Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Vliv technologických parametrů na kvalitu obráběného povrchu tropických dřevin

Diplomová práce

Autor: Bc. Nikola Petříková DiS.

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Sedlecký, Ph.D.

2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „ Vliv technologických parametrů na kvalitu obráběného povrchu tropických dřevin“ vypracovala samostatně pod vedením Ing. Miroslava Sedleckého, Ph.D. a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V…… dne……

Poděkování

Mé poděkování patří především Ing. Miroslavu Sedleckému, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování diplomové práce věnoval.

Abstrakt

V diplomové práci byla zkoumána kvalita povrchu obráběných tropických dřevin, během podélného bočního frézování. Do skupiny tropických dřevin byl zahrnut mahagon a iroko, ze kterých byly vyrobeny vzorky, pro další výzkum. Při výrobě vzorků, sloužících pro testování povrchu se měnily parametry obrábění. Hlavními parametry byly otáčky hřídele 3000; 6000 a 9000 ot/min a podávací rychlost 4; 8; 11 m/min. Společně se změnami otáček a podávacích rychlostí byly měněny také druhy materiálu řezných nástrojů. Jednalo se o tři typy materiálů TM1, TM2 a TM1 CrTiN, přičemž v posledním případě byl nůž s povlakovou úpravou. Při měření kvality povrchu byla zkoumána nejvhodnější kombinace parametrů společně s použitými typy nástrojů, pro co nejlepší výsledek opracování dřevin. Kvalita povrchu byla hodnocena pomocí průměrných aritmetických úchylek profilu drsnosti (Ra) a vlnitosti (Wa), a dále pomocí Rz, RSm, Wz a WSm.

Klíčová slova

Kvalita povrchu, obrábění dřeva, tropické dřeviny

Abstract

The diploma thesis examined the surface quality of machined tropical trees during longitudinal side milling. The group of tropical woody plants included mahogany and iroko from which the samples were made for further research. Machining parameters were changed during the production of samples used for surface testing. The main parameters were shaft speed 3000; 6000 and 9000 rpm and feed rate 4; 8; 11 m/min. Along with changes in speed and feed rates the materiál types of the cutting tool were also changed. There were three types of materials TM1, TM2, TM3 CrTiN the latter case being a coated knife. When measuring the surface quality the most suitable combination of parameters was examined together with the types of tools used for the best possible result of wood processing. The surface quality was evaluated using the average arithmetic deviations of roughness profile (Ra) and corrugation (Wa) and further by Rz, RSm, Wz and WSm.

Key words

Surface quality, machining wood, tropical wood

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ **10**

SEZNAM TABULEK **11**

SEZNAM GRAFŮ **12**

1 ÚVOD **14**

2 CÍL PRÁCE **15**

3 PROBLEMATIKA **17**

3.1 Základní rozdělení obrábění 17

3.2 Frézování 17

3.2.1 Kinematika frézování 21

3.2.1.1 Výpočet řezné rychlosti 22

3.2.1.2 Výpočet posuvné rychlosti 22

3.2.1.3 Výpočet posuvu na zub 23

3.2.1.4 Výpočet hloubky vln 23

3.2.1.5 Výpočet hloubky rýh 24

3.3 Nástroj pro obrábění 24

3.3.1 Úhlová geometrie břitu 24

3.3.2 Materiál na výrobu nástroje 26

3.3.3 Povlakování nástrojů 27

3.3.3.1 Aplikace povlaků 28

3.3.3.2 Metody CVD a PVD 29

3.3.3.3 Úprava nástrojů před povlakováním CVD a PVD 30

3.4 Otupování nástroje 33

3.4.1 Proces otupování 33

3.4.2 Příčiny otupení břitového nástroje 34

3.5 Frézovaný materiál 35

3.6 Metody hodnocení kvality povrchu 36

3.6.1 Dotyková metoda ... 37
3.6.2 Bezdotyková metoda ... 37
3.6.3 Vizuální metoda ... 37
3.6.4 Porovnávací metoda ... 38
3.7 Faktory ovlivňující proces řezání ... 38
3.8 Faktory ovlivňující kvalitu povrchu ... 38
3.9 Kvalita obrobeného povrchu ... 39
4 METODIKA ... 41
4.1 Použité materiály ... 42
4.2 Použité nástroje a frézovací hlava ... 43
4.2.1 Frézovací žiletkové nože ... 43
4.2.2 Frézovací hlava ... 45
4.3 Strojní vybavení ... 45
4.3.1 Frézka ... 45
4.3.2 Podávací zařízení ... 46
4.3.3 Formátovací kotoučová pila ... 46
4.4 Přístrojové vybavení ... 47
4.4.1 Kontaktní profilomert FORM TALYSURF 50 Intra ... 47
4.5 Zjištění hustoty a vlhkosti ... 47
4.5.1 Zjištění hustoty ... 47
4.5.2 Zjištění vlhkosti ... 47
4.6 Příprava zkušebních vzorků ... 48
4.7 Metodika měření průměrných aritmetických úchylek vlnitosti a drsnosti ... 48
4.7.1 Kontaktní metoda – přístroj FORMTALYSURF 50 Intra 2 ... 49
4.8 Statistické zpracování dat ... 49
5 VÝSLEDKY A DISKUZE ... 51
5.1 Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti „Ra“ ... 51

5.2 Největší výška profilu drsnosti „Rz“ 55
5.3 Průměrná šířka prvku profilu drsnosti „RSm“ 60
5.4 Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti „Wa“ 64
5.5 Největší výška profilu vlnitosti „Wz“ 68
5.6 Průměrná šířka prvku profilu drsnosti „WSm“ 72
5.7 Diskuse 76
6 ZÁVĚR 77
6.1 Celkové shrnutí 77
6.2 Přínos pro praxi a vědu 79
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 80

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Princip srovnávání (Lisičan, 1996) 18
Obr. 2: Princip fézování na hloubku (tloušťkování) (Lisičan, 1996) 19
Obr. 3: Ofrézování křivé plochy (Lisičan, 1996) 19
Obr. 4: Tvary řezné hrany na frézování profilu (Lisičan, 1996) 19
Obr. 5: Typy frézování podle polohy a osy otáčení (Siklienka a Kminiak, 2013a) 20
Obr. 6: Schéma oddelování třísky při válcovém frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a) 22
Obr. 7: Hlavní úhly řezné hrany (Prokeš, 1978) 25
Obr. 8: Provedení stripping (vlevo - správné provedení, vpravo - špatné provedení) (Holubář et. al., 2005) 31
Obr. 9: Mikroúprava břitu omíláním (vlevo bez úpravy, vpravo s úpravou) (Holubář et. al., 2005) 32
Obr. 10: Průběh otupování břitu (Prokeš, 1978) 34
Obr. 11: Základní plochy obrobku (Siklienka a Kminiak, 2013a) 36
Obr. 12: Výpočet parametru Ra (Havelková et. al., 2014) 42
Obr. 13: Žiletkové nože 43
Obr. 14: Žiletkové nože 44

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Vlastnosti materiálů 43
Tab. 2: Vlastnosti použitých nástrojů 44
Tab. 3: Technické parametry použitých nástrojů 44
Tab. 4: Parametry spodní svislé frézky FVS, ED, APT Line II (Tuttlinger, Německo) 45
Tab. 5: Parametry podavače MAGGI, STEFF 2034 46
Tab. 6: Formátovací kotoučová pila SCM si300 class 46
Tab. 7: Testování faktorů na základě hodnoty (P) (Gaff a Gáborík, 2009) 50

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Vliv druh dřeviny na drsnost povrchu Ra 51
Graf 2: Vliv podávací rychlosti v_f na drsnost povrchu Ra 52
Graf 3: Vliv otáček hřídele na drsnost povrchu Ra 53
Graf 4: Vliv typu nože na drsnost povrchu Ra 54
Graf 5: Vliv otáček hřídele, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnost povrchu Ra 55
Graf 6: Vliv druhu dřeviny na drsnost povrchu Rz 55
Graf 7: Vliv podávací rychlosti v_f na drsnost povrchu Rz 56
Graf 8: Vliv otáček hřídele na drsnost povrchu Rz 57
Graf 9: Vliv typu žiletkového nože na drsnost povrchu Rz 58
Graf 10: Vliv otáček hřídele, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnost povrchu Rz 59
Graf 11: Vliv druhu dřeviny na drsnost povrchu RSm 60
Graf 12: Vliv podávací rychlosti v_f na drsnost povrchu Rz 61
Graf 13: Vliv otáček hřídele na drsnost povrchu RSm 61
Graf 14: Vliv typu žiletkového nože na drsnost povrchu RSm 62
Graf 15: Vliv otáček hřídele, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnot povrchu RSm 63
Graf 16: Vliv druhu dřeviny na vlnitost povrchu Wa 64
Graf 17: Vliv podávací rychlosti v_f na vlnitost povrchu Wa 65
Graf 18: Vliv otáček hřídele na vlnitost povrchu Wa 65
Graf 19: Vliv typů žiletkových nožů na vlnitost povrchu Wa 66
Graf 20: Vliv otáček hřídele, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost povrchu Wa 67
Graf 21: Vliv druhu dřeviny na vlnitost povrchu Wz 68
Graf 22: Vliv podávací rychlosti v_f na vlnitost povrchu Wz 69
Graf 23: Vliv otáček hřídele na vlnitost povrchu Wz 69
Graf 24: Vliv typu žiletkového nože na vlnitost povrchu Wz 70
Graf 25: Vliv otáček hřídele, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost povrchu Wz 71
Graf 26: Vliv druhu dřeviny na vlnitost povrchu WSm 72
Graf 27: Vliv podávací rychlosti v_f na vlnitost povrchu WSm 73
Graf 28: Vliv otáček hřídele na vlnitost povrchu WSm 73

Graf 29: Vliv typu žiletkového nože na podávací rychlost WSm 74
Graf 30: Vliv otáček hřídele, podávací rychlost a typu nástroje na vlnitost povrchu WSm 75

1 ÚVOD

Dřevo odjakživa patří k nejoblíbenějším a nejstarším materiálům, které spadají do přírodních materiálů s nejvšestrannějším využitím (Gandelová, 2009). Dřevěný materiál se zpracovává zejména v nábytkářském a stavebním průmyslu, ale jeho využití má široký rozsah. V nynější době se intenzivně zlepšuje zpracovávající technika, z důvodu stálého zjišťování nových vlastností a poznatků dřeva. Jedná se zejména o mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti, ale také strukturu dřeva. Lepší znalosti vlastností přírodních materiálů v podobě dřeva, zásadně zvyšují mnohostranné využití (Gandelová, 2009).

Dřevo lze definovat jako ortotropní, hygroskopický, propustný a biologický materiál s rozlišným chemickým složením a strukturou. Jeho skladba je velmi rozmanitá ve vlastnostech, tvaru, funkci a velikosti (Davim, 2011).

Dřevo představuje všestranný materiál, který se lehce opracovává a jednoduše se sním manipuluje. Je to pevný ale přesto pružný materiál, s výbornými vlastnostmi. Jedná se zejména o dobré tepelně – izolační vlastnosti. Je odolné vůči chemickým složkám a v dřevěných konstrukcích schopné tlumit vibrace. Nedostatkem dřeva jsou praskliny, vznikající při různých změnách teplot a vlhkosti (Lisičan, 1996).

Mezi nejmladší vědu patří dělení (řezání) dřeva (Lisičan, 1996). Během procesu obrábění dochází k vytvoření třísky, opotřebení řezného nástroje, iniciaci trhlin a opracování povrchu dřevin (Davim, 2011). Proces řezání lze definovat jako porušení dřevných částic hranou řezného klínu pronikajícího do dřeva. Účelem je rozdělení velkého kusu na menší kusy, získání vyšší hladkosti povrchu či dosažení požadovaného tvaru. Při procesu dochází k úbytku dřevní hmoty z původního objemu (Lisičan, 1996).

Každé cizí těleso různého tvaru je bráno jako řezný klín. Aby došlo k průniku do dřevitého materiálu, musí být materiál řezného klínu tvrdší než dřevo. Řezná hrana frézovacích a pilových zubů nebo ostří vrtáku je chápána jako samostatný řezný klín. Výsledek procesu je ovlivňován esteticky, technicky a kvalitativně, zejména kvůli nehomogennosti dřevné hmoty, kam patří uspořádání ročních letokruhů, vláken a dřeňových paprsků (Lisičan, 1996).

2 CÍL PRÁCE

Cílem práce bylo zjistit nejlepší kombinaci frézovacích parametrů, společně s obráběcími noži různých materiálů, pro ideální povrch, co se týče drsnosti a vlnitosti. Do parametrů jsou řazeny otáčky hřídele a podávací rychlost. Drsnost a vlnitost byla hodnocena pomocí průměrných aritmetických úchylek profilu drsnosti a vlnitosti a dále pomocí Rz, RSm, Wz a WSm.

Kombinace frézovacích parametrů, materiálů řezných nástrojů a dřevin probíhala mezi:

- Obráběná dřevina: mahagon, iroko
- Otáčky hřídele: 3000; 6000; 9000 ot/min
- Podávací rychlost: 4; 8; 11 m/min
- Materiál nástroje: TM 1, TM 2, TM1 CrTiN

Sledované faktory:

- Kvalita povrchu (Ra) - posuzována podle aritmetických úchylek profilu drsnosti
- Kvalita povrchu (Rz) – posuzována podle největší výšky profilu drsnosti
- Kvalita povrchu (RWs) – posuzována podle průměrné šířky prvku profilu drsnosti
- Kvalita povrchu (Wa) - posuzována podle aritmetických úchylek profilu vlnitosti
- Kvalita povrchu (Wz) - posuzována podle největší výšky profilu vlnitosti
- Kvalita povrchu (WSm) - posuzována podle průměrné šířky prvku profilu vlnitosti

Metody pro zkoumání průměrných aritmetických úchylek povrchu:

- Kontaktní metoda – profilometr FORM TALYSURF 50 Intra

Diplomová práce by měla ukázat výsledky pro ideální nastavení řezných parametrů, které mají vliv na kvalitu obrobeného povrchu.

Zásadním faktorem pro dobrou kvalitu povrchu je správné nastavení řezného procesu.

Metody zkoumající průměrné aritmetické úchylky povrchu a jejich porovnávání jsou důležitým aspektem pro celkové hodnocení.

3 PROBLEMATIKA

V diplomové práci jsou řešeny problémy v oblasti obrábění dřeva, zejména frézování obrobků. Frézování je jedním z nejčastější způsobů obránění při výrobě nábytku a dalších komponentů, týkajících se dřevařského průmyslu. Během obrábění je využíváno několik nástrojů z různých materiálů a rozlišnými vlastnostmi. Typ řezných nástrojů je vybírán podle vlastností obráběné dřeviny. V případě tropických dřevin, u kterých je v diplomové práci zkoumána kvalita, je vhodnější používat nástroje z tvrdých kovů. Mezi tyto nástroje patří diamantové, popřípadě nástroje s povlakovou úpravou. Společně s vhodným výběrem nástroje je zásadním krokem zvolit správné otáčky hřídele a podávací rychlost. Výsledná kvalita obrobení je ovlivněna všemi zmíněnými faktory.

3.1 Základní rozdělení obrábění

Základní obrábění je řazeno do dvou skupin. Do základního rozdělení spadá třískové a beztřískové obrábění. Třískové obrábění je bráno jako častějším a využívanějším způsobem, které dále rozdělit do několika skupin. Jedná se o frézování, soustružení, hoblování, broušení, vrtání, dlabání, odkorňování, leštění a okružování (Lisičan, 1996).

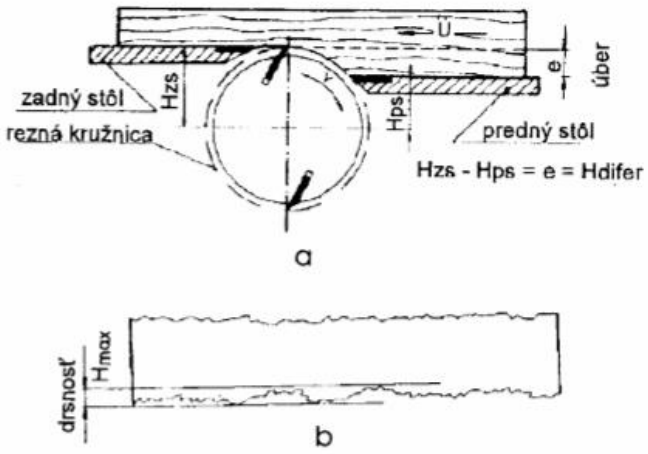
3.2 Frézování

Frézování je definováno jako proces, při kterém se řeže dřevo řeznými hranami, pomocí rotujícího nástroje. Přičemž je dílec posouván ve směru kolmo na osu rotujícího nástroje při určité řezné výšce (tzv. hloubce úběru) (Lisičan, 1996; Krauss *et. al.*, 2016). Úběr musí být menší než je hloubka dílce a poloměr nástroje. Cykloidální indikovaný pohyb řezu a hloubka třísky je v mezích $0 \leq h \leq u_z$ (Lisičan, 1996). Opracování nebo-li obrobení materiálu třískovým způsobem do potřebného tvaru, rozměru a vyžádanou povrchovou kvalitou, je hlavním účelem frézování. Frézování dřevěného materiálu je v praxi nejznámější a nejrozšířenější technologie obrábění (Lisičan, 1996; Kvietková, 2015).

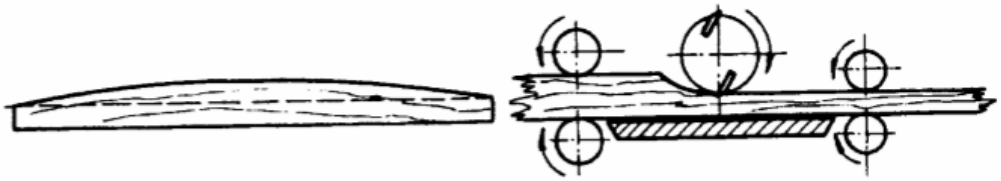
Během frézování dochází ke změně tloušťky třísky, kvůli záběru od nuly do maxima. Při obrábění je posuv kolmý k ose otáčení nástroje. Frézování je způsob

obrábění, který se volí v případě, pokud je potřeba vytvořit přesný rozměr obráběného materiálu a současně hladký povrch. Z obrobku je odřezávána tříska s proměnnou tloušťkou díky řeznému procesu, který je přerušovaný, z toho důvodu třísku odřezává každý zub nástroje (Lisičan, 1996; Kvietková, 2015). Frézování je důležitým výrobním procesem nejen při přesném tvarováním dřeviny, ovšem také udává kvalitu drsnosti povrchu, která hraje důležitou roli u adheze (Kilic *et al*., 2006)

Frézování lze zařadit do několika technologických skupin. Do základních tříd se řadí tloušťkování a srovnávání materiálu, které spadají pod rovinné frézování. U srovnávání dochází k zarovnání jedné plochy na zakřiveném dílci. Podle této ofrézované rovné plochy, v dalším kroku možno opracovat dílec na přesnou hloubku. Vykonává se tím, že opracovávaný dílec je posunut na nožovou hlavu, která je umístěna pod stolem stroje (děleným na přední a zadní) ubírající vrstvu, nazývaná úběrem (obr. 1) (Lisičan, 1996; Kvietková, 2015). Pokud je křivost dílce větší, je možnost materiál opakovaně frézovat, dokud není povrch rovný. Hlavním principem tloušťkování je ofrézování dílce na požadovanou hloubku, s přesným rozměrem. K tloušťkování dochází po srovnávací operaci, při které je srovnána pouze jedna plocha. Již opracovanou plochou je dílec položen na stůl, přičemž nad stolem je frézovací hlava, která má za úkol ofrézovat druhou plochu. Při tomto postupu dochází ke kalibraci na požadovanou hloubku (obr. 2) (Lisičan, 1996).



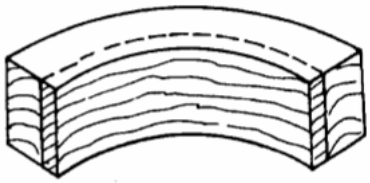
Obr. 1: Princip srovnávání *(Lisičan, 1996)*



Obr. 2: Princip fézování na hloubku (tloušťkování) *(Lisičan, 1996)*

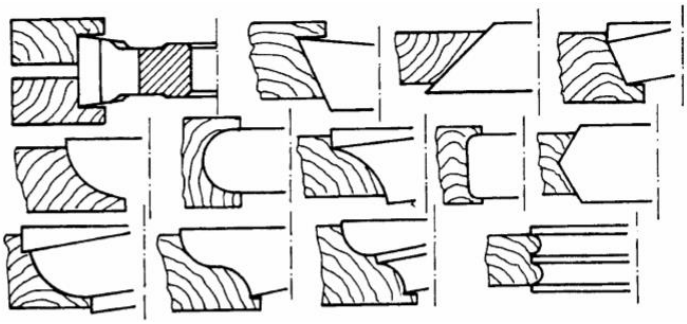
Přesnosti obrobků týkající se rozměru a tvaru jsou ovlivňovány i technickým stavem stroje. Drsnosti povrchu nejsou ovlivňovány pouze hloubkou vlnek, ale rovněž i rovnoměrností vlnek (Lisičan, 1996).

Křivočaré frézovaní je dalším typem (obr. 3). Týká se opracování zakřivené plochy, která se frézuje vedením tělesa okolo kotoučové frézy. K operaci napomáhají pomocné šablony a naklánění zadního stolu na srovnávací frézce (Lisičan, 1996)



Obr. 3: Ofrézování křivé plochy *(Lisičan, 1996)*

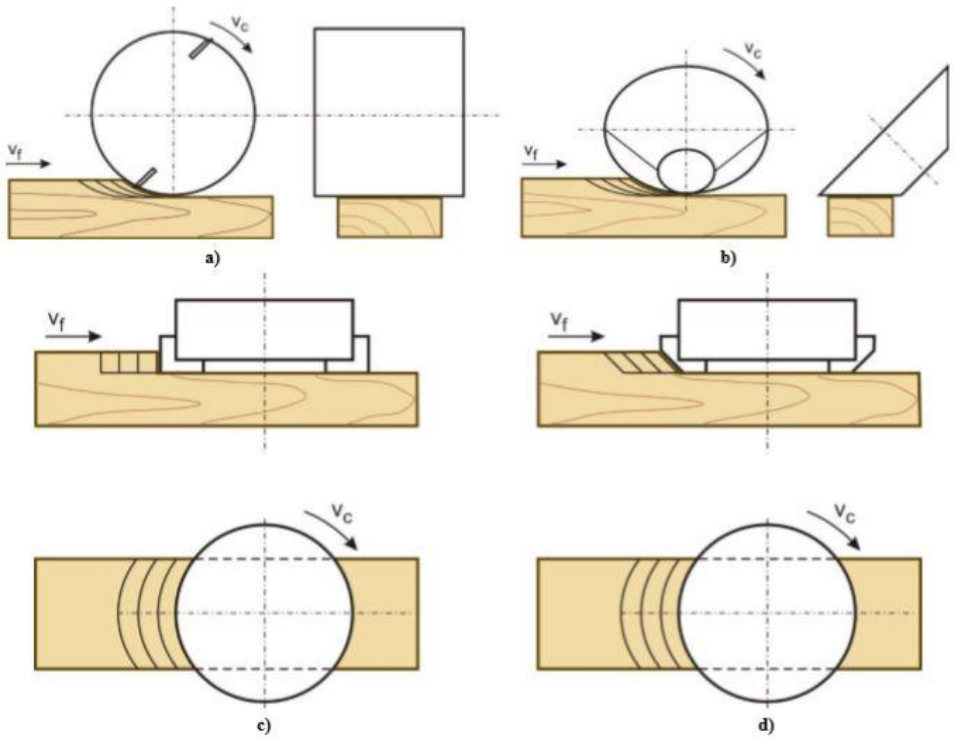
Pro dosažení různých profilů, na kotoučových frézách, které mají tvarované řezné hrany, lze využít profilovací způsob frézování. Na určité dílce jsou potřeba vytvořit určité profily (obr. 4) (Lisičan, 1996).



Obr. 4: Tvary řezné hrany na frézování profilu *(Lisičan, 1996)*

Frézování je rozdílné podle osy otáčení a plochy, které opisují řezné hrany nástroje. Jsou řazeny do čtyř typů frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a):

- Válcové frézování (obr. 5a) – osa otáčení je rovnoběžná s obrobenou plochou, přičemž řezná hrana opisuje válcovou plochu
- Kuželové frézování (obr. 5b) – osa otáčení je pod úhlem k obrobené ploše a řezné hraně nástroje, opisující kuželovou plochu
- Čelní frézování (obr. 5c) – osa otáčení je kolmá k obrobenému povrchu, hlavní řezné hrany nástroje se pohybují v rovině a vedlejší řezné hrany opisují válcovou plochu.
- Čelně – kuželové frézování (obr. 5d) – osa otáčení nástroje je kolmá k obrobenému povrchu, řezné hrany nástroje jsou skloněné pod určitým úhlem k obrobenému povrchu.



Obr. 5: Typy frézování podle polohy a osy otáčení *(Siklienka a Kminiak, 2013a)*
a – válcové, b – kuželové, c – čelní, d – čelně – kuželové, v_c – řezná rychlost, v_f – posuvná rychlost

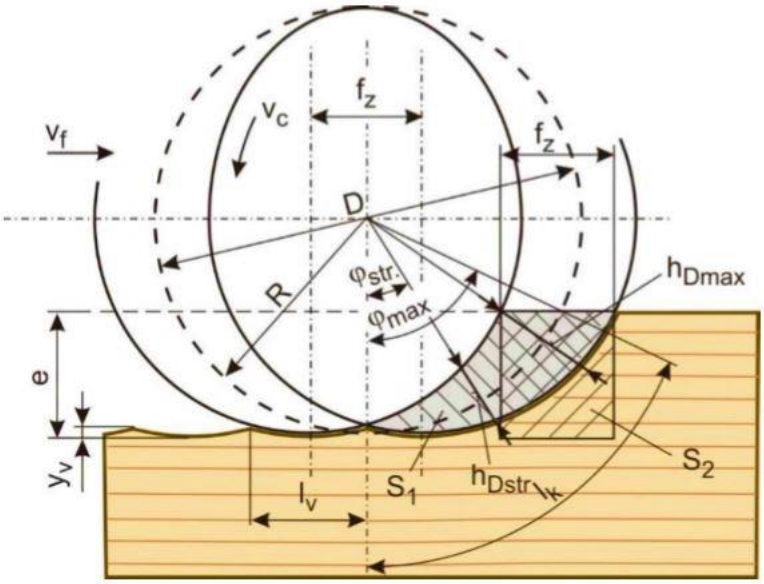
Válcové frézování je proces, při kterém dochází k obrábění pilovými kotouči. Tento typ obrábění je rozdílný, kvůli řezným nástrojům. Frézování je využíváno pro dosažení potřebných rozměrů, tvarů a kvality obrobku. Při procesu válcového frézování jsou využívány kotoučové frézy a nožové hřídele jako nástroje. Nožové hřídele bývají oblíbené z důvodu možné výměny různých druhů nožů (Siklienka a Kminiak, 2013a).

Kuželové frézování má osu otáčení řezného nástroje pod ostrým úhlem. Řezná hrana opisuje kuželový povrch a řeže nadmíru konstantní hloubky. Kuželové frézování je využíváno pro vytvoření plochých povrchů s maximální výškou nerovností 16÷30 μm. Během tohoto typu frézování většinou nevznikají žádné nerovnosti či vlnitosti (Siklienka a Kminiak, 2013a).

Během čelního frézování je osa otáčení kolmá na obráběný povrch. Kružnici opisují břity, které jsou připevněny k čelu nástroje, přičemž vedou rovnoběžně s opracovanou plochou (Prokeš, 1982). Tento typ frézování je využíván v případě požadavku na plochý povrch obrobku (Siklienka a Kminiak, 2013a).

3.2.1 Kinematika frézování

Indikovaný pohyb řezné hrany má cykloidální tvar, při konstantní řezné i podávací rychlosti (v, u) (Lisičan, 1996). Kinematika oddělování třísky během frézování je znázorněna (obr. 6). Průřez třísky se však může v praxi lišit, z důvodu odlišnosti od nominálního průžezu, a to vlivem otupení břitu, nepřesností chodu vřetena, nepravidelností chodu podávacího zažízení, odchylkami břitů od řezné kružnice a vlivem nestejnorodnosti hmoty a odštipování obrobku (Prokeš, 1978). Dráha břitu obrobku vytváří tvar cykloidy. U větších průměrů frézování nástrojů je řežná rychlost v průměru s rychlostí posuvu mnohem vyšší, proto na místě náběru břitu se dá předpokládat dostatečná přesnost, že jeho dráha řezu tvoří kružnici. Během jedné otáčky v záběru je břit na délce oblouku l, příslušící středovému úhlu $\varphi' + \varphi$. Většinou se při výpočtu délky třísky l uvažuje s úhlem φ, jelikož úhel φ' je velmi malý (Prokeš, 1978).



Obr. 6: Schéma oddělování třísky při válcovém frézování *(Siklienka a Kminiak, 2013a)*

R – poloměr nástroje, D – průměr nástroje, v_c – řezná rychlost, v_f – posuvná rychlost, f_z – posuv zubu, l_v – délka jedné vlny, y_v – výška jedné vlny, e – úběr třísky, S_1 – odříznutá plocha po průchodu řezné hrany, S_2 – obdélníjová plocha se stranami f_z a e, h_{Dmax} – maximální tloušťka třísky, h_{Dstr} – střední tloušťka třísky, l_k – délka oblouku, φ_{str} – úhel posuvného pohybu (střední), φ_{max} – úhel posuvného pohybu (maximální)

3.2.1.1 Výpočet řezné rychlosti

Řezná rychlost je hlavní pohyb.

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

Kde:

D – průměr kružnice [mm]

n – počet otáček za minutu [ot/min]

3.2.1.2 Výpočet posuvné rychlosti

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

Kde:

f – posun na otáčku [mm]

$f_z -$ posuv na zub [mm/zub]

$n -$ otáčky [ot/min]

$z -$ počet řezných hran frézy [ks]

3.2.1.3 Výpočet posuvu na zub

$$f_z = \frac{v_f * 1000}{n * z} \ [mm] \tag{3}$$

Kde:

v_f – rychlost posuvu [m/min]

n – otáčky [ot/min]

z – počet řezných hran frézy [ks]

3.2.1.4 Výpočet hloubky vln

$$y = \frac{f_z^2}{4 * D} \Rightarrow f_z = \sqrt{4 * D * y} \ [mm] \tag{4}$$

Kde:

y – hloubka kinematických nerovností povrchu [mm]

D – průměr hrotnice frézovací hlavy [mm]

f_z – posuv na jeden zub [mm]

n – otáčky nástroje [min^{-1}]

3.2.1.5 Výpočet hloubky rýh

$$y_v = \frac{3*S_1}{h} * f_z \ \ [mm] \tag{5}$$

Kde:

S_1 – vychýlení zubu vlevo

h – výška zubu

f_z – posuv na jeden zub [mm]

3.3 Nástroj pro obrábění

V praxi je řezným nástrojem těleso různých tvarů. Těleso má buď jednu řeznou hranu, popřípadě i větší počet řezných hran, které se rozdělují podle tvaru, velikosti, způsobu pohybu nosného korpusu nástroje a druhu technologie. Z hlediska principu je řezajícím nástrojem každý řezný klín (Lisičan, 1996). Každé těleso klínovitého tvaru, které vniká do dřevitého materiálu, je tvrdší než dřevo a odstraňuje z obráběného materiálu určitý objem tzv. třísku, je brát jako řezný klín. Řezající hrana frézovacích, pilových zubů a ostří vrtáků je považována za samostatný řezný klín. Řezný proces je specifický z důvodu různého typu dřevní hmoty, která má různé uspořádání vláken, dřeňových paprsků a ročních letokruhů. Kvůli odlišnosti dřevní struktury je proces ovlivňován kvalitativně, technicky, ale také esteticky (Lisičan, 1996).

3.3.1 Úhlová geometrie břitu

Úhlová geometrie břitu je velmi důležitá při obrábění, jelikož udává velikost řezných úhlů, které jsou společně s ostatními řeznými podmínkami zásadní pro výkonost strojů a nástrojů, při kvalitě obrobené plochy, rozměrové přesnosti výrobku a hospodárnosti všech druhů obrábění. Velikost řezných úhlů, společně s ostatními rozměry ostatních částí nástroje, je potřeba volit podle řezných podmínek, druhu materiálu a podle materiálu nástroje. Při špatně zvolených řezných úhlech se zhoršuje kvalita obrobené plochy, zrychluje se opotřebení a otupení řezného břitu, a tím je zkrácená životnost nástroje. Dále se zvyšuje řezný odpor a může být ovlivňována

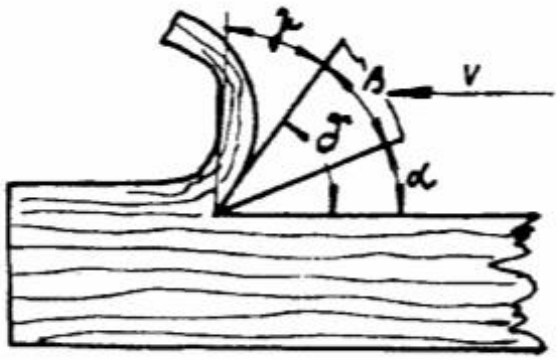
výkonost stroje, společně s hospodárností provozu (Prokeš, 1978). Tvrdé dřeviny a abrazivní hmoty jsou potřeba řezat s většími úhly břitu, zatímco u měkkých dřevin s menší objemovou hmotností a menší pevností jsou používány menší úhly břitu. Součet všech úhlů *α, β* a *γ* tvoří dohromady 90° (obr. 7) (Prokeš, 1978).

$$\alpha + \beta + \gamma = 90° \qquad (6)$$

Velikost odporu obráběného materiálu proti vnikání nástroje je závislá na velikosti úhlu *β*. Tento úhel je brán jako klínovitá část, vnikající do obráběného materiálu, během čeho dochází k oddělování třísky. Čím větší bude úhel *β,* tím vzniká větší odpor obráběného materiálu (Prokeš, 1978). Proto je nejvýhodnější volit co nejmenší úhle břitu.

Tření hřbetu s obráběnou plochou ovlivňuje úhel hřbetu *α*. Čím je menší úhel *α,* tím vzniká větší tření. V případě zmenšení úhlu hřbetu se plocha mez hřbetem a obráběnou plochou zvětší (Prokeš, 1978).

Úhel čela *γ* se zmenšuje a zároveň stoupá řezný odpor, v závislosti na zvětšování úhlu řezu *δ.* Řezný odpor klesá do určité hodnoty úhlu řezu, při zmenšování úhlu řezu (Prokeš, 1978).



Obr. 7: Hlavní úhly řezné hrany *(Prokeš, 1978)*
α – nástrojový úhel hřbetu, β – nástrojový úhel řezného klínu, γ – nástrojový úhel čela, δ – nástrojový řezný úhel

3.3.2 Materiál na výrobu nástroje

Hlavními problémy vznikajícími v procesu obrábění dřeva jsou rozdíly mezi kovem a dřevem, kde velkou roli hrají chemické a fyzikální struktury materiálů. Dřevo má velmi dobrou obrobitelnost. Z tohoto důvodu ho lze frézovat při vysokých otáčkách a vyšší podávací rychlosti. Nevýhodami je obsah vody ve dřevě, která má za následek naleptávání a otupování nástroje a přítomné vady ve dřevě, které způsobují otupení břitů. Z těchto důvodů vyplývá, že křehké materiály nejsou vhodné na výrobu řezných nástrojů (Faga *et. al.*, 2006).

Pro obrábění dřeva a hmot na bázi dřeva jsou materiály na výrobu nástrojů rozděleny (Prokeš, 1978; Humár 2008):

- Nástrojové oceli – legované, nelegované, rychlořezné
- Slinuté karbidy
- Řezná keramika
- Supertvrdé materiály – povlaky CVD a PVD, diamant
- Cermety – keramika s kovem (ceramics a metal)

Nástrojové oceli se používají jako materiál na obráběcí nástroje pro obrábění dřevěných hmot a hmot na bázi dřeva. Nástrojové oceli mohou být nízkolegované či uhlíkové, nekladou-li se na ně příliš velké nároky. U obránění s vysokými rychlostmi obrábění se používají nízkolegované oceli, a to z důvodu většího zahřívání břitu. Nízkolegovaná ocel se používá na řezný nástroj v případě, pokud je po nástroji požadována delší životnost a požadavek na zvýšení opotřebení (Prokeš, 1978).

Nástrojové oceli musí mít vysokou tvrdost, trvanlivost a řezivost. Dále dobrou houževnatost, odolnost proti opotřebení a co nejmenší rozměrovou stálost, během tepelného zpracování a kalení. Požadavky jsou stanoveny podle rozdílných způsobů namáhání nástrojů (Prokeš, 1978).

Vlastnosti vybraných nástrojových ocelí jsou závislé na druhu obráběné dřeviny, druhu nástroje a na pracovním namáhání. Při opracování abrazivnějších materiálů se doporučuje používat odolná ocel, která odolává hlavně proti opotřebení. Houževnatější ocel se naopak doporučuje využívat v případech, pokud je nástroj složitého tvaru, nástroj pracuje s přerušovaným řezem nebo je rázově namáhám (Prokeš, 1978).

Adamcová (2010) z výzkumu zjistila, že u nástrojových ocelí došlo k většímu opotřebení, na rozdíl od rychlořezné oceli, u které vyšly hodnoty s menším opotřebením. U nástrojové oceli dochází k nejmenší odolnosti proti opotřebení, oproti ostatním zkoumaným materiálům. Bylo zjištěno, že největší opotřebení nastává hned v počátku obrábění od 0 – 112 m. Takovéto brzké opotřeben způsobuje otěr částic. V úseku normálního opotřebení dochází k pozvolnému opotřebení.

Slinuté karbidy jsou vyrobeny z pevně spojených směsí, v podobě prášků. Jedná se o karbidy titanu, wolframu a tantalu, spojené pojivy kobaltu. Směs je vyráběna lisováním, kdy některé její složky dosahují teploty tání. Teplota lisování směsi se pohybuje okolo 600 °C (Prokeš, 1978).

Do litých materiálů spadají tvrdé návary, které mají vysoký obsah uhlíků či boru. Z těchto důvodů je nelze tvářet za studena a ve většině případů ani za tepla (Prokeš, 1978). Rozdělení do skupin (Prokeš, 1978):

- Nízkolegované slitiny s obsahem neželezitých prvků < než 20 %
- Slitiny s obsahem legujících prvků > 20 %
- Neželezné návarové slitiny
- Návary obsahující karbidy wolframu

Ideálními materiály pro řezné nástroje, které mají vysokou tvrdost, vyšší tepelnou vodivost a nízkým koeficientem tření jsou diamanty (Sheikh-Ahmad *et. al.*, 2003)

3.3.3 Povlakování nástrojů

Povlakování nástrojů má veliký vliv na zvýšení výkonnosti, a to díky vyšší pevnosti ale především kvůli sníženému třetí během obrábění materiálu. Tento faktor je velmi důležitý, jelikož během obrábění může docházet k vysokému tření. Poté dochází k rychlejšímu otupování řezného nástroje, ztrátě energie, vysokým teplotám, a také vysokým řezným silám. Životnost nástroje je zvyšována právě při použití povlaku. Z důvodu minimalizování poloměru hrany musí být povlak v tenké vrstvě (Sheikh-Ahmad, 2002). Povrchové úpravy aplikované na řezný nůž zvyšují jeho odolnost vůči opotřebení, různým otřesům ale zejména ovlivňují kvalitu konečného produktu (Labidi *et al.*, 2005).

Zvýšit produktivitu obrábění je nejpodstatnějším požadavkem výrobců nástrojů. Nejdůležitějším hlediskem je snižování nákladů na chlazení a likvidace řezných kapalin, které byly využity při obrábění, poté následuje zvyšování životnosti nástroje. To není po ekonomické stránce až tak důležité, v porovnáním s předchozími body. Celkové porovnávání výkonosti nástrojů s různými PVD povlaky, je zároveň ovlivňováno i řeznými parametry, a ty dále mají vliv na produktivitu obrábění. Z tohoto pohledu je zřejmé, že čím je vyšší zatížení nástroje, tím důležitější roly hrají nástroje s vysokou chemickou a tepelnou stabilitou (Šíma *et al.*, 2007; Holubář *et al.* 2009). V dnešní době u moderních metod obrábění jsou PVD povlaky již nezbytné pro co nejlepší konečný výsledek povrchu (Šíma *et. al.*, 2004).

Hlavními výhodami povlakování nástrojů oproti nástrojů bez povlakování je výrazně zvýšená životnost. Výhody se projevují zejména u středních a vyšších řezných rychlostí obrábění (Holubář *et al*., 2011a). Kluzné PVD povlaky mají velmi důležitou roli při obrábění. Jejich přínos je především znát v několika bodech (Zindulka *et al.*, 2005):

- vylepšení kluzných vlastností
- mezi obrobkem a vrstvou je výrazně snížena přilnavost
- řezné síly jsou snížené a zároveň mají plynulejší průběh
- nástroj zabíhá rovnoměrněji
- zamezuje se tvorbě nárůstků

3.3.3.1 Aplikace povlaků

Před samotným povlakováním nástrojů pomocí PVD technologií je potřeba provést mokré čistění nástroje a fyzikální iontové čistění u procesu PVD. Kromě standartního čistění dochází také z pískové a další mechanické úpravě, která má docílit odstranění nečistot. Procesy před samým povlakováním zvyšují adhezi povlaků u nástrojů. Někdy dochází k mechanické úpravě i po povlakování, z důvodu snížení drsnosti povrchu nástroje. Aplikace PVD povlaků se používá z několika hledisek. Týkají se především výjimečných vlastností, ke kterým patří velmi vysoká tvrdost, nízká chemická afinita u obrobků, nízký koeficient frikce a vysoká oxidační a tepelná odolnost (Holubář *et al.*, 2005).

Na povlakování nástrojů, kterými jsou vyměnitelné břitové destičky pro řezání a tváření, existují dva typy metod. První metodou je CVD (Chenucal Vapour Deposition),

která používá na opracování chemickou směs reaktivních plynů (např. $TiCl_3$, $AlCl_3$, CH_4, apod.). Směs je zahřívána na relativně vysokou teplotu pohybující se od 900 °C do 1100 °C. Druhou metodou je PVD (Physical Vapour Deposition), jenž je zaměřená na fyzikálním principu. Mezi ně náleží odpaření či odprášení materiálu, které jsou obsažené v povlaku (Ti, Al, Cr, Si apod.), dále také jejich ionizace a následující nanášení na nástroj (Zindulka, 2004).

3.3.3.2 Metody CVD a PVD

PVD technologie povlakování je velmi šetrná k životnímu prostředí, zejména kvůli absenci chemických látek a plynů, ale také díky dalšímu využití nespotřebované energie, vzniklé během procesu. Metoda pracuje na fyzikálním principu odpařování a odprašování materiálu. Během odpařování se mohou uvolňovat čisté kovy, do kterých patří titan, chrom, hliník a zirkon, nebo dále jejich slitiny a příměsi, jako je nikl, křemík, hafnium atd. Otěruvzdorné PVD povlaky jsou tvořeny nitridy těmito prvky. Pro tvorbu nitridů je zapotřebí dusík v podobě plynu, přítomného v atmosféře přibližně ze 78%. Argon o 1% obsahu v atmosféře doprovází nitrid. Celý proces PVD technologie probíhá ve vakuu, kde při jeho spalování odchází zplodiny, hned v první plynné fázi, jelikož ve vakuu se nedokážou přeměnit na oxidy. Jedná se o zbytky dusíku a argonu (Holubář *et al.*, 2005; Mrkvica *et. al.*, 2016). PVD povlaky se mohou využívat pro nástroje s velmi ostrou hranou s poloměrem pod 20 μm (Mrkvica *et. al.*, 2016).

Na rozdíl od metody PVD má metoda povlakování CVD dost nevýhod. Jedná se o vysokou teplotu, větší množství odpadu a využívání rizikových plynů. Obě technologie povlakování se navzájem konkurují a zároveň doplňují. Výhodnější je však metoda PVD, z důvodu ekologického pohledu (Holubář *et al.*, 2005).

Metody povlakování mají hlavně dopad na ekonomický přínos. Při povlakování dochází ke zjednodušení, to znamená zvýšení životnosti nástroje, tím pádem se zvyšuje i ekonomika. Cena nástroje společně s povlakováním tvoří v celém procesu obrábění jen nepatrné procento. Proto zvýšená či snížená živostnost nástroje má minimální vliv na ekonomický dopad. Podle průzkumů světových výrobců nástrojů je obráběcí proces rozdělen procenty (Holubář *et al.*, 2005):

- Obráběcí nástroj: 5%
- Obráběný materiál: 17%

- Stroje a jejich vybavení: 26%
- Osobní náklady: 32%
- Režie: 20%

3.3.3.3 Úprava nástrojů před povlakováním CVD a PVD

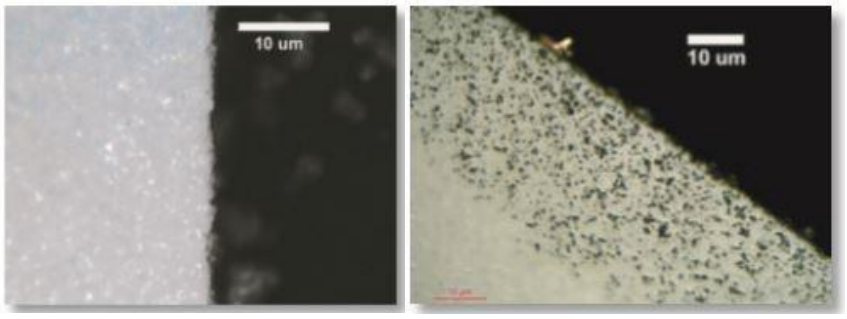
Prvním krokem před samotným povlakováním je odmaštění, ke kterému se dříve používal benzin a petrolej. V současnosti jsou nástroje odmašťovány více ekologickými prostředky. Jedná se o průmyslová odmašťovadla na bázi ropných derivátů, které mají přísné ekologické normy. Odmašťovadla obsahují dearomatizované uhlovodíky a tenzidy zabraňující nadměrnému odpařování a způsobují dobrou smáčivost. Odmašťující proces probíhá v jednoduchých zařízení podle velikosti nástroje a kapacit (Holubář *et al.*, 2005).

Dalším krokem je mokré čištění, do kterého spadají kombinované metody. Zejména jednoduché oplachy, tlakové oplachy, elektrochemické metody, ultrazvuky a vakuové sušení. Mokré čistění probíhá v průmyslovém zařízení, do kterého patří mycí linky. Ty mají několik samostatných mycích a oplachových van, popřípadě jednotlivé vany s automatickými výměnami technologických lázní. K čistění se většinou používají kapalné čistící prostředky. Jsou dávkovány dávkovacím čerpadlem přímo do mycí lázně. Čistící proces je vykonáván v alkalickém prostředí. Nejznámějšími roztoky jsou takové, které obsahující KOH a NaOH. V případě potřeby zvýšení účinku odmaštění mohou být roztoky kombinovány s nepatrným množstvím přídavků tenzidů, popřípadě i citronovými a fosforečnými kyselinami. Lze kombinovat zásadité a kyselé prostředí v oddělených nádobách, a tím se dosahuje zvýšení čistícího účinku. Po čistění se pokračuje oplachy. Ty zajišťují odstranění zbytků čistících lázní a zároveň chrání očištěný povrch před korozí pasivátorem. Nejideálnějšími jsou pasivátory s krátkou dobou působení, přibližně do 2 dnů. Pasivátory společně s oplachovými lázněmi bývají kombinovány, z důvodu minimalizování obsahu solí a ostatních rozpustných látek ve vodě. Kvůli tomuto problému je potřeba používat čistou oplachovou vodu. Pasivátory často obsahují neionogenní tenzidy, alkoholy a organické soli. Aby byl povrch kvalitní a bez zbytkových map, je velmi důležité rychlé osušení smáčeného povrchu. Na sušící proces existuje několik metod, využívající odstřeďování zbytkové kapaliny, odpařování zbytkové kapaliny ve vakuu nebo na vzduchu (Holubář *et al.*, 2005).

Pískování nebo-li mikropískování je metoda používající pří sériové výrobě. Pískováním jsou z povrchu odstraňovány pevně uchycené nečistoty, nebo nečistoty zanesené v pórech materiálu. Nejčastěji se používají abraziva SiC a Al_2O_3. Důležitý výběr je kladen na běžná média a jejich rezidua, která mohou negativně působit na adhezi povlaku nástroje. Abrazivní zrna se pohybují ve velmi malých hodnotách 20 až 100 μm. Parametry pískování musí respektovat nástroj, jeho plochy a břity, kvůli zabránění negativních vlivů, jakými je například zaoblení hran (Holubář *et al.*, 2005).

Odjehlení se využívá nejčastěji u nástrojů u HSS. K aplikaci se využívá kartáčování či ruční odjehlení. Pokud je následujícím procesem povlakování, je potřeba dodržet určité podmínky. Především materiál kartáčů, které musí být s plastovým vlasem nebo mosazné kartáče. Ruční odjehlení probíhá pilníky nebo tkaninami s abrazivy (Holubář *et al.*, 2005).

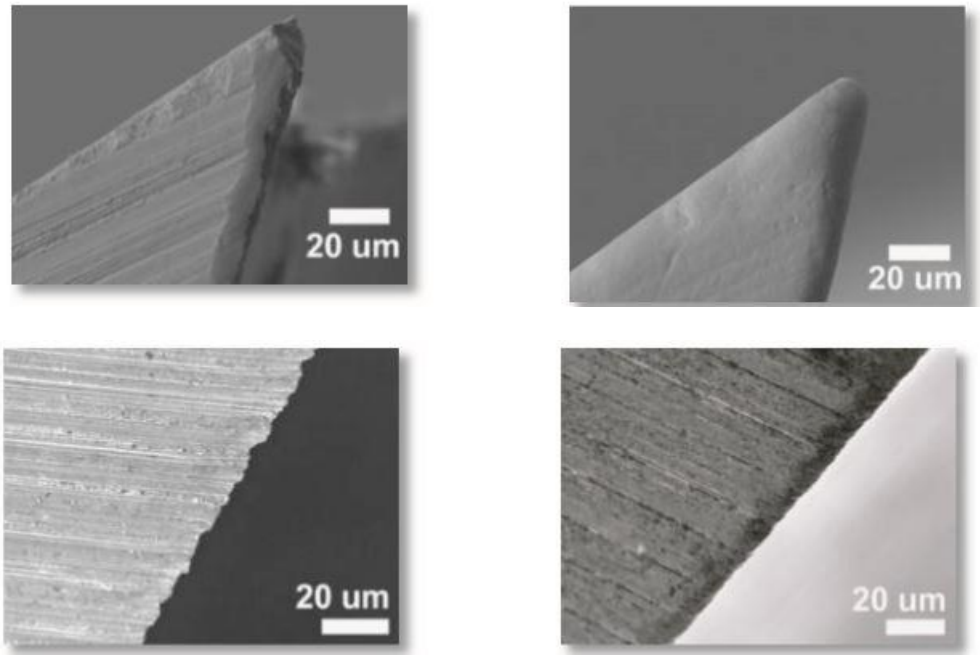
Odstraňování starých povlaků je nazýváno stripping. Provádí se chemickým nebo elektrochemickým způsobem. Povlaky odstraňují silná oxidační činidla a účinek elektrického proudu. Povlaky nástrojů z HSS se odstraňují roztoky peroxidu vodíku, vody a tetranatriumdifosfátu. Celý proces se provádí horkým peroxidem s teplotou kolem 70°, po kterém je potřeba povrch opláchnout a na krátkou dobu pasivovat činidlem (obr. 8). U nástrojů vyrobených z HM je technologie složitější a komplikovanější. Při špatně zvolené technologii může být narušena struktura povrchu, čím dochází k vyleptávání kobaltu (obr. 8). Reaguje negativně na zásadité či kyselé prostředí. Kobalt se naleptává a tím omezuje využití nástroje. I v tomto procesu je používán peroxid vodíku, ale ve značně menší koncentraci a při pokojové teplotě (Holubář *et al.*, 2005).



Obr. 8: Provedení stripping (vlevo - správné provedení, vpravo - špatné provedení)
(Holubář et. al., 2005)

Proces žíhání probíhá ve vakuu, kde se teplota blíží k povlakové teplotě. Je tím zabráněno znečistění vakuové komory, během dalšího kroku, a to samostatný proces povlakování. Metoda má pozitivní účinek na nástroje s chladícími otvory, v případě, že čistící metoda není dostačující a neodstraňuje všechny nečistoty stoprocentně. U materiálů HSS je žíhání doporučené, ovšem ve většině případů jde o záležitost přímo výrobce nástrojů (Holubář *et al.,* 2005).

Do mechanických úprav nástroje lze řadit omílání v granulátech, přičemž dochází k mikroúpravě břitů. Po provedení omílání má břit mnohem lepší adhezi vrstev. Nerovnosti na břitech způsobuje především geometrie broušení, kvalita obsluhy CNC brusek, kvalita HM substrátů a brusných kotoučů, a tím je ovlivňován řezný výkon. Pokud se následně aplikuje povlak PVD může dojít ke zhoršení, při kterém dojde k olupování povlaku na ostrých hranách. Aby se dalo této chybě předejít je doporučeno omílání se správně zvolenými abrazivy a granuláty (obr. 9) (Holubář *et al.,* 2005).



Obr. 9: Mikroúprava břitu omíláním (vlevo bez úpravy, vpravo s úpravou) *(Holubář et. al., 2005)*

Po povlakování je zapotřebí odstranit veškeré makročástice a snížit tím drsnost břitů s plochami. K této fázi napomáhá leštění prováděné třemi způsoby. Využívá se ruční leštění tkaninami s abrazivem, kartáčování či omílání. Úprava leštěním zajišťuje delší životnost nástroje a kvalitu obrobeného materiálu (Holubář *et al.,* 2005).

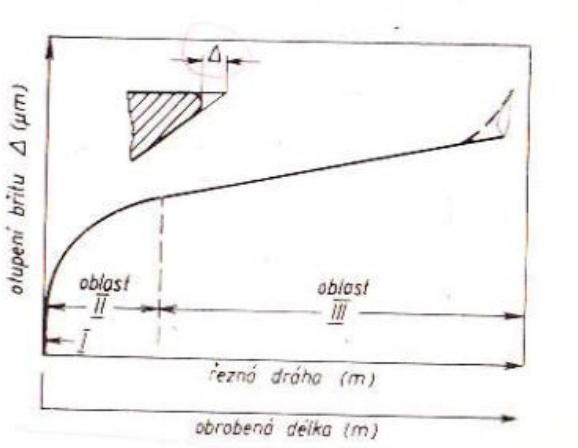
3.4 Otupování nástroje

Nástroj během řezání dřevitého materiálu ztrácí schopnost řezat. Problém je způsoben postupným otupováním, přičemž se mění mikrogeometrie břitu. K otupení nástroje dochází, kvůli oddělování částeček kovu z břitu. Příznaky tupého nástroje jsou pozorovány zejména na obráběném materiálu. Mezi hlavní body kritického stavu otupení patří zhoršení kvality povrchu obrobku, rozměrové nepřesnosti a pálení obrobku. Otupení lze poznat i na stroji, u kterého dochází ke zvýšení nežádoucí řezné síle (Prokeš, 1978). Jelikož při zpracování dřeva nedochází k procesu chlazení, je nezbytná dobrá tepelná vodivost nástrojů. Otupení břitu a opotřebení nástroje ovlivňuje především teplota řezného nástroje, a to z důvodů primárních vlastností materiálu nástroje, kterými jsou tvrdost, lomová houževnatost a chemická stabilita. Generované teplo při řezání obrobku negativně ovlivňuje přesnosti výrobku, jejich kvalitu, a především životnost nástroje. Zásadním opotřebením nástroje při řezání dřevitého materiálu je otěr, lze také pozorovat erozi materiálu nástroje společně s jeho otupováním hran, což zužuje možnosti aplikace nástroje (Bendikiene *et al.,* 2017).

Trvanlivost řezného klínu lze vyjádřit jako životní cyklus, který je násobkem. Životní cyklus je možno vyjádřit jednotkami délky. Trvanlivost nástroje je doba, kterou dokáže naostřený klín pracovat (Barcík, 2011).

3.4.1 Proces otupování

Průběh otupování platí pro břity z nástrojové oceli, slinuté karbidy, stelity ale i pro keramické materiály. Vzdálenost otupení břitu Δ je v závislosti s délkou odebírané třísky, tento proces značí (obr. 10) (Prokeš, 1978).



Obr. 10: Průběh otupování břitu *(Prokeš, 1978)*

Proces otupování má tři po sobě jdoucí období:

Během frézování dokáže naostřený nůž udržet mikrogeometrii jen velmi krátkou dobu. Experimenty Keturakis a Juodeikiené (2007) přinesly výsledky ukazující otupení řezné hrany převážně v první periodě, přičemž první perioda nastává ve velmi krátké době po naostření.

První období patří do nejkratšího časového úseku, kdy je břit otupen hned při prvním kontaktu s obrobkem. Dochází k ohnutí nebo odlomení jehly, která je vidět pouhým okem či případným zvětšením. V období druhém má křivka prudce stoupající tendenci, přičemž dochází k degresivnímu charakteru. Období třetí je proces opotřebení stabilizován a mění se mikrogeometrie nástroje. Ta probíhá ve většině případů o dost pomaleji a průběh křivky je lineární. U samostatných zrn nedochází k otupení, pouze k vylomení (Prokeš, 1978).

3.4.2 Příčiny otupení břitového nástroje

Otupení břitu je řazeno do kategorie mechanického opotřebení. K mechanickému oddělení částeček u břitu dochází, pokud je vnější síla, působící mezi nástrojem a obrobkem, větší než síla částeček, kterou jsou na sebe vzájemně vázány. Množství odírajících částeček, které jsou přesahující, je závislé na drsnosti povrchu břitu. Čím drsnější je povrch, tím snadněji se částečky mohou odírat. U procesu otupování dochází k čistě mechanickému opotřebení pouze v prvním fázi. U druhé i třetí fáze dochází

společně s opotřebením břitu, také k mechanickému otěru. Otěr může být také při zahřátí povrchové vrstvy břitu, působením vysoké teploty (850 °C). Dalšími vlivy jsou elektrochemická koroze a elektrická eroze. Elektrochemická koroze je ovlivněna kyselinami, působících ve dřevě společně s vlhkostí dřeva. Elektrická eroze je opakem elektromechanické koroze, jelikož dochází vlivem tření suchého dřeva a nástroje ke vzniku statické elektřiny (Prokeš, 1978).

Otupování břitů je pozorováno nejčastěji při zhoršených řezných podmínkách obrábění, z důvodu růstu řezné síly, složitějším posuvem obrobku, nekvalitním obráběným materiálem, a v neposlední řadě pálením obráběného materiálu (Prokeš, 1978). Týká se to především příliš velké výšky při opracování a velké hloubky záběru při frézování.

3.5 Frézovaný materiál

Při obrábění materiálu je důležité vzít v potaz fyzikální a mechanické vlastnosti. Mezi fyzikální vlastnosti patří schopnost pojmout určité množství vody volné, objemová hmotnost, hygroskopicita, elektrická vodivost a tepelná vodivost. Zatím co do mechanických vlastností patří tvrdost, pevnost a plastičnost. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva ovlivňuje několik faktorů. Hlavním faktorem je anatomická a chemická stavba dřeva a místo stanoviště, na kterém dřevina vyrostla (Prokeš, 1978). I technologické vlastnosti dřeva jsou důležitým faktorem při opracování materiálu. Do těchto vlastností patří štípatelnost, obrobitelnost, dělivost a také tvárnost. Na řezném odporu se výrazně podepisuje vlhkost dřeva s objemovou hmotností.

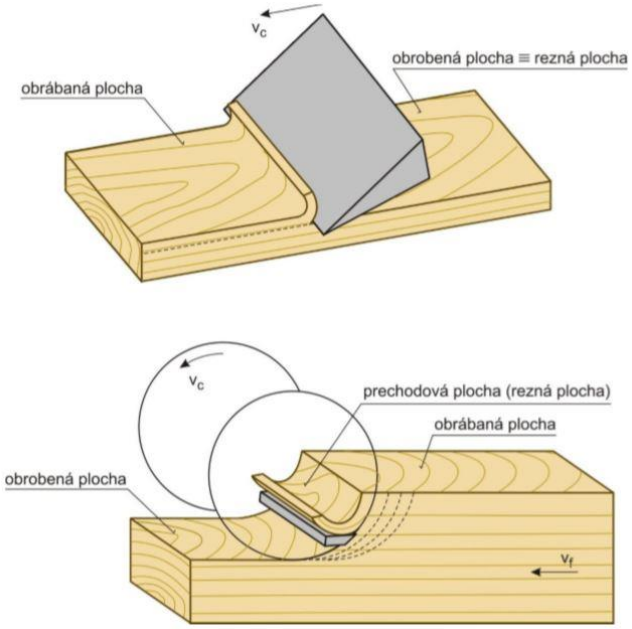
Obrobek se skládá ze třech druhů ploch (obr. 11) (Siklienka a Kminiak, 2013a):

- Obráběná plocha
- Přechodová plocha (řezná plocha)
- Obrobená plocha

Obrobená plocha je taková, která je obrobená řezáním, přičemž je odstraněna a nahrazena nově vzniklou plochou.

Přechodová plocha se vytváří za řeznou hranou nástroje. Přechodovou plochou je nazýván povrch, který se vytváří na obrobeném materiálu, působením řezné hrany v čase zdvihu, otáček nástroje a také obrobku (Siklienka a Kminiak, 2013a).

Obrobená plocha vzniká stejně jako obalová plocha částí přechodové plochy. Požadavky na definovaný tvar jsou dosaženy po procesu obrobení či dělení. Tedy přesný tvar a rozměr s geometrickými odchylkami obrobku vznikají po dokončení operace (Siklienka a Kminiak, 2013a).



Obr. 11: Základní plochy obrobku *(Siklienka a Kminiak, 2013a)*

3.6 Metody hodnocení kvality povrchu

Kvalita obrobení dřeva je hodnocena podle jakosti povrchu a přesnosti obrobku. I u dokonale obrobeného povrchu dřeva se nachází určitá drsnost, v horším případě vlnitost. Měření povrchu se rozděluje do dvou skupin. Jedná se o dotykové nebo-li kontaktní a bezdotykové. Pro zjišťování kvality obrobeného povrchu existuje několik metod. Od jednodušších, méně přesných až po velmi přesné metody.

Rozdílnost mezi drsností a vlnitostí povrchu je velmi špatně rozeznatelný pouhým okem. Drsnost s vlnitostí nelze hodnotit jednotlivě (Rousek, 2012b).

3.6.1 Dotyková metoda

Častěji využívaná je dotyková metoda. Hlavním prvkem této metody je hrot, který má za úkol opisovat povrch obrobeného dřeva. Hrot je propojen s měřícím přístrojem, který všechny data zapisuje a vyhodnocuje výsledky nerovnosti povrchu. Nevýhodou dotykové metody je delší doba zjišťování, a také méně přesné měření. Dotyková metoda je dále rozdělena do dvou skupin. Hlavní roli hraje snímač, který je buď absolutní nebo relativní. Pokud se dotýká povrchu pouze hrot, jedná se o absolutní snímač. Relativní snímač je přesouvám pomocí opěrných patek a hrot kopíruje povrch. Přístroj se skládá z několika částí, do kterých patří měřící jednotka, posuvna jednotka, snímač a rameno, pohybující se ve dvou směrech (horizontálně, vertikálně). U dotykové metody vzniká nevýhoda v případě, že na měřený povrch bude působit větší síla raménka a způsobí na povrchu nevyžádanou rýhu (Rousek *et al*., 2010).

3.6.2 Bezdotyková metoda

Bezdotyková metoda pracuje na principu odrazu paprsku od obrobeného povrchu zkoumaného dřeva. Paprsek míří poté do měřící sondy, která vyhodnocuje nerovnosti povrchu. I přes všechny výhody této metody, do kterých spadá rychlost a přesnost zjišťování nerovností, je velkou nevýhodou, pokud má zkoumaný vzorek větší nerovnost, kterou bezdotyková metoda nedokáže zpracovat. Stejně jako dotykové metody, tak i bezdotykové metody jsou rozděleny podle snímačů. Bezdotyková metoda je velice přesná a čím dál žádanější a využívanější. Do bezdotykové metody patří několik systémů. Zejména fotometrické hodnocení, laserové, skenovací, elektronické, optické, rastrové apod. (Rousek *et al*., 2010).

3.6.3 Vizuální metoda

Vizuální metoda je ze všech metod hodnocení povrchu ta nejjednodušší. Hodnotí se pouhým okem, popřípadě s použitím lupy nebo mikroskopu. Metoda je ovšem dosti nepřesná, protože kvalita povrchu je hodnocena lidským faktorem. Využívá se na odhalení trhlin, větších vad, po opracování povrchu nahrubo a při hodnocení kvality nátěru (Rousek *et al*., 2010).

3.6.4 Porovnávací metoda

Porovnávací metoda je složena z dotykové a vizuální metody, které jsou využívány společně s etalony. Stejně jako vizuální metoda i porovnávací metoda je spojena s lidským faktorem, ovšem jedná se o preciznější a přesnější metodu. Porovnávací metoda probíhá dotykem na povrchu, u kterého se zjišťuje kvalita a tím je posuzována jeho drsnost. Tato zjištěná drsnost se následně srovnává podle vytvořené stupnice. Porovnávací metodu by měli provádět zkušení odborníci, kteří mají dlouhodobé zkušenosti v tomto oboru. Veškeré poznatky při zkoumání povrchu jsou založeny na experimentálním hodnocení (Rousek *et al*., 2010).

3.7 Faktory ovlivňující proces řezání

Siklienka a Kminiak (2013a) rozdělují procesy ovlivňující řezání do třech skupin:

- Faktory týkající se obrobku - vliv dřeviny, vliv vlhkosti, vliv teploty
- Faktory týkající se nástrojů – vliv řezného klínu a úhlu nástroje, vliv opotřebení a řezného klínu, vliv řezné rychlosti
- Faktory týkající se současně obrobku a nástroje – vliv modelu řezání, vliv hloubky třísky.

3.8 Faktory ovlivňující kvalitu povrchu

Při přesnostech obrábění mají vliv (Prokeš, 1978):

- obráběcí stroje (přesnosti jednotlivých částí, druhy, typy strojů, seřízení strojů),
- obráběcí nástroje (jejich tvar, opotřebení, upnutí, tuhost),
- pomocné stroje a jejich zařízení (vedení strojů, podávací zařízení, upínací zařízení, dopravníky apod.),
- pracovní postupy, vlastnosti obrobků, rozměry, velikosti přídavků na obrábění, způsoby odstraňování odpadu, rychlosti posuvu, řezné rychlosti, tloušťky vrstev odebírané nástroji.

3.9 Kvalita obrobeného povrchu

I přes nejpreciznějí obrobený materiálu je na dřevitém povrchu značná drsnost či vlnitost. Drsnosti povrchů jsou vyznačovány několika faktory, které se projevují na obrobené části materiálu. Do faktorů drsnosti se zahrnují především makroskopické a mikroskopické prohlubně, různé velikosti vyvýšenin, rýhy nebo svazky dřevních vláken, které jsou částečně vytrhané. Nerovnosti obrobených ploch jsou skoro pokaždé nepravidelné. Na rozdíl od drsnosti je vlnitost označována za pravidelnou, u které se vyvýšeniny i prohlubně, přibližně s podobnými rozměry i tvary opakují. Drsnost i vlnitost povrchu je velmi důležitá při povrchové úpravě obrobku ale i při jeho konečném vzhledu. Ztráta surovin není tedy způsobena drsností a vlnitostí ale nepřesností tvarů a rozměrů obráběného materiálu (Prokeš, 1978; Lisičan, 1988).

Podle výzkumu Laina *et al.* (2017) došlo k zjištění, u kterého je zřejmé, že tvrdost dřeva ovlivňuje konečnou drsnost povrchu. Při zvyšující se tvrdosti dřevin se zhoršují výsledky drsnosti povrchu.

Ze získaných poznatků Korkut a Akgül (2007), kteří testovali vazbu mezi počáteční teplotou sušení a drsností, společně s vlnitostí, došli k výsledku následnému. Konečná kvalita povrchu se zvyšuje, pokud je dřevina sušena na vyšší teplotu.

Drsnost i vlnitost povrchu mají několik činitelů, které je ovlivňují (Prokeš, 1978):

- Způsob jakým je tříska oddělována; je vázán jak na způsob obrábění, tak i na nepřesnosti chodu nástroje, které jsou způsobeny v důsledku přípravy nástroje, vibracemi, upnutím, ale také geometrií nástroje;
- řezné podmínky, kterými jsou řezná rychlost, podávací rychlost, tloušťka třísky a hloubka záběru;
- vlastnosti obrobku, zásadní problém je u křehkých materiálů (např. dekorační vrstvy), kde se vylamují částečky a tím se nevytváří tříska.

Pokud jsou obráběny dřeviny měkké a řídké, je jejich drsnost povrchu se stejnými podmínkami větší než u dřevit s větší hustotou (Prokeš, 1978). Příkladem je porovnání lípy a habru.

V minulosti posuzování vlnitosti a drsnosti probíhalo pouze zrakem a hmatem. Povrch by třízen do několika skupin (hladký, vlnitý, chlupatý, s rýhami a povrch

s vytrhanými vláky). V dnešní době k posuzování kvality povrchu slouží různé druhy přístrojů (Prokeš, 1978; Siklienka a Kminiak, 2013a).

Požadavky na profilometry (Siklienka a Kminiak, 2013a):

- délka mřeného úseku musí být dostatečně dlouhá
- rozsah měření od μm až po 1 mm i více
- u dotykového přístroje musí být tlak snímaného hrotu minimální
- rozpoznání vlnitosti od drsnosti povrchu
- změřit i skryté vytrhnutí vláken
- měřením nepoškodit testovaný povrch
- minimální pracnost s měření

Měření drsnosti a vlnitosti se nejčastěji používají přístroje, pracující na principu dotykové metody či optické metody. Méně využívanými jsou metody pneumatické, fotoelektrické a metoda, při kterých se nanáší pasty (Prokeš, 1978).

4 METODIKA

Metodika diplomové práce je rozdělena do bodů podle stanoveného cíle.

Vybrané faktory:

1. Obráběný materiál: iroko (IR), mahagon (MH)
2. Materiál nástroje: fréza TM1, fréza TM2, fréza TM1 CrTiN.
3. Podávací rychlost: 4 m/min, 8 m/min, 11 m/min.
4. Otáčky hřídele: 3000 ot/min, 6000 ot/min, 9000 ot/min.

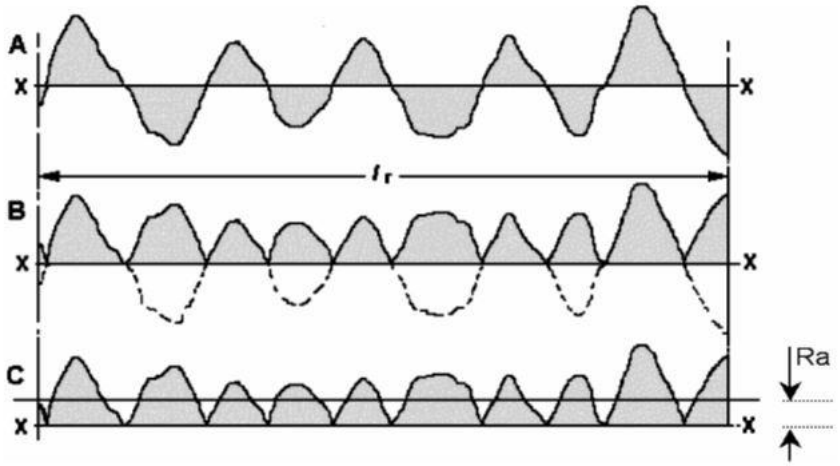
Sledované charakteristiky, které jsou:

1. Kvalita povrchu, která byla hodnocena pomocí:

- Ra – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti,
- Rz – největší výška profilu drsnosti,
- RSm – průměrná šířka prvku profilu drsnosti,
- Wa – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu vlnitosti,
- Wz – největší výška profilu vlnitosti,
- WSm – průměrná šířka prvku profilu vlnitosti.

Grafické znázornění odvození hodnoty Ra (obr. 12) (Havelková *et. al.*, 2014):

A. proložení středové čáry
B. absolutní hodnota odchylky
C. výpočet průměrné hodnoty odchylky



Obr. 12: Výpočet parametru Ra *(Havelková et. al., 2014)*

4.1 Použité materiály

Pro frézování byly použity tropické dřeviny. Jednalo se o dřevinu mahagonu a iroka (tab. 1).

Mahagon se využívá jako dekorativní materiál kvůli zajímavé kresbě. Využívá se především pro výrobu nábytku, obložení, hudebních nástrojů a dveří. Výhodami mahagonu jsou jeho výjimečné vlastnosti, do kterých patří tvarová stálost a odolnost. I v tenké vrstvě zůstává obrobek stabilní, bez jakéhokoliv kroucení. Velikou výhodou je opracovatelnost, která může být zakončena leštěním do vysokého lesku. Mahagon z velké části odolává vlhkosti a díky této vlastnosti je dosti odolný vůči houbovým chorobám. Kmeny stromů dorůstají do velkých průměrů, čímž poskytují velké kusy řeziva o větších rozměrech a bez růstových vad.

Iroko má uplatnění především v interiéru ale i v exteriéru. Nejčastěji je používáno na dřevěné podlahy, schody a při výrobě nábytku. Dřevina postupem času má tendenci na vzduchu tmavnout. Jádrová část iroka má výbornou odolnost vůči vodě, proto je ideální do exteriéru, kde může přijít od kontaktu s deštěm i sněhem a to bez impregnace. Přesto jeho výdrž v těchto podmínkách je 25 let. Pokud je použit olej, je jeho trvanlivost ještě prodloužena. Bělová část není na rozdíl od jádrové části odolná vůči vodě a je velmi náchylná na napadení dřevokazným hmyzem. Po vysušení je poměrně tvarově stabilní s nízkou tendencí ke kroucením a jiným deformacím.

Tab. 1: Vlastnosti materiálů

Vlastnosti materiálů		
Označení	**Název**	**Hustota [kg/m³]**
HM	Mahagon	700
IR	Iroko	650

4.2 Použité nástroje a frézovací hlava

Nástroje, které byly použity na obrábění jsou frézovací žiletkové nože. Využívány byly tři rozdílné typy.

4.2.1 Frézovací žiletkové nože

Při frézování byly použity tři typy nástrojů (obr. 13; 14). Jedná se o typové označení nožů (TM 1) Leitz 5086, (TM 2) Leitz 6906 a jako poslední byl použit typ nože (TM 1 CrTiN) Leitz 5086 s povrchovou úpravou v podobě povlaku CrTiN, kvůli zlepšení jeho kvality a kvality povrchu obrobeného materiálu (tab. 2; 3). Povlak CrTiN byl vyroben a aplikován na nástroj společností SHM Šumperk. Na povrch byl aplikován metodou PVD (physical vapour deposition). Všechny žiletkové nože, které byly využity na obrábění, byly zakoupeny u firmy Leitz v určitém množství.

Obr. 13: Žiletkové nože

Obr. 14: Žiletkové nože

Tab. 2: Vlastnosti použitých nástrojů

Vlastnosti použitých nástrojů				
Označení	**Materiál**	**Typ**	**Výrobce**	**Rozměry [mm]**
TM1	Tvrdokov TM-05	Leitz 5086	Leitz CO.	50x12x1,5
TM2	Tvrdokov TM-03F	Leitz 6906	Leitz CO.	50x12x1,5
TM1 CrTiN	Materiál TM1 + povlak CrTiN	fréza s povlakem	SHM Šumperk	50x12x1,5

Tab. 3: Technické parametry použitých nástrojů

Technické parametry použitých nástrojů							
Označení	**Mikrotvrdost [Gpa]**	**Ra [µm]**	**Wa [µm]**	**Úhlová geometrie**			
				Úhel hřbetu α	**Úhel břitu β**	**Úhel čela γ**	**Úhel řezu δ**
TM1	17	0,264	0,229	10°	60°	20°	70°
TM2	22	0,205	0,259				
TM1 + CrTiN	30	0,154	0,082				

4.2.2 Frézovací hlava

Při frézování byla použita čtyřnožová frézovací hlava s rozměry 125x50x30 mm. Jejím výrobcem je společnost Felder. Během frézování byly použity dvě stejné frézy. Otáčky vřetene byly 3000, 6000 a 9000 ot/min se souvisejícími řeznými rychlostmi 20, 40 a 60 m/s, které byly vypočteny pomocí vzorce:

$$vc = \frac{\pi * D * n}{60 * 1000} \text{ [m/s]} \quad (7)$$

Kde:

vc – řezná rychlost [m/s]

D – průměr frézovací hlavy [mm]

n – otáčky frézovací hlavy [ot/min].

4.3 Strojní vybavení

Mezi strojní vybavení patřila frézka, podávací zařízení a formátovací kotoučová pila.

4.3.1 Frézka

Pro obrábění podélného masivního materiálu je určena spodní svislá frézka FVS (ED, APT Line II, Tuttlinger, Německo). Její řezná rychlost a vyžádané otáčky stroje se mohou nastavit pomocí klínového řemenu, který lze přehodit a tím jsou přenastaveny parametry (tab. 4).

Tab. 4: Parametry spodní svislé frézky FVS, ED, APT Line II (Tuttlinger, Německo)

Spodní svislá frézka FVS, ED, APT Line II (Tuttlingen, Německo)				
Proudová soustava	**Příkon**	**Otáčky [ot/min]**	**Řezná rychlost - průměr hlavy 125 [m/s]**	**Rok výroby**
360/220 V	4 kW	3000; 4500; 6000; 9000	20; 30; 40; 60	1975

4.3.2 Podávací zařízení

Pro posun podélných dílců z masivního dřeva je využito podávací zařízení od firmy MAGGI (tab. 5). Vyznačuje se čtyřmi rychlostmi a pohybem vpřed a vzad. Změna prvních dvou rychlostí se provádí změnou ozubených kol, které jsou uložené za krytem převodovky. Další rychlosti jsou měněny pomocí otočením páčky vypínače umístěné na motoru, s dvojitým vinutím. Rozmezí otáček je 1400 až 2800 ot/min. Podávací zařízení je možno nastavit do potřebné pozice, a to pomocí přestavitelného stojanu.

Tab. 5: Parametry podavače MAGGI, STEFF 2034

Podavač MAGGI, STEFF 2034				
Motor	**Příkon kW**	**Otáčky [ot/min]**	**Podávací rychlost [m/min]**	**Rok výroby**
400 V	0,6 - 0,8 kW	1400/2800	4; 8; 11	2005

4.3.3 Formátovací kotoučová pila

Pro řezání masivního dřeva je vhodná formátovací kotoučová pila SCM si300 class (tab. 6). Součástí pily je pracovní stůl, který je v délce 3200 mm. Materiál pracovního stolu je vyrobený z hliníkové slitiny s povrchovou úpravou.

Tab. 6: Formátovací kotoučová pila SCM si300 class

Formátovací kotoučová pila SCM si300 class			
Výkon motoru	**Otáčky [ot/min]**	**Maximální výška řezu**	**Rok výroby**
4 - 5 kW	**4000**	**100 mm**	**2012**

4.4 Přístrojové vybavení

Do přístrojového vybavení je zahrnut kontaktní profilometr FORM TALYSURF 50 Intra.

4.4.1 Kontaktní profilomert FORM TALYSURF 50 Intra

Měření drsnosti povrchu se zjišťuje pomocí kontaktního přístroje FORM TALYSURF 50 Intra, který dokáže změřit kvalitu určeného povrchu s 50 mm horizontální délkou snímání. Na 50 mm je úchylka přímosti 0,4 μm. Kontaktní profilometr zaznamenává chybu měření ± 2 %.

4.5 Zjištění hustoty a vlhkosti

4.5.1 Zjištění hustoty

Hustota vzorků byla měřena podle normy ČSN EN 323 (1994).

Výpočet hustoty:

$$\delta_w = \frac{m_w}{a_w * b_w * l_w} = \frac{m_w}{V_w} \ [kg/m^3] \qquad (8)$$

Kde:

m_w – hmotnost zkušebního tělesa při určité vlhkosti w [kg]

V_w – objem zkušebního tělesa při určité vlhkosti w [m^3]

δ_w – hustota zkušebního tělesa při určité vlhkosti w [kg/m^3]

a_w, b_w, l_w – rozměry zkušebního tělesa při určité vlhkosti w [m]

4.5.2 Zjištění vlhkosti

Podle normy ČSN EN 322 (1994) lze zjišťovat vlhkost vzorků. Vlhkost dřeva se zjišťuje hmotnostní vlhkostí masivního dřeva, jako podíl procentuální hmotnosti vody, která je obsažena ve vlhkém vzorku a hmotnosti vzorku ve vysušeném dřevě. Konečný výsledky jsou přesné na 1,0 %.

Výpočet vlhkosti:

$$W = \frac{m^1 - m^0}{m^0} * 100 \text{ [\%]} \quad (9)$$

Kde:

m^1 – hmotnost vlhkého zkušebního tělesa [g]

m^0 – hmotnost vysušeného zkušebního tělesa [g]

W – vlhkost [%]

4.6 Příprava zkušebních vzorků

Tropické dřeviny byly naformátovány jako zkušební tělesa o rozměru 500x100x20 mm. Klimatizace vzorků probíhala při normálních podmínkách vzduchu (65 ± 3 %) a teplotě vzduchu (t = 20 ± 2 °C) podobu tvou týdnů. Při těchto podmínkách vychází celková vlhkost na 12 %. Zkušební tělesa byla nejprve obráběna frézkou, která byla nastavena na určité podmínky frézování. U frézování docházelo k úběru materiálu o 1 mm, přičemž frézovaná strana byla dlouhá 500 mm. Na vzorcích se zakreslí od středu vzorku, na každou stranu úseky o patnácti milimetrech, tím vznikne 10 úseků, které se dále dělí na tři 6 mm části. Vzorky byly následně použity na stanovení Wa a Ra s rozměry 500x10x20 mm, u nichž byly označeny strany, které byly předem obrobené a poté byly vyznačeny podávací směry řezů. Ve středové označované části byly odeprány parametry o vlhkosti a drsnosti.

4.7 Metodika měření průměrných aritmetických úchylek vlnitosti a drsnosti

Měření vlhkosti a drsnosti povrchu materiálu bylo měřeno kontaktní metodou:

- přístroj FORMTALYSURF 50 Intra 2 (firma – TaylorHobson)

Kvalita povrchu hodnocena podle:

- Ra – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti,
- Rz – největší výška profilu drsnosti,
- RSm – průměrná šířka prvku profilu drsnosti,

- Wa – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu vlnitosti,
- Wz – největší výška profilu vlnitosti,
- WSm – průměrná šířka prvku profilu vlnitosti.

Měření probíhalo u každého vzorku minimálně desetkrát. Vzorky byly měřeny podle dvou norem. Jedná se o normy ČSN EN ISO 4288 a ČSN EN ISO 4287, které jsou určeny pro stanovení kvality povrchu.

Kvalita povrchu byla měřena u vzorků s rozměry 500x10x20 mm, na jejich povrchu byl naznačen směr posuvu a frézovací povrch. Vzorky byly před samotným měřením klimatizovány při teplotě vzduchu 20 ± 2 °C. Vlhkost vzduchu se pohybovala v průměru 65 ± 3 %. Při těchto podmínkách u dřevin vznikla 12% vlhkost.

4.7.1 Kontaktní metoda – přístroj FORMTALYSURF 50 Intra 2

Kontaktní přístroj FORMTALYSURF 50 Intra 2 je od výrobce TaylorHobson. Na profilometr bylo nasazeno raménko, které má diamantový kuželový hrot s poloměrem 2 μm. U zkoušky byl také používán filtr profilu a Gaussův filtr.

4.8 Statistické zpracování dat

Statistické zpracování dat se provádělo kvůli sledování proměnným znakům, které se mezi sebou navzájem porovnávali a vyhodnocovali. Ke statistickému zpracování hodnot byly využívány dva softwary.

- Software Microsoft EXCEL (Microsoft, Redmont, Washington, Spojené státy)
- STATISTICA 12 (Statsoft Inc., Tulsa, Oklahoma, Spojené státy americké)

Velmi důležité bylo před samostatným vypracováním analýz zjistit, zda vzorky nemají odlehlé výsledky a v dalším kroku probíhalo rozdělení jejich četností. Pokud byly zjištěny u zpracování dat odlehlé výsledky, bylo zapotřebí provést opakované měření. Opravné měření probíhalo v označeném místě vzorku, kde byla chyba nalezena. Mezi měřené hodnoty spadá drsnost Ra, Rz, RSm a vlnitost Wa, Wz, WSm, u kterých byla

využita statistická metoda ANOVA. Během testování vzorků byla zvolena a nastavena hladina významnosti $\alpha = 0{,}05$ nebo-li 5%.

Pro vyloučení odlehlých hodnost byl prováděn Dean-Dixonův test. V první řadě musely být výsledky seřazeny podle velikosti. U minimálních a maximálních hodnot bylo stanoveno kritérium Q_1 a Q_u prostřednictvím následných vzorců:

$$Q^1 = \frac{(x^2 - x^1)}{(x_n - x^1)} \qquad Q_n = \frac{(x_n - x_{n-1})}{(x_n - x_1)} \tag{10}$$

Dále následovalo vypočítání rozdílu rozpětí hodnot mezi minimální (x_1) a maximální (x_n) hodnotou. Všechny vypočítané hodnoty Q byly poté porovnávány s kritickou tabelovanou Q_n, která měla udaný počet hodnot (n) na vybrané hladině významnosti. V případě, že některé hodnoty Q byly větší, popřípadě stejné jako kritická hodnota Q_n, následovalo jejich vyřazení. U vyřazených hodnot muselo probíhat opakované testování, jelikož se tím změnila rozpětí mezi maximálními a minimálními hodnotami. Podle tohoto postupu se vyřadily veškeré odlehlé hodnoty (tab. 7).

Dalším krokem následovalo posouzení rozdělení četností nebo-li dokázaní normality zkoumaných dat. Hladina významnosti u normality zkoumaných dat byla $\alpha = 0{,}05 = 5\%$, podle Shapiro-Wilksova testu.

Ze statistického hlediska byla k vyhodnocování změřených výsledků využita analýza rozptylu, provedená ve softwaru Statistica 12.

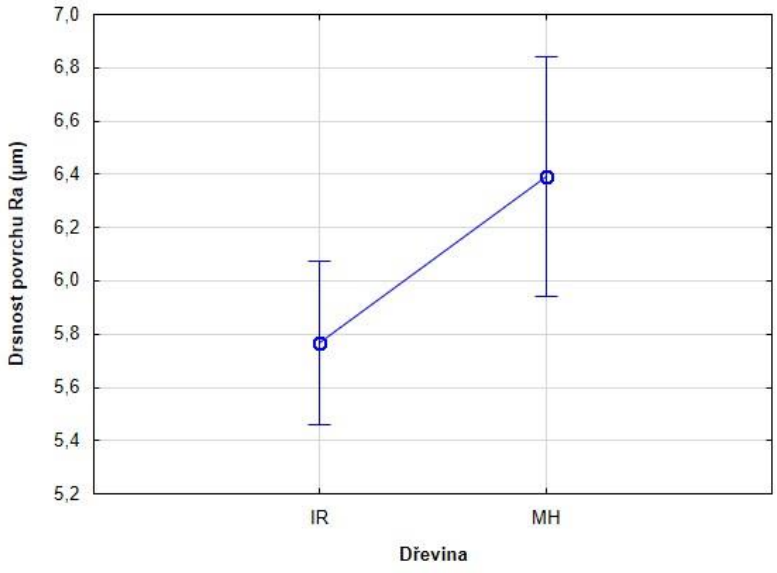
Tab. 7: Testování faktorů na základě hodnoty (P) *(Gaff a Gáborík, 2009)*

HODNOTA (P)	STATISTICKÁ VÝZNAMNOST
ø P < 0,05	vliv faktoru je statisticky významný
ø P > 0,05	vliv faktoru není statisticky významný
ø P = 0,05	vliv faktoru je na hranici statistické významnosti
ø P = 0	faktor působí
ø P < 0,001	vliv faktoru je statisticky velmi významný

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

5.1 Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti „Ra“

Na grafu 1 je vidět vlit druhu dřeviny na drsnost povrchu (Ra). Bylo zjištěno, že dřeviny iroko (IR) a mahagon (MH) mají mezi sebou statisticky významný rozdíl, ovlivňující povrch. Hodnota mahagonu byla o 10,82 % vyšší než hodnota iroka. I přes podobné vlastnosti dřevin, které jsou obě z tropických oblastí, se ve výsledku projevil značný rozdíl. Rozdílnost může být ovlivněna několika faktory, do kterých patří hustota, stavba dřeva ovlivněna především velikostí pórů, ale také růstové podmínky dřeviny. Z výzkumu Bendikiene a Keturakis (2016) je patrné, že drsnost povrchu je závislá na směru vláken, anatomických vlastnostech a v neposlední řadě záleží na vlastnostech řezného nože. U výzkumu (Škaljić *et. al.*, 2009) se zjistilo, že kvalita povrchu u dubového dřeva je podstatně vyšší než kvalita povrchu u jedle, u které se ukázaly vysoké hodnoty drsnosti.

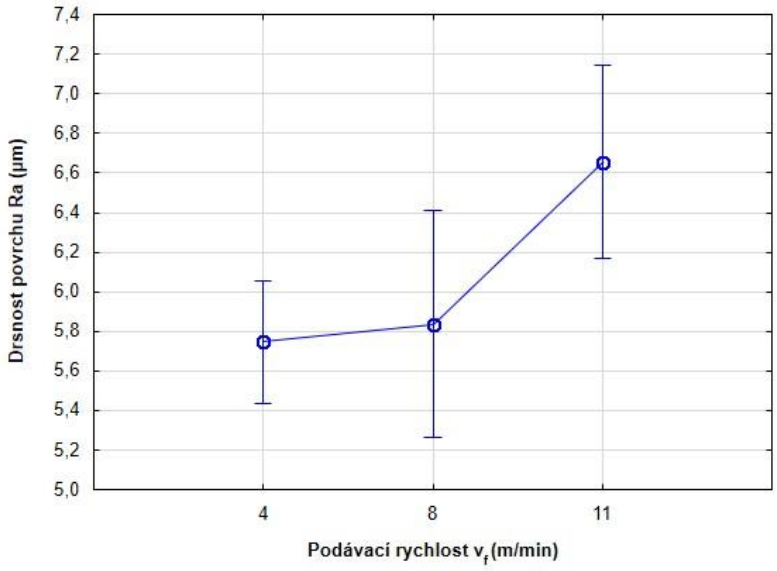


Graf 1: Vliv druh dřeviny na drsnost povrchu Ra

Vliv podávací rychlosti v_f na drsnost povrchu dřevin Ra je graficky znázorněn na grafu 2, kde je statisticky významný rozdíl mezi rychlostmi 4 m/min a 11 m/min, kde je nárust o 15,81 %, a také mezi rychlostmi 8 m/min a 11 m/min s nárustem 14,03 %.

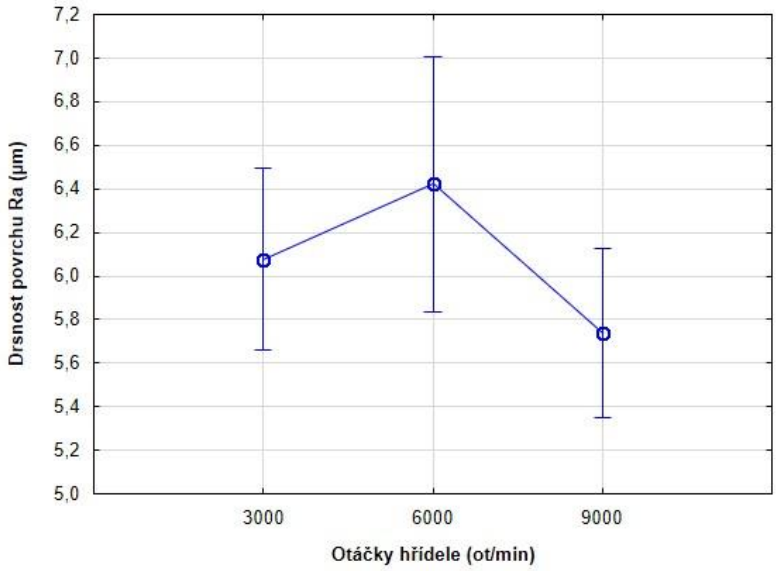
Naopak mezi podávacími rychlostmi 4 m/min a 8 m/min není statisticky významný rozdíl, a proto je nárust pouze o 1,56 %.

Podle výzkumu (Kminiak *et. al.*, 2015) je zjištěno, že vyšší podávací rychlost zvyšuje drsnost povrchu obrobené dřeviny. Ke stejnému výsledku došel ve výzkumu i (Škaljić *et. al.,* 2009), který zkoumal drsnost povrchu dubu a jedle. Ve výsledcích mu vyšlo, že zhoršení drsnosti bylo zaznamenáno při podávací rychlosti 18 m/min, přičemž mezi rychlostmi 18 – 24 m/min již nebyl prokázán žádný výraznější vliv na drsnost povrchu Ra.



Graf 2: Vliv podávací rychlosti v_f na drsnost povrchu Ra

Během zkoumání vlivu otáčet hřídele na drsnost povrchu Ra nebyly jištěny velké rozdíly (graf 3). Mezi otáčkami hřídele 3000 ot/min a 6000 ot/min, nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl. Přičemž 6000 ot/min je o 5,71 % vyšší než 3000 ot/min. Statisticky významný rozdíl nebyl ani mezi 3000 ot/min a 9000 ot/min. Statisticky významný rozdíl byl objeven mezi 6000 ot/min a 9000 ot/min, kde došlo k poklesu u 9000 ot/min o 10,68 %.

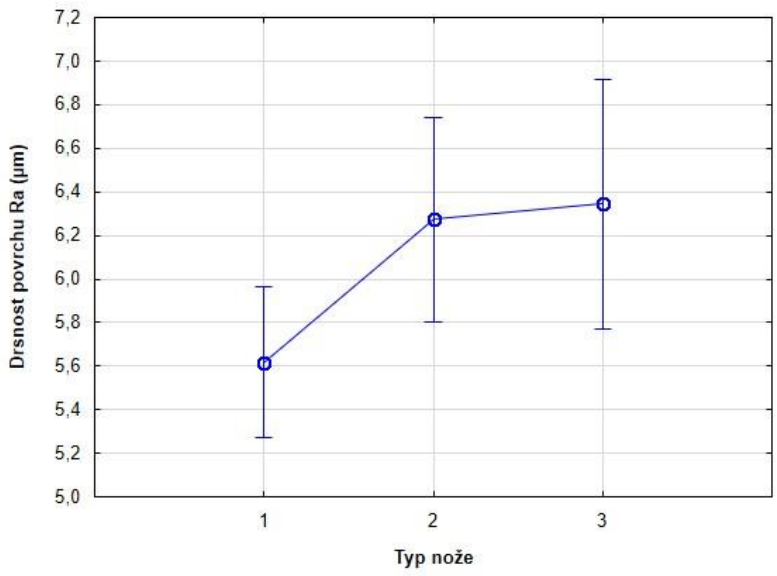


Graf 3: Vliv otáček hřídele na drsnost povrchu Ra

Graf 4 znázorňuje vliv správného výběru řezného nože na drsnost povrchu Ra. Značně významný statistický rozdíl se projevil mezi noži TM 1 (Leitz 5086) a TM 2 (Leitz 6906) s nárustem o 11,67 % a mezi noži TM 1 (Leitz 5086) a TM 1 CrTiN (Leitz 5086 s povlakem CrTiN), kde žiletkový nůž 3 má vyšší hodnotu o 12,91 %. Naopak mezi noži TM 2 (Leitz 6906) a TM 1 CrTiN (Leitz 5086 s povlakem CrTiN) není statisticky významný rozdíl (1,11 %).

Podle výzkumu Rouska *et al.* (2012b) bylo zjištěno, že u různých druhů dřevin se obráběcí nástroj chová odlišně, i přes změnu nastavení na různé parametry. K podobným výsledkům došli i Siklienka a Adamcová (2012). Konečný povrch je ovlivňován druhem materiálu řezného nástroje.

Kminiak *et. al.*, 2016 zjistili, že zhoršení kvality povrchu nastalo tehdy, pokud byla poškozena řezná hrana nástroje (tzv. vytváření hřebenů).

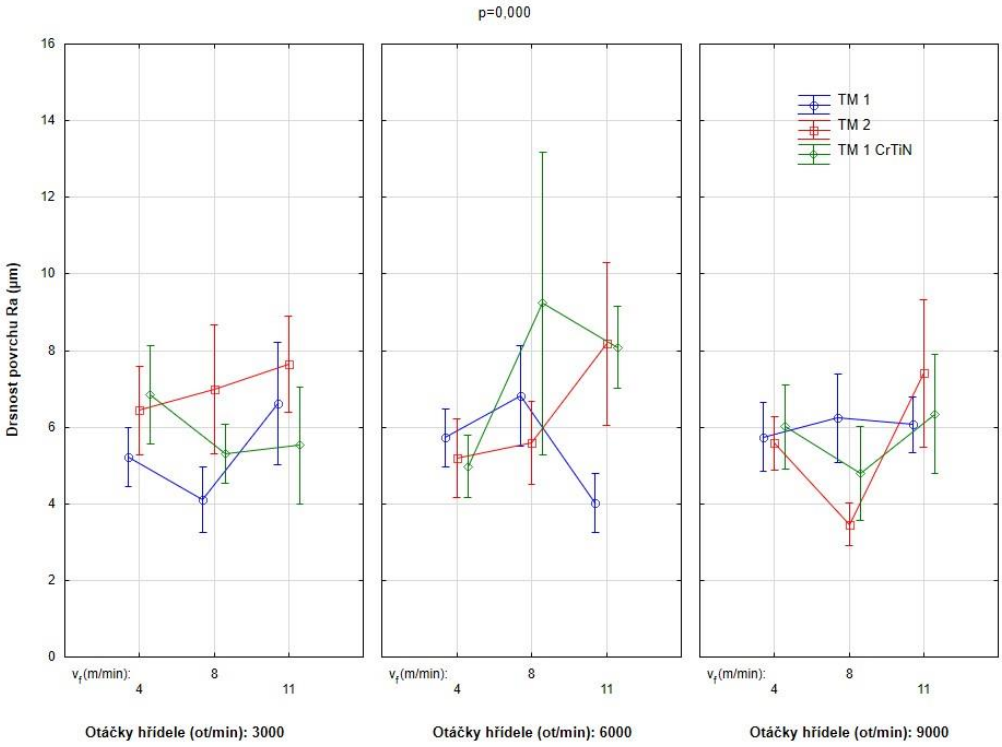


Graf 4: Vliv typu nože na drsnost povrchu Ra

Během obrábění dřevin iroka a mahagonu, jejichž drsnost povrchu Ra je ovlivňována typem nástroje, podávací rychlostí a otáčkami hřídele, došlo k nejvyšší hodnotě při otáčkách hřídele 6000 ot/min s posuvnou rychlostí 8 m/min, pomocí obráběcího nože TM 1 CrTiN (Leitz 5086 s povlakem CrTiN). Naopak nejnižší hodnota se vyskytla u při 9000 ot/min s posuvnou rychlostí 8 m/min a řezným nástrojem TM 2 (Leitz 6909) (graf 5).

Výzkum Kminiaka *et. al.,* 2015 značí, že obrobená drsnost povrchu je závislá na několika aspektech. V první řadě se jedná o řezný odpor, který ovlivňuje řezný model a typ dřeviny. Dále se jedná o rychlost otáček hřídele, jelikož ty jsou ovlivňovány především typem nástroje a v neposlední řade jde o podávací rychlost, která je také ovlivněna typem nástroje.

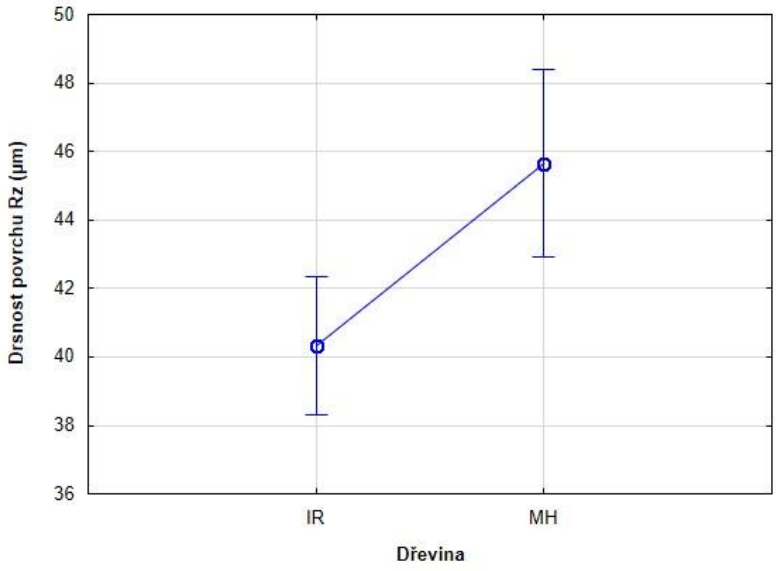
Korkut a Akgül (2007) zjišťovali spojitost mezi teplotou sušení a konečnou kvalitou povrchu. Došli k výsledku v jejich průzkumu, že počáteční teplota sušení je velmi důležitým aspektem pro konečnou drsnost povrchu.



Graf 5: Vliv otáček hřídele, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnost povrchu Ra

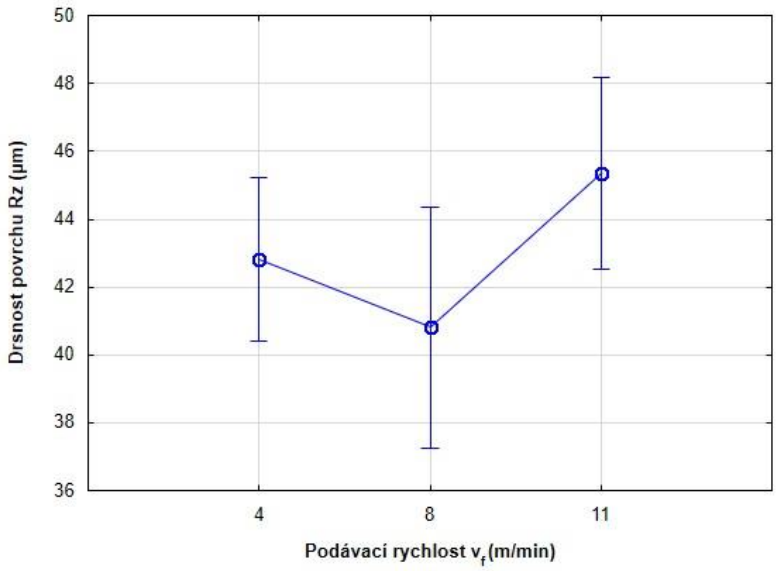
5.2 Největší výška profilu drsnosti „Rz“

Na grafu 6 je graficky znázorněn vliv druhu dřeviny na drsnost povrchu Rz. Z výsledku je patrné, že dřeviny iroko (IR) a mahagon (MH) jsou mezi sebou statisticky významné. Dřevina mahagou má vyšší hodnotu o 12,88 %.



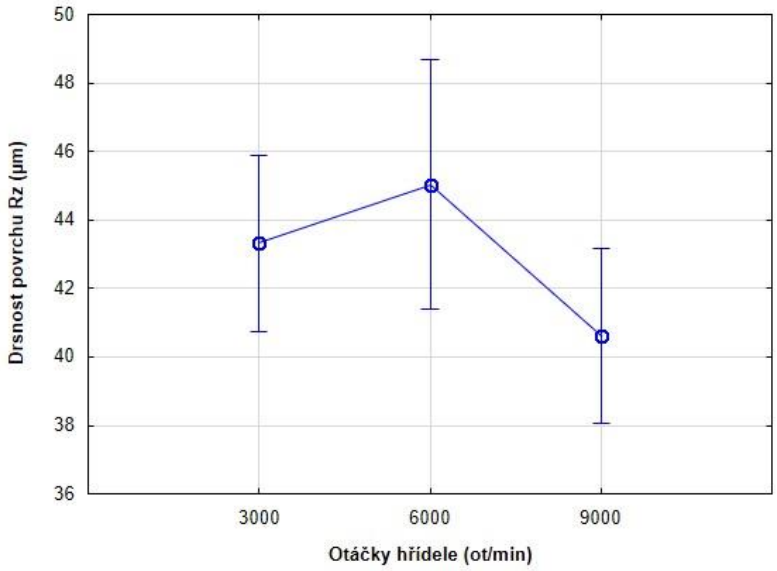
Graf 6: Vliv druhu dřeviny na drsnost povrchu Rz

Vliv podávací rychlosti v_f na drsnost povrchu Rz je znázorněna na grafu 7. Hodnota mezi podávacími rychlostmi 4 m/min a 8 m/min není statisticky významná. Přičemž podávací rychlost 4 m/min má vyšší hodnotu o 4,94 % než 8 m/min. Mezi rychlostmi 4 m/min a 11 m/min také není statisticky významná hodnota. Hodnota podávací rychlosti 11 m/min je vyšší o 5,91 %. Statisticky významný rozdíl nastal mezi posuvnými rychlostmi 8 m/min a 11 m/min, kde je hodnoty vyšší o 11,14 %.



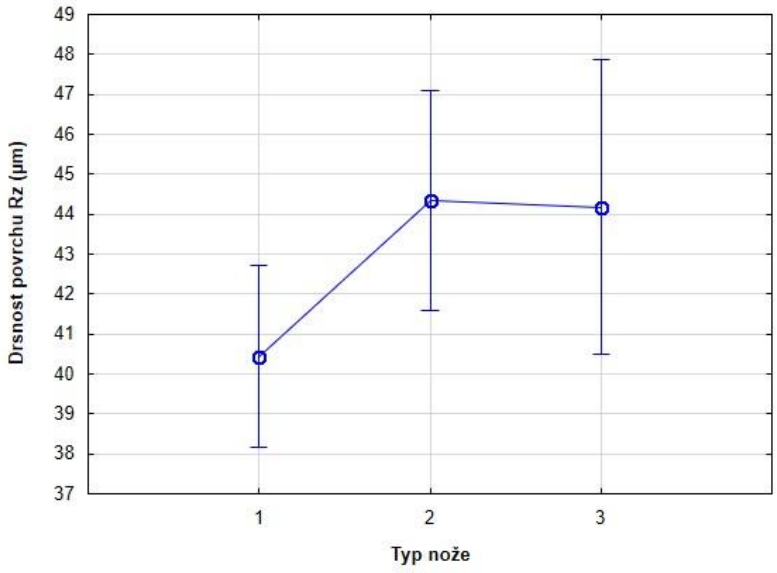
Graf 7: Vliv podávací rychlosti v_f na drsnost povrchu Rz

Graf 8 ukazuje vliv otáček hřídele na drsnost povrchu Rz. Hodnoty mezi otáčkami 3000 ot/min a 6000 ot/min (3,97 %), stejně jako otáčky 3000 ot/min a 9000 ot/min (6,63 %) nejsou statisticky významné. Statisticky významná hodnota nastala mezi otáčkami 6000 ot/min a 9000 ot/min, přičemž 6000 ot/min má vyšší hodnotu o 10,86 %.



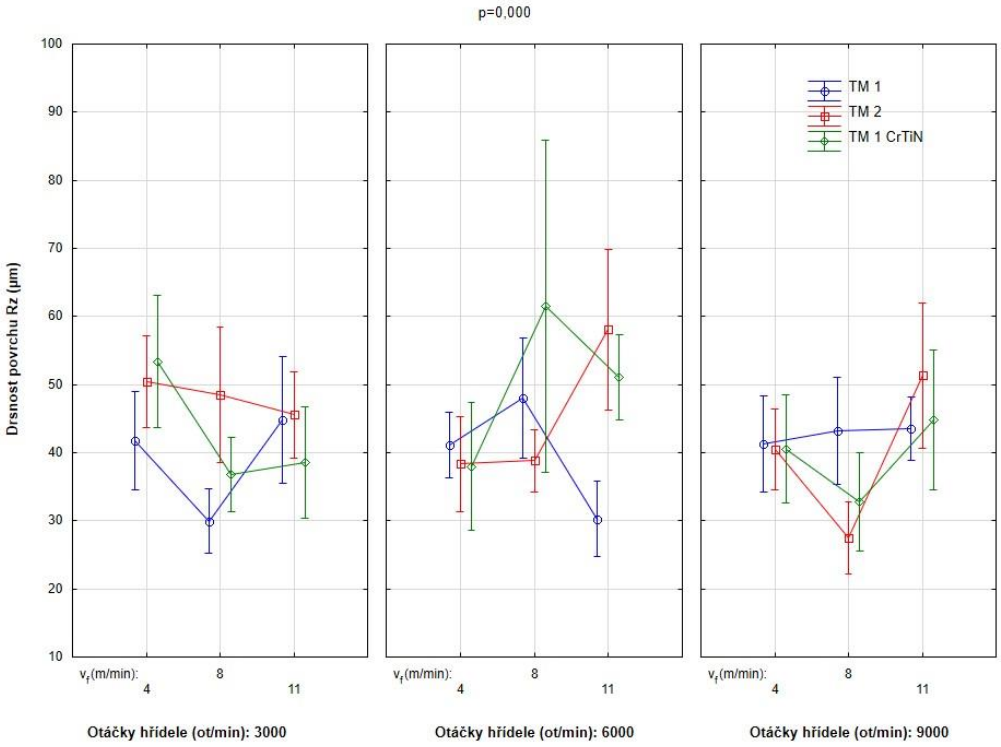
Graf 8: Vliv otáček hřídele na drsnost povrchu Rz

Vliv správného výběru žiletkového nože na drsnost povrchu Rz (graf 9), ukazuje nejvyšší hodnoty u nože TM 2 (Leitz 6906). Naopak u nože TM 1 (5086) jsou hodnoty nejnižší. Statistický rozdíl vznikl mezi žiletkovými noži TM 1 (Leitz 5086) a TM 2 (Leitz 6906), kde nůž TM 2 má vyšší hodnotu o 9,67 %. Mezi noži TM 1 (Leitz 5086) a TM 1 CrTiN (Leitz 5086 s povlakem CrTiN) nastal statisticky významný rozdíl podobný předchozí kombinaci (9,25 %). U nožů TM 2 (Leitz 6906) a TM 1 CrTiN (Leitz 5086 s povlakem CrTiN) je zanedbatelná hodnota v rozdílu (0,39 %), a proto není statisticky významná.



Graf 9: Vliv typu žiletkového nože na drsnost povrchu Rz

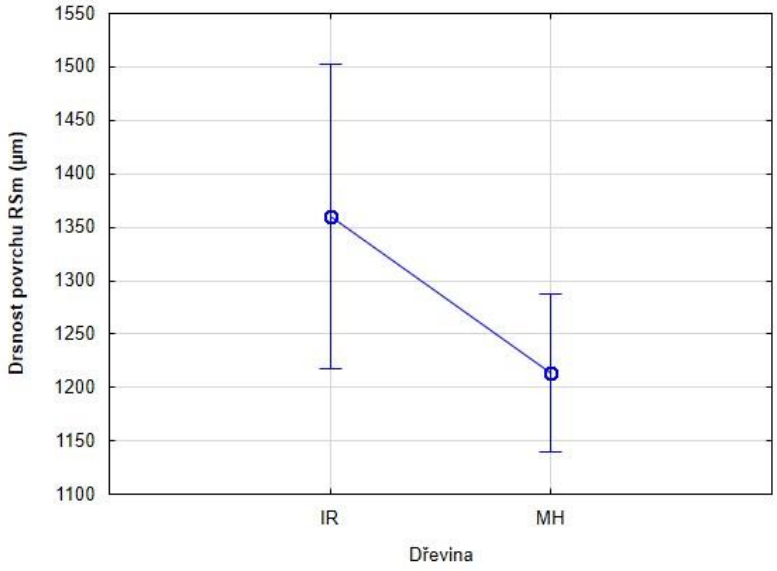
K nevyšší hodnotě, která měla vliv na drsnost povrchu Rz, bylo dosaženo při 6000 ot/min s podávací rychlostí 8 m/min a řezným nožem TM 1 CrTiN (Leitz 5086 s povlakem CrTiN). O něco nižší hodnoty oproti předešlým vyšly u 6000 ot/min s podávací rychlostí 11 m/min a řezným nástrojem TM 2 (Leitz 6909). Nejnižších výsledky se ukázaly u 9000 ot/min s podávací rychlostí 8 m/min a řezným nástrojem TM 2 (Leitz 6909) (graf 10).



Graf 10: Vliv otáček hřídele, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnost povrchu Rz

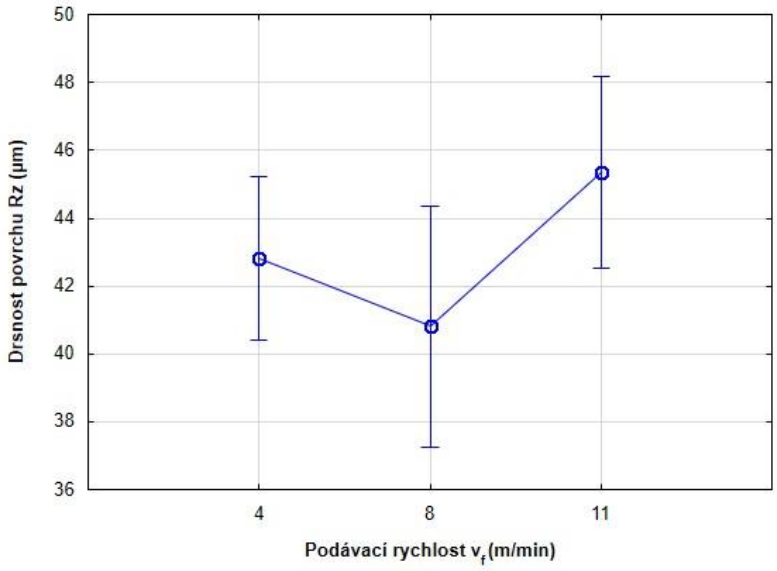
5.3 Průměrná šířka prvku profilu drsnosti „RSm“

Graf 11 vyznačuje vliv dřevin na drsnost povrchu RSm. Hodnota mezi dřevinami iroka (IR) a mahagonem (MH) je statisticky významná. Iroko má vyšší hodnotu o 12,07 %.



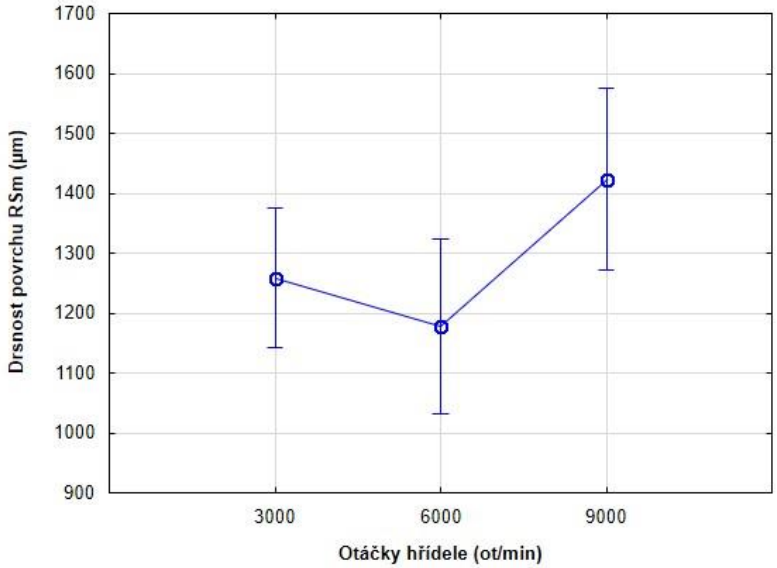
Graf 11: Vliv druhu dřeviny na drsnost povrchu RSm

Vliv podávací rychlosti na drsnost povrchu RSm (graf 12) má významně statistickou hodnotu mezi podávacími rychlostmi 4 m/min a 8 m/min, kde podávací rychlost 4 m/min má vyšší hodnotu o 53,04 %. Podobný výsledek je u rychlostí 4 m/min a 8 m/min (45,71 %). Hodnota mezi podávacími rychlostmi 8 m/min a 11 m/min není statisticky významná. Nejvyšší hodnoty dosáhla podávací rychlost 4 m/min.



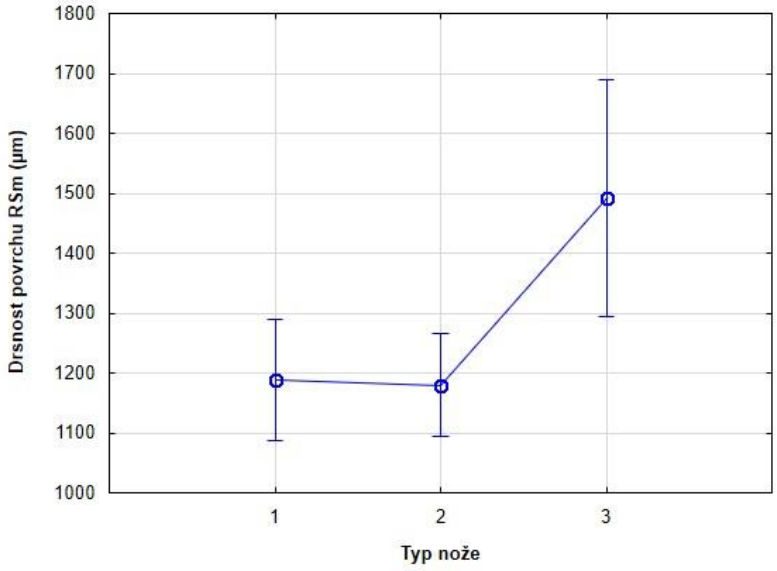
Graf 12: Vliv podávací rychlosti v_f na drsnost povrchu Rz

Při měření vlivu otáček hřídele na drsnost povrchu RSm (graf 13) bylo zjištěn statisticky významný rozdíl pouze mezi otáčkami 6000 ot/min a 9000 ot/min. Hodnota u otáček 9000 ot/min je vyšší o 20,82 %. U ostatních kombinacích není statisticky významný rozdíl.



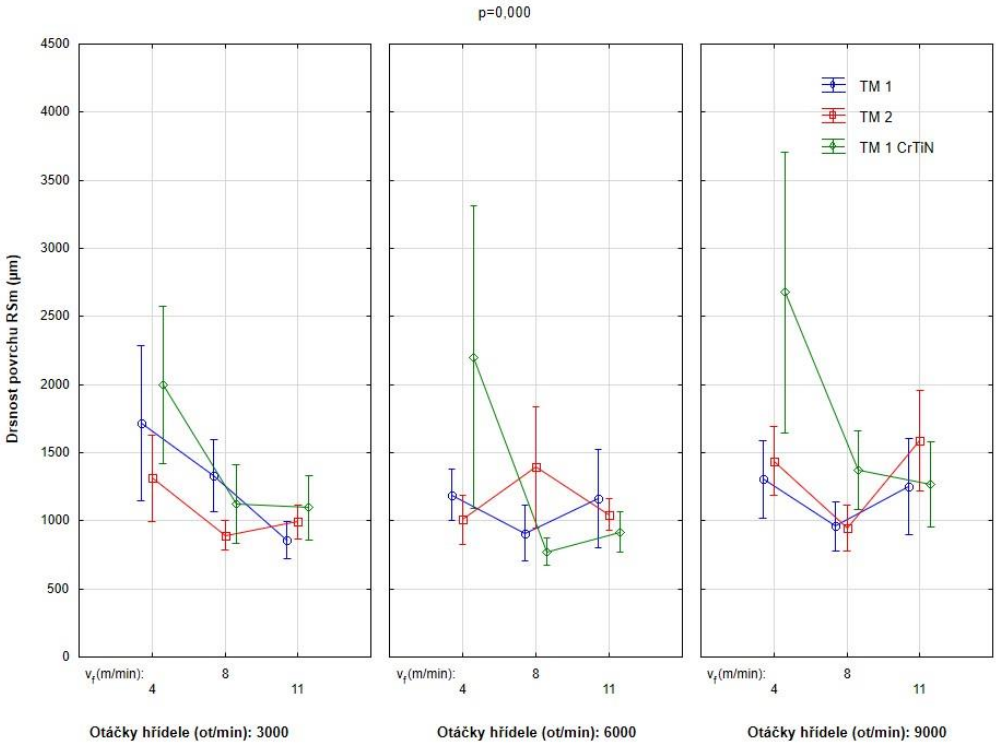
Graf 13: Vliv otáček hřídele na drsnost povrchu RSm

Při zkoumání nejlépe hodnoceného typu nože, který má nejlepší vliv na drsnost povrchu, dosáhl nejvyšší hodnoty žiletkový nůž TM 1 CrTiN (Leitz 5086 s povlakem CrTiN). Významně statistický rozdíl nastal u nožů TM 1 (Leitz 5086) a TM 1 CrTiN (Leitz 5086 s povlakem CrTiN), kde nůž TM 1 CrTiN má vyšší hodnotu o 25,63 %. Podobné hodnoty vyšly i mezi noži TM 2 (Leitz 6906) a TM 1 CrTiN (5086 s povlakem CrTiN) s vyšší hodnotou u nože TM 1 CrTiN o 26,46 %. Rozdílnost výsledků u nožů TM 1 (Leitz 5086) a TM 2 (Leitz 6906) je velmi nízká, a proto je statisticky nevýznamná (graf 14).



Graf 14: Vliv typu žiletkového nože na drsnost povrchu RSm

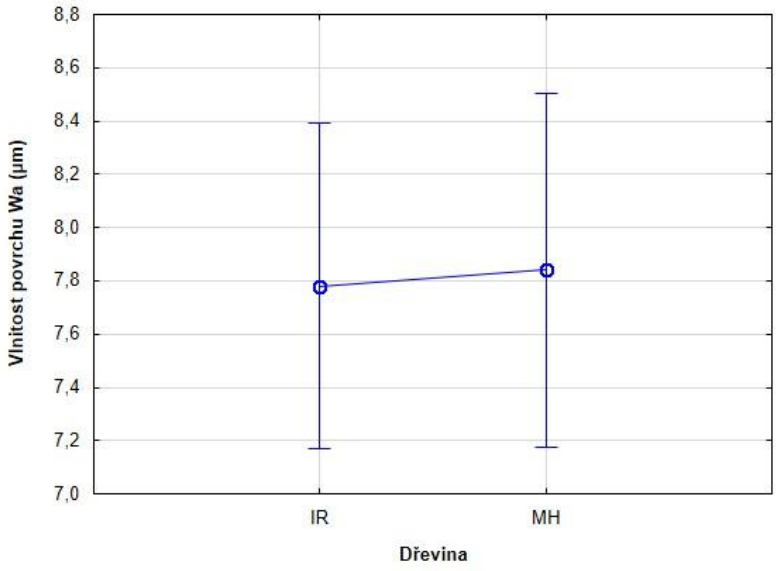
Na grafu 15 je znázorněna nejvyšší dosažená hodnota u kombinace 9000 ot/min s podávací rychlostí 4 m/min a použitím řezného nástroje TM 1 CrTiN (Leitz 5086 s povlakem CrTiN), která ovlivňuje drsnost povrchu RSm. Nejnižší hodnoty byly zjištěny u více kombinací různých parametrů. Přesto nejnižší vznikla u 6000 ot/min, podávací rychlostí 8 m/min a obráběcím nástrojem TM 1 CrTiN (Leitz 6909 s povlakem CrTiN).



Graf 15: Vliv otáček hřídele, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnot povrchu RSm

5.4 Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti „Wa“

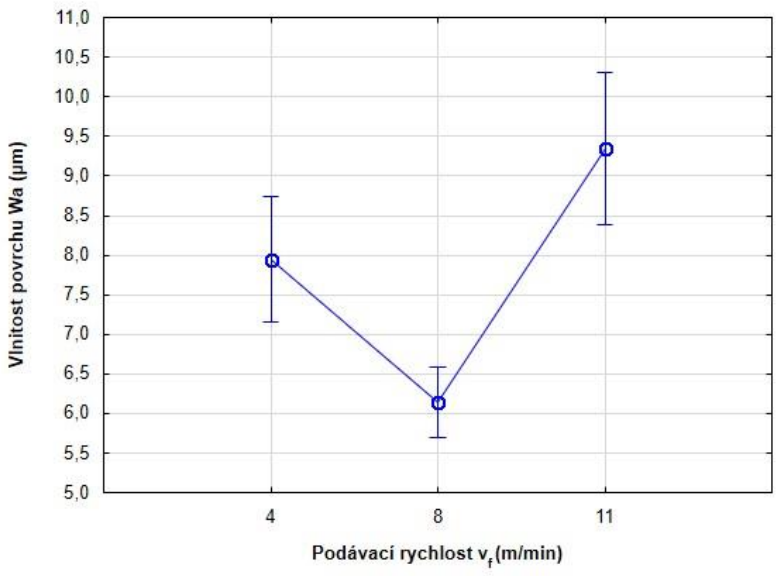
Při prozkoumání vlivu druhů dřevin na vlnitost povrchu Wa, nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi dřevinami iroko (IR) a mahagonem (MH) (graf 16).



Graf 16: Vliv druhu dřeviny na vlnitost povrchu Wa

Na grafu 17 je vidět vliv podávací rychlosti na vlnitost povrchu Wa. U všech kombinací je hodnota podávací rychlosti statisticky významná. Nejvyšší hodnota nastala u podávací rychlosti 11 m/min. Zatím co nejnižší hodnota vyšla u podávací rychlosti 8 m/min. Podávací rychlost 11 m/min je vyšší o 52,10 % od podávací rychlosti 8 m/min.

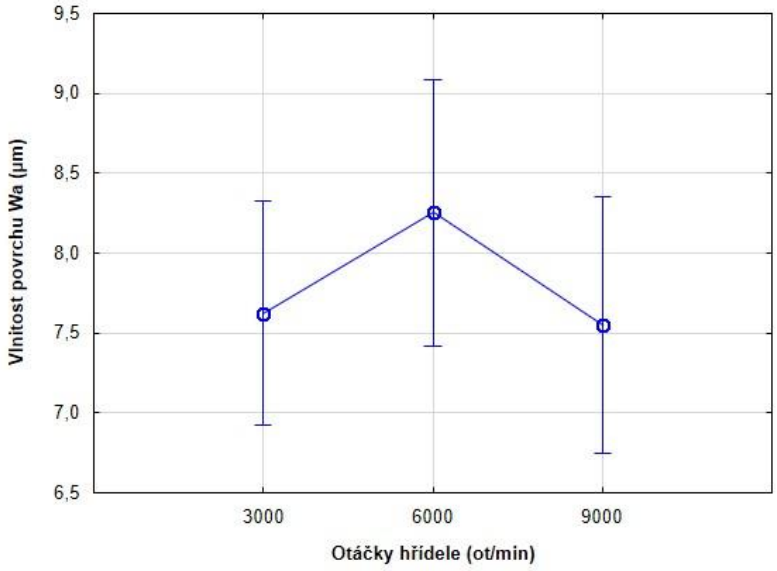
Kvalita obrobeného povrchu je závislá na rychlosti podávací rychlosti. S přibývající podávací rychlostí se snižuje konečná kvalita povrchu Wa, ale i Wz (Kminiak *et. al.*, 2015). K velmi podobnému vyhodnocení došel ve svém výzkumu i Rousek *et. al.* (2012b), který k výsledku zohledňoval i chvění. Pokud by docházelo k chvění, vzniká větší drsnost u malých posuvů, naopak nižší drsnost nastane u větších posuvů. Stejné výsledky zjistila i Kvietková *et. al.* (2015d) zkoumající aritmetickou úchylku Wa.



Graf 17: Vliv podávací rychlosti v_f na vlnitost povrchu Wa

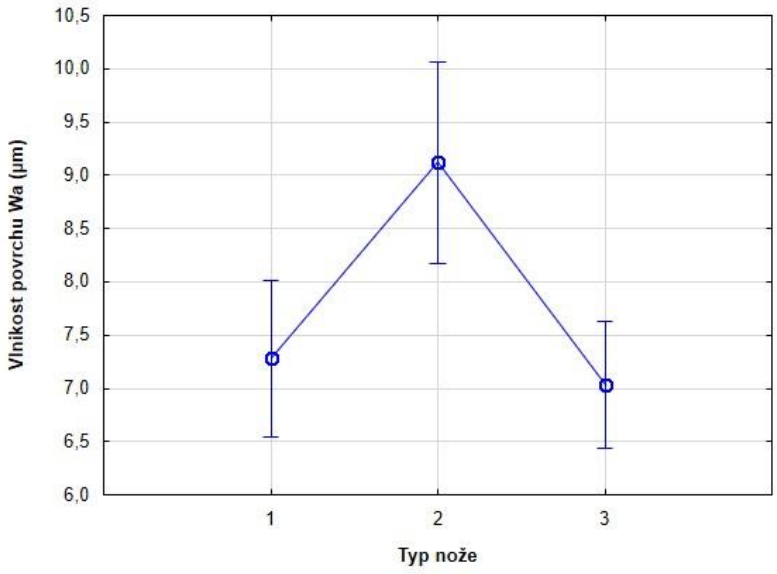
I otáčky hřídele ovlivňují vlnitost povrchu Wa (graf 18). Žádná kombinace otáček není statisticky významná.

Výzkum (Keturakis a Juodeikiené, 2007) ukázal spojitost mezi řeznou rychlostí a konečnou kvalitou povrchu, přičemž bylo zjištěno, že řezná rychlost má významný vliv na kvalitu povrchu. Čím je vyšší řezná rychlost, tím se zvyšuje kvalita povrchu.



Graf 18: Vliv otáček hřídele na vlnitost povrchu Wa

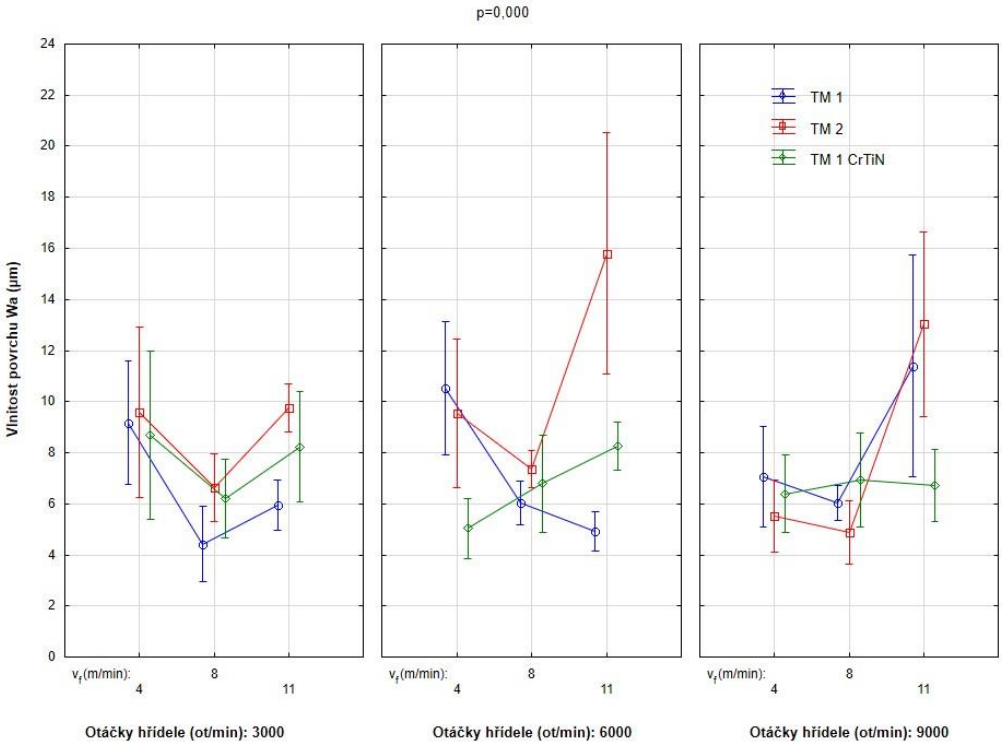
Správně zvolené typy nožů ovlivňují vlnitost povrchu dřevin (graf 19). Mezi nožem TM 1 (Leitz 5086) a TM 2 (Leitz 6909) vzniká statisticky významná hodnota, kdy je u nože TM 2 o 25,25 % vyšší. Také u nožů TM 2 (Leitz 6909) a TM 1 CrTiN (Leitz 5086 s povlakem CrTiN) vzniká statisticky významný rozdíl s nárustem u nože TM 2 o 29,75%. Mezi nástroji TM 1 (Leitz 5086) a TM 1 CrTiN (Leitz 5086 s povlakem CrTiN) nevzniká statisticky významná rozdílnost.



Graf 19: Vliv typů žiletkových nožů na vlnitost povrchu Wa

Při kombinaci 6000 ot/min s podávací rychlostí 11 m/min a řezným nástrojem 2 (Leitz 6909), byla zjištěna nevyšší hodnota ovlivňující vlnitost povrchu Wa (graf 20). Okolo nejnižší hodnoty, která vznikla u 3000 ot/min s podávací rychlostí 8 m/min a řezným nástrojem 1 (Leitz 5086) se pohybovalo několik dalších kombinací.

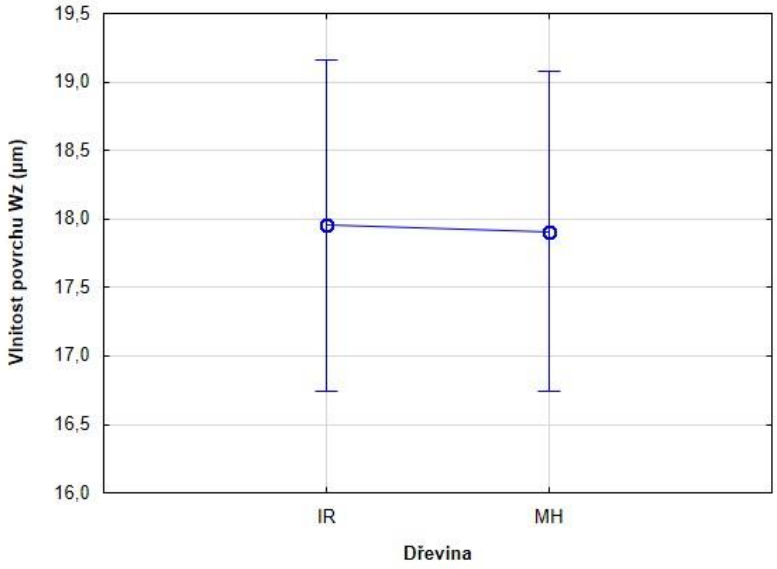
Během výzkumu Bajić *et. al.* (2008) došel k výsledku, který ukazuje vliv podávací rychlosti na kvalitu povrchu. Zjistil nejdůležitější činitel během obrábění, kterým je podávací rychlost. V jeho výzkumu byla zjištěna nejvyšší kvalita povrchu při nižší podávací rychlosti a vyšší řezné rychlosti. K podobnému výsledku došel i Gaff *et. al.* (2015), který zkoumal termicky modifikované dřevo a jeho vliv na průměrnou aritmetickou úchylku Wa.



Graf 20: Vliv otáček hřídele, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost povrchu Wa

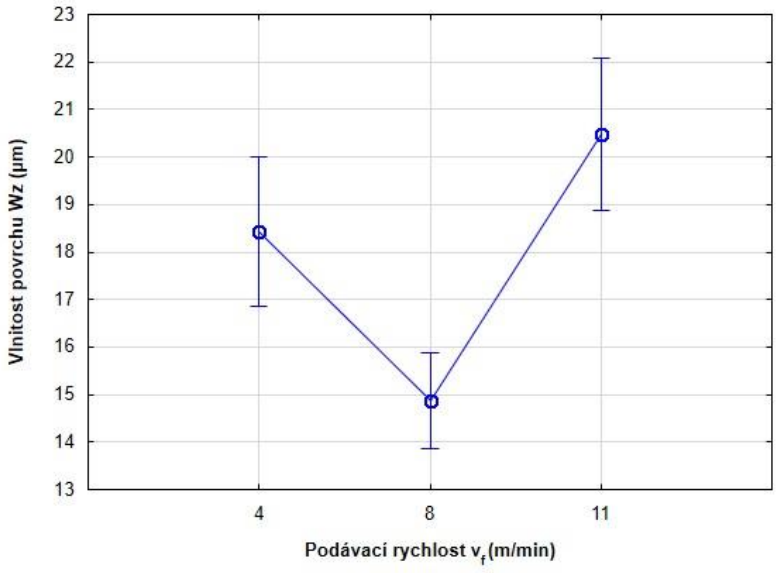
5.5 Největší výška profilu vlnitosti „Wz“

Vliv druhu dřeviny iroko (IR) a mahagonu (MH) na vlnitost povrchu Wz není statisticky významná (graf 21). Dřevina iroka má o 0,27 % vyšší hodnotu oproti dřevině mahagonu.



Graf 21: Vliv druhu dřeviny na vlnitost povrchu Wz

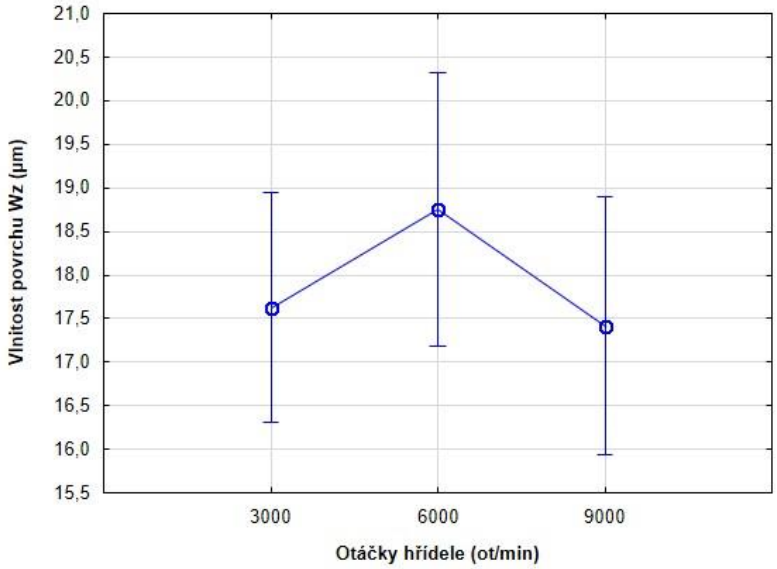
Z grafu 22 je patrné, že všechny podávací rychlosti jsou statisticky významné pro vlnitost povrchu Wz. Podávací rychlost 11 m/min dosáhla nevyšší hodnoty. Největší rozdíl nastal mezi podávacími rychlostmi 8 m/min a 11 m/min, přičemž podávací rychlost 11 m/min má vyšší hodnotu o 37,67 %. U podávacích rychlostí 4 m/min a 8 m/min nastal o něco menší rozdíl než u předchozí kombinace. Podávací rychlost 4 m/min je o 23,92 % vyšší než podávací rychlost 8 m/min. U podávacích rychlostí 4 m/min a 11 m/min se dostavil nejmenší rozdíl.



Graf 22: Vliv podávací rychlosti v_f na vlnitost povrchu Wz

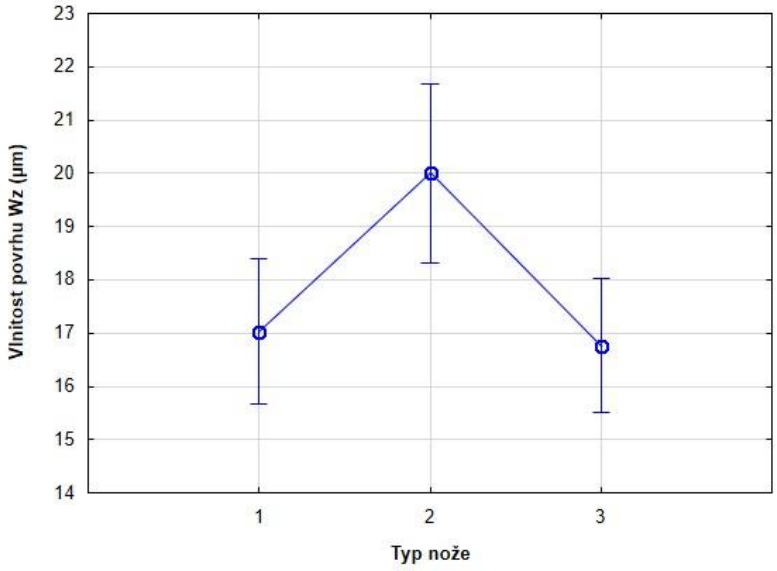
Vlnitost povrchu Wz je také ovlivněna otáčkami hřídele, kde podle měření (graf 23) nedošlo ani u jedné kombinace k statisticky významnému rozdílu.

Ve výzkumu Rousek *et. al.* (2010) bylo odhaleno, že otáčky hřídele společně s rychlostí posuvu mají dopad na výšku vlnek.



Graf 23: Vliv otáček hřídele na vlnitost povrchu Wz

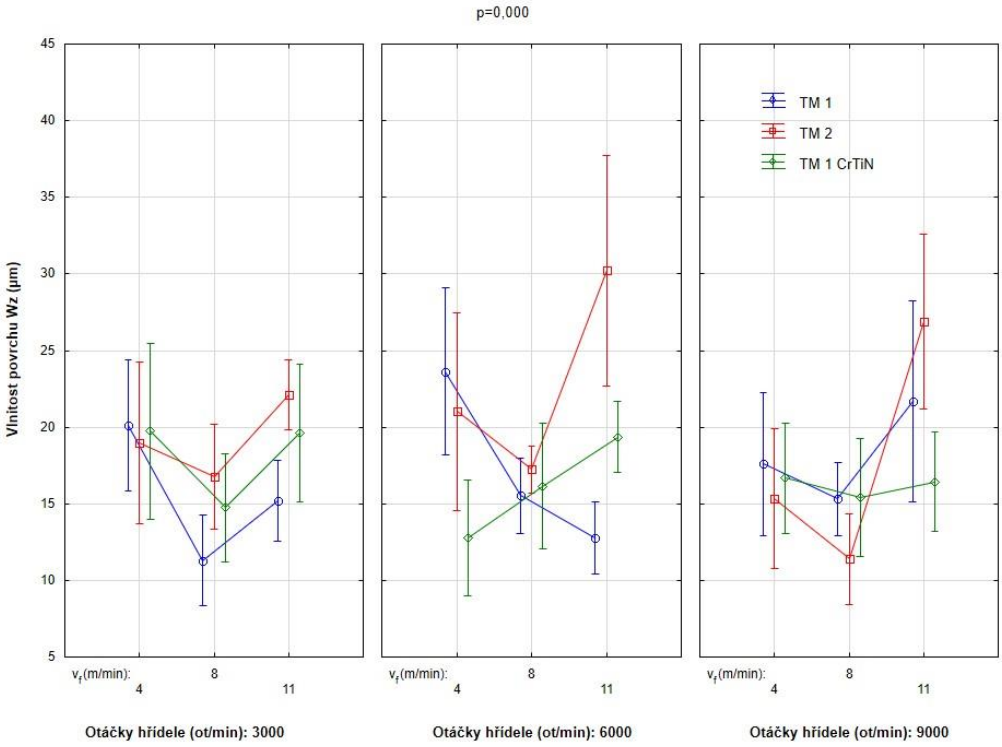
Typ žiletkového nože má velký vliv na vlnitost povrchu Wz (graf 24). Nejvyšší hodnoty dosáhnul nůž TM 2 (Leitz 6909), který má vyšší hodnotu o 17,50 % než nůž TM 1 (Leitz 5086) a o 19,31 % než nůž TM 1 CrTiN (Leitz 5086 s povlakem CrTiN). Mezi noži TM 1 (Leitz 5086) a TM 2 (Leitz 6909), stejně jako mezi noži TM 2 (Leitz 6909) a TM 1 CrTiN (Leitz 5086 s povlakem CrTiN) vzniká statisticky významná hodnota. Zatím co u nožů TM 1 (Leitz 5086) a TM 1 CrTiN (Leitz 5086 a povlakem CrTiN) není statisticky významný rozdíl.



Graf 24: Vliv typu žiletkového nože na vlnitost povrchu Wz

Nejvyšší hodnota, která ovlivňuje vlnitost povrchu Wz, znatelná na grafu 25 má totožnou kombinaci s předchozím grafem 20. Mezi nejnižší hodnoty patří dvě kombinace parametrů. Jako první je hodnota při 3000 ot/min s podávací rychlostí 8 m/min a řezným nožem TM 1 (Leitz 5086). Druhou obdobnou hodnotou je kombinace při 9000 ot/min s podávací rychlostí 8 m/min a řezným nástrojem TM 1 CrTiN (Leitz 5086 s povlakem CrTiN.

Významnou roli v kvalitě povrchu dřevin hraje řezná rychlost. Je zjištěno z výzkumu (Costes a Larricq, 2002), že se zvyšující se řeznou rychlostí vzniká lepší kvalita obrobeného povrchu. Velký vliv na drsnost povrchu má i voda obsažená ve dřevě. Pokud se v blízkosti řezné hrany, dokáže změnit mechanické chování dřeva.

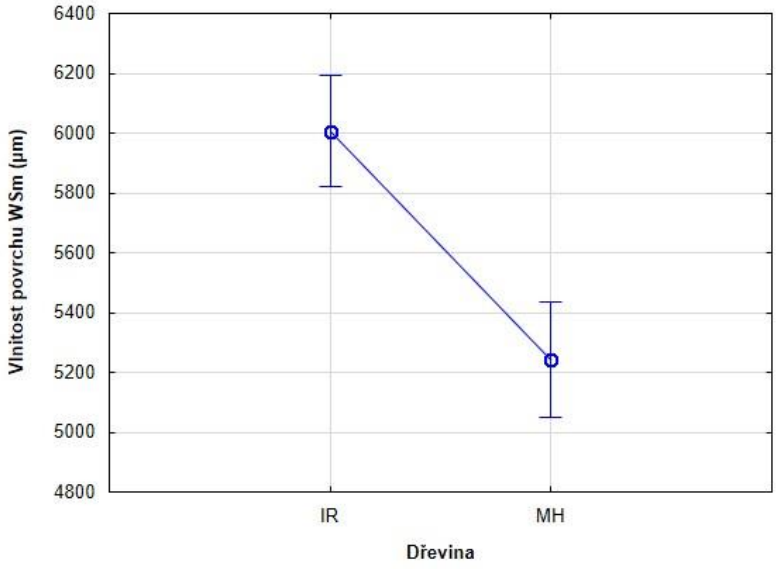


Graf 25: Vliv otáček hřídele, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost povrchu Wz

5.6 Průměrná šířka prvku profilu drsnosti „WSm“

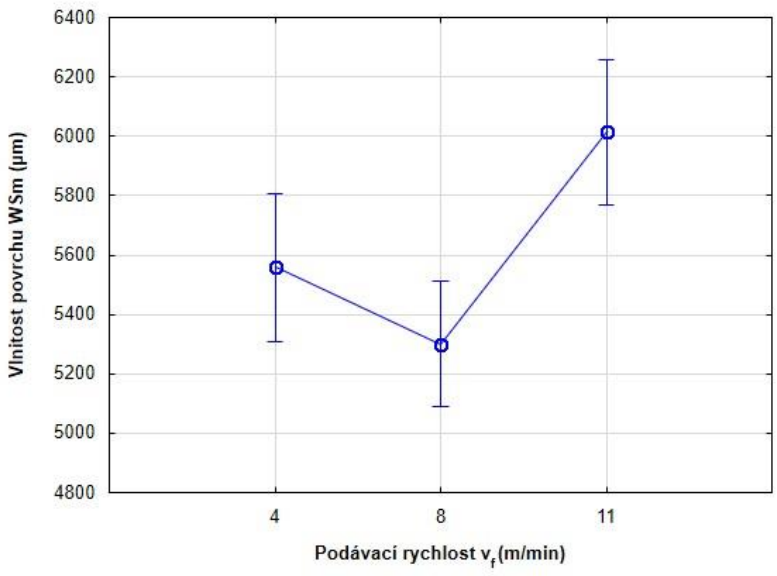
Mezi dřevinami iroka (IR) a mahagonem (MH) vznikla statisticky významná hodnota, která je zřejmá z grafu 26. Dřevina iroka má o vyšší hodnotu od mahagonu o 14,55 %.

Novák *et. al.* (2011) zjistil ze svého výzkumu, že vlnitost WSm je zcela jistě závislá na druh dřeviny. Konečná kvalita není natolik ovlivněna hustotu ale stavbou dřeva. Ke stejným výsledkům ve svém výzkumu došel i Thoma *et. al.* (2015).



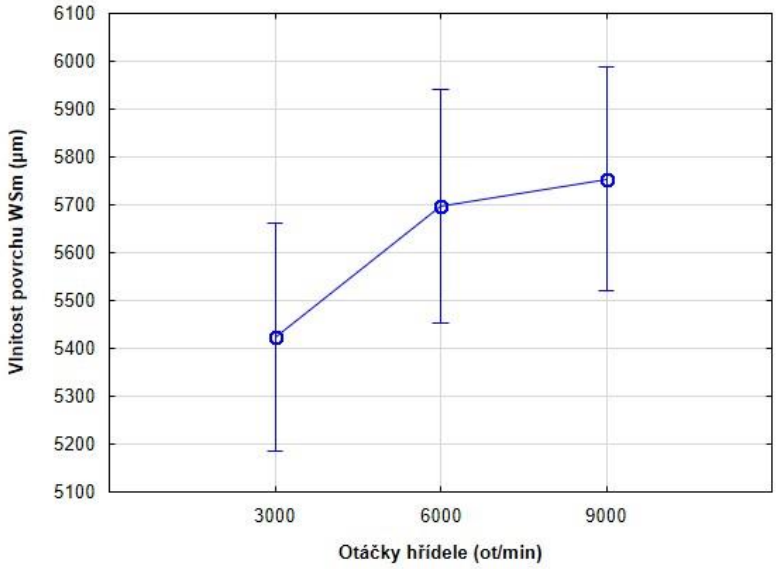
Graf 26: Vliv druhu dřeviny na vlnitost povrchu WSm

Statisticky významný rozdíl vyšel u vlivu podávací rychlosti v_f na vlnitost povrchu WSm mezi rychlostmi 4 m/min a 11 m/min, kde došlo k navýšení u podávací rychlosti 11 m/min o 8,21 % a u rychlostí 8 m/min a 11 m/min s nárustem o 13,47 %. Mezi podávacími rychlosti 4 m/min a 8 m/min nedošlo k statisticky významnému rozdílu. Nejvyšší hodnota vznikla u podávací rychlosti 11 m/min (graf 27).



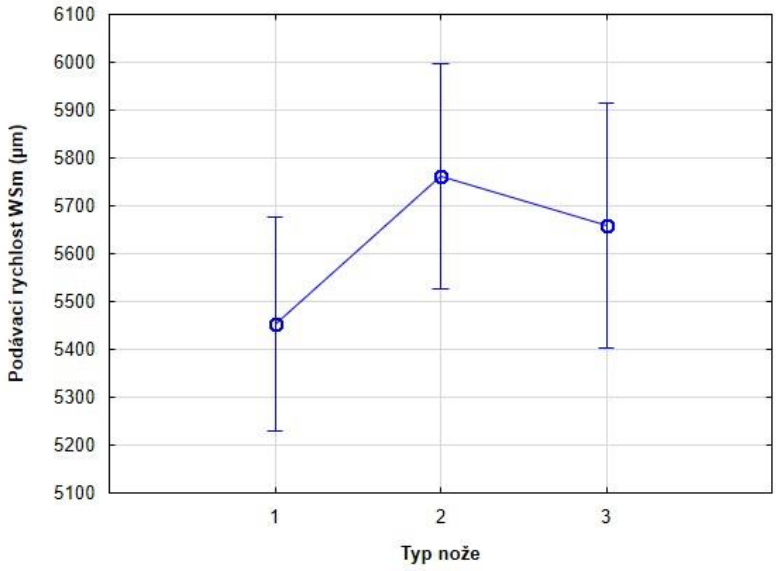
Graf 27: Vliv podávací rychlosti v_f na vlnitost povrchu WSm

Statisticky významná hodnota u vlivu otáček hřídele na vlnitost povrchu WSm nastala pouze mezi 3000 ot/min a 9000 ot/min s nárustem o 6,11 %. Mezi ostatními rychlostmi nenastal statisticky významný rozdíl (graf 28).



Graf 28: Vliv otáček hřídele na vlnitost povrchu WSm

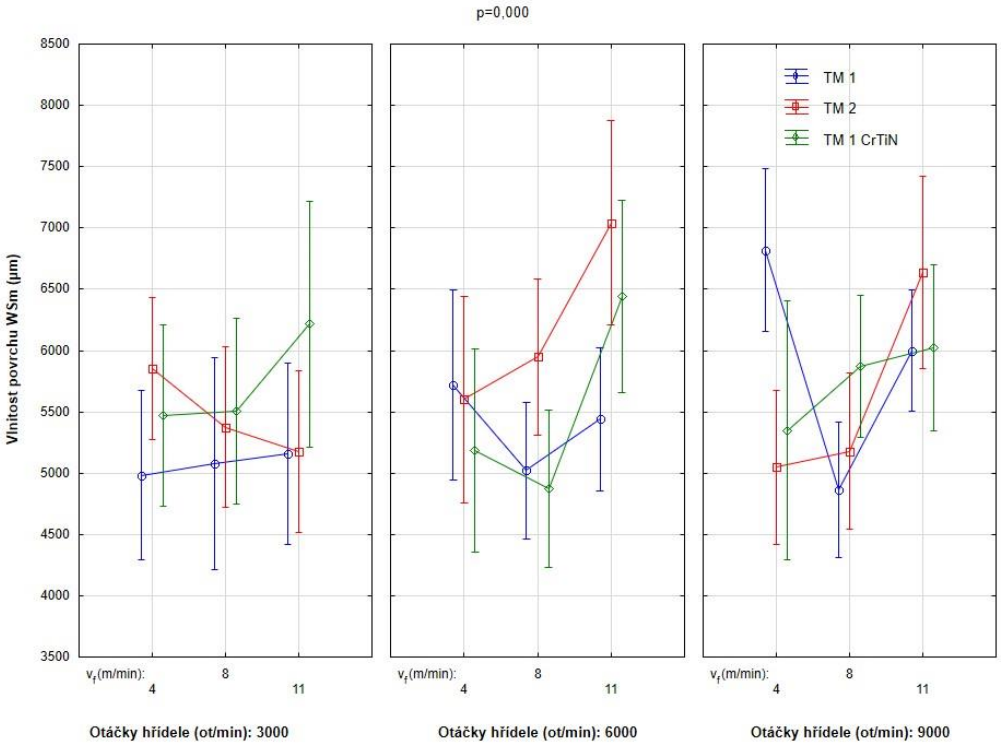
Mezi žiletkovými noži nebyl nalezen žádný statisticky významný rozdíl, který by výrazně ovlivňoval vlnitost WSm. Nejvyšší hodnota vznikla u typu nože TM 2 (Leitz 6909) (graf 29).



Graf 29: Vliv typu žiletkového nože na podávací rychlost WSm

U vlnitosti povrchu WSm dosáhla nejvyšší hodnoty kombinace parametrů při 6000 ot/min, podávací rychlostí 11 m/min a řezným žiletkovým nástrojem TM 2 (Leitz 6909). Nejnižších hodnot bylo dosaženo opět u dvou kombinací. První vznikla u 6000 ot/min s podávací rychlostí 8 m/min a řezným nástrojem TM 1 CrTiN (Leitz 5086 s povlakem CrTiN). Druhá kombinace se ukázala u 9000 ot/min, podávací rychlostí 8 m/min a žiletkovým nožem TM 1 (Leitz 5086) (graf 30).

Nejvyšší kvality povrchu bylo podle výzkumu (Bajić *et. al.*, 2008) dosaženo u nižší podávací rychlosti a vyšších otáčkách hřídele. K těmto výsledkům došel i Gaff *et. al.*, 2015).



Graf 30: Vliv otáček hřídele, podávací rychlost a typu nástroje na vlnitost povrchu WSm

5.7 Diskuse

Rozdíl kvality povrchu ovlivňuje několik faktorů. Hlavním faktorem zabývajícím se především samotným typem dřeviny, je hustota, kde s přibývající hustotou roste kvalita povrchu. Toto tvrzení bylo potvrzeno i z výzkumu Škaljić *et. al.* (2009), který zaznamenal výrazněji vyšší kvalitu povrchu u dubového dřeva s vyšší hustotou, než u jedle, která má podstatně nižší hustotu. Dalším ovlivňujícím faktorem jsou růstové podmínky a skladba dřeva a především její velikosti cév. Nejen samotné cévy působí na drsnost povrchu ale i směr vláken. K podobnému vyhodnocení dospěli ve svém výzkumu Bendikiene a Keturakis (2016), kteří zkoumali anatomické vlastnosti.

Bylo zjištěno, že na drsnost a vlnitost povrchu dřeviny působí podávací rychlost. Se zvyšováním řezné rychlosti stoupala i konečná drsnost povrchu Ra a vlnitost povrchu Wa a Wz. Stejné výsledky ve svých výzkumech uvedli i Kminiak *et. al.* (2015), Škaljić *et. al.* (2009), Rousek *et. al.* (2012b) a Kvietková *et. al.* (2015d). Samotná podávací rychlost nemá na kvalitu povrchu tak významný vliv, jako v kombinaci s otáčkami hřídele. Podle výsledků se došlo k závěru, že při nižších podávacích rychlostech a vyšších otáčkách hřídele dochází k mnohem lepším výsledkům kvality povrchu. Keturakis a Jundeikiné, (2007) z výzkumu zjistili významnost řezné rychlosti, kde docházelo k lepší kvalitě povrchu při vyšších řezných rychlostech.

Se změnami řezných nástrojů se také měnila kvalita obrobeného povrchu. Z výsledků těžko usoudit nejlépe zvolený typ nože, pro co nejvyšší kvalitu povrchu, jelikož i před různé kombinace obráběcích parametrů se hodnoty chovaly jinak u různých druhů dřevin. Podobný výsledek vyšel ve výzkumu u Rouska *et. al.* (2012b). Nejen druh obráběného materiálu rozhoduje o kvalitě povrchu ale i materiál řezného nože, který má velký vliv Siklienka a Adamcová (2012). S přibývajícím počtem obráběcích operací dochází k otupení řezného nástroje, a tím k poškození řezné hrany, která následně snižuje kvalitu povrchu (Kminiak *et. al.,* 2016).

V neposlední řadě je zásadní počáteční teplota sušení, která také působí na konečnou kvalitu, zjišťovaná výzkumem Korkut a Akgül (2007).

6 ZÁVĚR

6.1 Celkové shrnutí

Během výzkumu, při kterém se hodnotila kvalita povrchu dvou dřevin, kterými bylo iroko a mahagon, bylo zjištěno, že jejich drsnost a vlnitost se odvíjí od typu řezného materiálu. Materiál řezného nástroje a jeho vlastnosti jsou primárním činitelem během technologicko-výrobního postupu při výrobě. Vlastnosti řezného materiálu se mění s jeho strukturou a způsobem výroby, do které patří chemické složky, teplota zpracování a další parametry.

Získané poznatky z výsledků:

- Optimální parametry obrábění dřevin iroka a mahagonu ovlivňující jejich kvalitu povrchu Ra:
    - Nejvyšší drsnost povrchu nastala u řezného nástroje 3 (Leitz 5086 s povlakem CrTiN) při otáčkách hřídele 6000 ot/min a podávací rychlostí 8 m/min. Naopak nejnižší hodnota drsnosti byla u řezného nástroje 2 (Leitz 6909) s otáčkami hřídele 9000 ot/min a podávací rychlostí 8 m/min.
    - Z výsledků je patrné, že při nižších otáčkách společně s nástrojem 1 (Leitz 5086), který je oproti ostatním řezným nástrojům 2 a 3 méně odolný, docházelo k nižším hodnotám drsnosti. Oproti tomu, pokud byly zvoleny vyšší otáčky hřídele (9000 ot/min), k nejlepším výsledným hodnotám došlo s odolnějším řezným nástrojem 2 (Leitz 6909).
- Optimální parametry obrábění dřevin iroka a mahagonu ovlivňující jejich kvalitu povrchu Rz:
    - Při hodnocení kvality povrchu Rz bylo zjištěno, že došlo k podobným hodnotám a poznatkům. Nejvyšší drsnost byla u kombinace parametrů 6000 ot/min s podávací rychlostí 8 m/min a řezným nástrojem 3 (Leitz 5086 s povlakem CrTiN). Nejnižší hodnotu drsnosti znázorňují dvě kombinace. První kombinaci byla u 3000 ot/min, podávací rychlosti 8 m/min a řezným nástrojem 1

(Leitz 5086). Druhá kombinace nastala při 6000 ot/min, podávací rychlostí 11 m/min a řezným nožem 1 (Leitz 5086).

  - Během měření došlo k stejným poznatků jako u hodnocení drsnosti povrchu Ra. Méně odolnější řezný nástroj 1 (Leitz 5086), pro nižší drsnost povrchu je potřeba kombinovat s nižšími otáčkami hřídele.

- Optimální parametry obrábění dřevin iroka a mahagonu ovlivňující jejich kvalitu povrchu RSm:
  - K nejvyšší drsnosti povrchu RSm docházelo v nezávislosti na otáčky při nejnižší posuvné rychlosti 4 m/min, společně s řezným nástrojem 3 (Leitz 5086 s povlakem CrTiN).
  - Nejnižší hodnota drsnosti byla zjištěna u stejného řezného nástroje, ovšem s vyšší podávací rychlostí (8 m/min).
- Optimální parametry obrábění dřevin iroka a mahagonu ovlivňující jejich kvalitu povrchu Wa:
  - Při 6000 ot/min a posuvnou rychlostí 11 m/min, společně s řezným nástrojem 2 (Leitz 6909) byla zaznamenána nejvyšší hodnota vlnitosti povrchu. Podobně vysoká hodnota vznikla i při 9000 ot/min.
  - Pro co nejnižší vlnitost povrchu Wa je ideální volbou mít stoj nastaven na nižší otáčky (3000 ot/min) s podávací rychlostí 8 m/min a řezným nožem 1 (Leitz 5086), který je křehčí než ostatní zkoumané nože. Pokud jsou na stroji nastaveny vyšší otáčky hřídele, je ideální mít při nižší posuvné rychlosti tvrdší řezný nástroj, naopak při vetší posuvné rychlosti měkčí řezný nástroj.
- Optimální parametry obrábění dřevin iroka a mahagonu ovlivňující jejich kvalitu povrchu Wz:
  - Při hodnocení vlnitosti Wz došlo k velmi podobným výsledků a ustanovení jako u předchozí vlnitostí povrchu Wa.
- Optimální parametry obrábění dřevin iroka a mahagonu ovlivňující jejich kvalitu povrchu WSm:
  - Z výsledků je vidět, že největší vliv na vlnitost WSm má povádací rychlost. Přičemž nejnižší drsnost byla ukázána při podávací rychlosti 8 m/min společně s otáčkami hřídele 9000 ot/min a

řezným nástrojem 1 (Leitz 5086). Podobných výsledků bylo dosaženo při 6000 ot/min s řezným nástrojem 3 (Leitz 5086 s povlakem CrTiN). Naopak vyšších hodnoty drsnosti vznikly při vyšších posuvných rychlostech (11 m/min) s odolnějším řezným nástrojem 2 (Leitz 6909) a 3 (Leitz 5086 s povlakem CrTiN).

6.2 Přínos pro praxi a vědu

Přestože podobná problematika je několikanásobně již zkoumána, je velmi důležité získávat další poznatky a výsledky hodnot, které nám ukážou parametry, při kterých jsou dřeviny po obráběcím procesu opracovány s co možná nejvyšší kvalitou povrchu. Tato práce ukazuje nejlépe zvolené kombinace parametrů společně s řeznými nástroji a obráběcím druhem materiálu, a tím přispívá v praxi pro přesnější nastavení obráběcích strojů, s vyšší výslednou kvalitou povrchu. Z praktické části je podstatným aspektem řezný nástroj z různých druhů materiálů, který se při obrábění různých druhů frézovaných materiálů chová jinak. Ovšem řezné nástroje společně s obráběným materiálem jsou závislé na ostatních parametrech, do kterých spadá podávací rychlost a otáčky hřídele. Je důležité pomocí metod vyhotovené výsledky porovnat s výsledky z jiných výzkumů, čímž dojde k vyhodnocení optimálních parametrů.

Diplomová práce udává informace o nastavení parametrů, při kterých dochází k nižší hodnotě drsnosti Ra a vlnitosti Wa, a tím k lepší kvalitě povrchu. S přibývajícími znalostmi ohledně volby parametrů se zvyšuje pružnost výroby, zároveň s vyšší kvalitou povrchu stoupá i cena za konečný produkt.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Literární zdroje

ADAMCOVÁ, E. Porovnanie opotrebenia drevo rezného nástroja z rýchloreznej a nástrojovej ocele pri frézovaní smreka. *Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva*. 2010, roč. 7, č. 1, s. 13-21. ISBN 978-80-228-2143-8.

BAJIĆ, D.; LELA, B.; ŽIVKOVIĆ, D. Modeling of machined surface roughness and optimization of cutting parameters in face milling. *Metalurgija.* 2008, roč. 47, č. 4, s. 331-334. ISSN 0543-5846.

BARCÍK, Š. -- ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. KATEDRA LESNÍ TĚŽBY, -- ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. KATEDRA ZPRACOVÁNÍ DŘEVA, -- TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE. DREVÁRSKA FAKULTA, -- DVOŘÁK, J. -- SVEUČILIŠTE U ZAGREBU. ŠUMARSKI FAKULTET, -- WOODWORKING TECHNIQUES (4. : 2011 : PRAHA, ČESKO). *Woodworking techniques : proceedings of the 4th International Science Conference.* Prague: Czech University of Life Sciences Prague, 2011. ISBN 978-80-213-2182-3.

BENDIKIENE, R., KETURAKIS, G. The influence of technical characteristics of wood milling tools on its wear performance. *J Wood Sci* 63, 606–614 (2017). https://doi.org/10.1007/s10086-017-1656-x

BENDIKIENE, R.; KETURAKIS, G. The effect of tool wear and planning parameters on birch wood surface roughness. *Wood research*. 2016, roč. 61, č. 5, s. 791-798. ISSN 1336-4561.

COSTES, J.-P.; LARRICQ, P. Towards high cutting speed in wood milling. *Annals of Forest Science*. 2002, roč. 59, č. 9, s. 857-865.

DAVIM, J P. *Wood machining.* London: Wiley, 2011. ISBN 978-1-84821-315-9.

FAGA, M. G.; SETTINERI, L. Innovative anti-wear coatings on cutting tools for wood machining. *Surface and Coatings Technology*. 2006, roč. 201, č. 6, s. 30023007. ISSN 0257-8972.

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

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

GANDELOVÁ, Libuše, Petr HORÁČEK a Jarmila ŠLEZINGEROVÁ. *Nauka o dřevě*. Vyd. 3., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009. ISBN 978-80-7375-312-2.

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

HOLUBÁŘ, P.; JANKŮ, R.; ZINDULKA, O. Ekonomické a ekologické efekty PVD technologie. *MM Průmyslové spektrum*. 2009, roč. 8,9, s. 56-58. ISSN 1212-2572.

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

HOLUBÁŘ, P.; ŠÍMA, M.; ZINDULKA, O. Technologie úprav nástrojů před a po povlakování. *MM Průmyslové spektrum*. 2005, roč. 9, s. 70-72. ISSN 1212-2572.

HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing. 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

KETURAKIS, G.; JUODEIKIENĖ, I. Investigation of milled wood surface roughness. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2007, roč. 13, č. 1, s. 47-51. ISSN 1392-1320.

KILIC, M.; HIZIROGLU, S.; BURDURLU, E. Effect of machining on surface roughness of wood. *Building and Environment*. 2006, roč. 41, č. 8, s. 1074-1078. ISSN 0360-1323.

KMINIAK, R.; GAFF, M. Roughness of surface created by transversal sawing of spruce, beech, and oak wood. *BioResources*. 2015, roč. 10, č. 2, s. 2873-2887. ISSN 1930-2126.

KMINIAK, R.; SIKLIENKA, M.; ŠUSTEK, J. Impact of Tool Wear on the Quality of the Surface in Routing of MDF Boards by Milling Machines with Reversible Blades. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen*. 2016, roč. 58, č. 2, s. 89-100. ISSN 1336-3824.

KORKUT, S.; AKGÜL, M. Effect of drying temperature on surface roughness of oak (Quercus petraea ssp. iberica (Steven ex Bieb) Krassiln) veneer. *Building and environment*. 2007, roč. 42, č. 5, s. 1931-1935. ISSN 0360-1323.

KORKUT, S.; AKGÜL, M. Effect of drying temperature on surface roughness of oak (Quercus petraea ssp. iberica (Steven ex Bieb) Krassiln) veneer. *Building and environment*. 2007, roč. 42, č. 5, s. 1931-1935. ISSN 0360-1323.

KRAUSS, A.; PIERNIK, M.; PINKOWSKI, G. Cutting power during milling of thermally modified pine wood. *Drvna Industrija*. 2016, roč. 67, č. 3, s. 215-222. ISSN 0012-6772.

KVIETKOVÁ, M. -- ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA. *Obrábění dřeva.* V Praze: Česká zemědělská univerzita, Fakulta lesnická a dřevařská, 2015. ISBN 978-80-213-2604-0.

KVIETKOVÁ, M.; GAFF, M.; GAŠPARÍK, M.; KAPLAN, L.; BARCÍK, Š. Surface Quality of Milled Birch Wood after Thermal Treatment at Various Temperatures. *BioResources*. 2015b, roč. 10, č. 4, s. 6512-6521. ISSN 1930-2126.

LABIDI, C.; COLLET, R.; NOUVEAU, C.; BEER, P.; NICOSIA, S.; DJOUADI, M. A. Surface treatments of tools used in industrial wood machining. *Surface and Coating Technoogy*. 2005, roč. 200, č. 1-4, s. 118-122. ISSN 0257-8972.

LAINA, R.; SANZ-LOBERA, A.; VILLASANTE, A.; LOPÉZ-ESPÍ, P.; MARTÍNEZ - ROJAS, J. A.; ALPUENTE, J.; SÁNCHEZ-MONTERO, R.; VIGNOTE, S. Effect of the anatomical structure, wood properties and machining conditions on surface roughness of wood. Maderas. *Ciencia y tecnología*. 2017, roč. 19, č. 2, s. 203-212. ISSN 0717-3644.

LISIČAN, J. -- VYSOKÁ ŠKOLA LESNÍCKA A DREVÁRSKA (ZVOLEN, SLOVENSKO). FAKULTA DREVÁRSKA. *Obrábanie a delenie drevných materiálov.* Zvolen: Vysoká škola lesnícka a drevárska, 1988.

LISIČAN, Jozef. *Teória a technika spracovania dreva*. Zvolen: MATCENTRUM, 1996. ISBN 80-9673-15-6-4.

MRKVICA, I.; NESLUŠAN, M.; ČEP, R.; SLÉHA, V. Properties and Comparison of PVD Coatings. *Tehnički vjesnik*. 2016, roč. 23, č. 2, s. 569-574. ISSN 1330-3651

NOVÁK, V.; ROUSEK, M.; KOPECKÝ, Z. Assessment of wood surface quality obtained during high speed milling by use of non-contact method. *Drvna Industrija*. 2011, roč. 62, č. 2, s. 103-115. ISSN 0012-6772.

PROKEŠ, S. Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva. 3. vyd. Praha: SNTL – nakladatelství technické literatury. 1982. 584 s. ISBN 04-833-82.

PROKEŠ, Stanislav. *Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva*. 2., přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978. 584 s. ISBN 04-817-78.

ROUSEK, M.; KOPECKÝ, Z.; CHLEBOVSKÝ, R. Dodržení kvality obrábění dřeva frézováním ve vazbě na povrchové úpravy. *Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva*. 2010, roč. 7, č. 1, s. 141-150. ISBN 978-80-228-2143-8.

ROUSEK, M.; KOPECKÝ, Z.; SVOBODA, E. Influence of technology milling on the surface quality of the selected wood. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Forestry and Wood Technology*. 2012b, roč. 80, č. 1, s. 7-15. ISSN 1898-5912.

SEDLECKÝ, M. *Vliv druhu materiálu nástroje na kvalitu opracovaného povrchu při podélném frézování dřeva a materiálů na bázi dřeva.* Disertační práce. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, fakulta lesnická a dřevařská. 2017. 149 s.

SHEIKH-AHMAD, J. Y., J.S. STEWART a H. FELD. Failure characteristics of diamond-coated carbides in machining wood-based composites. *Wear*. 2003, roč. 255, č. 7-12, s. 1433-1437. ISSN 0043-1648.

SHEIKH-AHMAD, J. Y.; MORITA, T. Tool coatings for wood machining: Problems and prospects. *Forest Products Journal*. 2002, roč. 52, č. 10. s 43-51. ISSN 0015-7473.

SIKLIENKA, M.; ADAMCOVÁ, E. Výskum vplyvu materiálu reverzibilných nožov stopkových nástrojov na kvalitu opracovaného povrchu MDF. *Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva*. 2012, roč. 8, č. 1, s. 315-323. ISBN 978-80-2282385-2.

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

ŠÍMA, M.; JANKŮ, R. Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky. *MM Průmyslové spektrum*. 2007, roč. 4, s. 72-73. ISSN 1212-2572.

ŠÍMA, M.; ZINDULKA, O. Měření vlastností povlaků na nástrojích. *MM Průmyslové spektrum*. 2004, roč. 6, s. 30-31. ISSN 1212-2572.

ŠKALJIĆ, N.; BELJO-LUČIĆ, R.; ČAVLOVIĆ, A.; OBUĆINA, M. Effect of feed rate and wood species on roughness of machined surface. *Drvna Industrija*. 2009, roč. 60, č. 4. s. 229-234. ISSN 0012-6772.

THOMA, H.; PERI, L.; LATO, E. Evaluation of wood surface roughness depending on species characteristics. Maderas. *Ciencia y Tecnología*. 2015, roč. 17, č. 2, s. 285-292. ISSN 0717-3644.

ZINDULKA, O. Moderní metody povlakování nástrojů. *MM Průmyslové spektrum*. 2004, roč. 10, s. 28-29. ISSN 1212-2572.

ZINDULKA, O.; HOLUBÁŘ, P.; JÍLEK, M.; JANKŮ, R. Nový systém kluzných PVD povlaků. *MM Průmyslové spektrum*. 2005, roč. 4, s. 28-29. ISSN 1212-2572.

Normy, zákony, vyhlášky

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

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

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

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