

Česká Zemědělská Univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Vliv termické modifikace na energetickou náročnost
dřeviny Iroko při rovinném frézování**

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Sarvašová Kvietková Monika, PhD.

Vypracoval:

Adam Bača

Praha 2020

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Adam Bača

Dřevařství
Dřevařství

Název práce

Vliv termické modifikace na energetickou náročnost dřeviny Iroko při rovinném frézování

Název anglicky

The influence of the thermal modification on the energy intensity of Iroko Wood in plane milling

Cíle práce

Cílem práce je charakteristika procesu frézování termicky modifikovaného dřeva jako materiálu s inovovanou vnitřní strukturou dosaženou tepelnou a vlhkostní úpravou. Zaměříme se na změny vlastností dřeva při tepelné modifikaci. Dále se budeme zabývat energetickou náročností procesu, která nám ukáže vhodnou kombinaci parametrů pro frézování a stanovení spotřeby elektrické energie při obrábění.

Metodika

Charakteristika výrobního procesu termicky modifikovaného dřeva. Vliv tepelné úpravy na proces frézování, ale i na energetickou náročnost procesu. Výhody a nevýhody procesu frézování. Stanovení optimálních podmínek pro frézování. Popsání změn vlastností dřeva při tepelné modifikaci.

Doporučený rozsah práce

35 – 45 stránek

Klíčová slova

energetická náročnost, technologické parametry, tropická dřevina, frézování

Doporučené zdroje informací

- BARCÍK, Š., KVIETKOVÁ, M., BOMBA, J., SIKLIENKA, M. Dřevoobráběcí nástroje – údržba a provozování. Powerprint Praha. 2013. 355 s., ISBN 978-80-87415-80-1.
- HILL, C. A. S. Wood modification chemical, thermal and other processes. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, UK. 2006. 239 s.
- KVIETKOVÁ, M. Obrábění dřeva. CARTER Praha. 2015. 295 s., ISBN 978-80-213-2604-0.
- MAYES, D., OKSANEN, O. Thermowood(r) Handbook. Finsko Dostupné na: http://www.thermowood.fi/data.php/200312/795460200312311156_tw_handbook.pdf. (28. 8. 2013).
- PROKEŠ, S. Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva. STNL – Nakladatelství technické literatury, Praha: 1982. s. 354 – 415. ISBN 04-833-82.

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Monika Sarvašová Kvietková, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Ing. Miroslav Sedlecký, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2019

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 13. 3. 2019

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 14. 03. 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „**Vliv termické modifikace na energetickou náročnost dřeviny Iroko při rovinném frézování**“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Moniky Kvietkové Sarvašové, PhD., a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním bakalářské 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 Praze dne: 20. 4. 2020

.....

podpis

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Monice Sarvašové Kvietkové, PhD., a konzultantovi Ing. Miroslavu Sedleckému, Ph.D., za odborné vedení a poskytnutí cenných připomínek, vstřícnost a trpělivost, kterou měli při mých dotazech.

Abstrakt

Tato bakalářská práce popisuje a rozebírá charakteristiku vlivu termické modifikace na energetickou náročnost tropické dřeviny Iroko při rovinném frézování v závislosti při změnách teplot termické modifikace. Tropická dřevina Iroko proběhla termickou modifikací při teplotách 160 °C, 180 °C, 210 °C a porovnal jsem ji s nemodifikovaným vzorkem od stejné tropické dřeviny. Popsal jsem dané změny vlastností dřeva při tepelné modifikaci.

Dál jsem se zabýval vlivem tepelné úpravy na proces frézování z hlediska energetické náročnosti procesu. Sledované technologické parametry byly řezná rychlost 20, 30, 40 m*s⁻¹ a podávací rychlost 4, 8, 11 m*min⁻¹. Tyto technologické parametry nám ukázaly vhodnou kombinaci pro frézování a výši spotřeby elektrické energie při obrábění.

Práci jsem rozdělil na sedm částí. První část je zaměřena na problematiku frézování. V druhé části jsem popsal tropickou dřevinu Iroko. Třetí a čtvrtou část jsem věnoval termické úpravě dřeva finskou metodou ThermoWood® a energetické náročnosti procesu. Následující část stanovuje metodiku práce, kde jsem popsal materiál k měření, strojní vybavení a postup měření energetické náročnosti procesu. V šesté části jsem hodnotil naměřené výsledky. Z výsledků vyplynula statistická závislost poklesu energetické náročnosti frézování u termicky modifikovaného vzorku při 210 °C. Na základě výsledků bych doporučil volit řeznou rychlost při 20 a 30 m*s⁻¹, v kombinaci s podávací rychlostí při 4 a 8 m*min⁻¹. Zvýšení daných rychlostí vedlo k většímu nárůstu spotřeby elektrické energie. Poslední část je zaměřena na diskuzi výsledků a závěr práce.

Klíčová slova: Energetická náročnost, technologické parametry, tropická dřevina, frézování

Abstract

This bachelor thesis describes and discusses the characteristics of the effect of thermal modification on the energy intensity of Iroko tropical wood species in planar milling in relation to changes in thermal modification temperatures. The samples were modified at temperatures of 160 °C, 180 °C, 210 °C and I compared them with the unmodified sample of tropical tree Iroko. I described given changes of wood properties during thermal modification.

Next I dealt with the effect of heat treatment on the milling process in terms of energy intensity of the process. The monitored technological parameters were cutting speed 20, 30, 40 m*s⁻¹ and feeding speed 4, 8, 11 m*min⁻¹. These technological parameters have shown us a suitable combination for milling and the amount of power consumption during machining.

I divided the work into seven parts. The first part is focused on milling. In the second part I described tropical woody Iroko. The third and fourth parts were devoted to the thermal treatment of wood by the Finnish method ThermoWood® and the energy intensity of the process. The following part defines the methodology of the work, where I described the measurement material, machinery and procedure for measuring the energy intensity of the process. In the sixth part I evaluated the measured results. The results showed statistical dependence of decrease of energy intensity of milling in thermally modified sample at 210 °C. Based on the results, I would recommend cutting speed at 20 and 30 m*s⁻¹, in combination with the feeding speed at 4 and 8 m*min⁻¹. Increasing the speeds has led to a greater increase in electricity consumption. The last part is focused on discussion of results and conclusion of the work.

Keywords: Energy intensity, technological parameters, tropical wood, milling

Obsah

1. Úvod.....	- 12 -
2. Cíle práce.....	- 13 -
3. Frézování.....	- 14 -
3.1. Podle osy otáčení a ploch opsaných břity nástroje.....	- 15 -
3.2. Nesousledné a sousledné frézování.....	- 17 -
3.3. Podle tvaru obrobené plochy.....	- 18 -
3.4. Výhody a nevýhody frézování.....	- 18 -
4. Kinematika frézovacího procesu.....	- 19 -
5. Frézovací nástroje.....	- 22 -
5.1. Rozdělení frézovacích nástrojů.....	- 23 -
5.2. Druhy fréz.....	- 24 -
5.2.1. Kotoučové frézy.....	- 24 -
5.2.2. Stopkové frézy.....	- 25 -
5.2.3. Čelní frézy.....	- 26 -
5.2.4. Válcová fréza – nožová hřídel.....	- 26 -
6. Frézovací stroje.....	- 27 -
6.1. Rovinné frézky.....	- 27 -
6.1.1. Srovnávací frézka.....	- 27 -
6.1.2. Tloušťkovací frézka.....	- 28 -
6.1.3. Čtyřstranná frézka.....	- 29 -
6.2. Tvarové frézky.....	- 30 -
6.2.1. Svislá spodní frézka.....	- 30 -
6.2.2. Svislá horní frézka.....	- 31 -
7. Tropická dřevina Iroko.....	- 32 -
8. Tepelná modifikace dřeva.....	- 34 -

8.1.	Fáze výrobního procesu ThermoWood®	- 35 -
8.2.	Třídy výrobku ThermoWood®.....	- 36 -
8.3.	Faktory ovlivňující kvalitu ThermoWoodu	- 37 -
8.4.	Struktura dřeva ThermoWood	- 37 -
8.5.	Vliv termické úpravy na fyzikální vlastnosti dřeva.....	- 39 -
8.6.	Vliv termické úpravy na mechanické vlastnosti dřeva	- 40 -
8.7.	Použití modifikovaného dřeva	- 40 -
9.	Energetická náročnost procesu	- 41 -
10.	Metodika	- 44 -
10.1.	Použitý materiál	- 44 -
10.2.	Stolní frézka.....	- 46 -
10.3.	Podávací zařízení	- 46 -
10.4.	Frézovací hlava.....	- 47 -
10.5.	Měřicí přístroj energetické náročnosti	- 47 -
11.	Výsledky	- 49 -
12.	Diskuze	- 53 -
13.	Přínos pro vědu a praxi.....	- 55 -
14.	Závěr	- 56 -
15.	Seznam použitých zdrojů.....	- 57 -

Seznam obrázků

Obrázek č. 1.: Válcové frézování	- 15 -
Obrázek č. 2.: Kuželové frézování	- 15 -
Obrázek č. 3.: Čelní frézování	- 16 -
Obrázek č. 4.: Čelně-kuželové frézování	- 16 -
Obrázek č. 5.: Protiběžné frézování	- 17 -
Obrázek č. 6.: Souběžné frézování	- 17 -
Obrázek č. 7.: Tvarové frézování	- 18 -
Obrázek č. 8.: Technologické schéma válcového frézování	- 19 -
Obrázek č. 9.: Geometrie břitu	- 22 -
Obrázek č. 10.: Kotoučová fréza	- 24 -
Obrázek č. 11.: Stopková fréza	- 25 -
Obrázek č. 12.: Čelní fréza	- 26 -
Obrázek č. 13.: Nožová hřídel se čtyřmi noži	- 26 -
Obrázek č. 14.: Srovnávací frézka	- 28 -
Obrázek č. 15.: Tloušťkovací frézka	- 29 -
Obrázek č. 16.: Čtyřstranná frézka	- 29 -
Obrázek č. 17.: Svislá spodní frézka	- 30 -
Obrázek č. 18.: Svislá horní frézka	- 31 -
Obrázek č. 19.: Radiální řez dřevem Iroko	- 33 -
Obrázek č. 20.: Schéma výrobního procesu ThermoWood	- 35 -
Obrázek č. 21.: Stolní frézka	- 46 -
Obrázek č. 22.: Podávací zařízení na frézce	- 46 -
Obrázek č. 23.: Frézovací hlava	- 47 -
Obrázek č. 24.: Zapojení přístroje METREL Power Q plus	- 47 -

Seznam tabulek

Tabulka č. 1.: Účinky termické modifikace na jehličnaté dřeviny – smrk, borovice ...	36
Tabulka č. 2.: Účinky termické modifikace na listnaté dřeviny – bříza, osika	36
Tabulka č. 3.: Faktory ovlivňující úbytek hmotnosti termicky modifikovaného dřeva .	38
Tabulka č. 4.: Údaje z termické modifikace dřeva	44
Tabulka č. 5.: Změna hustoty termickou modifikací	45
Tabulka č. 6.: Závislost energetické náročnosti na teplotě termické modifikace	

s využitím Duncanova testu	50
Tabulka č. 7.: Průměrný vzrůst příkonu v závislosti na teplotě termické modifikace...	50
Tabulka č. 8.: Statistická významnost řezné a podávací rychlosti	52

Seznam grafů

Graf č. 1.: Závislost energetické náročnosti na teplotě termické modifikace	49
Graf č. 2.: Závislost řezné rychlosti a podávací rychlosti na energetickou náročnost...	51

Seznam zkratek

V_c - řezná rychlost

V_f - posuvná rychlost

R - poloměr nástroje

D - průměr nástroje

C - vysunutí řezné hrany nad tělo válce

e - úběr

f_z - posuv na řeznou hranu,

l_k - délka kontaktního oblouku

l_v - délka vlny (kinematické nerovnosti)

y_v - výška vlny (kinematické nerovnosti)

$S1$ - plocha zřezaná přechodem řezné hrany přes obrobek ($S1 = l_k \cdot hDstr$)

$S2$ - plocha obdélníka o stranách e a f_z

$hDstr$ - nominální střední tloušťka přířezu třísky

$hDmax$ - nominální maximální tloušťka přířezu třísky

φstr - střední úhel posuvného pohybu

φmax - maximální úhel posuvného pohybu

α = úhel hřbetu

γ = úhel čela

ε = úhel zkosení

D - průměr frézy

d - průměr upínacího otvoru

A - průměr stopky

H - celková výška

$R1$ - poloměr zaoblení

β = úhel břitu

δ = úhel bočního podbrusu

λ = úhel sklonu ostří (axiální úhel)

S - šířka frézy

R - radius

D - pracovní průměr

h - pracovní výška

C - průměr vodícího ložiska

1. Úvod

Dnešní doba klade velký důraz na zpracování přírodních surovin a jejich následnou obnovitelnost. Dřevo, které se skládá ze svazků celulóзовých a hemicelulóзовých vláken, které jsou obklopeny ligninem, který je drží pohromadě. Díky tomuto složení představuje obnovitelný zdroj energie. Dřevo má velmi dobré mechanické vlastnosti, snadno se opracovává a má příjemný estetický vzhled. Také má svoje nevýhody kvůli své různorodosti ve stavbě a hygroskopicitě dřeva. Tyto nevýhody lze řešit několika způsoby. Jedna z možností je právě tepelná modifikace dřeva.

Tato metoda používá pouze vodu a teplo k úpravě dřeva. Díky tomu modifikované dřevo má vyšší odolnost vůči biologickým škůdcům a hlavně lepší rozměrovou stálost, která je největší nevýhodou dřeva. Proto jsem si vybral tuto modifikaci dřeva procesem ThermoWood®. Zaujala mě samotná technologie procesu bez použití chemikálií a chtěl jsem poznat vliv použití na tropickou dřevinu Iroko. Tropickou dřevinu Iroko jsem si vybral kvůli velmi rozdílné struktuře dřeva oproti tuzemským dřevinám. Tepelná modifikace dřeva procesem ThermoWood® je v posledních letech velmi diskutovatelným tématem, zejména rozvojem technologií a četných výzkumů na tuto problematiku. Z pohledu obrábění lze termicky modifikované dřevo obrábět různými způsoby.

Vybral jsem si proces rovinného frézování, protože ho provádíme na základních dřevoobráběcích strojích a je nezbytně nutné pro další zpracování ve výrobě. Tento proces se používá i na velkých dřevoobráběcích centrech, které jsou programovány přes počítač. U tohoto procesu je velmi různorodá škála frézovacích nástrojů, které mohou být použity pro opracování ploch a hran obrobku. Na tento proces jsem se zaměřil i po stránce energetické náročnosti, protože dnes je každá úspora energie z hlediska ochrany životního prostředí velmi žádoucí. Proto mě zajímala výše spotřeby elektrické energie při procesu frézování, s ohledem na technologické parametry frézování, kterými byly řezná a posuvná rychlost. Zmíněné technologické parametry zcela jistě ovlivňují energetickou náročnost.

2. Cíle práce

Cílem práce je charakteristika procesu frézování termicky modifikovaného dřeva jako materiálu s inovovanou vnitřní strukturou dosaženou tepelnou a vlhkostní úpravou, na energetickou náročnost tropické dřeviny Iroko při rovinném frézování. Zaměřil jsem se na termickou modifikaci metodou ThermoWood®, změn vlastností dřeva při procesu a tropickou dřevinu Iroko. Dál jsem se zabýval vlivem tepelné úpravy na technologický proces frézování, ale i na energetickou náročnost procesu, která nám ukázala vhodnou technologickou kombinaci parametrů pro frézování a stanovení spotřeby elektrické energie při obrábění.

K měření jsem si vybral tři tepelně modifikované vzorky při teplotách 160 °C, 180 °C a 210 °C. Kromě toho jsem pracoval i se vzorkem bez tepelné modifikace při teplotě 20 °C, který se porovnal s tepelně upravenými vzorky. Při frézování vzorků jsem pozoroval závislost stanovených frézovacích parametrů. Jako technologické parametry byly - řezná rychlost 20, 30 a 40 m*s⁻¹ a podávací rychlost 4, 8 a 11 m*min⁻¹. Z těchto technologických parametrů lze stanovit vhodné podmínky pro energetickou náročnost procesu frézování.

3. Frézování

Po úvodu práce a vymezení cílů práce bych začal prvním důležitým tématem této práce, kterým bylo charakterizovat proces frézování a jeho kinematiku. V této kapitole jsem začal definicí pojmu frézování a základním rozdělením podle technologických parametrů frézování. Na to jsem navázal základními frézovacími nástroji a následného použití těchto nástrojů na frézovacích strojích. Nyní se vrátím zpět na charakteristiku a definici pojmu frézování od autorů, kteří jsou odborníci na tuto problematiku.

Frézováním nazýváme obrábění otáčejícím se nástrojem (frézou, frézovací hlavou), kdy se nominální tloušťka třísky mění během záběru od nuly do maxima a posuv je ve směru kolmém k ose otáčení nástroje (Prokeš 1978).

Hlavním řezným pohybem při frézování je otáčivý pohyb nástroje, vedlejšími pohyby jsou posuvný pohyb obrobku a přísvuv, který nastavuje hloubkou řezu (Kvietková, 2015). Řezná plocha je cykloida a není totožná s obrobenou plochou (Lisičan a kol., 1996).

Tímto způsobem obrábění dřeva se zabezpečí opracování obrobku na požadovaný tvar, rozměry a hladkého povrchu (Lisičan, 1988). Frézování je třískotvorný proces, při kterém vzniká vedlejší produkt, kterým je tříska. Proces frézování dřeva je velmi využívaný kvůli pokrokové technologii strojů, které můžeme programovat přes počítač. Výsledkem jsou dřevoobráběcí centra, která se stala nedílnou součástí velkých podniků na zpracování dřeva. Výhodou těchto center je obrovský výběr frézovacích i dalších nástrojů. Univerzálnost těchto frézovacích strojů a nástrojů dává široké uplatnění ve dřevozpracujícím průmyslu (Barcík, 2009).

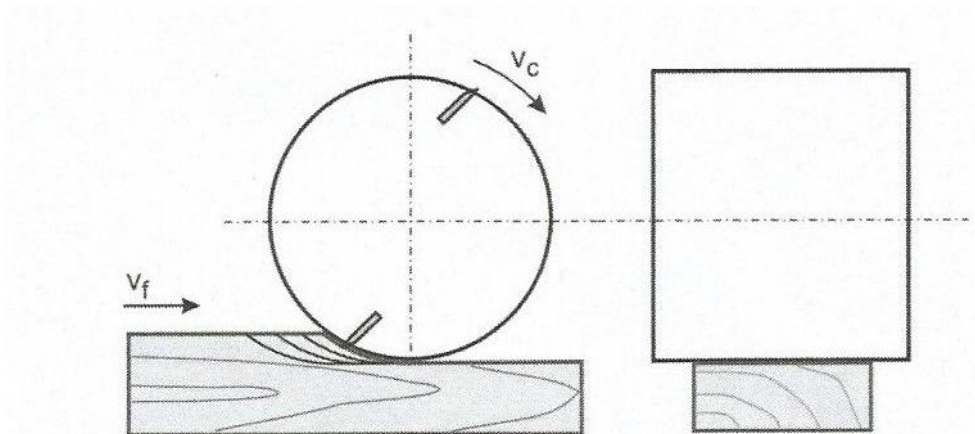
Rozdělení frézování

Frézování mohou rozdělit podle technologických parametrů do skupin:

- 1) podle osy otáčení a ploch opsaných břity nástroje,
- 2) nesousledné a sousledné frézování,
- 3) podle tvaru obrobené plochy (Prokeš 1978).

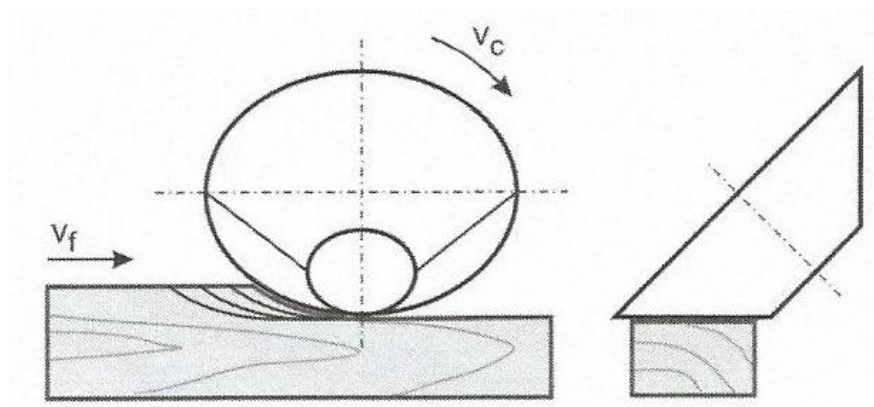
3.1. Podle osy otáčení a ploch opsaných břity nástroje

a) **Válcové frézování** – osa otáčení nástroje je rovnoběžná s obrobenou plochou, břity opisují válcovou plochu (Prokeš, 1978). Během válcového frézování je osa rotace rovnoběžná s obráběnou plochou (Obr. 1).



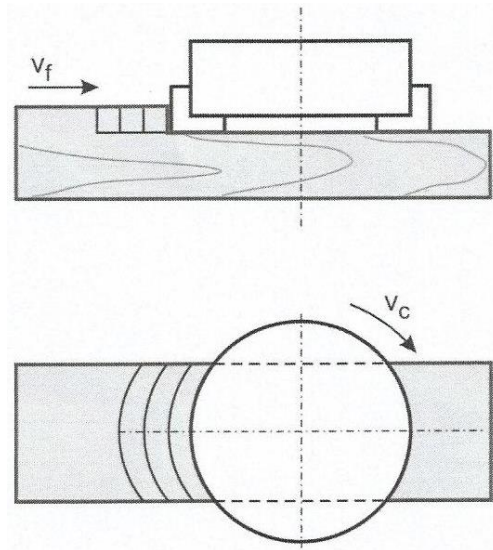
Obrázek č. 1.: Válcové frézování (Siklienka a Kminiak, 2013)
 V_c - řezná rychlost, V_f - posuvná rychlost

b) **Kuželové frézování** - osa otáčení nástroje je skloněná pod úhlem o 10° až 12° k obrobené ploše a řezné hrany nástroje opisují kuželovou plochu (Obr. 2). Toto frézování je velmi produktivní, protože tloušťka odebírané třísky je malá a může se zvýšit rychlost posuvu (Prokeš, 1978).



Obrázek č. 2.: Kuželové frézování (Siklienka a Kminiak, 2013)
 V_c - řezná rychlost, V_f - posuvná rychlost

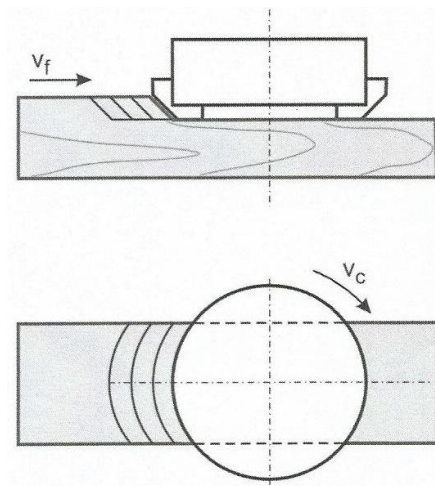
c) **Čelní frézování** - osa otáčení nástroje je kolmá k obrobenému povrchu, hlavně řezné hrany nástroje se pohybují v rovině a vedlejší řezné hrany opisují válcovou plochu (Siklienka a Kminiak, 2013). Dráha cykloidy vychází z pohybu zubů, které jsou umístěny na čele nástroje. Tento způsob se využívá při stopkových a tvarových frézách (Obr. 3), (Prokeš, 1978).



Obrázek č. 3.: Čelní frézování (Siklienka a Kminiak, 2013)

V_c - řezná rychlost, V_f - posuvná rychlost

d) **Čelně-kuželové frézování** - osa otáčení nástroje je kolmá k obrobenému povrchu, ale břity nástroje jsou skloněné k obrobenému povrchu pod určitým úhlem vůči ploše. Břit může být přímý nebo zaoblený (Obr. 4), (Prokeš, 1978).



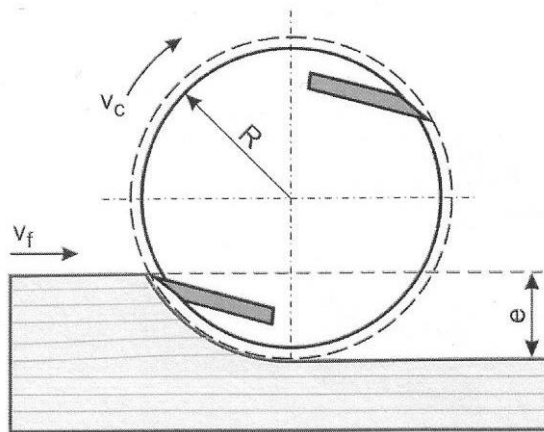
Obrázek č. 4.: Čelně-kuželové frézování (Siklienka a Kminiak, 2013)

V_c - řezná rychlost, V_f - posuvná rychlost

3.2. Nesousledné a sousledné frézování

Tato problematika je spojena se vzájemným pohybem nástroje a obrobku. Na obrázcích č. 5 a 6 lze vidět rozdíly daných způsobů.

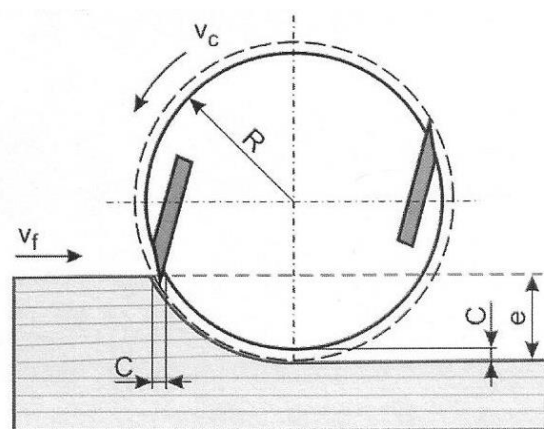
Frézování nesousledné se vyznačuje, že nástroj vykonává otáčející se pohyb proti směru pohybu obrobku. Průřez odebrané vrstvy materiálu postupně narůstá z nulové hodnoty na maximální. K odříznutí třísky dochází až po určitém skluzu řezné hrany po ploše vytvořené předcházejícím záběrem zubu (Barcík a kol., 2013).



Obrázek č. 5.: Protiběžné frézování (Siklienka a Kminiak, 2013)

R - poloměr nástroje, e - úběr, V_c - řezná rychlost, V_f - posuvná rychlost

Opakem je **frézování sousledné**, kdy se nástroj otáčí ve směru pohybu obrobku. Průřez odebrané vrstvy materiálu narůstá na maximální hodnotu a potom klesá až na nulovou hodnotu. Obrobená plocha se vytváří ve chvíli, kdy zub frézy vychází ze záběru. Řezné síly působí směrem dolů, čímž pomáhají upnutí obrobku na stole frézky. (Barcík a kol., 2013).



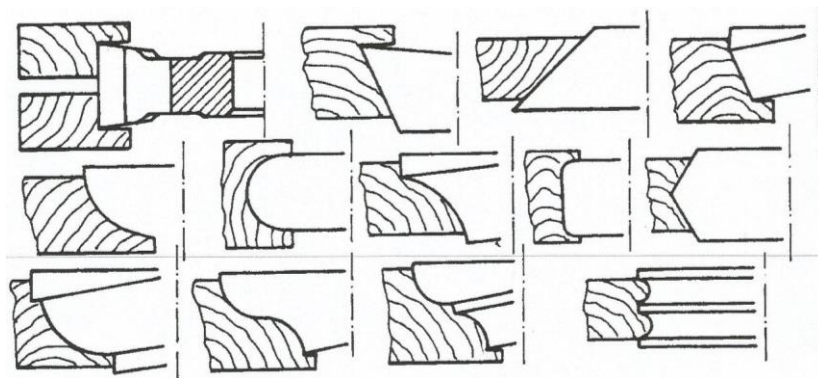
Obrázek č. 6.: Souběžné frézování (Siklienka a Kminiak, 2013)

R - poloměr nástroje, e - úběr, C - vysunutí řezné hrany nad tělo válce, V_c - řezná rychlost, V_f - posuvná rychlost

3.3. Podle tvaru obrobené plochy

a) **Rovinné** - zde řadíme hlavně tyto druhy frézování: srovnávání, tloušťkování a vícestranné frézování. Technologické operace, u kterých dbáme hlavně na kvalitu povrchu plochy a hrany.

b) **Tvarové** - (Obr. 7) slouží především na různé profily dílců, které se dosahují kotoučovou frézou s tvarovými řeznými hranami. Podle způsobu posuvu dílce se získává profil rovný nebo křivý. Stopkové frézy poskytují velkou škálu profilování, například frézování ozubů pro rohové spoje dílců (Lisičan a kol., 1996).



Obrázek č. 7.: Tvarové frézování (Lisičan, 1988)

c) **Objemové** – kopírovací frézování. Kopírovací frézky neboli „kopírovačky“ jsou stroje, které frézují materiál kotoučovou frézku, frézovací hlavou, upnutou na vodorovném nebo svislém vřetenu. Slouží k frézování oblých těles, tvarovaných noh židlí, křesel, dřevěných úchytů na nábytek (Janíček, Vozár, Zbořil, 1995).

3.4. Výhody a nevýhody frézování

Tyto vlastnosti frézování se vztahují k bodu 3.2, kde při daném zvolení sousledného nebo nesousledného frézování, vznikají určité výhody a nevýhody procesu.

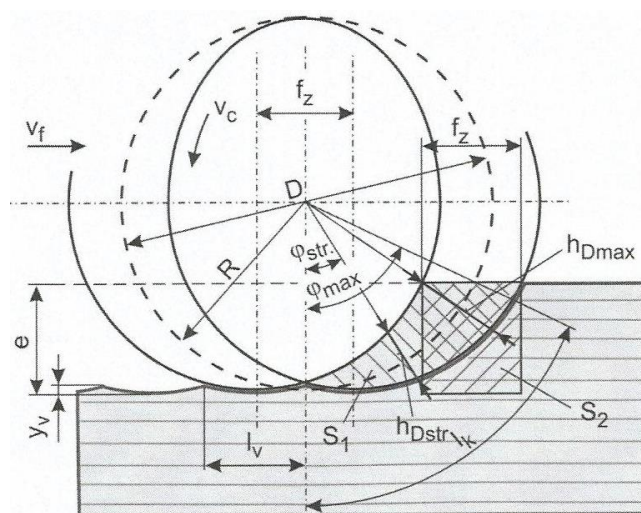
Výhodou nesousledného frézování je klidnější a plynulejší průběh. Nevýhodou je, že zub na začátku řezu klouže po materiálu a hrne ho před sebou, než nastane řez (Kvietková 2015). Další nevýhoda je nepříznivé působení řezné síly, která směřuje nahoru a odtahuje obrobek od upínacího stolu (Barcík a kol., 2013).

Výhody sousledného frézování jsou příznivé složky řezné síly, které přitlačují obrobek ke stolu frézky a hladší obrobený povrch (Kvietková 2015). Nevýhody jsou rychlejší otupování břitu a odlišné působení řezných sil (Prokeš, 1978).

Po základním rozdělení frézování jsem přiblížil kinematiku tohoto procesu obrábění.

4. Kinematika frézovacího procesu

V této kapitole jsem se zabíral problematikou kinematiky oddělování třísky při frézování (Obr. 8). V praxi však skutečný průřez třísky se odlišuje od nominálního průřezu vlivem otupení břitu, nepřesnosti chodu vřetena, odchylek břitů od řezné kružnice, nepravidelnosti chodu podávacího zařízení a především vlivem odštipování a nestejnorodosti hmoty obrobku (Prokeš, 1978).



Obrázek č. 8.: Technologické schéma válčového frézování (Siklienka a Kminiak, 2013)

D - průměr nástroje, **R** - poloměr nástroje, **V_c** - řezná rychlost, **V_f** - posuvná rychlost, **e** - úběr, **f_z** - posuv na řeznou hranu, **l_v** - délka vlny (kinematické nerovnosti), **y_v** - výška vlny (kinematické nerovnosti), **S₁** - plocha zřezaná přechodem řezné hrany přes obrobek (**S₁ = l_k · h_{Dstr}**), **S₂** - plocha obdélníka o stranách **e** a **f_z**, **h_{Dstr}** - nominální střední tloušťka přířezu třísky, **h_{Dmax}** - nominální maximální tloušťka přířezu třísky, **φ_{str}** - střední úhel posuvného pohybu, **φ_{max}** - maximální úhel posuvného pohybu, **l_k** - délka kontaktního oblouku

Řezná rychlost

Je rychlost řezného pohybu, značí se **V_c** a udává se v metrech za sekundu. Počítá se jako obvodová rychlost bodů ostří na obvodu nástroje.

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

Kde:

V_c - řezná rychlost [**m*s⁻¹**],

D - průměr frézy [**mm**],

n - otáčky frézy [**ot*min⁻¹**].

Posuvná rychlost

Dráha udávaná v milimetrech, kterou urazí při pohybu do záběru obrobek za 1 minutu (otáčku). Při zvětšení posuvu se zvětšuje řezný odpor a nezáleží na jiných vlivech.

$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} = \frac{f_z \cdot n \cdot z}{1000} \quad [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2)$$

Kde:

v_f - posuvná rychlost [$m \cdot \text{min}^{-1}$],

f - posuv na otáčku frézy [mm],

f_z - posuv na řeznou hranu frézy [mm],

n - otáčky frézy [$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$],

z - počet řezných hran frézy [-].

Posuv z hlediska směru pohybu může být:

- podélný,
- příčný,
- složený (frézování tvarových ploch).

Posuv může být:

- plynulý – probíhá současně s hlavním pohybem,
- po přítržích – obrobek nebo nástroj vykonává posuvný pohyb v době, v níž se hlavní pohyb nekoná.

Teoretická délka třísky

$$L = \frac{D}{2} * \text{arctg}(\varphi + \varphi') = \frac{\pi \cdot D \cdot (\varphi + \varphi')}{360^\circ} \approx 0,0175 * R * \varphi \quad [mm] \quad (3)$$

Kde:

D - průměr řezné kružnice [mm],

R - poloměr řezné kružnice [mm],

φ - úhel styku dřevních vláken s nástrojem [$^\circ$],

φ' - posunutý úhel styku dřevních vláken [$^\circ$], (Kvietková, 2015).

Teoretická střední tloušťka třísky

$$h_{ch-str} = \frac{f_z * a_p}{L} \approx \frac{f_z * a_p}{\sqrt{a_p * D}} \approx f_z * \sqrt{\frac{a_p}{D}} \approx \frac{f_z * 1000}{n * z} * \sqrt{\frac{a_p}{D}} \quad [mm] \quad (4)$$

Kde:

D - průměr řezné kružnice [mm],

L - teoretická délka třísky [mm],

a_p - tloušťka odebírané vrstvy [mm],

f_z - posuv na zub [mm/zub],

n - otáčky frézovacího nástroje [ot*min⁻¹],

z - počet zubů.

Okamžitá tloušťka odebírané vrstvy

$$h_\varphi = f_z * \sin \varphi_i \quad [mm] \quad (5)$$

Kde:

f_z - posuv na zub [mm/zub],

φ_i - záběrový úhel [°].

Posuv na zub

$$f_z = \frac{v_f * 1000}{n * z} \quad [mm] \quad (6)$$

Kde:

V_f - rychlost posuvu [m*min⁻¹],

n - otáčky frézy [ot*min⁻¹],

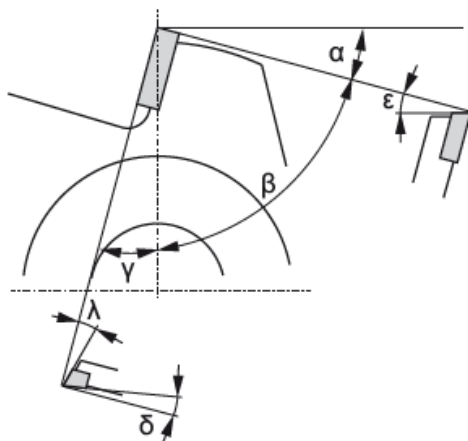
z - počet zubů [-], (Kvietková, 2015).

Po přiblížení zmíněných technologických parametrů frézování a kinematiky frézování, bych rád přešel na téma frézovacích nástrojů, které tvoří základ strojního vybavení. Tyto nástroje byly popsány v následující kapitole.

5. Frézovací nástroje

V páté kapitole jsem se zabýval základními frézovacími nástroji a jejich rozdělením. Definoval jsem pojem fréza dle odborné literatury. Frézy jsou vícebřité řezné nástroje s pravidelným uspořádáním řezných klínů a definovanou geometrií (Kvietková, 2015).

Nemohu opominout správné nastavení geometrie řezného břitu (Obr. 9), který ovlivňuje obráběcí proces i hledisko energetické náročnosti.



Obrázek č. 9.: Geometrie břitu

α = úhel hřbetu, β = úhel břitu, γ = úhel čela, δ = úhel bočního podbrusu, ϵ = úhel zkosení, λ = úhel sklonu ostří (axiální úhel)

(<https://www.aruzicka.cz/geometrie-rezne-casti-a-smery-frezovani>, 31. 1. 2020)

Úhel α = úhel hřbetu ($10^\circ - 15^\circ$) – je úhel, který svírá hřbet nástroje s vrcholovou přímkou anebo tečnou nástroje (plochou řezu). Úhel hřbetu má i přímý vliv na velikost řezného odporu a tím i na výslednou práci řezání (Barcík a kol., 2013).

Úhel β = úhel břitu ($60^\circ - 70^\circ$) – je úhel mezi čelem a hřbetem řezné části nástroje. Čím je tento úhel větší, tím větší je odpor obráběného materiálu (Barcík a kol., 2013).

Úhel γ = úhel čela ($20^\circ - 30^\circ$) – je úhel mezi rovinou čela a kolmicí k vrcholové přímce či tečně nástroje (plochy řezu). Tento úhel může být kladný i záporný. Úhel čela přímo ovlivňuje tvorbu třísky, její kvalitu a drsnost obráběné plochy. Zvětšováním úhlu čela se snižuje řezný odpor i síla F_r (Barcík a kol., 2013).

Úhel hrotu (fázový úhel) ϵ – ovlivňuje kvalitu řezu, která je patrná hlavně při řezání i vrtání do materiálů z rostlého dřeva. Se změnou úhlu se mění model řezání a zvětšuje se šířka třísky (Barcík a kol., 2013).

5.1. Rozdělení frézovacích nástrojů

Po úvodu do frézovacích nástrojů bych rád přešel na základní rozdělení frézovacích nástrojů. Je mnoho způsobů, podle kterých můžeme rozdělovat frézovacích nástroje.

Podle celkového provedení rozlišujeme:

- a) celistvé – s otvorem (kotoučové) nebo se stopkou (stopkové frézy),
- b) s upnutými noži nebo zuby – nožové hřídele, hlavy, kotouče,
- c) dělené – složené ze dvou a více kotoučových fréz,
- d) složené (Kvietková, 2015).

Podle ploch, na kterých leží řezné hrany:

- a) frézy válcové,
- b) frézy kotoučové,
- c) frézy čelní,
- d) frézy tvarové.

Podle umístění břítu:

- a) válcové – s břitem na válcové ploše,
- b) kuželové – s břitem jen na kuželové ploše,
- c) čelní – s břity na čelní ploše,
- d) tvarové – kombinace zmíněných typů.

Podle počtu břitů:

- a) jednobřité,
- b) vícebřité.

Podle způsobu otáčení frézy:

- a) pravořezné – nástroj se otáčí ve směru hodinových ručiček,
- b) levořezné – nástroj se otáčí v protisměru hodinových ručiček,
- c) frézy souměrné a korunkové – použití v obou směrech otáčení.

Podle způsobu výroby zubů:

- a) s frézovanými zuby,
- b) s podsoustruženými zuby.

Podle průběhu řezné hrany:

- a) s přímými řeznými hranami,
- b) s řeznými hranami ve tvaru šroubovice se střídavým sklonem řezných hran.

Podle způsobu upnutí frézy:

- a) stopkové,
- b) nástrčné.

Podle druhu řezného materiálu:

- a) monolitické z rychlořezných ocelí,
- b) s řeznými klíny ze spékaných karbidů,
- c) s povlakovanými řeznými destičkami ze spékaných karbidů.

Podle technologického hlediska:

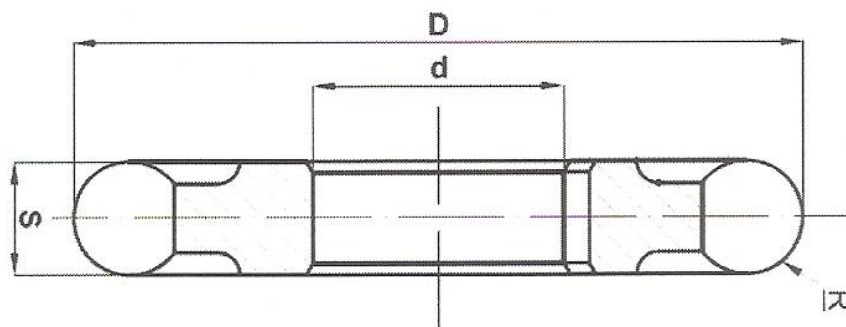
- a) frézy pro frézování rovinných ploch,
- b) frézy pro frézování tvarových ploch,
- c) kopírovací frézy (Kvietková, 2015).

5.2. Druhy fréz

Frézy dělíme podle tvaru na kotoučové, stopkové, čelní a válcovou.

5.2.1. Kotoučové frézy

Jsou to nástroje používané na frézování drážek, polodrážek a profilů (Obr. 10). Vyrábějí se s frézovaným a podsoustruženým hřbetem. Správné provedení podsoustružení, zajišťuje stálost profilu během celé doby životnosti. Frézy se ostří pouze z čela tak, aby úhel byl konstantní po celou dobu životnosti nástroje (Kvietková, 2015).



Obrázek č. 10.: Kotoučová fréza (Barčík a kol., 2013)

D - průměr frézy, S - šířka frézy, d - průměr upínacího otvoru, R - rádius

5.2.2. Stopkové frézy

Stopkové frézy mají rozmanitý tvar, kterým se liší jejich použití. Nejčastěji se používají na frézování drážek, polodrážek, frézování rybinových spojů, na tvarové frézování čelních a bočních hran dílců (Obr. 11).

Jsou to nástroje otáčející se kolem své vlastní osy. Nemají upevňovací otvor jako u kotoučových fréz, ale upevňují se stopkou do sklíčidla či kleštiny frézky (Kvietková, 2015).

Rozdělení stopkových fréz podle parametrů do skupin: (Kvietková, 2015)

Podle ostří:

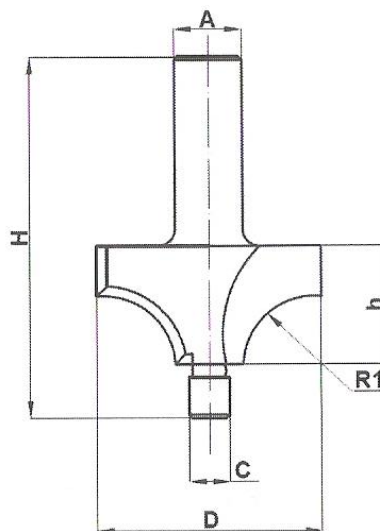
- a) rovné – válcové a kónické frézy,
- b) tvarové – profilovací.

Podle způsobu vedení:

- a) frézy s vodícím ložiskem,
- b) frézy bez vodícího ložiska.

Podle technologického hlediska:

- a) stopkové frézy,
- b) vrtáky,
- c) speciální nástroje.

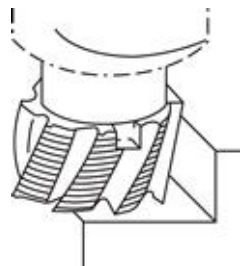


Obrázek č. 11.: Stopková fréza (Barcík a kol., 2013)

A - průměr stopky, D - pracovní průměr, H - celková výška, h - pracovní výška, R1 - poloměr zaoblení, C - průměr vodícího ložiska

5.2.3. Čelní frézy

Tímto druhem frézování se materiál odebírá břity na obvodu i břity na čele nástroje (Obr. 12). Osa otáčení nástroje je kolmá k povrchu, břity opisují válcovou plochu. Boční břity pracují na principu válcového frézování. Čelní břity jsou rovnoběžné s obrobeným povrchem. Tloušťka třísky se zvětšuje od nuly směrem ke středu odebrané vrstvy a zmenšuje se na výstupu zubů nástroje z obrobku. Čelní frézování je výkonnější než válcové frézování, protože je v záběru více zubů současně a lze volit větší posuv (Kvietková, 2015).



Obrázek č. 12.: Čelní fréza

(<https://www.bo-import.cz/frezy-hss/frezy-nastrcne-hss/freza-valcova-celni-nastrcna-624278v-063-63x40-hss-co8-typ-nr-19749.html>, 31. 1. 2020)

5.2.4. Válcová fréza – nožová hřídel

S tímto nástrojem se nejčastěji setkáme u srovnávacích a tloušťkovacích frézek. Nožové hřídele mají různou konstrukci a počet nožů. Základ tvoří válcová nožová hřídel, na které jsou upevněny dva, tři nebo čtyři nože, které jsou zajištěny přítlačnou lištou (Obr. 13). Nože jsou ostřeny na obou hranách a vyrábějí se z rychlořezné oceli nebo slinutých karbidů.

Speciální nožové hřídele, které mají spirálovitě uloženy nože v přítlačném zařízení. Mají nespornou výhodu tichého chodu a zásadně ovlivňují kvalitu řezu, protože třísky jsou v taženém řezu odřezávány šikmo (Nutsch a kol, 2006).



Obrázek č. 13.: Nožová hřídel se čtyřmi noži (Nutsch a kol., 2006)

Po rozebrání geometrie břitu, rozdělení frézovacích nástrojů a druhů fréz je potřeba navázat na další téma, které se věnovalo použití těchto nástrojů na daných dřevoobráběcích strojích. Každý stroj má své technologické upnutí frézovacích nástrojů, které při správném upnutí ve stroji konají daný proces frézování dřeva.

6. Frézovací stroje

Šestá kapitola zmiňuje základní dřevoobráběcí stroje na frézování. Tyto stroje patří mezi základní vybavení každé truhlářské dílny. Na frézkách se obrábí drsný povrch materiálů a po obrobení nám vzniká kvalitativně vylepšený povrch, který by měl být pokud možno hladký a rovný, aby se mohl dále zpracovávat.

Obecně frézky můžeme rozdělit:

- 1) rovinné frézky,
- 2) tvarové frézky.

6.1. Rovinné frézky

Rovinné frézky jsou základní dřevozpracující stroje na úpravu srovnání plochy a hrany obrobku. Jsou to stroje, kde se vodorovně uložená nožová hřídel otáčí jedním směrem rovnoměrnou rychlostí (Janíček, Vozár, Zbořil, 1995).

Řadíme sem následující stroje:

- I. srovnávací frézku,
- II. tloušťkovací frézku,
- III. čtyřstrannou frézku.

6.1.1. Srovnávací frézka

Nejzákladnější stroj mezi dřevaři, který je známý pod lidovým označením „štosovačka“, srovnávačka nebo odborně rovinná srovnávací frézka (Obr. 14). Stroj nám po správném opracování srovná plochu a hranu, tím pádem vytvoříme pravý úhel mezi danou plochou a hranou. Tento úkon je nezbytný pro další pokračování v obrábění na dalších dřevoobráběcích strojích. Obrobek je veden ručně do řezu nebo se používá přípravek „žehlička“, která slouží k bezpečnému přejetí přes nožovou hřídel.

Konstrukce stroje:

Stroj se skládá z ocelolitinového stojanu, kde je umístěn elektromotor, nožová hřídel, přední a zadní stůl s vodicím pravitkem a s krytem nožové hřídele. Polohou předního stolu se určuje tloušťka odebírané třísky. Poloha zadního stolu je přesně seřízena na výšku záběrové kružnice nožů hřídele (Josten, Reiche, Wittchen, 2010).

Nožová hřídel je uložena ve valivých ložiskách, kterou pohání elektromotor s klínovými řemeny. Třísky se odvádějí po plechovém skluzu do odsávacího potrubí (Janíček, Vozár, Zbořil, 1995).

Hlavní a pracovní vypínač jsou umístěny u pracovní plochy. Kryt nožové hřídele zakrývá otáčející se hřídel. Pružinový mechanismus uvolňuje pouze potřebnou část nožové hřídele a po obrobení se uzavře (Nutsch a kol, 2006).



Obrázek č. 14.: Srovnávací frézka

(<https://www.rojekstroje.cz/rojekstroje/eshop/36-1-SROVNAVACKY-HOBLOVKY/0/5/238-Srovnavaci-frezka-RFS-510-INDUSTRY-9>, 31. 1. 2020)

6.1.2. Tloušťkovací frézka

Další velmi používaný a nezbytný stroj při zpracování rostlého dřeva. Známy pod lidovým označením „protahovačka“ nebo „tloušťkovačka“ (Obr. 15). Na tomto stroji navazujeme na předchozí operaci, čímž bylo srovnávání plochy. Stroj nám zabezpečí obrobení zbývající plochy a hrany. Tím dostaneme čisté míry daného vlysu.

Konstrukce stroje:

Litinový stojan stroje zajišťuje plynulý běh bez otřesů. Ve stojanu je umístěna nožová hřídel, válce posuvu a hnací motor (Josten, Reiche, Wittchen, 2010).

Pracovní stůl je přestavitelný mechanicky nebo ručním kolem podle milimetrové stupnice. Nožová hřídel má čtyři nože a je poháněna elektromotorem a klínovými řemeny. Do řezu materiál posouvají dva horní válce. Přední válec je rýhovaný, zadní válec je hladký. Před předním válcem jsou umístěny záchyty proti zpětnému vrhu materiálu ze stroje. Stolové válce

jsou volno běžné a snižují tření dřeva po stole. Posuv stroje lze plynule měnit (Janíček, Vozár, Zbořil, 1995).



Obrázek č. 15.: Tloušťkovací frézka

(<https://www.felder-group.com/cs-cz/produkty/tloustkovaci-frezky-c1948/tloustkovaci-frezka-exact-63-p3067>, 31. 1. 2020)

6.1.3. Čtyřstranná frézka

Čtyřstranné frézky jsou novější stroje, které dokážou dělat více operací najednou (Obr. 16). Tím mám na mysli, že mohou provádět srovnávání, tloušťkování i frézování drážek jedním průchodem. Vyrábějí se s různým počtem nožových hřídelí od čtyř do osmi a jejich uspořádání za sebou je různé. Materiál se do řezu posouvá posuvnými válci, kotouči nebo řetězem. Stroj je určen pro hromadnou a sériovou výrobu lišt, hranolů a vlysů pro rámy. Skládá se ze stojanu s vřeteny, z posuvacího zařízení a elektrického rozvaděče (Janíček, Vozár, Zbořil, 1995).



Obrázek č. 16.: Čtyřstranná frézka

(<https://www.dobrestroje.cz/dobrestroje/eshop/1-1-/219-2-CTYRSTRANNE-FREZKY/5/1763-CTYRSTRANNA-PROFILOVACI-FREZKA-ROJEK-CPF23-4>, 31. 1. 2020)

6.2. Tvarové frézky

Další hodně využívané stroje jsou tvarové frézky. Na tvarových frézkách se zhotovují konstrukční spoje, drážky, polodrážky, profilování hran. Většinou posuv obrobku do řezu je manuální nebo s využitím podávacího zařízení.

Nejčastější rozdělení tvarových frézek:

- 1) svislá spodní frézka,
- 2) svislá horní frézka.

6.2.1. Svislá spodní frézka

Stroj je tvořen z litinového rámu, kde je umístěno vřeteno s hnacím elektromotorem (Obr. 17). Pracovní stůl je napevno přimontován k rámu a má v sobě otvor pro vřeteno frézky. Na pracovním stole najdeme pracovní pravítko, které lze nastavit podle potřeby frézování. Upevňuje se pomocí upínacích šroubů a zároveň je spojeno s odsáváním, které odvádí třísky po obrábění.

Vřeteno frézky lze výškově nastavovat i naklápět. Zmíněné operace provádíme pomocí kolečka pod pracovním stolem nebo ze strany stroje. Záleží na typu stroje, protože u starších strojů manipulujeme ručně, u novějších elektromotoricky. Naklopení bývá 45° dopředu a 5° dozadu. Přes kuželovou stopku s přesuvnou maticí je trn frézky spojen s vřetenem frézky. Trn slouží k nasazení frézovacích nástrojů. Pomocí mezikroužků a matic se bezpečně upevní k vřetenu frézky.

Toto usazení je nezbytné z důvodu rozmanitosti frézovacích nástrojů. Z této rozmanitosti musí být možné upravovat otáčky stroje. To se provádí přehozením řemene na rozdílně velké řemenici na motoru a vřetenu frézy (Nutsch a kol., 2006).



Obrázek č. 17.: Svislá spodní frézka

(<https://www.felder-group.com/cs-cz/produkty/spodni-frezky-c1949/frezka-s-naklopnym-hridelem-f-900-z-p2959>, 31. 1. 2020)

6.2.2. Svislá horní frézka

Svislé horní frézky jsou dalším hojně používaným strojem pro kopírovací práce podle šablon, na výrobu svlaků a drážek a pro plošné profilování do plochy výrobku (Obr. 18).

Základní prvek stroje je litinový stojan tlumící otřesy, pracovní stůl se výškově seřizuje pomocí ručního kolečka. Posuvné zařízení umožňuje pohyb frézovacího vřetena nahoru a dolů (Josten, Reiche, Wittchen, 2010).

Obrobek se pohybuje při obrábění ručním posuvem, pomocí šablony nebo pravítkem s dorazem. Pohon vřetene zajišťuje motor s měniči klínů, kvůli vysokým otáčkám stroje, které se pohybují od 12 000 do 18 000 otáček za minutu.

Pro horní svislé frézky se používají jedno nebo dvoubřité frézy, umístěné v ose vřetene nebo excentricky s pomocným upínacím pouzdrem. Excentrické frézování umožňuje měnit průměr frézovaného otvoru (Josten, Reiche, Wittchen, 2010).



Obrázek č. 18.: Svislá horní frézka

(<https://www.surplex.com/cz/m/samco-mini-router-horni-frezka-563332.html>, 31. 1. 2020)

Po vyjmenování základních strojů určených na frézování dřeva, nastal čas se věnovat druhému podstatnému tématu práce, kterým byla charakteristika tropické dřeviny Iroko, která byla předmětem měření této práce.

7. Tropická dřevina Iroko

Sedmá kapitola popisuje druhé podstatné téma, kterým byla vybraná tropická dřevina Iroko, která byla sledována jako součást měření této práce. Popsal jsem vzhled a stavbu dřeva, základní vlastnosti, využití dřeviny a zpracování na strojích.

Botanický název: Chlorophora Excelsa, Chlorophora Regia, Milicia excelsa, regia.

Obchodní názvy: African teak, Mvule (východ Afriky), Kambala (Zair), Tule (Mozambik).

Výskyt: Roste ve vlhkých, poloopadavých lesích tropické Afriky, od Sierry Leone na západě po Tanzanii na východě (Gibbs, 2009).

Rozměry stromu: Dosahuje výšky 50 m a průměr kmenu 2,5 m, kmen je válcovitý a patrný do výšky 21 m (Gibbs, 2009).

Vlastnosti: Po vysušení je hustota 640 kg/m^3 při vlhkosti 12%. Schne dobře a rychle, malá tendence k deformacím. Tvarově stabilní se střední pevností v ohybu a tlaku, velmi nízkou tuhost a rázovou houževnatost (Gibbs, 2009).

Popis dřeva: Bělové dřevo: Barva světle žlutá, běl má tloušťku 5-10 cm, světlá běl dobře odlišena od jádra dřeva, náchylná k napadení dřevokazným hmyzem, běl se nevyužívá, (<http://www.arakolin.cz/cs/dreviny/iroko>, 28. 1. 2020), (Gibbs, 2009).

Jádrového dřevo: Žlutohnědé jádrové dřevo, které na vzduchu postupně tmavne do sytější hnědé se světlejšími žilkami, které vynikají na tangenciálním řezu (woodpoint.cz/produkt/iroko-terasa, 29. 1. 2020). Jádrové dřevo je velmi trvanlivé a extrémně špatně impregnovatelné (Gibbs, 2009).

Stavba: Stavba dřeva je stejnorodá, ale spíše středně hrubá, široké cévy jsou viditelné. Průběh dřevních vláken je nepravidelný. Vyznačuje se výraznou točivostí vláken, která způsobuje pruhovanou kresbu na radiálním řezu a figurální kresbu na tangenciálním řezu (woodpoint.cz/produkt/iroko-terasa, 29. 1. 2020).

Trvanlivost: Vysoce trvanlivé dřevo díky obsahu olejnatých látek ve dřevě, odolává vůči vodě, plísním, hnilobě i hmyzu. Iroko je velmi odolné – řadí se do třídy trvanlivosti (I-II). Nelze impregnovat.

Využití: Tropická dřevina Iroko se používá k obdobným účelům jako teak.

- stavba konstrukcí lodí, mostů, pilířů, výroba laviček, kádě,
- nábytek, okna a dveře, konstrukční rámy, schodiště, podlahy a parkety,

- pulty, laboratorní pracovní plochy a odkapávače (Gibbs, 2009).

Zpracování: Ohledně technologického zpracování - si musíme dávat pozor na zkamenělé uloženy ve stavbě dřeva, které by nám poničily řezný nástroj. Jemný prach při obrábění může dráždit nosní sliznici a kůži (Gibbs, 2009).

Řezání: Pro tvrdost dřeva je potřeba větší pohonná síla. Břity nástrojů se mohou otupit kvůli výskytu zkamenělých uloženin ve dřevě.

Frézování: Vlákno je střídavě točité, objevují se v něm vrstvy usazených minerálů, které otupují břity. U hoblování ubíráme třísku jen mělce (Gibbs, 2005).

Profilování: Získalo si oblibu, protože má stejnoměrnou texturu, díky níž se snadno řežou spoje. Opracování ručními nástroji obtížné, kvůli střídavé točitosti vlákna (Gibbs, 2005).

Ohýbání: Mírné.

Lepení: Lepí se dobře pomocí syntetických lepidel.

Přibíjení: Hřebíky, vruty drží dobře a nezpůsobují trhliny ve dřevě.

Konečná úprava: Snadno se moří, pokud se aplikací vyplní póry, lze snadno leštit a získává krásný lesk (Gibbs, 2009).

Dostupnost a cena řeziva: Nepatří k nejdražším tropickým tvrdým dřevům, běžně dostupné ve skladech s exotickým řezivem (Gibbs, 2005).



Obrázek č. 19.: Radiální řez dřevem Iroko

(<http://www.hardwooddistributors.org/species/iroko-teak>, 28. 1. 2020)

Tropická dřevina Iroko byla charakterizována v sedmé kapitole. Následující kapitola se věnovala třetímu důležitému tématu této práce, kterým byla termická úprava dřeva finskou metodou ThermoWood®.

8. Tepelná modifikace dřeva

Osmá kapitola se zabývala třetím důležitým tématem této práce, kterým bylo charakterizovat zvolený proces termické modifikace ThermoWood®, který zpracovala a patentovala finská společnost VTT. Na začátku jsem zmínil trochu historie a v navazujících kapitolách je popsán proces operací, klasifikace ThermoWood a následné změny vlastností dřeva.

Technologie modifikace dřeva byla vědecky studována už od 30. let 20. století v Německu a ve 40. letech ve Spojených státech amerických. Novodobé počátky termického dřeva sahají do 90. let minulého století, kde se výzkumné práce uskutečnily ve Finsku, Francii, v Nizozemsku a v Německu. Nejobsáhlejší výzkumnou práci provedla společnost VTT (Finské státní výzkumné středisko) ve Finsku. Nerad bych opomenul i další možnosti termické modifikace dřeva. Jak jsem zmínil, ve Finsku se zabývali horkým vzduchem ThermoWood®, ve Francii zkoušeli inertní prostředí plynů Rétification a Bois Perdue, v Nizozemsku testovali páru PLATO® a v Německu vyvíjeli modifikaci olejem OHT proces. Z těchto všech vyjmenovaných termických modifikací se právě nejvíce rozšířila metoda ThermoWood®.

V mé bakalářské práci jsem se výhradně věnoval termické modifikaci dřeva metodou ThermoWood®. Při této metodě se materiál ohřeje na teplotu okolo 180 °C do maximální teploty 260 °C. Při ohřevu v komoře je dřevo chráněno párou proti samovznícení. Zmíněná pára ovlivňuje chemické procesy, které probíhají ve dřevě. Díky těmto operacím dosáhneme změn v chemické struktuře dřeva, které vedou ke zvýšení rozměrové stability, která se odvíjí od snížení hygroskopicity a zlepšení odolnosti proti biologickým škůdcům. Rozsah těchto změn závisí na výšce teploty, času a tlaku. Vizualní vedlejší efekt tepelné modifikace dřeva je ztmavnutí dřeva kvůli vysoké teplotě. Při překročení tepelných limitů dřevo ztrácí svoji ohybovou pevnost, a proto se termicky modifikované dřevo nedoporučuje používat na nosné účely (Thermowood Handbook Brochure).

8.1. Fáze výrobního procesu ThermoWood®

V této podkapitole jsem charakterizoval proces technologie ThermoWood, která je rozdělena do tří hlavních fází (Obr. 20).

Fáze 1. Zvýšení teploty a sušení při vysokých teplotách

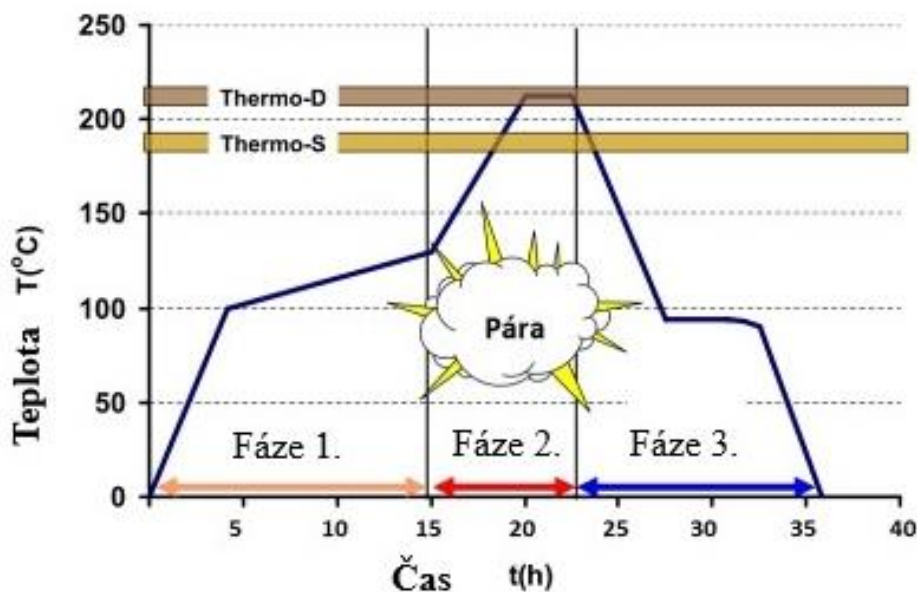
Při použití tepla a páry se teplota v komoře rychle zvyšuje na úroveň přibližně 100 °C. Poté teplota plynule narůstá na 130 °C, během níž dochází k sušení při vysoké teplotě a obsah vlhkosti dřeva klesá téměř na nulu. Doba ohřevu a sušení závisí na dřevině, vstupní vlhkosti a rozměrech řeziva – hlavně na tloušťce (ThermoWood® – Handbook, 2003).

Fáze 2. Tepelné zpracování

Jakmile došlo k sušení při vysoké teplotě, teplota uvnitř pece se zvýší na 185 °C až 215 °C. Teplota zůstává konstantní po dobu 2 - 3 hodin v závislosti na teplotě o aplikaci konečného použití (třídy Thermo S a D). Během tepelné úpravy je do komory vháněná pára, která slouží jako ochranné médium proti vznícení dřeva a příznivě ovlivňuje probíhající chemické reakce (ThermoWood® – Handbook, 2003).

Fáze 3. Chlazení a vlhkost

Konečným krokem je snížení teploty pomocí systémů rozprašování vody, kdy teplota dosáhla 80 - 90 °C, dojde k opětovnému zvlhčení, které zvýší obsah vlhkosti dřeva na použitelnou úroveň 4 – 7 % (ThermoWood® – Handbook, 2003).



Obrázek č. 20.: Schéma výrobního procesu ThermoWood

(<https://fasady-terasy-thermowood.cz/zajimavosti/vyroba-a-tridy-materialu-thermowood-b100.html>, 28. 1. 2020)

8.2. Třídy výrobku ThermoWood®

Na základě experimentů v průběhu výrobního procesu vznikly dvě třídy pro klasifikaci ThermoWood®. Třídy se od sebe odlišují ve druhé fázi procesu, kde jsou ovlivněny druhem dřeviny, dobou trvání a teplotou. Třídy jsou rozlišeny pro jehličnaté i listnaté dřeviny.

Thermo-S je materiál vyráběn poměrně mírným tepelným zpracováním termické modifikace (Tab. 1, 2). Písmeno "S" znamená "stabilitu". Je charakteristický nižší hmotností a světlehnědou barvou. Průměrné hodnoty tangenciálního sesychání a bobtnání dosahují 6 – 8 %, co jsou hodnoty blízké rostlému dřevu. Thermo-S třída je klasifikována jako relativně trvanlivá podle normy EN 113 – přirozená odolnost proti rozpadu, splňuje požadavky třídy 3.

Tabulka č. 1.: Účinky termické modifikace na jehličnaté dřeviny – smrk, borovice

(ThermoWood® Handbook, 2003)

	Thermo - S	Thermo - D
Teplota modifikace	190 °C	212 °C
Odolnost proti povětrnostním vlivům	+	++
Rozměrová stabilita	+	++
Pevnost v ohybu	Beze změny	-
Barevná změna	Ztmavnutí	Výrazné ztmavnutí

Thermo-D je výrobek vzniknutý intenzivnějším působením teploty termické modifikace (Tab. 1, 2). Písmeno "D" znamená "trvanlivost". Má tmavou barvu, dobrou rozměrovou stabilitu a vyšší stupeň odolnosti vůči biologickým činitelům. Průměrné hodnoty tangenciálního sesychání a bobtnání se pohybují v rozmezí 5 – 6 %. Thermo-D třída je klasifikována jako odolný podle normy EN 113 – přirozená odolnost proti rozkladu splňuje požadavky třídy 2.

Tabulka č. 2.: Účinky termické modifikace na listnaté dřeviny – břıza, osika

(ThermoWood® Handbook, 2003)

	Thermo - S	Thermo - D
Teplota modifikace	185 °C	200 °C
Odolnost proti povětrnostním vlivům	Beze změny	+
Rozměrová stabilita	+	+
Pevnost v ohybu	Beze změny	-
Barevná změna	Ztmavnutí	Výrazné ztmavnutí

8.3. Faktory ovlivňující kvalitu ThermoWoodu

Kvalita konečného produktu je výrazně ovlivněna vstupní surovinou. Dalším ovlivňujícími faktory jsou délka ohřevu, vlastní termická modifikace, ochlazování a výše stanovené teploty. Stanovená teplota se vztahuje k již zmíněným třídám v předchozí kapitole. Při procesu tepelné modifikace probíhá ve dřevě značné množství procesů, které mění částečně jeho mechanické, ale především jeho fyzikální vlastnosti.

Druhy dřevin: Nejběžnější dřeviny jsou smrk ztepilý (*Picea abies*), borovice lesní (*Pinus sylvestris*), bříza bělokorá (*Betula pendula*) a topol osika (*Populus tremula*).

Mezi jednotlivými druhy dřeva existují rozdíly, pokud jde o roční růst, dřevní buňky, dřevěné póry, počet chemických složek atd. Navíc různé druhy dřeva mají například různé vlastnosti délky vlákna: jehličnaté dřevo má širokou distribuci délky vláken, listnaté dřevo má v průměru mnohem kratší délku vlákna (ThermoWood® Handbook, 2003).

Povětrnostní podmínky: Tepelně upravené dřevo bez povrchové úpravy není odolné vůči venkovním podmínkám. Původní tmavě hnědá barva není stabilní a vlivem těchto podmínek začne šednout a blednout. Odolnost byla zlepšena použitím vodních nebo rozpouštědlových barev (Jämsä S., Ahola P., Viitaniemi P., 2000).

8.4. Struktura dřeva ThermoWood

Dřevo obecně má velmi rozmanitou strukturu na všech úrovních, které poznáváme. Jak jsem se už zmínil, je velmi důležité brát zřetel na odlišnosti daných druhů dřevin a jejich rozdílné vlastnosti, které při výrobním procesu termicky modifikovaného dřeva hrají obrovskou roli. Nyní se zaměřím na základní složky dřeva a zkusím popsat děje, které nastanou při ohřevu. Začneme nejnáchylnější složkou dřeva a to jsou hemicelulózy.

Hemicelulóza je polysacharid, který podléhá rozkladu při teplotách okolo 150 °C. Významným faktorem tepelné degradace hemicelulóz je přítomnost acetylových skupin, které jsou tepelně labilní a vedou k tvorbě kyseliny octové, která způsobuje degradaci polysacharidů (Hill, 2006). Díky tomu se polysacharidový řetězec hemicelulózy štěpí na nižší řády a vznikají oligosacharidy a monosacharidy.

V důsledku působení zvýšené teploty se bobtnání a sesychání dřeva snížilo vlivem vlhkosti, lepší se biologická trvanlivost, barva ztmavne, několik extraktů vytéká ze dřeva, dřevo se stává světlejším, snižuje se rovnovážný obsah vlhkosti, pH klesá a zlepšují se tepelné

izolační vlastnosti, ale zároveň se mění tuhost a pevnost dřeva (ThermoWood® Handbook, 2003).

Celulóza tvoří nosnou kostru buněčných stěn. Nejprve je zasažena amorfni část celulózy – depolymerace v amorfni celulóze vede k poklesu tahové a ohybové pevnosti dřeva. Krystalická část celulózy depolymerizuje až při 300 °C, změny v krystalické celulóze jsou důležité z pohledu změn modulu pružnosti, začínající degradace celulózy v oblasti 210-220°C (Hill, 2006).

Lignin je termicky nejstabilnější složka dřeva, kde chemické reakce v molekulách probíhají za vysokých teplot. Částečně se rozkládá okolo 300 °C, ale výrazněji až při vyšších teplotách 400 °C, ve spojitosti s intenzivním rozkladem fenyl propanových jednotek a aromatických jader (Reinprecht, Vidholdová, 2008).

Extraktivní látky podléhají různým změnám v průběhu zvýšených teplot. Termicky modifikované dřevo obsahuje méně prchavých terpenů, ale o to více v něm najdeme kyselinu octovou, která se vytvoří z acetylových skupin hemicelulóz, celulózy i z ligninu (Hill, 2006).

Finální úbytek hmotnosti závisí na odbourání hemicelulóz a dalších změn v chemické struktuře. Zvyšuje se s nárůstem teploty a s prodloužením času ohřevu. Také závisí od typu prostředí (vzduch, dusík, vakuum, olej), od podmínek ohřevu, od vlhkosti a druhu dřeva a od přítomnosti agresivních aditiv ve dřevě (Reinprecht, Vidholdová, 2008).

Tabulka č. 3.: Faktory ovlivňující úbytek hmotnosti termicky modifikovaného dřeva

(Hill, 2006)

Menší úbytek hmotnosti	Větší úbytek hmotnosti
v inertní atmosféře nebo ve vakuu	ve vzduchu
v otevřeném systému	v uzavřeném systému
v suchém prostředí	v mokřém prostředí
jehličnaté dřeviny	listnaté dřeviny

8.5. Vliv termické úpravy na fyzikální vlastnosti dřeva

V této kapitole jsem popsal základní fyzikální změny vlastností dřeva. Obecně mohu říct, že proces má pozitivní dopad na lepší rozměrovou stabilitu, vyšší odolnost vůči dřevokazným houbám i hmyzu, nižší hustotu a zajímavou barvu. Další změny vlastností jsou výsledkem chemických procesů ve struktuře dřeva.

Hygroskopicitá: Je velmi důležitá vlastnost dřeva, která ovlivňuje hlavně rozměrovou stabilitu a odolnost vůči škůdcům. Je to schopnost přijímat a odevzdávat vodu do okolního vzduchu při určité rovnovážné vlhkosti a teplotě vzduchu. ThermoWood® má menší hygroskopicitu oproti rostlému dřevu.

Pokles hygroskopicity můžeme zdůvodnit těmito jevy:

- odbourání určitého podílu hemicelulóz,
- odbourání nebo prostorová blokace hydrofilních -OH skupin,
- migrací a přerozdělováním hydrofobních látek (Reinprecht, Vidholdová, 2008).

Rozměrová stabilita: Termicky modifikované dřevo má lepší rozměrovou stabilitu a to i při změnách relativní vlhkosti vzduchu. Za vylepšenou rozměrovou stabilitu dřeva stojí zejména odbourání hemicelulóz (Hill, 2006).

Hustota: Při termické úpravě se sice zmenšuje, ale je to méně než při úbytku hmotnosti. Díky vědeckým studiím bylo prokázáno, že vzniklé napětí v tangenciálním a radiálním směru může někdy zvětšit rozměr v podélném směru (Hill, 2006). Proces snižuje hustotu v průměru asi o 10 % (Thermowood Handbook Brochure).

Barva a vůně: Barva tepelně modifikovaného dřeva se mění ze žluté na hnědou a je podobná tropickým dřevinám (teak, cedr). Získává nezaměnitelnou vůni – karamelový zápach (Reinprecht, 2016). Vyšší teplota a delší doba zahřívání způsobují vznik tmavší barvy.

Biologická trvanlivost: Zlepšení biologické trvanlivosti je výsledkem odstranění přírodních zdrojů potravy ve dřevě a také změnami chemického a strukturního složení. Úroveň odolnosti vůči rozkladu houbami se zvýšila při vyšších teplotách. ThermoWood se doporučuje používat ve třídách nebezpečnosti 1 až 3 v souladu s EN-335-1 bez nutnosti další chemické ochrany (ThermoWood® Handbook, 2003).

8.6. Vliv termické úpravy na mechanické vlastnosti dřeva

V této kapitole jsem popsal základní mechanické změny vlastností dřeva. Na základě nabytých informací mohu zdůraznit především pokles rázové houževnatosti, pevnosti a tvrdosti dřeva. Na druhou stranu lze dohledat v odborné literatuře, že právě pevnost a tvrdost dřeva zůstane nezměněna, ale dokonce mírně vzrostou (Reinprecht, 2016). Proto se raději doporučuje, aby všechny typy modifikace dřev se nepoužívaly na nosné účely v konstrukcích.

Pevnost a rázová houževnatost: Pevnost tepelně ošetřeného dřeva obvykle klesá, protože při vysokých teplotách jsou narušeny jeho složky, zejména hemicelulózy (Reinprecht, 2016). Pevnost dřeva má přímou korelaci s hustotou. Rázová houževnatost dřeva po termické úpravě klesá, dřevo je znatelně křehčí a náchylné k praskání.

Ohybová pevnost: U materiálu ošetřeného při teplotách pod 200 °C nedošlo k významné ztrátě pevnosti v ohybu. Jasně snížení v horizontální ohybové pevnosti lze nalézt u zpracovaného materiálu při teplotách nad 200 °C (Thermowood Handbook Brochure).

Tahová pevnost: Klesá nápodobně jako ohybová pevnost obvykle o 10 – 30 %. Tlaková pevnost podél vláken se moc nemění, ale může trochu i vzrůst.

Tvrdość dřeva: S rostoucí teplotou se nemění nebo dokonce se lehce zvyšuje.

Modul pružnosti: Vlivem ohřevu se dočasně zvýší při nižší teplotě. Následně začne klesat, až dojde k následnému úbytku hmotnosti dřeva na 6 – 8 % (Reinprecht, Vidholdová, 2008).

8.7. Použití modifikovaného dřeva

Konec osmé kapitoly o termicky modifikovaném dřevě chci uzavřít jeho použitím. Je to ideální materiál pro interiérové výrobky, jako jsou parkety, dlaždice, panely, kuchyňský nábytek, obkladové stěny a vhodný pro výrobu saun. Lze použít také pro vstupní dveře, okna, venkovní obklady, zahradní nábytek, dětská hřiště, oplocení.

Jedním z potenciálů této úpravy dřeva je napodobit tropické dřeviny a postupně přestat používat chemicky chráněné dřevo biocidy. Je však potřeba zdůraznit, že dosud vyráběné druhy tepelně modifikovaného dřeva, nebyly vždy nejvhodnějším materiálem pro trvale mokré expozice v kontaktu s terénem nebo vodou (Reinprecht, 2016).

Osmá kapitola přiblížila proces termické úpravy dřeva finskou metodou ThermoWood®, změny vlastností dřeva při procesu a konečné použití ThermoWoodu. Další kapitola se zabývala čtvrtým důležitým tématem této práce, kterým byla energetická náročnost frézování.

9. Energetická náročnost procesu

V deváté kapitole jsem se zaměřil na čtvrtou problematiku této práce, která úzce souvisí s frézováním dřeva na dřevoobráběcích strojích. Tato problematika hlavně pojednávala o energetické náročnosti frézovacího procesu.

Při každém technologickém obrábění dřevní suroviny, kde je použito strojní zařízení, je velmi důležité sledovat energetickou náročnost procesu. Do celkové ceny produktu se vždy zahrne spotřeba strojního vybavení.

Energetická náročnost procesu je ovlivněna spousty faktory. Velkou roli hraje vstupní materiál určený k frézování, tzn. hustota dřeva, stavba dřeva, vady dřeva, vlhkost dřeva. Dál bych zdůraznil nastavení pracovního stroje, tím mám na mysli – velikost odebírané třísky, správné upevnění nástroje, správné otáčky nástroje, upevnění stroje, správná geometrie ostří atd. Rozhodně záleží také na údržbě ostří nástroje, protože je rozdíl mít ostré břity než provádět operaci s tupými břity. Poslední důležité technologické parametry frézování, které mě napadli, jsou řezná rychlost, podávací rychlost a nastavení úhlu čela břitu.

Energetická náročnost procesu se vyjadřuje různými veličinami, zpravidla se používá řezný příkon, který definuje množství vykonané práce strojem za jednotku času.

V mé bakalářské práci, kde jsem se zaměřil na vliv termické modifikace na energetickou náročnost u tropické dřeviny Iroko při rovinném frézování, mohu potvrdit rozdíl mezi rostlým a modifikovaným dřevem. Tento rozdíl je dán především poklesem hustoty a změn stavby modifikovaného dřeva, který klade menší odpor při obrábění než rostlé dřevo.

Výpočet výkonu a příkonu

U dřevoobráběcích strojů na dřevo rozeznáváme příkon a výkon. Příkon motoru P_p je roven součinu napětí, proudu a účinku $\cos \varphi$ (výkon odebraný ze sítě elektrické energie, vzorec 11). Příkon využijeme k určení výpočtu energetického nákladu nebo pro dimenzování elektrické rozvodné sítě (Barcík a Homola, 2004). Řezný výkon P_c je výsledkem součinu řezné síly F_c a řezné rychlosti V_c působící v hlavním bodě řezné hrany současně (vzorec 8), (Siklienka a Kminiak, 2013).

Máme dva druhy příkonu. První je příkon elektromotoru při volnoběhu stroje P_{p0} , měří se bez průchodu materiálu. Druhý je příkon motoru při operaci P_{pR} , měří se při průchodu materiálu (Barcík a Homola, 2004).

Řezný výkon P_c je množství práce vykonané za jednotku času.

$$P_c = \frac{P_{PR} - P_{PO}}{\eta_c} \quad P_c = \frac{A_c}{T} \quad [W] \quad (7)$$

Kde:

P_{PR} - výkon při chodu stroje za průchodu materiálu [W], A_c - práce řezání [J],

P_{PO} - výkon při chodu stroje bez průchodu materiálem [W], T - čas [s],

η_c - celková účinnost stroje [-].

Řezný výkon P_c se dá také vyjádřit jako součin řezné síly a řezné rychlosti, kdy obě složky působí v hlavním bodě řezné hrany ve stejném čase.

$$P_c = F_c * v_c \quad [W] \quad (8)$$

Kde:

F_c - řezná síla [N], v_c - řezná rychlost [$m*s^{-1}$].

Výkon potřebný na posuv P_f je výsledek součinu síly posuvu a posuvné rychlosti, kdy obě složky působí v hlavním bodě řezné hrany ve stejném čase.

$$P_f = F_f * v_f \quad [W] \quad (9)$$

Kde:

F_f - posuvná síla [N], v_f - posuvná rychlost [$m*s^{-1}$].

Příkon P_p lze definovat jako množství práce vykonané za jednotku času.

$$P_p = \frac{W}{T} \quad [W] \quad (10)$$

Kde:

P_p - řezný příkon [W], W - celková práce vykonaná strojem [J], T - čas [s].

Dále je možné definovat řezný příkon jako součin napětí, proudu a účinníku.

$$P_p = U * I * \cos \varphi \quad [W] \quad (11)$$

Kde:

U - napětí [V], I - proud [A], $\cos \varphi$ - účinník [-].

Přepočtení mezi řezným výkonem P_c a příkonem P_p je definováno následovně

$$P_p = \frac{P_c}{\eta} \quad [W] \quad (12)$$

Kde:

η - celková účinnost [-], (Siklienka a Kminiak, 2013).

Výpočet práce

Práce na odebrání materiálu A_e se skládá z více složek (vzorec 13).

$$A_e = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \quad [J] \quad (13)$$

Kde:

A_1 - práce pro vytvoření nového povrchu [J],

A_2 - práce plastických deformací [J],

A_3 - práce pružných deformací [J],

A_4 - práce tření [J].

Výpočet práce na odebrání materiálu A_e z hlediska pohybu je definovaná jako součet práce řezání a práce posuvu.

$$A_e = A_c + A_f \quad [J] \quad (14)$$

Kde:

A_c - práce řezání [J], A_f - práce posuvu [J].

Práce řezání A_c je práce potřebná na vykonání hlavního pohybu a dá se definovat jako:

$$A_c = \int_0^t F_c * v_c * dt \quad [J] \quad (15)$$

Kde:

F_c - řezná síla [N], V_c - řezná rychlost [$m*s^{-1}$].

Práce posuvu A_f je práce potřebná na vykonání posuvu a dá se definovat jako:

$$A_f = \int_0^t F_f * v_f * dt \quad [J] \quad (16)$$

Kde:

F_f - řezná síla [N], V_f - posuvná rychlost [$m*s^{-1}$], (Siklienka a Kminiak, 2013).

Po objasnění energetického hlediska frézování výpočty práce, výkonu a příkonu strojů, jsem se dostal k metodice práce. V metodice byl popsán frézovací stroj, nástroj, měřicí přístroj elektrické energie a použitý materiál.

10. Metodika

Metodika bakalářské práce se skládala z několika bodů. Nejprve charakteristika použitého materiálu k měření. Na to navazuje stanovení vlhkosti a hustoty vzorků. Následně jsem se vrátil k výrobnímu procesu termicky modifikovaného dřeva metodou ThermoWood® (Tabulka č. 4). Nakonec jsem popsal zpracování vzorků na dřevoobráběcích strojích a postup měření přístroje Metrel Power Q plus pro stanovení energetické náročnosti procesu frézování. Ještě jsem sledoval odlišné řezné a podávací rychlosti z hlediska stanovení optimálních technologických podmínek pro frézování a vliv na energetickou náročnost procesu frézování.

Obráběl jsem tropickou dřevinu Iroko bez termické modifikace při 20 °C a s termickou modifikací při 160 °C, 180 °C, 210 °C. U všech vzorků byla použita řezná rychlost 20 m*s⁻¹ a podávací rychlost 4 m*min⁻¹. Další sledované technologické parametry frézování byly řezné rychlosti 20, 30, 40 m*s⁻¹ a podávací rychlosti 4, 8, 11 m*min⁻¹. Díky tomu jsem mohl sledovat množství spotřebované energie při procesu. Při práci jsem dbal na standardní podmínky - teplota prostředí 20 °C a relativní vlhkost 70 %.

10.1. Použitý materiál

Tropická dřevina Iroko (*Chlorophora Excelsa*) dovezená z Afriky, jsem obdržel ve formě řeziva. Řezivo jsem upravil na vzorky o rozměrech 20x100x450 mm (t x š x l). Všechny operace proběhly v dílně dřevařského pavilonu fakulty lesnické a dřevařské.

Ještě před samotným procesem termické modifikace jsem si rozdělil vzorky do čtyř skupin podle předem určených termických modifikací. Vzorky bez modifikace 20 °C a vzorky s modifikací 160 °C, 180 °C, 210 °C. Termická modifikace byla dodržena procesem ThermoWood® a proběhla v laboratoři ve dřevařském pavilonu na České zemědělské univerzitě v Praze.

Základní fáze termické modifikace:

- Fáze 1.** – Ohřev a zvýšení teploty,
- Fáze 2.** - Tepelné zpracování,
- Fáze 3.** - Chlazení a vlhkost.

Tabulka č. 4.: Údaje z termické modifikace dřeva

Iroko	160 °C	180 °C	210 °C
Ohřev (h)	11,6	14,8	18,6
Termická modifikace (h)	3	3	3
Ochlazování (h)	3,92	5,76	7,2
Celková doba (h)	18,52	23,56	28,8

Vlhkost měřených vzorků jsem vypočítal podle známého vzorce, který vyjadřuje podíl hmotnosti vody k hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu. Udává to norma ČSN EN 322 (1994).

$$W = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad [\%] \quad (17)$$

Kde:

W - vlhkost dřeva [%],

m_w - hmotnost zkušební vzorku ve vlhkém stavu [g],

m₀ - hmotnost zkušební vzorku v absolutně suchém stavu [g].

Hustotu měřených vzorků jsem vypočítal podle známého vzorce, který vyjadřuje podíl hmotnosti a objemu dřeva při určité vlhkosti. Udává to norma ČSN EN 323 (1994). Změny hustoty na vzorcích v průběhu procesu termické modifikace udává (Tabulka č. 5).

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w * b_w * l_w} = \frac{m_w}{V_w} * 100 \quad [kg * m^{-3}] \quad (18)$$

Kde:

ρ_w - hustota dřeva [kg*m⁻³],

m_w - hmotnost zkušební vzorku při dané vlhkosti w [kg],

V_w - objem zkušební vzorku při dané vlhkosti w [m³],

a_w, b_w, l_w - rozměry zkušební vzorku při dané vlhkosti w [m].

Tabulka č. 5.: Změna hustoty termickou modifikací

IROKO	20 °C	160°C	180°C	210°C
Hustota (kg*m⁻³)	713	673,3	660	633,9

Z tabulky č. 5. vyplývá předpokládaný pokles hustoty v závislosti na výši teploty termické úpravy. Při teplotě 160 °C hustota klesla o 39,7 kg*m⁻³ oproti nemodifikovanému vzorku. Při teplotě 180 °C hustota klesla o dalších 13,3 kg*m⁻³ oproti modifikovanému vzorku při teplotě 160 °C. Největší úbytek hustoty ukázal modifikovaný vzorek při teplotě 210 °C, kde se hustota snížila o 79,1 kg*m⁻³ vůči výchozímu vzorku při 20 °C. To už je výrazný úbytek hustoty u tropické dřeviny Iroko.

10.2. Stolní frézka

Spodní svislá frézka FVS (Československé hudební nástroje, Hradec Králové), která je součástí vybavení dílny, byla určena na obrábění daných vzorků (Obr. 21). K frézce bylo přiděleno podávací zařízení. Jedná se o stroj vyrobený v roce 1975 s litinovou konstrukcí. Elektromotor o výkonu 5,2 kW při 1440 min⁻¹ / 2880 min⁻¹. Frézka umožňuje přehození klínových řemenů, kterými jde nastavit požadované otáčky stroje. Máme na výběr čtyři varianty - 3000 min⁻¹, 4500 min⁻¹, 6000 min⁻¹, 9000 min⁻¹. Velikost odebíraného materiálu byla 1 mm. Pomocí vzorce (1) lze vypočítat řezná rychlost.



Obrázek č. 21.: Stolní frézka

10.3. Podávací zařízení

Vzhledem k bezpečnosti podávání vzorků do řezu jsem použil podávací zařízení od firmy MAGGI Steff 2034 (Obr. 22). Podávací zařízení je upevněno pomocí přestavitelného stojanu, který umožňuje optimální nastavení zařízení do pozice. Zařízení je italské výroby z roku 2005. Motor má výkon 400 V a příkon 0,75 kW.



Obrázek č. 22.: Podávací zařízení na frézce

10.4. Frézovací hlava

K samotnému frézování jsem použil frézovací hlavu o rozměrech 125x50x30 mm od výrobce Maximus. Při frézování jsou ve fréze osazeny dva totožné nože. Typové označení nožů je Special 55, které se osadily pod úhlem ostří $\beta = 45^\circ$. Šířka nožů činí 45 mm a tvrdost nástroje je 62 HRC (Obr. 23). Břité nože obsahovaly tyto přísady C - uhlík – 0,7%, Cr - chrom – 4,2 %, W - wolfram – 18 %, V - vanad – 1,5 %.

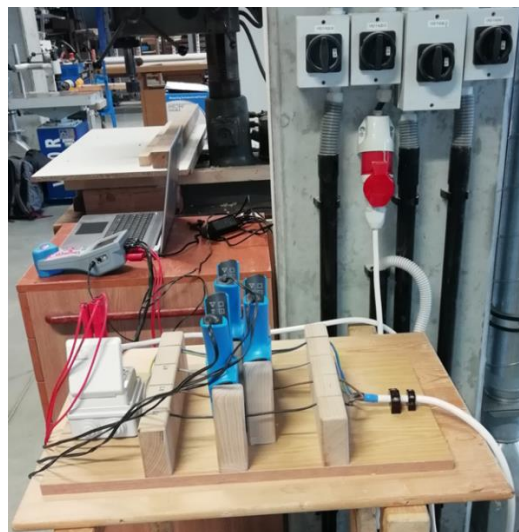


Obrázek č. 23.: Frézovací hlava

(https://www.simek.eu/static/_foto_zbozi/4/6/3/1/3/25897261._.B.o.jpg, 31. 1. 2020)

10.5. Měřicí přístroj energetické náročnosti

Měření během frézování jsem provedl s pomocí přístroje Metrel Power Q plus MI 2392 (Obr. 24), který jsem připojil k frézce a propojil s počítačem, kde jsem shromažďoval data přes software Metrel Power View. Přístroj je navržen tak, že snímá odebíraný proud I, napětí U a skrze fázový posun je schopen vypočítat příkon.



Obrázek č. 24.: Zapojení přístroje METREL Power Q plus

Postup měření

Měření bakalářské práce jsem provedl v dílnách dřevařského pavilonu na České zemědělské univerzitě v Praze.

Přístroj METREL Power Q plus jsem zapojil ke stolní frézce (Obr. 21), k počítači, kde jsem měl spuštěný program Metrel Power View a následně do přívodu elektrické energie (Obr. 24). Po zapnutí stolní frézky, jsem začal frézovat dané vzorky a spustil jsem měření přes počítač. Hodnoty, které zařízení zaznamenalo, se automaticky přenášely do daného programu. Pro snímání hodnot jsem nastavil vteřinový interval. V tomto intervalu se nasnímal i hodnoty při volno běhu stroje, ale ty byly posléze vyloučeny. Program automaticky vygeneroval průměrné hodnoty z měření. Tyto hodnoty jsem dále zpracoval pomocí programu Statistica 12 (Statsoft INC., USA) a Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation, USA).

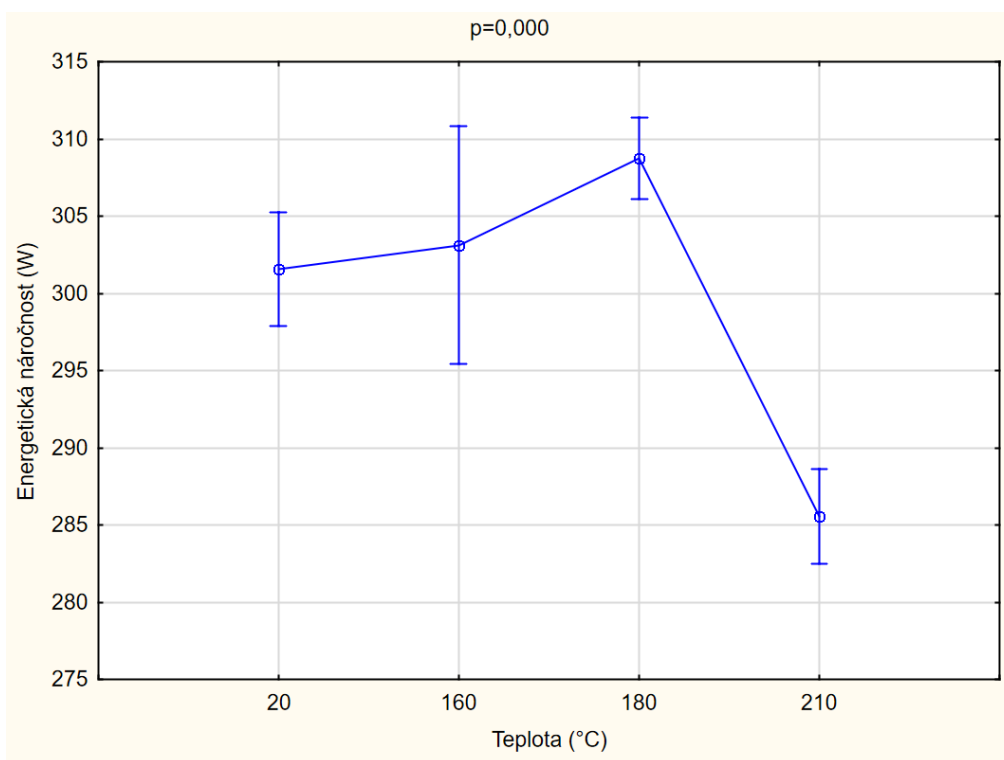
Po stanovení a popsání metodiky práce bych přešel na výsledky této práce. Naměřené výsledky byly zpracovány pomocí grafů a tabulek.

11. Výsledky

Jedenáctá kapitola rozebrala šesté téma práce, které bylo zaměřeno na hodnocení a zpracování výsledků v podobě dvou grafů a tří tabulek.

Všechny početní úkony jsem zpracoval v programu Statistica 12. Z druhů statistických testovacích hypotéz jsem zvolil Analýzu rozptylu - ANOVA – Analysis of variance. Dané hodnoty jsem převedl do tabulek pomocí programu Microsoft Excel 2010. Danou statistickou hypotézu jsem položil na hladinu významnosti $\alpha = 0,05$.

Z grafu číslo 1. lze pozorovat změny nárůstu příkonu v závislosti na teplotě termické úpravy.



Graf č. 1.: Závislost energetické náročnosti na teplotě termické modifikace

Z grafu mohu vyvodit tyto skutečnosti. Nemodifikovaný vzorek při teplotě 20 °C vykazoval průměrný příkon 301,5 W. U modifikovaného vzorku při teplotě 160 °C se nepatrně zvýšil příkon na 303 W. To stejné se projevilo u vzorku při teplotě 180 °C, kde příkon dosáhl hodnoty 308,8 W a procentuálně vzrostl o 2,38 %. Velmi pozoruhodný pokles příkonu zaznamenala tropická dřevina upravená při teplotě 210 °C, který se dostal na hodnotu 285,5 W. To mi přišlo jako velmi významný pokles asi o 5,3 % oproti nemodifikovanému vzorku, který měl 301,5 W (Tabulka č. 7).

Vzájemné porovnání jednotlivých proměnných hodnot mezi sebou jsou v tabulce č. 6. Červeně označené hodnoty znamenají statistickou významnost a jsou pod stanovenou hranicí $\alpha = 0,05$. Pomocí Duncanova testu vyšlo, že statisticky nejzajímavějším vzorkem je termicky upravené dřevo při teplotě 210 °C. Z daných čísel je statistická významnost velmi silná, protože se pohybuje velmi hluboko pod stanovenou hranicí (poslední řádek v Tabulce č. 6).

Tabulka č. 6.: Závislost energetické náročnosti na teplotě termické modifikace s využitím Duncanova testu

	Teplota modifikace (°C)	1 301,58	2 303,13	3 308,75	4 285,56
1	20		0,615059	0,028839	0,000115
2	160	0,615059		0,070587	0,000057
3	180	0,028839	0,070587		0,000051
4	210	0,000115	0,000057	0,000051	

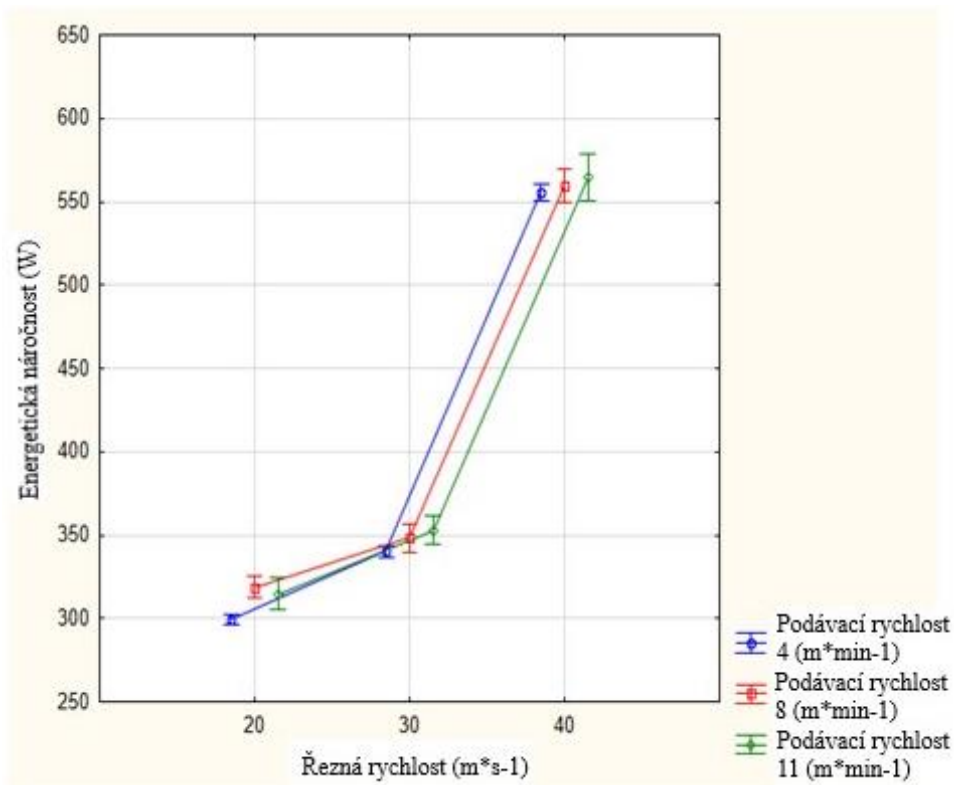
Vzorek při teplotě 180 °C taky vykazoval statistickou významnost s prvním vzorkem, ale v porovnání nebyla významnost až tak silná jako u vzorku číslo 4. Z toho vyplývá, že při stanovení hladiny významnosti $\alpha = 0,01$, by vzorek už nezapadal do statistické významnosti. Zbývající hodnoty jsou nad stanovenou hodnotou $\alpha = 0,05$, a proto nemají statistickou významnost. Dále se s nimi nezabývám.

Tabulka č. 7.: Průměrný vzrůst příkonu v závislosti na teplotě termické modifikace

Teplota (°C)	Průměrný příkon (W)	Vzrůst (%)
20	301,58	0
160	303,13	0,51
180	308,75	2,38
210	285,56	- 5,31

Z jednotlivých měření jsem sestavil tabulku vzrůstu a poklesu příkonu v závislosti na teplotě termické modifikace (Tabulka č. 7). Je patrné, že při 160 °C a 180 °C příkon při frézování vzrostl o 0,51 % a 2,38 %. Tento malý vzrůst příkonu, mohu zdůvodnit nedostatečnou výší teploty modifikace, kdy mohlo dojít ke zlepšení některých mechanických vlastností dřeva. Z pohledu měření mohu tyto hodnoty pominout, protože sloužily k porovnání. Kládl jsem důležitost měření na čtvrtý vzorek při teplotě 210 °C. Tropická dřevina Iroko upravená při teplotě 210 °C zaznamenala výrazný pokles příkonu o 5,31 %.

Na grafu číslo 2. lze vidět závislost řezné a podávací rychlosti na energetickou náročnost procesu frézování. Při řezné rychlosti $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ jsem naměřil výši příkonu na začínající hodnotě 300 W . Při zvýšení řezné rychlosti na $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, změřená hodnota vzrostla, na 340 W . Největší skok v nárůstu energie jsem zaznamenal při řezné rychlosti $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, kdy se hodnota dostala přes 550 W . To znamenalo nárůst příkonu více než o 200 W oproti řezné rychlosti při $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Graf č. 2.: Závislost řezné rychlosti a podávací rychlosti na energetickou náročnost

U každé řezné rychlosti jsem pozoroval změny příkonu při podávacích rychlostech 4 , 8 a $11 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. První změřené hodnoty začínaly v rozmezí $300 - 325 \text{ W}$. Při zvýšení řezné rychlosti na $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se příkon zvedl na rozmezí $340 - 355 \text{ W}$. Obrovský nárůst jsem zaznamenal při řezné rychlosti $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, kdy všechny podávací rychlosti narostly přes hodnotu 550 až 570 W .

Z grafu číslo 2. mohu popsat a stanovit vhodné parametry pro frézování. Je patrné, že když porovnám řezné rychlosti při $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tak se podávací rychlosti od sebe tolik neliší a nemají až tak zásadní vliv na energetickou náročnost. Při zvolení nejvyšší řezné rychlosti nezáleží na podávacích rychlostech, protože jsem se dostal nad spotřebu přes 550 W . Z toho vyplývá, že je lepší nastavit nižší řeznou i podávací rychlost a tím se dosáhne menší spotřeby příkonu. Přijatelné hodnoty má i řezná rychlost při $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a při všech podávacích

rychlostech. Z hlediska energetické náročnosti bych nedoporučil používat řeznou rychlost při $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, která nám zapříčinila nárůst příkonu více než o 200 W oproti řezné rychlosti při $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tuto řeznou rychlost bych zvolil pouze v nutných případech obráběcího procesu.

Tabulka č. 8. udává potvrzenou statistickou významnost na hladině $\alpha = 0,05$. Červené hodnoty značí velkou statistickou závislost, protože se dostaly hluboko pod stanovenou hranici. Z této závislosti a grafu mohu konstatovat, že řezná rychlost má obrovský vliv na energetickou náročnost. Podávací rychlosti také mají statistickou významnost, ale jejich hodnoty byly velmi vyrovnané z pohledu spotřeby příkonu.

Tabulka č. 8.: Statistická významnost řezné a podávací rychlosti

Sledované frézovací parametry	Hladina významnosti p
Řezná rychlost	0,000000
Podávací rychlost	0,000005

Shrnutí výsledků:

Na základě naměřených výsledků jsem prokázal jasnou závislost energetické náročnosti na teplotě termické modifikace dřeva metodou ThermoWood®. Tížený výsledek se dostavil u vzorku při teplotě $210 \text{ }^\circ\text{C}$, kde příkon klesnul na hodnotu 285,5 W, což byl pokles o 5,3 % vůči výchozímu vzorku ($20 \text{ }^\circ\text{C}$), který měl, hodnotu příkonu 301,5 W. Velkou roli, zde sehrála hustota, protože výchozí vzorek měl hustotu $713 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a při $210 \text{ }^\circ\text{C}$ hustota činila $633,9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Což je znatelný rozdíl v hustotě o $79,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ mezi vzorky. Výsledky ukázaly, že termicky upravená tropická dřevina Iroko byla energeticky méně náročná na množství odebírané energie, než rostlé dřevo. Všechny naměřené hodnoty se vztahovaly k řezné rychlosti, která byla $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a podávací rychlosti $4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

Dalším úkolem bylo sledovat různé možnosti technologických parametrů frézování. Ty byly sledovány při řezných rychlostech 20, 30, $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a podávacích rychlostech 4, 8, $11 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Tato závislost je vystižena v grafu číslo 2., kde jsou tyto veličiny vzájemně porovnány. Pokud bych měl stanovit vhodné frézovací parametry, tak bych zvolil řeznou rychlost při 20, $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a nejmenší podávací rychlost $4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Šly by použít i zbývající podávací rychlosti, protože hodnoty příkonu byly podobné. Rozhodně bych nevolil řeznou rychlost při $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, protože zaznamenala velký nárůst spotřeby elektrické energie. Z toho vyplývá, čím menší řezná i podávací rychlost, tím menší energetická náročnost a když hodnoty změním na vyšší, platí opak.

12. Diskuze

Posledním tématem bakalářské práce byla diskuze, kde jsem se věnoval porovnání a zhodnocení výsledků s ostatními pracemi na obdobnou problematiku.

Tímto tématem se zabývalo mnoho autorů. Například Kubš (2019), ve své disertační práci se zaměřil na termicky modifikovaný smrk ztepilý (*Picea abies*) a dub letní (*Quercus robur*) při teplotách 160, 180 a 210 °C. Jeho výzkum vykázal tyto důležité závěry. Chemické složení dřeva nelze opominout, protože čím vyšší teplota, tím menší je podíl hemicelulózy a také klesá hustota dřeva. Energetickou náročnosti ovlivňuje řezná rychlost, posuvná rychlost (čím vyšší, tím větší spotřeba elektrické energie). Zvyšující se úhel čela snižuje spotřebu energie. Vyšší teplota termické modifikace snižuje příkon elektrické energie a záleží na druhu dřeviny.

Další práce od Jouja (2018), který se zabýval energetickou náročností, ale u tropických dřevin Meranti a Merbau. Dospěl k závěrům, že při vyšší teplotě termické modifikace se řezný příkon snižuje, při zvýšení podávací rychlosti dojde k mírnému zvýšení řezného příkonu a nejcitelnější nárůst řezného příkonu zaznamenal při zvýšení řezné rychlosti z 30 m*s⁻¹ na 40 m*s⁻¹. Úhel čela v rozpětí 15 - 25 ° snižuje řezný příkon.

Hodně poznatků lze nalézt v odborných článcích, které se věnovaly tomuto tématu. Například článek od autorů Kubš, Gaff, Barčík (2016), kde se zabývaly faktory ovlivňující frézování tepelně upraveného i neupraveného bukového dřeva. Z článku jasně vyplynulo, že nejdůležitější faktor ovlivňující řezný výkon je řezná rychlost i nastavení úhlu čela. Podávací rychlost taky nepatrně ovlivnila spotřebu energie, ale není tak důležitá, jako výše uvedené dva případy. Z daného měření v článku lze konstatovat, že následující nastavení z hlediska energetické účinnosti pro praxi jsou nejnižší řezná rychlost, nejvyšší možný úhel čela a obrábět tepelně modifikované dřevo.

Další článek od autorů Sedlecký a kol. (2019), který se zabýval vlivem parametrů frézování a tepelné úpravy dřeva na příkon energie při frézování tepelně modifikovaného smrku a dubového dřeva. Článek pojednával o tom, že opět řezná rychlost má nejvýznamnější vliv na příkon. Bylo prokázáno, že účinek úhlu čela nástroje výrazně ovlivňuje příkon. Rychlost posuvu neovlivňuje příkon tak významně jako předchozí dva faktory, ale je statisticky významná. Měření prokázalo vliv termické úpravy na příkon. Tento efekt je nejvíce ovlivněn chemickými procesy a změnou hustoty při řezání dřeva.

Velmi pozoruhodné je porovnání stejné problematiky, ale pro tropickou dřevinu Padouk od kolegy Machance (2019) v jeho bakalářské práci. Jeho výsledky byly velmi vyrovnané. Výchozí vzorek 20 °C měl příkon 290 W a modifikovaný vzorek 210 °C měl hodnotu 283 W. Zmíněné hodnoty, byly velmi vyrovnané, dle mého názoru na základě malé změny v hustotě. Výchozí hustota činila $640 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a upravený vzorek při 210 °C měl hustotu $612 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. V porovnání s mými výsledky neměl takový rozdíl mezi naměřenými hodnotami.

Pro srovnání frézovacích parametrů jsem vyhledal práce od těchto autorů. První autor Sedlecký (2017) se zabýval energetickou náročností u středně tvrdé dřevovláknité desky, smrkové spárovky a laminované MDF desky. Výsledky v jeho výzkumu byly podobné jako v mé práci. To znamená, že čím je vyšší řezná rychlost, tím víc se zvedal řezný příkon. Naměřené hodnoty podávacích rychlostí měly vliv na výši řezného příkonu, ale rozdíly v hodnotách podávacích rychlostí nebyly tak odlišné.

Další práce od autorů Barčík a kol. (2014), kteří zkoumali vliv technologických faktorů na kvalitu opracování povrchu při frézování termicky modifikovaného borovicového dřeva. Z jejich experimentu je patrné, že u termodřeva při řezné rychlosti $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, dojde ke zvýšení hodnoty drsnosti. Při dalším zvýšení řezné rychlosti byl zaznamenán výrazný pokles drsnosti. Vliv posuvné rychlosti byl až jako poslední faktor, který ovlivňoval drsnost povrchu. Tato práce byla odlišná, protože se víc zaměřila na drsnost povrchu. Uvedl jsem ji z důvodu zajímavého porovnání a možného pokračování pro mé téma v této práci.

Poslední práce, která se zabývala vlivem úhlu čela na energetickou náročnost při rovinném frézování termicky modifikovaného bukového dřeva od autorů Kubš a Barčík (2014). Z naměřených výsledků došli k závěru, že čím větší úhel čela (konkrétně 25°), tím se snižuje řezný příkon a vznikla úspora 6,18 % oproti frézování rostlého dřeva.

Z výše uvedených prací a článků lze vyvodit závěr, na kterém se převážně shodují zmínění autoři. Prokázaly patrnou shodu energetické náročnosti v závislosti na teplotě termické úpravy dřeva. Při které se změní chemická struktura – menší podíl hemicelulóz a hustota dřeva. Nezapomenout na druh vstupní dřeviny do procesu, který má svoje opodstatnění. Nejvýznamnější faktory, které nejvíce ovlivnily energetickou náročnost, byly řezná rychlost a úhel čela nástroje. Dalším důležitým faktorem je posuvná rychlost, která není tak významná jako zmíněné předchozí dva faktory, ale má statistickou významnost.

13. Přínos pro vědu a praxi

Tato bakalářská práce byla z vědeckého pohledu přínosná, protože jsem zkoumal tropickou dřevinu Iroko, termickou úpravu dřeva finskou metodou ThermoWood®, změny technologických parametrů frézování v závislosti na energetickou náročnost procesu frézování. Práce obsahuje naměřené výsledky, které mohou pomoci v dalším vědeckém zkoumání. Z vědeckého pohledu bych se zaměřit na rozšíření této problematiky. Zajímavé by bylo prozkoumat další technologický parametr frézování, kterým je nastavení úhlu čela řezného bříty při frézování. Poslední věc ke zkoumání by mohla být zaměřena na zjištění drsnosti a vlnitosti obrobeného povrchu a případné otupení nástrojů při procesu frézování.

Hlavní přínos pro praxi bych viděl v určení technologický parametrů při rovinném frézování, které ovlivnily hodnotu řezného příkonu. Z naměřených výsledků mohu doporučit tyto vhodné frézovací kombinace - řeznou rychlost při 20 a 30 m*s⁻¹ a nejnižší podávací rychlost 4 m*min⁻¹. Lze použít i zbývající podávací rychlosti 8 a 11 m*min⁻¹, protože změřené hodnoty příkonu byly velmi podobné. Z toho vyplývá, že pro praxi by mohlo být efektivnější využívat vyšší podávací rychlosti, které zabezpečí snížení času obrábění, i přes mírný nárůst spotřeby elektrické energie.

Druhý přínos byl v přeměně rostlého dřeva na modifikované dřevo ThermoWood®, která ukázala prokazatelnou závislost na energetickou náročnost procesu frézování. Rostlé dřevo mělo výši příkonu 301,58 W a modifikované dřevo při 210 °C se dostalo na hodnotu příkonu 285,56 W. To znamenalo pokles příkonu o 5,31 % oproti rostlému dřevu. Tuto závislost jsem potvrdil a menší energetickou náročnost na množství odebrané elektrické energie vykazalo ThermoWood® oproti rostlému dřevu.

14. Závěr

Frézování dřeva, termická úprava dřeva a energetická náročnost tvoří obsáhlé problematiku, které vlivem neustálého technologického rozvoje budou mít význam na dřevozpracující průmysl i s ohledem na životní prostředí.

Dle mého názoru budoucnost frézování dřeva vidím v neustálém zdokonalování frézovacích nástrojů, stojů a podmínek, které stanovují technologické parametry frézování. Dnes již nelze opomenout technologický rozvoj strojů na zpracování dřeva, jakými jsou například dřevoobráběcích centra, která se programují přes počítač. Právě na těchto centrech převažuje proces frézování, vrtání a úprava hran, protože stroj má v zásobníku velké množství frézovacích nástrojů.

Velmi pozitivně bych hodnotil termickou úpravu dřeva metodou ThermoWood®, která používá pouze vodu a teplo při procesu úpravy dřeva. Proto získala takové uplatnění, protože náročnost na technologii není tak vysoká jako v ostatních možnostech tepelné úpravy dřeva. Nerad bych zapomněl na propojení zmíněných problematik, kterým byla energetická náročnost a její vliv na spotřebu elektrické energie při rovinném frézování.

Hlavním cílem bylo určit vliv termické modifikace na energetickou náročnost tropické dřeviny Iroko při rovinném frézování a sledovat vliv stanovených technologických parametrů frézování na výši spotřeby řezného příkonu. Výsledky v práci, prokázaly jasnou závislost termické modifikace dřeva na energetickou náročnost procesu. To znamená, že je energeticky méně nákladné obrábět termicky modifikované dřevo než rostlé dřevo. Sledované technologické parametry frézování potvrdily, že největší vliv na hodnotu spotřebované elektrické energie měla řezná rychlost. Posuvná rychlost měla také vliv na velikost spotřeby, ale nebyla tak výrazná jako rozdíly v řezných rychlostech. Na to bych navázal, že je velmi nezbytně nutné dodržovat údržbu strojů i nástrojů v dobré kvalitě, protože se může velmi znatelně promítnout na výši energetické náročnosti procesu frézování.

Výsledky mého měření ukázaly podobné shody a potvrdily závěry obdobně zaměřených výzkumů a prací. Z toho mohu vyvodit, že jsem měření provedl správně a potvrdil jsem stanovení sledovaných technologických parametrů při rovinném frézování a vliv termické úpravy dřeva na snížení energetické náročnosti při frézování.

Tato práce obsahuje shrnuté poznatky o velmi využívaném procesu frézování dřeva, základních frézovacích nástrojích a strojích, tropické dřeviny Iroko, termické modifikaci metodou ThermoWood®, vlivu termické modifikace na energetickou náročnost při rovinném frézování a sledování technologických parametrů frézování.

15. Seznam použitých zdrojů

Literární zdroje:

1. Barcík Š., Technika pre výrobu nábytku, 2009, TU Zvolen, 263 str., ISBN 9788022820554.
2. Barcík Š., Kvietková M., Bomba J., Siklienka M., Dřevoobráběcí nástroje – údržba a provozování, Praha 2013, Powerprint s.r.o., 355 str., ISBN 978-80-87415-80-1.
3. Barcík Š., Homola T., Vplyv vybraných parametrov na kvalitu obrobeného povrchu pri rovinom frézování juvenilního borovicového dřeva, 2004, Trieskové a beztrieskové obrabanie dreva, TU Zvolen, ISBN 80-228-1385-0.
4. Barcík Š., Gašparík M., Houska A., Razumov E. Yu., Sedlecký M., Vliv technologických faktorů na kvalitu opracování povrchu při frézování termicky modifikovaného borovicového dřeva, 2014, TU vo Zvolene, 9(1): 11-22 str., ISBN 978-80-228-2658-7.
5. Callum A.S. Hill, Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes, 2006, John Wiley & Sons Ltd, UK., 249 str., ISBN: 0-470-02172-1.
6. Gibbs N., Dřevo – Velká encyklopedie, Praha 2009, Grada Publishing a.s., 192 str., ISBN – 978-80-247-2858-2.
7. Gibbs N., Dřevo, Praha 2005, Nakladatelství Slovart s.r.o., 256 str., ISBN 80-7209-720-2.
8. Janíček F., Vozár J., Zbořil F., Výrobní Zařízení, Praha 1995, Informátorium, 255 str., ISBN 80-85427-61-3.
9. Josten E., Reiche T., Wittchen B., Dřevo a jeho obrábění, Praha 2010, Grada Publishing a.s., 336 str., ISBN 978-80-247-2961-9.
10. Jämsä S., Ahola P., Viitaniemi P., Long-term natural weathering of coated ThermoWood, 2000, Pigment & Resin Technology, Vol. 29 No. 2, pp. 68-74.
11. Jouja M., Energetická náročnost při obrábění termicky modifikovaného dřeva, 2018, ČZU v Praze, Diplomová práce, 67 stran.
12. Kvietková, M., Obrábění dřeva, 2015, ČZU v Praze, 295 str., ISBN 978-80-213-2604-0.
13. Kubš J., Termicky modifikované dřevo vliv nezávislých parametrů na závislé parametry při rovinném frézování, 2019, ČZU v Praze, Disertační práce, 167 stran.
14. Kubš J., Gaff M., Barcík Š., Factors Affecting the Consumption of Energy during the Milling of Thermally Modified and Unmodified Beech Wood, Kubš et al. (2016), Energy consumption of beech, BioResources 11 (1), 736-747.
15. Kubš J., Barcík Š., Vliv úhlu čela na energetickou náročnost při rovinném frézování termicky modifikovaného bukového dřeva, 2014, Trieskové a beztrieskové obrabanie dreva, TU vo Zvolene, 9(1) 97-104 str., ISSN 1339-8350.

16. Lisičan J., Obrábanie a delenie drevných materiálov, 1988, VŠLD Zvolen, 391 str., ISBN 85-1644-88.
17. Lisičan J. a kol., Teoria a technika spracovania dreva, 1996, MAT-CENTRUM, 626 str., ISBN 80-967315-6-4.
18. Machanec O., Vliv termické modifikace na energetickou náročnost dřeviny Padouk při rovinném frézování, 2019, ČZU v Praze, Bakalářská práce, 57 stran.
19. Mayes D., Oksanen O., ThermoWood Handbook, 2003, International Thermowood Association, 66 str., Dostupné: https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw_handbook_080813.pdf.
20. Nutsch W., a kol., Příručka pro truhláře, Praha 2006, Europa – Sobotáles, 615 str., ISBN 80-86706-14-1.
21. Prokeš, S., Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva, Praha 1978, STNL - Nakladatelství technické literatury, 584 str., ISBN 04-817-78.
22. Reinprecht L., Vidholdová Z., Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie, 2008, Technická univerzita vo Zvolene, 89 str., ISBN 978-80-228-1920-6.
23. Reinprecht L., Wood Deterioration, Protection and Maintenance, 2016, John Wiley & Sons Ltd, UK., 357 str., ISBN 978-1119-10653-1.
24. Sedlecký M., Sarvašová Kvietková M., Kubš J., Kubová P., The Effect of Milling Parameters and Thermal Modification on Power Input During the Milling of Thermally Modified Spruce and Oak Wood, Sedlecký et al (2019), Milling spruce & oak, BioResources 14 (1), 669-687.
25. Sedlecký M., Vliv druhu materiálu nástroje na kvalitu opracovaného povrchu při podélném frézování dřeva a materiálů na bázi dřeva, Praha 2017, Česká zemědělská univerzita v Praze, Disertační práce, 148 stran.
26. Siklienka M., Kminiak R., Delenie a obrábanie dreva, 2013, TU vo Zvolene, 207 str., ISBN-9788022826181.

Normy:

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

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

Internetové zdroje:

ThermoWoodHandbook, Brochure, Finsko, Dostupná na: https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/thermo_eng.pdf (1. 2. 2020).

<https://www.thermowood.fi/esitteet-ja-kirjat> (12. 12. 2019).

<https://www.aruzicka.cz/geometrie-rezne-casti-a-smery-frezovani>, (31. 1. 2020).

<https://www.bo-import.cz/frezy-hss/frezy-nastrcne-hss/freza-valcova-celni-nastrcna-624278v-063-63x40-hss-co8-typ-nr-19749.html>, (31. 1. 2020).

<https://www.rojekstroje.cz/rojekstroje/eshop/36-1-SROVNAVACKY-HOBLOVKY/0/5/238-Srovnavaci-frezka-RFS-510-INDUSTRY-9>, (31. 1. 2020).

<https://www.felder-group.com/cs-cz/produkty/tloustkovaci-frezky-c1948/tloustkovaci-frezka-exact-63-p3067>, (31. 1. 2020).

<https://www.dobrestroje.cz/dobrestroje/eshop/1-1-/219-2-CTYRSTRANNE-FREZKY/5/1763-CTYRSTRANNA-PROFILOVACI-FREZKA-ROJEK-CPF23-4>, (31. 1. 2020).

<https://www.felder-group.com/cs-cz/produkty/spodni-frezky-c1949/frezka-s-naklopnym-hridelem-f-900-z-p2959>, (31. 1. 2020).

<https://www.surplex.com/cz/m/samco-mini-router-horni-frezka-563332.html>, (31. 1. 2020).

<http://www.arakolin.cz/cs/dreviny/iroko> (28. 1. 2020).

<http://wood-point.cz/produkt/iroko-terasa/> (29. 1. 2020).

<http://www.hardwooddistributors.org/species/iroko-teak>, (28. 1. 2020).

<https://fasady-terasy-thermowood.cz/zajimavosti/vyroba-a-tridy-materialu-thermowood-b100.html>, (28. 1. 2020).

https://www.simek.eu/static/_foto_zbozi/4/6/3/1/3/25897261._.B.o.jpg, (31. 1. 2020).