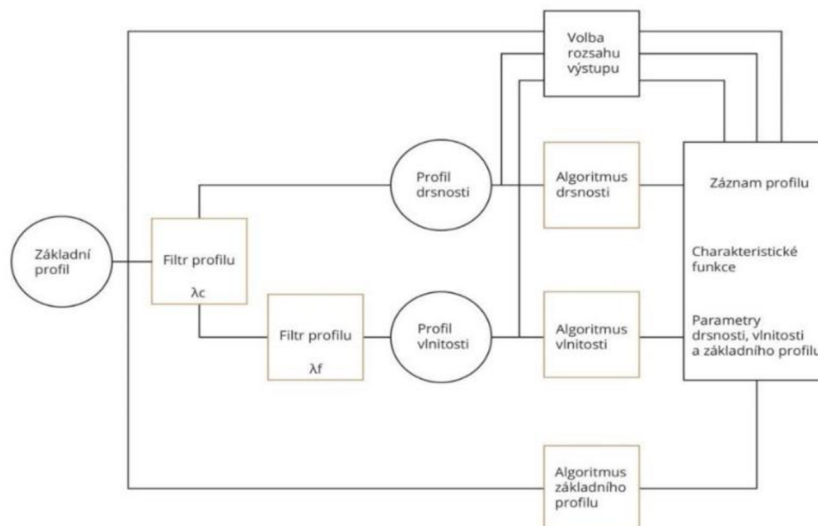
Tab. 4: Dělení profilu na dlouhovlnné a krátkovlnné komponenty (ČSN EN ISO 4287, 1999)

Značení	Popis
Filtr profilu (λ_s)	definiuje rozhraní mezi drsností a kratšími komponenty vln přítomných na povrchu
Filtr profilu (λ_c)	určuje rozhraní mezi komponenty drsnosti a vlnitosti
Filtr profilu (λ_f)	stanovuje rozhraní mezi vlnitostí a delšími komponenty vln přítomných na povrchu
Cut-off	vyjadřuje mezní vlnovou délku filtru profilu



Obrázek 12: Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti (ČSN EN ISO 4287, 1999)

Normou ČSN EN ISO 4287 (1999) se posuzuje opracovaný povrch podle diagramu na obrázku 13. Pomocí tohoto diagramu se postupuje při zjišťování kvality opracovaného povrchu za použití různých metod. K hodnocení kvality opracovaného povrchu bylo v našem případě použito měření kontaktním zařízením.

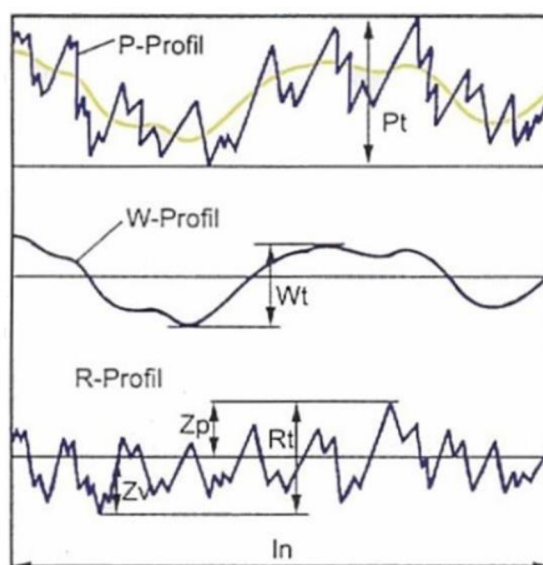


Obrázek 13: Vývojový diagram pro posuzování povrchu (ČSN EN ISO 4287, 1999)

Norma ČSN EN ISO 4287 (1999) stanovuje názvosloví geometrických parametrů, které je zobrazeno v tabulce 5.

Tab. 5: Názvosloví geometrických parametrů (ČSN EN ISO 4287, 1999)

Značení	Popis
P-Profil	Profile parametr – vypočítaný ze základního profilu
R-Profil	Roughness parametr – vypočítaný z profilu drsnosti
W-Profil	Waviness parametr – vypočítaný z profilu vlnitosti



Obrázek 14: Parametry P, W, R na profilu povrchu (<https://eluc.kr-olomoucky.cz>, 2019)

Pozn.: Pt, Wt, Rt – celková výška profilu, Zp – výška výstupku profilu, Zv – hloubka prohlubně profilu, ln – vyhodnocovaná délka

Norma ČSN EN ISO 4287 (1999) vyjadřuje výškové parametry jako průměrné aritmetické úchytky posuzovaného povrchu (Pa , Ra , Wa), které lze vypočítat následujícím vzorcem (4) jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.

$$Pa, Ra, Wa = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (4)$$

Kde: $l = lp, lr$ případně lw

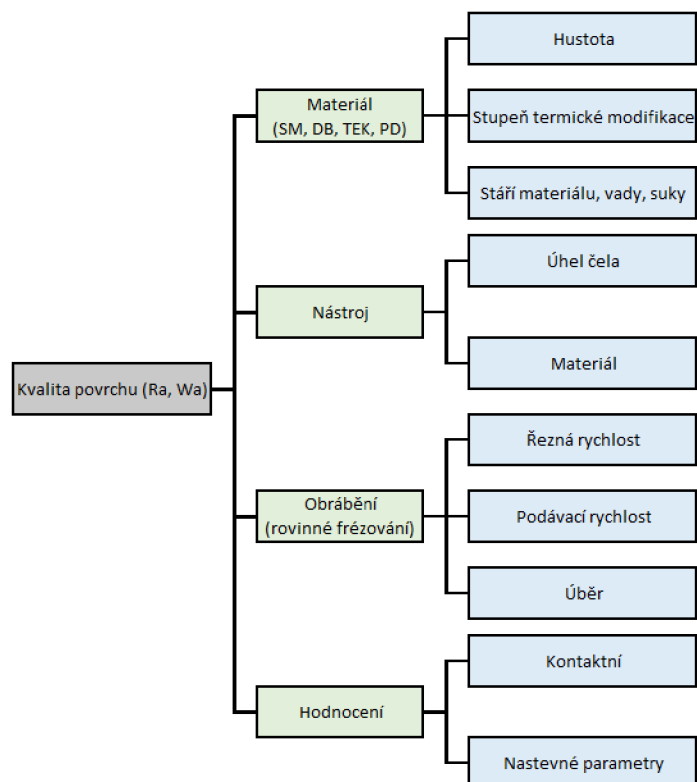
dx – rozsah základní délky

Norma ČSN EN ISO 4287 (1999) vyjadřuje délkové parametry jako průměrnou šířku prvků profilu (PSm , RSm , WSm), které lze vypočítat následujícím vzorcem (5) jako aritmetický průměr šířek Xs prvků profilu v rozsahu základní délky.

$$PSm, RSm, WSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (5)$$

3.4.2 Faktory ovlivňující kvalitu povrchu

Kvalitu opracovaného povrchu můžeme často označovat jako pozitivní vlastnost výsledného obrobku, produktu, přičemž je to jedna z nejvýznamnějších vlastností mající vliv na další procesy opracování povrchu. V oblasti terminologie je pojem kvalita někdy zaměňován a označován jakostí, což je v praxi považováno jako chybné označení, poněvadž kvalita může obsahovat hned několik úrovní jakosti. V rámci této práce jsme se zabývali vyhodnocením kvality opracovaného povrchu, kde jsme sledovali drsnost a vlnitost výsledného povrchu. Drsnost (Ra) sledujeme jako odchylky v mikroskopické rovině od ideálního tvaru, naproti tomu vlnitostí (Wa) rozumíme opakující se prohlubně na povrchu materiálu vzniklé v důsledku vzájemného působení posuvného pohybu materiálu a rotačního pohybu nástroje. Výsledný povrch a jeho kvalita může být ovlivněna mnoha faktory. Na obrázku 15, jsou vyobrazeny faktory ovlivňující kvalitu povrchu v rámci této práce (Taylor *et al.*, 1999; Kminiak a Gaff, 2015).



Obrázek 15: Faktory ovlivňující kvalitu povrchu v rámci této práce (Autor, 2022)

Řada studií a výzkumu z celého světa se zabývá problematikou kvality výsledného povrchu a zjištění faktorů, které mají vliv na kvalitu obráběného povrchu. Výsledný povrch a jeho kvalita je ovlivněna mnoha faktory, mezi které můžeme zařadit například i ty působící v průběhu obrábění. Mezi tyto faktory řadíme vhodný výběr stroje a nástroje, u kterého nesmíme zapomenout na kvalitu a údržbu ostří, ale i celého strojního zařízení. Další významný faktor bezprostředně mající vliv na kvalitu je i zvolený typ obráběcího procesu, nastavení obráběcích – frézovacích parametrů a geometrie nástroje, což souhlasí s konstatováním z výzkumu Rousek *et al.* (2012a). Z jeho výzkumu vyplývá, že použití různých typů nástrojů s nastavením různých parametrů obrábění má vliv na odlišné druhy dřeva při obrábění, proto doporučuje důkladně zvolit správný nástroj k obrábění s ohledem na použitý technologický postup. Při procesu obrábění taktéž mají vliv na kvalitu povrchu vibrace vznikající mezi obrobkem, nástrojem a strojem (Sitkei a Magoss, 2003). Z hlediska materiálu má samotná anatomická stavba dřeva vliv na kvalitu povrchu, což ve svém výzkumu u březového dřeva zjistili Bendikiene a Keturakis (2016) a uvádějí, že drsnost povrchu závisí hlavně na anatomické stavbě a vlastnostech daného druhu dřeva. K podobnému závěru dospěl ve svém výzkumu taktéž Thoma *et al.* (2015), který rovněž uvádí,

že drsnost povrchu byla více ovlivněna stavbou dřeva, ačkoliv hlavním cílem jeho výzkumu bylo zkoumání kvality povrchu v závislosti na druhu dřeviny a její hustoty. Výsledkem bylo zjištění, že samotná hustota nemá zřetelný vliv na drsnost povrchu. Stáří materiálu patří mezi další činitele, který má vliv na kvalitu povrchu ze strany materiálu. Ostman (1983) ve svém výzkumu uvádí, že umělé stárnutí materiálu výrazně zhoršuje kvalitu povrchu v porovnání se stárnutím přirozeným, z čehož vychází, že kvalita povrchu je tak velmi nepříznivě ovlivněna stárnutím materiálu.

Podle Rousek *et al.* (2012a) nelze hodnotit drsnost a vlnitost odděleně, což potvrzuje jeho výzkum, kde uvádí, že se oba zmíněné termíny v praxi vyskytují na povrchu obrobku v jisté kombinaci a pouhým okem nelze přesně odlišit vlnitost od drsnosti na povrchu. Poznatky z výzkumu Bajić *et al.* (2008) uvádějí, že nejdůležitějšího vlivu na drsnost povrchu při procesu čelního frézování bylo zaznamenáno v důsledku podávací rychlosti. Výsledky tohoto výzkumu vyjadřují, že při aplikování vysokých řezných rychlostí v kombinaci s nízkými podávacími rychlostmi lze dosáhnout nejlepší kvality povrchu z pohledu drsnosti. Vlivu řezných parametrů při frézování termicky modifikovaného březového dřeva se věnovala studie Kvietková *et al.* (2015b), kteří došli k závěru, že při zvyšování řezné rychlosti docházelo ke snižování průměrné aritmetické úchyly povrchu drsnosti. Při zvyšování podávací rychlosti naopak docházelo k nárůstu průměrné aritmetické úchyly povrchu drsnosti (R_a). V podobném výzkumu Kvietková *et al.* (2015c) řešili stejnou problematiku s využitím bukového dřeva, kde se výsledek shodoval s jejich předchozím výzkumem, že zvyšování řezné rychlosti má za následek snížení hodnoty R_a . Gaff *et al.* (2015) se ve své práci zabýval vlnitostí při frézování termicky modifikovaného březového dřeva. Z výsledků výzkumu lze konstatovat, že zvyšování řezné rychlosti snižuje hodnotu průměrné aritmetické úchyly vlnitosti (W_a), oproti tomu zvyšování podávací rychlosti hodnotu W_a zvyšuje. S ohledem na výsledky je třeba dosáhnout optimálního poměru vysoké řezné rychlosti a nejnižší podávací rychlosti tak, aby bylo dosaženo co nejlepšího povrchu vlnitosti. K obdobným závěrům došli ve svém výzkumu také Kvietková *et al.* (2015b), kteří zkoumali vlnitost u termicky modifikovaného dřeva javoru. Barčík *et al.* (2014b) se ve výzkumu věnovali zkoumání termicky modifikované borovice lesní procesem rovinného frézování. Z jejich výsledků vyplývá, že termická úprava, úhel čela a řezná rychlost mají největší vliv na kvalitu povrchu, kdežto nejmenšího vlivu bylo zaznamenáno u podávací rychlosti. Ve stejném výzkumu došel také k závěru, že termicky modifikované dřevo je značně různorodý materiál a na kvalitu povrchu má vliv nejen způsob obrábění, ale také samotná anatomická stavba dřeva.

4 Metodika práce

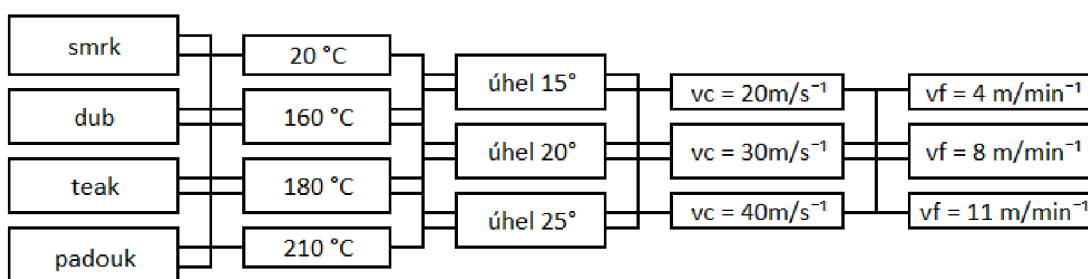
V závislosti na stanoveném cíli můžeme metodiku diplomové práce rozdělit do několika následujících částí:

- 1) Použitý materiál – příprava zkušebních těles, klimatizace, sušení
- 2) Termická modifikace: referenční vzorek 20 °C, 160 °C, 180 °C, 210 °C
- 3) Obrábění – použité stroje a nástroje, nastavení parametrů frézování
- 4) Zkušební vzorky – označení a příprava
- 5) Měření
- 6) Chemická analýza
- 7) Statistické vyhodnocení naměřených dat

Metodika byla zaměřena na analýzu vlivu jednotlivých faktorů na termicky upravený obráběný materiál ($T=20\text{ °C}$, 160 °C , 180 °C , 210 °C) na sledované parametry zkoumání:

- 1) Změny v chemické struktuře všech čtyř dřevin během všech stupňů termické modifikace a vliv chemického složení při rovinném frézování.
- 2) Kvalita opracovaného povrchu zjištěná kontaktní metodou, hodnocenou pomocí:
 - Ra – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti,
 - Wa – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu vlnitosti.
- 3) Vzájemná interakce uvedených parametrů a stanovení optimálních parametrů při rovinném frézování.

Na obrázku 16 jsou v schématu znázorněny všechny možné proměnné faktory pro parametry Ra a Wa .



Obrázek 16: Všechny možné proměnné faktory pro parametry Ra a Wa (Autor, 2022)

4.1 Použitý materiál

Pro účely výzkumu a následného porovnání výsledků byly použity zkušební tělesa jak z domácích (smrk, dub), tak z tropických dřevin (teak, padouk). Dřevo těchto dřevin bylo zakoupeno ve formě řeziva – fošen a byla kotoučovou pilou značky SCM s označením: si300 class v dílně naformátována na požadované rozměry těles o parametrech 450x100x18 mm (délka x šířka x tloušťka) pro snadnější manipulaci při obrábění a měření. Na námi naformátovaných tělesech musela být provedena klimatizace vzorků. Po dobu devadesáti dnů probíhala klimatizace proložených vzorků při relativní vlhkosti vzduchu 40 % a při teplotě 23 °C v klimatizované laboratoři, čímž bylo dosaženo 8% vlhkosti vzorků.

4.1.1 Sušení vzorků

Vzorky o 8% vlhkosti bylo potřeba před termickou modifikací dosušit. Vysušení probíhalo za použití laboratorní sušárny dřeva od značky Binder při teplotě 103 °C. na konečnou vlhkost 0 %.

4.1.2 Zjištění vlhkosti

Pro zjištění vlhkosti daných vzorků bylo použito normy ČSN EN ISO 322 (1994). Vzorec pro výpočet:

$$W = \frac{m^1 - m^0}{m^0} * 100 [\%] \quad (6)$$

Kde: W – vlhkost dřeva [%]

m^1 – hmotnost zkušebního tělesa (vzorku) ve vlhkém stavu [g]

m^0 – hmotnost zkušebního tělesa ve vysušeném stavu [g]

Výsledek byl vyjádřen s přesností na 1,0 %.

4.2 Termická modifikace vzorků

Termická modifikace připravených vysušených těles probíhala v termické komoře značky Katres. Pro tento experiment se jednotlivé vzorky zkoumaného dřeva rozdělily do čtyř souborů zkoumání. První soubor se skládal z těles, dřeva termicky neupraveného, tedy $T=20\text{ °C}$. Ostatní soubory byly postupně termicky upravovány v termokomoře, kde čelily expozici při teplotách ($T=160\text{ °C}$, 180 °C , 210 °C). Takto termicky upravené vzorky byly rozděleny podle teplot a připraveny k dalšímu zpracování.

4.2.1 Zjištění hustoty

Pro zjištění hustoty daných vzorků bylo použito normy ČSN EN ISO 323 (1994).

Vzorec pro výpočet:

$$\delta_w = \frac{m_w}{a_w * b_w * l_w} = \frac{m_w}{V_w} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (7)$$

Kde: δ_w – hustota zkušebního tělesa (vzorku) při dané vlhkosti w [kg/m^3]

m_w – hmotnost zkušebního tělesa (vzorku) při dané vlhkosti w [kg]

V_w – objem zkušebního tělesa (vzorku) při dané vlhkosti w [m^3]

a_w, b_w, l_w – jsou rozměry zkušebního tělesa (vzorku) při dané vlhkosti w [m].

V tabulce 6 jsou uvedeny hustoty u zkoumaného dřeva při daných stupních termické modifikace.

Tab. 6: Hustota zkoumaného dřeva při daných teplotách termické úpravy (Autor, 2022)

Označení materiálu	Teplota [°C]	Hustota [g/cm^3]	Označení materiálu	Teplota [°C]	Hustota [g/cm^3]
SM-smrk	20 °C	0,446	DB-dub	20 °C	0,761
	160 °C	0,42		160 °C	0,736
	180 °C	0,443		180 °C	0,673
	210 °C	0,423		210 °C	0,683
Označení materiálu	Teplota [°C]	Hustota [g/cm^3]	Označení materiálu	Teplota [°C]	Hustota [g/cm^3]
TEK-teak	20 °C	0,653	PD-padouk	20 °C	0,65
	160 °C	0,591		160 °C	0,623
	180 °C	0,555		180 °C	0,618
	210 °C	0,6		210 °C	0,612

V následující tabulce 7 jsou vyjádřeny časy jednotlivých fází termické modifikace na dané tepelné úpravy u zkoumaného dřeva Smrku (*Picea abies L.*), Dubu (*Quercus robur L.*), Teaku (*Tectona grandis Linn*), Padouku (*Pterocarpus soyauxii*).

Tab. 7: Časy jednotlivých fází termické modifikace zkoumaného dřeva (Autor, 2022)

Parametry procesu	Smrk (SM)			Parametry procesu	Teak (TEK)		
	160 °C	180 °C	210 °C		160 °C	180 °C	210 °C
Topení (h)	7,7	6,8	8,5	Topení (h)	10,5	13,1	13,3
Termizace (h)	3	3	3	Termizace (h)	3	3	3
Chlazení (h)	1,7	2,4	4,2	Chlazení (h)	7,2	6,2	4,8
Celkový čas termizace (h)	12,4	12,2	15,7	Celkový čas termizace (h)	20,7	22,3	21,1

Parametry procesu	Dub (DB)			Parametry procesu	Padouk (PD)		
	160 °C	180 °C	210 °C		160 °C	180 °C	210 °C
Topení (h)	10,6	11,4	14,6	Topení (h)	10	11,7	15,1
Termizace (h)	3	3	3	Termizace (h)	3	3	3
Chlazení (h)	2,2	2,8	3,1	Chlazení (h)	2,3	4,1	4,5
Celkový čas termizace (h)	15,8	17,2	20,7	Celkový čas termizace (h)	15,3	18,8	22,6

4.3 Obrábění

4.3.1 Stroje a nástroje

Výstupní termicky upravená tělesa připravená v polo-radiálním směru vláken o rozměrech 450x100x18 mm (délka x šířka x tloušťka) byla kotoučovou pilou značky SCM s označením: si300 class v dílně naformátována na zkušební vzorky o parametrech 450x3x18 mm (délka x šířka x tloušťka) pro snadnější manipulaci při obrábění a měření. K obrábění byla použita spodní jedno-vřetenová frézka typu FVS (ED, APT Line II) vyrobená německou společností Tuttlingen. U tohoto stroje se nastavují požadované otáčky, tedy i řezné rychlosti pomocí přehození klínových řemenů. Frézka byla osazena třemi druhy dvouožových frézovacích hlav od společnosti STATON o rozměrech 125x45x30 mm v závislosti na požadovaném úhlu řezného čela. Frézovací hlava byla vybavena frézovacím nožem z rychlořezné oceli od společnosti Maximus typového označení Special 55. Celý stroj je doplněn o podávací zařízení značky STEFF (2034) od italské firmy Maggi Engineering. Podávací zařízení STEFF disponuje celkem čtyřmi fixními rychlostmi, které umožňují

posuv deskového materiálu i podélných dílců vpřed a zad. Stroj je vybaven přestavitelným univerzálním stojanem viz obr.17, jehož pomocí lze nastavit podávací zařízení do libovolné pozice.



Obrázek 17: Spodní jedno-vřetenová frézka Tuttlingen vybavena přestavitelným univerzálním stojanem a podávacím zařízením STEFF 2034 (Autor, 2022)

Obrázek 18: Použitá frézovací hlava s úhlem řezného čela 15° - s detailem na nůž (Autor, 2022)

Tab. 8: Technické parametry spodní frézky (Autor, 2022)

Výrobce	Tuttlingen
Označení (typ)	FVS (ED, APT Line II)
Proudová soustava [V]	360/220 V
Příkon [kW]	4 kW
Otáčky [ot/min]	3000-9000
Řezná rychlost pro frézovací hlavu o průměru 125 mm [m/s]	20, 30 ,40, 60
Rok výroby	1975

Podle následujícího vzorce (8) můžeme definovat řeznou rychlost podle odpovídajících otáček.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot 1000} \text{ [m/s]} \quad (8)$$

Kde: v_c – řezná rychlost [m/s],

D – průměr frézy [mm],

n – otáčky frézy [ot/min].

Tab. 9: Výsledný přepočítání otáček na řeznou rychlost (Autor, 2022)

Otáčky [ot/min]	Řezná rychlost pro frézovací hlavu o průměru 125 mm [m/s]
3000	20
4500	30
6000	40

Tab. 10: Technické parametry frézovací hlavy (Autor, 2022)

Frézovací hlava: 1; 2; 3	STATON
Rok výroby	2005
Maximální otáčky	8000 min ⁻¹
Vnější průměr hlavy včetně nožů	130 mm
Vnější průměr hlavy	125 mm
Šířka hlavy	45 mm
Počet nožů	2
Počet nožů v záběru	pro účely experimentu 1
Úhel čela nástroje	15°; 20°; 25°

Tab. 11: Technické parametry podávacího zařízení (Autor, 2022)

Výrobce	Maggi Engineering
Typ	STEFF 2034
Motor [V]	400 V
Příkon [kW]	0,6 – 0,8 kW
Otáčky [ot/min]	1400–2800
Podávací rychlost [m/min]	4, 8, 11, 22
Rok výroby	2005

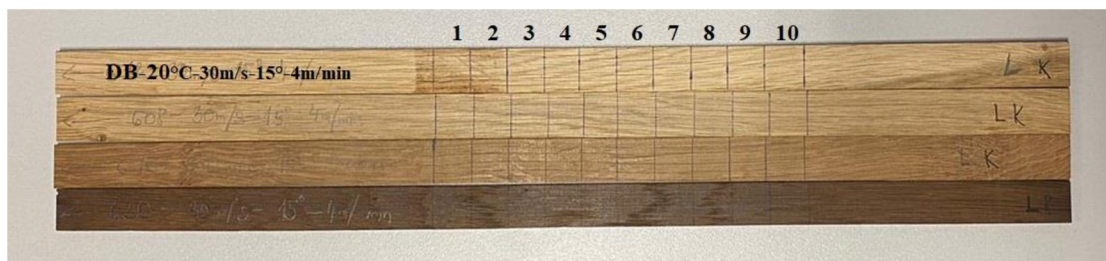
4.3.2 Nastavení frézovacích parametrů

Pro tento výzkum bylo využito hned několik nastavitelných parametrů k obrábění. Materiál byl do procesu obrábění podáván o rychlostech 4, 8 a 11 m /min podávacím zařízením značky STEFF. Řezná rychlost se pak u jednotlivých vzorků nastavovala na rychlosti 20, 30 a 40 m/s což odpovídá otáčkám viz tabulka 9. Při frézování docházelo k úběru materiálu o šířce 1 mm. Materiál byl během frézování vystaven taktéž 3 stupňům úhlu řezného čela nástroje. Jednalo se o úhly 15, 20 a 25°.

4.4 Zkušební vzorky

U všech použitých zkušebních vzorků se po obrábění vyznačila obrobená strana a směr podávání vzorku do řezu. Popis vzorků mimo jiné dále obsahuje zkratku dřeva, stupeň tepelné úpravy, použitou řeznou rychlost, podávací rychlost a úhel řezného čela nástroje viz obrázek 19. Finální označení vzorku bylo například ve tvaru: PD/160/30/4/25 – kde PD označuje zkušební vzorek dřeva padouk po termické úpravě při 160 °C, řeznou rychlost 30 m/s, podávací rychlost 4 m/min a úhel řezného čela nástroje 25°.

Pro následné měření drsnosti a vlnitosti povrchu kontaktním profilometrem se na vzorcích směrem od středu vyznačilo na každou stranu pět úseků, každý 15 mm dlouhý, celkem tedy deset úseků. Z vyznačených částí se získávaly hodnoty drsnosti (R_a) a vlnitosti (W_a).



Obrázek 19: Naměření a rozdělení vzorku dubu, na 10 oblastí pro následné měření kontaktním profilometrem, popis vzorku obsahující: zkratku dřeva DB-Dub, stupeň tepelné úpravy 20 °C, řeznou rychlost 30 m/s, úhel řezného čela nástroje 15°, podávací rychlost 4 m/min (Autor, 2022)

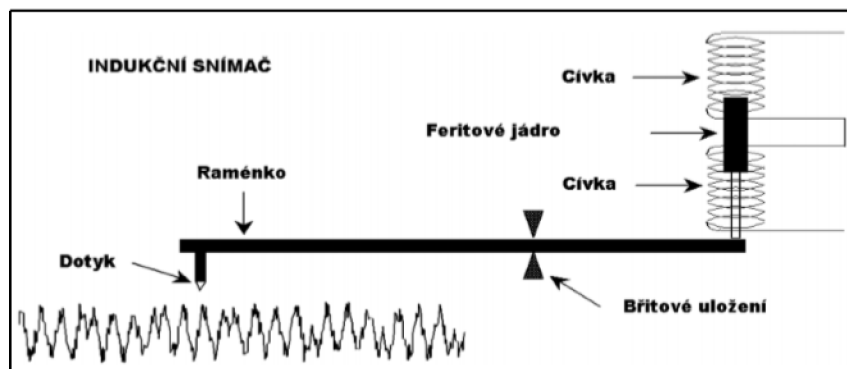
4.5 Měření

Na označených vzorcích se ve vyznačených polích provádělo měření kvality povrchu (profilu) drsnosti a vlnitosti za použití kontaktní metody v laboratoři. Měření vzorků probíhalo směrem dovnitř při zasouvání ramínka, začátek a konce měření měl 0,3 mm toleranci.

K měření kvality povrchu byl použit kontaktní profilometr neboli jinak drsnoměr od firmy Taylor Hobson s označením FORM TALYSURF 50 Intra, který byl položen na kamenné desce viz obr. 20 k zajištění dostatečného základu, stability a roviny pro měření. Délka horizontálního snímání povrchu činila 50 mm, při této délce je pak úchylnka přímosti 0,4 μm s odchylkou měření $\pm 2\%$. Všechna měření kvality povrchu drsnosti a vlnitosti probíhala podle norem ČSN EN ISO 4287 (1999) a ČSN EN ISO 4288 (1999).



Obrázek 20: Kontaktní profilometr vybavený o raménko kontaktního profilometru s kuželovým diamantovým hrotem (Autor, 2022)



Obrázek 21: Princip indukčního snímače kontaktního profilometru (Havelková a Hiklová, 2014)

4.5.1 Nastavení kontaktního profilometru

Kontaktní profilometr FORM TALYSURF 50 Intra byl osazen standardním raménkem s kuželovým diamantovým hrotem $R = 2 \mu\text{m}$. Nastavení kontaktního profilometru je znázorněno v tabulce 12 podle normy ČSN EN ISO 4287 (1999), kde je námi zvolené nastavení zvýrazněno modrou barvou a poukazuje tedy na použití Gaussova filtru a filtru profilu λc .

Tab. 12: Parametry měření podle normy ČSN EN ISO 4287 (ČSN EN ISO 4287, 1999)

Periodické profily	Parametry měření			
RSm [mm]	$\lambda c = lc$ [mm]	ln [mm]	lt [mm]	r_{tip} [mm]
$0,013 < RSm \leq 0,04$	0,08	0,4	0,48	2
$0,04 < RSm \leq 0,13$	0,25	1,25	1,5	2
$0,13 < RSm \leq 0,4$	0,8	4	4,8	02.V
$0,4 < RSm \leq 1,3$	2,5	12,5	15	5
$1,3 < RSm \leq 4$	8	40	48	10

Pozn.: RSm – průměrná šířka prvků profilu, $\lambda c = lc$ – základní délka, ln – vyhodnocená délka, lt – měřená délka, r_{tip} – poloměr hrotu ramínka

4.6 Chemická metodika

Součástí našeho výzkumu byla i chemická analýza vzorků termicky modifikovaného dřeva, včetně vzorků referenčních, tedy bez termické modifikace. Pro účely chemické analýzy jsme použily zbytky po obrábění převážně ve formě štěrky. Pak následovala dezintegrace a sítování vzorku podle normy Tappi T 257 cm-02 (Tappi, 2012). Za pomoci laboratorního nožového mlýnu byla štěrka rozmělněna, nasekána na třísky, které následně byly sítovány na sítích. Procesem sítování jsme získali frakci o velikosti 0,5–1,0 mm, tuto frakci jsme použili pro chemickou analýzu. Sítování probíhalo z důvodu, aby se oddělila menší frakce, která by mohla ucpávat póry ve fritách. Z takto připraveného vzorku byla stanovena anorganická, organická i polysacharidická část.

Anorganická část

Jako anorganická část dřeva je považován její popel, než však byl stanoven musela být nejprve stanovena vlhkost vzorku.

- Vlhkost

Vlhkost vzorku byla stanovena podle normy Tappi T 210 cm-13 (Tappi, 2015). Stanovení probíhalo tak, že jednotlivé vzorky byly naváženy na čtyři desetinná místa do váženek na analytických vahách a následně byly sušeny po dobu 4 hodin při 105 °C, což podle normy stačí ke konstantní hmotnosti vzorku. Poté z původní hmotnosti a hmotnosti po sušení byla vypočtena vlhkost vzorku. Tato vlhkost nám poté sloužila pro dopočet navážek pro další analýzy, ať už anorganické, organické, tak i pro polysacharidické složky.

- Popel

Popel neboli anorganická část dřeva byl stanoven také pomocí Tappi normy, konkrétně podle Tappi T 211 om-02 (Tappi, 2007). Stanovení popela probíhalo navážením 5 g do spalovacího kelímku, poté byl vzorek nejprve žihán nad kahanem a když již ze vzorku neodcházely žádné výpary, tak byl umístěn do muflové pece, kde byl 4 hodiny spalován při teplotě 525 °C. Po uplynutí této doby byl vzorek ve spalovacím kelímku přesunut do exsíkátoru, kde se nechal vychladnout a následně byl zvážen. Z hodnoty původního vzorku vztaheného k absolutní sušině a z hmotnosti popela bylo dopočítáno procentuální zastoupení popela.

Organická část

Organická část ve dřevu lze stanovit jako množství extrahovatelných látek, pro naši práci byla vybrána extrakce do binární směsi ethanol-toluen z důvodu, že do této směsi přechází nejvíce extrahovatelných látek a zároveň umožňuje vyextrahovat ze vzorku i pryskyřičné látky. Extrakce probíhala podle normy Tappi T 6 wd-73 (Tappi, 2015), v které byl použit toluen místo benzenu, hlavně z důvodu karcinogenity benzenu. Binární směs ethanol:toluen byla namíchána v poměru 7:3. Do papírové extrakční frity byl navážen vzorek, který byl vložen do Soxhletova nástavce a do předem zvážené baňky pod extrakčním nástavcem bylo přidáno 230 ml namíchané směsi. Vlastní extrakce probíhala právě pomocí Soxhletova nástavce a to 5 hodin, přičemž za 1 hodinu probíhaly 4 extrakční cykly. Poté byl vzorek vyjmut a sušen při teplotě 60 °C. Extrahovatelné látky byly stanoveny pomocí hmotnosti baňky před extrakcí a hmotnosti baňky po extrakci, konkrétně po odpaření rozpouštědla.

Polysacharidická část

Polysacharidickou částí dřeva rozumíme množství ligninu, celulózy, holocelulózy a hemicelulóz.

- Celulóza podle Seiferta

Celulóza byla stanovena metodou podle Seiferta (Wright a Wallis, 1998). Pro stanovení bylo naváženo do 50 ml baněk cca 1,1 g vzduchosuchého vzorku po extrakci. K naváženému vzorku byl přidán acetylaceton, dioxan a koncentrovaná kyselina chlorovodíková. Takto připravený vzorek byl vložen do vodní lázně pod zpětný chladič, kde byl 30 minut vařen. Po uplynutí této doby byl vzorek ponechán zchladnout. K vychladlému

vzorku byl nejprve přidán methanol. Byly zváženy frity S3, přes které probíhaly filtrace, nejprve vzorku s methanolem, který byl poté promyt methanolem, horkou vodou, dioxan a znovu methanolem za přerušovaného odsávání, aby vzorek s chemikálií vždy alespoň 5 minut reagoval. Poté byla fritu sušena při 60 °C a po dosažení konstantní hmotnosti zvážena. Z této hmotnosti a hmotnosti absolutně suchého vzorku bylo dopočteno procentuální zastoupení celulózy.

- Lignin podle Klasona

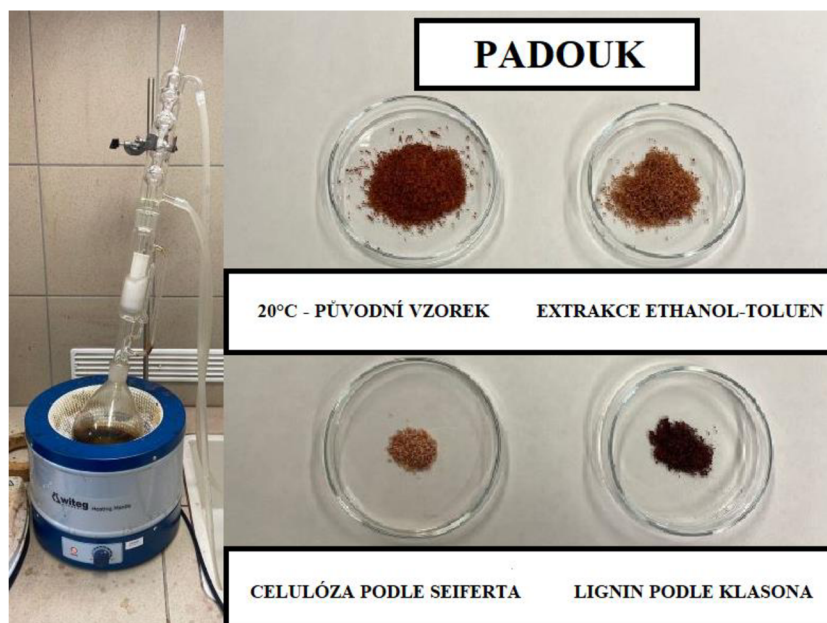
K analýze Klasonova ligninu byl rovněž jako u celulózy použit vzorek po extrakci. Průběh stanovení probíhal podle normy Tappi T 13 wd-74 (Tappi, 2015). Nejprve byly naváženy cca 2 g vzduchosuchého vzorku do kádinky, k tomuto množství byla přidána 72% kyselina sírová, a to v takovém množství, aby na 1 g vzorku bylo přidáno 15 ml. V kyselině byl vzorek ponechán po dobu 2 hodin a poté byl kvantitativně převeden do 2 l varné baňky, kde byl vařen za totálního refluxu pod zpětným chladičem po dobu 4 hodin v 3% kyselině sírové, proto bylo zapotřebí vypočítat množství vody, která je vložena do baňky. Po 4 hodinách vaření byl vzorek ponechán odstát do druhého dne, po odstátí následovala filtrace přes předem zvážený filtrační papír a promytí destilovanou vodou do neutrálního pH. Filtrační papír byl sušen při teplotě 105 °C a z rozdílu hmotnosti na něm a původní hmotnosti vzorku k analýze byl dopočten Klasonův lignin.

- Holocelulóza

V našem případě holocelulóza nebyla stanovena chemickou cestou, ale pouze dopočtem. A to tak, že součet hmotnostního zlomku ligninu, popela, organických látek a holocelulózy je roven 1.

- Hemicelulózy

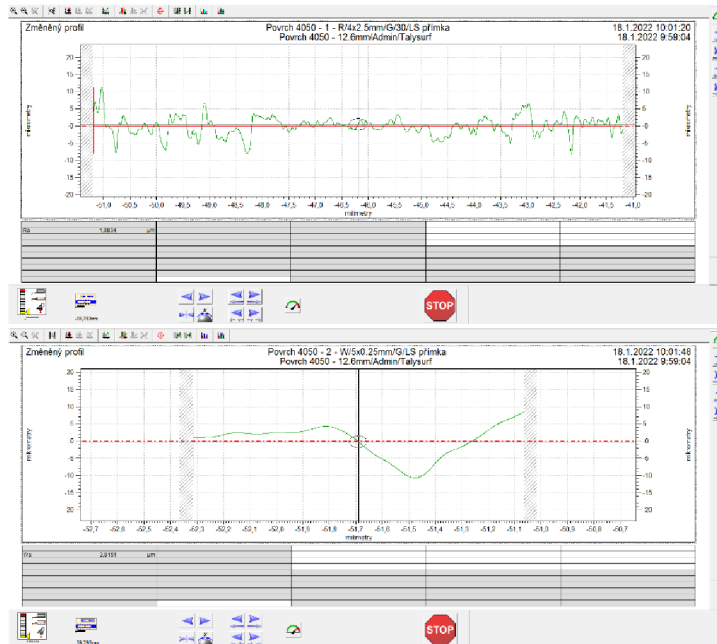
Množství hemicelulóz bylo zjištěno rozdílem holocelulózy a hemicelulóz (Corleto *et al.*, 2020).



Obrázek 22: Extrakce za použití Soxhletova přístroje, ukázka vzorku padouku (Autor, 2022)

4.7 Statistické vyhodnocení naměřených dat

Výstupy z měření kontaktním profilometrem jsou například znázorněny v obrázku 23, kde je vyhodnocena naměřená drsnost a vlnitost povrchu teaku. Každý vzorek byl podroben celkem deseti měření povrchu v předem označených polích. Všechny naměřené hodnoty se pak jako celek přenesly do programu Microsoft Excel 2016 od společnosti Microsoft sídlící ve státě Washington, kde se s daty dále pracovalo. U zpracovaných dat se následně provedlo vyloučení případných odlehlých hodnot, k čemuž byl použit Grubbsův test. Posouzení naměřených hodnot kvality povrchu Ra a Wa proběhlo dle statistické metody ANOVA, na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05 = 5 \%$. Zpracovaná data se následně vyhodnotila v softwaru STATISTICA 14 za použití čtyřfaktorové analýzy rozptylu. Jedná se o software od firmy Statsoft Inc., nyní sjednoceno pod firmou Tibco Software Inc. se sídlem ve státě California.



Obrázek 23: Výstupy hodnot R_a a W_a z měření kontaktním profilometrem (Autor, 2022)

Tab. 13: Vyhodnocení testovaných faktorů na základě hodnoty “P” (Gaff, Gáborík, 2009)

Hodnota P	Statistická významnost faktoru (vliv faktorů)
$\emptyset P < 0,05$	významný
$\emptyset P > 0,05$	není významný
$\emptyset P = 0,05$	na hranici významnosti
$\emptyset P = 0$	faktor působí
$\emptyset P < 0,001$	velmi významný
$\emptyset 0,001 < P < 0,01$	středně významný
$\emptyset 0,01 < P < 0,05$	málo významný

5 Výsledky a diskuse

5.1 Změny v chemické struktuře všech čtyř dřevin během všech stupňů termické modifikace a vliv chemického složení při rovinném frézování

Významný vliv na změnu chemické struktury dřeva je způsoben zvýšenou teplotou při termické modifikaci. Tabulka 14 nám znázorňuje průměrné hodnoty (vyjádřené v procentech) popela, extraktivních látek, ligninu, holocelulózy, celulózy a hemicelulózy dřeva smrku, dubu, teaku a padouku vystavené jednotlivým stupňům teplot termické modifikace. Čekovská *et al.* (2017) uvádí, že při teplotě nad 100 °C, zejména pak při úpravě dřeva při teplotách 150-170 °C dochází ke změnám v chemické struktuře dřeva.

Tab. 14: Chemická analýza přírodního a termicky modifikovaného dřeva (Autor, 2022)

SMRK (<i>Picea abies L.</i>)							
Teplota (°C)	Popel (%)	Extraktivní látky (%)	Lignin (%)	Celulóza (%)	Holocelulóza (%)	Hemicelulózy (%)	Energetika (W)
20 °C (neupravené)	4,939	0,816	26,851	42,924	67,394	24,470	805,5
160 °C	4,89	1,295	24,865	39,516	68,950	29,434	778,1
180 °C	1,918	1,703	26,070	35,537	70,309	34,772	774,7
210 °C	0,535	2,335	30,880	27,507	66,250	38,743	758,2
DUB (<i>Quercus robur L.</i>)							
Teplota (°C)	Popel (%)	Extraktivní látky (%)	Lignin (%)	Celulóza (%)	Holocelulóza (%)	Hemicelulózy (%)	Energetika (W)
20 °C	1,034	2,020	24,076	36,733	72,870	36,137	877,5
160 °C	0,971	1,723	25,814	32,899	71,492	38,593	828,5
180 °C	0,761	1,231	27,243	25,309	70,765	45,456	812,3
210 °C	0,769	3,489	35,979	21,404	59,763	38,359	829,4
TEAK (<i>Tectona grandis Linn</i>)							
Teplota (°C)	Popel (%)	Extraktivní látky (%)	Lignin (%)	Celulóza (%)	Holocelulóza (%)	Hemicelulózy (%)	Energetika (W)
20 °C	1,465	2,747	28,728	43,629	67,061	23,432	773,5
160 °C	1,245	6,056	29,318	39,016	63,381	24,365	766,5
180 °C	1,013	6,200	29,870	34,329	62,917	28,588	773,5
210 °C	0,979	5,339	29,897	32,785	63,785	31,000	766,6
PADOUK (<i>Pterocarpus soyauxii</i>)							
Teplota (°C)	Popel (%)	Extraktivní látky (%)	Lignin (%)	Celulóza (%)	Holocelulóza (%)	Hemicelulózy (%)	Energetika (W)
20 °C	6,332	8,070	32,034	43,572	53,564	9,992	403,4
160 °C	6,029	6,938	28,179	46,767	58,854	12,087	407,2
180 °C	5,959	5,882	30,821	41,522	57,338	15,816	404,2
210 °C	4,608	3,487	31,838	37,927	60,067	22,140	390,7

Data představují průměrné procentuální hodnoty látek v sušině daného dřeva při určitém stupni termické modifikace

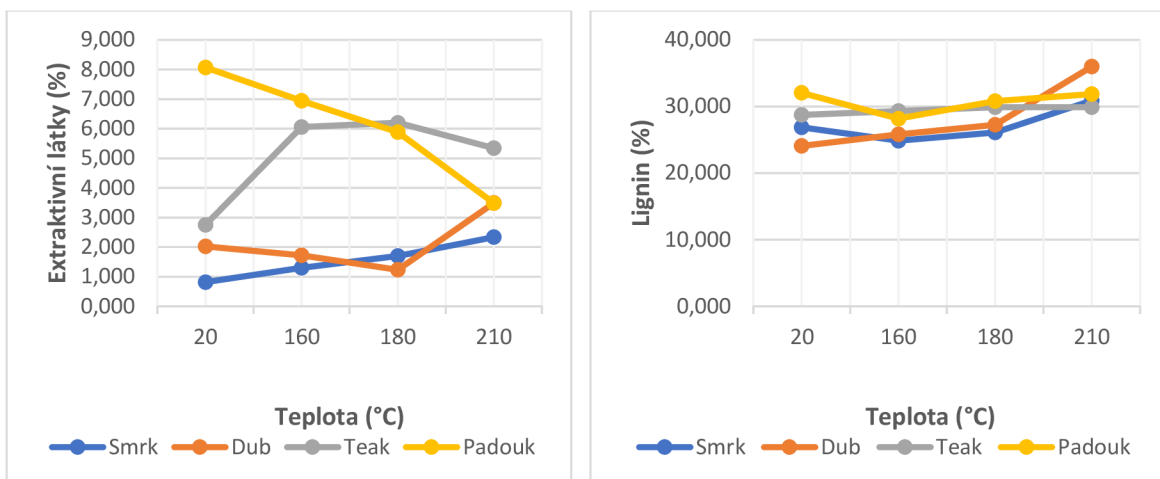
Podíl extraktivních látek u smrku se zvyšující se teplotou lineárně zvyšoval a vzrostl o 1,5 %, naproti tomu padouk zaznamenal téměř lineární úbytek extraktivních látek, a to cca o 5,6 %, což lze vidět na obrázku grafu 24. Z tabulky je patrný stoupající trend v zastoupení ligninu, a to u všech čtyř druhů dřeva. Za zmínku stojí například teak, u nějž pozorujeme téměř konstantní zastoupení ligninu během všech teplot termické úpravy. Naopak nejmarkantnější nárůst v zastoupení ligninu můžeme sledovat u dubu, jenž činil cca 12 %. Kubovký *et al.* (2020) se ve svém výzkumu při zkoumání vlivu termické modifikace na obsah celulózy u dubu evropského (*Quercus robur*, L.) dopracovali k závěru, že celulóza lépe odolává vlivu nižších teplot termické úpravy a má relativně odolné vazby. Pokles polymerizace celulózy nebyl při teplotě 160 °C tak významný, jako při teplotě 180 a 210 °C, kde docházelo k značnému rozštěpování vazeb celulózy což potvrzují i výsledné naměřené hodnoty námi zkoumaného dubu viz tabulka 14. Mimo jiné, jak uvádí Kubovký *et al.* (2020) a Palaez – Samaniego *et al.* (2013) ve svých výzkumech, tak dochází při vyšších teplotách termické úpravy k deacetylaci hemicelulóz ve dřevě, čímž dochází k uvolňování kyseliny octové, mravenčí či metanolu vlivem deacetylace hemicelulóz ve dřevě. Zmíněná kyselina octová pak katalyzuje hemicelulózy, ale i celulózu. Obsah celulózy téměř u všech zkoumaných druhů dřeva klesal, výjimkou byl Padouk (*Pterocarpus soyauxii*), který nejprve zaznamenal nárůst o 3 % celulózy mezi neupraveným dřevem a termicky upraveným na teplotu 160 °C, pak ale i u padouku došlo při následných vyšších tepelných úpravách k poklesu celulózy a to o 9 % oproti úpravě na 160 °C.

Jako další zkoumanou chemickou složkou dřeva byly hemicelulózy, které zaznamenaly nárůst svého zastoupení ve dřevě u všech zkoumaných druhů se zvyšující se tepelnou úpravou. Nejvýraznějšího nárůstu hemicelulóz registrujeme u padouku a smrku, kde v případě padouku v porovnání mezi neupraveným dřevem a termicky upraveným při 210 °C byl rozdíl o cca 13 %, obdobný významný nárůst hemicelulóz byl zaznamenán u smrku s celkovým nárůstem oproti neupravenému dřevu o cca 14 %. Tak jako u předešlých dvou druhů dřeva došlo i u teaku k největšímu procentuálnímu nárůstu v zastoupení hemicelulóz po úpravě na 210 °C, celkem o 7,5 % oproti původnímu neupravenému vzorku. Jedinou výjimkou v rostoucím trendu u obsahu hemicelulóz ve dřevě pozorujeme pak u dubu, u kterého hemicelulózy klesaly po úpravě na 210 °C, došlo k poklesu oproti úpravě na 180 °C o 7 %. Celkový nárůst hemicelulóz u dubu pak činil v porovnání s ostatními druhy dřeva na konečnou úpravu 210 °C pouhé 2 % oproti referenčnímu neupravenému vzorku.

Tak jako my v naší práci, tak i další autoři Výbohová *et al.* (2018), Esteves a Pereira *et al.* (2009), Nuopponen *et al.* (2005) a taktéž Bourgeois a Guyonnet *et al.* (1988) obdobně zaznamenali ve svých výzkumech u dřeva termicky modifikovaného jako například u námi zkoumaného smrku (*Picea abies*), dále borovice (*Pinus pinaster*) jedle (*Abies*) či jasanu (*Fraxinus excelsior L.*) nárůst obsahu ligninu ve dřevě. Zmiňovaný procentuální nárůst obsahu ligninu v tepelně upraveném dřevě je zapříčiněn převládajícími kondenzačními reakcemi. Mimo to rovněž nastává degradace makromolekul ligninu (Kačík *et al.* 2016). V porovnání s autory, kteří se rovněž zabývali problematikou chemického složení termicky modifikovaného dřeva se naše výsledky shodují s jejich zjištěními, tudíž jsou naše hodnoty v souladu s trendy.

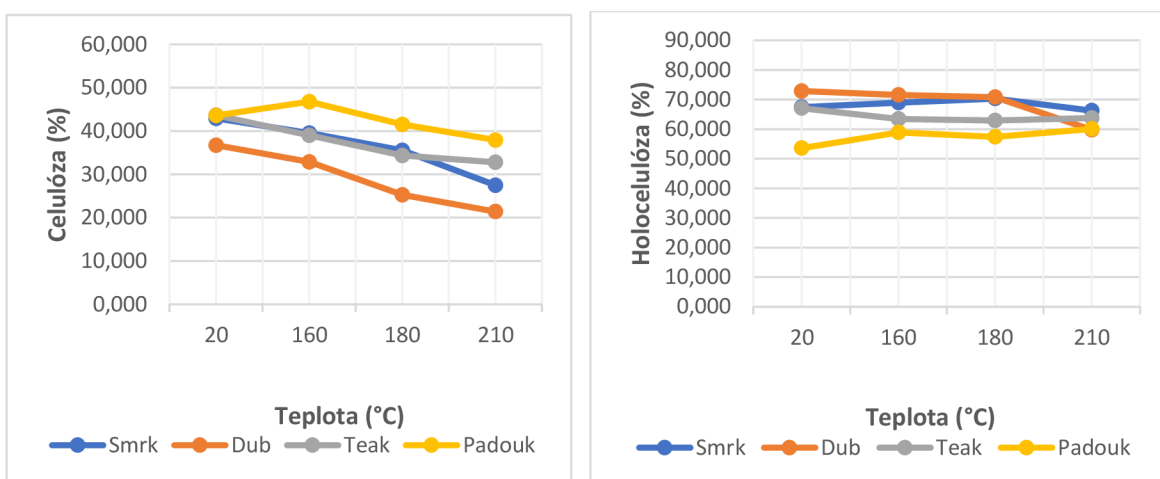
Doprovodným cílem chemické části práce bylo i zjištění, jestli mohou jednotlivé chemické složky termicky modifikovaného dřeva mít vliv na řezný příkon při rovinném frézování. V závislosti na tepelné úpravě dřeva dochází ve dřevě ke změnám hustoty a chemických složek, ze dřeva se stává křehčí materiál, u kterého se pak snižuje řezný odpor, což má za následek snižující spotřebu řezného příkonu. Kubovský *et al.* (2020) zmiňuje, že celulóza lépe odolává nižším teplotám termické modifikace, což může mít za následek i vyšší řezný příkon. Naopak při vyšších teplotách dochází k degradaci celulózy a ke štěpení jejich vazeb, což se může projevit na snížení řezného příkonu. Jelikož v našem případě se jednalo o snížení řezného příkonu v závislosti na rostoucí teplotě termické modifikace, tak můžeme tvrdit, že zřejmě je to právě vlivem poklesu zastoupení celulózy.

V následujících obrázcích 24 až 28 jsou graficky přehledně vyobrazeny a porovnány změny jednotlivých chemických látek všech čtyř druhů zkoumaného dřeva pro sledované stupně termické modifikace. Jak je z obrázku grafu 27 a tabulky 14 zřejmé dochází u všech dřevin k poklesu obsahu celulózy, a naopak se zvyšující teplotou termické modifikace dochází ke zvyšování zastoupení hemicelulóz a ligninu ve dřevě.



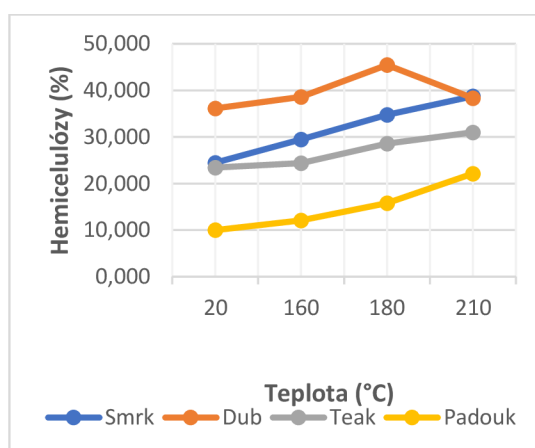
Obrázek 24: Změny extraktivních látek u zkoumaných druhů dřeva vlivem termické modifikace (Autor, 2022)

Obrázek 25: Změny ligninu u zkoumaných druhů dřeva vlivem termické modifikace (Autor, 2022)



Obrázek 26: Změny celulózy u zkoumaných druhů dřeva vlivem termické modifikace (Autor, 2022)

Obrázek 27: Změny holocelulózy u zkoumaných druhů dřeva vlivem termické modifikace (Autor, 2022)



Obrázek 28: Změny hemicelulóz u zkoumaných druhů dřeva vlivem termické modifikace (Autor, 2022)

5.2 Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti (R_a) – kontaktní metoda

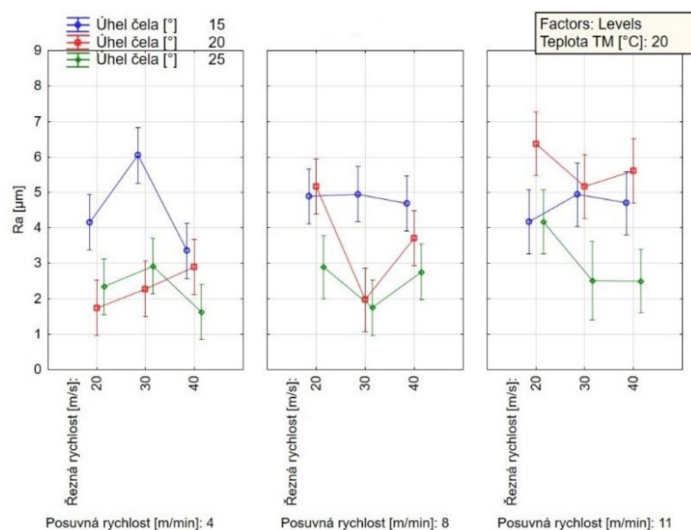
V této části práce jsme hodnotili průměrnou aritmetickou úchylku profilu drsnosti (R_a) u všech sledovaných druhů dřeva a za použití čtyřfaktorové analýzy rozptylu, pomocí které jsme zhodnotili vzájemný vliv všech faktorů na drsnost povrchu.

5.2.1 Čtyřfaktorové interakce

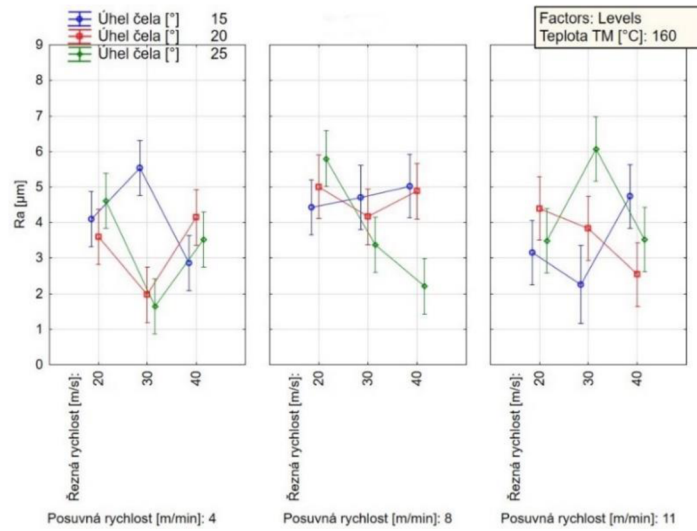
Na základě hladiny statistické významnosti “ P ” jsou čtyřfaktorové interakce stupně termické modifikace, řezné, posuvné rychlosti a úhlu čela nástroje u všech zkoumaných druhů dřeva statisticky významné. Výsledky jsou graficky shrnuty na níže uvedených obrázcích 29–44.

5.2.1.1 Smrk (*Picea abies L.*)

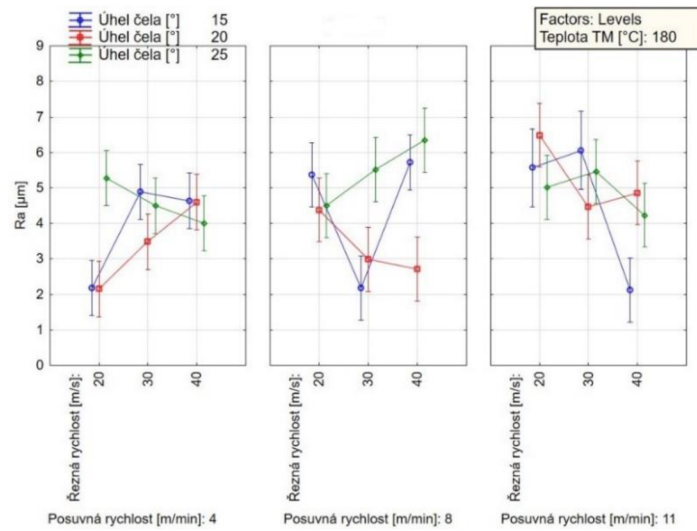
Nejlepší drsnosti bylo dosaženo u smrku při teplotě 160 °C při užití posuvné rychlosti 4 m/min, úhlu čela nástroje 25° a řezné rychlosti 40 m/s viz obr. 30. Smrk při stejné teplotě úpravy a posuvné rychlosti 8 m/min zaznamenal zlepšení povrchu drsnosti u použitého úhlu čela nástroje 25° při všech řezných rychlostech. Naopak u smrku termicky modifikovaného při 210 °C došlo v průběhu všech řezných rychlostí ke zhoršování R_a při posuvné rychlosti 4 m/min a úhlu čela 20°.



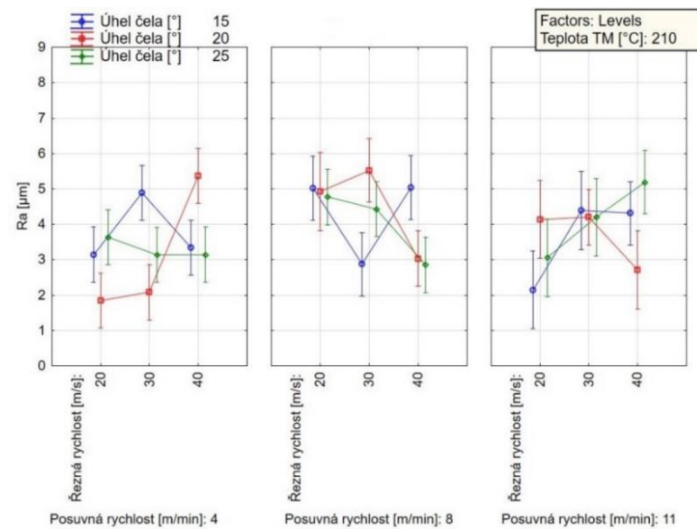
Obrázek 29: Drsnost (R_a) po frézování Smrku (*Picea abies L.*) $T = 20$ °C (Autor, 2022)



Obrázek 30: Drsnost (R_a) po frézování Smrku (*Picea abies L.*) $T = 160\text{ °C}$ (Autor, 2022)



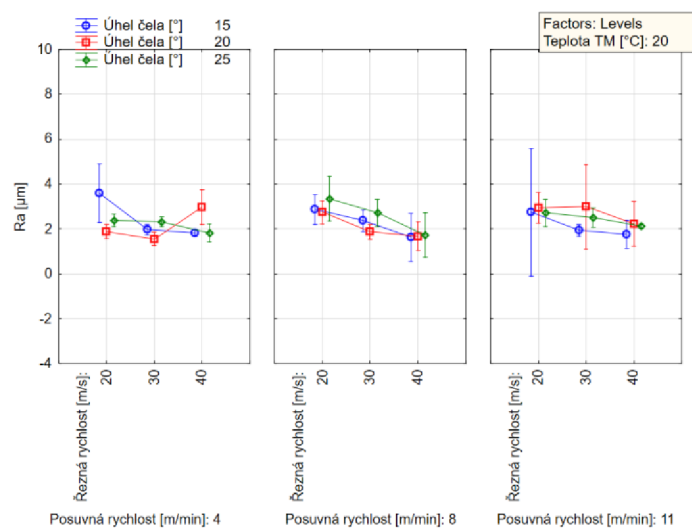
Obrázek 31: Drsnost (R_a) po frézování Smrku (*Picea abies L.*) $T = 180\text{ °C}$ (Autor, 2022)



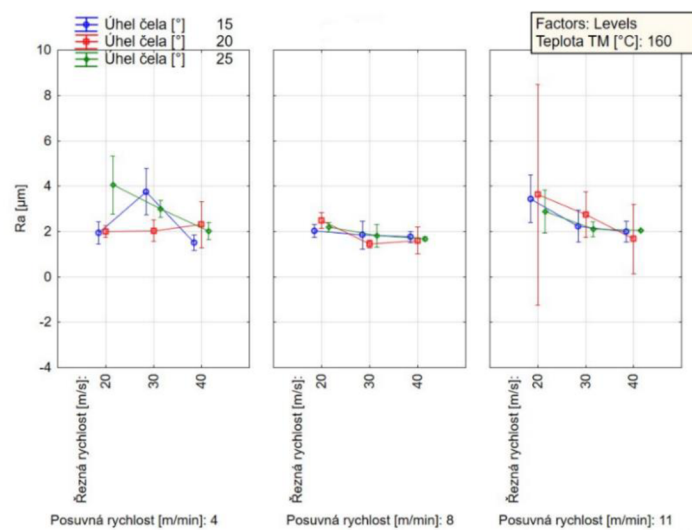
Obrázek 32: Drsnost (R_a) po frézování Smrku (*Picea abies L.*) $T = 210\text{ °C}$ (Autor, 2022)

5.2.1.2 Dub (*Quercus robur* L.)

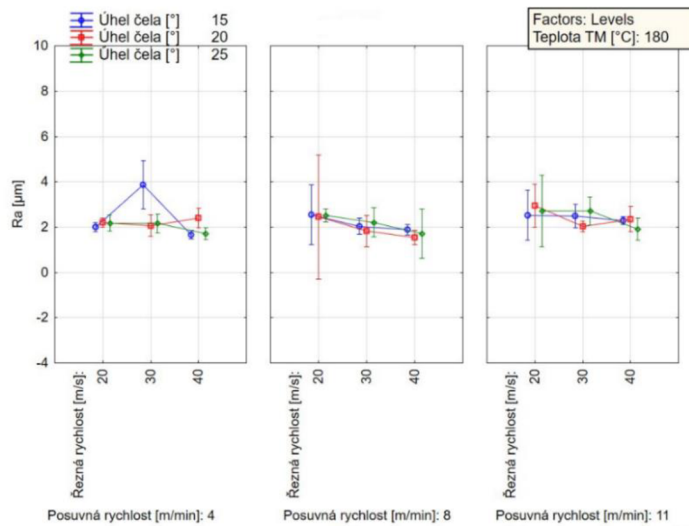
Dub bez termické modifikace viz obr. 33 u všech nastavených úhlů čela nástroje v průběhu všech řezných rychlostí zaznamenal zlepšení drsnosti povrchu u posuvné rychlosti 8 m/min. Totožné zlepšení zaznamenal dub při teplotě 160 °C během všech proměnných s výjimkou posuvné rychlosti, jež činila 11 m/min viz obrázek 34. Při termické úpravě dubu na 180 °C došlo téměř k dvojnásobnému zhoršení drsnosti při zvětšení řezné rychlosti z 20 m/s na 30 m/s u posuvné rychlosti 4 m/min a úhlu čela 15°, při opětovném zvýšení rychlosti na 40 m/s došlo ke zlepšení Ra povrchu, jak je patrné z obr. 35.



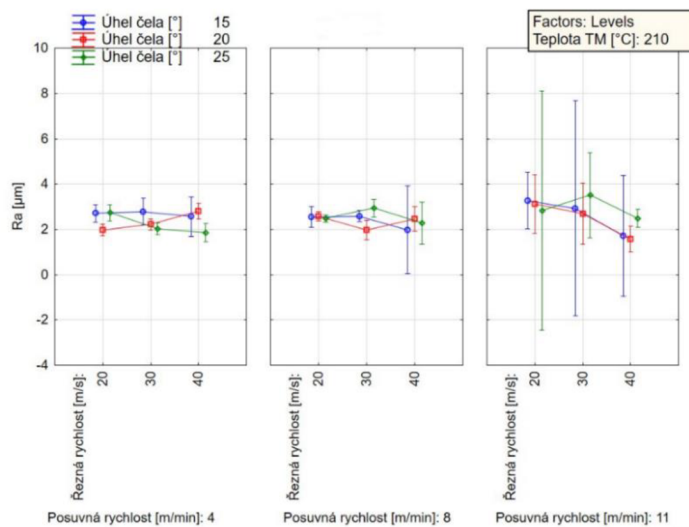
Obrázek 33: Drsnost (Ra) po frézování Dubu (*Quercus robur* L.) $T = 20$ °C (Autor, 2022)



Obrázek 34: Drsnost (Ra) po frézování Dubu (*Quercus robur* L.) $T = 160$ °C (Autor, 2022)



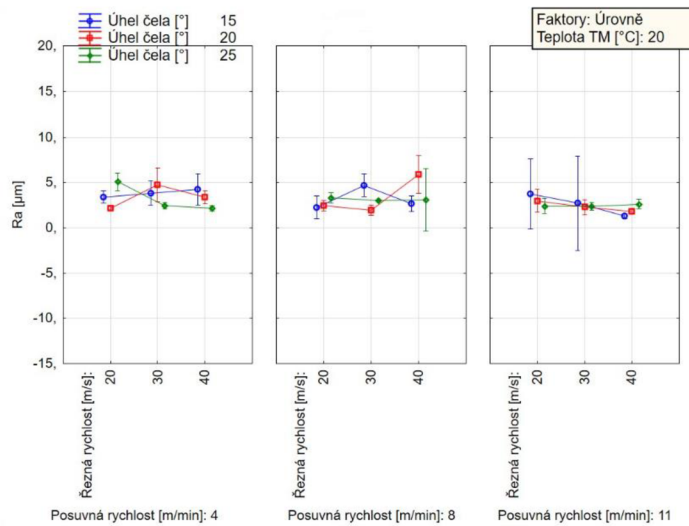
Obrázek 35: Drsnost (R_a) po frézování Dubu (*Quercus robur L.*) $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Autor, 2022)



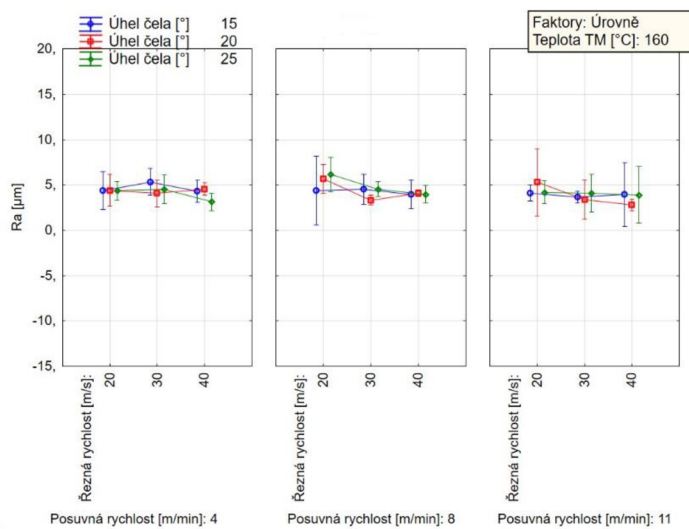
Obrázek 36: Drsnost (R_a) po frézování Dubu (*Quercus robur L.*) $T = 210\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Autor, 2022)

5.2.1.3 Teak (*Tectona grandis*)

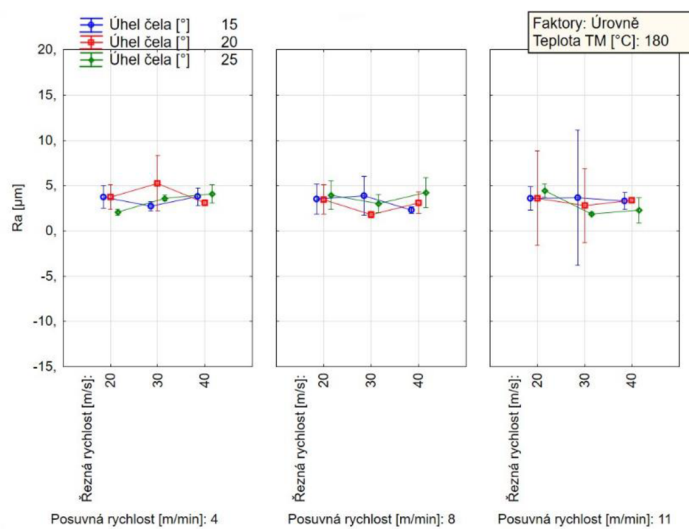
U teaku si můžeme povšimnout v obr. 38 a 40 dosažené stejné drsnosti povrchu při změnách řezné rychlosti z 20 m/s na 30 m/s a úhlu čela nástroje 25° . U teploty $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ toto nastalo za posuvné rychlosti 11 m/min, kdežto u teploty $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ za rychlosti posuvu 8 m/min.



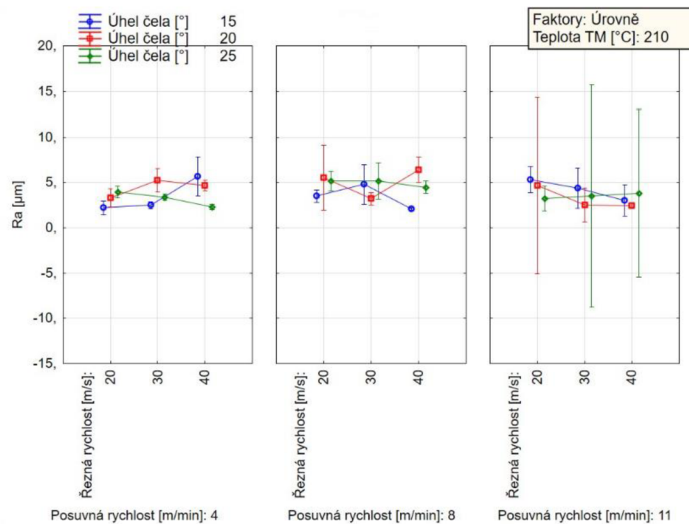
Obrázek 37: Drsnost (R_a) po frézování Teaku (*Tectona grandis*) $T = 20\text{ °C}$ (Autor, 2022)



Obrázek 38: Drsnost (R_a) po frézování Teaku (*Tectona grandis*) $T = 160\text{ °C}$ (Autor, 2022)



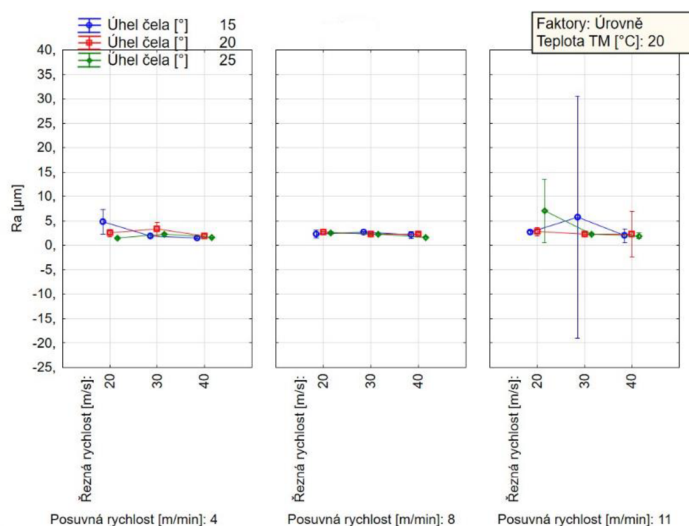
Obrázek 39: Drsnost (R_a) po frézování Teaku (*Tectona grandis*) $T = 180\text{ °C}$ (Autor, 2022)



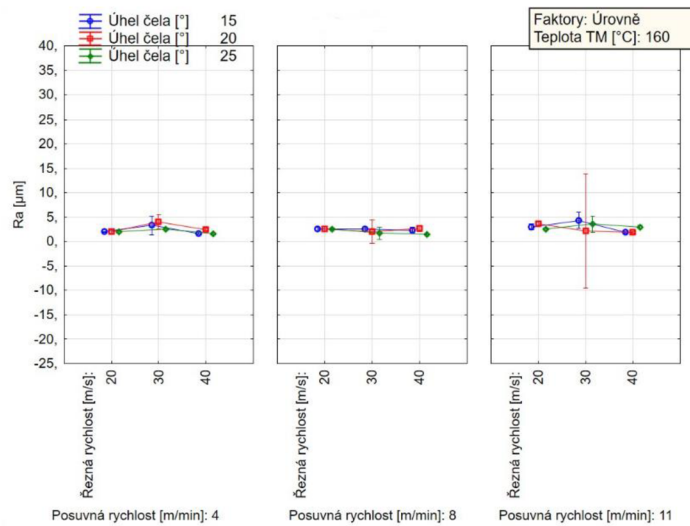
Obrázek 40: Drsnost (R_a) po frézování Teaku (*Tectona grandis*) $T = 210\text{ °C}$ (Autor, 2022)

5.2.1.4 Padouk (*Pterocarpus soyauxii*)

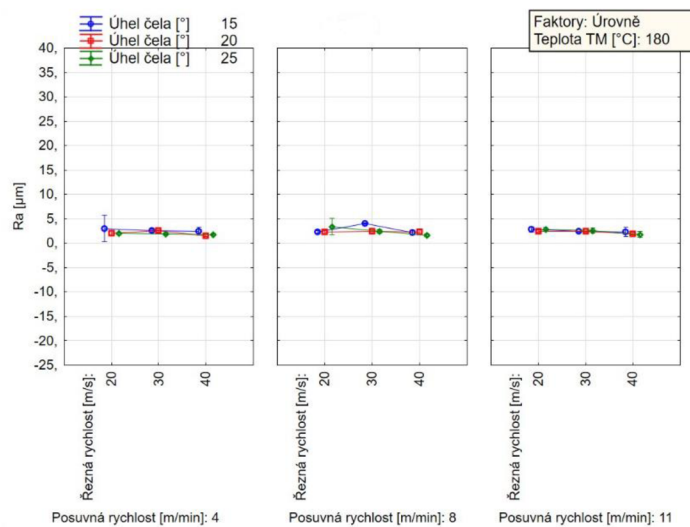
Při pohledu na čtyři následující obrázky grafů můžeme vidět minimální rozdíly mezi výslednými hodnotami drsnosti při vzájemné interakci všech faktorů při všech teplotách, což poukazuje na vysokou variabilitu měření, kdy se nám data shromažďují blíže kolem průměru. Největší odchylka dat byla u padouku bez termické modifikace viz obr. 41, u podávací rychlosti 11 m/min, řezné rychlosti 20 m/s a úhlu čela 25°.



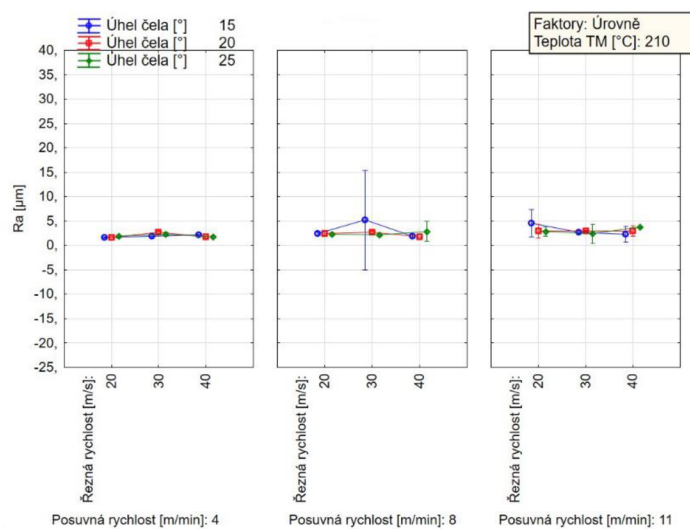
Obrázek 41: Drsnost (R_a) po frézování Padouku (*Pterocarpus soyauxii*) $T = 20\text{ °C}$ (Autor, 2022)



Obrázek 42: Drsnost (R_a) po frézování Padouku (*Pterocarpus soyauxii*) $T = 160$ °C (Autor, 2022)



Obrázek 43: Drsnost (R_a) po frézování Padouku (*Pterocarpus soyauxii*) $T = 180$ °C (Autor, 2022)



Obrázek 44: Drsnost (R_a) po frézování Padouku (*Pterocarpus soyauxii*) $T = 210$ °C (Autor, 2022)

Na výše uvedených grafech si můžeme všimnout u některých druhů dřeva snižování drsnosti povrchu při zvyšování podávací rychlosti a zejména zvyšováním řezných rychlostí. Škaljic *et al.* (2009) dospěl k podobné závislosti zmíněných parametrů ve svém výzkumu u jedlového dřeva. Dalšími autory, kteří ve svých výzkumech tak jako i my zaznamenali snižování hodnot drsnosti zvyšováním řezných rychlostí byli Kvietková *et al.* (2015) a Corleto *et al.* (2020). Naše výsledky jsou v souladu s trendy ostatních autorů, kteří zaznamenali nejen vliv řezné rychlosti, ale i podávací rychlosti na drsnost povrchu. Vliv termické modifikace v kombinaci s dalšími parametry frézování měl vliv na výslednou hodnotu drsnosti u většiny zkoumaných dřev. Tento vliv potvrzuje i výzkum Barcík *et al.* (2014b), kteří zaznamenali vliv teploty termické modifikace na výslednou drsnost povrchu u borovicového dřeva. Z výsledků výzkumu Laina *et al.* (2017), lze konstatovat, že druh dřeva (materiálu) a stejně tak zvolený proces obrábění mají vliv na výslednou drsnost povrchu.

5.3 Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti (W_a) – kontaktní metoda

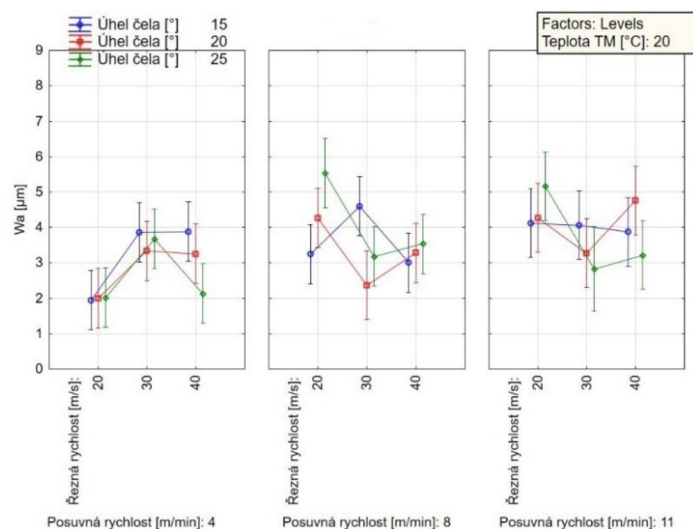
Dalším faktorem, který jsme hodnotili byla průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti (W_a) za použití čtyřfaktorové analýzy rozptylu. Použitím této analýzy jsme zhodnotili vzájemné působení vlivu všech sledovaných parametrů rovinného frézování všech druhů zkoumaného dřeva.

5.3.1 Čtyřfaktorové interakce

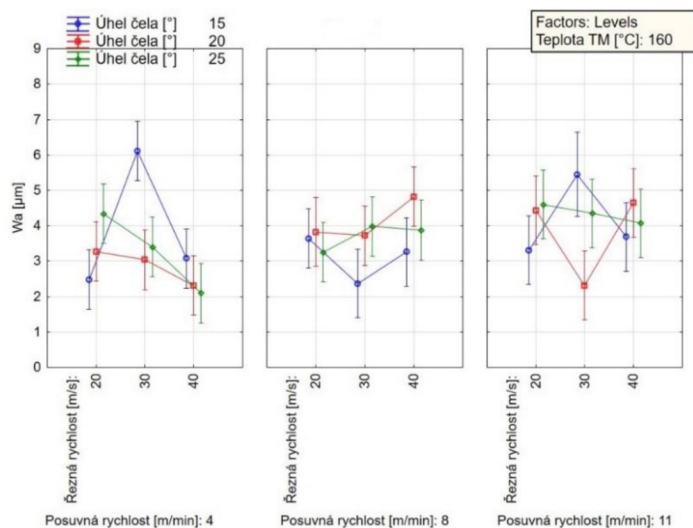
Vzájemné interakce parametrů stupně termické modifikace, řezné rychlosti, podávací rychlosti a úhlu čela nástroje u všech sledovaných druhů dřeva statisticky významně ovlivňují drsnost obrobeneho povrchu. V následujících obr. 45–60 jsou shrnuty výsledky čtyřfaktorové interakce na vlnitost povrchu jednotlivých druhů dřeva.

5.3.1.1 Smrk (*Picea abies L.*)

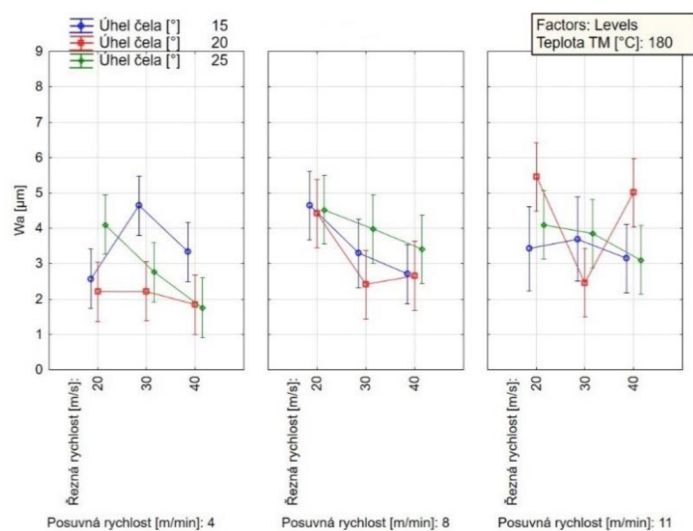
Na obrázku 47 smrku termicky modifikovaného při teplotě 180 °C došlo k zlepšování povrchu vlnitosti vlivem zvyšování řezných rychlostí u úhlu čela nástroje 25°, při všech podávacích rychlostech. Při teplotě 210 °C viz obr. 48, můžeme zpozorovat, že při použití posuvné rychlosti 8 m/min, docházelo k zlepšování vlnitosti (W_a) u všech úhlů čela při zvýšení řezné rychlosti z 20 m/s na 30 m/s. Při dalším zvýšení řezné rychlosti se vlnitost zhoršila.



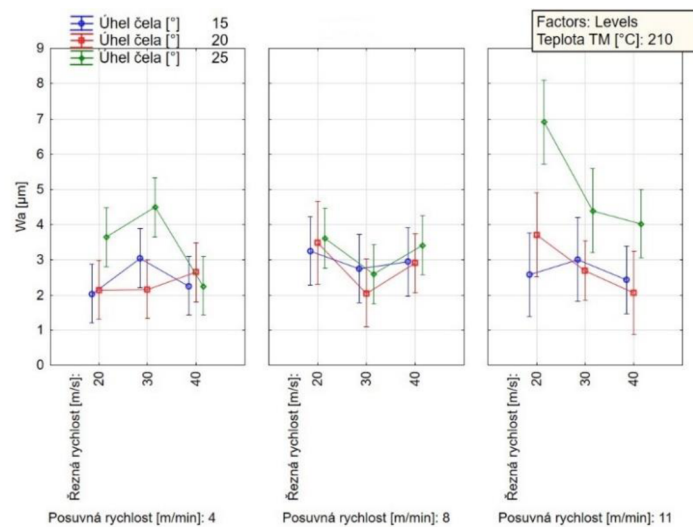
Obrázek 45: Vlnitost (W_a) po frézování Smrku (*Picea abies L.*) $T = 20$ °C (Autor, 2022)



Obrázek 46: Vlnitost (W_a) po frézování Smrku (*Picea abies L.*) $T = 160$ °C (Autor, 2022)



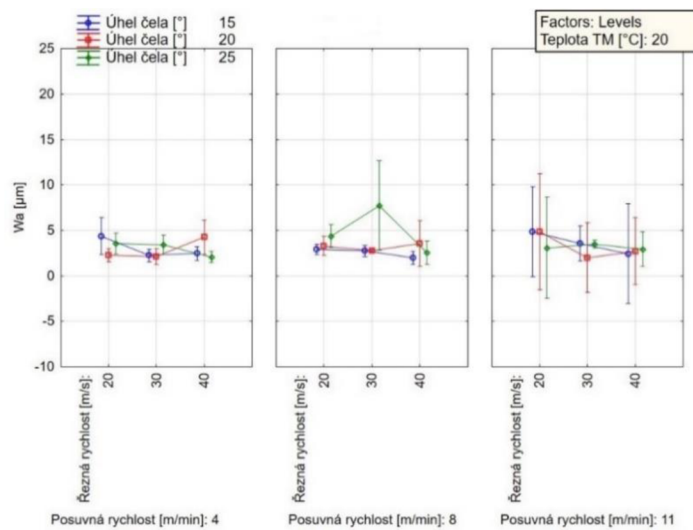
Obrázek 47: Vlnitost (W_a) po frézování Smrku (*Picea abies L.*) $T = 180$ °C (Autor, 2022)



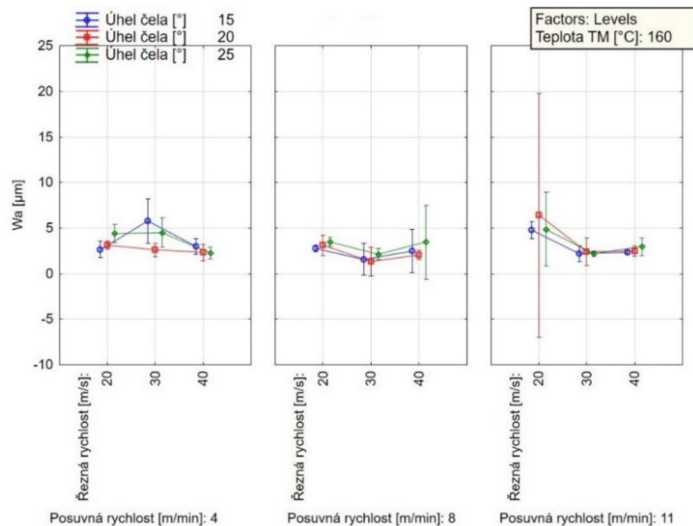
Obrázek 48: Vlnitost (W_a) po frézování Smrku (*Picea abies L.*) $T = 210$ °C (Autor, 2022)

5.3.1.2 Dub (*Quercus robur* L.)

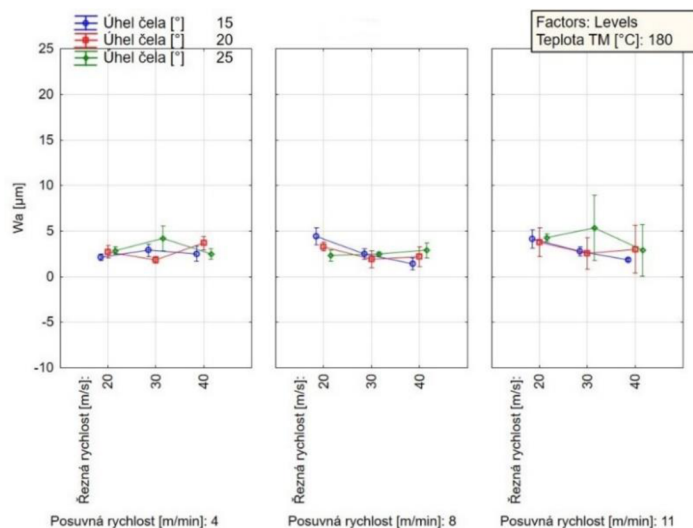
Dub bez úpravy termickou modifikací zaznamenal zhoršení vlnitosti povrchu při zvýšení řezné rychlosti na 30 m/s, posuvné rychlosti 8 m/min a úhlu čela 25°, následné zvýšení řezné rychlosti na 40 m/s mělo za následek zlepšení povrchu vlnitosti, jak je patrné z obr. 49. Vlnitost povrchu u dubu při teplotě 210 °C viz obrázek 52 vykazuje téměř shodné hodnoty, a to pro všechny užití úhly čel nástroje při posuvné rychlosti 4 m/min.



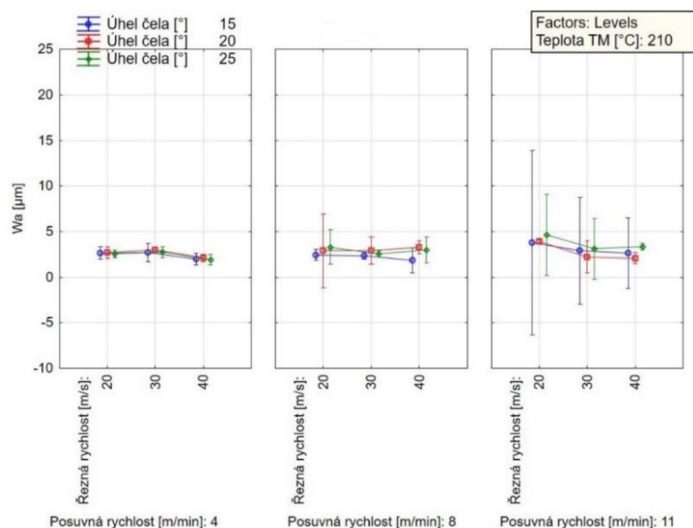
Obrázek 49: Vlnitost (W_a) po frézování Dubu (*Quercus robur* L.) $T = 20$ °C (Autor, 2022)



Obrázek 50: Vlnitost (W_a) po frézování Dubu (*Quercus robur* L.) $T = 160$ °C (Autor, 2022)



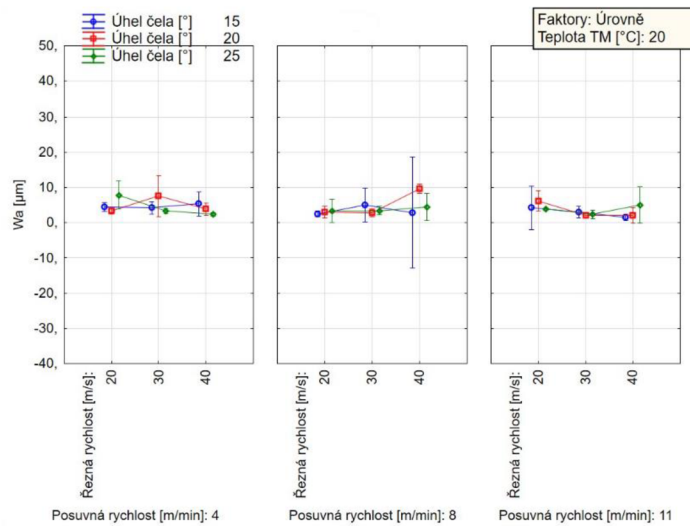
Obrázek 51: Vlnitost (W_a) po frézování Dubu (*Quercus robur L.*) $T = 180\text{ °C}$ (Autor, 2022)



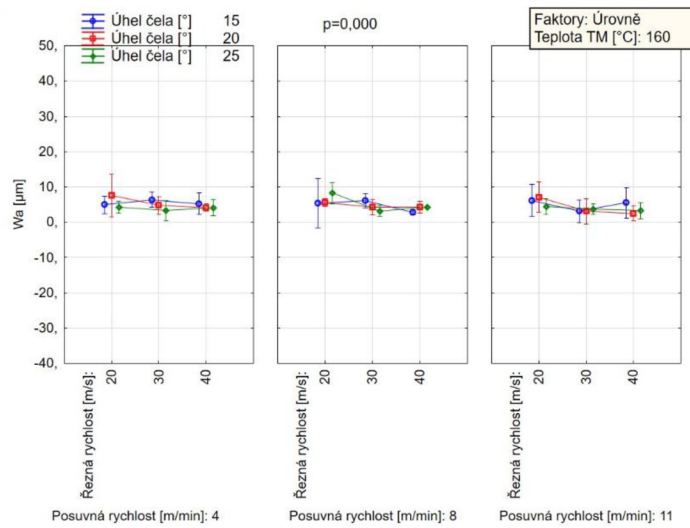
Obrázek 52: Vlnitost (W_a) po frézování Dubu (*Quercus robur L.*) $T = 210\text{ °C}$ (Autor, 2022)

5.3.1.3 Teak (*Tectona grandis*)

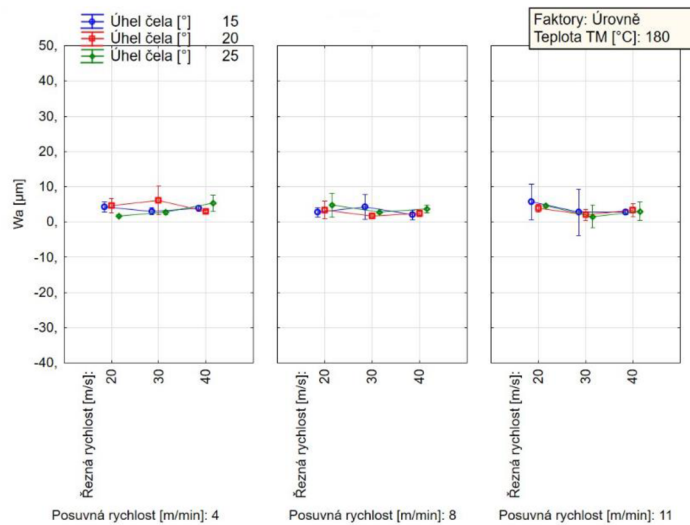
Při zvýšení řezné rychlosti z 20 m/s na 30 m/s, u posuvné rychlosti 4 m/min a úhlu čela 20° došlo ke zhoršení vlnitosti povrchu u teaku jak neupraveného, tak upraveného při teplotách 180 °C a 210 °C viz obr. 53,55 a 56, následné zvýšení řezné rychlosti mělo za následek zlepšení vlnitosti (W_a). Nejhorší vlnitost byla zaznamenána na obrázku 53 u teaku bez termické modifikace při parametrech: řezné rychlosti 40 m/s, podávací rychlosti 8 m/min a úhlu čela nástroje 20°.



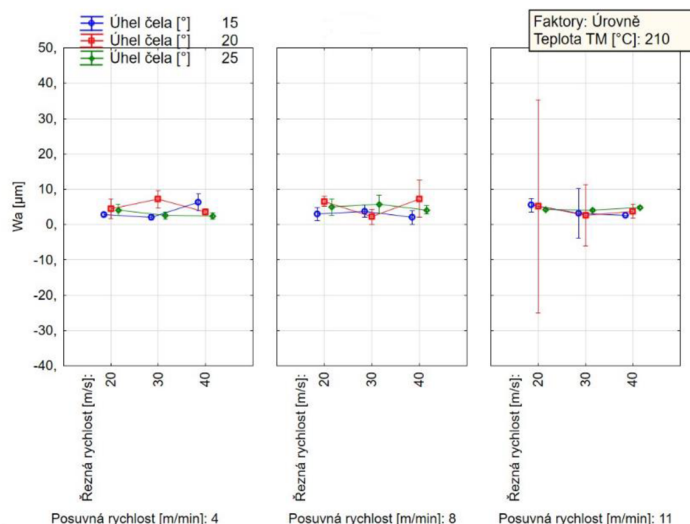
Obrázek 53: Vlnitost (W_a) po frézování Teaku (*Tectona grandis*) $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Autor, 2022)



Obrázek 54: Vlnitost (W_a) po frézování Teaku (*Tectona grandis*) $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Autor, 2022)



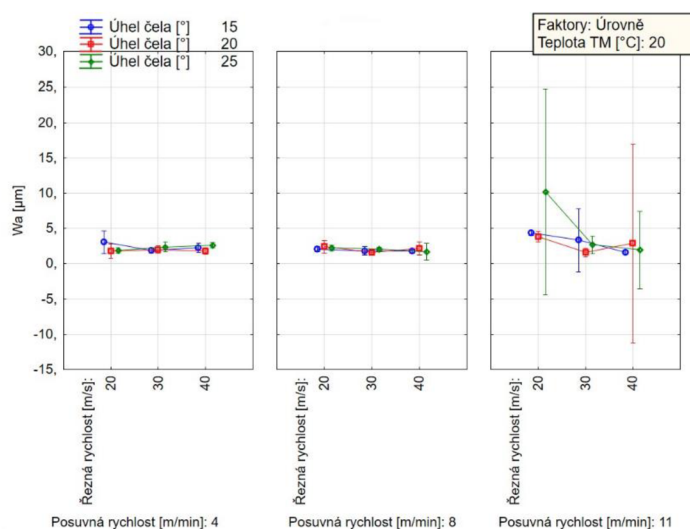
Obrázek 55: Vlnitost (W_a) po frézování Teaku (*Tectona grandis*) $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Autor, 2022)



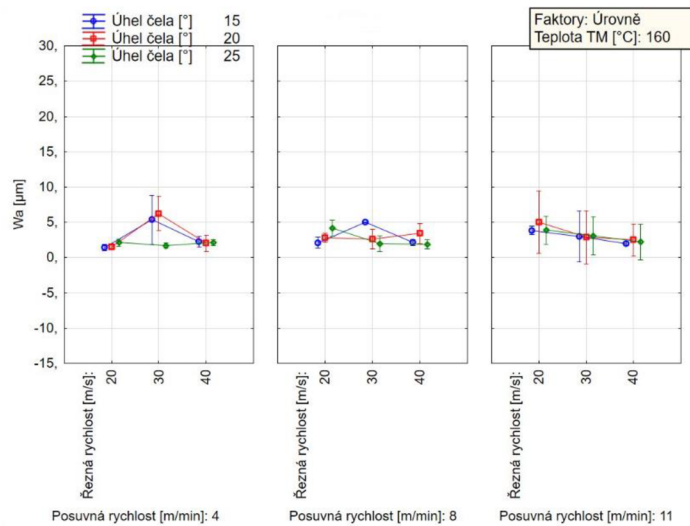
Obrázek 56: Vlnitost (Wa) po frézování Teaku (*Tectona grandis*) $T = 210$ °C (Autor, 2022)

5.3.1.4 Padouk (*Pterocarpus soyauxii*)

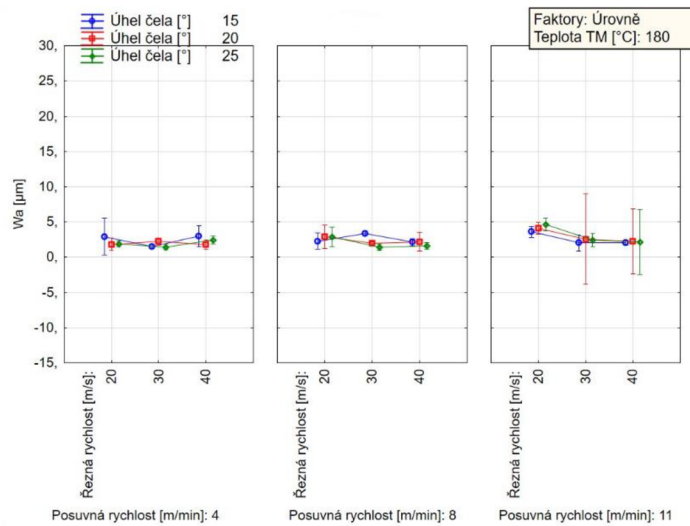
Nejhorší vlnitost byla zjištěna u tepelně neupraveného padouku viz obr. 57 při řezné rychlosti 20 m/s, podávací rychlosti 11 m/min a úhlu čela nástroje 25°, tato hodnota vlnitosti se následněm zvýšení řezné rychlosti zlepšila. U padouku při teplotě 160 °C pozorujeme u podávacích rychlostí 4 a 8 m/min zhoršení Wa při zvýšení řezné rychlosti z 20 na 30 m/s a nastaveným úhlem čela nástroje 15°, následným zvýšením řezné rychlosti se kvalita vlnitosti zlepšila, jak můžeme vidět na obrázku 58. Totožné zhoršení a následné zlepšení vlnitosti povrchu bylo zaznamenáno i při teplotě 210 °C pro stejné parametry frézování viz obr. 60.



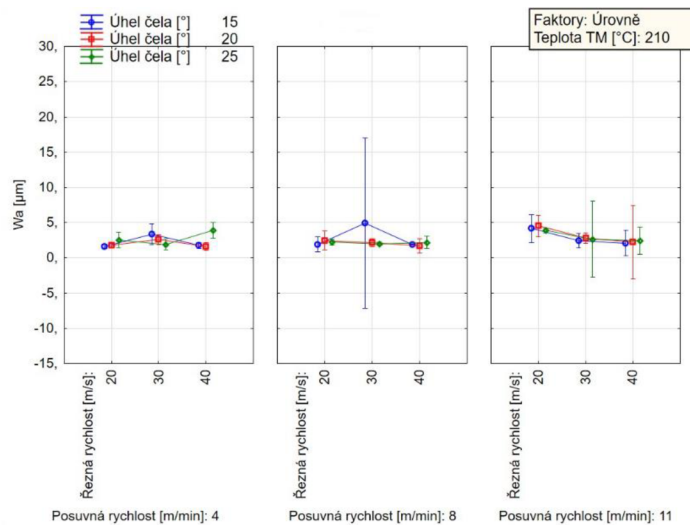
Obrázek 57: Vlnitost (Wa) po frézování Padouku (*Pterocarpus soyauxii*) $T = 20$ °C (Autor, 2022)



Obrázek 58: Vlnitost (W_a) po frézování Padouku (*Pterocarpus soyauxii*) $T = 160$ °C (Autor, 2022)



Obrázek 59: Vlnitost (W_a) po frézování Padouku (*Pterocarpus soyauxii*) $T = 180$ °C (Autor, 2022)



Obrázek 60: Vlnitost (W_a) po frézování Padouku (*Pterocarpus soyauxii*) $T = 210$ °C (Autor, 2022)

Z výše uvedených grafů obsahujících čtyřfaktorové hodnocení vlnitosti povrchu (W_a) je u většiny druhů zkoumaného dřeva patrné zlepšení hodnot vlnitosti se zvýšením řezné rychlosti z 20 m/s na 30 m/s. Gaff *et al.* (2015) ve výzkumu u dřeva břízy dospěli k závěru, že ke zlepšení hodnoty profilu vlnitosti (W_a) dochází s rostoucí řeznou rychlostí. Dalšími autory, kteří tuto skutečnost zaznamenali, byli i Razaei *et al.* (2020) u smrku. Naše výsledky jsou v souladu s výsledky těchto autorů, na základě toho se dá konstatovat, že pro dosažení co nejméně vlnitého povrchu je nejpříznivější užití vyšší řezné rychlosti. U jednotlivých druhů dřeva můžeme sledovat nejnižší dosažené aritmetické úchyly profilu vlnitosti při použití nižších posuvných rychlostí, což potvrzují i výsledky, ke kterým došli ve svých výzkumech Gaff *et al.* (2015) a taktéž Kaplan *et al.* (2018a) u dubového dřeva, za použití laserového měření vlnitosti povrchu.

5.4 Vzájemná interakce uvedených parametrů a stanovení optimálních parametrů při rovinném frézování

Na základě dosažených výsledků jsme z průměrných hodnot vyhodnotili optimální kombinaci všech zahrnutých parametrů pro rovinné frézování jednotlivých druhů zkoumaného dřeva. Jedná se jmenovitě o parametry: teplota termické modifikace, řezná rychlost, podávací rychlost, úhel čela nástroje a energetická náročnost ve vztahu ke zkoumaným faktorům: drsnosti, vlnitosti, ale i energetické náročnosti. Vyhodnocení optimálních parametrů je nezbytné nejen pro vědu, ale zejména pro praxi, kde se snažíme dosáhnout kompromisu mezi dosaženou kvalitou povrchu a energetickou náročností procesu.

5.4.1 Optimální kombinace parametrů pro rovinné frézování smrku

V následujících tabulkách 15–17 jsou vyobrazeny jak optimální (v tabulkách označeno zkratkou MIN), tak nevyhovující (MAX) parametry pro rovinné frézování smrkového dřeva termicky modifikovaného i tepelně neupraveného (pro náš výzkum označeno teplotou 20 °C), ve vztahu k dosažené kvalitě povrchu drsnosti (R_a), vlnitosti (W_a), ale i energetické náročnosti.

Tab. 15: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu R_a u Smrku (*Picea abies* L.)

(Autor, 2022)

Drsnost (R_a)					
Smrk		řez. rychlost	pod. rychlost [m/min]	úhel [°]	Energetika [W]
Teplota					
MIN	20 °C	30	8	20	570
MIN	160 °C	30	4	25	510
MIN	180 °C	20	4	20	423
MIN	210 °C	40	4	25	1138
MAX	20 °C	20	8	20	440
MAX	160 °C	30	11	25	507
MAX	180 °C	30	11	15	765
MAX	210 °C	40	11	25	1027

Tab. 16: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu W_a u Smrku (*Picea abies L.*)

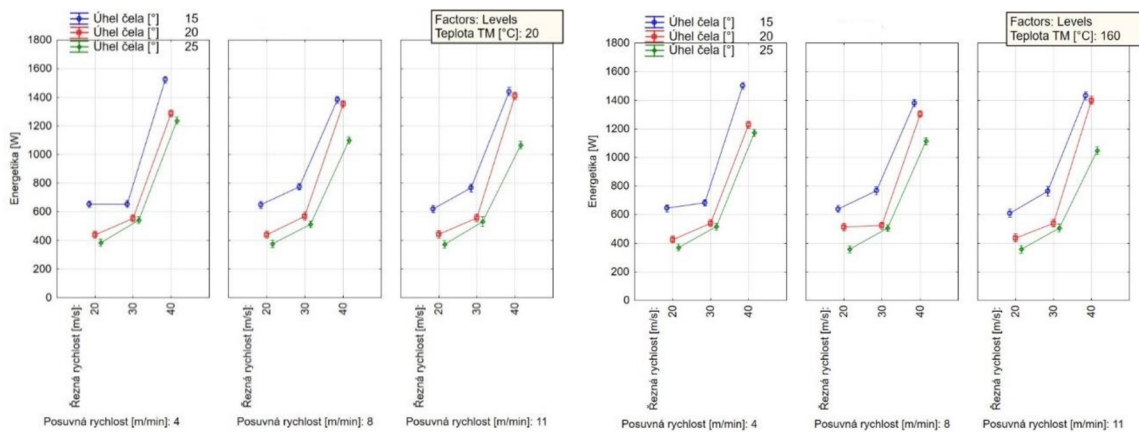
(Autor, 2022)

Vlnitost (W_a)					
Smrk		řez. rychlost	pod. rychlost [m/min]	úhel [°]	Energetika [W]
Teplota					
MIN	20 °C	40	4	25	1237
MIN	160 °C	20	4	15	635
MIN	180 °C	30	8	20	533
MIN	210 °C	20	4	20	405
MAX	20 °C	20	11	25	373
MAX	160 °C	40	11	25	1046
MAX	180 °C	20	8	20	437
MAX	210 °C	40	11	25	1027

Tab. 17: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu energetické náročnosti procesu u Smrku (*Picea abies L.*) (Autor, 2022)

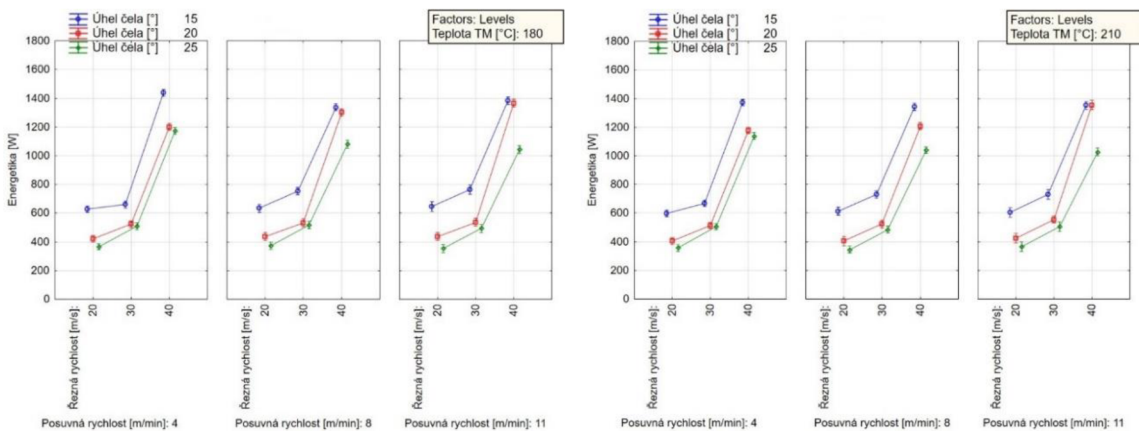
Energetická náročnost					
Smrk		Energetika [W]	řez. rychlost [m/s]	úhel [°]	pod. rychlost [m/min]
Teplota					
MIN	20 °C	373,333	20	25	11
MIN	160 °C	356,667	20	25	11
MIN	180 °C	353,333	20	25	11
MIN	210 °C	345,000	20	25	8
MAX	20 °C	1517,143	40	15	4
MAX	160 °C	1496,667	40	15	4
MAX	180 °C	1436,667	40	15	4
MAX	210 °C	1377,143	40	15	4

Data z tabulky 17 jsou graficky znázorněny v následujících obrázcích 61–64, kde můžeme pozorovat spotřebu el. energie rovinného frézování smrku při všech teplotách úpravy a námi nastavených parametrů frézování. U smrku termicky modifikovaného při teplotě 160 °C je procentuální nárůst spotřeby energie při porovnání hodnot MIN a MAX o 319,6 %. Zároveň si můžeme povšimnout, že nejmenší spotřeba elektrické energie při optimálních podmínkách je u smrku termicky modifikovaného při teplotě 210 °C.



Obrázek 61: Energetická náročnost po frézování u Smrku (*Picea abies L.*) T = 20 °C (Autor, 2022)

Obrázek 62: Energetická náročnost po frézování u Smrku (*Picea abies L.*) T = 160 °C (Autor, 2022)



Obrázek 63: Energetická náročnost po frézování u Smrku (*Picea abies L.*) T = 180 °C (Autor, 2022)

Obrázek 64: Energetická náročnost po frézování u Smrku (*Picea abies L.*) T = 210 °C (Autor, 2022)

5.4.2 Optimální kombinace parametrů pro rovinné frézování dubu

V tabulkách 18 a 19 jsou zobrazeny jak optimální (MIN), tak nevyhovující (MAX) parametry pro rovinné frézování dubového dřeva termicky modifikovaného i tepelně neupraveného (20 °C), z hlediska dosažené kvality povrchu drsnosti (Ra) a vlnitosti (Wa). Optimální a energeticky nevýhodné parametry rovinného frézování dubu jsou uvedeny v tabulce 20 z pohledu ekonomické náročnosti procesu.

Tab. 18: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu *Ra* u Dubu (*Quercus robur L.*)

(Autor, 2022)

Drsnost (<i>Ra</i>)					
Dub		rychlost [m/s]	pod. rychlost [m/min]	úhel [°]	Energetika [W]
Teplota					
MIN	20 °C	30	4	20	650
MIN	160 °C	40	4	15	1624
MIN	180 °C	40	4	15	1602
MIN	210 °C	20	4	20	450
MAX	20 °C	20	8	20	507
MAX	160 °C	20	11	20	495
MAX	180 °C	20	8	20	455
MAX	210 °C	30	11	15	815

Tab. 19: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu *Wa* u Dubu (*Quercus robur L.*)

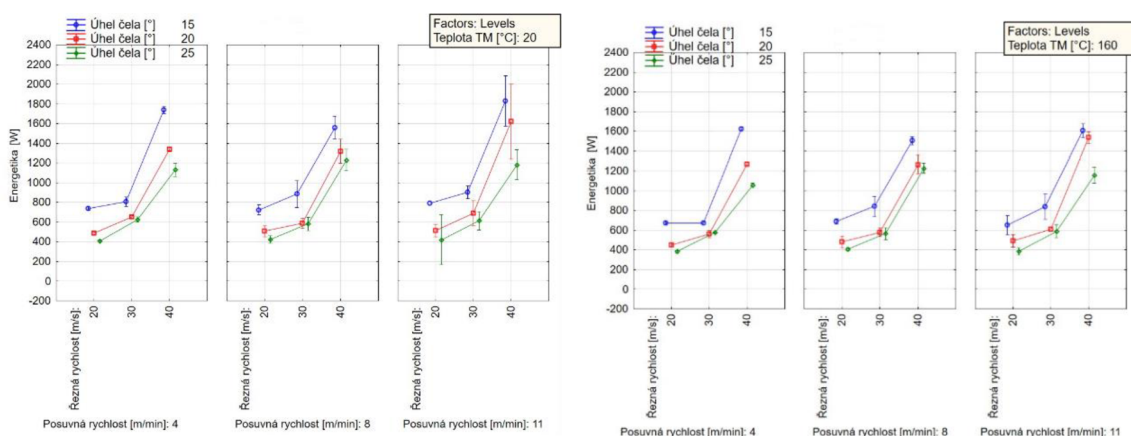
(Autor, 2022)

Vlnitost (<i>Wa</i>)					
Dub		rychlost [m/s]	pod. rychlost [m/min]	úhel [°]	Energetika [W]
Teplota					
MIN	20 °C	40	4	25	1130
MIN	160 °C	30	8	15	843
MIN	180 °C	20	4	20	430
MIN	210 °C	40	4	25	1223
MAX	20 °C	30	8	25	582,5
MAX	160 °C	20	11	20	495
MAX	180 °C	40	11	25	1110
MAX	210 °C	20	11	25	390

Tab. 20: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu energetické náročnosti procesu u Dubu (*Quercus robur L.*) (Autor, 2022)

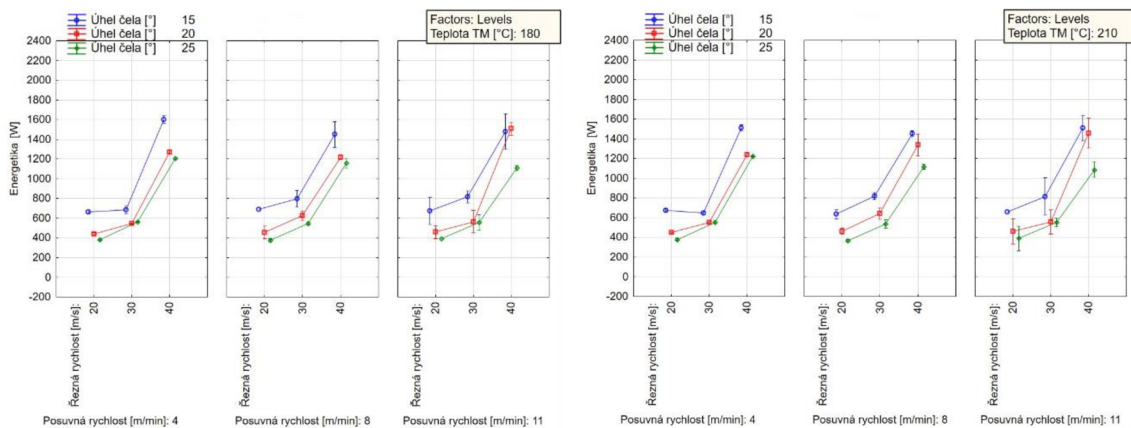
Energetická náročnost					
Dub		Energetika [W]	řez. rychlost [m/s]	úhel [°]	pod. rychlost [m/min]
Teplota					
MIN	20 °C	410,000	20	25	4
MIN	160 °C	384,286	20	25	4
MIN	180 °C	375,000	20	25	8
MIN	210 °C	366,667	20	25	8
MAX	20 °C	1830	40	15	11
MAX	160 °C	1624,286	40	15	4
MAX	180 °C	1602,857	40	15	4
MAX	210 °C	1510	40 40	15 15	4 11

Následující obrázky 65–68 zobrazují graficky znázorněná data optimálních a nevyhovujících parametrů frézování dubu z pohledu energetiky při jednotlivých teplotách úpravy viz tabulka 20. Maximální hodnoty (MAX) dubu v neupraveném stavu (20 °C) a při teplotě 180 °C vykazují oproti svým minimálním hodnotám (MIN) nárůst o 346,3 % a 327,4 %. Ze všech zkoumaných druhů dřeva vykazuje dub nejvyšší spotřebu elektrické energie 1830 W při užití stejných nevýhodných parametrech frézování (řezné rychlosti a úhlu čela nástroje) z pohledu energetiky ve stavu bez termické modifikace.



Obrázek 65: Energetická náročnost po frézování u Dubu (*Quercus robur L.*) T = 20 °C (Autor, 2022)

Obrázek 66: Energetická náročnost po frézování u Dubu (*Quercus robur L.*) T = 160 °C (Autor, 2022)



Obrázek 67: Energetická náročnost po frézování u Dubu (*Quercus robur L.*) T = 180 °C (Autor, 2022)

Obrázek 68: Energetická náročnost po frézování u Dubu (*Quercus robur L.*) T = 210 °C (Autor, 2022)

5.4.3 Optimální kombinace parametrů pro rovinné frézování teaku

Optimální (MIN) i nejnevhodnější (MAX) parametry rovinného frézování teaku z pohledu dosažené kvality povrchu drsnosti a vlnitosti (Ra , Wa) jsou uvedeny v tab. 21 a 22 a z pohledu energetické náročnosti procesu uvedeny v tab. 23, pro všechny zkoumané stupně termické modifikace včetně referenční neupravené teploty (20 °C).

Tab. 21: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu Ra u Teaku (*Tectona grandis*)

(Autor, 2022)

Drsnost (Ra)					
Teak		rychlost [m/s]	pod. rychlost [m/min]	úhel [°]	Energetika [W]
Teplota					
MIN	20 °C	40	11	15	1447
MIN	160 °C	40	4	25	1144
MIN	180 °C	30	8	20	537,5
MIN	210 °C	40	8	15	1363
MAX	20 °C	20	11	15	630
MAX	160 °C	20	11	20	413
MAX	180 °C	20	8	15	620
MAX	210 °C	20	8	20	407

Tab. 22: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu W_a u Teaku (*Tectona grandis*)

(Autor, 2022)

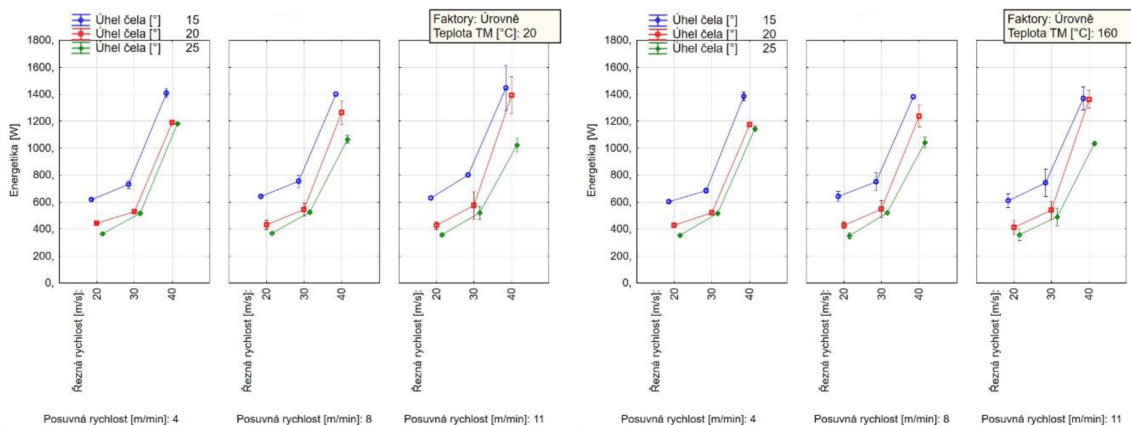
Vlnitost (W_a)					
Teak		rychlost [m/s]	pod. rychlost [m/min]	úhel [°]	Energetika [W]
Teplota					
MIN	20 °C	40	11	15	1447
MIN	160 °C	30	11	25	490
MIN	180 °C	30	8	20	537,5
MIN	210 °C	30	4	15	751
MAX	20 °C	30	4	20	528
MAX	160 °C	40	11	15	1370
MAX	180 °C	40	8	20	1250
MAX	210 °C	30	4	20	505

Tab. 23: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu energetické náročnosti procesu u

Teaku (*Tectona grandis*) (Autor, 2022)

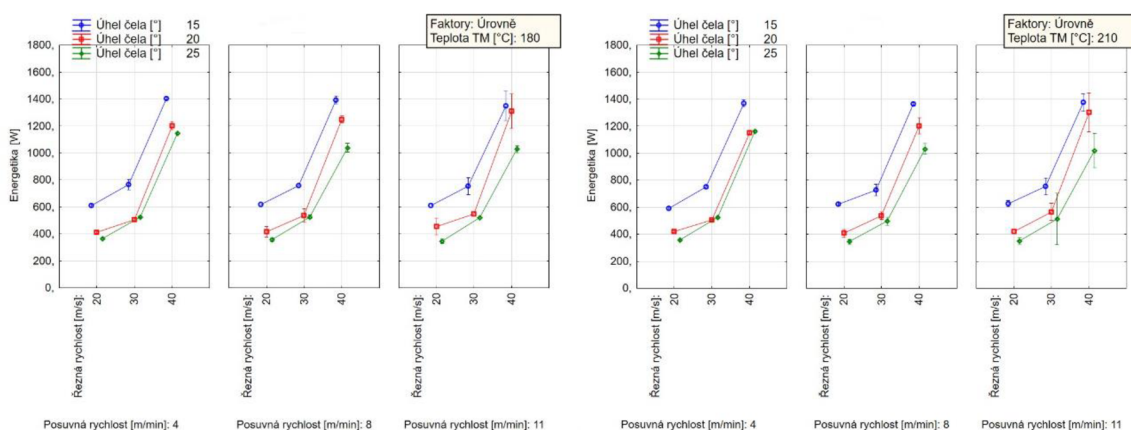
Energetická náročnost					
Teak		Energetika [W]	řez. rychlost [m/s]	úhel [°]	pod. rychlost [m/min]
Teplota					
MIN	20 °C	356,667	20	25	11
MIN	160 °C	350	20	25	8
MIN	180 °C	346,667	20	25	11
MIN	210 °C	345	20	25	8
MAX	20 °C	1446,667	40	15	11
MAX	160 °C	1384,286	40	15	4
MAX	180 °C	1403,333	40	15	4
MAX	210 °C	1375	40	15	11

Výsledné hodnoty teaku z tabulky 23 jsou zobrazeny v grafické podobě na obrázcích 69–72. Energetická náročnost procesu rovinného frézování teaku je nejnižší při teplotě 210 °C, oproti tomu maximální hodnota vykazuje téměř 4násobný nárůst spotřeby energie.



Obrázek 69: Energetická náročnost po frézování u Teaku (*Tectona grandis*) T = 20 °C (Autor, 2022)

Obrázek 70: Energetická náročnost po frézování u Teaku (*Tectona grandis*) T = 160 °C (Autor, 2022)



Obrázek 71: Energetická náročnost po frézování u Teaku (*Tectona grandis*) T = 180 °C (Autor, 2022)

Obrázek 72: Energetická náročnost po frézování u Teaku (*Tectona grandis*) T = 210 °C (Autor, 2022)

5.4.4 Optimální kombinace parametrů pro rovinné frézování padouku

Optimální kombinace parametrů rovinného frézování pro jednotlivé stupně termické modifikace dřeva padouku je zobrazena společně s nejméně vhodnými parametry v následujících tabulkách. Hodnoty označené jako (MIN) představují optimální kombinaci parametrů, kdežto hodnoty označené jako (MAX) udávají nevhodné parametry jak pro sledovanou kvalitu povrchu (Ra) a (Wa) tak pro energetickou náročnost procesu. viz tabulky 24 až 26.

Tab. 24: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu Ra u Padouku (*Pterocarpus soyauxii*) (Autor, 2022)

Drsnost (Ra)					
Padouk		rychlost [m/s]	pod. rychlost [m/min]	úhel [°]	Energetika [W]
Teplota					
MIN	20 °C	20	4	25	290
MIN	160 °C	40	11	20	585
MIN	180 °C	40	4	25	530
MIN	210 °C	20	4	15	280
MAX	20 °C	20	11	25	300
MAX	160 °C	30	11	25	335
MAX	180 °C	20	4	15	288
MAX	210 °C	20	11	15	313

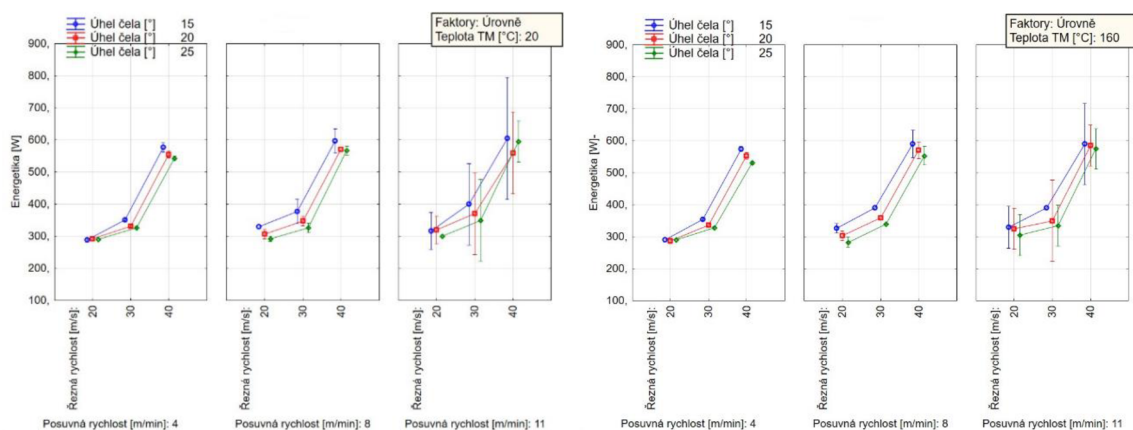
Tab. 25: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu Wa u Padouku (*Pterocarpus soyauxii*) (Autor, 2022)

Vlnitost (Wa)					
Padouk		rychlost [m/s]	pod. rychlost [m/min]	úhel [°]	Energetika [W]
Teplota					
MIN	20 °C	40	11	15	605
MIN	160 °C	30	4	25	329
MIN	180 °C	30	4	15	348
MIN	210 °C	20	4	20	290
MAX	20 °C	20	11	25	300
MAX	160 °C	30	11	25	335
MAX	180 °C	40	4	15	563
MAX	210 °C	30	8	15	360

Tab. 26: Optimální a nevyhovující kombinace parametrů z pohledu energetické náročnosti procesu u Padouku (*Pterocarpus soyauxii*) (Autor, 2022)

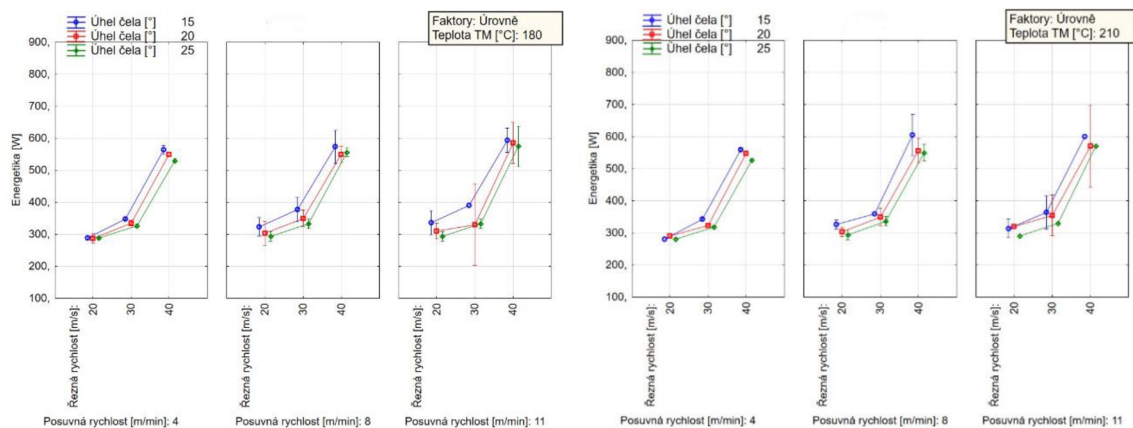
Energetická náročnost					
Padouk		Energetika [W]	řez. rychlost [m/s]	úhel [°]	pod. rychlost [m/min]
Teplota					
MIN	20 °C	288	20	15	4
MIN	160 °C	282,5	20	25	8
MIN	180 °C	286,667	20	20	4
MIN	210 °C	280	20 20	15 25	4 4
MAX	20 °C	605	40	15	11
MAX	160 °C	590	40 40	15 15	8 11
MAX	180 °C	593,333	40	15	11
MAX	210 °C	605	40	15	8

Padouk vykazuje při všech teplotách a aplikování optimálních parametrů frézování nejnižší spotřebu energie ze všech zkoumaných dřev. Pokles ve spotřebě energie mezi neupraveným padoukem a termicky upraveným při teplotě 210 °C činí 2,8 %. U padouku při teplotě 210 °C lze zvolit 2 varianty nastavení optimálních parametrů rovinného frézování z energetického hlediska. Jedná se o parametry: řezná rychlost 20/20 (m/s), podávací rychlost 4/4 (m/min) a úhel čela nástroje 15/25 (°).



Obrázek 73: Energetická náročnost po frézování u Padouku (*Pterocarpus soyauxii*) T = 20 °C (Autor, 2022)

Obrázek 74: Energetická náročnost po frézování u Padouku (*Pterocarpus soyauxii*) T = 160 °C (Autor, 2022)



Obrázek 75: Energetická náročnost po frézování u Padouku (*Pterocarpus soyauxii*) T = 180 °C (Autor, 2022)

Obrázek 76: Energetická náročnost po frézování u Padouku (*Pterocarpus soyauxii*) T = 210 °C (Autor, 2022)

Při detailním pohledu na tabulky 17, 20, 23 a 26, které nám vyobrazují hodnoty (MIN/MAX) energetické náročnosti procesu rovinného frézování všech 4 druhů zkoumaného dřeva, lze vidět, že kritické parametry (MAX) se ve všech případech a stupních tepelné úpravy shodují na úrovni řezné rychlosti odpovídající 40 (m/s). Při aplikování vyšší řezné rychlosti (vyšších otáček) v procesu frézování obecně platí, že se zvyšuje i spotřeba elektrické energie. K tomuto závěru došli ve svých výzkumech taktéž Iskra *et al.* (2005), Barčík *et al.* (2010), který se zabýval energetickou náročností procesu rovinného frézování buku a Corleto *et al.* (2020). Nejvyšší maximální hodnoty spotřeby elektrické energie byly zjištěny u dubu naopak nejnižší maximální spotřeba el. energie byla vyhodnocena u padouku. S 95 % pravděpodobností můžeme říct, že nám změna řezné rychlosti v kombinaci nižším úhlem čela nástroje statisticky významně ovlivňuje energetiku procesu rovinného frézování u všech druhů zkoumaného dřeva při všech teplotách, což lze vidět i na výše zobrazených grafech. Naopak optimální hodnoty (MIN) obsahují shodně ve všech případech řeznou rychlost 20 (m/s), zde zároveň platí, že čím je materiál poddajnější v důsledku snížené hustoty dřeva ovlivněné vyšším stupněm tepelné úpravy, tím u materiálu dochází ke snížení řezného odporu, to umožňuje použití nižší řezné rychlosti, čímž se současně snižuje energetická náročnost procesu.

Pro dosažení co nejkvalitnějšího povrchu z hlediska drsnosti (R_a) a vlnitosti (W_a) je na základě dosažených výsledků vhodné sledování parametrů řezné rychlosti, podávací rychlosti, ale i samotné termické modifikace. Zmíněná termická modifikace má za následek snižování hustoty dřeva, což samo o sobě ovlivňuje proces obrábění materiálu. Materiál se

v důsledku zvyšování teploty stává křehčím, poddajnějším, čímž se u něj snižuje i řezný odpor během obrábění, v našem případě během rovinného frézování. Z výše uvedených výsledků je patrné opakování vzájemné kombinace parametrů vyšší řezné rychlosti a nižší podávací rychlosti jak pro faktor drsnosti (Ra), tak vlnitosti (Wa) u všech druhů dřeva a téměř při všech teplotách. Laicky můžeme říct, že čím je podávací rychlost menší a na povrch materiálu působí vyšší řezná rychlost, tím je výsledný povrch hladší, bez vlnek a tedy kvalitnější.

6 Závěr

Závěry získané naším výzkumem ukazují, že sledované technicko-technologické parametry rovinného frézování mají významný vliv na kvalitu povrchu i energetickou náročnost procesu a jsou v souladu se závěry jiných autorů.

V následujících bodech jsou shrnuty závěry výzkumu:

- Chemické složení:
 - a) čím je vyšší teplota tepelné úpravy, tím je vyšší podíl v zastoupení ligninu a hemicelulóz u všech zkoumaných dřev, zastoupení extraktivních látek je téměř konstantní, naopak obsah celulózy se snižuje.
 - b) působení vyššího stupně termické modifikace má vliv na změny v chemickém složení dřeva. Při vyšším stupni termické modifikace se snižoval řezný příkon, což můžeme z hlediska chemického složení přisoudit snížení obsahu celulózy zaznamenaného u všech druhů dřeva, při působení všech teplot.

- Kvalita povrchu:
 - a) aplikování vyšší řezné rychlosti mělo významný vliv na drsnost výsledného povrchu téměř u všech druhů dřeva. Stupeň termické modifikace spolu s kombinací frézovacích parametrů měl za následek lepší drsnost povrchu *Ra*.
 - b) kombinace nižších podávacích rychlostí s vyššími řeznými rychlostmi zlepšují vlnitost povrchu. Zmíněná řezná rychlost měla za následek zlepšení povrchu jak u drsnosti, tak vlnitosti.

- Stanovení parametrů obrábění:

Na základě dosažených výsledků lze zhodnotit, že optimální kombinací k nastavení frézovacích parametrů pro rovinné frézování z hlediska kvality povrchu dřeva Smrku (*Picea abies L.*), Dubu (*Quercus robur L.*), Teaku (*Tectona grandis*) a Padouku (*Pterocarpus soyauxii*) by bylo použití kombinace vyšších řezných rychlostí (30, 40 m/s) a nižších podávacích rychlostí (4, 8 m/min). Z hlediska ekonomického, abychom spotřebovali co nejméně elektrického proudu by se jednalo hlavně o využití nižší řezné rychlosti (20 m/s) z důvodu nižších otáček stroje a tím úspory energie.

6.1 Přínos pro vědu

Samotná termická modifikace je ve světě poměrně probádanou oblastí. Proto jsme se v našem výzkumu zaměřili kromě termické modifikace i na proces samotného zpracování takto upraveného dřeva. Pro výzkum jsme použili dřeva smrku a dubu z domácí produkce a pro porovnání jsme jako zástupce exotických dřev zvolili dřevo teaku a padouku. Termická modifikace a proces frézování není u exotických dřev dostatečně vědecky probádaný, proto náš výzkum přináší další poznatky zejména v oblasti:

1) Možnosti termické modifikace exotických dřevin

Ověřili jsme možnost termické modifikace pro dřeva teaku a padouku při teplotách 160 °C, 180 °C a 210 °C metodou ThermoWood. Získali jsme poznatky o změně chemické struktury jednotlivých dřev a jejího vlivu na hustotu.

2) Možnosti frézování exotických dřevin

Prozkoumali jsme schopnost obrábění neupraveného a termicky modifikovaného exotického dřeva z pohledu kvality profilu drsnosti a vlnitosti.

3) Hodnocení vlivu jednotlivých parametrů frézování a jejich vzájemných interakcí na sledované charakteristiky

Součástí našeho výzkumu bylo zjistit jak řezná a podávací rychlost, úhel čela a stupeň termické modifikace ovlivňují proces rovinného frézování z pohledu:

- a) Energetické náročnosti procesu
- b) Kvality povrchu z pohledu střední aritmetické odchylky profilu drsnosti (R_a)
- c) Kvality povrchu z pohledu střední aritmetické odchylky profilu vlnitosti (W_a)

Z našeho výzkumu přinášíme poznatky z procesu zpracování neupraveného a termicky modifikovaného exotického dřeva. Naše práce nabízí způsoby hodnocení a možnosti nalezení optimálních parametrů při rovinném frézování z pohledu kvality povrchu a energetiky, výsledky výzkumu mohou pomoci v dalším bádání.

6.2 Přínos pro praxi

Podobnou problematikou se zabývalo již mnoho odborníků, přesto je důležité přinášet stále novější poznatky, které by bylo možné aplikovat v praxi, kde probíhá výroba v podstatně větším měřítku. Z toho důvodu je potřeba vylepšovat a zkoumat nástroje používané pro proces obrábění, porovnávat je s materiály již používanými tak, aby bylo dosahováno co nejlepších výsledků. Pro praxi díky naší práci přinášíme poznatky pro termicky modifikovaná exotická dřeva a jejich možnosti masovějšího využití, dále zhodnocení výsledků, které umožní získat velmi kvalitně opracovaný materiál při co nejnižší energetické náročnosti.

Výsledky pro praxi využitelné jsou:

- 1) Možnost termické modifikace dřeva z domácích zdrojů, ale i exotických dřev jako jsou teak a padouk při všech stupních termické modifikace.
- 2) Při jakém nastavení optimálních frézovacích parametrů a zachování nízké spotřeby elektrické energie dosáhneme nejlepší hodnoty drsnosti (Ra). Nejlepší variantou je, aby materiál byl vystaven co nejmenšímu množství výrobních postupů, a výsledný produkt měl po procesu rovinného frézování dostatečně kvalitní povrch, aby nemuselo docházet k dalšímu opracování, např. broušení.
- 3) Při jakém nastavení optimálních frézovacích parametrů včetně zachování úspory energie dosáhneme nejlepší hodnoty vlnitosti (Wa). Vlnitost stejně jako drsnost má vliv na finální produkt.

Podstatný význam pro praxi představuje výsledek vzájemných interakcí všech sledovaných hodnot jak z pohledu energetické náročnosti, tak vzájemné hodnoty drsnosti a vlnitosti v procesu rovinného frézování. Pro proces frézování je rozhodující vzájemné působení všech faktorů. Z tohoto důvodu jsou v této práci vyhodnoceny technicko-technologická nastavení parametrů od optimálních po nevhodné. Každý z faktorů ovlivňuje konečnou kvalitu materiálu, výkonnost výroby a v neposlední řadě i ekonomické hledisko výroby.

Seznam použitých zdrojů

Literární zdroje

BAJIĆ, D.; LELA, B.; ŽIVKOVIĆ, D. Modeling of machined surface roughness and optimization of cutting parameters in face milling. *Metalurgija*. 2008. ISSN 0543-5846.

BARCÍK, Š. 2009. *Technika pre výrobu nábytku*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. 263 s. ISBN 978-80-228-2055-4.

BARCÍK, Š.; KMINIAK, R.; ŘEHÁK, T.; KVIETKOVÁ, M. The influence of selected factors on energy requirements for plain milling of beech wood. *Journal of Forest Science*. 2010 ISSN 1212-4834.

BARCÍK, Š.; KVIETKOVÁ, M.; BOMBA, J.; SIKLIENKA, M. *Dřevoobráběcí nástroje – údržba a provozování*. Praha: Powerprint, 2013. 355 s. ISBN 978-80-87415-80-1.

BARCÍK, Š.; GAŠPARÍK, M.; HOUSKA, A.; RAZUMOV, E. Y.; SEDLECKY, M. Vliv technologických faktorů na kvalitu opracování povrchu při frézování termicky modifikovaného borovicového dřeva. *Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva*. 2014b, roč. 9, č. 1, 11-22 s. ISBN 978-80-228-2658-7.

BENDIKIENE, R.; KETURAKIS, G. The effect of tool wear and planning parameters on birch wood surface roughness. *Wood Research*. 2016. ISSN 1336-4561.

BLAŽEJ, A.; ŠUTÝ, L.; KOŠÍK, M.; KRKOŠKA, P.; GOLIS, E. *Chémia dreva*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1975. 224 s.

BONDAR, S. A. *A convoluted convection chambre of periodic actions for drying wood in the environment of combustion products of liquefied or natural gas*. 2015. 45-56 s.

BOURGEOIS, J.; GUYONNET, R. Characterisation and analysis of torrefied wood. *Wood Science and Technology*. 1988

CARDOSO, S.; SOUSA, V. B.; QUILHÓ, T. *et al.* Anatomical variation of teakwood from unmanaged mature plantations in East Timor. *Journal of Wood and Science*. 2015. 326-333.

CORLETO, R.; *et al.* Effect of thermal modification on properties and milling behaviour of African padauk (*Pterocarpus soyauxii* Taub.) wood. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020

ČEKOVSÁ, H. *et al.* *Tectona grandis* Linn. and its Fire Characteristics Affected by the Thermal Modification of Wood. *BioResources*. 2017a.

ČEKOVSÁ, H.; *et al.* Fire Resistance of Thermally Modified Spruce Wood. *BioResources*. 2017b.

ČUNDERLÍK, I. *Štruktúra dreva*. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. 82-88 s. ISBN 978-80-228-2061-5.

DARMAWAN, W.; GOTTLÖBER, C.; OERTEL, M.; WAGENFÜHR, A.; FISCHER, R. Performance of helical edge milling cutters in planing wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2011. 565-572 s. ISSN 0018-3768.

ESTEVEZ, B.; PEREIRA, H. Wood modification by heat treatment. A review. *BioResources*. 2009

GAFF, M.; KVIETKOVÁ, M.; GAŠPARÍK, M.; KAPLAN, L.; BARCÍK, Š. Effect of selected parameters on the surface waviness in plane milling of thermally modified birch wood. *BioResources*. 2015, roč. 10, č. 4, s. 7618-7626. ISSN 1930-2126.

GAFF, M.; GÁBORÍK, J. *Vlastnosti povrchu dreva modifikovaného reliéfováním*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 2009. 81 s. ISBN 978-80-228-2035-6.

GANDELOVÁ, L.; HORÁČEK, P.; ŠLEZINGEROVÁ, J. *Nauka o dřevě*. 3. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009. 175 s. ISBN 978-80-7375-312-2.

GANDELOVÁ, L.; ŠLEZINGEROVÁ, J. *Nauka o dřevě*. 2. vyd. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2014. 91-107 s. ISBN 978-80-7375-966-7.

GSÖLS, I.; RÄTZSCH, M.; LADNER, C. *Interactions between wood and melamine resins – effect on dimensional stability properties and fungal attack*. In: *Proceedings of the first European Conference on Wood Modification, Ghent, Belgium*. 2003. 221-225 s.

HAVELKOVÁ, M.; HIKLOVÁ H. *Mapování povrchu pevných těles se zaměřením na kontaktní profilometrii*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci. 2014. 48 s. ISBN 978-80-244-4043-9.

HILL, C. A. S. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. 1. vyd. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, UK. 2006. 239-260 s. ISBN 978-0-470-02172-9.

HOLUBÁŘ, P.; JÍLEK, M.; ŠÍMA, M.; MAIXNER, V. *Aplikace Triplecoating na VBD*. *The International Conference NEWTECH 2011 on Advanced Manufacturing Engineering*. 2011a. ISBN 978-80-214-4267-2.

HOLUBÁŘ, P.; ŠÍMA, M.; MAIXNER, V. *Aplikace nových modifikací třívrstevných PVD povlaků*. *MM Průmyslové spektrum*. 2011b. ISSN 1212-2572.

HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. 2. přepracované vydání. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2.

CHANRION, P.; SCHREIBER J. *Bois traité par haute température*. Éditions CTBA. 2003. 115 s. ISBN 2-85684-053-1.

CHARLES, R.; FRIHART. *Wood Adhesion and Adhesives*. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. CRC Press, New York. 2005. 215-278 s.

CHOW, S.; MUKAI, H. N. *Effect of thermal degradation of cellulose on wood – polymer bonding*. *Wood Science*, 1972. 4. 4:202-208.

ISKRA, P.; TANAKA, C.; OHTANI, T. Energy balance of the orthogonal cutting process. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2005 ISSN 0018-3768.

JIROUT F. *Dřevo v přírodě a řemeslech, v živnosti a průmyslu vůbec*. Praha: Obchodní tiskárna Merkur. 1928.

JOSTEN, E. *Dřevo a jeho obrábění*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a.s. 2010. 336 s. ISBN 978-80-247-2961-9.

KAČÍK, F.; LUPTÁKOVÁ, J.; ŠMÍRA, P.; NASSWETTROVÁ, A.; KAČÍKOVÁ, D.; VACEK, V. Chemical alterations of pine wood lignin during heat sterilization. *BioResources*. 2016 3442-3452.

KAČÍKOVÁ, D.; KAČÍK, F. *Chemické a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave*. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011. 71 s. ISBN 978-80-228-2249-7.

KAPLAN, L.; *et al.* Evaluation of the effect of individual parameters of oak wood machining and their impact on the values of waviness measured by a laser profilometer. *Wood research*. 2018a

KLIKA, J.; ČERNOHORSKÝ, Z. *Jehličnaté*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd. 1953. 310 s.

KMINIAK, R.; GAFF, M. Roughness of surface created by transversal sawing of spruce, beech and oak wood. *BioResources*. 2015, roč. 10, č. 2, ISSN 1930-2126.

KRJAŽEV, N. A. *Cilindričeskoe i koničeskoe frezerovanije drevesiny*. Moskva: Goslesbumizdat. 1963. 200 s.

KUBOVSKÝ, I.; KAČÍKOVÁ, D.; KAČÍK, F. Structural Changes of Oak Wood Main Components Caused by Thermal Modification. *Polymers*. 2020

KUBŠ, J.; *et al.* Influence of thermal treatment on power consumption during plain milling of lodgepole pine (*Pinus contorta* subsp. *murrayana*). *BioResources*. 2017.

KUKACHKA, B. F. *PROPERTIES OF IMPORTED TROPICAL WOODS*. Forest Products Laboratory. 1969.

KVIETKOVÁ, M. *Obrábění dřeva*. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. 2015. 295 s. ISBN 978-80-213-2604-0.

KVIETKOVÁ, M. *et al.* Surface Quality of Milled Birch Wood after Thermal Treatment at Various Temperatures. *BioResources*. 2015b ISSN 1930-2126.

KVIETKOVÁ, M.; *et al.* Effect of thermal treatment on surface quality of beech wood after plane milling. *BioResources*. 2015c ISSN 1930-2126.

LAINA, R.; *et al.* Effect of the anatomical structure, wood properties and machining conditions on surface roughness of wood. *Maderas. Ciencia y tecnologia*. 2017. ISSN 0717-3644.

LIPTÁK, O.; BÉKÉS, J.; HERBANSKÝ, L.; HRUBEC, J.; KISSOCZY, Š.; VALČUHA, Š.; ZONGOR, J. *Technológia výroby – obrábanie*. 1. vyd. Praha: SNTL – nakladatelství technické literatury. 1979. 445 s. ISBN 63-565-79.

LISIČAN, J. *Teória a technika spracovania dreva*. 2. vyd. Zvolen: MATCENTRUM. 1996. 626 s. ISBN 80-967315-6-4.

MAYES, D.; OKSANEN, O. *Thermowood® Handbook*. Finland: Finnish Thermowood Association, c/o Wood Focus Oy. Helsinki. 2003. 66 s. Dostupné z: <https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw_handbook_080813.pdf> (8. 2. 2019).

MILITZ, H.; TJEERDSMA, B. *Heat treatment of wood by the PLATO – process*. In RAPP, A. O. (ed). *Review on heat treatment of wood*. Hamburg: BFH, 2001, 25-36 s. ISBN 3-926301-02-3.

MUSIL, I.; HAMERNÍK, J. *Jehličnaté dřeviny*. Praha: Academia. 2007. 352 s. ISBN 978-80-200-1567-9.

NAVI, P.; SANDBERG, D. *Thermo-Hydro-Mechanical processing of wood*. 1. vyd. Lausanne: EPFL Press, 2012. 357 s. ISBN 978-2-940222-41-1.

NUOPPONEN, M.; *et al.* Thermal Modifications in Softwood Studied by FT-IR and UV Resonance Raman Spectroscopies. *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 2005

OSTMAN, B. A. L. Surface roughness of wood-based panels after aging. *Forest Product Journal*. 1983. ISSN 0015-7473.

PALAEZ-SAMANIEGO, M. R.; *et al.* A review of wood thermal pretreatments to improve wood composite properties. *Wood Science and Technology*. 2013.

PÉTRISSANS, M.; HAKKOU, M.; GÉRARDIN, P.; ZOULALIAN, A. *Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis*. *Polymer Degradation and Stability*. 2005. no 89. 1-5 s.

PROKEŠ, S. *Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva*. Praha: SNTL, 1982. 584 s. ISBN 04-833-82.

RAPP, A. O.; SAILER, M. *Oil heat treatment of wood in Germany: State of the art*. In RAPP, A. O. (ed). *Review on heat treatment of wood*. Hamburg: BFH, 2001. 45-62 s. ISBN 3-926301-02-3.

RAZAEI, F.; *et al.* Surface quality measurement by contact and laser methods on thermally modified spruce wood after plain milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020.

REINPRECHT, L. *Ochrana dřeva*. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 2008. 453 s. ISBN 978-80-228-1863-6.

REINPRECHT, L.; VIDHOLDOVÁ, Z. *Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie*. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 2008. 89 s. ISBN 978-80-228-1920-6.

ROHWER, G. J. *Tropické rostliny*. 1. vyd. Praha: Euromedia Group – Knižní klub v Praze. 2002. 288 s. ISBN 80-242-0774-5.

ROUSEK, M.; KOPECKÝ, Z.; CHLEBOVSKÝ, R. *Dodržení kvality obrábění dřeva frézováním ve vazbě na povrchové úpravy. Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva*. 2010. 141-150 s. ISBN 978-80-228-2143-8.

ROUSEK, M.; KOPECKÝ, Z.; NOVÁK, V.; KOWALSKI, M. *Hodnocení kvality povrchu dřeva po frézování. Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva*. 2012a. ISBN 978-80-228-2385-2.

SIKLIENKA, M.; KMINIAK, R. *Delenie a obrábanie dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 2013a. 207 s. ISBN 978-80-228-2618-1.

SIKLIENKA, M.; ŠUSTEK, J. *Energetická náročnosť a kvalitatívne ukazovatele v procesoch pilenia bukového dreva*. Technická univerzita vo Zvolene. 2013b. 99 s. ISBN 978-80-228-2609-9.

SITKEI, G.; MAGOSS, E. *Optimum surface roughness of solid woods affected by internal structure and woodworking operations. Proceedings of the 16th International Wood Machining Seminar, Matsuem Japan*. 2003.

SYRJÄNEN, T.; OY, K. *Heat treatment of wood in Finland – state of the art. Thermallytreatedwood*. [online] 2001. [cit. 11.2.2019]. Dostupné z: <<http://www.thermallytreatedwood.com/Worldwide/Finland.pdf>>.

ŠKALJIĆ, N.; *et al.* *Effect of feed speed and wood species on roughness of machined surface. Drvna industrija*. 2009.

ŠLEZINGEROVÁ, J.; GANDELOVÁ, L. *Stavba dřeva (cvičení)*. dotisk, Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2012, 129 s. ISBN 978-80-7375-168-5.

TAYLOR, J. B.; CARRANO, A. L.; LEMASTER, R. L. Quantification of process parameters in a wood sanding operation. *Forest Product Journal*. 1999, ISSN 0015-7473.

THOMA, H.; PERI, L.; LATO, E. Evaluation of wood surface roughness depending on species characteristics. *Maderas. Ciencia y Tecnologia*. 2015. ISSN 0717-3644.

TIRYAKI, S.; HAMZAÇEBİ, C.; MALKOÇOĞLU, A. *Evaluation of process parameters for lower surface roughness in wood machining by using Taguchi design methodology*. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2015. 537-545 s. ISSN 0018-3768

TSOUMIS, G. *Science and technology of wood – structure, properties, utilization*. Greece: Aristotelian University Thessaloniki. [online] 1991. [cit. 19.2.2019]. Dostupné z: < <https://www.trae.dk/wp-content/uploads/2001/10/science-and-technology-of-wood.pdf> > ISBN 978-3-941300-22-4.

ULRICH, R. B. *Roman Woodworking*. Yale University. 2008. ISBN 978-0-300-1034-0.

ÚŘADNÍČEK, L.; CHMELAŘ, J. *Dendrologie lesnická*. Vyd. 1. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1995. ISBN 80-715-7169-5.

ÚŘADNÍČEK, L.; *et al.* 2009 *Dřeviny české republiky*. 2009. Copyright 367 s. ISBN 978-80-87154-62-5.

VERNOIS, M. *Heat treatment of wood in France – state of the art*. In: *Proceedings of Special Seminar „Review on heat treatment of wood“*. France. [online] 2001. [cit. 8.2.2012]. Dostupné z: < <http://www.westwoodcorporation.com/Library/Technology/France.pdf> >.

VÝBOHOVÁ, E.; KUČEROVÁ, V.; ANDOR, T.; BALÁŽOVÁ, Ž.; VELKOVÁ, V. The effect of heat treatment on the chemical composition of ash wood. *BioResources*. 2018.

WAGENFÜHR, R.; WAGENFÜHR, A. *Holzatlas*. 7 vyd. München: 2021, 928 s. ISBN 978-3-446-46838-2.

WALKER, A. *Dřevo: velká encyklopedie: 150 druhů dřeva: podrobný průvodce „strom za stromem“: svět nejvšestrannějšího přírodního zdroje*. 1. vyd. Praha: Grada. 2009. 192 s. ISBN 978-80-247-2858-2.

WHITEHOUSE, D. *Surfaces and their Measurement*. 1. vyd. London: Kogan Page Science. 2004. 395 s. ISBN 1-9039-9660-0.

WRIGHT, P. J. a WALLIS, A. F. A. 1998. Rapid determination of cellulose in plantation eucalypt woods to predict kraft pulp yields. *Tappi Journal*, 81(2), 26-30. ISSN 0734-1415.

YASUDA, R.; MINATO, K. *Chemical modification of wood by non-formaldehyde cross-linking reagents*. *Wood Science and technology*. Japan. 1994. 101-110 s. ISSN 0043-7719.

YILDIZ, S.; GEZER, D. E.; YILDIZ, U. C. *Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat*. *Building and environment*. Turkey. 2006.

Internetové zdroje

BARCÍK, Š.; GAŠPARÍK, M.; HOUSKA, A.; RAZUMOV, Y. E.; SEDLECKÝ, M.: *Vliv technologických faktorů na kvalitu opracování povrchu při frézování termicky modifikovaného dřeva* [online] 2014. [cit. 11.2.2022] Dostupné z: < https://www.researchgate.net/publication/266911289_Vliv_tecnologickykh_faktoru_na_kvalitu_opracovani_povrchu_pri_frezovani_termicky_modifikovaneho_dreva >.

KVIETKOVÁ, S. M.; GAFF, M.; GAŠPARÍK, M.: *Effect of thermal treatment on surface quality of beech wood after plane milling* [online] 2015. [cit. 22.3.2019] Dostupné z: < https://www.researchgate.net/publication/277248463_Effect_of_thermal_treatment_on_surface_quality_of_beech_wood_after_plane_milling?fbclid=IwAR1GgrLESqbavZVfUB3ImpXvsTjmWr2nMogNKC4r3v36w0KUAV0grfnco_E >.

Modifikované dřevo [online] 2022. [cit. 18.2.2022]. Dostupné z: < <http://www.n-i-s.cz/cz/modifikovane-drevo/page/217/> >.

Sandberg, D.; *et al.*: *Wood modification technologies – a review* [online] 2022. [cit. 18.2.2022]. Dostupné z: < <https://iforest.sisef.org/contents/?id=ifor2380-010> >.

Tectona grandis Lf [online] 2022. [cit. 21.2.2022]. Dostupné z: < <https://www.prota4u.org/database/protav8.asp?g=pe&p=Tectona+grandis+L.f.> >

Tectona grandis Lf [online] 2022. [cit. 21.2.2022]. Dostupné z: < https://ldf.mendelu.cz/unod/multimedia/tropicka_dreva/karta.htm?drevina=tectona >

PlatoWood [online] 2022. [cit. 21.2.2022]. Dostupné z: < <https://www.platowood.com/> >

ThermoWood [online] 2022. [cit. 22.2.2022]. Dostupné z: < <https://www.thermowood.fi/1> >

Tepelně upravené dřevo – termowood [online] 2022. [cit. 22.2.2022]. Dostupné z: < <http://www.prokom.cz/tepelne-upravene-drevo-termowood/129-thermowood-tepelne-upravene-drevo-vyhody-materialu> >.

Straka, J.: *Obrábění dřeva – prezentace* [online] 2022. [cit. 26.2.2022]. Dostupné z: <https://www.zsmitusova16.cz/download_file.php?file=1425553808 >.

Pterocarpus soyauxii Taub. [online] 2022. [cit. 26.2.2022]. Dostupné z: <<https://www.prota4u.org/database/protav8.asp?g=pe&p=Pterocarpus+soyauxii+Taub.> >.

Royal Wood [online] 2022. [cit. 27.2.2022]. Dostupné z: <<https://www.graswoodwide.com/>>.

ELUC: Kontrola drsnosti povrchu [online] 2019. [cit. 22.3.2019] Dostupné z: <<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1102> >.

Zákony, normy a vyhlášky

ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 24 s.

ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 16 s.

ČSN EN ISO 322. *Dosky z dřeva: Zisťovanie vlhkosti*. Praha: Český normalizační institut, 1994. 7 s.

ČSN EN ISO 323. *Dosky z dřeva: Zisťovanie hustoty*. Praha: Český normalizační institut, 1994. 7 s.

Tappi Test Methods. 2015. *Tappi T 210 cm-13. Sampling and Testing Wood Pulp Shipments for Moisture*. Georgia: Tappi Press Atlanta. ISBN 1-930657-33-1.

Tappi Test Methods. 2007. *Tappi T 211 om-02. Ash-in-wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525 °C*. Georgia: Tappi Press Atlanta. 7 s. ISBN 1-930657-33-1.

Tappi Test Methods. 2015. *Tappi T 13 wd-74. Lignin in Wood*. Georgia: Tappi Press Atlanta. ISBN 1-930657-33-1.

Tappi Test Methods. 2015. *Tappi T 6 wd-73. Alcohol-Benzene Solubility of Wood*. Georgia: Tappi Press Atlanta, ISBN 1-930657-33-1.

Tappi Test Methods. 2012. *Tappi T 257 cm-02. Sampling and preparing wood for analysis*. Georgia: Tappi Press Atlanta, 21 s. ISBN 1-930657-33-1.

Přílohy

Dřevo	Řezná rychlost [m/s]	Úhel [°]	Podávací rychlost [m/min]	Teplota [°C]	Wa průměr [μm]	Ra průměr [μm]	Energetika průměr [W]
SM	20	15	4	20	3,1	3,6	641,4
SM	20	15	4	160	3,1	4,8	635,7
SM	20	15	4	180	3,4	3,2	620,0
SM	20	15	4	210	2,9	3,5	600,0
SM	20	15	8	20	4,3	4,5	647,5
SM	20	15	8	160	5,1	4,3	640,0
SM	20	15	8	180	3,8	4,3	633,3
SM	20	15	8	210	5,1	4,8	613,3
SM	20	15	11	20	6,5	4,6	620,0
SM	20	15	11	160	6,0	5,7	610,0
SM	20	15	11	180	5,3	5,5	645,0
SM	20	15	11	210	3,6	3,2	605,0
SM	20	20	4	20	3,7	3,7	444,3
SM	20	20	4	160	4,6	5,2	424,3
SM	20	20	4	180	4,1	3,2	423,3
SM	20	20	4	210	2,7	3,3	405,0
SM	20	20	8	20	7,3	7,0	440,0
SM	20	20	8	160	4,4	4,8	513,3
SM	20	20	8	180	9,8	6,3	436,7
SM	20	20	8	210	4,2	5,2	405,0
SM	20	20	11	20	6,6	5,4	443,3
SM	20	20	11	160	5,5	4,3	436,7
SM	20	20	11	180	6,4	6,1	436,7
SM	20	20	11	210	9,2	8,2	425,0
SM	20	25	4	20	3,1	3,3	385,0
SM	20	25	4	160	6,3	5,3	366,7
SM	20	25	4	180	4,4	5,4	365,0
SM	20	25	4	210	5,5	4,6	356,0
SM	20	25	8	20	7,6	4,5	376,7
SM	20	25	8	160	5,3	5,0	357,5
SM	20	25	8	180	8,7	5,7	373,3
SM	20	25	8	210	5,7	5,2	345,0
SM	20	25	11	20	8,3	6,0	373,3
SM	20	25	11	160	5,2	4,6	356,7
SM	20	25	11	180	5,8	5,2	353,3
SM	20	25	11	210	5,3	4,9	365,0
SM	30	15	4	20	7,3	5,9	651,4

SM	30	15	4	160	6,3	5,1	668,3
SM	30	15	4	180	4,7	4,8	654,3
SM	30	15	4	210	4,6	4,9	674,3
SM	30	15	8	20	6,3	5,5	775,0
SM	30	15	8	160	4,3	4,6	766,7
SM	30	15	8	180	5,1	4,5	753,3
SM	30	15	8	210	7,2	4,6	730,0
SM	30	15	11	20	6,9	5,6	766,7
SM	30	15	11	160	9,7	4,4	765,0
SM	30	15	11	180	6,5	6,7	765,0
SM	30	15	11	210	4,8	5,2	730,0
SM	30	20	4	20	5,4	3,5	558,6
SM	30	20	4	160	4,5	3,4	535,7
SM	30	20	4	180	3,7	3,4	523,3
SM	30	20	4	210	3,1	3,2	514,3
SM	30	20	8	20	4,0	2,6	570,0
SM	30	20	8	160	5,9	4,4	522,5
SM	30	20	8	180	3,1	4,0	533,3
SM	30	20	8	210	3,4	4,7	523,3
SM	30	20	11	20	4,2	4,7	556,7
SM	30	20	11	160	4,5	4,4	540,0
SM	30	20	11	180	3,5	4,6	536,7
SM	30	20	11	210	3,9	4,3	555,0
SM	30	25	4	20	5,5	4,2	534,3
SM	30	25	4	160	4,5	2,8	510,0
SM	30	25	4	180	3,5	4,2	505,0
SM	30	25	4	210	16,0	4,7	501,7
SM	30	25	8	20	4,3	3,2	512,5
SM	30	25	8	160	5,3	4,7	505,0
SM	30	25	8	180	5,6	6,0	516,7
SM	30	25	8	210	3,7	4,1	485,0
SM	30	25	11	20	5,6	4,8	530,0
SM	30	25	11	160	6,2	6,1	506,7
SM	30	25	11	180	5,8	5,4	493,3
SM	30	25	11	210	12,7	7,0	505,0
SM	40	15	4	20	5,7	3,8	1517,1
SM	40	15	4	160	4,0	4,1	1496,7
SM	40	15	4	180	6,0	4,2	1436,7
SM	40	15	4	210	3,3	4,1	1377,1
SM	40	15	8	20	4,3	4,6	1382,5
SM	40	15	8	160	6,0	4,2	1380,0
SM	40	15	8	180	7,7	5,1	1337,5
SM	40	15	8	210	5,1	5,0	1343,3

SM	40	15	11	20	4,8	5,7	1440,0
SM	40	15	11	160	4,7	4,1	1430,0
SM	40	15	11	180	5,0	3,9	1383,3
SM	40	15	11	210	3,6	4,1	1353,3
SM	40	20	4	20	4,2	4,0	1288,3
SM	40	20	4	160	3,7	4,7	1226,7
SM	40	20	4	180	3,2	4,4	1208,3
SM	40	20	4	210	4,7	4,6	1171,7
SM	40	20	8	20	4,8	3,8	1352,5
SM	40	20	8	160	4,3	4,5	1302,5
SM	40	20	8	180	4,1	4,5	1303,3
SM	40	20	8	210	4,1	4,5	1207,5
SM	40	20	11	20	5,4	5,4	1410,0
SM	40	20	11	160	4,1	3,5	1400,0
SM	40	20	11	180	5,2	4,2	1366,7
SM	40	20	11	210	3,6	3,8	1355,0
SM	40	25	4	20	2,9	3,2	1236,7
SM	40	25	4	160	3,3	3,2	1182,9
SM	40	25	4	180	3,2	3,4	1171,7
SM	40	25	4	210	3,3	2,8	1138,3
SM	40	25	8	20	6,5	3,9	1100,0
SM	40	25	8	160	5,0	4,3	1112,5
SM	40	25	8	180	7,3	5,6	1080,0
SM	40	25	8	210	3,7	4,1	1040,0
SM	40	25	11	20	4,6	3,9	1066,7
SM	40	25	11	160	10,7	3,8	1046,7
SM	40	25	11	180	6,0	4,2	1043,3
SM	40	25	11	210	21,3	9,3	1026,7
DB	20	15	4	20	4,4	3,6	731,4
DB	20	15	4	160	10,0	4,3	672,0
DB	20	15	4	180	4,6	2,3	662,9
DB	20	15	4	210	9,0	4,7	672,0
DB	20	15	8	20	5,7	4,0	723,3
DB	20	15	8	160	7,7	3,7	690,0
DB	20	15	8	180	7,1	4,2	690,0
DB	20	15	8	210	10,2	5,5	635,0
DB	20	15	11	20	12,0	5,6	790,0
DB	20	15	11	160	5,7	4,8	652,5
DB	20	15	11	180	6,0	3,5	673,3
DB	20	15	11	210	7,4	6,0	660,0
DB	20	20	4	20	3,6	2,7	488,0
DB	20	20	4	160	3,7	2,3	452,9
DB	20	20	4	180	2,7	2,2	442,9

DB	20	20	4	210	3,5	2,2	450,0
DB	20	20	8	20	7,6	5,6	506,7
DB	20	20	8	160	6,1	3,4	483,3
DB	20	20	8	180	7,4	6,0	455,0
DB	20	20	8	210	5,4	3,7	463,3
DB	20	20	11	20	10,5	5,5	515,0
DB	20	20	11	160	14,0	8,0	495,0
DB	20	20	11	180	8,4	4,6	460,0
DB	20	20	11	210	7,2	4,0	460,0
DB	20	25	4	20	4,5	2,6	410,0
DB	20	25	4	160	5,6	4,9	384,3
DB	20	25	4	180	5,1	2,9	381,7
DB	20	25	4	210	3,1	3,2	376,7
DB	20	25	8	20	6,4	5,2	423,3
DB	20	25	8	160	7,8	2,5	406,7
DB	20	25	8	180	3,2	2,7	375,0
DB	20	25	8	210	3,6	3,0	366,7
DB	20	25	11	20	5,7	3,6	420,0
DB	20	25	11	160	9,8	5,3	386,7
DB	20	25	11	180	7,2	3,7	390,0
DB	20	25	11	210	14,6	5,6	390,0
DB	30	15	4	20	3,3	2,1	808,3
DB	30	15	4	160	7,6	4,5	672,9
DB	30	15	4	180	3,4	4,6	684,3
DB	30	15	4	210	3,6	3,6	646,7
DB	30	15	8	20	5,7	3,2	885,0
DB	30	15	8	160	2,6	2,7	843,3
DB	30	15	8	180	4,1	2,6	797,5
DB	30	15	8	210	3,5	3,2	816,7
DB	30	15	11	20	5,5	4,1	905,0
DB	30	15	11	160	7,7	3,5	840,0
DB	30	15	11	180	6,0	4,4	816,7
DB	30	15	11	210	11,6	7,6	815,0
DB	30	20	4	20	3,0	2,0	650,0
DB	30	20	4	160	3,6	3,8	563,3
DB	30	20	4	180	5,5	3,2	545,0
DB	30	20	4	210	3,9	2,4	550,0
DB	30	20	8	20	3,4	3,4	587,5
DB	30	20	8	160	6,0	2,6	580,0
DB	30	20	8	180	3,0	2,5	625,0
DB	30	20	8	210	4,3	2,6	643,3
DB	30	20	11	20	6,4	5,6	690,0
DB	30	20	11	160	5,9	4,2	610,0

DB	30	20	11	180	6,2	3,5	563,3
DB	30	20	11	210	5,1	3,5	556,7
DB	30	25	4	20	4,6	2,6	625,7
DB	30	25	4	160	8,0	3,9	578,3
DB	30	25	4	180	7,5	2,7	561,4
DB	30	25	4	210	3,2	2,3	554,3
DB	30	25	8	20	14,5	4,5	582,5
DB	30	25	8	160	3,2	2,4	567,5
DB	30	25	8	180	5,7	3,1	546,7
DB	30	25	8	210	6,0	4,3	535,0
DB	30	25	11	20	5,6	3,9	613,3
DB	30	25	11	160	3,6	2,4	590,0
DB	30	25	11	180	7,2	3,8	556,7
DB	30	25	11	210	5,6	5,0	550,0
DB	40	15	4	20	3,4	2,4	1738,3
DB	40	15	4	160	3,8	1,8	1624,3
DB	40	15	4	180	3,4	1,8	1602,9
DB	40	15	4	210	3,7	3,8	1510,0
DB	40	15	8	20	6,0	3,8	1560,0
DB	40	15	8	160	4,4	3,3	1503,3
DB	40	15	8	180	3,5	2,2	1450,0
DB	40	15	8	210	4,4	3,9	1453,3
DB	40	15	11	20	3,9	2,1	1830,0
DB	40	15	11	160	4,1	3,4	1606,7
DB	40	15	11	180	5,2	4,0	1480,0
DB	40	15	11	210	6,8	2,9	1510,0
DB	40	20	4	20	5,8	4,0	1338,3
DB	40	20	4	160	3,5	3,2	1273,3
DB	40	20	4	180	4,4	2,8	1273,3
DB	40	20	4	210	4,3	3,1	1238,3
DB	40	20	8	20	5,5	2,6	1316,7
DB	40	20	8	160	3,1	2,4	1266,7
DB	40	20	8	180	3,3	1,8	1220,0
DB	40	20	8	210	5,4	3,1	1338,0
DB	40	20	11	20	5,4	3,6	1620,0
DB	40	20	11	160	6,0	4,1	1535,0
DB	40	20	11	180	6,6	4,7	1510,0
DB	40	20	11	210	5,2	3,5	1460,0
DB	40	25	4	20	2,4	2,4	1130,0
DB	40	25	4	160	2,7	2,3	1058,6
DB	40	25	4	180	7,5	2,9	1208,3
DB	40	25	4	210	2,7	2,4	1223,3
DB	40	25	8	20	4,7	2,8	1230,0

DB	40	25	8	160	7,2	2,1	1230,0
DB	40	25	8	180	4,6	2,7	1160,0
DB	40	25	8	210	7,6	5,0	1116,7
DB	40	25	11	20	5,1	3,6	1183,3
DB	40	25	11	160	3,6	2,4	1156,7
DB	40	25	11	180	8,8	4,5	1110,0
DB	40	25	11	210	7,3	3,8	1086,7
TEK	20	15	4	20	6,9	4,0	617,1
TEK	20	15	4	160	9,1	6,2	602,9
TEK	20	15	4	180	5,3	5,2	612,9
TEK	20	15	4	210	4,9	3,5	591,4
TEK	20	15	8	20	7,3	3,6	643,3
TEK	20	15	8	160	12,7	8,8	643,3
TEK	20	15	8	180	10,8	8,7	620,0
TEK	20	15	8	210	7,2	7,0	623,3
TEK	20	15	11	20	7,9	8,7	630,0
TEK	20	15	11	160	10,8	8,2	610,0
TEK	20	15	11	180	10,1	7,7	610,0
TEK	20	15	11	210	6,3	5,8	621,4
TEK	20	20	4	20	3,8	2,3	443,3
TEK	20	20	4	160	12,6	6,3	428,6
TEK	20	20	4	180	8,7	6,3	411,7
TEK	20	20	4	210	9,7	6,4	420,0
TEK	20	20	8	20	4,9	2,8	432,5
TEK	20	20	8	160	10,4	8,7	430,0
TEK	20	20	8	180	9,5	6,1	416,7
TEK	20	20	8	210	12,9	9,4	406,7
TEK	20	20	11	20	10,7	7,3	426,7
TEK	20	20	11	160	16,9	12,7	413,3
TEK	20	20	11	180	6,4	5,3	455,0
TEK	20	20	11	210	11,9	8,7	420,0
TEK	20	25	4	20	10,9	6,7	365,0
TEK	20	25	4	160	5,8	5,4	353,3
TEK	20	25	4	180	2,9	2,4	365,0
TEK	20	25	4	210	6,9	5,7	356,7
TEK	20	25	8	20	6,1	4,4	370,0
TEK	20	25	8	160	11,3	9,5	350,0
TEK	20	25	8	180	9,7	6,0	356,7
TEK	20	25	8	210	12,1	7,9	345,0
TEK	20	25	11	20	7,3	5,1	356,7
TEK	20	25	11	160	13,2	8,0	360,0
TEK	20	25	11	180	8,6	6,5	346,7
TEK	20	25	11	210	6,8	4,7	350,0

TEK	30	15	4	20	5,9	6,0	734,3
TEK	30	15	4	160	9,1	6,5	688,6
TEK	30	15	4	180	3,8	3,2	775,7
TEK	30	15	4	210	2,7	2,7	751,4
TEK	30	15	8	20	11,1	6,9	755,0
TEK	30	15	8	160	11,6	6,7	752,5
TEK	30	15	8	180	8,3	7,2	760,0
TEK	30	15	8	210	11,5	8,5	727,5
TEK	30	15	11	20	5,2	3,7	800,0
TEK	30	15	11	160	10,2	7,2	743,3
TEK	30	15	11	180	6,2	8,0	755,0
TEK	30	15	11	210	8,2	6,1	755,0
TEK	30	20	4	20	12,8	8,4	528,3
TEK	30	20	4	160	7,9	5,5	520,0
TEK	30	20	4	180	10,2	8,2	507,1
TEK	30	20	4	210	13,5	7,7	505,0
TEK	30	20	8	20	4,0	3,2	545,0
TEK	30	20	8	160	6,6	6,0	550,0
TEK	30	20	8	180	2,3	2,0	537,5
TEK	30	20	8	210	6,6	5,3	536,7
TEK	30	20	11	20	2,8	3,5	576,7
TEK	30	20	11	160	6,2	7,3	540,0
TEK	30	20	11	180	4,1	5,4	550,0
TEK	30	20	11	210	6,0	5,6	565,0
TEK	30	25	4	20	4,4	2,8	518,6
TEK	30	25	4	160	9,2	6,8	516,7
TEK	30	25	4	180	4,0	4,5	526,7
TEK	30	25	4	210	3,6	3,8	523,3
TEK	30	25	8	20	7,6	5,7	526,7
TEK	30	25	8	160	6,0	6,0	520,0
TEK	30	25	8	180	10,3	8,4	526,7
TEK	30	25	8	210	10,5	7,7	496,7
TEK	30	25	11	20	5,0	3,3	520,0
TEK	30	25	11	160	5,2	7,2	490,0
TEK	30	25	11	180	3,0	2,1	520,0
TEK	30	25	11	210	5,8	6,4	515,0
TEK	40	15	4	20	8,6	5,6	1408,6
TEK	40	15	4	160	8,8	5,9	1384,3
TEK	40	15	4	180	6,6	5,8	1403,3
TEK	40	15	4	210	8,1	7,0	1368,6
TEK	40	15	8	20	5,7	3,8	1400,0
TEK	40	15	8	160	7,2	5,6	1380,0
TEK	40	15	8	180	6,8	3,3	1393,3

TEK	40	15	8	210	4,0	2,5	1363,3
TEK	40	15	11	20	2,4	1,5	1446,7
TEK	40	15	11	160	18,9	9,2	1370,0
TEK	40	15	11	180	7,4	6,1	1350,0
TEK	40	15	11	210	7,5	5,6	1375,0
TEK	40	20	4	20	6,1	5,6	1190,0
TEK	40	20	4	160	5,4	5,3	1175,0
TEK	40	20	4	180	5,5	4,0	1203,3
TEK	40	20	4	210	4,5	5,1	1150,0
TEK	40	20	8	20	12,4	7,7	1262,5
TEK	40	20	8	160	6,4	5,8	1237,5
TEK	40	20	8	180	11,6	8,4	1250,0
TEK	40	20	8	210	12,0	8,5	1202,5
TEK	40	20	11	20	5,7	4,0	1393,3
TEK	40	20	11	160	10,0	6,0	1360,0
TEK	40	20	11	180	10,2	7,3	1310,0
TEK	40	20	11	210	10,1	7,1	1302,5
TEK	40	25	4	20	3,3	2,7	1183,3
TEK	40	25	4	160	6,8	3,8	1144,3
TEK	40	25	4	180	8,0	5,2	1148,3
TEK	40	25	4	210	3,5	2,8	1165,0
TEK	40	25	8	20	9,2	6,5	1066,7
TEK	40	25	8	160	5,7	5,7	1042,5
TEK	40	25	8	180	5,5	5,3	1040,0
TEK	40	25	8	210	9,2	7,2	1032,5
TEK	40	25	11	20	10,8	6,5	1023,3
TEK	40	25	11	160	8,7	6,3	1036,7
TEK	40	25	11	180	5,6	3,0	1030,0
TEK	40	25	11	210	10,4	7,3	1020,0
PD	20	15	4	20	7,2	7,2	288,0
PD	20	15	4	160	5,0	3,6	290,0
PD	20	15	4	180	10,3	7,0	288,0
PD	20	15	4	210	2,3	1,7	280,0
PD	20	15	8	20	3,4	3,0	330,0
PD	20	15	8	160	2,7	4,9	326,7
PD	20	15	8	180	3,0	2,6	323,3
PD	20	15	8	210	2,8	3,0	326,7
PD	20	15	11	20	4,9	3,4	316,7
PD	20	15	11	160	4,7	3,4	330,0
PD	20	15	11	180	8,2	5,9	336,7
PD	20	15	11	210	5,1	7,7	313,3
PD	20	20	4	20	3,4	4,0	292,0
PD	20	20	4	160	2,1	2,3	287,5

PD	20	20	4	180	3,8	3,1	286,7
PD	20	20	4	210	2,0	1,8	290,0
PD	20	20	8	20	3,0	3,9	306,7
PD	20	20	8	160	6,7	4,9	303,3
PD	20	20	8	180	3,7	4,2	303,3
PD	20	20	8	210	3,1	3,4	303,3
PD	20	20	11	20	4,9	4,0	320,0
PD	20	20	11	160	9,2	9,0	325,0
PD	20	20	11	180	5,2	2,9	310,0
PD	20	20	11	210	5,8	3,1	320,0
PD	20	25	4	20	2,3	1,6	290,0
PD	20	25	4	160	2,5	2,5	290,0
PD	20	25	4	180	2,5	2,2	288,3
PD	20	25	4	210	3,4	2,4	280,0
PD	20	25	8	20	3,3	2,9	292,5
PD	20	25	8	160	7,0	3,6	282,5
PD	20	25	8	180	10,6	7,0	293,3
PD	20	25	8	210	3,3	2,8	293,3
PD	20	25	11	20	25,9	15,5	300,0
PD	20	25	11	160	4,4	2,9	305,0
PD	20	25	11	180	5,2	3,9	293,3
PD	20	25	11	210	4,6	3,3	290,0
PD	30	15	4	20	2,3	2,2	351,4
PD	30	15	4	160	9,8	4,8	354,3
PD	30	15	4	180	2,0	2,8	348,3
PD	30	15	4	210	3,9	2,1	342,9
PD	30	15	8	20	2,7	2,8	376,7
PD	30	15	8	160	8,1	3,0	390,0
PD	30	15	8	180	4,8	4,6	376,7
PD	30	15	8	210	9,1	6,7	360,0
PD	30	15	11	20	10,1	10,5	400,0
PD	30	15	11	160	7,9	8,0	390,0
PD	30	15	11	180	2,4	2,5	390,0
PD	30	15	11	210	3,2	3,6	363,3
PD	30	20	4	20	2,5	4,6	331,7
PD	30	20	4	160	9,4	6,6	336,7
PD	30	20	4	180	2,6	2,6	335,0
PD	30	20	4	210	3,6	3,6	323,3
PD	30	20	8	20	2,3	2,4	347,5
PD	30	20	8	160	4,7	3,9	360,0
PD	30	20	8	180	2,8	4,1	350,0
PD	30	20	8	210	2,6	3,4	350,0
PD	30	20	11	20	2,5	2,6	370,0

PD	30	20	11	160	5,4	4,4	350,0
PD	30	20	11	180	10,3	5,5	330,0
PD	30	20	11	210	3,7	3,4	355,0
PD	30	25	4	20	3,0	2,6	327,1
PD	30	25	4	160	2,0	3,1	328,6
PD	30	25	4	180	2,4	2,1	326,7
PD	30	25	4	210	2,7	3,4	318,3
PD	30	25	8	20	2,4	2,4	326,7
PD	30	25	8	160	3,0	4,8	340,0
PD	30	25	8	180	8,7	4,6	333,3
PD	30	25	8	210	2,3	2,6	336,7
PD	30	25	11	20	8,7	4,2	350,0
PD	30	25	11	160	14,9	14,2	335,0
PD	30	25	11	180	4,6	5,1	333,3
PD	30	25	11	210	4,0	3,1	330,0
PD	40	15	4	20	2,7	1,8	577,1
PD	40	15	4	160	3,6	2,3	574,3
PD	40	15	4	180	12,5	5,8	563,3
PD	40	15	4	210	2,3	2,9	558,3
PD	40	15	8	20	3,2	2,5	596,7
PD	40	15	8	160	5,6	3,2	590,0
PD	40	15	11	180	2,6	3,2	593,3
PD	40	15	11	210	3,9	2,6	600,0
PD	40	20	4	20	2,9	2,2	555,0
PD	40	20	4	160	4,4	3,7	553,3
PD	40	20	4	180	2,9	2,8	550,0
PD	40	20	4	210	3,4	2,8	548,3
PD	40	20	8	20	3,0	2,5	570,0
PD	40	20	8	160	5,9	4,7	570,0
PD	40	20	8	180	3,4	3,3	550,0
PD	40	20	8	210	2,2	2,0	556,7
PD	40	20	11	20	4,1	3,6	560,0
PD	40	20	11	160	3,4	2,2	585,0
PD	40	20	11	180	3,1	2,5	585,0
PD	40	20	11	210	5,1	4,2	570,0
PD	40	25	4	20	2,9	1,6	543,3
PD	40	25	4	160	2,8	3,0	531,4
PD	40	25	4	180	3,1	1,9	530,0
PD	40	25	4	210	4,5	1,9	527,1

PD	40	25	8	20	2,5	1,8	566,7
PD	40	25	8	160	3,5	2,5	553,3
PD	40	25	8	180	2,2	2,4	556,7
PD	40	25	8	210	5,5	6,6	550,0
PD	40	25	11	20	8,3	4,3	595,0
PD	40	25	11	160	4,2	5,1	575,0
PD	40	25	11	180	5,1	3,4	575,0
PD	40	25	11	210	4,2	5,8	570,0