Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Vliv termické modifikace na energetickou náročnost dřeviny Padouk při rovinném frézování

Bakalářská práce

Autor: Ondřej Machanec

Vedoucí práce:doc. Ing. Monika Sarvašová Kvietková, PhD.

2019

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Ondřej Machanec

Dřevařství

Název práce

Vliv termické modifikace na energetickou náročnost dřeviny Padouk při rovinném frézování

Název anglicky

Effect of the thermal modification on the energy intensity of wood species Padouk in planar milling

---

Cíle práce

Cílem práce je zjišťování vlivu termické modifikace na energetickou náročnost při rovinném frézování tropické dřeviny Padouk. Energetickou náročnost budeme zkoumat v závislosti na změně teploty termické modifikace.

Metodika

Charakteristika procesu obrábění frézováním, termické modifikace vybrané tropické dřeviny. Proměnné teploty termické modifikace budou 160, 180 a 210°C, které budou porovnány s referenčními tělesy bez termické modifikace. Termická úprava dřeva proběhne patentovanou metodou Thermowood. Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v grafické a textové podobě. Stanovení takových podmínek, které jsou z hlediska energetické náročnosti pro frézování tepelně modifikovaného dřeva optimální. Popsání změn vlastností dřeva při tepelné modifikaci.

Doporučený rozsah práce

35 – 45 stránek

Klíčová slova

Padouk, frézování termicky upraveného dřeva

Doporučené zdroje informací

BARCÍK, J., GAŠPARÍK, M., HOUSKA, A.,EVGENY YU, R., SEDLECKÝ, M. Vliv technologických faktorů na kvalitu opracování povrchu při frézování termicky modifikovaného dřeva. Zvole. Technická univerzita vo Zvolene, 2014, ISBN 978-80-228-2658-7.

BARCÍK, Š., GAŠPARÍK, M.,HOUSKA, A., RAZUMOV, E., SEDLECKÝ, M. Trieskové a beztrieskové obrábania dreva, 2014 Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, ISBN 978-80-228-2658-7.

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

KAČÍKOVÁ, D., KAČÍK, F. Chemické a mechanické změny dreva při termickej úprave. Zvolen. Technická univerzita vo Zvolene, 2011, ISBN 978-80-228-2249-7.

KVIETKOVÁ, M. Obrábění dřeva. CARTER Praha. 2015. 295 s., ISBN 978-80-213-2604-0.

LISIČAN, J. Obrábanie a delenie drevných materiálov. Zvolen. Technická univerzita vo Zvolene, 1988, 412s.

MAYES, D., OKSANEN, O. Thermowood(r) Handbook. Fínsko Dostupné na <http://www.thermowood.fi/data.php/200312/795460200312311156_tw_handbook.pdf.>

NUTSCH, W. Příručka pro truhláře. 2. přeprac. vyd. Praha. Europa-Sobotáles cz, 2006. ISBN 80-86706-14-1.

SVOREŇ, J. Drevarské stroje. Časť II. Technická univerzita vo Zvolene, ES 2006, 149s.

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 17. 03. 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „**Vliv termické modifikace na energetickou náročnost dřeviny Padouk při rovinném frézování**“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Moniky Sarvašové Kvietkové, PhD., a že jsem použil pouze zdroje, které jsou uvedeny v seznamu zdrojů.

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

V Praze dne 18.4.2019 podpis:

Poděkování

Zde bych rád poděkoval vedoucí mé bakalářské práce doc. Ing. Monice Sarvašové Kvietkové, Ph.D., a mému konzultantovi Ing. Miroslavu Sedleckému, Ph.D. za odborné vedení a poskytnutí cenných rad, trpělivost a ochotu, se kterou odpovídali na všechny mé dotazy.

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na energetickou náročnost termicky modifikovaného tropického dřeva při rovinném frézování v závislosti na změně teploty termické modifikace. Měřeny byly vzorky dřeviny padouk termicky modifikované při teplotě 160°C, 180°C a 210°C a následně porovnány s termicky nemodifikovaným dřevem dané dřeviny.

Práce je rozdělena na pět částí. V první části se zabývá analýzou a přiblížením procesu frézování. Druhá část je věnovaná dřevině padouk. Ve třetí části je popsána metoda termické modifikace metodou ThermoWood®. V další části je vysvětlena metodika měření a v poslední páté části jsou prezentovány výsledky. Z výsledků vyplývá, že statisticky významný pokles energetické náročnosti nastává jen u jednoho typu ze čtyř měřených vzorků, a to u vzorků termicky modifikovaného při 210°C. V porovnání se vzorky klimatizovanými na teplotu 20°C nastává statisticky významný pokles příkonu.

Klíčová slova: Padouk, frézování termicky upraveného dřeva

Abstract

The bachelor thesis is focused on the energy intensity of thermally modified tropical wood during planar milling, depending on the temperature change of the thermal modification. Samples of padouk wood thermally modified at 160°C, 180°C and 210°C were measured and then compared with thermally unmodified wood of the given tree species.

The thesis is divided into five parts. The first part deals with the analysis and approximation of the milling process. The second part is dedicated to the padouk tree. The third part describes the thermal modification method ThermoWood®. The next part explains the measurement methodology and the last fifth part presents the results. The results show that a statistically significant decrease in energy intensity occurs only in one of the four measured samples, namely in thermally modified samples at 210°C. Compared to air-conditioned samples at 20°C, there is a statistically significant decrease in power consumption.

Keywords: Padouk, milling of thermally treated wood

Obsah

1 Úvod 11

2 Cíl práce 12

3 Termicky modifikované dřevo® 13

3.1 Fáze výroby ThermoWood® 14

3.2 Třídy ThermoWood® 15

3.3 Faktory ovlivňující ThermoWood® 17

3.4 Struktura a vlastnosti termicky modifikovaného dřeva 17

3.4.1 Vliv termické modifikace na mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva 18

3.4.2 Vliv termické modifikace na vlastnosti termicky modifikovaného dřeva 19

4 Frézování 21

4.1 Charakteristika frézování 21

4.2 Popis frézování 21

4.3 Metody frézování 21

4.3.1 Válcové frézování 21

4.3.2 Okružní frézování 22

4.3.3 Čelní frézování 22

4.3.4 Planetové frézování 23

4.4 Rozdělení podle vzájemného pohybu nástroje a obrobku 23

4.5 Rozdělení frézování podle tvaru hotového výrobku 24

4.6 Rozdělení fréz 24

4.7 Rozdělení rovinných frézek 29

4.7.1 Svislé frézky 29

4.7.2 Srovnávací frézka 33

4.7.3 Tloušťkovací frézka 34
4.7.4 Vícestranná frézka 34
4.8 Kinematika frézování 35
4.9 Energetická náročnost procesu frézování 39
5 Padouk 41
6 Metodika 43
7 Výsledky 49
8 Diskuze 52
9 Závěr 53

Seznam obrázků

Obrázek č. 1. Válcové frézování 21
Obrázek č. 2. Okružní frézování 22
Obrázek č. 3. Čelní frézování 22
Obrázek č. 4. Frézování nesousledné a sousledné 24
Obrázek č. 5. Geometrie ostří 27
Obrázek č. 6. Schéma čelního frézování 28
Obrázek č. 7. Trn frézky 29
Obrázek č. 8. Svislá spodní frézka 30
Obrázek č. 9. Frézovací hlava (složená fréza) 31
Obrázek č. 10. Celistvá kotoučová fréza 31
Obrázek č. 11. Fréza se vsazenými zuby 32
Obrázek č. 12. Sada fréz 32
Obrázek č. 13. Kinematický model frézování 35
Obrázek č. 14. Textura 42
Obrázek č. 15. Spodní svislá frézka 45
Obrázek č. 16. Podávací zařízení 45
Obrázek č. 17. Frézovací hlava 46
Obrázek č. 18. Přístroj Metrel Power Q plus 47
Obrázek č. 19. Schéma zapojení přístroje Metrel Power Q plus 47

Seznam tabulek

Tabulka č. 1. Účinky termické modifikace na jehličnaté dřeviny (smrk, borovice) 16
Tabulka č. 2. Účinky termické modifikace na jehličnaté dřeviny (bříza, osika) 16
Tabulka č. 3. Parametry termické modifikace 43
Tabulka č. 4. Hustota po termické modifikaci 44
Tabulka č. 5. Evansova příručka (1996) 48
Tabulka č. 6. Závislost energetické náročnosti na teplotě termické modifikace s využitím Duncanova testu 50
Tabulka č. 7. Průměrný pokles příkonu v závislosti na termické modifikaci 50
Tabulka č. 8. Korelace hustoty, energie a teploty termické modifikace 51

Seznam grafů

Graf č. 1. Proces výroby 15
Graf č. 2. Závislost energetické náročnosti na teplotě termické modifikace 49

1 Úvod

Dřevo, jeden z nejgeniálnějších přírodních materiálů, které nám planeta Země poskytla. Už od pravěku je to materiál, se kterým se lidstvo setkávalo. Nejprve se ho snažilo využívat v podobě primitivních nástrojů a přístřešků. V období starověku se dřevo využívalo především jako stavební a palivový materiál. Ve středověku navíc jako materiál, který našel průmyslové využití. Dnes se na něj pohlíží jako na přírodní obnovitelný materiál s rozmanitým využitím, a to především díky jeho mechanickým vlastnostem, anatomické stavbě, dostupnosti a dnes možná největší výhodě oproti ostatním materiálům, ceně.

Navzdory svým nesporným výhodám má dřevo také své nevýhody, a to zejména trvanlivost. Pokud se v dnešní době u výrobků ze dřeva snažíme dosáhnout co nejvyšší životnosti, je metoda termické modifikace jednou z nejdiskutovanějších. Proto jsem si vybral téma termická modifikace dřeva, která byla navíc použita na tropickou dřevinu. Tropické dřeviny mají vyšší životnost a odolnost než naše dřeviny, především díky své anatomické stavbě. Frézování jsem si vybral z toho důvodu, protože bych těžko hledal jinou operaci třískového obrábění dřeva, která by byla z hlediska kvalitativního obrábění více používaná a energetickou náročnost, protože cena je v dnešní době ve výrobě jeden z nejpodstatnějších faktorů.

Jeden z důvodu výběru termické modifikace metodou ThermoWood® pro mne byla také otázka ekologie, na kterou je v dnešní době kladen velký důraz. Termicky modifikované dřevo, jak už z názvu vyplývá, je dřevo modifikované pouze pomocí tepla. Při výrobě se na dřevo nemusí působit žádnými chemickými látkami a můžeme tedy mluvit o modifikaci zcela šetrné k životnímu prostředí.

2 Cíl práce

V současnosti se čím dál více využívá termická modifikace dřeva, proto hlavním cílem v mé bakalářské práci bylo zjištění vlivu termické modifikace v závislosti na energetické náročnosti při rovinném frézování tropické dřeviny padouk. Měření energetické náročnosti bylo měřeno v závislosti na změně teploty termické modifikace, a to při teplotách termické modifikace 160°C, 180°C a 210°C. Mimo to se takto termicky modifikované vzorky měly porovnat se vzorky nemodifikovanými, pouze klimatizovanými na 20°C.

Vedlejší cíl byl charakterizovat a popsat proces frézování a charakterizovat termicky modifikované dřevo metodou ThermoWood®.

3 Termicky modifikované dřevo®

V mé bakalářské práci jsem se věnoval termicky modifikovaným vzorkům, proto se v této kapitole věnuji termické modifikaci dřeva.

Již od pradávna je známo, že opalování dřeva na otevřeném ohni zvýší jeho trvanlivost v exteriéru. Už Vikingové používali tuto metodu na venkovní konstrukce, například na ploty.

Termické zpracování dřeva bylo vědecky prozkoumáno nejdříve ve 20. století. Nejprve Stammem a Hansenem ve třicátých letech a ve Spojených státech v letech čtyřicátých Whitem. V padesátých letech pokračují ve výzkumu tohoto tématu Němci Bavendam, Runkel a Buro. V šedesátých letech publikovali své poznatky Kollman a Schneider a v sedmdesátých letech Rusche a Burmester. Ve Finsku, Francii a Nizozemsku v devadesátých letech. Nejintenzivnější a rozsáhlá výzkumná práce byla provedena společností VTT (Technical Research Center of Finland) ve Finsku. Významný, praktický výzkum provádí také YTI (Institut životního prostředí Technologie).

Moje bakalářská práce se zabývá termickou modifikací metodou ThermoWood. To je metoda vyvinutá společností VTT. Přičemž je materiál ohřátý na teplotu alespoň 180 stupňů Celsia, zatímco je chráněn parou před samovznícením. Pára zajišťuje ochranu dřeva, ale také ovlivňuje chemické změny probíhající ve dřevě. Dřevo se vlivem termické modifikace stane v exteriérových podmínkách více trvanlivé a zlepší se jeho odolnost vůči biologickým činitelům. Jeden z vedlejších efektů termické modifikace je, že dřevo ztmavne. Hlavní nevýhodou je snížení ohybové pevnosti, a proto se termicky modifikované dřevo nepoužívá na nosné prvky (ThermoWood® Handbook, 2003).

Termicky modifikované dřevo můžeme rozdělit podle způsobu ohřívání média:

- horkým vzduchem ThermoWood®,
- parou PLATO® proces,
- olejem OHT proces (Oil Heat Treatment),
- v inertním prostředí plynů Rétification Le Bois Perdure.

3.1 Fáze výroby ThermoWood®

Proces byl vyvinut společností VTT ve spolupráci s finským průmyslem dřevařských výrobků. ThermoWood® a je licencován členům finské asociace ThermoWood®.

Proces ThermoWood® může být rozdělen do tří hlavních fází (Graf č. 1.)

1. fáze - zvýšení teploty a sušení při vysokých teplotách

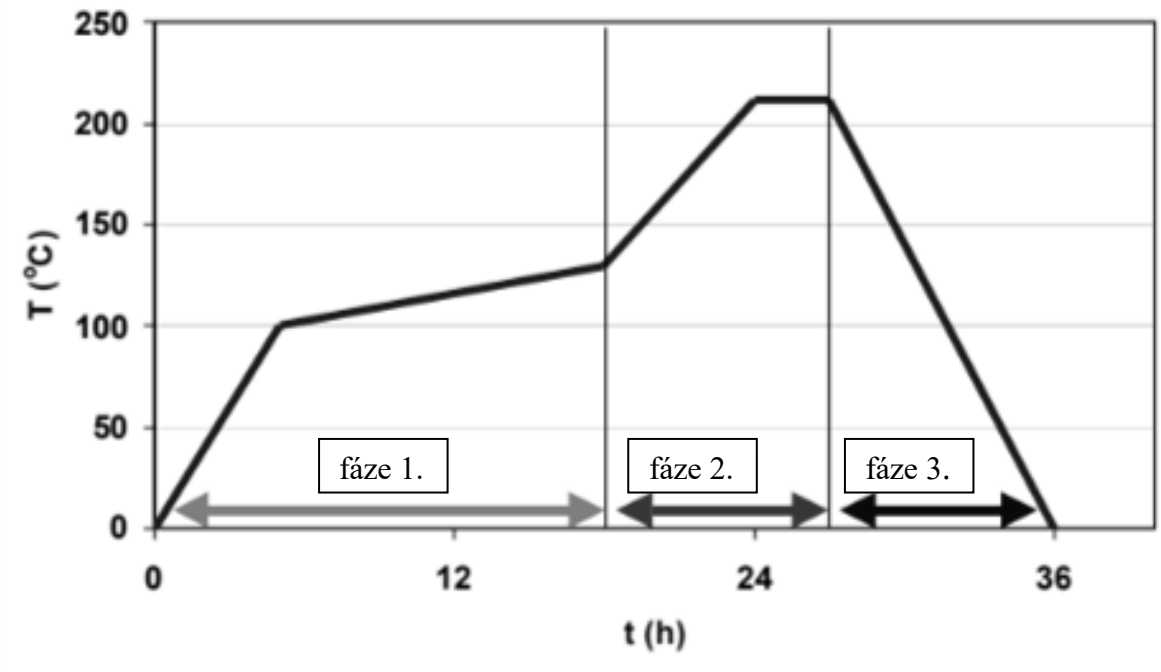
Teplota se prudce zvyšuje na teplotu přibližně 100°C. Následně se teplota plynule zvyšuje na 130°C, pomocí působení vodní páry nebo horkého vzduchu. Během této teploty dochází k sušení a vlhkost dřeva klesá téměř na nulu. Doba sušení závisí na počáteční vlhkosti dřeva a tloušťce materiálu.

2. fáze - termické zpracování

Jakmile dojde k sušení při vysoké teplotě, teplota se uvnitř pece zvýší na 185°C nebo až na 215°C. Když dojde k dosažení cílové teploty, udržuje pec tuto teplotu po dobu 2-3 hodin. Tato doba je závislá na cílové teplotě.

3. fáze - ochlazování

Konečným krokem je snížení teploty systémem rozprašování vody. Když teplota dosáhne 80-90°C, dojde ke zvlhčení dřeva, tím se zvýší vlhkost dřeva na 4-7%. Komora se otvírá při teplotě 40°C hlavně z toho důvodu, aby nedošlo k termickému šoku a zhoršení vlastností dřeva. Doba ochlazování závisí na dřevině a na tloušťce materiálu, obvykle 5-15 hodin (ThermoWood® Handbook, 2003).



Graf č. 1. Proces výroby

(https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw_handbook_080813.pdf, 9.3.2019)

3.2 Třídy ThermoWood®

Co se týká termického zpracování dřeva, existují dvě třídy. Vlastnosti se mění pomalu se zvyšující teplotou, jakmile ale teplota překročí 200°C, vlastnosti se začínají měnit rychle. Proto se ThermoWood® dělí na Thermo-S a Thermo-D.

Thermo-S je vyráběné mírnějším termickým zpracováním. Písmeno S znamená stabilitu, ta je spolu s vzhledem klíčovou vlastností. Vzhledově je světle hnědý a je vhodný pro použití v interiérech a v prostředí, ve kterých není dřevo neustále vystaveno vodě. Průměrné hodnoty tangenciálního sesychání a bobtnání dosahují 6 – 8%. Norma ČSN EN 335 (2013) zařazuje Thermo-S do 1 a 2 třídy použití na základě ohrožení biologickými škůdci a do třídy použití 1 a 2.

Thermo-D je produktem intenzivnějšího působení termické modifikace. Průměrné hodnoty sesýchání a bobtnání se pohybují v rozmezí 5 – 6%. Je více rozměrově stabilní a tmavší. Podle normy ČSN EN 350 (2017) patří, z hlediska trvanlivosti a odolnosti dřeva vůči hnilobě, do kategorie 2 a odpovídá třídám použití 1-3.

ThermoWood® není vhodný pro třídy použití 4 nebo 5.

Dřeviny používané na termickou modifikaci jsou nejčastěji borovice a smrk. Co se týká jehličnatých dřevin, v případě listnatých dřevin jsou to bříza a osika. Termicky modifikované jehličnaté dřeviny se nejčastěji používají na terasy, zahradní doplňky, interiérové a exteriérové obklady. Očekávaná doba životnosti je 30 let. Listnaté dřeviny se používají pro sauny a pro podlahovinu. Produkce listnatého sortimentu byla v roce 2004 15% (Hill, 2006).

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

Tabulka č. 2. Účinky termické modifikace na jehličnaté dřeviny (bříza, 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

3.3 Faktory ovlivňující ThermoWood®

Všeobecné faktory - významný vliv na kvalitu konečného produktu má kvalita vstupní suroviny. Termicky modifikované mohou být v zásadě všechny dřeviny, ale pro každou dřevinu musí být proces optimalizovaný.

Druh dřeviny - ve Finsku se nejvíce používá borovice lesní (Pinus sylvestris), smrk ztepilý (Picea abies), bříza bělokorá (Betula pendula) a topol osika (Populus tremula). Kromě toho se zkoumá také borovice montereyská (Pinus radiata), jasan ztepilý (Fraxinus excelsior), modřín sibiřský (Larix sibirica), olše lepkavá (Alnus glutinosa), buk lesní (Fagus silvativa) a eukalyptus. Existují rozdíly mezi druhy dřeva, pokud jde o roční růst, buňky, póry, počet chemických složek atd. Navíc odlišné druhy mají například různé vlastnosti délky vlákna, měkké dřeviny mají širokou rozmanitost v délce vlákna ve srovnání s tvrdými dřevinami, které mají průměrně mnohem kratší délku vláken a menší rozptyl **(**ThermoWood® Handbook, 2003**).**

3.4 Struktura a vlastnosti termicky modifikovaného dřeva

Dřevo má komplikovanou strukturu, skládá se z různých typů buněk - tracheidy, cévy, libriformní vlákna, parenchymatické buňky, aj.. Buňky jsou orientované obyčejně rovnoběžně s osou kmene stromu. Buněčné stěny jsou tvořeny z celulózy (40-50%), hemicelulóz (15-30%) a ligninu (20-30%) (Hill, 2006). Nejméně odolné termickému rozkladu jsou hemicelulózy, které se rozkládají při teplotách 170-240°C (Kačíková, Kačík, 2011). Celulóza degraduje při vyšší teplotě. Amorfní část celulózy je náchylnější k termické degradaci a pravděpodobně vykazuje podobné vlastnosti jako hexózové složky hemicelulóz. Krystalická část celulózy se odbourává v rozmezí 300-340°C (Hill, 2006). Ztráta polysacharidů vede ke zvýšení obsahu ligninu. Obecně se připouští, že lignin je nejvíce termicky stabilní (ThermoWood® Handbook, 2003), nepatrně se odbourává i pod hranicí 300°C, ale výrazněji až nad hranicí 300-400°C (Reinprecht, Vidholdová, 2008). Změna vlastností je proto způsobena právě degradací hemicelulóz. Dřevo obsahuje také malé množství extraktiv. Do této skupiny patří například terpeny, tuky, vosky a fenolické látky. Extraktiva nejsou základními prvky dřeva a většina z nich se v průběhu termického zpracování odpařuje (ThermoWood® Handbook, 2003).

3.4.1 Vliv termické modifikace na mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva

Mechanické vlastnosti se ve většině případů zhoršují (rázová houževnatost, pevnost, tvrdost), ale některé se mohou zlepšit (modul pružnosti a případně i tvrdost). Rázová houževnatost a pevnost dřeva klesá při dlouhodobějším působením teplot přes 160°C (Reinprecht, Vidholdová, 2008).

Pevnost, tvrdost a rázová houževnatost - při nižších teplotách termické modifikace se pevnost závažně nesnižuje (ThermoWood® Handbook, 2003). Pokles těchto vlastností závisí na stupni narušení jeho stavebních polymerů, které nastávají hlavně v oblasti hemicelulóz. Změny mechanických vlastností termicky modifikovaného dřeva jsou nejvíce ovlivněny výškou použité teploty. Přičemž platí, že čím větší je teplota, tím výraznější je snížení vlastností dřeva. Pro většinu výrobků ze dřeva je nepřijatelné, aby jejich vlastnosti příliš klesly, proto pokud je použit tvrdší způsob termické modifikace, zajišťují se:

- dlouhodobě nepřekročit teplotu 220°C a současně omezit přístup vzduchu
- když teplota dlouhodobě překročí hranici 220°C, musí se ohřev ukončit za nepřítomnosti kyslíku. Při překročení této hranice platí, že termicky modifikované dřevo se nesmí používat na nosné konstrukce (Bemgtsoona kol., 2006).

Ohybová pevnost, tahová a tlaková pevnost - při teplotě 155°C klesne ohybová pevnost o 20% asi za 3 dny, při teplotě 135°C asi za 2 týdny a při teplotě 220°C za 5 hodin (Tabulka č. 1. a 2.). Tahová pevnost vlivem vysokých teplot také klesá. Naopak tlaková pevnost podél vláken se víceméně nemění a v určitých případech se může i zvýšit (Reinprecht, Vidholdová, 2008).

Modul pružnosti - modul pružnosti se většinou vlivem ohřevu dočasně zvýší a začne klesat až tehdy, když dochází k zjevnějším úbytkům hmotnosti dřeva pod 6 až 8%. Ovšem při ohřevu dřeva s podílem agresivních chemikálií se modul pružnosti snižuje ve většině případů okamžitě (Kretschmann, Alden, Verill, 1997). Při působením vyšších teplot nad 160-190°C se modul pružnosti obyčejně také snižuje.

3.4.2 Vliv termické modifikace na vlastnosti termicky modifikovaného dřeva

Hygroskopicita - hygroskopicita se vlivem termické modifikace snižuje (Jämsä, Ahola, Viitaniemi, 2000). Hygroskopicita ovlivňuje ostatní vlastnosti dřeva, nejvíce rozměrovou stabilitu a odolnost vůči biologickým činitelům. Hygroskopicita je schopnost dřeva přijímat vodu z okolního prostředí a naopak odevzdávat do okolního prostředí.
Pokles hygroskopicity lze zdůvodnit:

- odbouráním určitého podílu hemicelulóz,
- odbouráním anebo prostorovou blokací -OH skupin,
- migrací a distribucí hydrofobních skupin (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Rozměrová stálost - rozměrové změny se v porovnání s termicky nemodifikovaným dřevem snižují dokonce až o 80-90%, závisí to hlavně na stupni termického zpracování (Tabulka č. 1. a 2.). Snížená je také schopnost bobtnání a sesychání. Kroucení, prohnutí a jiné deformace se také snižují v porovnání s běžně sušeným dřevem v sušárnách (ThermoWood® Handbook, 2003). Rozměrová stabilita lze zdůvodnit odbouráním hemicelulóz (Hill, 2006).

Hustota - při termické modifikaci se sice zmenšuje, ale méně než hmotnost. Bylo také popsáno, že vlivem vznikajících napětí v tangenciálním a radiálním směru se někdy může podélný rozměr nepatrně zvětšit (Hill, 2006).

Barva a vůně - termicky modifikované dřevo má svou charakteristickou vůni i barvu, hlavně změna barvy je pro termicky modifikované dřevo charakteristická (Tabulka č. 1. a 2.), (Kvietková a kol., 2015). Termicky modifikované dřevo získává tmavší barvu, přičemž čím vyšší teplota termické modifikace, tím tmavší je barva modifikovaného dřeva. Barva se často podobá tropickým dřevinám (Reinprecht, 2008).

Akustické vlastnosti - akustické vlastnosti jsou zajímavé hlavně pro hudební nástroje, které se dají získat při mírnější termické modifikaci. Akustické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva se podobají historickým hudebním nástrojům, to se využívá především při restaurování. Důležitým faktorem pro restaurování je také rozměrová stabilita (Reinprecht, Vidholdová, 2008).

Biologická odolnost - testy biologické odolnosti byli provedeny CTBA ve Francii. Z dřevokazného hmyzu vybrali červotoče proužkovaného (Anobium punctatum) a hrbohlava hnědého (Lyctus bruneu). Ukázali že ThermoWood® je odolný vůči oběma druhům. Zejména vlivem odbourání určitého podílu hemicelulóz, které jsou důležité pro dřevokazné houby i hmyz. Zkoušky na univerzitě Kuopio dokazují, že ThermoWood® má dobrou odolnost vůči tesaříkovitým broukům (ThermoWood® Handbook, 2003). Zvýšení odolnosti vůči biologickým činitelům se připisuje následujícím faktorům:

-snížením podílu -OH funkčních skupin, tím se snižuje jednak sorpční schopnost dřeva, to zabraňuje vytvoření optimální vlhkosti pro dřevokazný hmyz a jednak se mění i podmínky pro difúzi enzymů i nízkomolekulových katalyzátorů produkovaných dřevokaznými houbami (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

- odbouráním hemicelulóz, které jsou pro biologické škůdce nejpřípustnější

- vytvořením látek s biocidním účinkem. Jak z původních extraktiv, tak i z termicky degradovaných složek dřeva (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Další kapitola se věnuje problematice frézování, a to hlavně z toho důvodu, protože měření energetické náročnosti termicky modifikovaných vzorků probíhalo na spodní svislé frézce, která se řadí do frézovacích dřevoobráběcích strojů.

4 Frézování

4.1 Charakteristika frézování

Frézováním nazýváme obrábění otáčejícím se nástrojem (frézou, frézovací hlavou apod.), kde se nominální tloušťka třísky mění od nuly do maxima a posuv je ve směru kolmém k ose otáčení nástroje. Tento způsob volíme za účelem dosažení hladkého povrchu a přesných rozměrů výrobku. Volba druhu a následná údržba nástroje (frézy) je neméně důležitá, a proto je potřeba jí věnovat zvýšenou pozornost (Barcík a kol., 2013).

4.2 Popis frézování

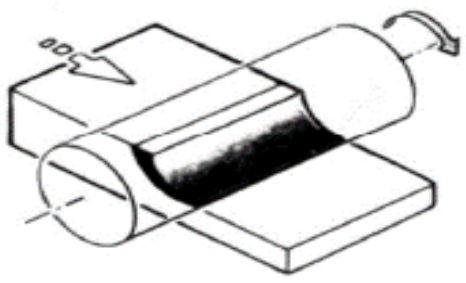
Frézování je proces třískového obrábění, při kterém je tloušťka materiálu odebírána z obrobku ve formě třísek (Kubš, Barcík, 2014). Hlavní pohyb při procesu koná fréza, která se otáčí kolem své osy a postupně se zařezává do materiálu svými zuby, které má umístěné po obvodě. Vedlejší pohyb při procesu koná samotný obrobek, který je posouván proti otáčející se fréze. Známe také případy, kde oba pohyby koná fréza, například při obrábění horní ruční frézkou (Lisičan, 1988).

4.3 Metody frézování

Z hlediska rozdělení frézování podle metod můžeme frézování rozdělit na základě toho, která část frézy obrábí materiál (Mikolášik, 1981).

4.3.1 Válcové frézování

Nástrojem při válcovém frézování (Obrázek č. 1.) je válcová fréza, případně tvarová fréza, u které je osa otáčení rovnoběžná s obráběnou plochou (Barcík a kol., 2013).

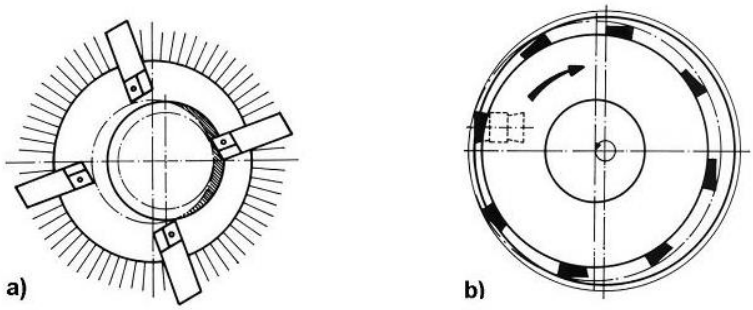


Obrázek č. 1. Válcové frézování

(Barcík, 2009)

4.3.2 Okružní frézování

Nástrojem při okružním frézování (Obrázek č. 2.) je frézovací hlava osazená noži. Využívá se při obrábění tyčí a při výrobě závitů. Při obrábění tyčí koná frézovací hlava většinou rotační i posuvný pohyb, při řezání závitů jen pohyb rotační (Barcík a kol., 2013).



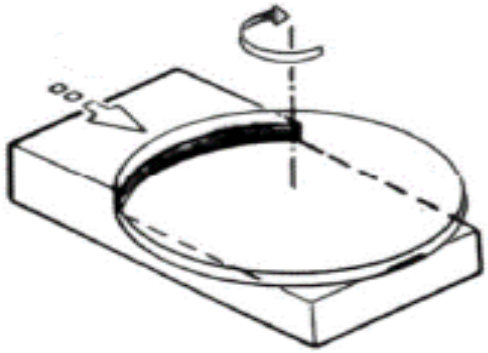
Obrázek č. 2. Okružní frézování

(https://docplayer.cz/docs-images/40/7908232/images/page_18.jpg, 12.8.2018)

a) okružní frézování vnější, b) okružní frézování vnitřní.

4.3.3 Čelní frézování

Při čelním frézování (Obrázek č. 3.) je nástrojem čelní fréza, která má řezné hrany na obvodu i na čele. Osa otáčení frézy je kolmá k obráběnému povrchu a jednotlivé břity opisují válcovou plochu. Břity umístěné po obvodu frézy pracují na principu válcového frézování, přibližně kolmo ke směru dřevních vláken. Břity umístěné na čele jsou rovnoběžné s obrobeným povrchem. Tloušťka třísky se zvyšuje od nuly směrem ke středu odebrané vrstvy a zmenšuje se na výstupu břitů z obrobku (Prokeš, 1982).



Obrázek č. 3. Čelní frézování

(Barcík, 2009)

4.3.4 Planetové frézování

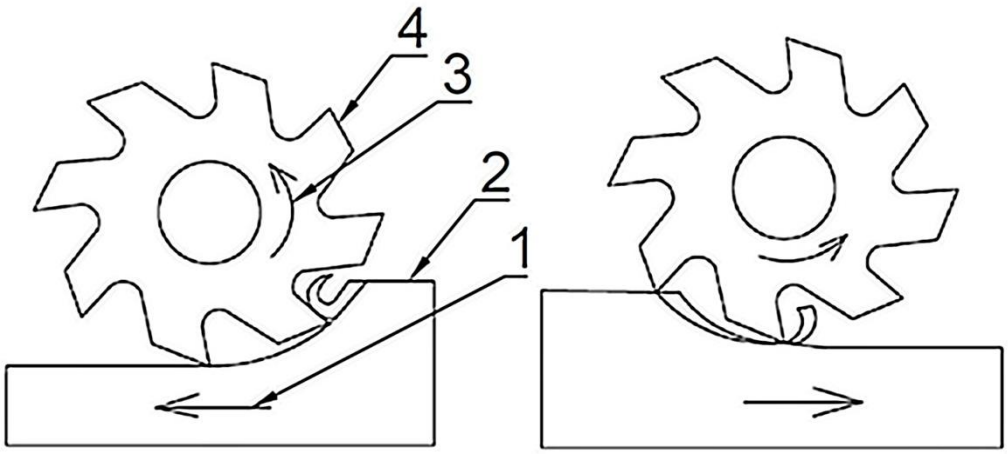
Tato metoda je realizovaná na obráběcích centrech a počítačově řízených strojích. Pohyb frézy je řízený po kružnici, proto můžeme obrábět části nebo celé rotační plochy. Takto se frézují kruhová zaoblení a venkovní válcové výstupky (Barcík a kol., 2013).

4.4 Rozdělení podle vzájemného pohybu nástroje a obrobku

Z hlediska pohybu obrobku vzhledem k otáčkám nástroje dělíme frézování na sousledné a nesousledné (Obrázek č. 4.).

a) frézování sousledné – nástroj se otáčí ve směru posuvu obrobku. Průřez odebrané třísky narůstá na maximální hodnotu a následně postupně klesá na nulovou hodnotu. Obrobená plocha se vytváří, když zub frézy vychází ze záběru. Složka řezné síly působí směrem dolů a pomáhají tak upnutí obrobku ke stolu frézky a kvalita frézování je vyšší než u frézování nesousledného. Podmínkou sousledného frézování je vymezovací vůle mezi šroubem a maticí. Jinak by vznikaly velké rázy a mohlo by dojít k poškození stroje i nástroje.

b) frézování nesousledné – nástroj se otáčí proti směru posuvu obrobku. Průřez odebrané třísky postupně narůstá z nulové hodnoty do maximální. K odříznutí třísky dochází až po určitém skluzu řezné hrany po ploše vytvořené předcházejícím záběrem zubu. Toto způsobuje vyšší silové účinky a deformace a to má za následek zvýšené opotřebení řezné hrany. Složka řezné síly směřuje směrem nahoru a tím odtahuje obrobek od stolu frézky. To má za následek zhoršení kvality frézovaného povrchu (Kvietková, 2015).



Obrázek č. 4. Frézování nesousledné a sousledné

(Barcík a kol., 2013)

1. směr posuvu, 2. obrobek, 3. směr řezného pohybu, 4. fréza.

4.5 Rozdělení frézování podle tvaru hotového výrobku

Barcík a kol., 2013 rozděluje frézování podle tvaru hotového výrobku na:

a) rovinné – tloušťkování, srovnávání a čtyřstranné frézování,

b) objemové – kopírovací frézování,

c) tvarové frézování.

4.6 Rozdělení fréz

Dále Barcík a kol., 2013 rozděluje frézy následovně:

Podle celkového provedení

a) celistvé- buď s otvorem nebo se stopkou,

b) s upnutými noži nebo zuby - nožové hřídele, hlavy, kotouče,

c) dělené - složené většinou ze dvou a více kotoučových fréz,

d) složené.

Podle umístění břitů

a) válcové – s břitem umístěným na válcové ploše,

b) kuželové – s břitem umístěným jen na kuželové ploše,

c) čelní – s břity umístěnými na čelní ploše,

d) tvarové – různé kombinace výše uvedených typů.

Podle počtu břitů

a) s jedním břitem,

b) s více břity.

Podle způsobu otáčení frézy

a) pravořezné – nástroj se otáčí ve směru hodinových ručiček,

b) levořezné – nástroj se otáčí proti směru hodinových ručiček.

c) frézy souměrné a korunkové – mohou se použít při 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 technologického hlediska

a) frézy pro frézování rovinných ploch,

b) frézy pro frézování tvarových ploch,

c) kopírovací frézy.

Druhy fréz

Frézy můžeme dělit z hlediska tvaru na kotoučové, stopkové a čelní.

a) Kotoučové frézy

Kotoučové frézy jsou nástroje používané na frézování drážek, polodrážek a profilů. Vyrábějí se nejčastěji s frézovaným nebo podsoustruženým hřbetem. Správné provedení podsoustružení zajišťuje stálost profilu během celé doby životnosti (Kvietková, 2015).

Materiál na výrobu kotoučových fréz:

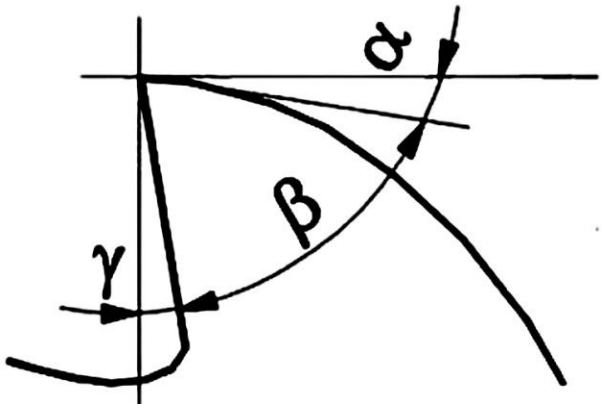
Kotoučové frézy se v současné době vyrábějí převážně z nástrojové oceli třídy 19, konkrétně 19 083, 19 733, 19 436, o tvrdosti HRC 50 – 60. U nástrojů z tohoto materiálu se pohybuje otupení v rozmezí 29 – 35 μm. Toto otupení se při nesprávném zacházení s kotoučovými frézami (nesprávné ostření, tepelné úpravy) může zvýšit až o 300 % při obrobení stejného množství dřevní suroviny. Rozlišujeme tři skupiny materiálu na výrobu fréz:

a) uhlíkaté nástrojové oceli – ostří se zahřívá na 250 °C, označení např.: U 8 A (U - uhlík, 8 - % uhlíku, A – vysoko jakostní),

b) slitinové (legované) oceli – ohřev je do 350 °C, obsahují přídavné prvky (chrom, dusík, titan, vanad),

c) slinuté karbidy (SK) – ohřev do 900 °C, spékaný kov wolfram + titan.

Broušení - ostří se jen z čela, z toho důvodu aby byl po celou dobu životnosti nástroje konstantní úhel a správná geometrie ostří (Obrázek č. 5.), (Barcík a kol., 2013).



Obrázek č. 5. Geometrie ostří

(Kvietková, 2015)

α) úhel hřbetu - úhel uzavírá řezný povrch a hřbetová plocha (10°-15°), β) úhel břitu - úhel uzavírá čelní plocha a plocha řezu (60°-70°), γ) úhel čela - úhel uzavírá čelní plocha a rovina kolmá na obrobenou plochu (20°-30°).

b) Stopkové frézy

Stopkové frézy jsou nástroje otáčející se kolem své vlastní osy. Na rozdíl od kotoučových fréz nemají upevňovací otvor, ale upevňování se provádí pomocí sklíčidla, do kterého se upne stopka nástroje.

Tyto frézy se nejčastěji používají na frézování drážek, polodrážek, k frézování rybin, na tvarové frézování čelních a bočních ploch (Barcík a kol., 2013).

Rybinová fréza:

Zvláštním případem stopkových fréz jsou rybinové frézy. Na čelní části rybinové frézy jsou někdy frézy opatřené pilovými předřezávači, které jsou o 0,5 mm větší než je průměr frézy. Čela frézy jsou skloněná pod úhlem 2°k ose otáčení, z toho důvodu aby bylo menší tření o obrobek. Úhel hřbetu se pohybuje v rozmezí 10° – 15°, úhel břitu 45° – 60°, úhel čela 20° – 30°, frézy se vyrábějí s válcovou stopkou popřípadě se závitem (Barcík a kol., 2013).

c) Čelní fréza

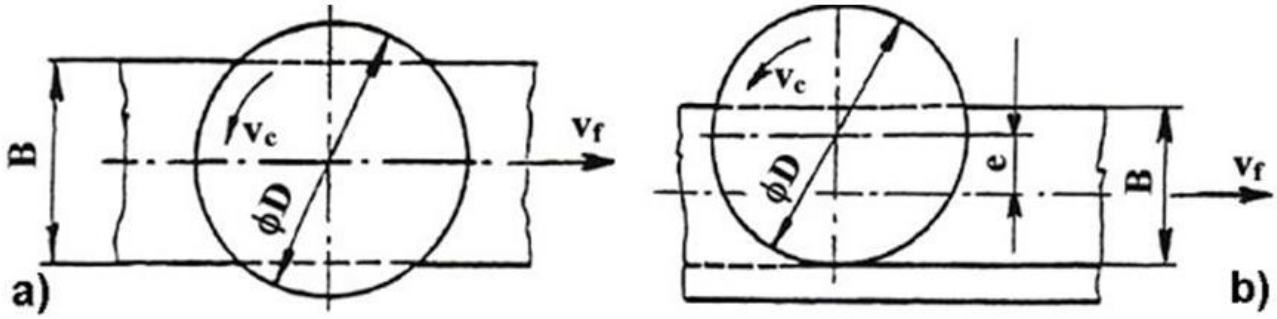
Tento nástroj, jak už jeho název napovídá, je určen pro čelní frézování (Obrázek č. 6.). Při tomto druhu frézování je materiál odebírán nejen břity na obvodu, ale i břity na čele nástroje. Osa otáčení nástroje je kolmá k obráběnému povrchu. Břity opisují válcovou plochu, přičemž boční břity pracují na principu válcového frézování, které je prováděno přibližně ve směru dřevních vláken. Čelní břity jsou zatím 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, z toho důvodu, že je v záběru současně více zubů.

Při čelním frézování nevzniká chvění, to je zapříčiněno tím, že chod stroje je rovnoměrný a plynulý (Kvietková, 2015).

Rozdělení frézování podle symetrie:

a) symetrické frézování,

b) nesymetrické frézování.



Obrázek č. 6. Schéma čelního frézování

(http://slideplayer.cz/slide/2597287/9/images/5/%C4%8Celn%C3%AD+fr%C3%A9zov%C3%A1n%C3%AD, 13.10.2018)

D - průměr frézy, v_c - řezná rychlost, v_f - rychlost posuvu.

4.7 Rozdělení rovinných frézek

Na rovinných frézkách se obrábí drsný povrch obrobku a vytváří se tím povrch hladký a rovný. Obecně frézky můžeme rozdělit na rovinné a tvarové. Má bakalářská práce se zabývá pouze rovinnými frézkami a to z toho důvodu, že byl tento druh použit ke měření.

4.7.1 Svislé frézky

Svislé frézky se používají k výrobě drážek, žlábků a profilů i pro zhotovování konstrukčních spojů. Řezný pohyb je zde rotační a obrobek je zpravidla přiváděn k nástroji, přičemž může být posuv manuální nebo pomocí podavače.

Svislé frézky se dělí na - svislé spodní frézky,
- svislé horní frézky.

Svislé spodní frézky:

Měření mé bakalářské práce probíhalo na této frézce osazenou frézovací hlavou. Svislá spodní frézka (Obrázek č. 8.) je tvořena stojanem, na kterém je umístěno vřeteno s hnacím agregátem. Pracovní stůl je pevně spojen se stojanem a je opatřen otvorem pro vřeteno. Otvor se pomocí vsazovacích kroužků upravuje na určitý průměr nástroje. Na pracovním stole je upevněné pravítko pomocí upínacích šroubů, které slouží k vedení obrobku do řezu.

Obrázek č. 7. Trn frézky

(https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQf1WswGm-bT-_5qzS_kOJn97WsOUZXeex1-3JiQWYR3yMe5DTR, 14.12.2018)

Vřeteno frézky (Obrázek č. 7.) je výškově nastavitelné a může být naklápěcí. Naklápění a výškové nastavení se provádí ručním kolečkem nebo elektromotoricky. Naklápění bývá 45° dopředu a 5° dozadu. Přes kuželovou stopku s přesuvnou maticí je trn frézky spojen s vřetenem frézky. Frézovací nástroje se na trn frézky upevňují pomocí matice trnu a mezikroužků. Z důvodu rozmanitosti fréz musí být frézky nastavitelné z hlediska otáček (Nutscha kol., 2006).

Obrázek č. 8. Svislá spodní frézka

(https://www.simek.eu/svisla-stolni-frezka-t-270/, 28.2.2019)

Konstrukce fréz:

Podle konstrukce dělí Nutsch a kol., 2006 frézy na frézovací hlavy, frézy celistvé, se vsazenými zuby a složené.

c) frézovací hlava (složená fréza)

Měření mé bakalářské práce probíhalo pomocí frézovací hlavy (Obrázek č. 9.). Ta je tvořena z několika vzájemně rozebíratelných částí. Nosná část břitů je vyměnitelně spojena s tělem frézy. Největší výhodou těchto fréz je ta, že se dají různě přestavovat. Břity jsou upevněny tvarovým stykem, tzn. neúmyslné uvolnění části s břity, není možné. Tato konstrukce je vhodná pro nastavitelné drážkovací frézy, šikmé frézy, čepovací kotouče, polodrážkovací, hoblovací, profilovací a otočné nožové hlavy.

Obrázek č. 9. Frézovací hlava (složená fréza)

(https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/14882/content_uni_hlava.jpg, 14.12.2018)

Kromě frézovací hlavy, která je zmíněna výše rozeznáváme dále další frézy důležité pro praxi.

a) celistvé frézy

Břity a tělo nástroje je z jednoho materiálu. Tyto frézy (Obrázek č. 10.) se používají jen v některých případech, a to protože břity nástroje po ostření mění svůj tvar a také mají malou životnost.

Obrázek č. 10. Celistvá kotoučová fréza

https://www.mt-nastroje.cz/Freza-DIN1880-nastrcna-hrubozuba-HSSCo5-D63-d14059.htm (4.4.2019)

b) frézy se vsazenými zuby

Fréza se vsazenými zuby (Obrázek č. 11.) je tvořena tělem nástroje, na kterém jsou osazeny nerozebíratelným způsobem břity z tvrdého materiálu. Nejčastěji se jako materiál břitů používají slinuté karbidy, rychlořezná ocel, stelity nebo polykrystalický drahokam. Tato konstrukce je vhodná na drážkovací frézy, vyduté a vypouklé frézy, nepřestavitelné šikmé frézy a zplošťovací frézy.

Obrázek č. 11. Fréza se vsazenými zuby

(https://webmiumeshopblob.azureedge.net/eshops/9922/product-primary/6e41c8cc-b85e-46a0-9c27-73b1eb3be903_lrg.jpg, 14.12.2018)

d) sada fréz

Skládá se z několika společně upnutých nástrojů (Obrázek č. 12.). Používají se zde kombinace výše zmíněných typů konstrukcí. Povolené otáčky se zde určují podle jednotlivých fréz a to podle frézy s nejnižšími povolenými otáčkami. Sady fréz se používají například při výrobě oken nebo při výrobě palubek.

Obrázek č. 12. Sada fréz

(https://webmiumeshopblob.azureedge.net/eshops/9922/product-primary/a70dbb92-9960-48e5-af68-730ffb8b376c_lrg.jpg, 14.12.2018)

Svislé horní frézky:

Dalším druhem svislých frézek jsou svislé horní frézky, které se používají na výrobu drážek a svlaků, na frézování tvarů pomocí šablon a na frézování ornamentů do ploch obrobků.

Stroj je tvořen stojanem, na kterém je umístěn výškově nastavitelný a otočný suport. Pracovní stůl se do pracovní polohy uvádí buď pneumaticky, nebo pomocí nožní páky. Obrobek se opracovává pomocí šablony a vodícího kolíku, který je zapuštěný do pracovního stroje nebo pomocí nastavitelného vodícího pravítka. Motor frézky je umístěn nad pracovním strojem a pohon probíhá přímo. Protože nástroje pracují při velikých otáčkách (12 000 - 24 000 za minutu), používají se hnací motory s měniči kmitočtu.

Jako nástroj se u horních svislých frézek používají jednobřité nebo vícebřité nástroje tzv. stopkové frézy. Jednobřité frézy se upínají do excentrického sklíčidla a vícebřité frézy se upínají do centrického sklíčidla (Nutsch a kol., 2006).

Kromě svislé horní frézky, která byla použita pro měření mé bakalářské práce, rozeznáváme další stroje, které jsou v praxi neméně důležité, a to srovnávací, tloušťkovací a vícestranné frézky popsané v následujících podkapitolách.

4.7.2 Srovnávací frézka

Srovnávací frézka se používá k srovnávání fošen, prken, hranolů, atd., frézování ploch a bočních ploch do úhlu a k srážení hran.

Konstrukce je tvořena stojanem stroje, ve kterém je umístěn nožový hřídel. Na stojanu jsou upevněny dva pracovní stoly, přední a zadní stůl. Na stolech je umístěné vodící pravítko, které slouží jako boční vedení při frézování. Jako ochrana před dotykem je srovnávací frézka vybavena krytem nožové hřídele, který zakrývá nožovou hřídel v prostoru před ní i za ní. Součástí krytu je pružinový mechanismus, který uvolní pouze potřebnou část nožové hřídele před pravítkem a po obrobení obrobku se opět uzavře (Nutsch a kol., 2006).

4.7.3 Tloušťkovací frézka

Tloušťkovací frézka se používá na frézování (hoblování) fošen, prken, hranolů atd. na tloušťku popřípadě na šířku. Zpravidla se před operací tloušťkování provádí operace srovnávání na srovnávací frézce.

Stroj je tvořen ovládacími prvky, stojanem stroje, ve kterém je umístěná nožová hřídel, posuvné zařízení a hnací motor. Ve stojanu je umístěn pracovní stůl, který je umístěn na několika šroubových vřetenech. Nastavované rozměry jsou zobrazeny na stupnici nebo digitálně. Oproti srovnávací frézce se zde nožová hřídel výškově nepohybuje a je umístěna nad pracovním stolem. Posuvné zařízení je tvořeno podávacím a odebíracím válcem. Srovnávací frézka je dále vybavena patkou proti zpětnému vrhu a to z toho důvodu, protože nožová hřídel působí silou proti obsluze, která před strojem vkládá obráběný materiál (Nutsch a kol., 2006).

4.7.4 Vícestranná frézka

Vícestrannou frézkou se provádí více operací současně. Obrobek je přiváděn transportními válečky na obráběcí vřetena. Vřetena umožňují obrábět všechny podélné plochy obrobku. Při použití frézovacích nástrojů stroj umožňuje navíc profilování ohoblované plochy. Nastavení agregátu na příslušný tvar probíhá elektromotoricky. Z důvodů požadavku vysoké kvality obrobeného povrchu se někdy nepoužívají mechanické podavače, ale používají se podavače, které pracují na hydraulickém upnutí obrobku.

Při vícestranném frézování je celý stroj zcela uzavřen krytem. To usnadňuje odsávání třísek a redukuje hluk (Nutsch a kol., 2006).

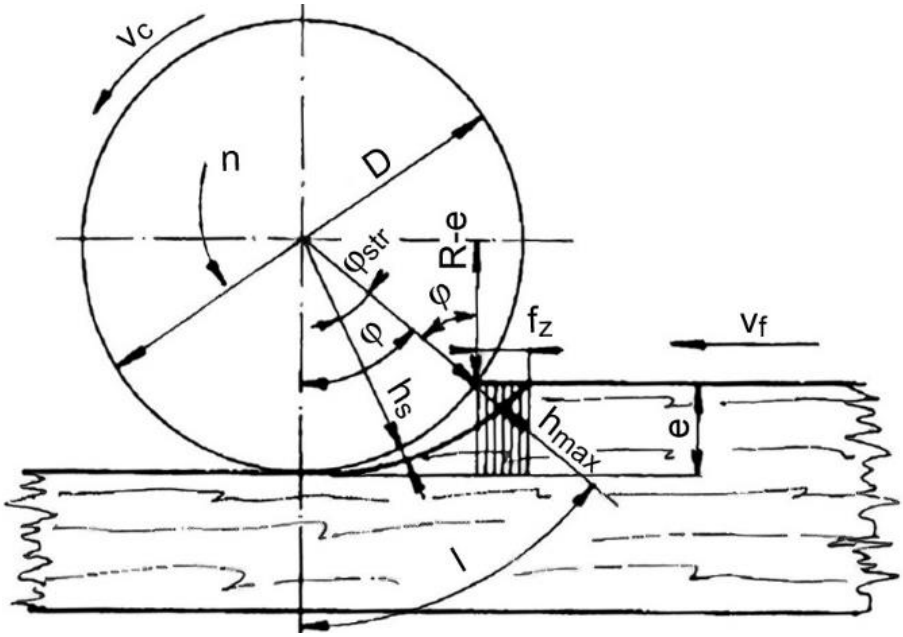
V praxi je velice důležité určení správných řezných podmínek. Proto se v další podkapitole věnuji kinematice frézování.

4.8 Kinematika frézování

Řeznými podmínkami definujeme všechny činitele působící v průběhu frézování. Snažíme se o docílení co nejoptimálnějších neboli nejproduktivnějších podmínek. Z toho důvodu je potřebné znát jednotlivé podmínky obrábění a jejich vzájemné působení mezi sebou. Kinematiku frézování znázorňuje Obrázek č. 13..

Mezi základní podmínky patří řezná rychlost, posuvná rychlost a hloubka řezu. Mimo základní řezné podmínky však značným způsobem ovlivňuje průběh frézování také řezný materiál, druh obráběného materiálu, geometrie nástroje, tvar a průřez třísky, chlazení a mazání (Prokeš, 1978).

Při konstantní řezné rychlosti i podávací rychlosti má pohyb řezné hrany cykloidní tvar. Řezná rychlost jev poměru k rychlosti posuvu mnohonásobně vyšší, proto můžeme s dostatečnou přesností předpokládat, že na úseku záběru jednoho řezného klínu bude řezná dráha odpovídat kružnici. Řezný klín je během jedné otáčky v záběru na délku oblouku l, který odpovídá střednímu úhlu φ + φ'. Úhel φ' je velmi malý, proto se při výpočtu délky třísky l většinou uvažuje úhel φ (Kvietková, 2015). V praxi se však skutečný průřez třísky od nominálního průřezu může lišit, to hlavně vlivem otupení břitu, nebo nepřesnosti chodu vřetena (Prokeš, 1982).



Obrázek č. 13. Kinematický model frézování

(Kvietková, 2015)

Řezná rychlost

Je to rychlost řezného pohybu a udává se v metrech za sekundu. V praxi se zjednodušeně počítá jako obvodová rychlost bodů ostří umístěných na obvodu nástroje (Lisičan, 1988).

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

v_c - řezná rychlost [m/s], D - průměr frézy [mm], n - počet otáček frézovacího nástroje [ot/min].

Na základě řezných norem je třeba nejprve určit optimální řeznou rychlost a následně vypočítat potřebné otáčky. Vypočítané otáčky následně nastavíme na frézce, pokud nebudeme schopni nastavit přesné otáčky, nastavíme nejbližší nižší. Optimální otáčky se pohybují v rozmezí 30 - 45 m/min (Lisičan, 1988).

Posuvná rychlost

Je to dráha udávaná v milimetrech, kterou při pohybu do záběru urazí za 1 minutu, případně otáčku. Při zvětšování posuvu roste řezný odpor. V tomto případě nezáleží na jiných vlivech.

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

v_f- posuvná rychlost [mm/min], f - posuv na otáčku [mm], n - počet otáček frézovacího nástroje [ot/min], z - počet řezných hran frézy (Kvietková, 2015).

Z hlediska směru pohybu může být posuv:

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

Posuv může být:

- plynulý, ten probíhá současně s hlavním pohybem,

- po přítrzích, při tomto způsobu obrobek nebo nástroj vykonává posuvný pohyb v jedné době, v níž se hlavní pohyb nekoná (Prokeš, 1965 a 1978).

Teoretická délka třísky

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

D - průměr řezné kružnice [mm], R- poloměr řezné kružnice [mm], φ - úhel styku dřevních vláken s nástrojem [°], φ' - posunutý úhel styku dřevních vláken [°] (Kvietková, 2015).

Teoretická střední tloušťka třísky

$$h_s = \frac{f_z.\mathrm{e}}{L} \approx \frac{\mathrm{F}_z.\mathrm{e}}{\sqrt{e \cdot D}} \approx \frac{f_z \cdot 1000}{n \cdot z} \quad \text{[mm]} \qquad (4)$$

D -průměr řezné kružnice [mm], e - tloušťka odebrané třísky [mm], f_z - posuv na zub [mm/zub],n - počet otáček frézovacího nástroje [ot/min],z - počet řezných hran frézy (Kvietková, 2015).

Posuv na řeznou hranu frézy (posuv na zub)

$$f_z = \frac{v_f \cdot 1000}{n \cdot z} \quad \text{[mm]} \qquad (5)$$

v_f - posuvná rychlost [m/min], n - počet otáček frézovacího nástroje [ot/min],z - počet řezných hran frézy (Kvietková, 2015).

Další faktory ovlivňující proces frézování

Hloubka řezu (h) [mm] -měří se jako vzdálenost mezi obrobenou a obráběnou plochou ve směru posuvu. Popřípadě se měří na obrobeném materiálu (Barcík, 2009).
Druh obráběného materiálu- je určen třídou obrobitelnosti. Obrobitelnost je stanovena na základě materiálu, druhu a způsobu obrábění (Lisičan 1988).

Řezný materiál - Při použití kvalitnějších řezných materiálů jsme schopni obrábět vyššími řeznými rychlostmi a nezkrátíme tím životnost nástroje.

Geometrie řezného nástroje - značně ovlivňuje jednak kvalitu opracovaného povrchu, tak i rozměrovou a tvarovou přesnost obráběného dílce (Barcík, 2009).

Optimální podmínky - z ekonomického hlediska volíme řezné podmínky tak, abychom daný dílec opracovávali s co nejmenšími náklady a s co nejvyšší produktivitou. Přičemž musíme zajistit technologické a konstrukční požadavky.

Další podkapitola se věnuje energetické náročnosti, která byla jedním z cílů bakalářské práce, nezbytná pro část metodiky a také se nemůže opomenout její důležitost u procesu obrábění.

4.9 Energetická náročnost procesu frézování

Energetická náročnost je velmi důležitá při každém zpracování dřevní suroviny, kde je použito strojní zařízení. To hlavně z toho důvodu, že spotřeba energie se promítne do výsledné ceny produktu, proto se snažíme dosáhnout co nejoptimálnějších podmínek spotřeby energie, to se ale nesmí promítnout na kvalitě výrobku.

Energetická náročnost je ovlivněna mnoha faktory, jako například materiálem (hustota, tloušťka), nástrojem (úhel čela, materiál) a způsobem obrábění (řezná rychlost, podávací rychlost a úběr materiálu), (Stewart, 1984).

Řezný výkon a příkon

Při hodnocení dřevoobráběcích strojů rozlišujeme výkon a příkon. Řezný výkon P_c je důležitý k vyvození řezné síly, potřebné k oddělení třísky od obráběného materiálu. Dá se také říct, že je to množství práce vydané za jednu sekundu. Příkon motoru P_p se definuje jako součin napětí, proudu a účinku cos φ (výkon odebraný ze sítě elektrického napětí). Příkon potřebujeme znát pro výpočty energetických nákladů, nebo na navržení elektrické sítě (Barcík a Homola, 2004).

Dále při měření rozeznáváme dva druhy příkonu. Zaprvé příkon elektromotoru při volnoběhu P_{PO}, ten naměříme za chodu stroje bez průchodu materiálu a za druhé příkon motoru při technologické operaci P_{PR}, který naměříme za chodu stroje při průchodu materiálu. Když známe oba druhy, můžeme řezný výkon vypočítat ze vzorce (6), (Barcík, Homola, 2004, Kminiak, 2007).

$$P_c = \frac{P_{PR} - P_{PO}}{\eta_c} \qquad P_c = \frac{A_c}{T} \qquad \text{[W]} \qquad (6)$$

P_c - řezný výkon [W], P_{PR} - výkon při chodu stroje za průchodu materiálu [W], P_{PO} - výkon při chodu stroje bez průchodu materiálem [W], η_c - celková účinnost dřevoobráběcího stroje [-].

Řezný příkon můžeme definovat podle vzorce (7), (Peschel, 2002).

$$P_p = U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad [W] \qquad (7)$$

P_p - řezný příkon [W], U - elektrické napětí [V], I - elektrický proud [A], $\cos\varphi$ - účiník [-].

Řezná síla

Pokud známe řezný výkon, můžeme zjistit řeznou sílu podle vzorce (8), (Lisičan, 1986).

$$F_c = \frac{P_c}{v_c} \quad [N] \qquad (8)$$

F_c - řezná síla, P_c - řezný výkon[W], v_c - řezná rychlost [m/s].

Řezná práce

Výslednou hodnotu práce na odebrání materiálu můžeme složit ze dvou veličin. Z práce potřebné na řezání a z práce potřebné na posuv obrobku.

$$A_e = A_c + A_f \quad [J] \qquad (9)$$

A_e - celková práce[J], A_c - práce potřebná na řezání[J], A_f - práce potřebná na posuvu[J].

- práci potřebnou na řezání můžeme vypočítat ze vzorce (10).

$$A_c = \int_0^t F_c \cdot v_c \cdot dt \quad [J] \qquad (10)$$

A_c - práce potřebná na řezání[J], F_c - řezná síla[N], v_c - řezná rychlost[m/s].

- práci potřebnou na posuv můžeme vypočítat ze vzorce (11), (Peschel, 2002).

$$A_f = \int_0^t F_f \cdot v_f \cdot dt \quad [J] \qquad (11)$$

A_f - práce potřebná na posuv[J], F_f - řezná síla[N],v_f - posuvná rychlost [m/min].

V další kapitole se věnuji dřevině padouk, a to z toho důvodu, protože měřené vzorky byly z tohoto dřeva.

5 Padouk

Padouk patří do čeledi Leguminosae a jeho botanické názvy jsou: Pterocarpus soyauxii Taub., P. osun Craib., P. tinctorius Welw. Obchodně se česky nazývá padouk africký, červený padouk a korál africký.

Vyskytuje se roztroušeně v afrických dešťových rovníkových lesích od Nigérie, po celém Kamerunu a z Gabunu až do Angoly. Nejvíce v pobřežních oblastech Gabunu podél ramen Severní řeky a v Kongu Kins.

Strom dorůstá 35-40m, má tenké, dost vysoko zasahující kořenové náběhy. Kmen stromu je rovný a válcovitý. Průměrná tloušťka činí 70-100cm. Kůra je 5 - 8 mm tlustá a vláknitá. Je zbarvena do šedohněda a odlupuje se v úzkých tenkých podélných proužcích. Na záseku je kůra žlutorůžová a vylučuje latex.

Běl je bělavá a dobře odlišná, je bezcenná a odstraňuje se. Čerstvé jádrové dřevo je růžově korálové až svítivě červené. Na vzduchu a světle tmavne na červenohnědo-oranžovou. Struktura (Obrázek č. 14.) je středně jemná a hustá, rovnovlákná, ale častěji s pravidelnou střídavou točivostí vláken, to dodává dřevu jemné pruhování.

Dřevo je velmi odolné vůči plísním, středně odolné vůči termitům a imunní proti napadení ostatním hmyzem (Grün, 1971).

Původně se používal k extrakci barviva. Dnes se nejvíce používá na krájené dekorativní dýhy a intarzie. Ve formě řeziva se nejvíce využívá v interiéru, ale dá se použít i v exteriéru. Díky své barevné nestálosti se nehodí na místa vystavené UV záření. Dále se používá na karoserie automobilů, interiéry vagonů, lodí, na pažby, rukojetě. Díky své vysoké trvanlivosti ve styku s vodou a se zemí se osvědčil i na konstrukce (mosty), trvanlivé pražce (Wagenführ, 2007).

Obrázek č. 14. Textura

(https://www.mytropicaltimber.org/en/c/3/products/74/padouk-dafrique, 16.2.2019)

Fyzikální vlastnosti:

Hustota při 12...15% - 650...700...850kg/m^3

Hustota čerstvé kulatiny - 900-1000kg/m^3

Podíl pórů - 57%

Sesychání -délkové - 0,2%

- radiální - 2,4...3,6%

- tangenciální 4,1...8,2% (Wagenführ, 2007).

Bod nasycení vláken je 18%, málo pracuje (Grün, 1971).

Mechanické vlastnosti:

Pevnost v tlaku podél vláken - 62...75...81N/mm^2

Pevnost v tahu kolmo na vlákna - 1,9...3,5...5,7N/mm^2

Pevnost ve smyku- 7,3...8,5 N/mm^2

Rázová houževnatost - 4,5...8,5 J/cm^2

Tvrdost podél vláken - 29...39...47N/mm^2

Tvrdost kolmo na vlákna - 18...21...25N/mm^2

Pevnost v ohybu - 110...134...149 N/mm^2

Modul pružnosti - 10 000...16 600N/mm^2

Štípatelnost - 1,1...1,6N/mm^2 (Wagenführ, 2007).

6 Metodika

Výběr a příprava zkušebních vzorků

V metodice popisuji všechny stroje a nástroje, které byly použity na měření mé bakalářské práce a postupy, podle kterých jsem měřil.

Pracoval jsem se dřevinou padouk (Pterocarpus soyauxii). Nejdříve jsem podélným dělením a příčným zkracováním na formátovací pile zhotovil 64 vzorků o rozměrech 20*100*450 mm (hloubka*šířka*délka) v dílně dřevařského pavilonu FLD. Poté již byly vzorky připraveny na termickou modifikaci, která proběhla v Kostelci nad Černými lesy (Truba).

Před vstupem do termické komory jsem vzorky rozdělil do čtyř skupin podle stupně následné termické modifikace. Vzorky bez termické modifikace 20°C a s termickou modifikací 160°C, 180°C, 210°C. Termickou modifikaci jsem prováděl standardním procesem "ThermoWood®" (Tabulka. č. 3.). Termická modifikace proběhla v komoře Katres (Kostelec nad Černými lesy, Truba). Před samotnou termickou modifikaci jsem měl vzorky uskladněné při standardních podmínkách, relativní vlhkosti 70% a teplotě prostředí 20°C. Vzorky jsem odebral z jedné várky.

Rozdělení termické modifikace:

1. fáze - zvýšení teploty a sušení při vysokých teplotách,
2. fáze - termická modifikace,
3. fáze - ochlazování.

Tabulka č. 3. Parametry termické modifikace

	160°C	180°C	210°C
ohřev [h]	10	11,7	15,1
termická modifikace[h]	3	3	3
ochlazování [h]	2,3	4,1	4,5
celková délka[h]	15,3	18,8	22,6

Vlhkost jsem vypočítal podle normy ČSN EN 322 (1994). Hmotnost vzorků jsem stanovil procentuálním podílem hmotnosti vody vlhkého vzorku a hmotnosti vysušeného vzorku.

$$W = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%] \qquad (13)$$

W - vlhkost [%], m_1 - hmotnost zkušebního tělesa ve vlhkém stavu [g], m_0 - hmotnost zkušebního tělesa ve vysušeném stavu [g].

Hustotu vzorků jsem vypočítal podle normy ČSN EN 323 (1994). Výsledky jsou vypsány v Tabulce č. 4..

$$\delta_w = \frac{m_w}{a_w \cdot b_w \cdot l_w} = \frac{m_w}{V_w} \quad [kg/m^3] \qquad (12)$$

δ_w- hustota zkušebního tělesa při dané vlhkosti w [kg/m^3], m_w- hmotnost zkušebního tělesa při dané vlhkosti w [kg], a_w, b_w, l_w- rozměry zkušebního tělesa při dané vlhkosti w [m],V_w - objem zkušebního tělesa při dané vlhkosti w [m^3].

Tabulka č. 4. Hustota po termické modifikaci

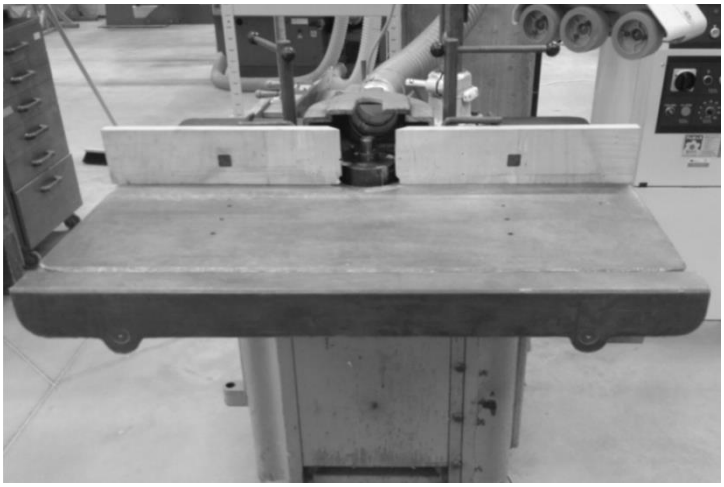
	20°C	160°C	180°C	210°C
hustota [g*cm^{-3}]	0,64	0,623	0,622	0,612

Charakteristika stroje

Vzorky jsem frézoval na spodní svislé frézce FVS (Obrázek č. 15.) od výrobce Československé hudební nástroje na které bylo nainstalováno podávací zařízení (Obrázek č. 16.) od výrobce STEFF. Na frézce jsem nastavil úběr e = 1 mm.

Parametry stroje:

- příkon 4kW,
- kmitočet 50Hz,
- otáčky vřetene 3000ot/min,
- řezná rychlost se vypočítala podle vzorce (1),
- podávací rychlost 4 m/min.



Obrázek č. 15. Spodní svislá frézka

Parametry podávacího zařízení:

-motor 400V,

- příkon 0,75 kW,
- rok výroby 2005.

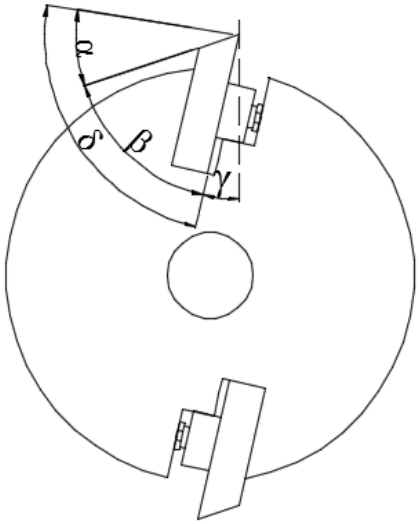
Obrázek č. 16. Podávací zařízení

Charakteristika nástroje

Jako nástroj pro měření jsem použil frézovací hlavu o rozměrech 125x50x30 mm od společnosti Felder. Při frézování jsem frézu osadil dvěma noži (Obrázek č. 17.). Přičemž v záběru byl pouze jeden nůž a druhý sloužil pouze jako vyvažovací. Nože byly vyrobené na zakázku od výrobce Maximus.

Parametry nožů:

- typ Special 55,
- šířka nože 45 mm,
- úhel ostří (β)15°,
- tvrdost 62 HRC.



Obrázek č. 17. Frézovací hlava

α - úhel hřbetu, β - úhel řezného klínu, δ - řezný úhel, γ - úhel čela.

Přístroj pro měření

Energetickou náročnost jsem měřil pomocí přístroje METREL Power Q plus MI2392 (Obrázek č. 18.). Přičemž samotné měření bylo založeno na změně množství odebírání elektrického proudu elektromotorem stroje ze sítě. Přístroj snímal jednak změnu odebíraného proudu I, a také aktuální hodnotu napětí U. Následně nasnímá fázový posun a tím dokáže spočítat příkon elektromotoru.

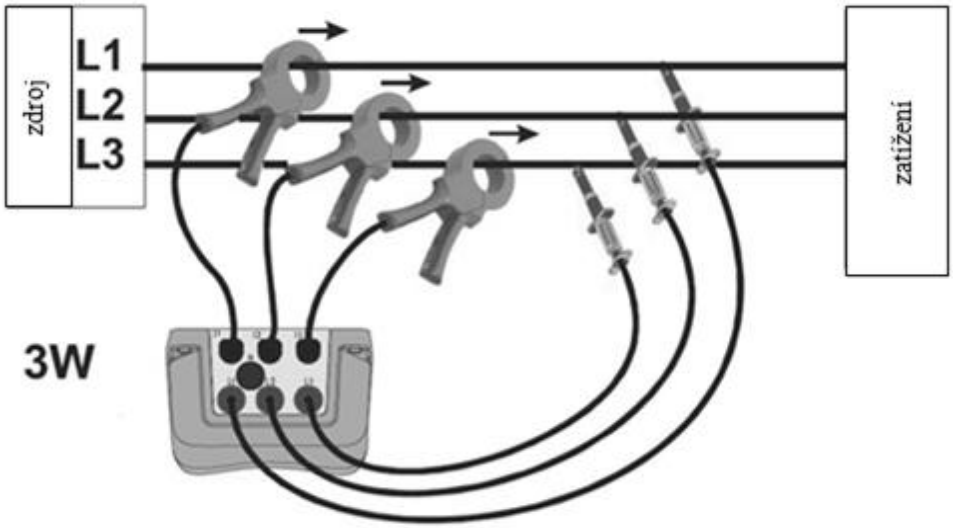
Obrázek č. 18. Přístroj Metrel Power Q plus

(www.metrel.si/en, 25.3.2019)

Postup měření

Bakalářkou práci jsem měřil v dílnách na dřevařském pavilonu České zemědělské univerzity v Praze. V dílnách byla relativní vlhkost vzduchu 70% a teploty prostředí 20°C.

Nejdříve jsem musel propojit přístroj METREL Power Q plus MI2392 ke spodní svislé frézce (Obrázek č. 19.) a k počítači s programem Metrel PowerViev. Nasnímané hodnoty se automaticky přenášely ze spodní svislé frézky do počítače v intervalu jedné sekundy. V tomto intervalu se nasnímalo více hodnot, přičemž se použila průměrná hodnota. Tyto hodnoty se následně ukládaly do připojeného počítače a nakonec jsem je zpracoval pomocí programu Statistica 12 (Statsoft INC., USA) a Microsoft Excel 2016 (Microsoft Corporation, USA).



Obrázek č. 19. Schéma zapojení přístroje Metrel Power Q plus

(www.metrel.si/en, 25.3.2019)

Korelace:

Evansova příručka (1996), (Tabulka č. 5.), podle které jsem hodnotil výsledky korelace.

Tabulka č. 5. Evansova příručka (1996)

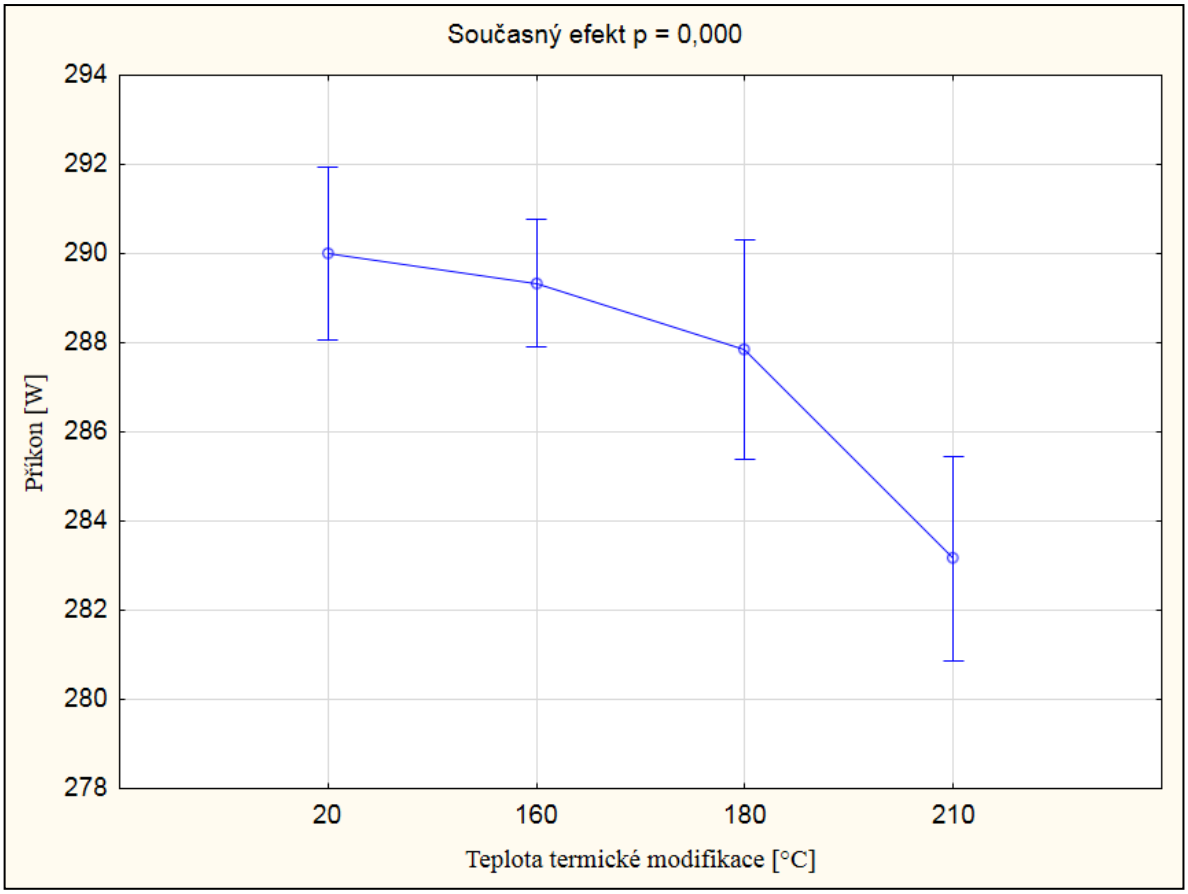
Rozmezí (v absolutní hodnotě)	Závislost
0,00-0,19	velmi slabá
0,20-0,39	slabá
0,40-0,59	střední
0,60-0,79	silná
0,80-1,00	velmi silná

7 Výsledky

V této kapitole jsem zpracoval výsledky v grafické a tabelární podobě. Graf č. 2. popisuje změny nárůstu příkonu v závislosti na teplotě termické modifikace.

Všechny grafy a tabulky jsem zpracoval pomocí programu Statistica 12, kde jsem použil ANOVU. Tabulky jsem dále převedl do programu Microsoft Excel 2016. V grafické podobě jsou popsány termicky modifikované vzorky při teplotách 160°C, 180°C, 210°C a vzorky nemodifikované, pouze klimatizované při teplotě 20°C.

Pro statistické analýzy jsem použil hladinu významnosti α = 0,05 %.



Graf č. 2. Závislost energetické náročnosti na teplotě termické modifikace

Energetickou náročnost v závislosti na teplotě termické modifikace znázorňuje graf uvedený výše (Graf č. 2.). Z grafu vyplývá mírnější pokles příkonu (svislá osa) modifikovaného dřeva při 160°C a 180°C (vodorovná osa) oproti nemodifikovanému dřevu 20°C. Zatímco dřevo modifikované při teplotě 210°C vykazuje statisticky významný úbytek příkonu.

Naměřené hodnoty příkonu byly v rozmezí 280,81 - 291,89W.

Statistickou významnost lépe znázorňuje Duncanův test (Tabulka č. 5.).

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

	Teplota termické modifikace [°C]		1 290,00	2 289,33	3 287,86	4 283,16
1	20			0,637726	0,156274	0,000066
2	160		0,637726		0,298776	0,000123
3	180		0,156274	0,298776		0,001572
4	210		0,000066	0,000123	0,001572	

Zde jsou porovnané jednotlivé proměnné mezi sebou. Červeně znázorněné hodnoty (tzn. hodnoty pod 0,05), jsou hodnoty statisticky významné. Statisticky významné hodnoty ukázal Duncanův test také pouze na termicky modifikovaném dřevu při 210°C.

Tabulka č. 7. Průměrný pokles příkonu v závislosti na termické modifikaci

Teplota [°C]	Průměrný příkon [W]	Pokles [%]
20	290	0
160	289,33	0,23
180	287,86	0,74
210	283,16	2,36

Z tabulky uvedené výše (Tabulka č. 6.) jsou patrné úbytky příkonu při frézování v závislosti na termické modifikaci. U termicky modifikovaných vzorků při 160°C klesl příkon o 0,23%, u vzorků termicky modifikovaných při 180°C klesl příkon o 0,74% a u termicky modifikovaných vzorků při 210°C klesl příkon o 2,36%.

Korelace:

Pro hodnocené parametry byla sestavena tabulka korelace (Tabulka č. 6.). K určení korelace byl použit program Microsoft Excel a vyhodnocení korelace bylo podle Evansovy příručky (1996), (Tabulka č. 7.).

Tabulka č. 8. Korelace hustoty, energie a teploty termické modifikace

	Korelační koeficient
Hustota na teplotě	-0,975625
Energie na teplotě	-0,4340185
Energie na hustotě	0,50344132

Silná závislost byla zjištěna mezi hustotou a teplotou. Čím více se zvýší teplota termické modifikace, tím více klesne hustota. Středně silná závislost dále vyšla mezi energií a teplotou, přičemž čím více se zvýší teplota termické úpravy, tím více klesne energetická náročnost. Mezi energií a hustotou vyšla závislost také středně silná, a to taková, že s klesající hustotou, klesá i energetická náročnost.

8 Diskuze

Výsledky sice ukázaly, že na teplotě termické modifikace vzhledem k energetické náročnosti záleží a rozdíly příkonu jsou zde patrné, ale rozdíl není u teploty termické modifikace tolik markantní a na energetickou náročnost nemá takový vliv jako například v diplomové práci Kubše (2013). V jeho práci zkoumal energetickou náročnost termicky modifikovaného bukového dřeva v závislosti na podávací rychlosti, řezné rychlosti a úhlu čela. Uvádí, že při zvýšení podávací rychlosti při frézování termicky modifikovaného dřeva ze 4 m/min na 8 m/min vzrostl příkon o 24 W a při zvýšení z 8 m/min na 11 m/min o dalších 12 W. U řezné rychlosti při frézování termicky modifikovaného dřeva jeho grafy ukazují, že se při zvýšení z 20 m/s na 30 m/s hodnoty příkonu zvýšily o 50 W a při zvýšení z 30 m/s na 40 m/s o dalších téměř 250 W. Energetická náročnost v závislosti na úhlu čela vyšla Kubšovi (2013) nejlépe při úhlu 25°, kdy při změně na úhel čela 20° narostl příkon o přibližně 22 W a při změně na úhel čela 15° vzrost dále o dalších 40 W.

Touto problematikou se dále zaobíral Sedlecký (2017). Ve své disertační práci zkoumal energetickou náročnost středně tvrdé dřevovláknité surové desky, dále středně tvrdé dřevovláknité laminované desky a smrkové spárovky, kde zaznamenal podobné procentuální změny při změně podávací rychlosti i řezné rychlosti.

Obě výše zmíněné práce sice zkoumaly jiný materiál, ale zaznamenaly podobný úbytek příkonu v závislosti na teplotě termické modifikace, podobně jako má práce. Proto můžeme říct, že čím vyšší je teplota termické modifikace, tím více a znatelněji klesne příkon.

9 Závěr

Třískové obrábění frézováním se v současnosti čím dál více využívá, a to hlavně z toho důvodu, že například v porovnání s řezaným povrchem je frézovaný povrch kvalitnější a přesnější. Proto jsem v mé bakalářské práci právě tuto operaci popsal a charakterizoval. Dále jsem popsal termickou modifikaci metodou ThermoWood® a dřevinu padouk.

Hlavním cílem mé bakalářské práce bylo určit energetickou náročnost termicky modifikovaného dřeva padouku. Výsledky ukázaly, že termická modifikace má vliv na energetickou náročnost procesu frézování. U vzorků termicky modifikovaných při teplotě 160°C a 180°C se energetická náročnost snížila oproti termicky nemodifikovaným pouze v malém rozsahu. Pouze u vzorků termicky modifikovaných při teplotě 210°C jde jednoznačně říct, že snížení energetické náročnosti znatelně ovlivňuje příkon, a to z toho důvodu, protože výsledky měření ukazují statisticky významné hodnoty.

Bakalářská práce poskytuje užitečné informace pro další využití v praxi a poskytuje teoretický podklad v oblasti frézování a termické modifikace metodou ThermoWood®.

Seznam použité literatury

BARCÍK, Š., GAŠPARÍK, M., HOUSKA, A., RAZUMOV, E., SEDLECKÝ, M. *Vliv technologických faktorů na kvalitu opracování povrchu při frézování termicky modifikovaného dřeva*. Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, 2014, ISBN 978-80-228-2658-7.

BARCÍK, Š., HOMOLA, T. *Vplyv vybraných parametrov na kvalitu obrobeného povrchu pri rovinom frézování juvenilního borovicového dreva*. In: Trieskové a beztrieskové obrabanie dreva, Zvolen, 2004, ISBN 80-228-1385-0.

BARCÍK, Š., KVIETKOVÁ, M., BOMBA, J., SIKLIENKA, M. *Dřevoobráběcí nástroje - údržba a provozování, vysokoškolská učebnice*. 1. vyd., Praha, Powerprint, 2013. ISBN 978-80-87415-80-1.

BEMGTSOON, C., JERMER, J., CLANG, A., EK-OLAUSSON, B. *Investigation of some technical properties of heat-treated wood*, 2003, ISBN 03-40266 .

DVOŘÁK, O. *Analýza procesu frézování termicky modifikovaného dřeva*, Praha, Česká zemědělská univerzita v Praze, 2016, Bakalářská práce.

EVANS, J, D. *Straight for ward statistics for the behavioral sciences* [online]. PacificGrove: Brooks/ColePub. Co [cit. 14.4.2019]. ISBN 0534231004 9780534231002, 1996. Dostupné z: <http://www.worldcat.org/title/straightforward-statistics-for-the-behavioralsciences/oclc/32465263>

GRÜN, K. Lexikon tropických dřevin, Praha, Státní nakladatelství technické literatury, 1971, 336 s.

HILL, C. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*, 1. vyd., Spojené státy americké, Wiley, ISBN-13: 978-0-470-02172-9, 260 s.

JAMSÄ, S., AHOLA, P., VIITANIEMI, P. *Long-term natural weathering of coated ThermoWood*, 2000, Pigment & Resin Technology, Vol. 29, No: 2, 68 - 74.

KAČÍKOVÁ, D., KAČÍK, F. *Chemické a mechanické změny dreva při termickej úprave*. Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, 2011, ISBN 978-80-228-2249-7.

KMINIAK, R. *Diplomová práce, Vlyv vybraných Technicko-technologických faktorov na energetické a kvalitatívne ukazovatele pri rovinnom frézovaní juvenilného topolového dreva*, Zvolen, Technické univerzita vo Zvolene, 2007, 129 s.

KRETSCHMANN, D., E., ALDEN, H., A., VERILL, S. *Variations of microfibril angle in loblolly pine: comparison of iodine crystalization and X – ray difraction techniques. The proceedings of IAWAúIUFRO,* 1997, 157 – 176 s.

KUBŠ, J. *Vliv vybraných faktorů na energetickou náročnost rovinného frézování termicky modifikovaného dřeva*, Praha, Česká zemědělská univerzita v Praze, 2013, Diplomová práce.

KUBŠ, J., BARCÍK, Š. *Vliv uhlu čela na energetickou náročnost při rovinném frézování termicky modifikovaného bukového*, Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, ISSN 1339-8350.

KUBŠ, J., GAFF, M., BARCÍK, Š. *Factors Affecting the Consumption of Energy during the Milling of Thermally Modified and Unmodified Beech Wood. BioResources,* 2016, roč. 11, č. 1, ISBN 1930-2126, 736-747 s.

KVIETKOVÁ, M. *Obrábění dřeva,* CARTER Praha. 2015, ISBN 978-80-213-2604-0, 295 s.

KVIETKOVÁ, M., GAFF, M., GAŠPARÍK, M., KAPLAN, L., BARCÍK, Š. *Surface quality of milled birch wood after thermal treatment at various temperatures,* 2015, BioRes. 10(4), 6512-6521.

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

LISIČAN, J. *Obrábanie a delenie drevných materiálov*, Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, 1988, 412s.

MAYES, D., OKSANEN, O. *Thermowood(r) Handbook*. Finsko Dostupné na <http://www.thermowood.fi/data.php/200312/795460200312311156_tw_handbook.pdf.>

MIKOLÁŠIK, Ľ. *Drevárské stroje a zaridenia*. 1. vyd., Bratislava, ALFA, 1981, 270 s.

NUTSCH, W. Příručka pro truhláře. 2. přeprac. vyd. Praha. Europa-Sobotáles cz, 2006. ISBN 80-86706-14-1.

PESCHEL, P. *Dřevařská příručka: tabulky, technické údaje*, Praha, Sobotáles, 2002, ISBN 80-85920-84-0, 320 s.

PROKEŠ, S. *Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva*. SNTL / ALFA Bratislava, 1982.

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

SEDLECKÝ, M. *Vliv druhu materiálu nástroje na kvalitu opracovaného povrchu při podélném frézování dřeva a materiálů na bázi dřeva,* Praha, Česká zemědělská univerzita v Praze, 2017, Disertační práce.

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

STEWART, H., A. *Result force and surface quality from some face-milling variables. Forest Products Journal,* 1984, roč. 34, ISSN 0015-7473, č. 5, 21 - 24 s.

SVOREŇ, J. *Drevarské stroje. Časť II.,* Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, 2006, ISBN 8022815659, 149s.

SVOREŇ. J. *Drevarské stroje. Časť I*., 1. vyd. Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, 2002, 80-228-1188-2, 169s.

WAGENFÜHR, R. *Holzatlas,* München, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung, 2007, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung, ISBN-10 3-446-40649-2, 816 s.

Použité 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, 7s.

Internetové zdroje

Celistvá kotoučová fréza [online]. (cit. 4.4.2019). Dostupné z: <https://www.mt-nastroje.cz/Freza-DIN1880-nastrcna-hrubozuba-HSSCo5-D63-d14059.>

Fréza se vsazenými zuby [online]. (cit. 14.12.2018). Dostupné z: <https://webmiumeshopblob.azureedge.net/eshops/9922/product-primary/6e41c8cc-b85e-46a0-9c27-73b1eb3be903_lrg.jpg.>

Frézovací hlava [online]. (cit. 14.12.2018). Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/14882/content_uni_hlava.jpg>

METREL.*MI 2392 PowerQ Plus* [online]. © METREL 2017 (cit. 12.7.2017). Dostupné z: <www.metrel.si/en>

Okružní frézování [online]. (cit. 12.8.2018). Dostupné z: <https://docplayer.cz/docs-images/40/7908232/images/page_18.jpg>

Proces výroby [online]. (cit. 9.3.2019). Dostupné z: <https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw_handbook_080813>

Sada fréz [online]. (cit. 14.12.2018). Dostupné z: <https://webmiumeshopblob.azureedge.net/eshops/9922/product-primary/a70dbb92-9960-48e5-af68-730ffb8b376c_lrg.jpg.>

Schéma čelního frézování[online]. (cit. 13.10.2018). Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2597287/9/images/5/%C4%8Celn%C3%AD+fr%C3%A9zov%C3%A1n%C3%AD>

Svislá spodní frézka [online]. (cit. 28.2.2019). Dostupné z: <https://www.simek.eu/svisla-stolni-frezka-t-270/>

Textura [online]. (cit. 16.2.2019). Dostupné z: <https://www.mytropicaltimber.org/en/c/3/products/74/padouk-dafrique>

Trn frézy [online]. (cit. 14.12.2018). Dostupné z: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQf1WswGm-bT-_5qzS_kOJn97WsOUZXeex1-3JiQWYR3yMe5DTR>