

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra základního zpracování dřeva



**Vliv technicko-technologických a materiálových faktorů  
rovinného frézování termicky modifikovaného březového  
dřeva na energetickou náročnost obrábění**

Diplomová práce

Autor: Elena Miftieva

Vedoucí práce: prof. Ing. Štefan Barčík, Csc.

2014

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

Katedra základního zpracování dřeva

Fakulta lesnická a dřevařská

# **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Miftieva Elena

Dřevařské inženýrství

Název práce

**Vliv technicko - technologických a materiálových faktorů rovinného frézování termicky modifikovaného březového dřeva na energetickou náročnost obrábění**

Anglický název

**Influence of technical - technological and material factors of planar milling of thermally modified birch wood on energy performance during shaping**

---

## **Cíle práce**

Hlavním cílem práce je experimentální sledování vlivu vybraných technicko - technologických parametrů rovinného frézování při různých teplotách termicky modifikovaného březového dřeva na energetickou náročnost řezného procesu tj. řezný výkon a příkon.

## **Metodika**

Teoretická východiska pro řešení dané problematiky s experimentálním hodnocením. Model využití experimentálních výsledků s dovořením pro vědu a praxi.

## **Harmonogram zpracování**

Datum zadání práce: únor 2013

Vypracování zadávacího listu: červenec 2013

Příprava a zpracování podkladů: říjen 2013

Literární rešerše a zpracování technické části: prosinec 2013

Experimentální část práce: leden - únor 2014

Finální úprava práce a odevzdání ke kontrole: březen 2014

Datum odevzdání práce: duben 2014

**Rozsah textové části**

45 - 55 stran textu

**Klíčová slova**

frézování, termo dřevo, technicko - technologické faktory, výkon, příkon

**Doporučené zdroje informací**

Lisíčan, J. 1996. Teória a technika spracovania dreva, Zvolen, Matcentrum, 625 s., ISBN 80-967315-6-4.

Prokeš, S. 1982. Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva, 3. vyd., Praha - SNTL, 584 s.

Beňo, J. 1999. Teória rezania kovov, Vienaľa, Košice, ISBN 80-70099-429-0.

Лубченко, В.И. 1986. Резание древесины и древесных материалов, Лесная промышленность, Москва, 1986.

Káčiková, D., Kačík, F. 2011. Chemické a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave, ES, TU Zvolen, 71 s.

Reinprecht, L., Vidholdová, Z. 2008. Termodrevo - príprava, vlastnosti a aplikácie, TU Zvolen, 2008.

Odborné články k dané problematice.

**Vedoucí práce**

Barcik Štefan, prof. Ing., CSc.

**Termín odevzdání**

duben 2014

  
**prof. Ing. Štefan Barcik, CSc.**  
Vedoucí katedry



  
**prof. Ing. Marek Turčáni, Ph.D.**  
Děkan fakulty

V Praze dne 13.9.2013

"Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **«Vliv technicko-technologických a materiálových faktorů rovinného frézování termicky modifikovaného březového dřeva na energetickou náročnost obrábění»** vypracovala samostatně pod vedením prof. Ing. Štefana Barcíka, Csc. a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V..... dne.....

.....

Elena Miftieva

## **Poděkování**

Tímto chci poděkovat mému vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Štefanu Barčíkovi, CSc. za vedení, vstřícný přístup, odbornou pomoc při zpracování této diplomové práce, poskytování studijních materiálů týkajících se diplomové práce a za jeho čas při řešení této práce.

Dále bych chtěla poděkovat všem, kteří mi poskytli rady a pomoc při řešení této práce a kteří jakýmkoli způsobem přispěli k vypracování mé diplomové práce. Dále chci poděkovat mé milé mamince za podporu a pomoc v průběhu celého života.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se věnuje problematice vlivů technicko-technologických a materiálových faktorů na energetickou náročnost obrábění při rovinném frézování termicky modifikovaného březového dřeva. V teoretické části práci jsou popsány základní pojmy související s tématem této problematiky. Teoretický rozbor se věnuje popisu termicky modifikovaného dřeva, frézování a energetické náročnosti obrábění. Další část se zabývá metodikou práce a zahrnuje informace o přípravě experimentálních vzorků a také obsahuje popis experimentálního zařízení. Experimentální část práce je zaměřená na hodnocení materiálových vlivů (rostlé březové dřevo, termická úprava březového dřeva 160°C, 180°C, 210°C, 240°C) a technicko-technologických faktorů (řezná rychlost, rychlost posuvu, délka řezu) na energetickou náročnost řezného procesu (množství energie teda řezný příkon  $P$  (W) potřebný na obrábění materiálu). Následující kapitoly prezentují výsledky a vyhodnocení zaznamenaných hodnot a související s tím vyvozené závěry a jsou hlavními částmi této práce. Hlavním cílem práce je experimentální posouzení vlivu materiálových a technicko-technologických parametrů (řezná rychlost, rychlost posuvu, délka řezu) na velikost řezného příkonu a jeho změny v procesu rovinného frézování rostlého a termicky modifikovaného březového dřeva. Přínos pro vědu a praxi a závěr jsou poslední části této práce.

### **Klíčová slova:**

Termicky modifikované dřevo, frézování, technicko-technologické faktory, řezný příkon, energetická náročnost při frézování

## **Abstract**

This thesis with the issue of the effects of technical- technological and material factors on the energy performance machining face milling of thermally modified wood of birch . In the theoretical part of the thesis are described the basic concepts related to the topic of this issue. Theoretical analysis is devoted to the description of thermally modified wood, milling and cutting energy intensity. The next part of thesis is the methodology of work and includes information on the preparation of experimental samples and also contains a description of the experimental device. The experimental part of the work is focused on the assessment of the materials effects (grown birch wood, birch wood thermal treatment of 160°C, 180°C, 210°C, 240°C ) and technical- technological factors (cutting speed , feed rate, cutting of length ) on energy intensity of the cutting process (the amount of energy thus cutting power  $P$  (  $W$  ) required for machining materials ) . These following chapters present the results and evaluation of the recorded values and associated with the conclusions drawn and the mains parts of this work. The main goal of this thesis is the experimental evaluation of the impact of material and technical and technological parameters (cutting speed , feed rate, cutting of length) cutting the size of the input and the changes in face milling process and thermally modified solid birch wood. Contribution for the science and practice and action are in the last part of this thesis.

### **Keywords:**

Thermowood, milling, technical-technological factors, cutting power, energy intensity of milling.

## Obsah

Seznam obrázků.....	10
Seznam tabulek.....	11
Seznam grafů .....	11
Úvod.....	13
Cíle práce .....	14
1. Termický modifikované dřevo (Thermowood) .....	15
1.1. Analýza současného stavu ochrany dřeva.....	15
1.2 Termická modifikace dřeva.....	17
1.2.1 Cíle, podstata a definice termické modifikovaného dřeva .....	17
1.3 Změny dřeva při termické modifikaci.....	20
1.3.1. Vliv termických úprav na chemickou strukturu dřeva .....	21
1.3.2. Anatomické změny .....	23
1.4 Vliv termických úprav na vlastnosti dřeva.....	24
1.4.1. Fyzikální vlastnosti termodřeva .....	24
1.4.2. Mechanické vlastnosti termodřeva .....	27
1.4.3. Trvanlivost tepelně modifikovaného dřeva .....	30
1.5. Technické vlastnosti termodřeva.....	32
1.6. Technologie výroby termodřeva .....	33
1.6.1 Termodřevo připravované v atmosféře vzduchu (ThermoWood®).....	34
1.6.2 Termodřevo připravované v prostředí vodní páry (Plato®Wood).....	35
1.6.3. Termodřevo připravované v prostředí inertních plynů (RetificatedWood)...	36
1.6.4. Termodřevo připravované v olejích (OHT-Wood) .....	36
1.7. Klasifikace termodřeva a jeho aplikace .....	36
1.7.1. Klasifikace termodřeva.....	36
1.7.2. Aplikace termodřeva .....	39
2. Frézování .....	40
2.1. Frézování dřeva.....	40
2.2. Rozdělení procesu frézování. ....	41
2.3. Základní technologické způsoby frézování.....	42
2.4. Druhy frézování .....	44
2.5. Kinematické zákonitosti frézování.....	45
2.5.1. Proces oddělování třísky. Tvar a rozměry třísky.....	45
2.5.2. Kinematické prvky frézování .....	46
3. Energetická náročnost procesu frézování .....	49
3.1. Metody výpočtu řezné síly a spotřeby energie.....	51



3.2. Měření řezného výkonu.....	53
3.2.1. Zapojení A/D převodníku.....	53
3.2.2. Snímání kroutícího momentu .....	54
3.2.3. Měřicí zařízení na analyzování kvality elektrické sítě .....	55
4. Vliv činitelů na energetickou náročnost frézování.....	55
5. Metodika práce .....	58
5.1. Vyběr a příprava experimentálních vzorků.....	58
5.2. Experimentální zařízení .....	60
5.2.1. Popis a charakteristika spodní vřetenové frézky .....	60
5.2.2. Podávací zařízení.....	61
5.2.3. Charakteristika řezného nástroje .....	61
5.2.4. Charakteristika zařízení na měření výkonu .....	62
5.3. Řezné podmínky experimentálního měření .....	63
5.4. Stanovení fyzikálních vlastností zkušebnímu materiálu .....	64
5.4.1. Stanovení hustoty .....	64
5.4.2. Stanovení vlhkosti .....	64
6. Experimentální část a sledování (popis vlastního frézování a měření řezného výkonu) .....	65
6.1. Příprava experimentálního pracoviště.....	66
6.2. Popis vlastního měření .....	67
7. Výsledky a vyhodnocení.....	70
7.1. Hustota a vlhkost zkoumaného materiálu .....	70
7.2. Řezný příkon .....	73
7.2.1. Statistické zhodnocení .....	73
7.2.2. Vliv tepelné úpravy materiálů na řezný příkon .....	75
7.2.3. Vliv podávací rychlosti na řezný příkon .....	77
7.2.4. Vliv řezné rychlosti na řezný příkon .....	82
7.2.5. Vliv délky frézování na řezný příkon.....	87
8. Celkové zhodnocení výsledků .....	91
9. Diskuse a přínos pro praxi a vědu.....	93
Závěr .....	95
Seznam použité literatury .....	96
Seznam příloh .....	98
Přílohy	

## Seznam obrázků

- Obr. 1 Vlastnosti termodřeva
- Obr. 2 Chemické změny hlavních složek dřeva při termické úpravě
- Obr. 3 Mikroskopická struktura dřeva
- Obr. 4 Změny obsahu rovnovážné vlhkosti při působení teplot 220-225°C po dobu 1-3h a při různých vlhkostech
- Obr. 5 Závislost změny hustoty termicky upraveného borovicového dřeva od teploty 160°C až 240°C po dobu působení 3 hodiny
- Obr. 6 Barevný rozdíl rostlého (nahore) a tepelně upraveného dubového dřeva (*Quercus*) a změny barvy při teplotě od 160°C do 240°C
- Obr. 7 Pokles pevnosti v tlaku smrkového dřeva v závislosti na teplotě působení
- Obr. 8 Změna ohybové pevnosti borovicového dřeva při teplotním zatížení od 60°C do 240°C
- Obr. 9 Vliv teploty tepelné modifikace borovicového dřeva na tvrdost podle Brinella, délka působení-3 hodiny
- Obr. 10 Změna pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v závislosti od teploty zatížení
- Obr. 11 Zvýšení trvanlivosti ThermoWood dřeva vyrobeného z běle borovice při teplotách 100 až 240°C po dobu působení 3 h.
- Obr. 12 Změna barvy termodřeva
- Obr. 13 Výrobní zařízení na přípravu ThermoWoodu
- Obr. 14 Proces výroby ThermoWoodu
- Obr. 15 Nárůst prodeje termicky upraveného dřeva Thermowood v rocích 2001-2007
- Obr. 16 Ukázka použití termodřeva v interiéru – na podlahy a do saun
- Obr. 17 Ukázka použití termodřeva v exteriéru – na zahradní nábytek, na obklady vnějších fasád
- Obr. 18 Kinematické varianty frézování
- Obr. 19 Hlavní druhy frézování
- Obr. 20 Způsoby frézování podle polohy osy otáčení a podle tvaru ploch, které opisují břity nástroje
- Obr. 21 Kinematické prvky protiběžného frézování
- Obr. 22 Kinematický model obrábění válcovým frézováním (oddělování třísky)
- Obr. 23 Profil třísky odřezané válcovou frézou
- Obr. 24 Vyčnívání řezné hrany v nožové hlavě
- Obr. 25 Měřicí zařízení A/D převodník
- Obr. 26 Schéma snímače kroučícího momentu
- Obr. 27 Snímače kroučícího momentu
- Obr. 28 Měřicí zařízení Metrel Power Q Plus MI 2392 a jeho zapojení
- Obr. 29 Úhlová geometrie nástroje
- Obr. 30 Zařízení pro tepelnou úpravu –vysokoteplotní pec
- Obr. 31 Spodní jednovřejenová frézka s podávacím zařízením
- Obr. 32 Podávací zařízení STEFF 2034

- Obr. 33 Frézovací hlava s úhlem čela 15° pro experimentální měření
- Obr. 34 Měřicí zařízení Metrel Power Q Plus MI 2392 a schéma zapojení přístroje
- Obr. 35 Stanovení hustoty – experimentální vzorky
- Obr. 36 Experimentální vzorky před měřením
- Obr. 37 Připojení měřicího zařízení
- Obr. 38 Osazená frézovací hlava, úhel čela 15°
- Obr. 39 Připravené pracoviště
- Obr. 40 Vyrazný rozdíl v struktuře dřeva jednotlivých typů tepelné úpravy zkoumaného materiálu

## Seznam tabulek

- Tab. 1 Změna vlastností a příklady použití termicky modifikovaného dřeva ThermoWood® typu Thermo-S a Thermo-D
- Tab. 2 Průběh termické modifikace experimentálních vzorků – jednotlivé etapy tepelné úpravy
- Tab. 3 Technické parametry spodní svislé frézky FVS
- Tab. 4 Technické parametry podávacího zařízení STEFF 2034
- Tab. 5 Základní technické parametry frézy
- Tab. 6 Řezné podmínky experimentu
- Tab. 7 Změna průměrných hodnot hustoty a vlhkosti pro každý přířez zkoumaného materiálu
- Tab. 8 Průměrná hustota a vlhkost zkoumaného materiálu
- Tab. 9 Vicefaktorová analýza rozptylu
- Tab. 10 Mnohonásobné porovnání vlivu změny řezné rychlosti, podávací rychlosti a materiálu na řezný příkon Tukeyovou metodou
- Tab. 11 Procentuální změna průměrného řezného příkonu v závislosti na termické úpravě materiálů při různých variantách řezné a podávací rychlosti.
- Tab. 12 Procentuální změna průměrného řezného příkonu při vlivu podávací rychlosti při různých kombinacích řezné rychlosti pro jednotlivé druhy tepelné úpravy materiálů
- Tab. 13 Procentuální změna průměrného řezného příkonu při vlivu řezné rychlosti při různých kombinacích řezné rychlosti pro jednotlivé druhy tepelné úpravy materiálů
- Tab. 14 Analýza rozptylu
- Tab. 15 Mnohonásobné porovnání vlivu změny materiálu a délky řezu na řezný příkon Tukeyovou metodou
- Tab. 16 Procentuální změna průměrného řezného příkonu při různých odfrézovaných délkách pro jednotlivé typy tepelné úpravy materiálu

## Seznam grafů

- Graf 1 Změna průměrných hodnot hustoty pro každý přířez zkoumaného materiálu
- Graf 2 Průběh změny hustoty v závislosti na tepelné úpravě
- Graf 3 Analýza závislosti řezného příkonu na tepelné úpravě materiálů
- Graf 4 Bodový graf řezného příkonu v závislosti na různých variantách tepelné úpravy březového dřeva
- Graf 5 Analýza rozptylu pro závislost příkonu na podávací rychlosti pro jednotlivé typy tepelné úpravy březového dřeva

- Graf 6 Bodový graf řezného příkonu při různých podávacích rychlostech pro jednotlivé druhy tepelné úpravy
- Graf 7 Závislost řezného příkonu na rychlosti posuvu při různých variantách řezné rychlosti a termické úpravě materiálů.
- Graf 8 Analýza rozptylu pro závislost řezné rychlosti v závislosti na řezné rychlosti pro jednotlivé typy tepelné úpravy materiálu
- Graf 9 Bodový graf závislosti řezného příkonu na řezné rychlosti
- Graf 10 Závislost řezného příkonu na řezné rychlosti při různých variantách rychlosti posuvu a termické úpravě materiálů.
- Graf 11 Znázornění rozdílů mezi řezným příkonem, naměřeném na rozdílných odfrézovaných délkách při různých typech tepelné úpravy materiálu.
- Graf 12 Analýza rozptylu pro závislost řezného příkonu na délce frézování pro jednotlivé druhy tepelné úpravy zkoumaného materiálů

## Úvod

Dřevo patří k přírodním, obnovitelným materiálům se širokým spektrem použití jak v interiérových, tak i v exteriérových expozicích. Dřevo je mechanicky odolný, dobře zpracovatelný a estetický materiál, avšak má nepříznivé vlastnosti jako hygroskopičnost, anizotropnost a náchylnost k napadení dřevokaznými houbami a jinými biologickými činiteli. Přirozená trvanlivost je jednou z velmi důležitých vlastností dřeva. V současnosti při využívání výrobků ze dřeva se klade velký důraz na jeho ochranu vůči biologickým činitelům a dlouhou dobu životnosti. Problematiku zvýšení trvanlivosti a odstranění nepříznivých vlastností dřeva se snaží částečně řešit termická modifikace dřeva. Jde o úpravu dřeva přirozeným způsobem s minimálním dopadem na životní prostředí. Vlastnosti termicky upraveného dřeva se zkoumají už poměrně dlouho a jsou dobře známé i v odborné veřejnosti. V poslední době se ukazuje zvýšený zájem o termicky modifikované dřevo, které se využívá v různých oblastech. S růstem spotřeby termodřeva souvisí i jeho následné opracování a s tím i související otázka energetické náročnosti obrábění tohoto materiálu. Nejrozšířenějším způsobem mechanického obrábění dřeva je řezání s tvorbou třísky, kam patří i frézování. V praxi je velmi důležité, aby celý proces řezání proběhl s co nejmenšími nároky na energii (tedy na energetickou náročnost celého procesu). Energetická náročnost procesu je závislá jak na fyzikálně-mechanických vlastnostech dřeva, tak i na technicko-technologických podmínkách realizace procesu frézování. Vhodným výběrem řezných podmínek je možné snížit náklady při obrábění dřeva, tedy i zvýšit výkonnost řezání.

Tato diplomová práce je zaměřena na experimentální stanovení změny energetické náročnosti při frézování termicky neošetřeného (roslého) a termicky upraveného březového dřeva a také zjistit jaké technicko-technologické podmínky pro obrábění tohoto materiálu jsou nejvhodnější z hlediska energetické náročnosti.

## Cíle práce

Hlavním cílem této diplomové práce je posouzení vlivu materiálových a technicko-technologických parametrů (řezná rychlost, rychlost posuvu, délka řezu) na velikost řezného příkonu a jeho změny v procesu rovinného frézování rostlého a termicky modifikovaného ( $T=160^{\circ}\text{C}$ ,  $T=180^{\circ}\text{C}$ ,  $T=210^{\circ}\text{C}$ ,  $T=240^{\circ}\text{C}$ ) březového dřeva.

Ke splnění mého hlavního cílu vedli tyto dílčí cíle:

1. Sjednotit a popsat poznatky o termicky modifikovaném dřevě, rovinném frézování a energetické náročnosti při obrábění.
2. Stanovit fyzikální vlastnosti (hustota, vlhkost) zkoumaného materiálu.
3. Experimentálním způsobem stanovit odlišnosti související s vlivem materiálových a technicko-technologických faktorů v energetické náročnosti při frézování termicky upraveného a rostlého březového dřeva.
4. Provést statistické zpracování naměřených údajů a udělat související s tím závěry.
5. Stanovit přínos pro vědu a praxi.

## 1. Termicky modifikované dřevo (Thermowood)

V posledním období výrazně vzrostl zájem o termicky modifikované dřevo. Tento zájem je způsobený zvýšeným zájmem o trvanlivý stavební materiál a legislativními změnami, které omezují používání toxických látek.

Termická úprava dřeva se využívá v různých oblastech, přičemž dochází k zlepšení některých vlastností a jiné se zhoršují. Oproti jiným způsobům modifikace dřeva se však za její výhodu považuje, že se nepoužívají chemické látky, které by mohli negativně ovlivňovat životní prostředí nebo ekologickou kvalitu výrobků. (Kačíková, Kačík, 2011)

### 1.1. Analýza současného stavu ochrany dřeva

Dřevo má široké spektrum použití ve stavebnictví, nábytkářském, papírenském průmyslu a v dalších odvětvích. Dřevo různých druhů se vyznačuje odlišnými specifickými vlastnostmi, jako je hustota, trvanlivost, rozměrová stabilita, pevnost, tvrdost apod. Typickou charakteristikou dřeva je jeho anizotropie. Jednou z velmi důležitých vlastností dřeva je jeho přirozená trvanlivost v různých exteriérových a interiérových expozicích. Používané dřevo musí mít dostatečnou pevnost, tvrdost, rozměrovou stabilitu a barevnou stálost.

Pod pojmem „přirozená trvanlivost dřeva“ se v širším spektru rozumí jeho:

- biodegradovatelnost (t. j. náchylnost na poškození dřevokaznými houbami, dřevokazným hmyzem a jinými biologickými škůdci)
- hořlavost
- korodovatelnost (t. j. náchylnost na erozi povrchu UV zářením, vodou a jinými povětrnostními činiteli, jako i na poškození do větší hloubky agresivními chemikáliemi)
- deformovatelnost (t. j. náchylnost na změny tvarů při změnách klimatu)

Na přirozenou trvanlivost má vliv množství různých faktorů, převážně struktura dřeva (odlišnosti ve struktuře dřeva dané zejména druhem dřeva, klimatickými a půdními podmínkami růstu stromů) a expoziční zatížení dřeva (dané jeho umístěním v interiérech a exteriérech). (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

Prodloužení životnosti výrobků ze dřeva se docílí jejich správnou ochranou. Zvýšení trvanlivosti dřeva se realizuje formou:

- Fyzikální (regulace expozičních podmínek),

- Konstrukční (vychází z principů fyzikální ochrany; spočívá v použití vhodných druhů dřeva a dřevěných materiálů, optimalizací jejich tvarů, použití povrchových bariérových nátěrů, regulace interiérové klima),
- Chemické ochrany dřeva (použití vhodných typů chemických látek s požadovaným směrovým účinkem)
- Modifikační ochrany dřeva.

Metody fyzikální a konstrukční ochrany dřeva nemůžou stále zabránit aktivitě dřevokazných činitelů. Proto je třeba komplexně řešit ochranu dřeva, to znamená použít vhodnou chemickou nebo modifikační ochranu dřeva.

Chemické prostředky na ochranu dřeva musí mít legislativně schválené typové označení. Dominantním faktorem se při uplatnění chemického ochranného prostředku v praxi stává jeho ekologická a zdravotní nezávadnost a to v době ošetření dřeva, jeho expozici a při likvidaci spalováním čili kompostováním. Spolu se zvýšením trvanlivosti dřeva je důležité brát v úvahu to, aby se při těchto komplexnějších postupech přihlíželo i na hledisko zatížení životního prostředí. Přiměřenou trvanlivost dřeva je účelné dosáhnout takovou technologií, při které se nezatíží životní prostředí a upravené dřevo je zdravotně nezávadné. Všeobecně platí, že chemická ochrana dřeva není pro životní prostředí optimální a to na etapě její realizace, expozice a likvidace i proto má dnes dost odpůrců. To všechno znamená, že je třeba hledat nové cesty pro použití co nejmenší toxických prostředků a zvyšovat trvanlivost dřeva formou jeho modifikace.

Modifikované dřevo – je dřevo se záměrně změněnou strukturou a s cíleně zlepšenými vlastnostmi, jako je biologická odolnost, termická odolnost, odolnost vůči agresivním chemikáliím, odpudivost vůči vodě, hydrofóbnost, rozměrová stabilitě, barevné stálosti, pevnosti, tvrdosti, apod. Obměna struktury a vlastnosti rostlého dřeva se realizuje mechanickými, chemickými, termickými a enzymatickými (biologickými) metodami modifikace. (Reinprecht, 2007)

K základním užitným vlastnostem modifikovaného dřeva patří:

- odolnost vůči biologickým škůdcům, tj. vůči hnilobě, plesnivění, požerům hmyzu,
- odolnost vůči požárům,



- odolnost vůči povětrnostním vlivům, hlavně vůči vodě, UV záření, kyslíku, agresivním chemikáliím a jiným atmosférickým činitelům, zejména ve vazbě na jeho odolnost vůči tvorbě trhlin, povrchovou erozi a barevnou stabilitu,
- pevnost, modul pružnosti, houževnatost, tvrdost,
- rozměrová stabilita (sesychání a bobtnání). (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

Jednou z hlavních úloh modifikace dřeva je zvýšení odolnosti méně trvanlivých druhů vůči různým biologickým a abiotickým činitelům. Také důležitými jsou otázky ceny takového dřeva a eko-toxikologická problematika (aby modifikované dřeva po jeho použití nezatěžovalo životní prostředí víc než rostlé dřevo). (Reinprecht, 2007) Při ochraně modifikací, narozdíl od chemické ochrany, se dřevo neupravuje toxickým biocidem, což je velmi důležité hlavně z ekologického pohledu. A právě z tohoto důvodu je ochrana modifikací dřeva v praxi více využívána. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

## 1.2 Termická modifikace dřeva

To, že při termickém působení dřeva mění své vlastnosti a tím pádem se dřevo stává odolnějším a trvanlivějším je známé již odedávna. Již naši předkové využívali tuto metodu, kdy opalovali konce plotových stojek, aby tak zvýšili jejich trvanlivost. (ThermoWood Handbook, 2003)

Vliv termického působení na vlastnosti dřeva se zkoumají už poměrně dlouho. Samotný proces tepelné modifikace byl teoreticky popsán již ve 20. letech minulého století. V roce 1920 Tiemann pozoroval snížení rovnovážné vlhkosti dřeva a jeho následné bobtnání při sušení za vysokých teplot. Samm (1946) také zjistil, že při termickém působení dochází ke zlepšení rozměrové stability dřeva. Avšak nabytí vysoké intenzity výzkumu a aplikace termické modifikace v průmyslu pokračovalo zejména v posledních letech. Průmyslová výroba termicky modifikovaného dřeva „Termodřeva“ se provádí již více než 10 let, hlavně v krajinách západní Evropy. V posledních letech se v dřevozpracujícím průmyslu se stále zvyšuje výroba a zpracovaného termicky modifikovaného dřeva. (Kačíková, Kačík, 2011; Reinprecht, 2007)

### 1.2.1 Cíle, podstata a definice termické modifikovaného dřeva

Termické metody modifikace dřeva – jsou založené na termických a hydrotermických úpravách dřeva při vysokých teplotách v oblasti 150-280°C. Následkem vysokých teplot dochází k rozkladu některých stavebních polymerů dřeva a

k tvorbě nových ve vodě nerozpustných látek, jako i látek s toxickým nebo odpuzujícím účinkem vůči biologickým škůdcům dřeva. (Reinprecht, 2007; Reinprecht, Vidholdová, 2008)

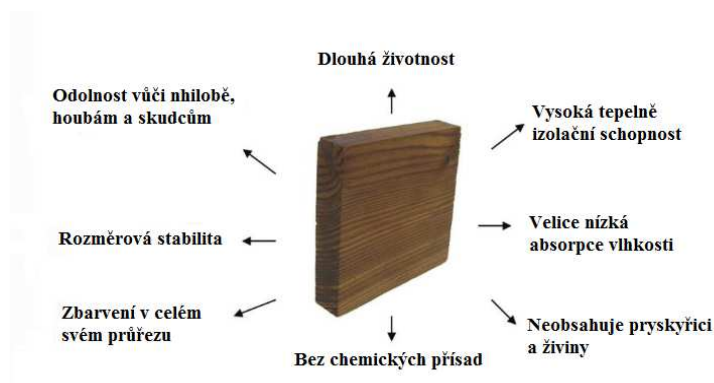
#### • **Praktické cíle termické modifikace dřeva**

Cílem je připravit takový dřevěný materiál, který bude mít specifické zlepšené vlastnosti v porovnání s rostlým dřevem a bude použitelný na výrobu různých dřevařských výrobků do náročných exteriérových a interiérových expozic. Aby takto modifikované dřevo dokázalo nahradit některé velmi trvanlivé a rozměrově stabilní exotické druhy dřeva.

Základním záměrem tepelné úpravy rostlého dřeva na výrobu termodřeva je získat takový materiál, který by měl takovéto vlastnosti:

- nižší hygroskopicitu,
- vyšší rozměrovou stabilitu,
- vyšší odolnost vůči dřevokazným houbám a hmyzů, dřevozbarvujícím houbám a plísním,
- zachování, případně i zlepšení mechanických vlastností – pevnost, tuhost, tvrdost,
- zachování a zlepšení estetické stránky – barva, textura, lesk, minimální podíl trhlin, apod.

Z výše uvedeného se dá říci, že úlohou termické modifikace dřeva je cíleně změnit strukturu dřeva, a to tak, aby se zlepšili jeho vybrané vlastnosti. Termické modifikační úpravy dřeva se v praxi realizuje při různých teplotách a různými technologiemi. Na obrázku č. 1 je vidět zlepšené užité vlastnosti termické modifikovaného dřeva. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)



**Obr. 1** Vlastnosti termodřeva (autor)

- **Podstata termické modifikace dřeva**

Výroba termodřeva je termická modifikace rostlého dřeva při teplotách 150-280°C, při které se cíleně upravuje chemická struktura dřeva. Podstata termické modifikace dřeva při výrobě termodřeva tkví v komplexu záměrných zásahů do jeho chemické struktury, buď v jedné, nebo ve více rovinách:

Blokace hydroxylových –OH funkčních skupin dřeva → Pokles hygroskopicity a zlepšení rozměrové stability dřeva

Síťovací polykondenzační reakce v lignin-sacharidové matrici dřeva → Pokles hygroskopicity dřeva, a vznik látek těžce přístupných pro biologického škůdce

Změny ve struktuře hemicelulóz některých extraktivních látek → Vznik látek s odpuzujícím účinkem vůči biologickým škůdcům

Tvorba stabilních neprchavých degradačních zplodin z lignin - sacharidické matrice dřeva a z extraktivních látek → Blokace aktivity hub a hmyzů, vznik látek s biocidním efektem

Důležitým je, aby při těchto záměrných zásazích nedocházelo k větším změnám v polymerech dřeva, zejména v polymerizačním stupni celulózy, která má velký vliv na pevnost dřeva. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

- **Definice termické modifikace dřeva**

- Termická modifikace je záměrná technologická úprava struktury dřeva, kterou se zvyšuje jeho trvanlivost.
- Požadované změny v struktuře dřeva nastávají zejména vlivem zvýšené teploty v intervalu 150 až 280°C, působící obvykle po dobu 15 minut až 24 hodin.
- Typy a rozsahy změn v struktuře a ve vlastnostech termické modifikovaného dřeva jsou kromě působící teploty ovlivněné také celkovými podmínkami prostředí, tj. či se tepelná úprava uskutečňuje v oxidační atmosféře nebo bez

přítomnosti vzduchu (inertní prostředí bez kyslíku), jako i od druhu a vstupní vlhkosti dřeva. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

### 1.3 Změny dřeva při termické modifikaci

Změny, vznikající ve dřevě působením zvýšené teploty závisí na více faktorech:

- Druh dřeva, jeho tvar a počáteční vlhkost,
- Intenzita přiváděného tepla – výška teploty a čas jeho působení,
- Prostředí (vzduch, inertní plyn),
- Tlak prostředí (vakuum, vlhkost),

Intenzita působení tepla – je hlavním faktorem ovlivňujícím přeměny ve struktuře dřeva při termické modifikaci. Změny ve struktuře dřeva tím intenzivnější, čím je vyšší teplota působení a delší doba trvání úpravy.

Přístup kyslíku – přítomnost kyslíku významně ovlivňuje reakce probíhající při tepelném rozkladu dřeva a umožňuje snadnější narušení složek dřeva za odehrávání termooxidačních reakcí. Omezení termooxidační reakce můžeme prováděním termické modifikace v inertní atmosféře.

Tlak prostředí – proces tepelné úpravy může být prováděn za sníženého tlaku (vakuum), nebo zvýšeného tlaku v závislosti na technologickém zařízení.

Zvýšený tlak se používá při úpravě dřeva vodní párou. Při termické modifikaci za sníženého tlaku je omezené množství kyslíku v prostředí, čím se potlačí termooxidační reakce.

Vlhkost dřeva – vedení tepla při termické modifikaci dřeva je ovlivněna jeho vstupní vlhkostí. V mokřém dřevě je vedení tepla vyšší než v suchém.

Druh dřeva – listnaté dřeviny kvůli nižšímu podílu ligninu se termicky modifikují intenzivněji ve srovnání s jehličnany. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

Na tepelnou úpravu se nejčastěji používají méně trvanlivé druhy dřeva, nejčastěji smrk (*Picea abies*), borovice (*Pinus sylvestris*), buk (*Fagus silvatica*), bříza (*Betula pendula*), jasan (*Fraxinus excelsior*), dub (*Quercus*), ale i jiné.

Borovice (*Pinus sylvestris*) - termicky modifikované borové dřevo se snadno opracovává všemi nástroji díky odstranění pryskyřice při termické modifikaci.

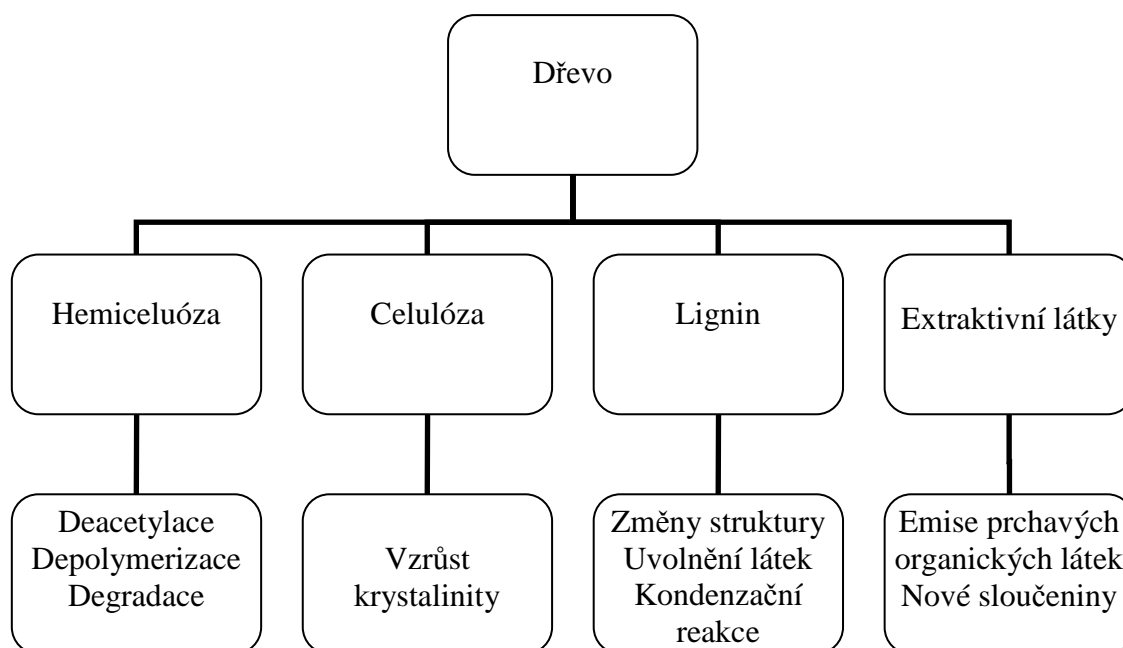
Smrk (*Picea abies*) - tepelně upravené dřevo smrku je lehké a snadno mechanicky opracovatelné a dobře se povrchově upravuje.

*Bříza (Betula pendula)* - odstín březového dřeva termicky ošetřeného vyššími teplotami napodobuje vzhled některých exotických dřevin. Velký počet suků ve dřevě vytváří široké spektrum odstínu. (www.prokom.cz)

Při tepelné úpravě dřeva se mění jeho mechanické a fyzikální vlastnosti, které úzce souvisí s chemickými změnami. (Kačíková, Kačík, 2011)

### 1.3.1. Vliv termických úprav na chemickou strukturu dřeva

Zvýšená teplota způsobuje chemické změny hlavních složek dřeva a extraktivních látek. Jejich rozsah závisí na délce působení teploty, při které se termická modifikace vykonává. Teplota se považuje za hlavní faktor chemických změn ve dřevě. Při teplotách 20°C až 150°C dochází k sušení dřeva, zde dřevo ztrácí vodu jak volnou tak i vázanou. V rozsahu teplot 180 až 250°C, které se obvykle používají na termickou úpravu dřeva, probíhají ve dřevě významné chemické změny. Při teplotách vyšších než 250°C začíná proces zuhelnatění, vzniká oxid uhličitý a další pyrolýzní produkty. Změny probíhající ve dřevě při tepelné modifikaci znázorňuje následující obrázek (obr. č. 2). (Kačíková, Kačík, 2011)



**Obr. 2** Chemické změny hlavních složek dřeva při termické úpravě (Kačíková, Kačík, 2011)

Hlavní složky dřeva jako jsou lignin, celulóza, hemicelulóza se působením tepla mění odlišně. Hemicelulózy jsou nejméně odolné vůči termickému rozkladu. Rozkládají se v teplotním intervalu 170-240°C. Celulóza a lignin jsou odolnější vůči vlivům teploty v porovnání s hemicelulózou. Rozklad celulózy je do teploty 250°C mírný, ale v teplotním rozsahu 250-330°C nastává její intenzivní termický rozklad. Lignin je

nejodolnější složka dřeva vůči termickému rozkladu. Aktivní rozklad ligninu probíhá při teplotě 300-400°C. Extraktivní látky se mění rychle vypařováním ze dřeva při ohřevu. (Reinprecht, Vidholdová, 2008; Kačíková, Kačík, 2011)

### **Hemicelulóza**

Jako první se z hlavních složek dřeva při termickém působení začínají měnit hemicelulózy a to už při relativně nízkých teplotách. Hemicelulóza je amorfní heteropolysacharid na stavbě, na kterém se podílí více typů monosacharidů. Degradace hemicelulózy probíhá v širším rozsahu teplot, intenzivněji od 170° do 280 °C. Termický rozklad začíná deacetylací, při které vzniká kyselina octová, metanol, furan a jiné monomerní látky. Kyselina octová působí jako katalyzátor depolymerizačních reakcí a dále urychluje rozklad polysacharidů. Monomery vzniklé při deacetylační reakci dokážou vstoupit při vysokých teplotách do kondenzačních reakcí za vzniku hydrofóbnějších substancí vzhledem k původní hemicelulóze, a to se odrazí v nárůstu hydrofobnosti dřeva a zlepšení rozměrové stability.

Následkem částečného odbourání hemicelulóz a jiných změn ve struktuře dřeva dochází k zvyšování finálního úbytku hmotnosti termodřeva, který se zvyšuje s nárůstem teploty a prodloužením času ohřevu. (Reinprecht, Vidholdová, 2008; Kačíková, Kačík, 2011)

### **Celulóza**

Celulóza jako nosná kostra buněčných stěn dřeva je odolnější vůči termickému působení v porovnání s hemicelulózami, a to v důsledku její krystalické struktury.

Při ohřívání celulózy v rozsahu teplot 120 až 350°C probíhají tři primární reakce: termooxidace, dehydratace a depolymerizace. Paralelní průběh těchto reakcí v značné míře ovlivňuje výsledek procesu. Záměrná termická degradace celulózy při teplotách v oblasti 170+/-60°C se spojí s dehydratačními a depolymerizačními reakcemi, které vedou k poklesu jejího průměrného polymerizačního stupně. Zasahované jsou zejména amorfní a méně krystalické zóny celulózy. Ohřevem dřeva se zjevně mění i vzájemný podíl krystalické a amorfní celulózy. Zkouškami bylo zjištěno, že při ohřevu dřeva na teploty cca 120-160C byl pozorován nárůst krystalického podílu a při vyšších teplotách a delším časem ohřevu následuje pokles krystalického podílu. Krystalický podíl výrazně narůstal v přítomnosti molekul vody. Změny v krystalickém množství celulózy jsou důležité s pohledu změn modulu pružnosti termicky modifikovaného dřeva, tj. modul pružnosti termodřeva se dá při některých technologiích výroby i zvětšit. Krystalická celulóza depolymerizuje patrněji až při teplotách mírně nad 300°C. Avšak i při

depolymerizačních procesech v lineárních řetězcích amorfni celulózy klesá tahová a ohybová pevnost a také jiné mechanické vlastností dřeva. Proto při výrobě termodřeva je tedy nutné potlačit všechny depolymerizační reakce v řetězcích celulózy, což se zajistí ohřevem dřeva v inertním prostředí dusíku, ve vakuu, nebo pod hladinou v rostlinných olejích. (Reinprecht, Vidholdová, 2008; Kačíková, Kačík, 2011)

### **Lignin**

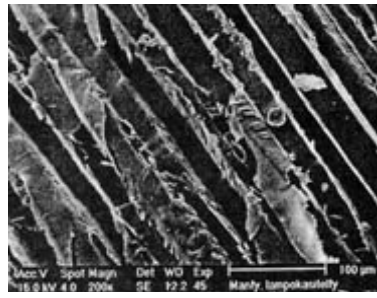
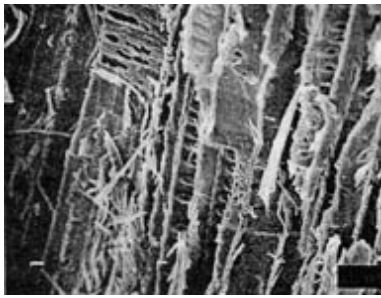
Lignin je důležitou stavební složkou dřeva, zabezpečující dřevnatění buněčných stěn dřeva a je nejodolnější složkou dřeva vůči tepelnému působení. Není to ze strany fyzikálních změn, kde lignin snadno přechází do plastifikačního stavu, ale ze strany chemických změn, kde jeho kovalentní vazby ukazují nejlepší odolnost vůči termolýze a termooxidace. Chemické reakce v molekulách ligninu se uskutečňuje při teplotách 180-260°C. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

### **Extraktivní látky**

Podléhají také různým fyzikálním, fyzikálně-chemickým a chemickým změnám vlivem zvýšených teplot. Většina tukových, voskových a pryskyřičných látek se při ohřevu dřeva dostávají do kapalného a plynného stavu a migrují k jeho vnějšímu povrchu. Vlivem vysokých teplot se některé extraktivní látky přeměňují na prchavé organické komponenty a ze dřeva se vypařují. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

### **1.3.2. Anatomické změny**

Působení zvýšených teplot na dřevo, případně vlhkostní a jiné napětí vzniklé v buněčných stěnách dřeva v rozsahu teplot 100 až 260°C způsobuje výrazné změny v anatomickém složení strukturních elementů. Jedná se hlavně o vznik trhlin v buněčných stěnách. Současně se mění i tloušťka buněčných stěn a nezřídka i jejich pórovitost. Při experimentu na ohřev borovicového dřeva při teplotě 275°C po dobu 15 minut (Gosselink et al., 2004) byla pozorovaná změna struktury dřeva a významné vzrůstání počtu a velikosti pórů. (Reinprecht, Vidholdová, 2008; Kačíková, Kačík, 2011)  
Petrný mikroskopický rozdíl přírodního a tepelné ošetřeného dřeva borovice znázorňuje následující obrázek č. 3.



**Obr. 3** Mikroskopická struktura dřeva: a) rostlé dřeva borovice; b) termodřevo borovice (ThermoWood Handbook, 2003)

## 1.4 Vliv termických úprav na vlastnosti dřeva

Cílenými termickými úpravami dřeva, které se realizují obvykle v prostředí omezeného přístupu vzduchu, v dusíku, v přítomnosti vodní páry, v olejích nebo v jiných kapalinách, se připravují materiály typu ThermoWood, PlatoWood, OHT-Wood a jiné. Kromě chemických změn, ke kterým dochází v průběhu zpracování, se výrazně snižuje schopnost rozměrových změn při změnách vlhkosti. Tím se zásadně zlepšuje rozměrová stálost dřeva. V důsledku rozkladu hemicelulóz dřevo už neobsahuje dostatečné množství výživných látek pro podporu růstu houby způsobujících hnilobu. Schopnost tepelně ošetřeného dřeva přijímat vodu je výrazně omezená, díky čemuž se dřevo stává rezistenčním proti všem škůdcům a hnilobám. V průběhu zpracování dřevo získá zajímavou barvu. Všechny tyto změny provázeny obvykle mírným poklesem pevnosti. (Kačíková, Kačík, 2011)

### 1.4.1. Fyzikální vlastnosti termodřeva

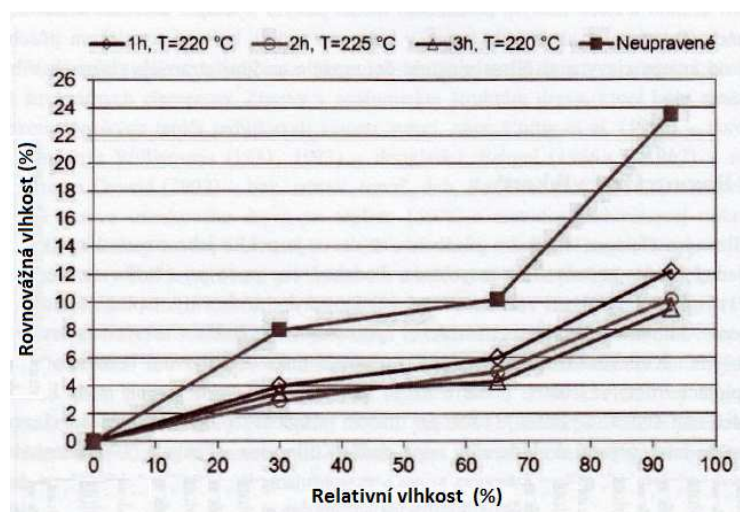
Při výrobě termodřeva je důležité jak se změní jeho hygroskopicitu, rozměrová stabilita, hustota a barva. Důležité jsou také změny jeho tepelně-izolačních a akustických vlastností.

#### Hygroskopicitu

Hygroskopicitu jako velmi důležitá vlastnost dřeva má vliv na jeho rozměrovou stálost a rezistenci proti biologickým škůdcům. Je to schopnost dřeva přijímat a odevzdávat vodu do okolního vzduchu při určité rovnovážné vlhkosti a teplotě vzduchu. Hygroskopicitu reprezentuje rovnovážnou vlhkost dřeva a je hlavním efektem tepelného působení na dřevo. Dřevo upravené vysokými teplotami má menší hygroskopicitu v porovnání s neupraveným rostlým dřevem (obr.č. 4). Výraznější pokles



hygroskopie nastává při vyšších teplotách a při delším času působení a také je závislý od druhu dřeva.



**Obr. 4** Změny obsahu rovnovážné vlhkosti při působení teplot 220-225°C po dobu 1-3h a při různých vlhkostech (Kačíková, Kačík, 2011)

Z obrázku je vidět že tepelné působení redukuje obsah rovnovážné vlhkosti dřeva a při vysokých teplotách (220°C) klesá jeho hodnota přibližně na polovici oproti neupravenému dřevu. Rozdíl je větší v případě vyšší relativní vlhkosti. (Kačíková, Kačík, 2011; Reinprecht, Vidholdová, 2008)

### **Rozměrová stabilita**

Pokles rovnovážné vlhkosti dřeva po termickém působení vede ke zlepšení jeho rozměrové stability, což znamená, že při změnách relativní vlhkosti vzduchu se jeho rozměry mění méně v porovnání s přírodním dřevem. Rozměrová stálost závisí na druhu dřeva a na anatomickém směru. Vzrůst rozměrové stability v tepelně ošetřeném dřevě je způsoben zejména poklesem hygroskopie v důsledku chemických změn při zvýšené teplotě. Není možné však vyloučit ani jiné vlivy, jako tvorba esterových a éterových příčných vazeb v ligninu, respektive mezi ligninem a hemicelulózou, díky kterým se struktura buněčných stěn termodřeva stává odolnějším vůči vstupu molekul vody.

Na základě uskutečněných experimentů ohřevu dřeva na teploty 150-300°C v atmosféře vzduchu nebo dusíku se dá říci, že maximální hodnoty rozměrové stálosti dřeva dosáhnou při 15-20% úbytcích hmotnosti. Různé druhy termodřeva se v daném smyslu výhodně používají tam, kde se vyžaduje snížené vlhkosní použití dřevařských

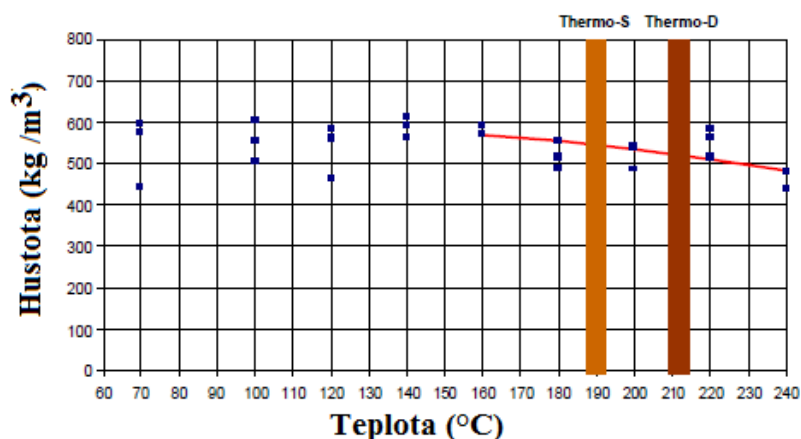
výrobků, jako například parkety v interiéru nebo terasové podlahy v exteriéru. (Kačíková, Kačík, 2011; Reinprecht, Vidholdová, 2008)

### Hustota

Úbytek hmotnosti dřeva při jeho termické úpravě je jednou z nejdůležitějších charakteristik. Podle více autorů závisí úbytek hmotnosti při termickém působení na druhu dřeviny, prostředí, teploty a času ohřevu. Zaman et al. (2000) při úpravě březového dřeva zjistil úbytek hmotnosti mezi 6,4% (4 h) a 10,2% (8h) při teplotě 200°C, a 13,5% (4h) a 15,2% (8h) při teplotě 220°C. (Kačíková, Kačík, 2011) Při stejných podmínkách termického působení byl zjištěný větší úbytek hmotnosti pro listnatou dřevinu než pro jehličnatou.

Na mírném poklesu hustoty termodřeva se odrazí to, že při termických úpravách se určité složky dřeva odbourávají a tím objem dřeva se zmenšuje, ale méně než jsou jeho příslušné úbytky hmotnosti. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

Níže uvedený obrázek ukazuje závislost úbytku hustoty od teploty a času ohřevu. Dlouhodobé působení zvýšených teplot způsobí značný úbytek hustoty dřeva.



**Obr. 5** Závislost změny hustoty termicky upraveného borovicového dřeva od teploty 160°C až 240°C po dobu působení 3 hodiny (ThermoWood Handbook, 2003)

### Barva a vůně

Termodřevo má specifickou barvu a vůni. Vlivem vysokých teplot se dřevo rovnoměrně zbarvuje do žlutohnědých až hnědočerných odstínů. Čím vyšší teplota a čas ohřevu tím tmavší barvu bude dřevo mít (obr. č. 6). Dřevo se zbarvuje po celém průřezu a též při mechanickém opracování (řezání, hoblování, frézování nebo broušení) si zachovává svůj původní kakaový, kávový nebo jiný odstín. Barva termicky upraveného dřeva se často podobá některým tropickým druhům dřeva (merbau, eben, teakové dřevo). Z hlediska praxe je důležitá otázka stability barevného odstínu termické

upraveného dřeva. Dlouhodobé testy přirozeného stárnutí termodřeva v povětrnostních podmínkách ukázali, že jeho barevnost není trvalá, tj. časem šediví a bledne.

Při termické úpravě dřeva se tvoří prchavé organické produkty vznikající rozkladem hemicelulóz a kvůli tomu dřevo získává charakteristickou vůni. Toto je někdy překážkou jeho širšího uplatnění v interiéru. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)



**Obr. 6** Barevný rozdíl rostlého (nahore) a tepelně upraveného dubového dřeva (*Quercus*) a změny barvy při teplotě od 160°C do 240°C (autor)

### **Tepelně-izolační a akustické vlastnosti**

Tepelná vodivost u termické modifikovaného dřeva se zmenšuje o 10 až 30%. To je výhodné při použití termodřeva pro okna, obklady budov a také sauny.

Tepelně upravené dřevo disponuje zajímavými akustickými vlastnostmi, které se často podobají dřevu vzácných historických hudebních nástrojů, což se využívá i při jejich restaurování. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

### **1.4.2. Mechanické vlastnosti termodřeva**

Mechanické vlastnosti termodřeva se ve většině případů zhoršují (rázová houževnatost, pevnost, tvrdost), což je jeho nevýhodou a omezujícím faktorem pro jeho aplikace jako konstrukčního a stavebního materiálu. Avšak ošetřením při nižších teplotách některé z mechanických vlastností jako modul pružnosti a případně tvrdost se můžou i zlepšit, ale za tvrdších podmínek se začínají zhoršovat. Dříve provedené experimenty ukázaly, že při tepelné úpravě borovicového dřeva došlo k mírnému vzrůstu modulu pružnosti při úbytku hmotnosti 4%, ale při vyšších teplotách, času

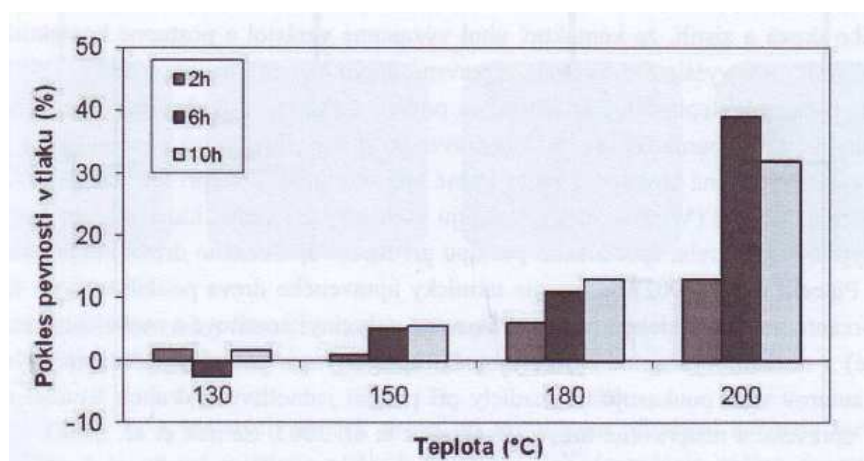
ohřevu a rovněž při odpovídajících vyšších úbytcích hmotností jeho hodnota klesala. Pokles rázové houževnatosti a pevnosti termicky upraveného dřeva (resp. při dlouhodobém působení teplot nad 160° poklesl modulu pružnosti) je obvykle výraznější vzhledem k poklesu jeho hmotnosti nebo hustoty.

Změny mechanických vlastností jsou závislé na obdobných faktorech, které způsobují změny v chemické struktuře dřeva a také působí na pokles jeho hmotnosti a hustoty. (Reinprecht, Termodrevo), (Kačík, Kacíkova)

### **Rázová houževnatost, pevnost a tvrdost**

Snížení houževnatosti a pevnosti tepelně modifikovaného dřeva se nachází v těsné závislosti na stupni degradace jeho stavebních složek. Procesy degradace hemicelulóz, změny krystalického a amorfního podílu celulózy, polykondenzační reakce v ligninu jsou hlavními faktory, ovlivňující pevnostní vlastnosti tepelně upraveného dřeva.

Pokles houževnatosti a pevnosti jsou hlavně ovlivněny podmínkami výrobního procesu (obr. č. 7). (Kačíková, Kačík, 2011; Reinprecht, Vidholdová, 2008)



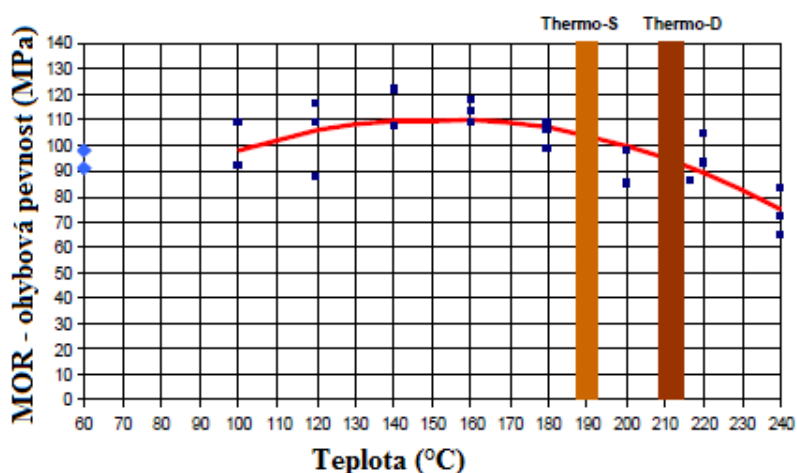
**Obr. 7** Pokles pevnosti v tlaku smrkového dřeva v závislosti na teplotě působení (Kačíková, Kačík, 2011)

- Rázová houževnatost dřeva po termické úpravě klesá, a termodřevo se stává zjevně křehčím. Zkouškami na ohřev dřeva při teplotě 300°C (Seborg a kol., 1953) bylo zaznamenáno výrazné snížení houževnatosti o 90% při 30% úbytcích hmotnosti. Později Reinprecht (1992) stanovil, že při tepelném působení  $T=210^{\circ}\text{C}$  na topolové dřevo po dobu 3 hodin rázová houževnatost v ohybu kleslá o 61% při úbytku hmotnosti 11,3%.

- Pokles ohybové pevnosti termodřeva je obvykle v rozsahu od 5 do 30%, někdy může být i vyšší. To ukazuje experiment, kde Bengtsoon a kol. (2002) zjistili značný

50% pokles ohybové pevnosti dřeva při jeho ohřevu na teplotu 220°C po dobu 5 hodin, v celkovém čase 4 dní s ohřevem a chlazením.

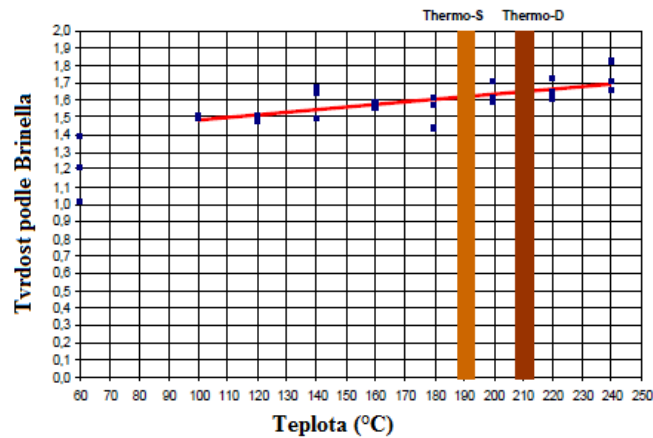
Tahová, tlaková a smyková pevnost dřeva se vlivem vysokých teplot také mění. Tahová pevnost klesá podobně jako pevnost v ohybu (obr. č. 8). Tlaková pevnost podél vláken při termické modifikaci při mírných podmínkách vzrůstá, ale se zvýšením teploty a doby působení začíná klesat (obr. č. 7). Při maximálním tlakovém zatížení na tepelně upravené dřevo bylo stanoveno, že tepelně upravené dřevo se rozpadlo na víc kusů, což ukazuje na jeho zvýšenou křehkost.



**Obr. 8** Změna ohybové pevnosti borovicového dřeva při teplotním zatížení od 60°C do 240°C (ThermoWood Handbook, 2003)

Vliv poklesu houževnatosti a pevnosti na technologický proces výroby termodřeva je velice důležitý jak pro spotřebitele, tak pro výrobce. Výrazné klesání pevnosti v ohybu a houževnatosti při tvrdších podmínkách termických modifikací o 30-50% se stává pro výrobky ze dřeva již nepřijatelným. V souvislosti s tím není doporučeno používat tepelně modifikované dřevo pro nosné konstrukce.

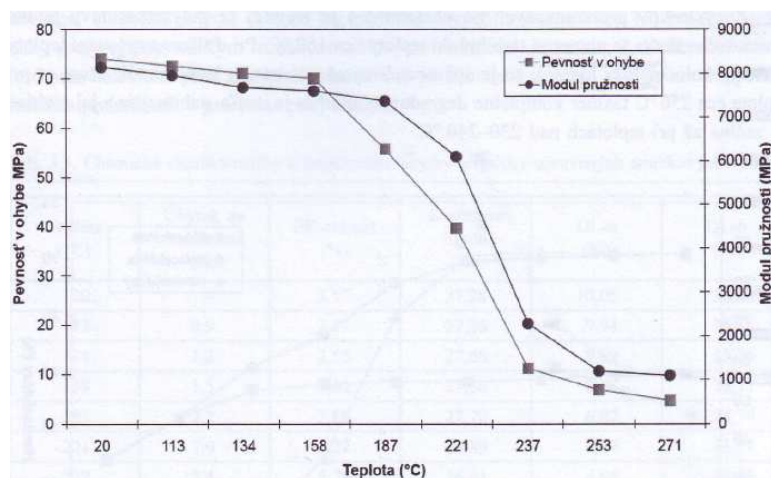
- Tvrdost dřeva se se zvyšující teplotou ohřevu v intervalu 100-240°C nemění, nebo někdy dokonce mírně narůstá, což z praktického pohledu je nepatrná změna. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)



**Obr. 9** Vliv teploty tepelné modifikace borovicového dřeva na tvrdost podle Brinella, délka působení-3 hodiny (ThermoWood Handbook, 2003)

### Modul pružnosti

Modul pružnosti se při krátkodobém ohřevu nižšími teplotami do 160°C zvyšuje. Ke snižování modulu pružnosti obvykle dochází při značném úbytku hmotnosti dřeva nad 6 až 8%. Při teplotě nad 160-190°C modul pružnosti dřeva klesá i při kratším času působení, avšak pozvolněji než pevnost dřeva (obr. č. 10). (Reinprecht, Vidholdová, 2008)



**Obr. 10** Změna pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v závislosti od teploty zatížení (Kačíková, Kačík, 2011)

### 1.4.3. Trvanlivost tepelně modifikovaného dřeva

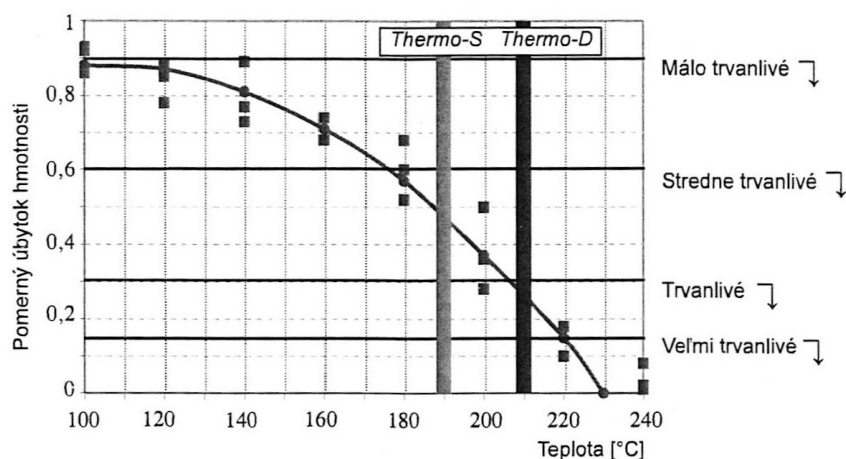
Podstatu pojmu trvanlivost tvoří především jeho rezistence proti napadení biologickými škůdci, dřevokazného hmyzu, plísní a houbami. Také pod tímto pojmem rozumíme odolnost proti klimatickým vlivům, požáru a mechanickému opotřebení. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

## Biologická odolnost

Význam biologické odolnosti termodřeva v praxi se těsně spojí s jeho expozičním zatížením. Různé druhy termodřeva patří k uznávaným kvalitním dřevěným materiálům, které jsou vhodné hlavně do 3 třídy ohrožení podle EN 335-1.

Podstata zvýšení biologické odolnosti termodřeva leží hlavně ve změnách jeho chemické struktury. Výraznější zlepšení odolnosti tepelně upraveného dřeva nastává při působení teplot v rozsahu 150-260°C. Odolnost vůči hnilobě a plísní má velký význam kdy vlhkost dřeva dosahuje mez nad 20%. Termodřevo je ve srovnání s neupraveným dřevem rezistentnější proti výše uvedeným biologickým činitelům. Dřeviny původně netrvanlivé nebo málo trvanlivé s třídou trvanlivosti 5 nebo 4 (podle EN 350-2) dosahují tepelnou úpravou zvýšení trvanlivosti na úroveň středně až velmi trvanlivé, což jsou 3 až 1 třídy trvanlivosti.

Tak například ohřevem běle borovice (Hanger a kol., 2002) s 5 třídou trvanlivosti na teplotu 200°C působící 4 hodiny získává dřevěný materiál, který splňuje kritéria 2 respektive 3 třídy trvanlivosti. Dalším příkladem je ThermoWood dřevo běle borovice, trvanlivost kterého se po úpravě teplotou 205°C stala porovnatelná s trvanlivostí tuje nebo tisu, respektive při použití ještě vyšších teplot nad 220°C se stává až velmi trvanlivým materiálem (obr. č. 11). (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

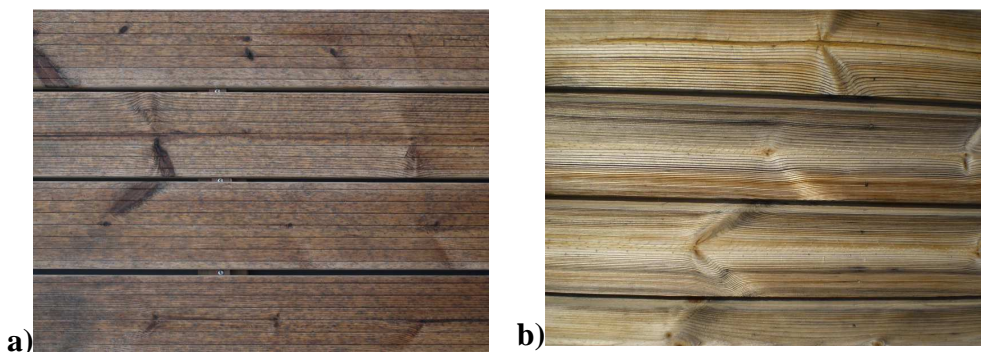


**Obr. 11** Zvýšení trvanlivosti ThermoWood dřeva vyrobeného z běle borovice při teplotách 100 až 240°C po dobu působení 3 h. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

## Odolnost proti povětrnostním vlivům

Povětrnostní odolnost termodřeva (vůči slunečnímu záření, kyslík, voda, emise, vítr, apod.) je závislá na určitých technologických podmínkách při výrobě.

Barva: termodřevo není nijak upravené ve smyslu ochrany proti UV záření, kyslíku a srážek. To způsobuje poměrně rychlou ztrátu původního odstínu. Barva se mění z hnědé na šedou (obr. č. 12). Celkový proces šednutí termodřeva v závislosti na několika faktorech probíhá 3-5 let. Tyto barevné změny však nemají vliv na odolnost materiálu vůči biologickým činitelům. Procesu přirozeného stárnutí termodřeva můžeme zabránit povrchovým ošetřením vhodnými ochrannými nátěry.



**Obr. 12** Změna barvy termodřeva: a) fáze začínajícího šednutí, b) fasádní obklad v průběhu stárnutí (www.prokom.cz)

Vlhkost termodřeva kvůli jeho nižší hygroscopicitě dosahuje nižší hodnoty vlhkosti než u rostlého dřeva a to podobu vnitřní i vnější expozice.

Trhlinky na povrchu termodřeva se jich vyskytuje méně, což vyplývá z jeho trvale nižší rovnovážné vlhkostí a lepší rozměrové stálosti. V termicky modifikovaném dřevě trhliny se netvoří více méně i tehdy když se materiál povrchově neošetřuje, což může být výhodné pro takové výrobky, jako jsou šindele, ploty, protihlukové bariéry apod. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

### **Protipožární odolnost**

Odolnost termodřeva vůči požáru je vcelku stejná jako odolnost původního neupraveného dřeva. Avšak hoření termodřeva probíhá s menší tvorbou dýmu než u rostlého. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

## **1.5. Technické vlastnosti termodřeva**

Technické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva jsou víceméně dobré. Ačkoli vlivem poklesu jejich hustoty, narušení hemicelulóz a zvýšení hydrofobnosti povrchů je třeba počítat se zhoršením některých z těchto vlastností.



## **Obrábění**

Obrábění termicky modifikovaného dřeva může být provedeno jak pomocí strojního zařízení, tak i běžným ručním způsobem. Avšak při opracování termodřeva nástroje musí být dobře naostřené (řezné plochy jsou hladší, a tím se snižuje řezná síla). Problém při obrábění termodřeva může tvořit vznik jemného prachu, který znečišťuje pracovní prostředí a může vyvolat zdravotní problémy obslužného personálu. Proto, aby nedošlo k vdechnutí tohoto prachu je nutné vzniklou frakci při obrábění termodřeva zachytávat pomocí speciálních odsávačů. Dalším nepříjemným faktem při obrábění termodřeva je specifický zápach, který vzniká uvolňováním aromatických látek. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

### Frézování

Při frézování termodřeva můžou vznikat trhliny, proto pro získávání lepšího obrobeneho povrchu, musejí bý řezné hrany nástroje musí být velmi dobře naostřené. Nejčastěji se trhliny tvoří při frézování dřeva příčně k vláknům. Největší komplikace související s tvorbou trhlín je na začátku a na konci frézování, kdy ostří frézy vystoupuje z obrobku. Opotřebením řezného nástroje při obrábění termodřeva je pomalejší v porovnání s původním dřevem. (ThermoWood Handbook, 2003)

## **1.6. Technologie výroby termodřeva**

Průmyslová výroba termicky modifikovaného dřeva známého pod názvem termodřevo se začala provádět v 90. letech 20. století. Jeho výroba byla zavedena ve více státech západní Evropy jako reakce na legislativní změnu, která se týká chemické ochrany dřeva. Proces výroby termodřeva je ekologicky nezávadný jelikož probíhá bez přídavku jakýchkoliv chemických prostředků a za použití pouze tepla (resp. i vodní páry nebo rostlinného oleje).

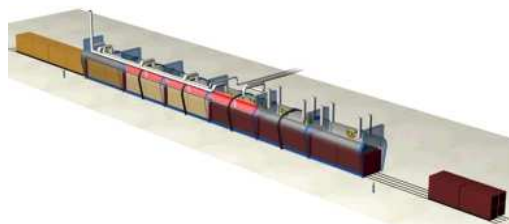
V současnosti má největší komerční význam zejména pět různých modifikací:

- Příprava v atmosféře vzduchu (ThermoWood® - Finsko)
- Příprava v prostředí vodní páry (Plato®Wood- Holandsko)
- Příprava v prostředí inertních plynů (RetificatedWood - Francie)
- Příprava v olejích (OHT-Wood, RoyalWood - Německo)

(Reinprecht, Vidholdová, 2008)

### 1.6.1 Termodřevo připravované v atmosféře vzduchu (ThermoWood®)

ThermoWood se vyrábí tepelným zpracováním při teplotách 160 až 240°C. Celý proces zpracování dřeva na termodřevo (ThermoWood) – od sušení až po konečné zvlhčení tvoří jeden souvislý řetězec událostí. Výrobní proces zahrnuje šest kroků a výrobní zařízení představuje šest oddělených komor, kterými dřevo přechází (obr. č. 13). Vstupní surovinou na výrobu ThermoWoodu je zpravidla borovice nebo smrk.



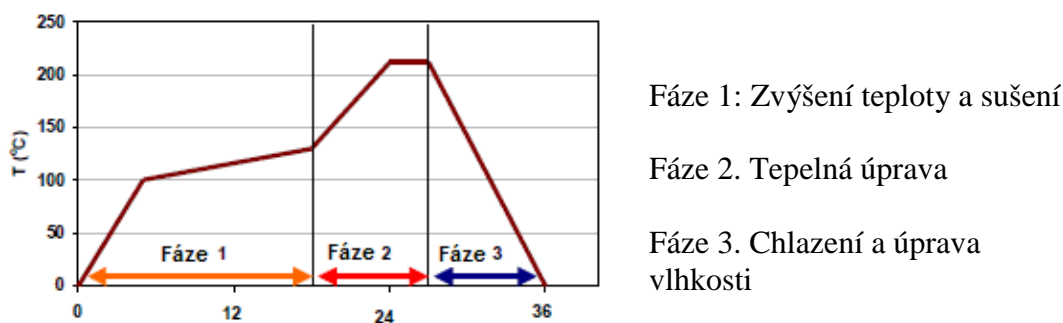
**Obr. 13** Výrobní zařízení na přípravu ThermoWoodu ([www.prokom.cz](http://www.prokom.cz))

V prvních třech krocích se řezivo suší a připravuje pro vlastní fázi tepelného zpracování, které se uskutečňuje v následujícím kroku. Poslední dva kroky slouží na chlazení, zvlhčení, provzdušení a konečnou klimatizaci upravovaného dřeva. Klimatizace poté pokračuje v teplých zastřešených prostorech po dobu 24 až 48 hodin. (Kačíková, Kačík, 2011)

Samotný proces tepelného zpracování můžeme rozdělit do tří hlavních etap:

- 1) Zvýšení teploty a sušení – V první etapě probíhá vysokoteplotní sušení dřeva, za působení vodní páry. Proces začíná rychlým vzrůstem teploty na 100°C, potom následuje pozvolné zvyšování na hodnotu 130°C. Jako sušící médium se používá horký vzduch nebo horká pára. Během této etapy se dřevo vysuší téměř na nulovou vlhkost.
- 2) Tepelná úprava – V této etapě dochází k samotnému tepelnému zpracování, teplota je zvyšovaná na úroveň 185 až 230 °C a udržována po dobu 2 – 3 hodin. Výška teploty a čas působení závisí na požadavky klasifikační třídy ThermoWoodu (Thermo-S nebo Thermo-D)
- 3) Chlazení a úprava vlhkosti – Závěrečná třetí etapa slouží ke konečné normalizaci dřeva. Tepelně upravené dřevo postupně ochlazuje a při teplotě 80–90 °C se vlhkostně stabilizuje. Ve finálu úpravy by měla být konečná vlhkost dřeva na úrovni 4 – 7 %. (Kačíková, Kačík, 2011; Reinprecht, Vidholdová, 2008)

Průběh procesu výroby termodřeva je zobrazen na obrázku č. 14



Obr. 14 Proces výroby ThermoWoodu (ThermoWood Handbook, 2003)

### 1.6.2 Termodřevo připravované v prostředí vodní páry (Plato®Wood)

Proces aplikovaný v Holandsku používá čerstvé dřevo a probíhá při poměrně nízkých teplotách v prostředí vodní páry za zvýšeného tlaku. Výrobní proces probíhá za působením normálního a zvýšeného tlaku. Doba trvání procesu je závislá na druhu, tloušťce a celkovém tvaru dřeva. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

Proces se skládá z následujících etap:

- 1) Hydrotermolýza – Tato etapa se uskutečňuje v tlakové nádobě, kde vstupní surovina (čerstvé nebo suché dřevo) hydrotermicky upravuje při teplotách 150-190°C a při zvýšeném tlaku 0,6-1MPa po dobu 4-5 hodin. Hydrotermická úprava se realizuje pomocí horkého vzduchu u čerstvého dřeva, nebo vodní páry u suchého dřeva. Vlhkost suchého dřeva se téměř nemění a pohybuje v rozsahu 14 – 20 %.
- 2) Sušení – Na druhé etapě se dřevo suší konvenčním způsobem 3 až 5 dní na vlhkost přibližně 10%.
- 3) Vytvrzování – Třetí etapou dřevo se stabilizuje tzn. probíhá jeho vytvrzení, kde dřevo se zase zahřívá na 150-190°C. Stabilizace trvá 12 až 16 hodin při tlaku 0,1MPa ale bez přítomnosti vlhkosti. Účinkem těchto parametrů probíhá vzájemné zesíťování molekul ligninu za pomoci produktů rozkladu hemicelulóz. V této fázi vlhkost dřeva klesá pod 1 %.
- 4) Kondenzování – Závěrečnou etapou se dřevo klimatizuje na běžnou vlhkost na hodnotu 4 – 6 %. Doba působení závisí od druhu dřeva, tloušťky a od finálního použití a trvá přibližně 3 dny.

PlatoWood dřevo se vyrábí obvykle ze smrku, borovice, douglasky, topolu a břízy. Uplatňuje se hlavně v exteriéru. Má asi o 50% lepší rozměrovou stálost, o 30-

40% nižší hygroskopicitu a částečně zlepšenou trvanlivost vůči biologickým škůdcům. Jeho ohybová pevnost však klesá o 5-20% a modul pružnosti se víceméně zachovává nebo mírně roste o 0-10%. (Kačíková, Kačík, 2011; Reinprecht, Vidholdová, 2008)

### **1.6.3. Termodřevo připravované v prostředí inertních plynů (RetificatedWood)**

Při retifikačním procesu se používá dřevo s 12% vlhkostí a zpracuje se v jedné fázi při teplotách 200°C až 260°C v prostředí dusíku (maximální podíl kyslíku 2%). Dřevo se při tomto procesu mírně pyrolyzuje. Termooxidační reakce ve dřevě se odehrává v menší míře, čímž si zachovává svou pevnost. (Kačíková, Kačík, 2011; Reinprecht, Vidholdová, 2008)

### **1.6.4. Termodřevo připravované v olejích (OHT-Wood)**

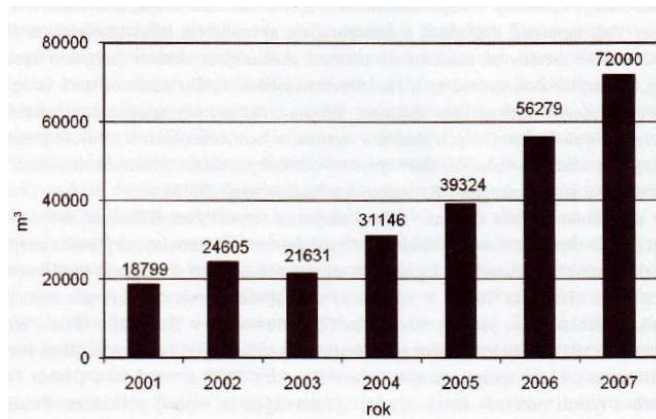
Proces OHT se provádí v impregnačních kotlích při vysokých teplotách za použití oleje. Vstupní surovinou je čerstvé dřevo, které se při zpracování ohřívá při teplotách 180-200°C po dobu 2 až 4 hodin. Olej umožňuje dobrý ohřev a omezuje přístup kyslíku, čímž se v něm omezují nežádoucí termooxidační procesy, ale na druhou stranu způsobuje zvýšení hmotnosti o 50 až 70%, co je při některých aplikacích nevýhodné. Další nevýhodou je to, že často používaný lněný olej má nepříjemný zápach. (Kačíková, Kačík, 2011; Reinprecht, Vidholdová, 2008)

## **1.7. Klasifikace termodřeva a jeho aplikace**

Různými technologiemi tepelné modifikace dřeva můžeme připravit termodřevo s „požadovanými vlastnostmi“, tedy je možné úroveň zpracování optimalizovat přesně podle konečného účelu použití.

### **1.7.1. Klasifikace termodřeva**

Na trhu je široká nabídka různých druhů „Termodřeva“, například termicky modifikované dřevo vyráběné v Holandsku pod názvem Plato<sup>®</sup>Wood, Plato<sup>®</sup>Hout popřípadě Platonium<sup>®</sup>. Avšak Finská technologie nazývaná Termodřevo (ThermoWood) je nejúspěšnější v Evropě a v roce 2007 reprezentovala přibližně 90% z celkového množství výroby tepelně upraveného dřeva (obr. č. 15).



**Obr. 15** Nárůst prodeje termicky upraveného dřeva Thermowood v rocích 2001-2007 (Kačíková, Kačík, 2011)

Dřevo s označením ThermoWood<sup>®</sup> tepelně upravené finskou technologií zahrnuje dvě hlavní kategorie samostatně pro listnaté a jehličnaté dřeviny nazvané: Thermo-S („Stabilita“) a Thermo-D („Odolnost“). Tyto třídy jsou odlišné v technologických parametrech jejich výroby (teplota, čas) a následně v doporučeném použití. Pro aplikaci v exteriéru, kde je důležitá vysoká odolnost a stabilita je doporučeno použití termodřeva třídy Thermo-D. Pro interiéry kde je požadována stabilita materiálu a vzhled je vhodné použití termodřeva třídy Thermo-S. (Kačíková, Kačík, 2011; Reinprecht, Vidholdová, 2008)

Změny základních vlastností dřeva způsobené vlivem tepelného zpracování a příklady použití termicky modifikovaného dřeva ThermoWood<sup>®</sup> dle kategorie výrobků jsou uvedeny v tabulce č. 1

**Tab. 1** Změna vlastností a příklady použití termicky modifikovaného dřeva ThermoWood® typu Thermo-S a Thermo-D (Reinprecht, Vidholdová, 2008; www.prokom.cz)

<b>Dřevina</b>	<b>Vlastnost</b>	<b>Thermo-S</b>	<b>Thermo-D</b>
<b>Jehličnaté dřeviny</b> (borovice, smrk)	Teplotní zpracování	190 ± 3 °C	212 ± 3 °C
	Odolnost proti povětrnosti	+	++
	Třída trvanlivosti	3	2
	Rozměrová stabilita	+	++
	Pevnost v ohybu	Beze změny	-
	Tmavost barvy	+	++
	<b>Doporučené účely použití</b>		
	- Interiérové konstrukční prvky - Nábytek - Obklady - Okna a dveře - Podlahy - Sauny	- Konstrukce do exteriéru - Obklady - Dlažby - Sauny a koupelový nábytek - Zahradní nábytek - Dětské hřiště - Protihlukové bariéry	
<b>Dřevina</b>	<b>Vlastnost</b>	<b>Thermo-S</b>	<b>Thermo-D</b>
<b>Listnaté dřeviny</b> (bříza, osika)	Teplotní zpracování	185 ± 3 °C	200 ± 3 °C
	Odolnost proti povětrnosti	+	+
	Třída trvanlivosti	4	3
	Rozměrová stabilita	+	+
	Pevnost v ohybu	Beze změny	-
	Tmavost barvy	+	++
	<b>Doporučené účely použití</b>		
	- Interiérové konstrukční prvky - Nábytek - Podlahy - Vybavení sauny	Účely použití jsou stejně jako u Thermo-S. Využívá se při požadavku na tmavší barvu.	
<b>Poznámky:</b> „+“ - zlepšení vlastnosti “-“ - zhoršení vlastnosti			

## 1.7.2. Aplikace termodřeva

Všeobecně platí, že termodřevo patří k perspektivním dřevěným materiálům, který má potenciál nahradit jednak trvanlivé a tvarově stabilní tropické dřeviny, a jednak i dřevo dosud chemicky ošetřené různými biocidy. Musíme však zdůraznit, že v současnosti vybrané druhy termické modifikovaného dřeva ne vždy splňují vysoké požadavky na materiál určené do náročných exteriérových expozic v trvalém kontaktu s terénem nebo vodou (tj. nedoporučuje se pro 4. a 5. třídy ohrožení podle EN 335-1). Také se doporučuje nepoužívat termodřevo v základových podzemních aplikacích, kde je nutná konstrukční pevnost. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

### Tepelně modifikované dřevo v interiérech

V interiéru se dá termodřevo použít na parkety, obklady, kuchyňský a koupelový nábytek, vnitřní panely a lavičky v saunách někdy i na hudební nástroje. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)



**Obr. 16** Ukázka použití termodřeva v interiéru – na podlahy a do saun (www.novawood.com.tr; www.swm-wood.com)

### Tepelně modifikované dřevo v exteriérech

Zlepšené vlastnosti termicky upraveného dřeva jako zvýšená trvanlivost a rozměrová stálost dělá tento materiál excelentním pro jeho aplikace i v exteriérech. V exteriérech je však vhodné zejména do 3. třídy ohrožení bez trvalého styku s terénem pro obklady vnějších fasád, zahradní nábytek izolovaný od terénu například plastovými

podložkami, oplocení nad úrovní terénu. Případně někdy do 4. třídy ohrožení – pro terasy, dětské hřiště, protihlukové bariéry



**Obr. 17** Ukázka použití termodřeva v exteriéru – na zahradní nábytek, na obklady vnějších fasád (www.thermowood.fi; www.prokom.cz)

## 2. Frézování

Frézovací stroje obrábí dřevo a dřevěné materiály otáčejícím pohybem nástroje, který je upnutý v mechanismu hlavního pracovního pohybu (hřídel, hlava, vřeten, atd.), technologickými způsoby, zabezpečujícími materiálu požadované rozměry a kvalitu povrchu. Tato jejich univerzálnost jím dává široké možnosti uplatnění v dřevozpracujícím průmyslu. (Barcík, 2009)

### 2.1. Frézování dřeva

Frézování je výrobní metoda, při níž se odebírá materiál obrobku zuby (noži) nástroje otáčejícího se kolem pevné osy. Posuv dílců přitom probíhá převážně ve směru kolmém k této ose. Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky. Kde se nominální tloušťka třísky mění od nuly do maxima. Možnost mnohostranné aplikace a přesnost frézování jsou hlavní příčinou jeho rozšíření v praxi. (Vigner, 1984; Barcík, 2013)

Účel frézování - je mechanické povrchové opracování dílce řezáním, charakteristickým třískotvorným procesem, pomocí čehož se docíluje:

- dosažení hladkého povrchu a přesných rozměrů výrobku → srovnávačky, tloušťkovačky



- vytvoření tvarových ploch → spodní frézy, vrchní frézy, třístranky, čtyřstranky. (Prokeš, 1982)

## 2.2. Rozdělení procesu frézování.

V průběhu obrábění materiálu frézováním dochází k interakci otáčejícího se nástroje (frézy, frézovací hlavy apod.) a obrobku, které mají vůči sobě odlišné rychlosti. Rychlost posuvu dílce je několikanásobně menší, než obvodová rychlost nástroje. Vzhledem k rotačnímu pohybu řezné hrany a přímočarému rovnoměrnému pohybu obrobku je výsledný pohyb řezné hrany cykloidní.

**Podle orientace pohybu nástroje a obrobku rozdělujeme frézování:**

1) *protiběžné (nesousledné)* - nástroj vykonává otáčející se pohyb proti směru pohybu obrobku. Obrobená plocha vzniká při vnikání nástroje do obrobku. Průřez odebrané vrstvy materiálu postupně narůstá z nulové hodnoty na maximální. K odříznutí třísky dochází až po určitém skluzu řezné hrany po ploše vytvořené předcházejícím záběrem zubu. Přitom vznikají silové účinky a deformace způsobující zvýšené opotřebení břitu. Složka řezné síly působí nepříznivě, protože směřuje nahoru a odtahuje obrobek od upínacího stolu. Většinou při se obrábění dřeva frézovací nástroj otáčí proti směru posuvu.

2) *souběžné (sousledné)* - nástroj se otáčí ve směru pohybu obrobku. Průřez odebírané vrstvy materiálu narůstá na maximální hodnotu a potom postupně klesá až na nulovou hodnotu. Obrobená plocha se vytváří ve chvíli, kdy zub frézy vychází ze záběru. Řezné síly působí obvykle směrem dolů. (Vigner, 1984; Barčík, 2013)



**Obr. 18** Kinematické varianty frézování a) protiběžné; b) souběžné (Lisičan, 2007)

### 2.3. Základní technologické způsoby frézování

Obrobek se v praxi při různých operacích frézuje ve všech směrech vzhledem k průběhu dřevních vláken, nejčastěji však ve směru podélném až podélně příčném.

**Podle tvaru hotového výrobku rozdělujeme čtyři základní technologické způsoby frézování:**

- Rovinné frézování („srovnávání“ a „tloušťkování“) – obrábění je prováděno nejčastěji válcovými nožovými hlavami a frézovacími kotouči, ale používají se také i kónické nožové hlavy, čelní frézy nebo stopkové frézy.

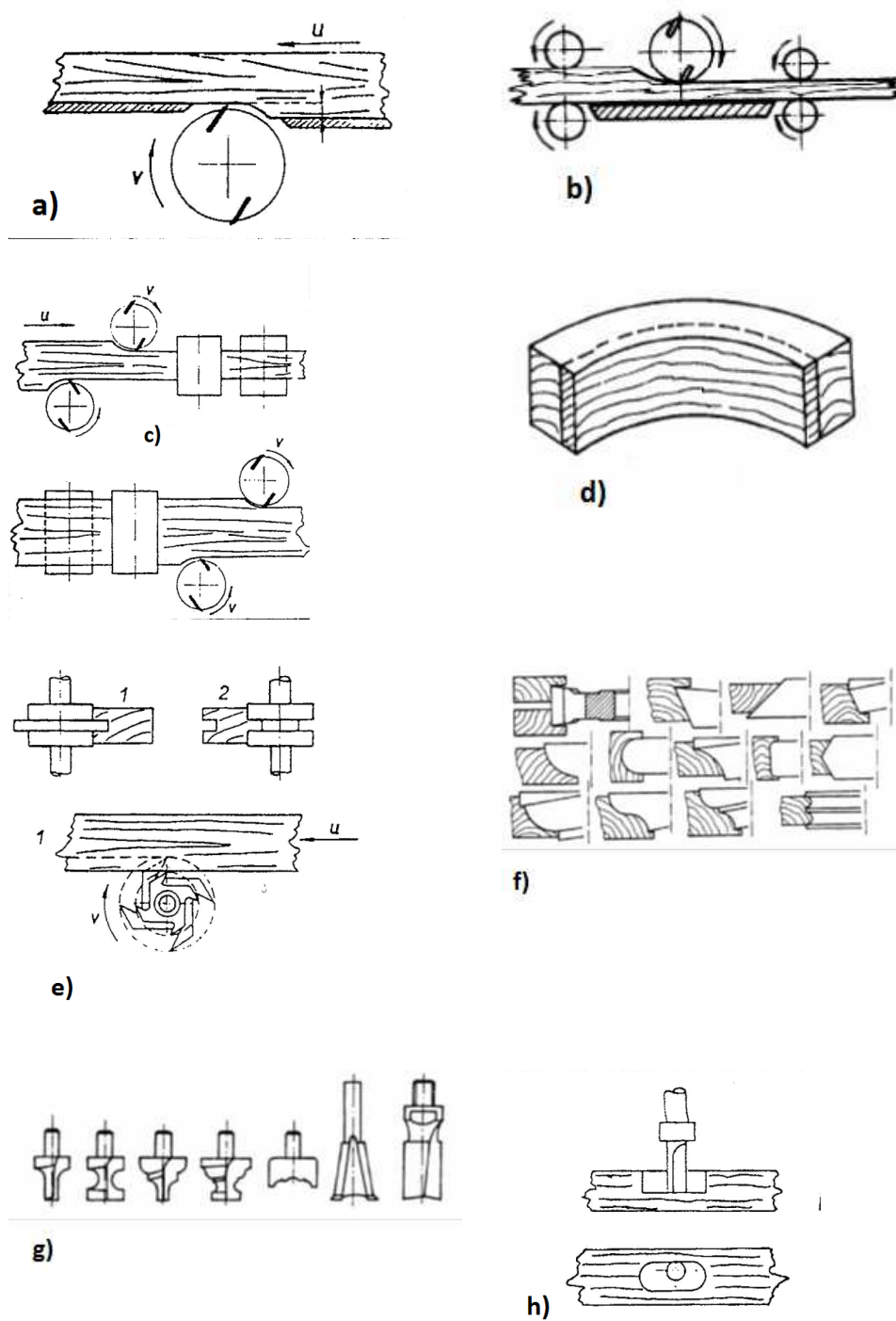
- „Srovnáváním“ nazýváme vytvoření jedné základní rovne plochy na křivém dílci, podle které je dílec v následující operaci frézování opracován na přesnou tloušťku.

- „Tloušťkování“ (=ofrézování dílce na přesnou tloušťku) je operace následující po srovnání jedné plochy dílce, který se položí na stůl a tloušťkovací nožová hlava upevněná nad stolem ofrézuje druhou plochu a egalizuje dílec na požadovanou tloušťku.

- Křivoploché frézování (frézování křivé plochy)-křivé plochy se frézují vedením dílce okolo kotoučové frézy pomocí šablony, naklánění zadního stolu na srovnávací frézece apod.

- Profilové frézování (vytváření různých profilů na dílci)- různé profily se na dílcích dosahují kotoučovými frézami s tvarovanými řeznými hranami, eventuálně soupravami jednoduchých frézovacích kotoučů, jako i stopkovými profilovacími frézami, řeznými hrany, které jsou tvarované podle požadovaného profilu na obrobku. Podle způsobu posuvu dílce se získá rovný nebo křivý profil.

- Speciální frézování -při speciálním frézování jako například tvorba reliéfů se používají téměř výlučně stopkové frézy. (Lisičan, 2007)

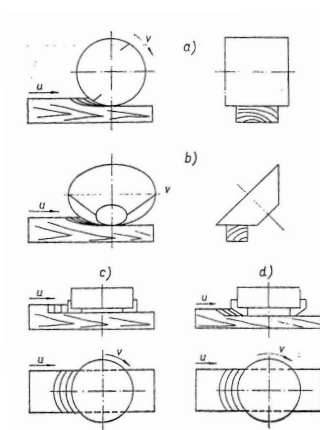


**Obr. 19** Hlavní druhy frézování a) srovnávání, b) tloušťkování, c) dvoustranné frézování, d) frézování křivé plochy, e) frézování pera a drážky, f) tvary řezné hrany na frézování profilů, g) stopkové frézy na frézování profilů, h) frézování vrchní frézou (Prokeš, 1982; Lisičan, 2007)

## 2.4. Druhy frézování

Podle polohy osy otáčení a podle ploch, které při frézování opisují břity nástroje, rozlišujeme následující druhy frézování:

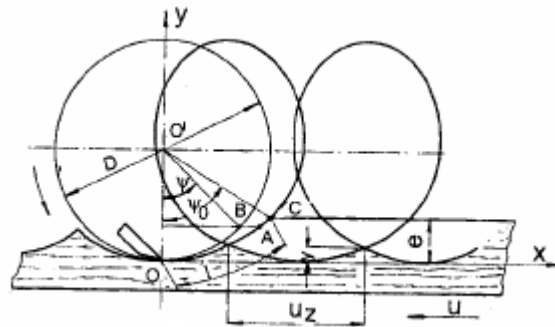
- Válcové frézování – nástrojem je válcová, případně tvarová fréza. Osa otáčení nástroje je rovnoběžná s obrobenou plochou, břity opisují válcovou plochu. Způsob vytváření této plochy a průběh tvoření třísky závisí na smyslu rotace frézy ke směru posuvu obrobku (protisměrné, sousměrné frézování).
- Kuželové – osa otáčení nástroje je skloněna pod určitým úhlem k obrobené ploše a břity opisují kuželovou plochu. Princip oddělování třísky je stejný jako u válcového frézování.
- Čelní – nástrojem je čelní fréza, která má řezné hrany na plášti i na čele. Osa otáčení nástroje je kolmá k obrobenému povrchu, břity opisují válcovou plochu. Boční břity pracují na principu válcového frézování, přibližně kolmo ke směru dřevních vláken. Čelní břity jsou rovnoběžné s obrobeným povrchem. Tloušťka třísky se zvyšuje od nuly směrem ke středu odebrané vrstvy a zmenšuje se na výstupu zubů nástroje z obrobku. Tento způsob frézování se používá u většiny tvarových a stopkových fréz.
- Čelně kuželové – osa otáčení je kolmá k obrobenému povrchu, avšak na rozdíl od předchozího způsobu jsou břity skloněny k obrobenému povrchu pod určitým úhlem. Břit může být přímý nebo zaoblený. (Prokeš, 1982; Barcík, 2013; Vigner, 1984)



**Obr. 20** Způsoby frézování podle polohy osy otáčení a podle tvaru ploch, které opisují břity nástroje a) válcové frézování, b) kuželové frézování, c) čelní frézování, d) čelně kuželové frézování (Prokeš, 1982)

## 2.5. Kinematické zákonitosti frézování

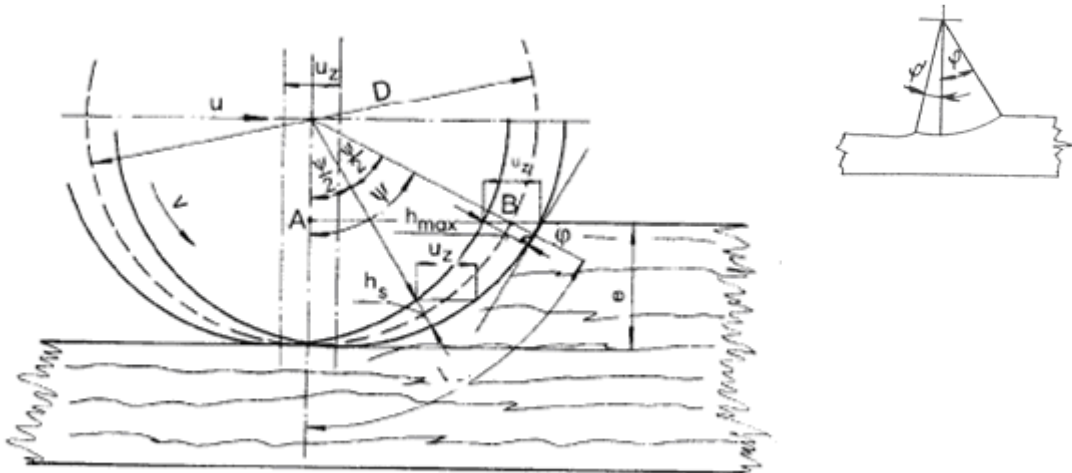
V procesu frézování nástroj uskutečňuje otáčivý pohyb a dráha ostří tvoří v obrobku cykloidu. Vznik cykloidy při frézování ukazuje obrázek č. 21. Jelikož řezná rychlost frézovacích nástrojů je v porovnání s rychlostí posuvu velká, můžeme předpokládat, že v úseku záběru dráha břitu opisuje kružnici. Kinematika oddělování třísky v průběhu frézování je znázorněna na obrázku č. 22. (Uhliř, 1987)



Obr. 21 Kinematické prvky protiběžného frézování, (Lisičan, 2007)

### 2.5.1. Proces oddělování třísky. Tvar a rozměry třísky.

Při válcovém frézování řezná hrana za jednu otáčku je v záběru na celé obloukové délce  $l$ , která připadá středovému úhlu  $\varphi + \varphi'$ . Úhel  $\varphi'$  je velmi malý, proto se při výpočtu délky třísky  $l$  většinou uvažuje úhel  $\varphi$ . (Barčík, 2009)



Obr. 22 Kinematický model obrábění válcovým frézováním (oddělování třísky)

$h_{max}$ -maximální tloušťka třísky,  $h_s$ -střední tloušťka třísky,  $V$ - směr otáčejícího pohybu nástroje,  $e$ - tloušťka odebrané vrstvy obrobku,  $D$ - průměr řezné kružnice. (Lisičan, 2007; Prokeš, 1982)

Z výše uvedeného obrázku je vidět, že přesunem středu řezné kružnice s průměrem  $D$  vzniknou dva kruhové oblouky ve výšce  $e$  (tloušťka odfrézované vrstvy), která tvoří plochu příčného průřezu třísky, objem třísky je zobrazen na obrázku č. 23 (Lisičan, 1988)



**Obr. 23** Profil třísky odřezané válcovou frézou (Lisičan, 2007)

V praxi se však skutečný průřez třísky může lišit od nominálního průřezu následujícími faktory:

- vlivem otupení břitu,
- nepřesnosti chodu vřetena,
- odchylek břitů od řezné kružnice,
- nepravidelnosti chodu podávacího zařízení
- vlivem odštipování a nesterodnosti hmoty obrobku. (Prokeš, 1982)

### 2.5.2. Kinematické prvky frézování

Patří sem následující prvky: řezná a posuvná rychlost, posuv na zub, rozměry třísky. (Lisičan, 1988)

- **Nominální délka třísky**

Délka třísky je daná délkou řezného oblouku. Její znalost je potřebná při analýze trvanlivosti řezné hrany. Čím je delší, tím je trvanlivost ostří za stejných podmínek kratší.

Při větších průměrech nástroje, malých tloušťkách odebírané vrstvy a malých posuvech se délka třísky určí ze vztahu:

$$l = 2R \sqrt{\frac{e}{R}} = \sqrt{e * D} \quad (\text{mm})$$

kde:  $e$  – tloušťka odebrané vrstvy obrobku (mm);

$D=2R$  – průměr řezné kružnice (mm).

Skutečná délka třísky je obvykle menší než délka teoretická vlivem deformace třísky a nesoudržnosti hmoty obrobku. (Lisičan, 2007; Prokeš, 1982; Barcík, 2009)

- **Střední nominální a maximální tloušťka třísky**

Tloušťka třísky je proměnlivá a se nachází v rozmezí od  $h = 0$  až  $h_{\max} < u_z$ .

- Střední tloušťku třísky můžeme vypočítat podle vzorce:

$$h_{str} = \frac{v_f * 1000}{n * z} \sqrt{\frac{e}{D}} \quad (\text{mm})$$

kde:  $e$  – výška úběru (mm)

$v_f$  – posuvná rychlost (mm)

$n$  – otáčky frézy ( $\text{ot.min}^{-1}$ )

$z$  – počet zubů (ks)

$D$  – průměr řezné kružnice (mm).

Účelem výpočtu tloušťky třísky je příprava podkladu pro aproximativní výpočty spotřeby energie na řezný proces.

- Maximalní tloušťka vzniká při výběhu řezné hrany ze dřeva a se vypočítá podle vzorce:

$$h_{\max} = \frac{2 * v_f}{D * n * z} \sqrt{e * (D - e)} \quad (\text{mm})$$

kde:  $e$  – výška úběru (mm)

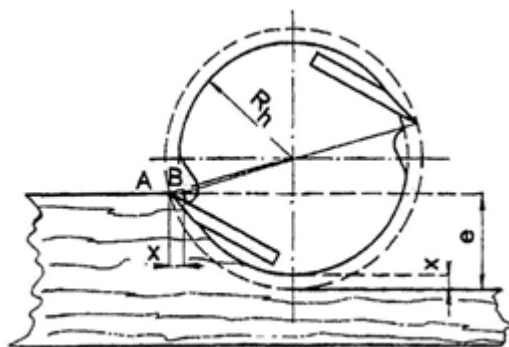
$v_f$  – posuvná rychlost (mm)

$n$  – otáčky frézy ( $\text{ot.min}^{-1}$ )

$z$  – počet zubů (ks)

$D$  – průměr řezné kružnice (mm).

S maximální tloušťkou třísky souvisí otázka osazení (přesahu) řezné hrany v nožové hlavě (obr. č. 24). (Lisičan, 1988; Barcík, 2009)



**Obr. 24** Vyčínívání řezné hrany v nožové hlavě (Lisičan, 2007)

- **Řezná rychlost**

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

kde:  $D$  – průměr řezné kružnice (mm)

$n$  – počet otáček za minutu (ot/min)

- **Posuvná rychlost**

$$v_f = \frac{f_z \cdot n \cdot z}{1000} \quad (\text{m/min})$$

kde:  $f_z$  – posuv na jeden zub (mm/zub)

$n$  – otáčky frézovacího nástroje (ot/min)

$z$  – počet zubů nástroje (-)

- **Posuv na zub**

$$f_z = \frac{v_f \cdot 1000}{n \cdot z} \quad (\text{mm})$$

kde:  $v_f$  – posuvná rychlost (m/min)

$n$  – otáčky frézovacího nástroje (ot/min)

$z$  – počet zubů (-)

(Prokeš, 1982)



### 3. Energetická náročnost procesu frézování

V praxi je velmi důležité, aby celý proces řezání dřeva probíhal s co nejmenšími nároky na energii (tedy energetickou náročností celého procesu). Na energetickou náročnost strojního zařízení má vliv více faktorů, jakými jsou například:

- Výběr vhodného materiálu rezného nástroje
- Jeho geometrie
- Optimální rezné podmínky (rezná rychlost, rychlost posuvu, posuv na zub)
- Řezný výkon

(Kováč, Mikleš)

Řezný výkon a příkon jsou základní kritéria při hodnocení dřevoobráběcích strojů. Prostřednictvím rezného výkonu je nejčastěji sledovaná energetická náročnost procesu řezání. (Siklienka, Kminiak, 2013; Barcík, Řehák, 2009)

- Řezný výkon

Je velmi důležitý faktor energetické náročnosti. Řezný výkon  $P_c$  je výkon, který na základě rezné síly je zapotřebí k tomu, aby bříty nástroje mohly odřezávat třísky. Jinými slovy je to výsledek skalárního součinu vektoru síly  $F_c$  a vektoru rezné rychlosti  $V_c$ .

$$P_c = F_c * V_c \quad (\text{W})$$

Řezný výkon můžeme definovat také jako množství práce vynaložené za jednu sekundu.

$$P_c = \frac{A_c}{t} \quad (\text{W})$$

kde:  $1 \text{ W} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

- Příkon motoru

Příkon motoru  $P_p$  je součin napětí, proudu a účinku  $\cos\varphi$ , tj. výkon odebraný ze sítě. Příkon je významný parametr nezbytný pro stanovení energetických nákladů a pro určení zatížení elektrických napájecích kabelů.

$$P_p = U * I * \cos\varphi \quad (\text{W})$$

kde:  $U$ -elektrické napětí (V);

$I$ -elektrický proud (A);

$\cos\varphi$ - účinek (-).

Jestliže je stroj zapojený v třífázové soustavě, příkon elektromotoru vypočítáme z následujícího vztahu, jako tři jednofázové zatížení:

$$P_P = U_R * I_R * \cos \varphi_R + U_S * I_S * \cos \varphi_S + U_T * I_T * \cos \varphi_T \quad (\text{W})$$

(Siklienka, Argay, 2012; Barcík, Řehák, 2009)

### **Při zkušebních měřeních se setkáváme s dvěma druhy příkonů:**

- Příkon motoru při volnoběhu  $P_{po}$  je tedy když stroj vykonává činnost bez zatížení (bez materiálu). Hodnota příkonu motoru při chodu naprázdno zahrnuje výkon potřebný k překonání elektromechanických ztrát motoru, ztrát v převodech a vedení stroje.
- Příkon motoru při technologické operaci  $P_{pr}$ , který se měří na stroji, který skutečně obrábí materiál. Tato hodnota překonává ztráty při volnoběhu motoru (uvedeno výše) a taky zahrnuje výkon, potřebný k vykonání samotné technologické operaci. (Barcík, Řehák, 2009)

V případě, kdy budeme znát hodnoty obou těchto příkonů a budeme akceptovat předpoklad, že absolutní ztráty v motoru stroje pracujícího naprázdno a při reálné práci jsou stejně velké, můžeme pro výpočet řezného výkonu použít následující vzorec:

$$P_c = \frac{P_{pr} - P_{po}}{\eta_c} \quad (\text{kW})$$

kde:  $\eta_c$  – celková účinnost stroje.

Celkovou účinnost najdeme ze vztahu:

$$\eta_c = \eta_{el} * \eta_{re}$$

kde:  $\eta_{el}$  – účinnost elektromotoru

$\eta_{re}$  – účinnost řemenového převodu

(Barcík, Řehák, 2009)

Při znalosti hodnoty řezného výkonu můžeme snadno spočítat i řeznou sílu, kterou musíme působit na nástroj, abychom překonali řezný odpor materiálu při oddělování třísky břitem.

$$F_c = \frac{P_c}{v_c} \quad (\text{N})$$

Řezný výkon má přímo úměrnou závislost od objemu dřeva, který se přemění na třísku v průběhu jedné sekundy. (Barcík, Řehák, 2009; Lisičan, 1988)

### 3.1. Metody výpočtu řezné síly a spotřeby energie

Přibližný výpočet řezné síly a spotřeby energie na proces můžeme určit následujícími způsoby:

a) Technologicko-fyzikálním způsobem určení měrného řezného odporu a v návaznosti určení řezné síly a řezného výkonu

b) Empiricko-statistickou metodou (Lisičan, 2007)

• **Technologicko – fyzikální způsob** - je založen na aplikaci běžných zákonů fyziky.

Řezný proces je procesem vzájemného působení mezi řezným klínem a dřevnou hmotou, která jeho vnikání klade odpor.

Řezná síla  $F_c$  je síla, kterou je nutno působit na řezací nástroj, aby se překonal odpor dřeva a odřezala se tříška. Aby k procesu odřezání třísky došlo, musí být síla  $F_c$  větší než je odpor dřeva, daný jeho mechanickými vlastnostmi.

Řezná síla a energie na řezný proces je podmíněná technologickými a technickými činiteli řezání. (Lisičan, 1988; Lisičan, 2007)

$$F_c = \frac{k_c * b * e * v_f}{60 * v_c} \quad (\text{N})$$

kde:  $F_c$  – řezná síla (N)

$k_c$  – řezná síla na jednotku plochy řezu (MPa)

$b$  – šířka řezné spáry

$e$  – řezná výška

$v_f$  – rychlost posuvu ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )

$v_c$  – řezná rychlost ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Důležitým parametrem řezného procesu je měrná řezná síla  $K_c$ , která je vyjádřena poměrem řezné síly k ploše příčného průřezu třísky. Hodnota  $K_c$  se nazývá měrným řezným odporem (sílu) a určí se z tabulkové hodnoty  $K_{cT}$  a jednotlivých faktorů vlivu podle vztahu:

$$k_c = k_{cT} * K_d * K_w * K_m * K_\delta * K_e \quad (\text{N} \cdot \text{mm}^2)$$

kde:  $K_d$  – faktor vlivu dřeva

$K_w$  – faktor vlivu vlhkosti

$K_m$  – faktor vlivu opotřebení

$K_\delta$  – faktor vlivu řezného úhlu

$K_e$  – faktor vlivu řezné výšky

(Lisičan, 2007; Lisičan, 1988; Barčík, Řehák, 2009)

Velikost měrné řezné síly udává obtížnost procesu řezání a je závislá na různých činitelích charakterizujících podmínky řezání: technických - vlivu parametrů procesu a nástroje, technologicko-řezných vlastností materiálu. (Kováč, Mikleš)

Z rovnice je vidět, že měrný řezný odpor je součinitel, vyjadřující vliv různých činitelů působících v řezném procesu na hodnotu specifického protitlaku dřeva na vnikající nástroj.

Řezný výkon je definován množstvím práce za jednu sekundu.

$$P_c = \frac{F_c * v_c}{1000} \quad (\text{kW})$$

kde:  $F_c$  – řezná síla (N)

$v_c$  – řezná rychlost (m.s<sup>-1</sup>)

(Lisičan, 2007; Lisičan, 1988; Barcík, Řehák, 2009)

Řezný výkon můžeme vypočítat také pomocí kroutícího momentu podle následujícího vztahu (Kováč, Mikleš):

$$P_c = \frac{2 * M_k * v_c}{D} \quad (\text{W})$$

kde:  $M_k$  – krouticí moment (N\*m)

$v_c$  – rezná rychlost (m\*s<sup>-1</sup>)

$D$  – průměr nástroje (mm)

- **Empiricko – statistická metoda**- pokusy vyjadřuje míru vlivu souboru různých samostatných činitelů procesu řezání na řeznou sílu exponenciální rovnicí.

**Řezna síla při podelném frézování:**

$$F_{r_{str}} = C_F h_{str}^{-0,51} \delta^{1,1} v^m w^{-0,23} \rho^{0,44} \varphi_{2_{str}}^{0,17} e^{0,8} \gamma_{\dot{s}p}^{1,43} bU \quad (\text{N}) \quad (*)$$

$$\text{při } v \leq 45 \text{ m/s} \quad C_F = 1\,126 * 10^{-6} \quad m = -1,37$$

$$\text{při } v > 45 \text{ m/s} \quad C_F = 5\,876 * 10^{-9} \quad m = 0,03$$

**Řezný výkon:**

$$P_r = C_F h_{str}^{-0,51} \delta^{1,1} v^k w^{-0,23} \rho^{0,44} \varphi_{2_{str}}^{0,17} e^{0,8} \gamma_{\dot{s}p}^{1,43} bU \quad (\text{kW}) \quad (**)$$

$$\text{při } v \leq 45 \text{ m/s} \quad C_F = 11,26 * 10^{-8} \quad k = -0,37$$

$$\text{při } v > 45 \text{ m/s} \quad C_F = 5\,876 * 10^{-11} \quad k = 1,03$$

Rovnice (\*) a (\*\*) jsou platné v mezích, které téměř úplně zahrnují vyskytující se podmínky frézovacích procesů v dřevařské praxi. (Lisičan, 2007)

Podle některých autorů jsou naměřené hodnoty řezného výkonu shodné s hodnotami řezného výkonu stanovené pomocí teoretických výpočtů.

Sledování řezného výkonu bylo také uskutečněno pomocí výpočtu z naměřené hodnoty řezné síly  $F_c$ . Statistické vyhodnocení řezného výkonu naměřeného pomocí wattmetrů a řezného výkonu, získaného výpočtem z řezné síly, prokázalo, že tyto hodnoty mají vzájemně vysoký koeficient korelace. Z čeho vyplývá, že můžeme dovolit stanovit hodnotu řezné síly na základě naměřeného řezného příkonu. (Barcík, Řehák, 2009)

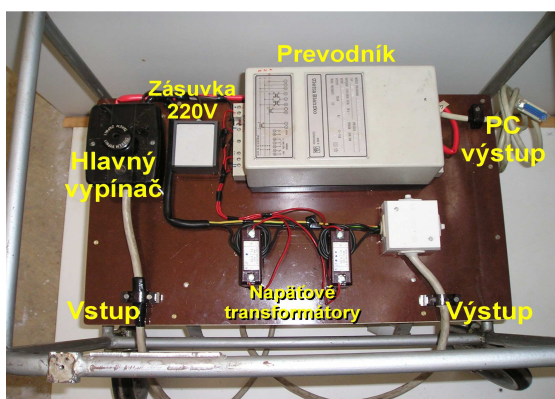
## 3.2. Měření řezného výkonu

Řezný výkon měříme pomocí měřících zařízení následujícími metodami:

1. Zapojení A/D převodníku
2. Snímání kroutícího momentu
3. Analyzování kvality elektrické sítě pomocí měřícího zařízení

### 3.2.1. Zapojení A/D převodníku

Vyhodnovací zařízení je sestaveno z komplexní sestavy počítače a karty s AD převodníkem. Převodník se zapojí do elektrické sítě před vstupem do dřevoobráběcího stroje.



**Obr. 25** Měřící zařízení A/D převodník (Barcík, Řehák, 2009)

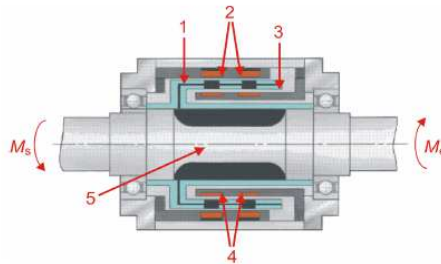
Princip měření je založen na změně odebraného proudu pohonného elektromotoru ze sítě. Tato změna je převodníkem činného výkonu snímající změnu proudu napětí a účinku  $\cos\varphi$  převáděná na výstupní proud, který je AD převodníkem přetransformovaný do číslicové formy.

(Barcík, Řehák, 2009)

### 3.2.2. Snímání kroutícího momentu

Měření se provádí pomocí snímače, který snímá kroutící moment na hřídeli hnacího rotačního zařízení (setrvačnicku). Jednotlivé části měřícího zařízení jsou zobrazeny na obrázku č. 26. Zařízení registruje změnu kroutícího momentu a přepisuje jej na elektrický signál.

Signál ze snímače je vedený do měřícího zařízení, což je vlastně měřící ústředna, a odtamtud je zaznamenávaný na disk počítače. (Siklienka, Kminiak, 2013)



**Obr. 26** Schéma snímače kroutícího momentu 1 – vnější válec, 2 – sekundární cívka, 3 – vnitřní cívka, 4 – primární cívka, 5 – deformační zóna (Barcík, Řehák, 2009)

Kroutící moment se definuje vynásobením působící síly vzdálenosti mezi bodem otáčení a působištěm síly.

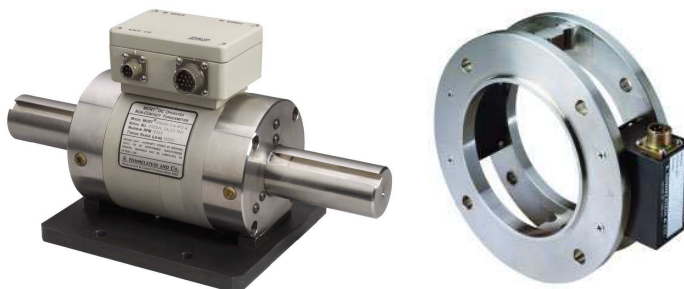
Hodnotu kroutícího momentu vypočteme pomocí vztahu:

$$M_k = F * r \quad (\text{Nm})$$

kde:  $F$  – síla (N)

$r$  – rameno (m)

V praxi se vyskytuje různé konstrukční provedení snímačů, které jsou zobrazeny na obr. č. 27 (Barcík, Řehák, 2009)



**Obr.27** Snímače kroutícího momentu (Barcík, Řehák, 2009)

### 3.2.3. Měřicí zařízení na analyzování kvality elektrické sítě

Měření řezného příkonu se provádí měřicím zařízením určeným na analyzování kvality elektrické sítě. Přístroj se představuje zapojení typu Metrel Power Q Plus MI 2392 do elektrické sítě před vstup jednotlivých fází do hlavního elektromotoru strojního zařízení (obr. č. 28).



**Obr. 28** Měřicí zařízení Metrel Power Q Plus MI 2392 a jeho zapojení (Siklienka, Argay, 2012)

Princip měření je založený na změně odebraného proudu hnacího elektromotoru stroje ze sítě. Pro výpočet příkonu elektromotoru Metrel Power Q snímá změnu odběru proudu  $I$ , aktuální hodnotu napětí  $U$  a na základě zesnímaného fázového posunu a účinek  $\cos\varphi$ . Hodnoty jsou zaznamenávané v intervalu 1 sekundy. V průběhu této sekundy je naměřených 1024 hodnot a následně přístrojem zprůměrovaných, tyto zprůměrované hodnoty slouží jako podklad pro vyhodnocení. Zařízení je schopné analyzovat všechny tři fáze současně se všemi parametry elektrické sítě, což je jeho hlavní výhodou. (Siklienka, Argay, 2012; Barčík, Řehák, 2009)

## 4. Vliv činitelů na energetickou náročnost frézování

Energetická náročnost procesu obrábění je závislá jak na fyzikálně-mechanických vlastnostech materiálu, tak i na tvaru, rozměrech, ostrosti řezného nástroje a technicko-technologických podmínkách realizace procesu řezání. Působení všech výše uvedených činitelů zahrnuje v sobě řezný odpor  $K$ . Vzhledem k výše uvedenému a k tomu, že řezný výkon má přímo úměrnou závislost na veličině řezného odporu (narůst řezného odporu s sebou přináší vyšší energetickou náročnost) můžeme energetickou náročnost obrábění sledovat pomocí hodnoty měrného řezného odporu. (Siklienka, Kminiak, 2013; Lisičan, 1988)

Energetická náročnost procesu frézování závisí na následujících parametrech:

#### Řezná rychlost

Z prací více autorů vyplývá, že měrný řezný odpor se zvětšuje při řezných rychlostech vyšších než 45 m/s, což přináší s sebou zvětšení energetické náročnosti a tudíž stoupání řezného výkonu, které je způsobeno rychlejším otáčením nástroje a tedy i rychlejším obráběním materiálu. Podle Pahlitzshe je optimální řezná rychlost z hlediska spotřeby energie a trvanlivosti břitu v rozsahu 30 až 45 m/s. (Prokeš, 1982)

Směr vláken na měrný řezný odpor má základní význam.

Energetická náročnost frézování se mění se změnou směru dřevních vláken. Nejvyšší řezný odpor je naměřen při příčném frézování ( $\varphi = 90^\circ$ ) a při podélném frézování ( $\varphi = 180^\circ$ ) je nejnižší. Při frézování po vláknech ( $\varphi = 110^\circ$  až  $170^\circ$ ) je mírně větší řezný odpor než při frézování proti vláknům. To lze vysvětlit tím, že dělení, které předbíhající před ostřím prochází ve směru do třísky a při tom vzniká stlačování dřeva, což přivádí k většímu namáhání hřbetu nástroje. Při obrábění proti vláknům je to opačně. (Prokeš, 1982)

#### Tloušťka třísky

Se zvětšující se tloušťkou třísky a zároveň se se zvětšujícím posuvem na zub energetická náročnost obrábění narůstá, a to bez ohledu na směr dřevních vláken, řeznou rychlost a geometrii řezného klina. (Prokeš, 1982)

#### Velikost úběru

Z hlediska energetické náročnosti je vhodné, aby velikost úběru, která je závislá buď od profilu obrobku, nebo od přídávku na obrábění, byla co nejmenší, poněvadž se s jejím zvětšováním energetická náročnost frézování zvětšuje. (Prokeš, 1982)

#### Vlhkost materiálu

Při vlhkosti materiálu 8-12% řezná síla získává maximální hodnotu, to platí při všech směrech dřevních vláken a při všech tloušťkách třísky. Minimální hodnoty řezné síly jsou přibližně v oblasti nasycení dřevních vláken, pak zůstává řezný odpor téměř stejný. (Prokeš, 1982)

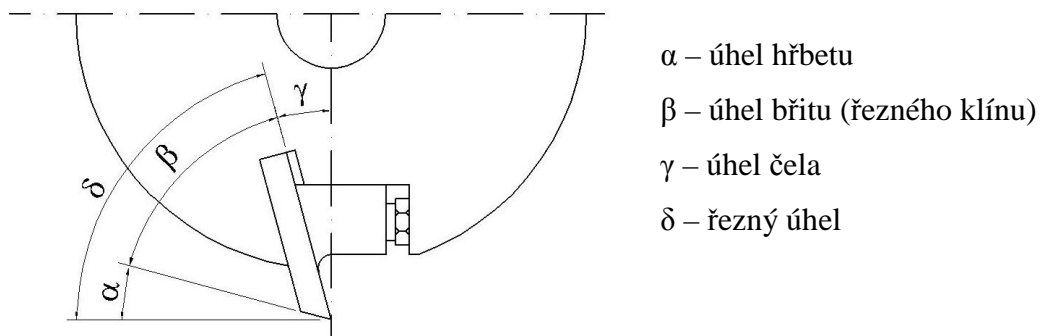
Objemová hmotnost dřeva má značný význam, jelikož s jejím zvětšením roste přibližně stejnou měrou řezný odpor za stejných podmínek. (Prokeš, 1982)

#### Geometrie nástroje

Velikost řezných úhlů spolu s ostatními řeznými podmínkami má velký vliv na výkonnost nástrojů, strojů, hospodárnost všech druhů obrábění a je rozhodující pro rozměrovou přesnost výrobku. Nesprávné volené řezné úhly můžou zhoršit kvalitu



obráběné plochy, zrychlit otupění ostří a tím snížit životnost stroje a hospodárnost provozu.



**Obr. 29** Úhlová geometrie nástroje (Barcík, Řehák, 2009)

- *Úhel řezné hrany  $\beta$  (úhel břitu)* - čím větší je úhel řezné hrany, tj. úhel klínovité části nástroje, která vniká do obráběného materiálu při oddělování třísky, tím větší je odpor obráběného materiálu proti vnikajícímu nástroji. Proto bylo by vhodné volit úhel ostří co nejmenší, ale zároveň při zmenšení úhlu řezné hrany pod určitou hodnotu značně klesá pevnost řezné hrany, tj. rychleji se otupí. Při volbě úhlu řezné hrany však musíme většinou vycházet především z hodnot uhlů  $\alpha$  a  $\gamma$ .
- *Úhel hřbetu  $\alpha$*  - má vliv na tření hřbetu o obráběnou opracovávanou plochu. Čím je tento úhel menší, tím větší je tření a naopak. Úhel hřbetu má přímý vliv na velikost řezného odporu a tím i na výslednou práci řezání. Bylo zjištěno, že při úhlu hřbetu  $15^\circ$  řezné síly jsou minimální, a to při všech směrech dřevních vláken. Velikost úhlu se v praxi volí  $10^\circ$ - $30^\circ$ .
- *Úhel čela  $\gamma$*  - přímo ovlivňuje tvoření třísky a její velikost, co má význam při průmyslovém zpracování třísek. Se zvětšováním úhlu čela se řezný odpor postupně zmenšuje až do minima, které je asi při  $\gamma=35^\circ$  při frézování příčném, při  $40^\circ$  až  $60^\circ$  při frézování podélném a při  $40^\circ$  až  $50^\circ$  při tangenciálním frézování. (Prokeš, 1982; Kováč, Mikleš)

## 5. Metodika práce

### 5.1. Vyběr a příprava experimentálních vzorků

Při experimentálních zkouškách byly použity vzorky z dřeviny břízy (*Betula Pendula*). Zkušební materiál na diplomovou práci včetně jeho tepelné úpravy byl poskytován docentem Razumovem, katedrou dřevozpracujícího průmyslu Lesnické Fakulty Povolžské Státní Technologické Univerzity, která se nachází ve městě Joškar-Ola v Rusku.

Pro zhotovení zkušebních vzorků byly použity dvě místní kulatiny z břízy (*Betula Pendula*), ze které se vymanipulovaly fošny, přičemž každá kulatina byla použita na jinou sérii vzorků. Pořez probíhal na vlastní pilnici Fakulty Lesnické Povolžské Státní Technologické Univerzity. Po rozřezání fošny na tloušťku 32 mm byly vysušeny na 8% vlhkost. Dále následným rozřezáním fošen bylo získáno 10 přířezů 500 mm dlouhých a 100 mm širokých. Poté následovala tepelná úprava. Z 10 přířezu se 2 přířezy nechali neupravené, tedy zůstaly přírodní, a dalších 8 se tepelně modifikovalo na příslušnou teplotu (160°C, 180°C, 210°C, 240°C). Pro každou teplotu byly k dispozici 2 přířezy po jedné z každé série.

#### Tepelná úprava materiálu

Tepelná úprava materiálu byla prováděna v zařízení určené k tepelnému ošetření dřeva technologií ThermoWood.

Samotný proces úpravy probíhal následovně (tab. 2 a obr. č. 14):

**Tab. 2** Průběh termické modifikace experimentálních vzorků – jednotlivé etapy tepelné úpravy (Razumov)

Teplota (°C)	Fáze 1 (hod)	Fáze 2 (hod)	Fáze 3 (hod)
160	4	5	2
180	5	5	2,5
210	6	5	3
240	7	5	3,5



**Obr. 30** Zařízení pro tepelnou úpravu –vysokoteplotní pec (Razumov)

- V první fázi zvýšení teploty a sušení se teplota v peci rychle zvyšuje na 100°C za působení vodní páry. Poté teplota pozvolně stoupá až do 170°C, materiál o vlhkosti 8-10% se vysuší na nulovou vlhkost, jako sušicí médium se používá horký vzduch.

- V druhé fázi se teplota zvyšuje na úroveň 180 až 220°C. Touto teplotou působí na dřevo po dobu 3-5 hodin. Hodnota teploty a čas působení jsou dány požadavky na úroveň modifikace - se zvyšující se teplotou a časem působení se zvyšuje tmavost dřeva.

- V poslední fázi chlazení a úpravy vlhkosti probíhá postupné snižování teploty, tedy se tepelně upravené dřevo ochlazuje a při teplotě 90-100°C se koná vlhkostní stabilizace dřeva na konečnou vlhkost 3-6%.

Upravený materiál byl dovezen na Fakultu Lesnickou a Dřevařskou ČZU v Praze a následně byl umístěn do místnosti, kde byl vystaven konstantním podmínkám teploty  $t=20\pm 2^{\circ}\text{C}$  a při relativní vlhkosti vzduchu  $\varphi = 65\pm 5\%$  pro ustálení vlhkosti.

Po klimatizování byly všechny vzorky ve školní dílně srovnány pomocí srovnávací frézky a následně otlušťkovány na tloušťkovací frézce na tloušťku 23 mm. Touto poslední operací byly vzorky z rostlého a tepelně ošetřeného březového dřeva s konečnými rozměry 23x100x500 mm připraveny na experiment.

Poté před samotným experimentálním měřením se změnila vlhkost vzorků pomocí dotykového vlhkoměru Wagner L606 Moisture Meter, která se rovnala 3-6% dle typu tepelné úpravy.

Samotné experimentální sledování spočívalo v měření odebraného proudu při rovinném frézování rostlého a termicky modifikovaného dřeva s vlivem vybraných technicko-technologických podmínek. K experimentu byl zapotřebí frézovací stroj a zařízení na měření řezného výkonu.

## 5.2. Experimentální zařízení

Všechny praktické zkoušky byly realizovány na experimentálním zařízení, které je umístěno v truhlárně fakulty Lesnické a dřevařské ČZU v Praze. Experiment se uskutečnil pomocí následujících operací a strojního vybavení:

- Rovinné frézování bylo vykonané na spodní vřetenové frézce FVS;
- Podávání materiálu do řezu bylo zabezpečeno podávacím zařízením STEFF 2034;
- Měření odebraného proudu a napětí se provádělo pomocí měřicího zařízení METREL Power Q plus MI2392.

### 5.2.1. Popis a charakteristika spodní vřetenové frézky

Spodní vřetenová frézka, která byla použita k mému výzkumu na rovinné frézování vzorků je znázorněná na obr. č. 31



**Obr. 31** Spodní jednovřetenová frézka s podávacím zařízením (autor)

Stroj se skládá z ocelového stojanu, který zabezpečuje stabilitu, nese vřeteno a pohon. Deska stolu z ocelolitininy má pravoúhlý tvar. Uprostřed desky je otvor pro vřeteno. Stroj je poháněn nepřímým převodem pomocí klínového řemene od elektromotoru. Pomocí stupňových řemenic je možno dosahovat od 3000/6000 do 4500/9000 ot/min. Základní údaje o spodní vřetenové frézce jsou popsány v následující tabulce:

**Tab. 3** Technické parametry spodní svislé frézky FVS

Parametr	Hodnota
Proudová soustava	360/220 (V)
Příkon	4 (kW)
Kmitočet	50 (Hz)
Otáčky stroje	3000, 4500, 6000, 9000 ot./min
Řezná rychlost	20, 30, 40, 60 (m/s), pro Ø nástroje 130 mm
Výrobce	Československé hudební nástroje Hradec Králové
Rok výroby	1975

### 5.2.2. Podávácí zařízení

Podávacím mechanismem STEFF 2034 se stupňovou změnou podávací rychlosti (obr. č. 32) bylo realizováno podávání materiálu do stroje. Tabulka č. 4 popisuje základní parametry zařízení na podávání materiálu.



**Obr. 32** Podávácí zařízení STEFF 2034 (autor)

**Tab. 4** Technické parametry podávacího zařízení STEFF 2034

Parametr	Hodnota
Typ	STEFF 2034
Motor	400 (V)
Příkon	0,6 - 0,8 (kW)
Otáčky	1400/2800 ot./min
Podávací rychlost	4, 8, 11, 22 (m/min)
Výrobce	MAGGI
Rok výroby	2005

### 5.2.3. Charakteristika řezného nástroje

Pro rovinné frézování byla použita jako řezný nástroj dvojnožová frézovací hlava na dřevo s vyměnitelnými noži. Do frézovací hlavy byly osazeny dva noži tak aby při obrábění v záběru byl jenom jeden břit. Jeden nůž byl upevněn tak aby záběr břitu byl 0,6 mm. Druhý nůž se nezúčastnil v procesu obrábění a byl osazen do frézovací hlavy

na doraz za účelem vyvážení nástroje. V tabulce č. 5 jsou uvedeny základní parametry frézy.

**Tab. 5** Základní technické parametry frézy

Parametr	Hodnota
Výrobce	STATON
Průměr frézy	125 (mm)
Průměr frézy s noži	130 (mm)
Šířka frézy	45 (mm)
Průměr upínacího otvoru	30 (mm)
Počet nožů	2
Maximální otáčky	8000 ot./min

Pro experimentální měření frézovací hlava měla úhel čela  $\gamma = 15^\circ$ . Pro samotné měření bylo k dispozici 6 nožů-po jednom na každou teplotu a jeden náhradní. Nože z nástrojové oceli před měřením byly naostřeny a úhlová geometrie odpovídala hodnotám: úhel řezného klina  $\beta = 45^\circ$ , úhel hřbetu  $\alpha = 30^\circ$  a řezný úhel  $\delta = 75^\circ$ .



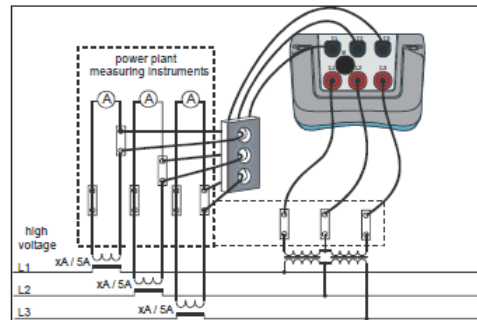
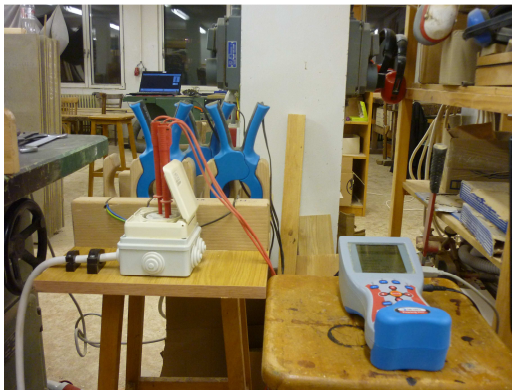
**Obr. 33** Frézovací hlava s úhlem čela  $15^\circ$  pro experimentální měření (autor)

#### 5.2.4. Charakteristika zařízení na měření výkonu

Přístroj sestává z proudových kleští s nastavitelným rozsahem podle velikosti snímaného proudu, z napěťových svorek a ze samotného měřicího přístroje Metrel Power Q Plus MI 2392 (obr. 34).

Podstata měření je založena na změně odebíraného proudu hnacího elektromotoru frézovacího stroje ze sítě. Pro výpočet příkonu elektromotoru Metrel Power Q snímá změnu odběru proudu  $I$ , aktuální hodnotu napětí  $U$  a účinek  $\cos \varphi$ . V průběhu 1 sekundy je naměřených 1024 hodnot následně přístrojem zprůměrovaných, tyto zprůměrované hodnoty slouží jako podklad pro vyhodnocení. Výhodou při vyhodnocení je to, že máme možnost rozpoznat v průběhu jedné sekundy jak minimální tak i maximální hodnotu, a z toho jsme schopné lépe filtrovat vstupné údaje (vyloučení hodnot náběhu řezného nástroje do materiálu a výstup nástroje z obrobku). Připojení přístroje

s počítačem je přes rozhraní RS 232 a údaje jsou staženy pomocí softwaru Power Q Link 2.1.



**Obr. 34** Měřicí zařízení Metrel Power Q Plus MI 2392 (autor) a schéma zapojení přístroje (Metrel, 2010)

### 5.3. Řezné podmínky experimentálního měření

Měření řezného výkonu při rovinném frézování probíhalo za různých podmínek obrábění. Za účelem sledování a získání potřebných údajů o řezném výkonu bylo experimentální měření rovinné nesousledné frézování vybraných vzorků vykonané za následujících podmínek:

**Tab. 6** Řezné podmínky experimentu

Řezné podmínky		Hodnota
Podávací rychlost (m/min)		4
		8
		11
Řezná rychlost (m/s)		20
		30
		40
Úhlová geometrie nástroje (°)	Úhel čela	$\gamma = 15^\circ$
	Úhel břitu	$\beta = 45^\circ$
	Úhel hřbetu	$\alpha = 30^\circ$
	Řezný úhel	$\delta = 75^\circ$
Tloušťka úběru (mm)		0,6
Tepelná úprava vzorků, (°C)		Přírodní
		T=160
		T=180
		T=210
		T=240

Z výše uvedených parametrů je vidět, že nám vznikne 9 různých kombinací řezných podmínek při pěti druzích materiálů.

## 5.4. Stanovení fyzikálních vlastností zkušebního materiálu

Fyzikální vlastnosti dřeva jsou nejdůležitější v dřevobráběcí praxi a mají zásadní vliv na jeho technologické zpracování. Z fyzikálních vlastností dřeva byly stanoveny hustota a vlhkost. Pro získávání těchto vlastností byly vyrobeny vzorky ze stejného materiálu, který byl použitý na samotný experiment na měření řezného výkonu. Z důvodu omezeného množství materiálu byla tělesa pro zkoušky na stanovení fyzikálních vlastností dřeva získané ze zbytků po rovinném frézování. Po ukončení experimentu nám zůstalo 10 zbytků experimentálního materiálu po dvou na každý typ tepelné úpravy (rostlé, 160°C, 180°C, 210°C, 240°C), které byly následně srovnávány a otlušťkovány na konečné rozměry: 20x20x500 mm. Tělíška se označili jako A i B a tím pádem byly připraveny k provedení jednotlivých zkoušek na stanovení vlastností. Zkoušky proběhly v laboratoři FLD na katedře Základního zpracování dřeva.

### 5.4.1. Stanovení hustoty

Hustota vyjadřuje hmotnost látky vztaženou k jejímu objemu v  $\text{g/m}^3$ . Zkouška se prováděla podle normy ČSN 49 0108. Z připravených vzorků pro stanovení fyzikálních vlastností byly vymanipulovány tělíška o rozměrech 20x20x30 mm (štlxd podél vláken). Tělíška byla vyrobena z rostlého a termicky upraveného dřeva. Hustota dřeva se měřila při stejné vlhkosti dřeva použitého při jeho obrábění, tedy 3-6% v závislosti na stupni termické úpravy. Měřením rozměrů tělesa digitálním posuvným měřidlem s přesností na 0,01mm a jeho vážením na laboratorní váze jsme zjistili jeho objem a hmotnost. Naměřené hodnoty byly zapsané a podle vztahu  $\rho_w = m_w/V_w$  byla získána hustota jednotlivých dřevin.



Obr. 35 Stanovení hustoty – experimentální vzorky (autor)

### 5.4.2. Stanovení vlhkosti

Vlhkost dřeva můžeme vyjádřit jako procentuální podíl hmotnosti vody obsažené ve vlhkém vzorku ke hmotnosti stejného vzorku ve stavu vysušeném. Zkouška byla



realizována podle normy ČSN 49 0103 na stejných vzorcích, které se použily pro stanovení hustoty. Zkušební tělesa byla zvážena s přesností na 0,01g na laboratorní váze. Poté se zkušební vzorky vysušily při teplotě  $103\pm 2^\circ\text{C}$  do ustálené hmotnosti (změna hmotnosti mezi dvěma váženími prováděnými po dvou hodinách nepřekročila 0,01g). Ochlazené vzorky byly vzápětí (aby přírůstek vlhkosti nebyl větší než 0,1%) znovu zváženy s přesností na 0,01g.

Hodnoty v průběhu měření byly zapsané a absolutní vlhkost zkoušených vzorků dřeva  $W$  (%) vypočtena ze vztahu:

$$W_{abs} = \frac{(m_w - m_0)}{m_0} \quad (\%)$$

kde:

$m_w$  - hmotnost zkušební tělesa ve stavu vlhkém, (g)

$m_0$  - hmotnost zkušební tělesa po vysušení, (g)

## 6. Experimentální část a sledování (popis vlastního frézování a měření řezného výkonu)

Experiment se uskutečnil v truhlářské dílně Fakulty lesnické a dřevařské. Pro výzkum byly připraveny zkušební vzorky tepelně neošetřeného a tepelné upraveného březového dřeva o rozměrech 23x100x500 mm. Pro každou tepelnou úpravu byly připraveny 2 vzorky (obr. 36). Naměřená vlhkost vzorků byla stanovena v rozmezí 3-6% v závislosti na typu tepelné úpravy materiálů. Měření řezného výkonu při jednotlivých řezných podmínkách se provádělo v průběhu rovinného frézování.

### 1. Rostlé dřevo



### 2. T=160°C



### 3. T=180°C



### 4. T=210°C



### T=240°C



**Obr. 36** Experimentální vzorky před měřením (autor)

## 6.1. Příprava experimentálního pracoviště

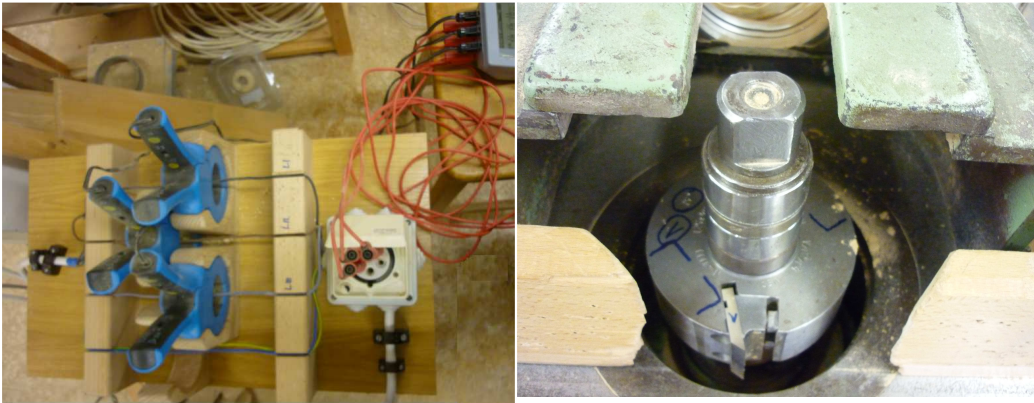
Před samotným experimentálním měřením bylo zapotřebí připravit pracoviště:

1) Nejdříve bylo nutné připojit měřicí přístroj METREL Power Q plus MI 2392 na přívod ke spodní frézce.

Přívodní kabel frézovacího stroje se odpojil ze svorek v rozvodné skřínce frézky a byl připojen na kabel procházející měřicím zařízením. Druhý konec kabelu měřicího zařízení (odvod) byl opět zapojen do rozvodné skříňky frézky.

Prodlužovací kabel měřicího zařízení se skládá s klasického přívodu, odvodu a třetího mezikusu, do kterého byly umístěny napěťové svorky měřicího zařízení (červené dráty:  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$ ). Od tohoto mezikusu byly jednotlivé žíly přívodního kabelu rozděleny na všechny fáze a na každý kabel (fázi) byly umístěny proudové kleště pro snímání procházejícího proudu (černé dráty:  $I1$ ,  $I2$ ,  $I3$ ). Tyto pomocné kabely se připojili do samotného měřicího zařízení, které se připojilo do elektrické sítě. Pomocí USB kabelu byl měřicí přístroj spojen s počítačem.

2) Po zapojení měřicího přístroje bylo nutné osadit frézovací hlavu do spodního vřetena frézky.



**Obr. 37** Připojení měřicího zařízení (autor)

**Obr. 38** Osazená frézovací hlava, úhel čela 15° (autor)



**Obr. 39** Připravené pracoviště (autor)

Zapojením měřicího přístroje a osazením frézovací hlavy pracoviště bylo připraveno k experimentu. Po nastavení řezných podmínek mohlo začít vlastní měření.

## 6.2. Popis vlastního měření

Měření řezného výkonu probíhalo kontinuálně při nesousledném frézování při stejné úhlové geometrii a při jednotlivých řezných podmínkách (viz. kapitola 5.3) - celkem 9 kombinací řezných a posuvných rychlostí.

- Na začátku měření byly nastaveny řezné parametry na následující hodnoty: řezná rychlost na 30 m/s a posuvná rychlost na 4 m/s. Při frézování, pomocí posuvných pravítek byl nastaven úběr materiálu na konstantní hodnotu 0,6mm. Pro rovinné frézování každého typu experimentálních vzorků byl použit nový naostřený nůž. K dispozici bylo tedy 6 nožů-po jednom na každou teplotu a

jeden náhradní, který byl osazen do frézovací hlavy na doraz a sloužil pro vyvážení nástroje. Nože z nástrojové oceli před měřením byly naostřeny a očíslovány a úhel řezného klina měl konstantní hodnotu  $45^\circ$ . Po nastavení řezných podmínek, osazení frézovací hlavy s číslem nože 1, spuštění měřicího zařízení a upnutí spodní frézky se uskutečnil samotný experiment. Měření započalo s březového, rostlého (tepelně neošetřeného) dřeva, které se frézovalo na řezné rychlosti  $v_c = 30$  m/s a posuvné rychlosti  $v_f = 4$  m/min odfrézovalo se 2 krát - tudíž byly odfrézováno 2 metry (druhý vzorek se posouval ihned za prvním). Poté se ten samý materiál odzkoušel při posuvné rychlosti  $v_f = 8$  a 11 m/min - na každou kombinaci se odfrézoval 1 metr. Pro dosažení podávací rychlosti 11 m/min bylo nutné v podávacím zařízení přehodit ozubené kolečka. Po každé kombinaci byly naměřené hodnoty uloženy do počítače. Poté přehozením řemenu na řemenice stroje se řezná rychlost přepnula na  $v_c = 20$  m/s a měření pokračovalo při rychlosti posuvu  $v_f = 11$  m/min a byl odfrézován 1 metr. Naměřené hodnoty byly uloženy. Dále pomocí přepínače na ovládacím panelu stroje se řezná rychlost změnila na  $v_c = 40$  m/s a posuvná rychlost zůstala stejná  $v_f = 11$  m/min, rostlé březové dřevo se nechalo projít 1 krát (1 metr). Po uložení dat se kolečka podávacího zařízení zase přendaly. Následné měření probíhalo při řezné rychlosti  $v_c = 20$  m/s a rychlostech posuvu  $v_f = 4$  a 8 m/min, kde se na každou kombinaci odfrézoval 1 metr. Nakonec se nastavila řezná rychlost  $v_c = 40$  m/s a při rychlostech posuvu  $v_f = 4$  a 8 m/min se materiál odfrézoval 2 krát (jeden metr na každou kombinaci). Naměřené hodnoty byly vždycky uloženy do počítače po odfrézování materiálu při jednotlivých kombinacích řezných podmínek. Tím pádem bylo odfrézováno 10 metrů březového dřeva a v průběhu měření zaznamenávány hodnoty řezného příkonu při všech devíti kombinacích řezných podmínek.

- Poté se ten samý vzorek opracuje při podmínkách řezné rychlosti  $v_c = 40$  m/s a rychlosti posuvu  $v_f = 8$  m/min až doko dosazení odfrézované dráhy 30 metrů (s počítáním těch 10 metrů co byly odfrézované před tím). Naměřené hodnoty se uložily do počítače.
- Dále se za samých podmínek  $v_c = 40$  m/s a  $v_f = 8$  m/min obrábělo dalších 30 m až do dosazení celkové odfrézované dráhy 60 m. Pak proběhlo ukládání zaznamenaných dat do počítače.

- A následně se odfrézovalo dalších 30 m při  $v_c=40$  m/s a  $v_f=8$  m/min po odfrézování celkem 90 m. Změřené údaje byly uloženy do počítače.

Po ukončení frézování nám zůstaly zbytky potřebné ke stanovení fyzikálních vlastností materiálu. Tím samým měření řezného výkonu při rovinném frézování březového rostlého dřeva skončilo. Frézka se vypnula. Do frézovací hlavy byl osazen nový naostřený nůž číslo 2 a začalo měření řezného výkonu při frézování termické upraveného vzorku  $T=160^\circ\text{C}$ .

Vzhledem k tomu, že při rovinném frézování na každý typ tepelné úpravy se používal nový naostřený nůž se stejným úhlem hřbetu, postup experimentu na měření řezného příkonu pro jednotlivé typy termické úpravy vypadal stejně.

#### **Postup měření řezného příkonu pro jednotlivé typy tepelné úpravy:**

- 1) Osazení nového naostřeného nože do frézovací hlavy a její upnutí do stroje.
- 2) Měření a zaznamenávání řezného příkonu při devíti jednotlivých nastavení kombinací řezných podmínek (řezné rychlosti a podávací rychlosti). Uložení dat bylo provedeno po každé kombinaci měření.
- 3) Frézování a měření řezného příkonu bylo za stejných podmínek  $v_c=40$  m/s a  $v_f=8$  m/min, po odfrézování celkem 30, 60 a 90 metrů zkušebního materiálu následovalo uložení dat.

Po odfrézování každého vzorku nám zůstával zbytek, který byl použit k vymanipulování zkušebních tělísek na stanovení fyzikálních vlastností materiálů. Postup měření řezného příkonu se opakoval vždy při každém typu tepelně ošetřeného materiálu. Po odzkoušení všech experimentálních materiálech byl měřicí přístroj odpojen, všechno uklizeno a pracoviště uvedeno do původního stavu.

## 7. Výsledky a vyhodnocení

Zpracování zaznamenaných hodnot řezného příkonu bylo prováděno pomocí programu MS Excel, kde naměřené hodnoty byly rozříděné v závislosti na posuvné rychlosti, řezné rychlosti a typu materiálu. Dále naměřené hodnoty byly převedeny a vyhodnoceny pomocí programu STATISTICA 12. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze I (hustota) a příloze II a III (řezný příkon).

### 7.1. Hustota a vlhkost zkoumaného materiálu

Hustota a vlhkost dřeva jsou jedním z hlavních parametrů ovlivňujících jeho vlastnosti a výrazně se podílí na energetické náročnosti při frézování dřeva. Za klíčový ukazatel vlastnosti dřeva lze brát právě jeho hustotu.

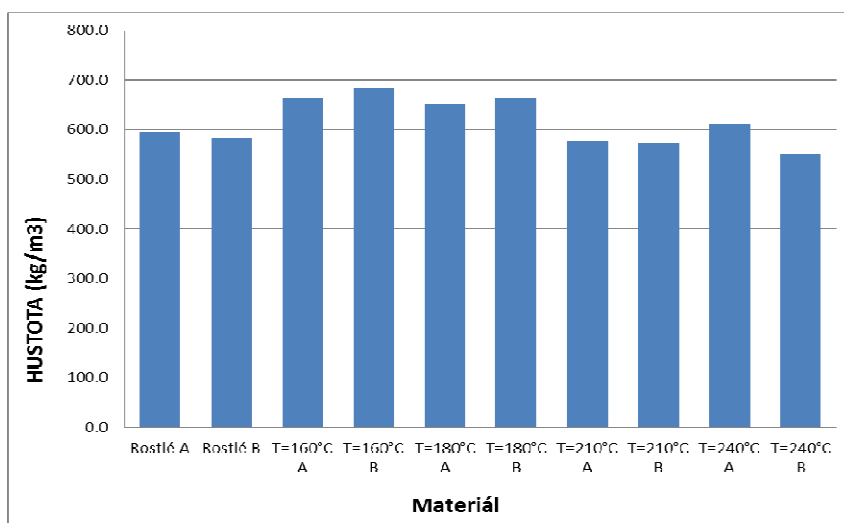
Jak již bylo zmíněno dříve - pro každý typ tepelné úpravy byly k dispozici dva přířezy, které byly označeny jako A a B. Po ukončení vlastního experimentu byly ze zbytkového materiálu vymanipulovány zkušební vzorky pro stanovení fyzikálních vlastností. Hodnoty získané při měření fyzikálních vlastností dřeva byly zpracovány pomocí programu MS Excel.

Tabulka č. 7 nám ukazuje změnu průměrné hodnoty hustoty zkoumaného materiálu u jednotlivých typů tepelné úpravy, kde je možné vidět, že hustota se výrazně liší v rámci jednotlivé teploty. U rostlého dřeva je rozdíl hustoty mezi přířezem A i B o 1,7%; u tepelně ošetřených vzorků  $T=160^{\circ}\text{C}$  je rozdíl o 3%; tepelná úprava  $T=180^{\circ}\text{C}$  ukazuje procentuální změnu hustoty mezi vzorky A a B o 1,7%; u zkušební vzorku  $T=210^{\circ}\text{C}$  je to 0,5%; největší procentuální rozdíl mezi přířezy v rámci jednotlivé tepelné úpravy  $T=240^{\circ}\text{C}$  je až o 9,6%.

**Tab. 7** Změna průměrných hodnot hustoty a vlhkosti pro každý přířez zkoumaného materiálu

Tepelná úprava ( $^{\circ}\text{C}$ )	Průměrná hustota $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	Vlhkost $W$ (%)
Rostlé_A	593.5	6.1
Rostlé_B	583.6	5.8
$T=160^{\circ}\text{C}$ _A	663.4	5.0
$T=160^{\circ}\text{C}$ _B	684.0	4.9
$T=180^{\circ}\text{C}$ _A	651.0	4.2
$T=180^{\circ}\text{C}$ _B	662.3	4.1
$T=210^{\circ}\text{C}$ _A	577.1	3.7
$T=210^{\circ}\text{C}$ _B	574.5	3.3
$T=240^{\circ}\text{C}$ _A	611.3	2.7
$T=240^{\circ}\text{C}$ _B	552.6	2.7

Přehledně tento jev znázorňuje graf č. 1.



**Graf 1** Změna průměrných hodnot hustoty pro každý přířez zkoumaného materiálu

Z teoretických poznatků je známé, že struktura dřeva jako i jeho vlastnosti výrazně závisí na poloze v kmeni a je nutno s touto závislostí uvažovat už při výběru experimentálního materiálu. Hustota dřeva se liší nejen mezi kmeny jedné dřeviny, mění se ale i v samotném kmenu. K odlišnostem dochází nejen v podélném a kolmém směru na dřevní vlákna, ale i v rovině rovnoběžné s vlákny (v rovině radiální a tangenciální). Změny hustoty v horizontálním směru kmenu zapříčiňuje nepravidelnost šířky letokruhů.

Na základě výše řečeného a zaznamenaného jevu odlišnosti hustoty materiálu v rámci každého typu tepelné úpravy můžeme předpokládat, že zkušební vzorky byly vymanipulovány z různých částí kmene, což se odrazilo na struktuře dřeva a následně se výrazně podílelo na hodnotách měřeného řezného příkonu. Tudiž se na těchto odchylkách podílel ten fakt, že experimentální vzorky byly vymanipulovány z dvou kulatin po jednom kusu v každé sérii. Tuto skutečnost jsme neměli možnost ovlivnit, jelikož materiál pro experiment byl přivezen.

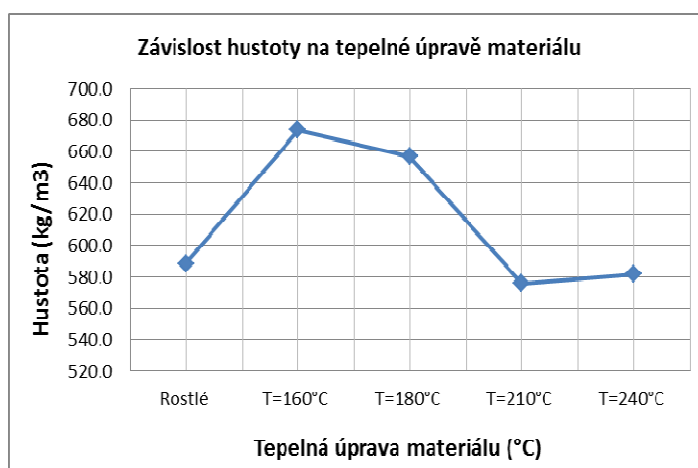
V tabulce č. 8 jsou ukázány již zprůměrované hodnoty hustoty a vlhkosti pro každý typ zkoumaného materiálu. Z tabulky je vidět že vlhkost zkoumaného materiálu se pohybuje v rozsahu 6-3% a se zvyšující se teplotou modifikace vlhkost vzorků klesá. U hustoty je to naopak (graf č. 2), kde největší hodnoty mají vzorky tepelně ošetřené na 160°C a 180°C. Dále klesání rostlé dřevo a tepelné ošetřené dřevo na teplotu T=240°C. Nejmenší hodnotu hustoty ukazuje tepelná úprava T=210°C. Také v tabulce můžeme vidět procentuální rozdíl hustoty v porovnání s rostlým dřevem, kde největší změna je u

materiálů T=160°C – 14,5% a u T=180°C – 11,6%. U materiálů T=210°C a T=240°C rozdíl není tak významný.

**Tab. 8** Průměrná hustota a vlhkost zkoumaného materiálu

Tepelná úprava (°C)	Hustota $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Procentuální změna hustoty (%)	Vlhkost W (%)
Rostlé	588.6	-	6.0
T=160°C	673.7	14.47	5.0
T=180°C	656.7	11.57	4.2
T=210°C	575.8	-2.17	3.5
T=240°C	582.0	-1.12	2.7

Z grafu 2 je vidět průběh změny hustoty v závislosti na tepelné úpravě.



**Graf 2** Průběh změny hustoty v závislosti na tepelné úpravě

Níže uvedené fotografie (obr. č. 40) byly vytvořeny během zkoušky při stanovení hustoty materiálů a ukazují odlišnost ve struktuře dřeva (výrazný rozdíl v šířkách letokruhů) zkoumaných vzorků (PR\_A, PR\_B,...atd.) Na těchto odchylkách se výrazně podílí hodnoty naměřeného řezného příkonu v průběhu našeho experimentu a musíme s tímto faktem dále počítat při hodnocení výsledků.





**Obr. 40** Vyrazný rozdíl v struktuře dřeva jednotlivých typů tepelné úpravy zkoumaného materiálu (autor)

## 7.2. Řezný příkon

Získané hodnoty byly zpracované vícefaktorovou analýzou rozptylu při sledování vlivu tepelné úpravy materiálu, řezné rychlosti a podávací rychlosti jsou prezentované formou grafů a tabulek.

### 7.2.1. Statistické zhodnocení

Hlavním cílem statistického zhodnocení je zjistit, který z faktorů (řezná rychlost, podávací rychlost, změna termické úpravy materiálu) má největší vliv na energetickou náročnost při frézování březového dřeva. Největší význam má ten faktor, jehož hodnota hladiny významnosti  $p$  je menší než 0,05.

Z naměřených hodnot byla nejprve zhotovena analýza rozptylu a provedeno mnohonásobné porovnání Tukeyovou metodou.

Na základě analýzy rozptylu (tab. 9), která zkoumá závislosti řezného příkonu na typu tepelné úpravy, řezné rychlosti a podávací rychlosti bylo zjištěno, že všechny zkoumané faktory jsou statistické významné a jejich významnost klesá v pořadí: materiál, řezná rychlost, podávací rychlost. Taky je z analýzy vidět, že i interakce

faktorů „materiál\*řezná rychlost“ a „řezná rychlost\*podávací rychlost“ mají také významný vliv na řezný příkon.

**Tab. 9** Vicefaktorová analýza rozptylu

	SČ	Stupně (volnosti)	PČ	F	p
<b>Abs. člen</b>	70122834	1	70122834	263027.6	0.000000
Materiál (°C)	234504	4	58626	219.9	0.000000
Řezná rychlost (m/s)	5586336	2	2793168	10477.0	0.000000
Podávací rychlost (m/min)	25268	2	12634	47.4	0.000000
„Materiál*Řezná rychlost“	20104	8	2513	9.4	0.000000
„Materiál*Podávací rychlost“	589	8	74	0.3	0.973481
„Řezná rychlost*Podávací rychlost“	2840	4	710	2.7	0.032498
„Materiál*Řezná rychlost*Podávací rychlost“	2686	16	168	0.6	0.859761
Chyba	93043	349	267		

Tukeyovou metodou zjistíme, který z faktorů působících na řezný příkon se liší na hladině významnosti 0,05. Níže uvedená tabulka přehledně znázorňuje provedený test.

**Tab. 10** Mnohonásobné porovnání vlivu změny řezné rychlosti, podávací rychlosti a materiálu na řezný příkon Tukeyovou metodou

<b>Podávací rychlost (m/min)</b>	
<b>4</b>	467.47
<b>11</b>	472.33
<b>8</b>	485.47

<b>Řezná rychlost (m/s)</b>	
<b>20</b>	356.87
<b>30</b>	421.34
<b>40</b>	671.33

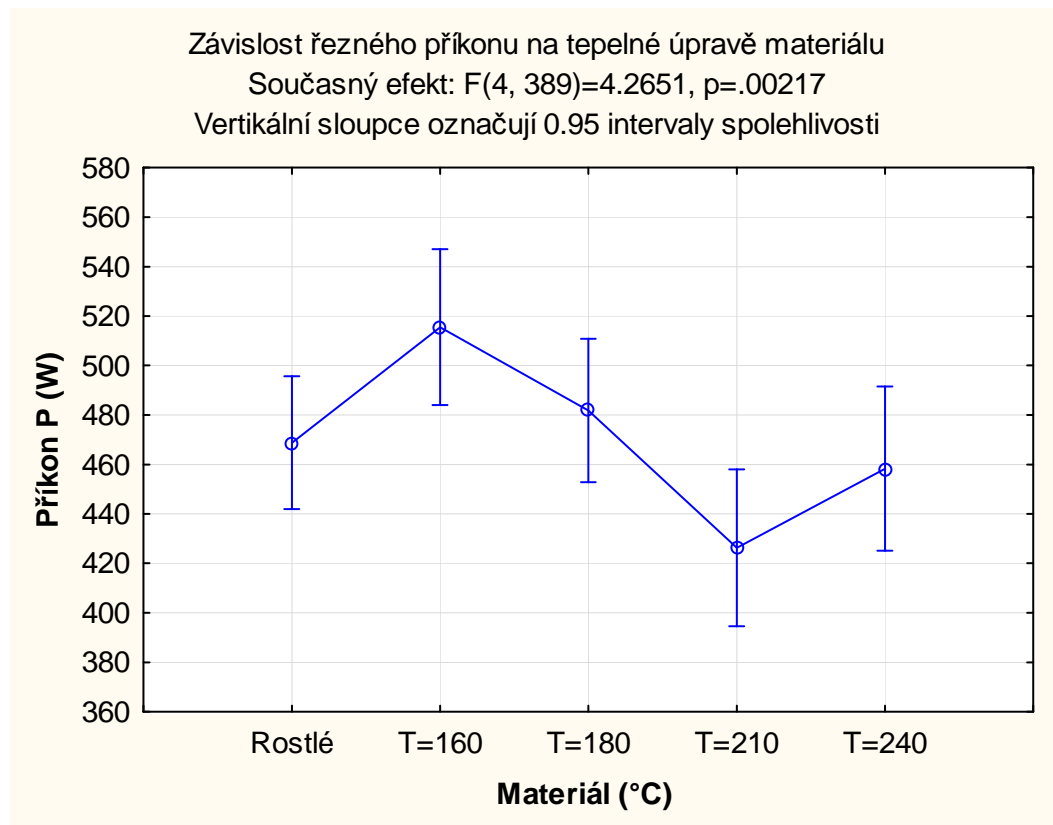
<b>Materiál (°C)</b>	
<b>T=210°C</b>	426.23
<b>T=240°C</b>	458.31
<b>Rostlé</b>	468.78
<b>T=180°C</b>	481.76
<b>T=160°C</b>	515.52

Z tabulek je čitelné, že při analýze vlivu podávací rychlosti je nejvýznamnější přechod na rychlost posuvu 8 m/min, rychlost 4 m/min a změna na 11 m/min takový význam nemají.

Při analýze vlivu řezné rychlosti a materiálu je vidět, že přeměny uvnitř každého faktoru je statistický významné a tím ovlivňují hodnoty řezného příkonu.

### 7.2.2. Vliv tepelné úpravy materiálů na řezný příkon

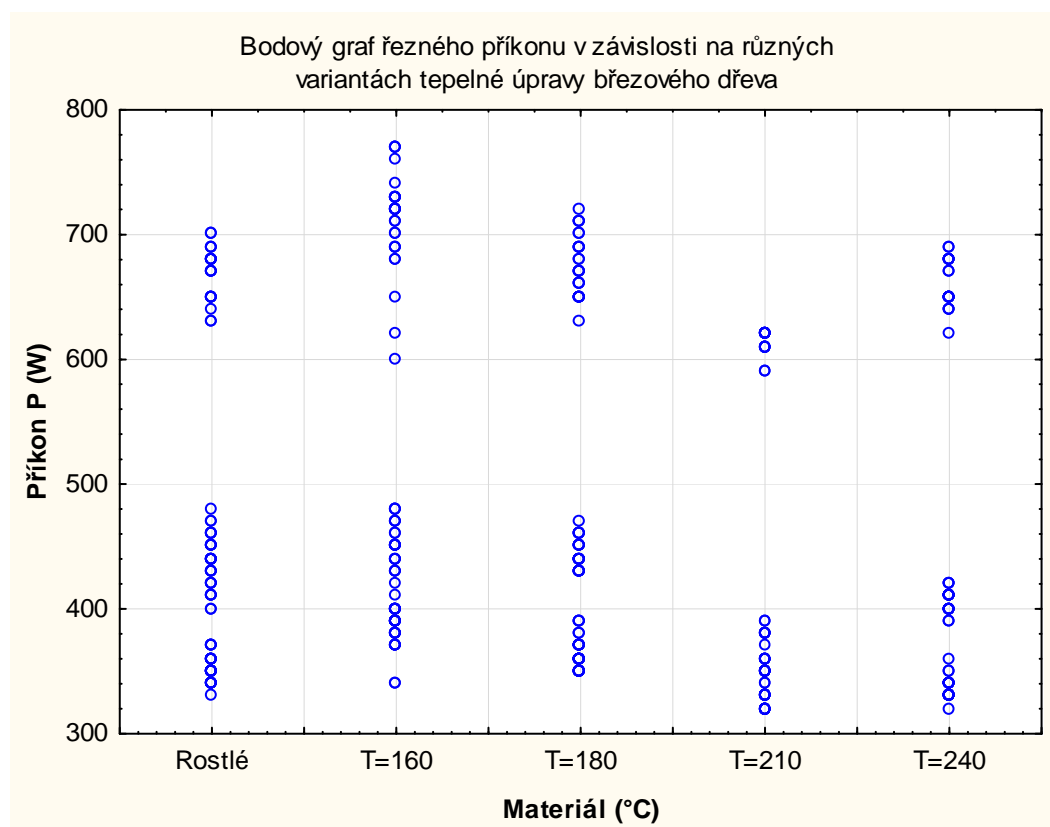
Vliv termické úpravy materiálu na energetickou náročnost při frézování hraje jednu z nejzákladnějších úloh. V níže uvedeném grafu je porovnán vliv rostlého březového dřeva a tepelně upraveného dřeva teplotou 160°C, 180°C, 210°C, 240°C na hodnotu řezného příkonu při frézování.



**Graf 3** Analýza závislosti řezného příkonu na tepelné úpravě materiálu

Z grafu je vidět, že příkon se liší podle stupňů termické úpravy. V porovnání s rostlým březovým dřevem jsou hodnoty příkonu pro termicky upravený materiál T=160°C a T=180°C větší, tudíž řezný příkon stoupá při těchto teplotách tepelné úpravy materiálu a pak při teplotě ošetření materiálu T=210°C a T=240°C mírně klesá. Pozorovaný jev (stoupání příkonu při teplotách T=160°C a T=180°C ve srovnání s energetickou náročností při frézování rostlého dřeva břízy) se neshoduje s dřívějším experimentem na porovnání energetické náročnosti frézování přírodního a termicky modifikovaného dřeva (J.Kubš, 2013), kde byl zaznamenán úbytek řezného příkonu při frézování termicky modifikovaného dřeva. Avšak znázorněna závislost v grafu v rozsahu teplot

$T=160^{\circ}\text{C}$  až  $T=180^{\circ}\text{C}$  potvrzuje teoretické poznatky (viz. kapitola 4), které tvrdí, že hodnota řezného příkonu je těsně závislá na hustotě opracovaného materiálu a směru vláken a tyto činitele mají značný význam, jelikož se zvětšením hustoty dřeva roste přibližně stejnou měrou řezný odpor, což graf 3 závislosti řezného příkonu na materiálu prokazuje. Jinak v rozsahu tepelné úpravy materiálu  $T=210^{\circ}\text{C}$  až  $T=240^{\circ}\text{C}$  je vidět pokles hodnoty řezného příkonu v porovnání s přírodním dřevem, což je způsobeno poklesem hustoty zkoušeného materiálu. Také můžeme pozorovat pokles příkonu v intervalu teplot  $T=160^{\circ}\text{C}$  až  $180^{\circ}\text{C}$ .



**Graf 4** Bodový graf řezného příkonu v závislosti na různých variantách tepelné úpravy březového dřeva

Graf 4 ukazuje rozložení naměřených hodnot řezného příkonu. Na grafu je vidět, že v každém souboru hodnot je přibližné rozdělení na dvě oblasti, což je zapříčiněno zaprvé různými hustotami zkoušených dřevin a směrem vláken, za druhé nelineárně měřenými parametry podávací a řezné rychlosti a malým počtem měření.

V tabulce č. 11 je uvedeno procentuální zpracování změny průměrného řezného příkonu v závislosti na tepelné úpravě materiálu při různých kombinacích řezné a podávací rychlosti.

**Tab. 11** Procentualní změna průměrného řezného příkonu v závislosti na termické úpravě materiálů při různých variantách řezné a podávací rychlosti.

V <sub>f</sub> (m/min)	V <sub>c</sub> (m/s)	Rostlé	T=160°C	T=180°C	T=210°C	T=240°C	Změna (%)	Změna (%)	Změna (%)	Změna (%)
		Příkon P (W)	Příkon P (W)	Příkon P (W)	Příkon P (W)	Příkon P (W)				
4	20	340.0	380.0	360.4	323.3	332.1	11.76	6.00	-4.91	-2.32
8		350.0	390.0	370.0	328.0	338.6	11.43	5.71	-6.29	-3.26
11		354.3	398.0	376.7	330.0	341.7	12.33	6.32	-6.86	-3.56
4	30	433.5	443.3	437.7	352.7	401.5	2.26	0.97	-18.64	-7.38
8		440.0	454.3	448.6	378.3	410.0	3.25	1.95	-14.02	-6.82
11		448.0	466.7	457.5	380.0	415.0	4.17	2.12	-15.18	-7.37
4	40	656.2	700.6	660.0	607.1	647.3	6.77	0.58	-7.48	-1.36
8		681.4	721.3	686.3	616.7	664.0	5.86	0.72	-9.50	-2.55
11		690.0	728.3	698.0	620.0	683.3	5.55	1.16	-10.14	-0.97
<b>Průměrná změna:</b>							<b>7.04</b>	<b>2.84</b>	<b>-10.34</b>	<b>-3.95</b>

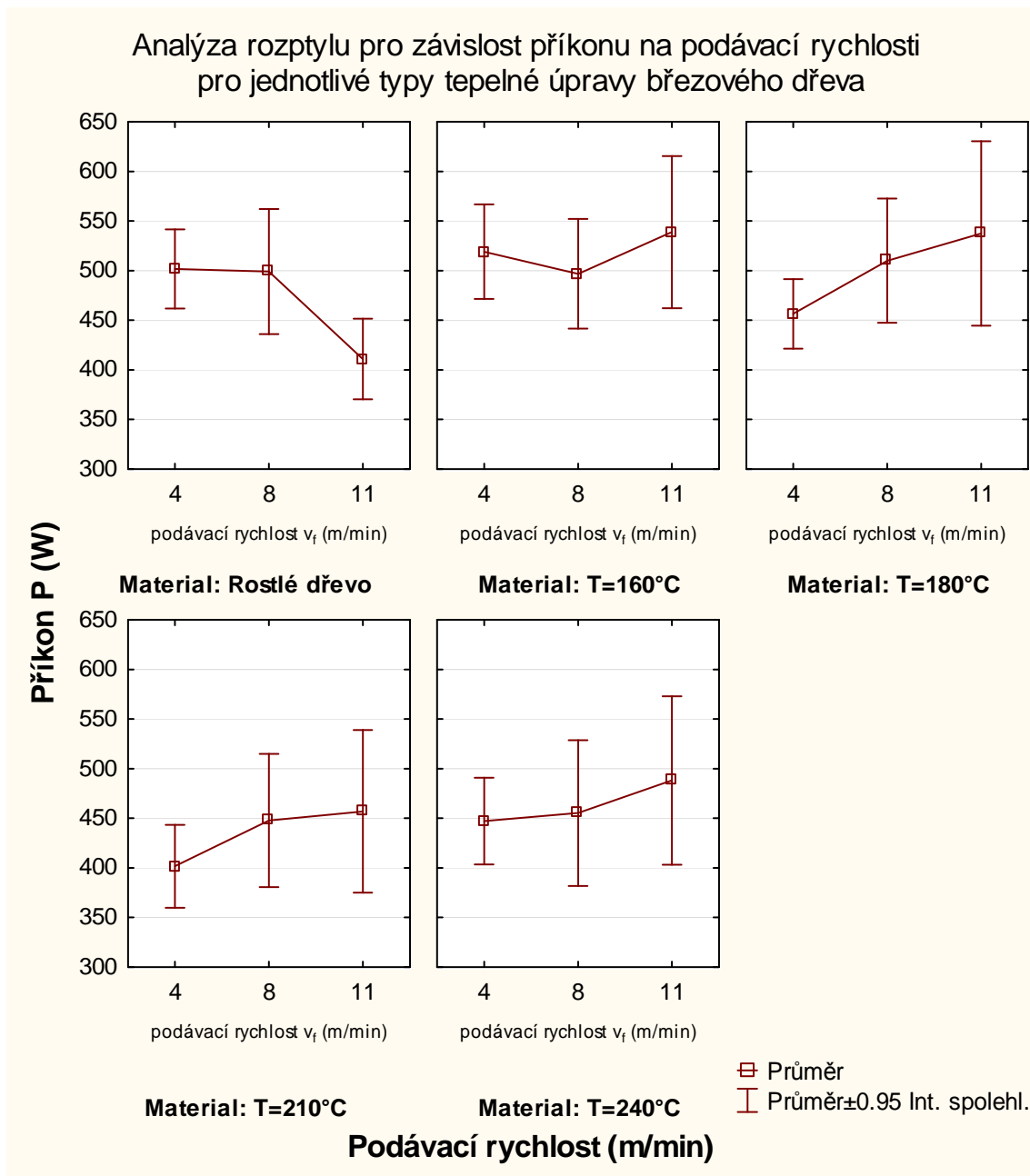
Tabulka ukazuje procentní rozdíl průměrných hodnot řezného příkonu termicky upraveného materiálu rostlého dřeva. Z tabulky vidíme, že řezný příkon stoupá při teplotě T=160°C na 7% a při tepelné úpravě na T=180°C mírně na 2,8%. Avšak při frézování materiálů ošetřeného na T=210°C můžeme sledovat snižování řezného příkonu o 10,3% a při T=240°C o 4% v porovnání s rostlým dřevem.

#### **Shrnutí:**

Z uvedených grafů a tabulky můžeme potvrdit, že hodnota řezného příkonu je výrazně závislá na typu tepelné úpravy materiálu, při které se i mění jeho hustota. Z těchto údajů můžeme konstatovat fakt, že vzorky byly vymanipulovány z různých kulatin. Faktory ovlivňující strukturu dřeva se podíleli na hustotě vzorků a následně to způsobilo to, že řezný příkon při teplotě úpravy materiálů T=160°C a T=180°C je větší oproti řeznému příkonu při frézování rostlého dřeva.

### **7.2.3. Vliv podávací rychlosti na řezný příkon**

Dalším zkoumaným faktorem ovlivňujícím řezný příkon frézovacího stroje je podávací rychlost. Graf 5 nám ukazuje, že působení podávací rychlosti vyvolává změnu řezného příkonu.

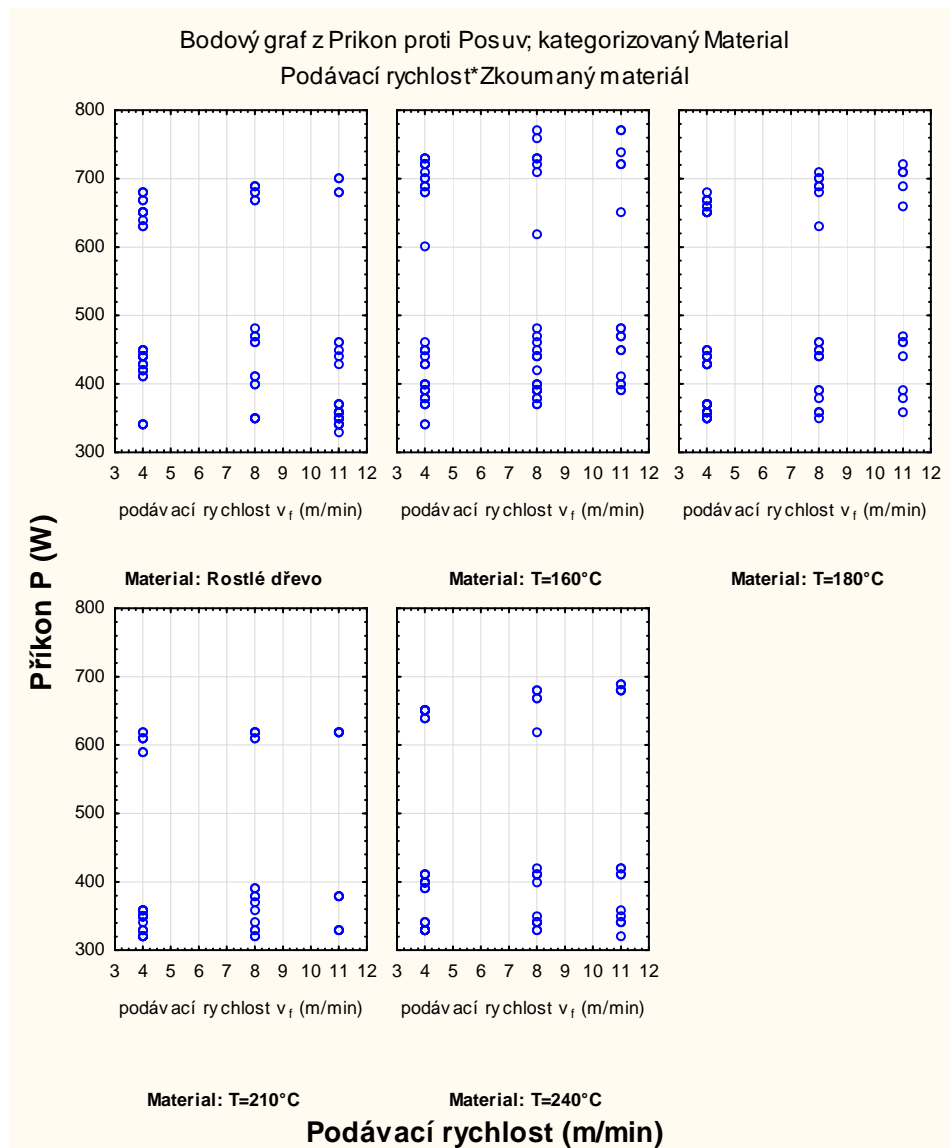


**Graf 5** Analýza rozptylu pro závislost příkonu na podávací rychlosti pro jednotlivé typy tepelné úpravy březového dřeva

Z grafu je vidět, že při změně rychlosti ze 4 m/min na 8 m/min u rostlého dřeva a tepelně upraveného materiálu T=160°C průměrné hodnoty příkonu klesají u rostlého o 0,6% u materiálu T=160°C až o 4,2%, u ostatních materiálů při změně posuvné rychlosti ze 4m/min na 8 m/min se řezný příkon zvyšuje.

Při změně podávací rychlosti z 8 m/min na 11 m/min řezný příkon mírně stoupá u všech materiálů kromě rostlého dřeva, u kterého je sledován pokles o 17,6%.

Klesání příkonu u rostlého dřeva při všech změnách posuvné rychlosti a u termodřeva  $T=160^{\circ}\text{C}$  při změně posuvné rychlosti ze 4 m/min na 8 m/min můžeme zdůvodnit vlivem nerovnoměrné hustoty materiálů (odlišná struktura zkoumaných vzorku) a také to může být způsobeno tím, že frézování bylo při větších řezných rychlostech což výše uvedený graf nebere v potaz a také s vyššími rychlostmi posuvu obráběcí proces probíhá rychleji a tím pádem měřící zařízení při měření zaznamenává menší počet hodnot, všechny tyto faktory se významně podílí na hodnotách průměrné energetické náročnosti při obrábění. Faktor růstu řezného příkonu se zvýšením rychlosti posuvu je ve shodě s teoretickými znalostmi a můžeme to zdůvodnit tím, že se zvyšováním rychlosti posuvu se zvyšuje přísun materiálu za jednotku času, který je zapotřebí ofrézovat a na což je nutné dodat více příkonu.



**Graf 6** Bodový graf řezného příkonu při různých podávacích rychlostech pro jednotlivé druhy tepelné úpravy

Bodový graf 6 demonstruje rozmístění hodnot naměřeného řezného příkonu u jednotlivých druhů materiálů při různých podávacích rychlostech. Na grafu je vidět že soubor naměřených hodnot je rozdělen do několika skupin a mají rozsáhlé uspřádání, což je způsobeno v první řadě odlišnou hustotou zkoumaného materiálu a za druhé rozdílnými řeznými rychlostmi, které graf nebere v potaz.

K procentuálnímu porovnání vlivu podávací rychlosti na změnu průměrného řezného příkonu při interakci s různými řeznými rychlostmi pro různé druhy materiálů slouží následující tabulka.

**Tab. 12** Procentuální změna průměrného řezného příkonu při vlivu podávací rychlosti při různých kombinacích řezné rychlosti pro jednotlivé druhy tepelné úpravy materiálů

Rostlé dřevo							
Vc (m/s)	4 m/min	8 m/min	Změna (%)	Vc (m/s)	8 m/min	11 m/min	Změna (%)
	Příkon P (W)	Příkon P (W)			Příkon P (W)	Příkon P (W)	
20	340.0	350.0	2.94	20	350.0	354.3	1.23
30	433.5	440.0	1.50	30	440.0	448	1.82
40	656.2	681.4	3.84	40	681.4	690	1.26
Průměrná změna:			2.76	Průměrná změna:			1.44

Tepelná úprava T=160°C							
Vc (m/s)	4 m/min	8 m/min	Změna (%)	Vc (m/s)	8 m/min	11 m/min	Změna (%)
	Příkon P (W)	Příkon P (W)			Příkon P (W)	Příkon P (W)	
20	380.0	390.0	2.63	20	390.0	398.0	2.05
30	443.3	454.3	2.48	30	454.3	466.7	2.73
40	700.6	721.3	2.95	40	721.3	728.3	0.97
Průměrná změna:			2.69	Průměrná změna:			1.92

Tepelná úprava T=180°C							
Vc (m/s)	4 m/min	8 m/min	Změna (%)	Vc (m/s)	8 m/min	11 m/min	Změna (%)
	Příkon P (W)	Příkon P (W)			Příkon P (W)	Příkon P (W)	
20	360.4	370.0	2.66	20	370.0	376.7	1.81
30	437.7	448.6	2.49	30	448.6	457.5	1.98
40	660.0	686.3	3.98	40	686.3	698.0	1.70
Průměrná změna:			3.05	Průměrná změna:			1.83

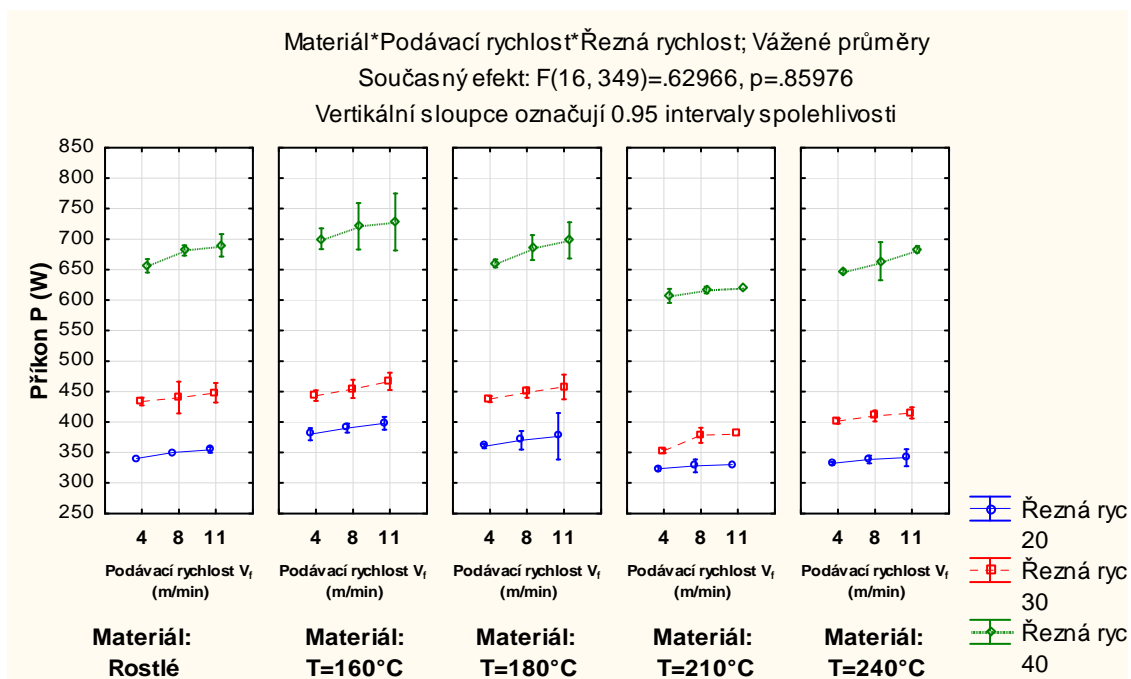
Tepelná úprava T=210°C							
Vc (m/s)	4 m/min	8 m/min	Změna (%)	Vc (m/s)	8 m/min	11 m/min	Změna (%)
	Příkon P (W)	Příkon P (W)			Příkon P (W)	Příkon P (W)	
20	323.3	328.0	1.45	20	328.0	330.0	0.61
30	352.7	378.3	7.26	30	378.3	380.0	0.45
40	607.1	616.7	1.58	40	616.7	620.0	0.54
Průměrná změna:			3.43	Průměrná změna:			0.53



Tepelná úprava T=240°C							
Vc (m/s)	4 m/min	8 m/min	Změna (%)	Vc (m/s)	8 m/min	11 m/min	Změna (%)
	Příkon P (W)				Příkon P (W)		
20	332.1	338.6	1.96	20	338.6	341.7	0.92
30	401.5	410	2.12	30	410.0	415	1.22
40	647.3	664	2.58	40	664.0	683.3	2.91
Průměrná změna:			2.22	Průměrná změna:			1.68

Tabulka nám ukazuje, že při zvýšení rychlosti posuvu při jednotlivých řezných rychlostech se zvětšuje i řezný příkon. Nejvyšší nárůst příkonu při jednotlivých řezných rychlostech je při přechodu podávací rychlosti ze 4 m/min na 8 m/min u všech variant. Průměrná změna řezného příkonu při přepínání rychlosti posuvu ze 4 m/min na 8 m/min činí 2,8%, změnou podávací rychlosti z 8 m/min na 11 m/min se příkon zvyšuje o 1,5%. Větší nárůst průměrné hodnoty příkonu při změně rychlosti posuvu ze 4 m/min na 8 m/min může být způsoben tím, že v daném případě zvýšení posuvné rychlosti je dvakrát větší než je to při změně rychlosti z 8 m/min na 11 m/min.

Znázorněním tabulky je graf 7, kde je vidět závislost řezného příkonu na rychlosti posuvu při různé interakce s řeznou rychlostí pro jednotlivé druhy tepelné úpravy materiálů.



**Graf 7** Závislost řezného příkonu na rychlosti posuvu při různých variantách řezné rychlosti a termické úpravě materiálů.

Na grafu 7 je vidět závislost řezného příkonu na podávací rychlosti při změně řezné rychlosti pro určitý druh zkoumaného materiálu. Z grafu je čitelné, že u všech vzorků, tedy u všech typů tepelné úpravy materiálu při jednotlivých řezných rychlostech, se zvyšováním podávací rychlosti zvětšuje i množství energie potřebné na ofrézování materiálu.

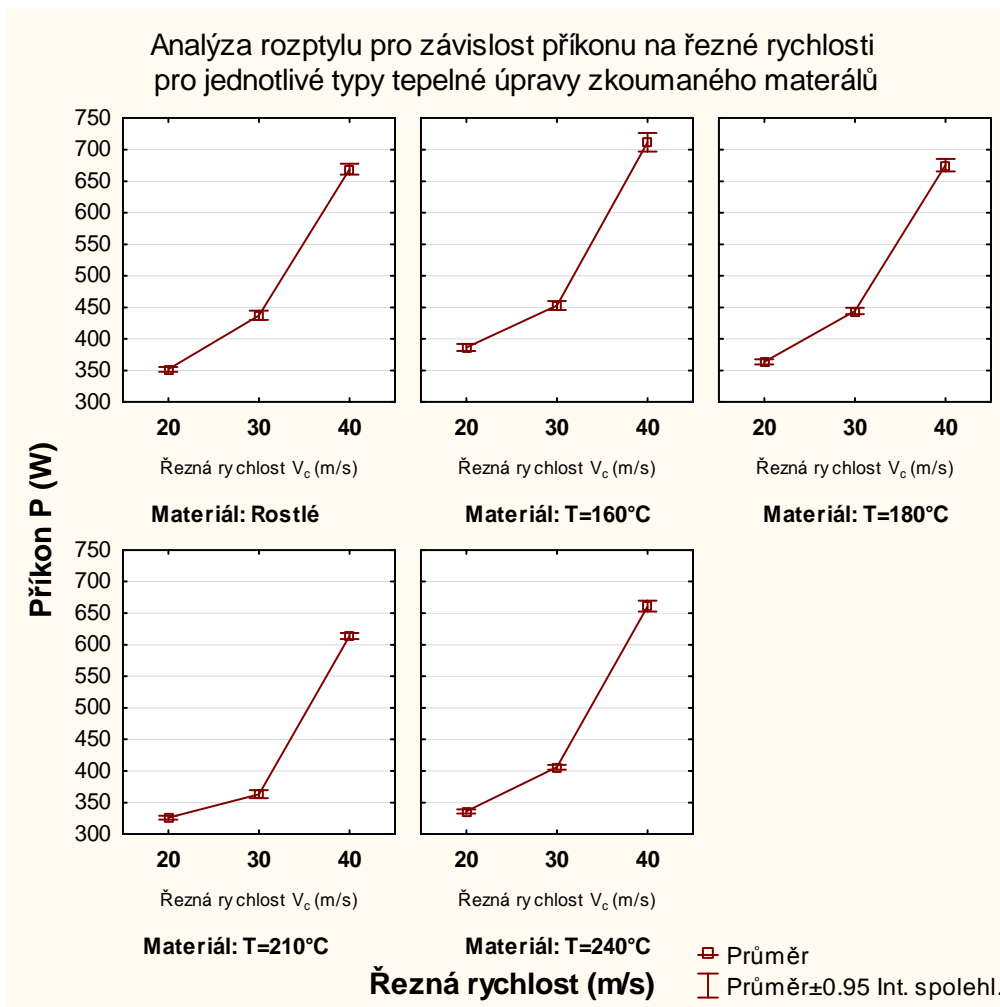
#### **Shrnutí:**

Z výše uvedených grafů a tabulky vyplývá, že v rámci jednotlivé řezné rychlosti se zvýšením podávací rychlosti řezný výkon zvětšuje, což můžeme zdůvodnit tím, že zvýšením rychlosti posuvu, tedy zvýšením přísunu materiálu za jednotku času se zvyšuje potřebná energie stroje nutná na překonání řezného odporu tj. na obrábění materiálu. Z celkového měření můžeme říct, že nejvyšší nárůst příkonu je při přechodu z rychlosti posuvu ze 4 m/min na 8 m/min, co můžeme zdůvodnit větším krokem zvýšení, než při změně rychlosti z 8/min na 11 m/min.

#### **7.2.4. Vliv řezné rychlosti na řezný příkon**

Při experimentálním měření řezného příkonu při rovinném frézování souběžně s podávací rychlostí byl zkoumán také vliv řezné rychlosti na řezný příkon. V našem experimentu měření energetické náročnosti probíhalo při frézování vzorků při řezných rychlostech 20, 30 a 40 m/s.

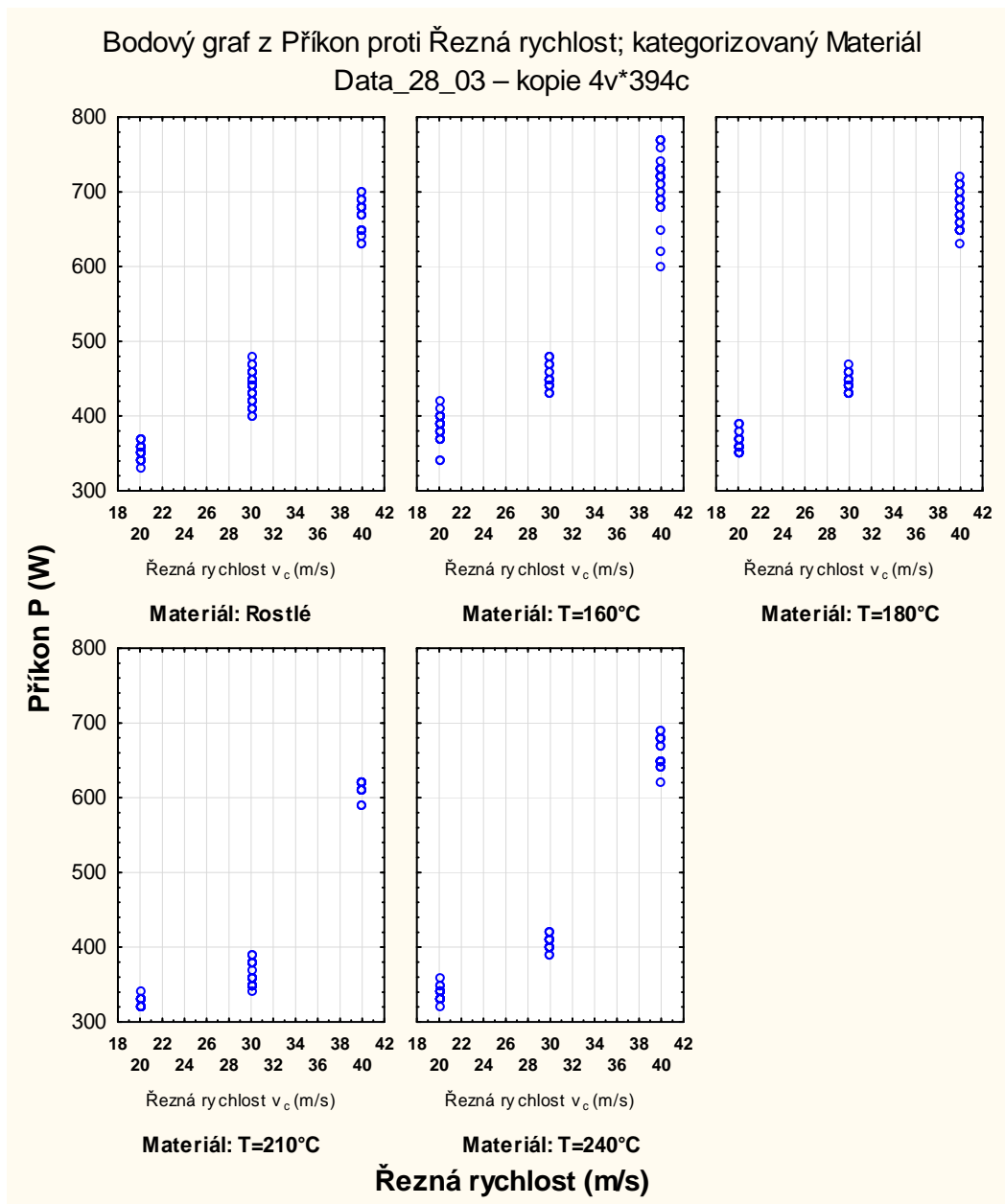
Závislost řezného příkonu na vlivu řezné rychlosti při určitých typech tepelné úpravy zkoumaného materiálu znázorňuje níže uvedený graf 8.



**Graf 8** Analýza rozptylu pro závislost řezné rychlosti v závislosti na řezné rychlosti pro jednotlivé typy tepelné úpravy materiálu

Z grafu je vidět, že se zvětšením řezné rychlosti se řezný příkon také zvětšuje. Při řezné rychlosti 20 m/s dochází k nejmenšímu řeznému výkonu a při řezné rychlosti 40 m/s je nejvyšší. Přitom můžeme pozorovat, že řezný příkon výrazně vzrůstá nad hodnotou 30 m/s. Zvyšování řezného příkonu se zvyšováním řezné rychlosti je způsobeno tím, že řezný nástroj se rychleji otáčí a tedy se i rychleji obrábí materiál, zákonitě stoupá i řezný příkon.

Rozložení naměřených hodnot řezného příkonu v závislosti na řezné rychlosti při rovinném frézování zobrazuje bodový graf 9.



**Graf 9** Bodový graf závislosti řezného příkonu na řezné rychlosti

Bodový graf znázorňuje, že naměřené hodnoty řezného příkonu v závislosti na řezné rychlosti jsou umístěny příliš těsně vedle sebe, což nám ukazuje, že změna řezné rychlosti má významný vliv na energetickou náročnost obrábění.

V tabulce č. 13 je zpracováno procentuální porovnání změny průměrného řezného příkonu v závislosti na řezné rychlosti při různých kombinacích rychlosti posuvu.

**Tab. 13** Procentuální změna průměrného řezného příkonu při vlivu řezné rychlosti při různých kombinacích řezné rychlosti pro jednotlivé druhy tepelné úpravy materiálů

Rostlé dřevo							
Vf (m/min)	20 m/s	30 m/s	Změna (%)	Vf (m/min)	30 m/s	40 m/s	Změna (%)
	Příkon P (W)	Příkon P (W)			Příkon P (W)	Příkon P (W)	
4	340.0	433.5	27.50	4	433.5	656.2	51.37
8	350.0	440.0	25.71	8	440.0	681.4	54.86
11	354.3	448.0	26.45	11	448.0	690.0	54.02
Průměrná změna:			26.55	Průměrná změna:			53.42

Tepelná úprava T=160°C							
Vf (m/min)	20 m/s	30 m/s	Změna (%)	Vf (m/min)	30 m/s	40 m/s	Změna (%)
	Příkon P (W)	Příkon P (W)			Příkon P (W)	Příkon P (W)	
4	380.0	443.3	16.66	4	443.3	700.6	58.04
8	390.0	454.3	16.49	8	454.3	721.3	58.77
11	398.0	466.7	17.26	11	466.7	728.3	56.05
Průměrná změna:			16.80	Průměrná změna:			57.62

Tepelná úprava T=180°C							
Vf (m/min)	20 m/s	30 m/s	Změna (%)	Vf (m/min)	30 m/s	40 m/s	Změna (%)
	Příkon P (W)	Příkon P (W)			Příkon P (W)	Příkon P (W)	
4	360.4	437.7	21.45	4	437.7	660.0	50.79
8	370.0	448.6	21.24	8	448.6	686.3	52.99
11	376.7	457.5	21.45	11	457.5	698.0	52.57
Průměrná změna:			21.38	Průměrná změna:			52.11

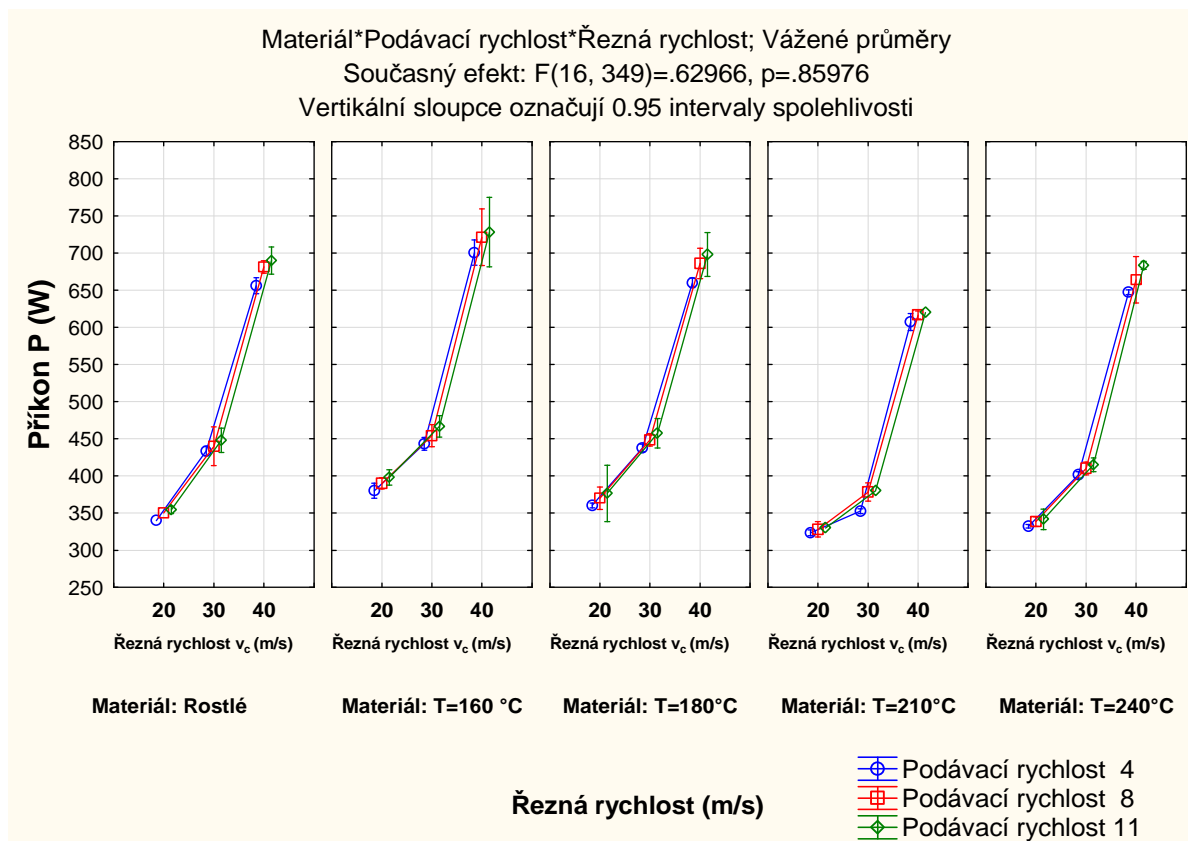
Tepelná úprava T=210°C							
Vf (m/min)	20 m/s	30 m/s	Změna (%)	Vf (m/min)	30 m/s	40 m/s	Změna (%)
	Příkon P (W)	Příkon P (W)			Příkon P (W)	Příkon P (W)	
4	323.3	352.7	9.09	4	352.7	607.1	72.13
8	328.0	378.3	15.34	8	378.3	616.7	63.02
11	330.0	380.0	15.15	11	380.0	620.0	63.16
Průměrná změna:			13.19	Průměrná změna:			66.10

Tepelná úprava T=240°C							
Vf (m/min)	20 m/s	30 m/s	Změna (%)	Vf (m/min)	30 m/s	40 m/s	Změna (%)
	Příkon P (W)	Příkon P (W)			Příkon P (W)	Příkon P (W)	
4	332.1	401.5	20.90	4	401.5	647.3	61.22
8	338.6	410.0	21.09	8	410.0	664.0	61.95
11	341.7	415.0	21.45	11	415.0	683.3	64.65
Průměrná změna:			21.15	Průměrná změna:			62.61

Z tabulky je patrné, že se zvětšením řezné rychlosti řezný příkon stroje stoupá. Markantnější přírůst řezného příkonu je při přechodu z řezné rychlosti 30 m/s na 40 m/s, kde průměrný přírůst činí 58% a při přechodu řezné rychlosti z 20m/s na 30 m/s průměrná změna byla pouze 19,8%.

Graf 10 sleduje průběh řezného příkonu v závislosti na řezné rychlosti při různých variantách podávací rychlosti.



**Graf 10** Závislost řezného příkonu na řezné rychlosti při různých variantách rychlosti posuvu a termické úpravě materiálů.

Z grafu je vidět změna průměrného řezného příkonu v rámci jednotlivých řezných rychlostí, při různých rychlostech posuvu není příliš velká, avšak z grafu je čitelné, že řezný příkon je výrazně závislý na změně řezné rychlosti.

#### Shrnutí:

Z výše zpracovaných tabulek a grafů můžeme konstatovat, že mezi řezným příkonem stroje a řeznou rychlostí je výrazná závislost, můžeme říci, že čím vyšší je řezná rychlost tím energeticky náročnější bude proces frézování. Největší narůst řezného příkonu byl zaznamenán nad hodnotou řezné rychlosti 30 m/s u všech zkoumaných vzorků. Tuto skutečnost můžeme zdůvodnit tím, že při vyšší řezné

rychlosti se zrychluje úběr materiálu a řezné hrany nástroje prochází obráběným materiálem více krát.

### 7.2.5. Vliv délky frézování na řezný příkon

Dalším zkoumaným faktorem byla délka frézování. Je známé, že odfrézovaná délka má významný vliv na opotřebení řezného nástroje a tím se zvyšuje příkon stroje potřebný na opracování materiálu. Zkoumání vlivu odfrézované délky na energetickou náročnost frézování probíhalo za konstantních podmínek řezné a posuvné rychlosti tedy i řezná rychlost se rovnala 40 m/s a podávací rychlost 8 m/min proto statistické posouzení vlivu tohoto faktoru bylo provedeno zvlášť.

Z analýzy rozptylu (tab.č.14) vyplývá, že všechny zkoumané faktory mají velmi významný vliv na řezný příkon, avšak vzájemná interakce zkoumaných faktorů takový vliv už nemá.

**Tab. 14** Analýza rozptylu

	SČ	Stupně (volnosti)	PČ	F	p
<b>Abs. člen</b>	172657878	1	172657878	475803.6	0.000000
Materiál (°C)	462512	4	115628	318.6	0.000000
Délka (m)	11442	3	3814	10.5	0.000001
„Materiál*Délka“	1477	12	123	0.3	0.981895
Chyba	370860	1022	363		

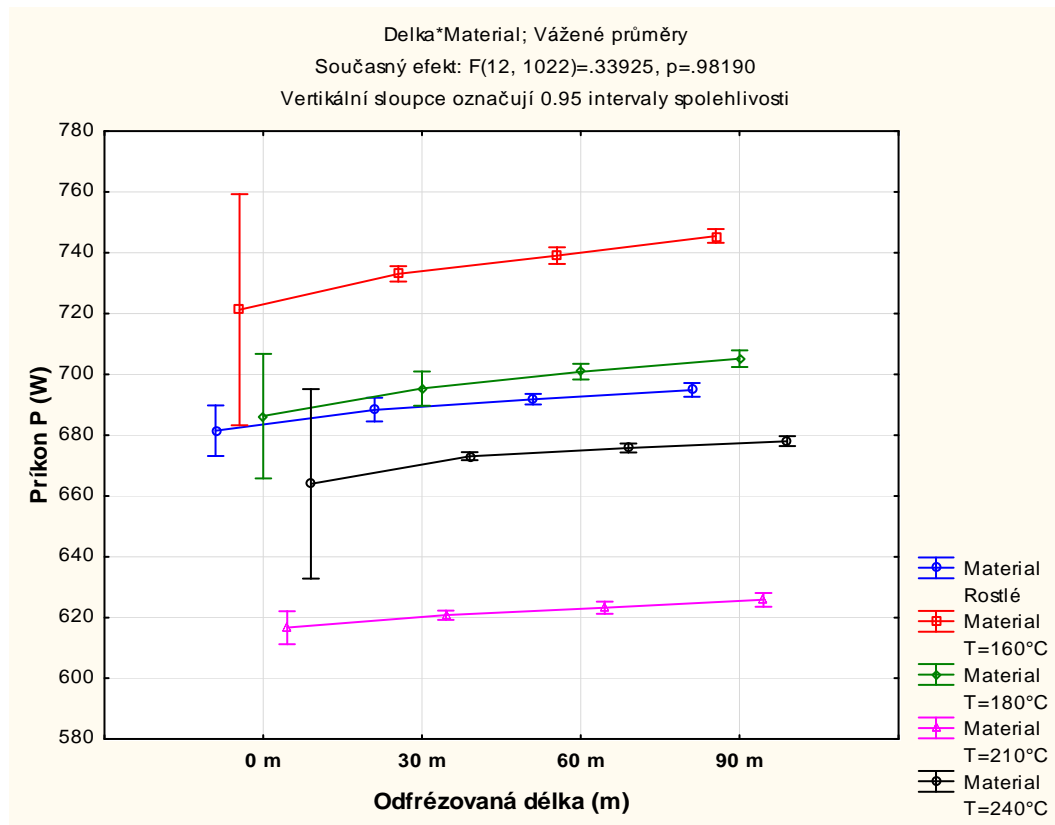
Tukeyová metoda (tab.č. 15) ukazuje, že změny každého zkoumaného materiálu jako i změny odfrézovaných délek jsou statistické významné.

**Tab. 15** Mnohonásobné porovnání vlivu změny materiálu a délky řezu na řezný příkon Tukeyovou metodou

<b>Materiál (°C)</b>	
<b>T=210°C</b>	622.81
<b>T=240°C</b>	675.77
<b>Rostlé</b>	690.92
<b>T=180°C</b>	700.27
<b>T=160°C</b>	737.08

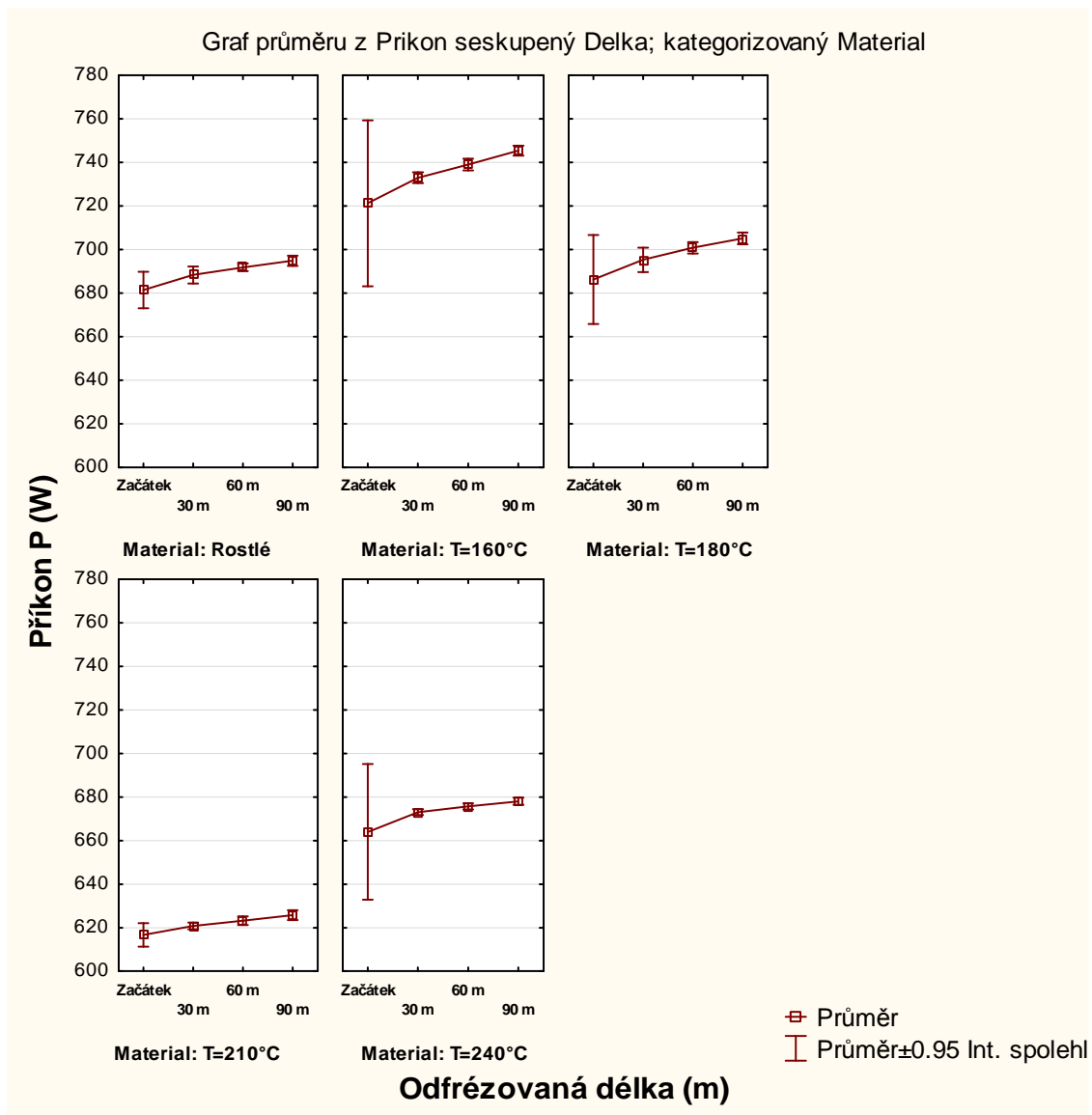
<b>Délka řezu(m)</b>	
<b>Začátek m</b>	677.94
<b>30 m</b>	687.33
<b>60 m</b>	691.43
<b>90 m</b>	693.5

Níže uvedené grafy 11 a 12 znázorňují závislost řezného příkonu na odfrézované délce.



**Graf 11** Znázornění rozdílů mezi řezným příkonem, naměřeném na rozdílných odfrézovaných délkách při různých typech tepelné úpravy materiálu.





**Graf 12** Analýza rozptylu pro závislost řezného příkonu na délce frézování pro jednotlivé druhy tepelné úpravy zkoumaného materiálu

Z grafu 12 je vidět, že s narůstající se odfrézovanou délkou roste energetická náročnost obrábění, což zapříčiněno otupováním řezného nástroje.

Pro procentuální porovnání změny řezného příkonu v závislosti na délce řezu byla zpracována následující tabulka č. 16.

**Tab. 16** Procentuální změna průměrného řezného příkonu při různých odfrézovaných délkách pro jednotlivé typy tepelné úpravy materiálu

Rostlé								
začátek	30 m	Změna (%)	30 m	60 m	Změna (%)	60 m	90 m	Změna (%)
681.4	688.3	1.01	688.3	691.8	0.51	691.8	694.8	0.44

Tepelná úprava T=160°C								
začátek	30 m	Změna (%)	30 m	60 m	Změna (%)	60 m	90 m	Změna (%)
721.3	733.0	1.63	733.0	739.0	0.82	739.0	745.5	0.87

Tepelná úprava T=180°C								
začátek	30 m	Změna (%)	30 m	60 m	Změna (%)	60 m	90 m	Změna (%)
686.3	695.3	1.32	695.3	700.8	0.80	700.8	705.1	0.61

Tepelná úprava T=210°C								
začátek	30 m	Změna (%)	30 m	60 m	Změna (%)	60 m	90 m	Změna (%)
616.7	620.8	0.67	620.8	623.2	0.40	623.2	625.8	0.41

Tepelná úprava T=240°C								
začátek	30 m	Změna (%)	30 m	60 m	Změna (%)	60 m	90 m	Změna (%)
664.0	673.1	1.36	673.1	675.7	0.40	675.7	678.0	0.33

Z tabulky je vidět, že po délce řezu 30 m hodnota průměrného příkonu prudce narůstá u všech vzorků. Procentuální změna průměrné hodnoty řezného příkonu při porovnání odfrézované délky na začátku, kde bylo odfrézováno 1-2m a po délce řezu 30 m je největší a činí 1,2%. Mezi délkami řezu 30m-60m a 60m-90m změna řezného příkonu je mírnější. Z tabulky je také čitelné, že u tepelně upraveného materiálu T=160°C, T=180°C a T=240°C je nárůst řezného příkonu po délce řezu 30 m rychlejší v porovnání s rostlým dřevem.

#### Shrnutí:

Z výše zpracovaných výsledků můžeme stanovit, že se řezný příkon s nárůstem odfrézované délky zvyšuje. Tento fakt můžeme zdůvodnit tím, že se zvyšující se délkou řezu roste otupování řezného nástroje. Přitom je zaznamenáno, že největší nárůst řezného příkonu je po odfrézování prvních 30 m, při dalším nárůstu délky řezu řezný

příkon stoupá mírně. Daná skutečnost je ve shodě s teoretickými poznatky, které dokumentují, že v prvních metrech opotřebení prudce narůstá, a potom roste mírnější.

## **8. Celkové zhodnocení výsledků**

### **Faktory ovlivňující výsledné hodnoty energetické náročnosti:**

Výsledky zaznamenaných hodnot při měření energetické náročnosti se v některých případech velmi liší. Na těchto odlišnostech se výrazně podílí struktura dřeva našich zkoumaných vzorků. Již ve stádiu stanovení fyzikálních vlastností, převážně stanovení hustoty vzorků byla zjištěna velká odlišnost ve struktuře dřeva (výrazné rozdíly v šířkách letokruhů – obr. č. 40) a tudíž i mezi hodnotami naměřené hustoty už v rámci jednotlivého materiálu (vzorek A a vzorek B). Tento jev se odrazil na odlišnostech v naměřených hodnotách hustoty mezi rostlým a tepelně upraveným dřevem. Tepelně ošetřené dřevo ( $T=160^{\circ}\text{C}$  a  $T=180^{\circ}\text{C}$ ) ukazovalo nejvyšší hodnoty hustoty v porovnání s rostlým dřevem -  $T=160^{\circ}\text{C}$  o 14,5% u materiálu  $T=180^{\circ}\text{C}$  rozdíl činí 11,6%. Nejnižší hodnoty hustoty ukazovali vzorky  $T=240^{\circ}\text{C}$  a  $T=210^{\circ}\text{C}$ . Tento fakt se neshoduje s teoretickými tvrzení, které uvádí, že se zvyšující se teplotou hustota dřeva klesá. Na základě výše řečeného můžeme konstatovat fakt, že experimentální vzorky byly vymanipulovány z různých kulatin a to, že byly pravděpodobně vymanipulovány z různých částí kmene, následně tato skutečnost se podílela na struktuře a vlastnostech dřeva převážně na jeho hustotě, tudíž se významně ovlivnily naměřené hodnoty energetické náročnosti při obrábění.

### **Zhodnocení výsledků energetické náročnosti obrábění:**

Pomocí experimentu bylo zjištěno, který z technicko-technologických faktorů čili materiálových faktorů má největší vliv na energetickou náročnost obrábění březového dřeva.

Statistickým zhodnocením bylo stanoveno, že nejvíce ovlivňujícím faktorem na energetickou náročnost je změna termické úpravy materiálu, za ním sleduje řezná rychlost a jako poslední nejméně významný faktor je podávací rychlost. Jelikož při sledování vlivu délky frézování na energetickou náročnost obrábění řezné podmínky se neměnili (tedy řezná a posuvné rychlosti byly konstantní -  $v_c=40$  m/s a  $v_f=8$  m/min) posouzení vlivu délky řezu bylo provedeno zvlášť. Statistické zhodnocení vlivu délky řezu poukázalo tento parametr za významný, tudíž parametrem ovlivňujícím energetickou náročnost.

**Vliv termické úpravy:** Nejvýraznější změny energetické náročnosti při sledování vlivu materiálu se projeví u materiálu tepelně ošetřeného na 160°C a na 180°C, které ukazují vyšší hodnoty řezného příkonu příslušně o cca 7% a 3% než u rostlého dřeva. Avšak náš experiment poukázal, že nejvýhodnějším z pohledu množství energie potřebné na frézování je termicky modifikovaný materiál T=210°C a T=240°C zde je zaznamenán pokles řezného příkonu přibližně o cca 10% a 4% v porovnání s rostlým dřevem.

**Vliv řezné rychlosti:** Druhým nejvýznamnějším parametrem je změna řezné rychlosti. Zde byl zaznamenán nárůst řezného příkonu se zvyšující se řeznou rychlostí u všech druhů zkoumaného materiálu. K největšímu nárůstu řezné rychlosti u všech vzorků dochází během zvýšení řezné rychlosti z 30 m/s na 40 m/s.

**Vliv podávací rychlosti:** Vliv změny podávací rychlosti má výrazně menší význam než předešlé faktory. Největší významnost rychlosti posuvu se projevuje v interakci s řeznou rychlostí. Zde můžeme pozorovat, že v rámci jednotlivé řezné rychlosti se zvýšením řezné rychlosti se zvyšuje řezný příkon u všech experimentálních vzorků. Nejvyšší přírůstek řezného příkonu v rámci určité řezné rychlosti je při přechodu z rychlosti posuvu ze 4 m/min na 8 m/min u všech materiálů.

**Vliv délky řezu:** Vliv tohoto faktoru na změnu řezného příkonu byl experimentálně sledován při konstantních podmínkách řezné a podávací rychlosti a proto statistické zhodnocení jeho vlivu bylo provedeno samostatně. Byla stanovena velká významnost vlivu tohoto faktoru na množství řezného příkonu. U všech vzorků byl zaznamenán prudký nárůst řezného příkonu po odfrézování délky 30 m. Další zvyšování řezného příkonu s narůstáním odfrézované délky byl mírnější.

## 9. Diskuse a přínos pro praxi a vědu

Hlavním záměrem práce bylo poukázat na vliv technicko-technologických parametrů (posuvná rychlost, řezná rychlost, délka řezu) a vliv dřeva (roslé a termicky upraveného březového dřeva) na energetickou náročnost obrábění při rovinném frézování.

Tato diplomová práce na základě uskutečněného experimentu poskytuje určité výsledky, které je možné zohlednit v praktické oblasti zpracování dřeva. Hlavně pomoci v oblasti optimalizace technicko-technologických parametrů, kterými se dají snížit náklady na frézování roslého a termicky upraveného dřeva, tedy zvýšit výkonnost řezání s co nejmenšími energetickými nároky.

- Řezný příkon se výrazně liší na různých typech tepelné úpravy materiálu. Z analýzy výsledků vyplývá, že nejvýznamnějším faktorem ovlivňujícím změnu řezného příkonu při frézování je změna termické úpravy. Tím náš experiment ukazuje, že při teplotách úpravy  $T=160^{\circ}\text{C}$  a  $T=180^{\circ}\text{C}$  řezný výkon dosahuje největších hodnot než u roslého dřeva, ale zde musíme brát v potaz také ten fakt, že na vzorky byly použity dvě kulatiny, které byly vymanipulovány z různých částí kmene, tento fakt jsme neměli možnost ovlivnit, jelikož vzorky byly pro experiment dovezeny. Toto všechno se podílelo na odlišné struktuře dřeva a tedy i na jeho vlastnostech, převážně na hustotě, která výrazně ovlivňuje hodnoty řezného příkonu. Avšak výsledky našeho experimentu ukazují to, že opracování termicky upraveného dřeva na teplotu  $T=210^{\circ}\text{C}$  a  $T=240^{\circ}\text{C}$  je energeticky výhodnější v porovnání s rostlým dřevem a tepelně upraveným dřevem na teplotou  $T=160^{\circ}\text{C}$  a  $T=180^{\circ}\text{C}$ .

- Dalším důležitým faktorem při optimalizaci technicko-technologických parametrů při frézování je řezná rychlost. Zde na základě výsledků můžeme říci, že její změna se významně projevuje na hodnotách řezného příkonu jak pro roslé tak i pro tepelně ošetřené dřevo. Změna řezné rychlosti se okamžitě projevuje na množství odebrané energie, proto s tímto faktorem musíme počítat už i při malovýrobě.

- Změna podávací rychlosti také ovlivňuje energetickou náročnost řezného procesu u všech typů zkoumaného materiálu, ale není tak výrazná jako předešlí činitelé. Vliv tohoto faktoru na energetickou náročnost má větší význam v interakce s řeznou rychlostí a bude významným činitelem při velkosériové výrobě.

- Dalším důležitým činitelem změny řezného příkonu je délka frézování. Jelikož s narůstáním odfrézované délky se zvyšuje množství energie potřebné na obrábění. U

všech materiálů byla zaznamenána tendence růstu řezné rychlosti po odfrézování prvních 30 m. S tímto faktorem musíme počítat jak v malovýrobě, tak i ve velkosériových produkcích.

Na základě výše uvedených výsledků můžeme konstatovat, že pro praxi bude nejvýhodnějším z hlediska energetické náročnosti při frézování nastavení následujících technicko-technologických podmínek: co nejmenší řezná rychlost a obrábění termicky modifikovaného dřeva (v případě našeho experimentu  $T=210^{\circ}\text{C}$  a  $T=240^{\circ}\text{C}$ ). Podávací rychlost je odporujícím činitelem, jelikož při nízkých rychlostech řezný příkon stroje je menší, ale na druhou stranu se zvyšuje doba obrábění materiálu a tím pádem se zmenšuje množství obrobeného materiálů a zrychluje opotřebení nástroje. Zvýšením podávací rychlosti se urychlí průchod materiálů strojem, ale zase se zvyšuje množství energie potřebné na obrobení. Výsledky experimentu ukazují, že změna rychlosti posuvu není tak významná jako ostatní činitelé a proto vhodné nastavení podávací rychlosti je otázkou pro jaký typ provozu se bude uplatňovat. Pro malovýrobu bude nejvýhodnějším snižovat rychlost posuvu a tím i energetickou náročnost při obrábění. Pro velkosériovou výrobu je tomu naopak, zde bude výhodnější nastavení vyšších rychlostí posuvu na úkor zvýšení energetické náročnosti, avšak za obrobení většího objemu produkce. S vhodným nastavením těchto technicko-technologických parametrů je těsně spojen i vliv délky frézování na množství potřebné energie a s tím souvisí i otázka opotřebení a následné údržby nástrojů. Zde můžeme konstatovat, že správná údržba nástrojů je jedním z důležitých faktorů z hlediska energetické náročnosti výroby a to především při velkém provozu, kde se délka frézování počítá na kilometry.

Pro vědu je tato diplomová práce přínosná především tím, že je možnost ji rozšířit o poznatky při řešení energetické, kvalitativní a kvantitativní optimalizací výrobního procesu při frézování rostlého a termicky upraveného březového dřeva. Jedním z dalších přínosů je nastolení použité metodiky experimentu na sledování vybraných parametrů, kde bude bráno v potaz to, že zkoumané vzorky musejí být získané z kulatin rostoucí ve stejných podmínkách a vzorky musejí být vymanipulovány ze stejných částí kmene, abychom tím vyloučili možnost zkreslení výsledků. V souvislosti s výsledky experimentu je nutné doplnění informací v oblasti obrábění termicky modifikovaného dřeva a následné porovnání rozdílů v naměřených hodnotách a další rozšíření sledované problematiky o jednotlivé vlivy z pohledu kvality opracování a geometrie nástroje.

## **Závěr**

Hlavním cílem této práce bylo prohloubit teoretické znalosti v oblasti obrábění termicky modifikovaného dřeva a pomocí experimentu zjistit vliv termické úpravy a technicko-technologických parametrů na energetickou náročnost při rovinném frézování březového dřeva.

Po vyhodnocení výsledků bylo zjištěno, že všechny faktory se podílí na množství řezného příkonu při obrábění. Avšak nejvíce ovlivňující faktor na energetickou náročnost je změna tepelné úpravy dřeva a řezná rychlost. Nejméně významným faktorem byla stanovena podávací rychlost. Dále byl stanoven vliv narůstající odfrézované délky na zvýšení energetické náročnosti obrábění.

V průběhu měření byla nastolena problematika postavení metodiky experimentu, která má větší význam, než se dalo očekávat. Závěrem můžeme konstatovat, že tato diplomová práce poskytuje výsledky vhodné pro další zkoumání této problematiky a může posloužit základem pro porovnání s jinými pracemi v oblasti energetické náročnosti obrábění při dodržení stejných podmínek.

## Seznam použité literatury

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

BARCÍK, Štefan; KVIETKOVÁ, Monika; BOMBA, Jan; SIKLIENKA, Mikuláš. *Dřevoobráběcí nástroje - údržba a provozování*. Praha: Powerprint, 2013. 355 s. ISBN 978-80-87415-80-1

BARCÍK, Štefan; ŘEHÁK, Tomáš. *Vliv vybraných technicko – technologických a materiálových faktorů na energetickou náročnost při rovinném frézování*. Praha, 2009. 84 s. Diplomová práce na České zemědělské univerzitě v Praze, fakultě lesnické a dřevařské.

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

KOVÁČ, Ján; MIKLEŠ, Milan. *Vplyv vybraných parametrov na energetickú náročnosť procesu rezania dreva pílovými kotúčmi*.

LISIČAN, Josef. *Obrábanie a delenie drevných materiálov*. Zvolen: Vysoká škola lesnícka a drevárska vo Zvolene, 1988. 412 s. Š 3730/1986-30

LISIČAN, Josef. *Teoria a technika spracovania dreva*. Zvolen: Matcentrum, 2007. 626 s. ISBN 80-967315-6-4

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

REINPRECHT, Ladislav. *Ochrana dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2007. 453 s. ISBN 978-80-228-1863-6

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



SIKLIENKA, Mikuláš; ARGAY, Filip; KMINIAK, Richard. *Vplyv vybraných materiálovo-technologických parametrov na veľkosť rezného príkonu pri pílení na horizontálnej kmeňovej pásovej píle*. Vedecký časopis drevárskej fakulty TU vo Zvolene, 2012. 54 (1): 63-72 s.

SIKLIENKA, Mikuláš; KMINIAK, Richard; ARGAY, Filip. *Vplyv uhlovej geometrie pílového kotúča na rezný výkon pri priečnom pílení bukového dreva*. Vedecký časopis drevárskej fakulty TU vo Zvolene, 2013 55 (1): 91-99 s.

UHLÍŘ, Alois; VLASÁK, Jiří. *Technológia 3: Výroba nábytku pre 4. ročník SPŠ drevárskych študijného odboru nábytkárstvo 1.vyd.* Bratislava: Alfa, 1987. 367 s.

VIGNER, Miroslav; PŘIKRYL, Zdeněk. *Obrábění*. Praha: SNTL, 1984. Typové číslo: L13-E1-V-41/22658.

**Elektronické zdroje:**

< <http://www.thermowood.fi> (International ThermoWood Association, ThermoWood Handbook, 2003)

< <http://www.prokom.cz>

< [www.thermowood.fi](http://www.thermowood.fi)

< [www.novawood.com.tr](http://www.novawood.com.tr)

< [www.swm-wood.com](http://www.swm-wood.com)

< <http://www.metrel.si> (Metrel, Instruction manual, 2010)

## **Seznam příloh**

**PŘÍLOHA I:** Naměřené hodnoty na stanovení hustoty zkoumaného materiálu.

**PŘÍLOHA II:** Naměřené hodnoty příkonu  $P$  ( $W$ ) při rovinném frézování experimentálních vzorků.

**PŘÍLOHA III:** Hodnoty příkonu  $P$  ( $W$ ) naměřené na rozdílných odfrézovaných délkách při rovinném frézování experimentálních vzorků.

## Přílohy

### PRÍLOHA I: Naměřené hodnoty na stanovení hustoty zkoumaného materiálu

#### Rostlé dřevo přířez A

č.vzorku	Rozměry			Váha	Hustota
Př_A	a (mm)	b (mm)	c (mm)	m (g)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	20.10	20.29	30.04	7.41	0.6048
2	20.17	20.29	30.05	7.45	0.6058
3	20.17	20.10	30.03	7.19	0.5906
4	20.16	20.20	30.01	7.23	0.5916
5	20.21	20.20	30.06	7.28	0.5932
6	20.22	20.20	30.06	7.35	0.5986
7	20.18	20.16	30.07	7.13	0.5828
8	20.18	20.17	30.09	7.19	0.5871
9	20.22	20.21	30.10	7.26	0.5902
10	20.21	20.23	30.15	7.38	0.5987
11	20.22	20.22	30.09	7.29	0.5926
12	20.21	20.24	30.00	7.19	0.5859
13	20.25	20.14	30.09	7.28	0.5932
<b>PRŮMĚR:</b>				<b>0.5935</b>	

#### Rostlé dřevo přířez B

č.vzorku	Rozměry			Váha	Hustota
Př_B	a (mm)	b (mm)	c (mm)	m (g)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	20.26	20.22	30.06	7.16	0.5814
2	20.28	20.16	30.09	7.23	0.5877
3	20.19	20.25	29.99	7.16	0.5839
4	20.24	20.24	30.03	7.22	0.5869
5	20.21	20.21	30.06	7.28	0.5929
6	20.27	20.22	30.08	7.14	0.5791
7	20.26	20.26	30.05	7.16	0.5805
8	20.26	20.26	30.01	7.16	0.5813
9	20.27	20.22	30.09	7.17	0.5814
10	20.26	20.21	30.09	7.20	0.5844
11	20.28	20.25	30.08	7.18	0.5812
12	20.28	20.23	30.06	7.16	0.5806
13	20.25	20.15	30.10	7.18	0.5846
14	20.26	20.12	30.23	7.21	0.5851
<b>PRŮMĚR:</b>				<b>0.5836</b>	

#### Termicky modifikované dřevo

##### T=160°C přířez A

č.vzorku	Rozměry			Váha	Hustota
160°C_A	a (mm)	b (mm)	c (mm)	m (g)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	20.30	20.26	30.03	8.11	0.6566
2	20.32	20.32	30.08	8.37	0.6739
2	20.26	20.26	30.07	8.25	0.6684
4	20.33	20.27	30.13	8.39	0.6757
5	20.29	20.21	30.05	8.30	0.6736
6	20.25	20.27	30.21	8.40	0.6774
7	20.20	20.31	29.97	8.37	0.6807
8	19.94	20.25	29.90	7.89	0.6535
9	20.11	20.32	29.95	7.90	0.6455
10	20.17	20.28	30.01	8.19	0.6672
11	20.25	20.22	30.08	7.95	0.6455
12	20.25	20.21	30.07	8.01	0.6509
13	20.25	20.31	30.07	7.98	0.6453
14	20.21	20.33	30.23	8.37	0.6739
<b>PRŮMĚR:</b>				<b>0.6634</b>	

#### Termicky modifikované dřevo

##### T=160°C přířez B

č.vzorku	Rozměry			Váha	Hustota
160°C_B	a (mm)	b (mm)	c (mm)	m (g)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	20.00	20.23	29.96	8.23	0.6789
2	20.23	20.27	30.06	8.44	0.6847
3	20.21	20.26	30.16	8.54	0.6915
4	20.22	20.28	30.10	8.60	0.6968
5	20.27	20.27	30.04	8.60	0.6968
6	20.29	20.23	30.03	8.23	0.6677
7	20.30	20.29	29.98	8.66	0.7013
8	20.21	20.28	30.00	8.54	0.6945
9	20.29	20.26	30.03	8.62	0.6983
10	20.26	20.34	30.24	8.66	0.6949
11	20.27	20.32	30.21	8.43	0.6775
12	20.24	20.28	30.34	8.31	0.6673
13	20.32	20.28	30.09	8.21	0.6621
14	20.28	20.29	29.93	8.18	0.6642
<b>PRŮMĚR:</b>				<b>0.6840</b>	

**Termicky modifikované dřevo****T=180°C přířez A**

č.vzorku	Rozměry			Váha m (g)	Hustota $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
	a (mm)	b (mm)	c (mm)		
180°C_ A					
1	20.34	20.16	30.00	7.88	0.6406
2	20.15	20.32	30.05	7.73	0.6283
3	20.11	20.29	30.02	7.69	0.6278
4	20.17	20.30	29.99	7.95	0.6474
5	20.18	20.32	29.99	8.01	0.6513
6	20.19	20.30	30.01	7.90	0.6423
7	20.18	20.26	30.04	8.16	0.6644
8	20.19	20.26	30.06	8.07	0.6563
9	20.17	20.26	30.03	7.88	0.6421
10	20.09	20.29	30.04	7.94	0.6484
11	20.10	20.27	30.29	7.89	0.6393
12	20.12	20.15	30.47	8.10	0.6557
13	20.13	20.16	30.15	8.41	0.6873
14	20.05	20.20	29.83	8.24	0.6820
<b>PRŮMĚR:</b>					<b>0.6510</b>

**Termicky modifikované dřevo****T=180°C přířez B**

č.vzorku	Rozměry			Váha m (g)	Hustota $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
	a (mm)	b (mm)	c (mm)		
180°C_ B					
1	20.27	20.23	30.13	8.41	0.6807
2	20.25	20.26	30.10	8.51	0.6891
3	20.24	20.27	30.16	8.53	0.6894
4	20.25	20.28	30.16	8.63	0.6968
5	20.27	20.25	29.95	8.67	0.7053
6	20.16	20.30	30.01	7.88	0.6416
7	20.20	20.28	30.11	8.03	0.6510
8	20.23	20.30	30.06	8.16	0.6610
9	20.30	20.23	30.12	8.29	0.6702
10	20.34	20.10	30.08	7.97	0.6481
11	20.37	20.10	30.05	7.75	0.6299
12	20.25	20.13	30.35	7.81	0.6313
13	20.21	20.18	30.08	7.84	0.6391
14	20.30	20.22	30.09	7.89	0.6388
<b>PRŮMĚR:</b>					<b>0.6623</b>

**Termicky modifikované dřevo****T=210°C přířez A**

č.vzorku	Rozměry			Váha m (g)	Hustota $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
	a (mm)	b (mm)	c (mm)		
210°C_ A					
1	20.23	20.23	30.23	7.15	0.5779
2	20.21	20.24	30.10	7.03	0.5710
3	20.20	20.21	30.16	6.98	0.5669
4	20.16	20.20	30.23	6.96	0.5654
5	20.20	20.23	30.12	6.98	0.5671
6	20.20	20.22	30.13	7.06	0.5737
7	20.22	20.24	30.14	7.08	0.5740
8	20.21	20.26	30.06	7.09	0.5760
9	20.21	20.26	30.16	7.05	0.5709
10	20.20	20.26	30.05	7.11	0.5781
11	20.19	20.16	30.03	7.16	0.5858
12	20.25	20.20	30.14	7.31	0.5929
13	20.32	20.23	30.14	7.39	0.5965
14	20.31	20.21	30.05	7.19	0.5829
<b>PRŮMĚR:</b>					<b>0.5771</b>

**Termicky modifikované dřevo****T=210°C přířez B**

č.vzorku	Rozměry			Váha m (g)	Hustota $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
	a (mm)	b (mm)	c (mm)		
210°C_ B					
1	20.21	20.27	30.09	7.30	0.5922
2	20.26	20.22	30.03	7.05	0.5731
3	20.19	20.22	30.08	6.97	0.5676
4	20.24	20.23	30.05	6.98	0.5673
5	20.20	20.25	30.26	6.94	0.5607
6	20.21	20.22	30.14	6.97	0.5659
7	20.22	20.27	30.12	6.99	0.5662
8	20.23	20.23	30.06	7.00	0.5690
9	20.20	20.24	30.07	7.02	0.5710
10	20.24	20.22	30.24	7.01	0.5664
11	20.28	20.24	30.12	7.39	0.5977
12	20.17	20.19	30.09	7.17	0.5851
13	20.14	20.19	30.10	7.07	0.5776
14	20.16	20.24	30.15	7.17	0.5828
<b>PRŮMĚR:</b>					<b>0.5745</b>

**Termicky modifikované dřevo****T=240°C přířez A**

č.vzorku	Rozměry			Váha m (g)	Hustota ρ (g/cm <sup>3</sup> )
	a (mm)	b (mm)	c (mm)		
1	20.13	20.27	30.04	7.40	0.6037
2	20.16	20.28	30.11	7.40	0.6011
3	20.21	20.24	30.32	7.49	0.6039
4	20.24	20.28	30.02	7.64	0.6200
5	20.21	20.27	30.07	7.55	0.6129
6	20.21	20.24	30.10	7.52	0.6108
7	20.17	20.22	30.05	7.59	0.6193
8	20.24	20.22	30.14	7.62	0.6178
9	20.20	20.11	30.06	7.55	0.6183
10	19.97	20.14	30.27	7.41	0.6087
11	20.15	20.11	30.03	7.39	0.6073
<b>PRŮMĚR:</b>					<b>0.6113</b>

**Termicky modifikované dřevo****T=240°C přířez B**

č.vzorku	Rozměry			Váha m (g)	Hustota ρ (g/cm <sup>3</sup> )
	a (mm)	b (mm)	c (mm)		
1	20.08	20.13	30.06	7.06	0.5810
2	20.12	20.14	30.05	6.70	0.5502
3	20.12	20.12	30.13	6.64	0.5444
4	20.10	20.15	30.07	6.56	0.5386
5	20.18	20.16	30.08	6.59	0.5385
6	20.14	20.15	30.14	6.64	0.5429
7	20.17	20.17	30.18	6.65	0.5416
8	20.13	20.16	30.20	6.70	0.5467
9	20.15	20.12	30.14	6.69	0.5475
10	20.12	20.20	30.07	6.89	0.5638
11	20.12	20.21	29.98	7.11	0.5832
<b>PRŮMĚR:</b>					<b>0.5526</b>

**PŘÍLOHA II: Naměřené hodnoty příkonu P (W) při rovinném frézování experimentálních vzorků****Rostlé březové dřevo**

20 m/s			30 m/s			40 m/s		
4 m/min	8 m/min	11 m/min	4 m/min	8 m/min	11 m/min	4 m/min	8 m/min	11 m/min
340	350	340	450	400	440	650	690	680
340	350	350	450	470	430	670	680	680
340	350	370	450	480	450	680	690	700
340	350	360	440	410	460	670	680	700
	350	350	450	410	460	680	690	
		360	420	470		680	670	
		360	440	460		650	670	
		370	420	460		630		
		350	430	400		630		
		360	420			640		
		340	440			650		
		350	410			650		
		360	430			650		
		370	440					
		360	440					
		340	440					
		330	440					
		340	420					
		350	430					
		360	410					
		370						
		350						
		360						

**Termicky modifikované březové dřevo T=160°C**

20 m/s			30 m/s			40 m/s		
4 m/min	8 m/min	11 m/min	4 m/min	8 m/min	11 m/min	4 m/min	8 m/min	11 m/min
340	370	390	440	440	480	680	620	650
390	380	410	450	480	470	720	730	770
380	370	400	460	470	470	720	770	770
400	390	390	450	440	480	730	760	720
400	400	400	450	440	450	730	720	720
390	390		450	450	450	720	710	740
400	380		430	460		730	730	
400	390		430			720	730	
370	400		430			680		
370	420					690		
370	390					690		
390	390					690		
380	390					700		
380	400					700		
380						710		
340						600		

**Termicky modifikované březové dřevo T=180°C**

20 m/s			30 m/s			40 m/s		
4 m/min	8 m/min	11 m/min	4 m/min	8 m/min	11 m/min	4 m/min	8 m/min	11 m/min
350	360	360	430	440	460	660	630	660
370	360	390	430	450	470	670	700	720
360	350	380	450	440	440	670	700	710
350	360		440	440	460	670	710	690
370	380		430	450		650	690	710
350	390		430	460		680	690	
360	390		450	460		670	690	
360			430			650	680	
370			450			660		
360			440			650		
360			440			650		
370			440			650		
350			430			650		
370								
360								
350								
360								
360								
350								
360								
370								
370								
360								
370								
350								

**Termicky modifikované březové dřevo T=210°C**

20 m/s			30 m/s			40 m/s		
4 m/min	8 m/min	11 m/min	4 m/min	8 m/min	11 m/min	4 m/min	8 m/min	11 m/min
320	320	330	350	360	380	590	620	620
330	340	330	350	380	380	590	620	620
320	330	330	360	390	380	620	620	620
330	330	330	350	370	380	610	610	620
320	320		350	390		620	620	620
320			360	380		610	610	
330			350			610		
320			350					
320			350					
			350					
			360					
			360					
			350					
			360					
			340					

**Termicky modifikované březové dřevo T=240°C**

20 m/s			30 m/s			40 m/s		
4 m/min	8 m/min	11 m/min	4 m/min	8 m/min	11 m/min	4 m/min	8 m/min	11 m/min
340	350	360	400	410	420	650	670	680
340	340	340	410	420	420	650	680	690
340	340	350	410	400	410	650	670	680
330	340	340	410	410	410	650	680	690
330	330	340	400	410		640	620	680
330	340	320	390			640		680
330	330		400			640		
330			390			650		
330			400			650		
330			400			650		
330			400			650		
330			410					
330			400					
330								

**PŘÍLOHA III: Hodnoty příkonu P (W) naměřené na rozdílných odfrézovaných délkách při rovinném frézování experimentálních vzorků**

ROSTLÉ			T=160°C			T=180°C			T=210°C			T=240°C		
30 m	60 m	90 m	30 m	60 m	90 m	30 m	60 m	90 m	30 m	60 m	90 m	30 m	60 m	90 m
700	690	700	720	750	750	650	680	680	620	630	630	670	680	670
690	680	700	760	740	740	730	690	690	620	620	620	670	680	680
680	690	700	760	750	750	720	710	700	630	620	620	670	670	670
690	680	700	750	730	750	720	700	710	620	620	620	680	680	670
700	690	690	750	750	740	730	710	720	620	610	630	670	670	680
680	680	680	740	740	750	740	690	730	630	630	620	680	680	680
690	690	690	740	730	750	740	700	720	620	620	630	670	670	670
700	700	700	740	730	740	720	680	690	610	620	620	670	680	690
680	690	690	740	740	750	610	690	700	610	620	630	680	670	680
680	680	700	730	750	750	710	710	700	620	630	620	670	670	670
700	690	700	740	740	740	720	720	720	630	620	630	670	670	670
680	700	700	730	730	750	710	710	720	620	620	620	670	670	670
690	690	700	730	740	740	710	690	730	620	620	630	680	680	670
700	680	690	730	740	740	730	700	690	620	630	620	670	670	680
680	690	700	730	730	750	730	700	690	610	620	630	680	680	670
690	690	690	730	740	740	710	710	710	620	630	620	670	680	670
700	690	680	720	730	740	600	720	710	610	620	620	680	670	670
680	700	690	720	740	750	670	710	720	620	630	620	670	680	670
690	690	700	720	730	740	710	700	680	630	620	630	670	670	670
690	690	690	750	740	750	700	680	680	620	620	620	670	670	680
680	700	690	740	750	740	710	700	690	620	630	630	670	670	670
700	690	700	720	740	750	730	710	710	610	620	630	680	680	680
680	700	690	730	730		730	720	710	620	630	620	670	670	690
700	690	700	740	740		720	710	720	630	620	640	680	680	680
680	680	700	740	750		640	690	730	620	620	630	670	680	680
680	690	690	730	740		680	700	680	620	630	640	670	670	680
690	700	700	730	730		730	690	680	620	620	630	680	680	680
700	690	690	740	740		710	700	710	630	620	620	670	680	680
690	700	700	740	750		710	720	730	620	630	630	680	680	680
700	690	690	720	740		730	710	720	630	620	620	670	670	680
680	690	700	730	730		740	690	690	620	630	630	670	680	680
690	680		730			720	690	710	630			670	670	680
700	690		730			650	690	720	620			680	680	680
680	690		740			680	700	730	630			670	670	680
690	700		720			730	710	690	620			670	680	680
700	690		730			700	710	690	620			670	680	690
690	700		740			700	690	690	620			670	680	680
690	690		730			710	680	720	630			680	680	680
700	690		740			740	690	730	620			670	670	680
690	700		730			730	710	710	620			680	680	690
700	690		720			700	710	680	620			670	680	680
690	690		740			640	700	690	620			680	670	670
700	690		740			720	680	700	620			670	680	670
690	700		720			700	790	720	620			670	680	670
580	690		740			710	700	730	620			670	680	670
680	700		740			720	710	700	620			680	670	670
700	700		730			730	700	680	620			670	680	680
690	690		730			730	720	680	620			670		680
680	700		740			710	710	700	620			670		680
700	690		720			650	690	710	620					690
680	700		730			710	680	700	620					680
680	690		730			690	700	720	610					680
690	700		720			690	710	730						680
690	690		720			720	710	680						690
700	700		730			730	700	680						680
690			740			720	690	690						680
670			720			690	700	720						690
690			730			630	720	730						680



700			730			710	710	720							680
690			730			710	690	690							680
680						700	680	700							
690						720	700	710							
700						740	720	720							
680						730	690	730							
690						710	690	710							
700						600	680	690							
						700	710	680							
						710	720	710							
						710	700	720							
						720	680	720							
						730	680	680							
						730	680	710							
						720	710	720							
						610	720	720							
						660	710	680							
						710	690	700							
						700	680	710							
						700	690	720							
						710	710	690							
						730	720	680							
						720	680	680							
						660	690	710							
						610	680	720							
						690	700	730							
						710	710	680							
						700	710	690							
						640	690	720							
						690	680	710							
						730	710	680							
						730	700	700							
						720	720	710							
						620	680	730							
						700	700	680							
						700	700	680							
						710	710	710							
						680	710	720							
						710	680	730							
						730	680	700							
						730	700	680							
						630	710	680							
						640	720	720							
						710	690	730							
						690	680	710							
						710	710	690							
						590	710	710							
						680	710	720							
						730	680	730							
						740	700	690							
						710	730	680							
						690	700	700							
						730	680	690							
						700	710	710							
						650	720	730							
						670	710	710							
						720	680	680							
						720	710	700							
						720	720	700							
						660	710	730							
						720	680	720							
						690	710	710							
						700	710	680							
						730	720	680							

						730	680	700						
						710	700	710						
						660	710	730						
						630	710	720						
						700	720	680						
						690	680	700						
						700	680	710						
						700	690	730						
						730	710	720						
						720	720	680						
						700	720	690						
						670	690	710						
						710	680	720						
						700	710	730						
						670	720	710						
						570	710	680						
						650	680	690						
						720	680	710						
						720	680	720						
						710	700	710						
						700	710	700						
						710	720	690						
						690		680						
						680		720						
						660		730						
						720		710						
						720		680						
						710		700						
						600		710						
						620		720						
						690		730						
						700		680						
						700		690						
						610		700						
						630		710						
						670		730						
						700		720						
						710								
						620								
						680								
						720								
						700								
						650								
						620								
						710								
						730								
						720								
						630								