

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a bio materiálů

**Vliv parametrů obrábění na
výslednou kvalitu u CNC obráběcího
centra**

Diplomová práce

Autor: Bc Josef Černý

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Sedlecký Ph.D.

2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Josef Černý

Dřevařské inženýrství

Název práce

Vliv parametrů obrábění na výslednou kvalitu u CNC obráběcího centra

Název anglicky

Influence of machining parameters on final surface quality in a CNC machine center

Cíle práce

Cílem práce je zjistit, jaký vliv mají vybrané parametry obráběcího procesu (řezná rychlost, podávací rychlost, úběr a odfrézovaná vzdálenost) na výslednou kvalitu obrobeného povrchu MDF s rozdílnou hustotou. Kvalita povrchu byla reprezentovaná složkou drsnosti (Ra, Rz, RSm) a vlnitosti (Wa, Wz, WSm).

Metodika

1. Literární rešerše na dané téma (červenec – září 2020).
2. Stanovení hodnocených parametrů (bude probíhat v průběhu tvorby literární rešerše a parametry budou stanoveny postupně: srpen – listopad 2020).
3. Samotné zjištění parametrů a jejich zpracování (měření parametrů, jejich změny a částečné vyhodnocení proběhne v průběhu prosince 2020 a ledna 2021).
4. Vyhodnocení výsledků (první čtvrtletí roku 2021).
5. Závěr a diskuse + odevzdání (březen nebo duben 2021).

Doporučený rozsah práce

min 50 stran

Klíčová slova

Obrábění, kvalita povrchu, obráběcí parametry

Doporučené zdroje informací

- Barcík, Š. Stroje a zariadenia – NCV. TU Zvolen, 2001., s.150, ISBN 80-228-1035-5.
Csanády, E. a Magoss, E.; Mechanics of Wood Machining; Springer 2013; s 202; ISBN 978-3642299544
Csanády, E. et al.; Quality of Machined Wood Surfaces; Springer 2015; 978-3-319-22418-3
DAVIM, J. P. Surface Integrity in Machining. 1. vyd. London: Springer. 2010. 215 s. ISBN 978-1-84882-973-5.
DAVIM, J. P. *Wood machining*. London: Wiley, 2011. ISBN 978-1-84821-315-9.
LISIČAN, J. – VYSOKÁ ŠKOLA LESNÍČKA A DREVÁRSKA (ZVOLEN, SLOVENSKO). FAKULTA DREVÁRSKA. Obrábanie a delenie drevných materiálov. Zvolen: Vysoká škola lesnícka a drevárska, 1988.
SIKLIENKA, M.; KMINIAK, R. Delenie a obrábanie dreva. Technická univerzita vo Zvolene. 2013a. 207 s. ISBN 978-80-228-2618-1.

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Miroslav Sedlecký, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Ing. Tomáš Kytka

Elektronicky schváleno dne 11. 2. 2022

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 05. 04. 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vliv parametrů obrábění na výslednou kvalitu u CNC obráběcího centra vypracoval samostatně pod vedením Ing. Miroslava Sedleckého Ph. D. a že jsem použil pouze zdroje, které jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

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

V Praze dne:

Bc. Josef Černý

.....

Poděkování

Zde bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Miroslavu Sedleckému Ph. D. a konzultantovi Ing. Tomáši Kytkovi za cenné rady, trpělivost a ochotu, se kterou odpovídali na všechny mé dotazy.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům a přítelkyni za jejich obrovskou podporu a pomoc při studiu.

ABSTRAKT

Dřevovláknitá deska se střední hustotou neboli MDF deska je materiál na bázi dřeva, který se v některých odvětvích dřevařského provozu upřednostňuje před dalšími aglomerovanými materiály, a dokonce i před masivním dřevem.

Nejčastější technologickou operací pro opracování tohoto materiálu je frézování. V dnešní době, kdy se i v dřevařském průmyslu vyžaduje čím dál tím větší přesnost, se využívají na tuto operaci CNC stroje. Nejčastějším využitím těchto strojů a technologie je výroba nábytkových dílců.

Přesnost není jediným požadavkem na tento druh obrábění, ale důležitá je i kvalita obrobeneho povrchu.

Právě z těchto důvodů se tato Diplomová práce věnuje kvalitě povrchu MDF po frézování na CNC stojích, kdy jsou měřenými parametry drsnosti (R_a , R_z a R_{Sm}) a vlnitosti (W_a , W_z a W_{Sm}). Pro jejich získání byla využita kontaktní metoda měření.

Pro vyšší přesnost a názornost byly použity dva typy MDF desek s rozdílnou hustotou a dva různé obráběcí nástroje. Právě ty dělí praktický úsek na dvě části. Pro první nástroj (tvarovací frézu) jsou sledovány parametry obrábění, tedy rezná rychlost, podávací rychlost a velikost úběru. Pro druhý nástroj (zaoblovací frézu) je sledovaným faktorem vzdálenost, kterou urazí v rezném procesu, což samozřejmě ovlivňuje otupování nástroje.

Výsledky zpracovávané v první části prokázaly vliv materiálu (konkrétně jeho hustoty) a některých dalších parametrů frézování na jednotlivé parametry drsnosti a vlnitosti.

V druhé části výsledky prokázaly, že měřené parametry drsnosti a vlnitosti rostou s postupně se zvyšující vzdáleností, kterou urazí nástroj v rezném procesu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Obrábění, kvalita povrchu, obráběcí parametry, frézování, CNC, MDF

ABSTRAKT

Medium density fibreboard or MDF board is a wood-based material which in some woodworking sectors is preferred over other agglomerated materials, and even over solid wood.

The most common technological operation for processing of this material is milling. Nowadays, when more and more precision is required in the woodworking industry, CNC machines are used for this operation. The most common use of these machines and technologies is the production of furniture components.

Accuracy is not the only requirement for this type of machining, the quality of the machined surface is also important.

For these reasons this Diploma Thesis deals with the quality of the MDF surface after milling on CNC machines, where the measured parameters are roughness (Ra, Rz and RSm) and corrugation (Wa, Wz and WSm). To obtain them, the contact measurement method was used.

For higher accuracy and visualisation, two types of MDF boards with different densities and two different machining tools were used. They divide the practical section into two parts. For the first tool (shaping cutter), the monitored factors are the machining parameters, therefore cutting speed, feed speed and removal rate. For the second tool (rounding cutter), the observed factor is the distance which they travel in the cutting process, which of course affects the blunting of the tool.

The results processed in the first part showed the influence of the material (specifically its density) and some other milling parameters on the individual parameters of roughness and corrugation.

In the second part, the results showed that the measured parameters of roughness and corrugation increase with gradually increasing distance that the tool travels in the cutting process.

KEY WORDS

Machining, surface quality, machining parameters, milling, CNC, MDF

OBSAH

1 ÚVOD	14
2 CÍL PRÁCE	16
3 OBRÁBĚNÍ	17
4 FRÉZOVÁNÍ	18
4.2 Základní technologické způsoby frézování.....	19
4.3 Rozdělení frézování	20
4.3.1 Podle osy otáčení a ploch opsaných řeznými klíny	20
4.3.2 Podle vzájemného pohybu nástroje a obrobku.....	22
4.3.3 Podle tvaru obrobené plochy.....	23
5 KINEMATIKA FRÉZOVÁNÍ.....	24
5.1 Základní řezné podmínky.....	25
5.2 Další faktory ovlivňující proces frézování.....	26
6 CNC STROJE	30
6.1 Historie CNC strojů	31
6.2 Rozdělení CNC strojů	33
6.3 Základní části CNC strojů.....	35
6.4 Souřadnicový systém CNC strojů	35
7 NÁSTROJE PRO CNC.....	36
7.2 Frézovací nástroje využívané na CNC strojích.....	36
7.2.1 Opatření nástroje	37
7.2.2 Upnutí nástrojů.....	37
8 PLOCHA OBRÁBĚNÉHO MATERIÁLU	38
8.1 Kvalita obrobené plochy	38
8.1.1 Základní pojmy při hodnocení kvality	38
8.1.2 Měření kvality povrchu	40
9.3 MDF deska (Medium Density Fiberboard).....	41
9.4 Výroba MDF	42
9.4.1. Výroba MDF v Lukavci	42
10 METODIKA PRÁCE	45
10.1 Použité materiály.....	46
10.2 Použité frézovací nástroje	47
10.2.1 Fréza CRUING.....	47
10.2.2 Fréza VYDONE	48
10.3 Strojní vybavení	49

10.3.1 CNC	49
10.3.2 Formátovací kotoučová pila	50
10.4. Měřicí zařízení	51
10.5 Příprava zkušebních vzorků	51
10.6 Měření fyzikálních a mechanických vlastností materiálu	53
10.6.1 Hustota	53
10.6.2 Vlhkost	54
10.6.3 Hustotní profil	54
10.7 Metodika měření profilu drsnosti a vlnitosti	56
11 VÝSLEDKY PRÁCE	57
11.1 Výsledky pro frézu GRUING	57
11.1.1 Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti „Ra“	60
11.1.2 Nejvyšší výška profilu drsnosti „Rz“ pro frézu GRUING	65
11.1.3 Průměrná šířka prvků drsnosti „RSm“ pro frézu GRUING	70
11.1.4 Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti „Wa“ pro frézu GRUING	75
11.1.5 Nejvyšší výška profilu vlnitosti „Wz“ pro frézu GRUING	80
11.1.6 Průměrná šířka prvků vlnitosti „WSm“ pro frézu GRUING	85
11.2 Výsledky pro frézu VYDONE	90
11.2.1 Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti „Ra“ v závislosti na odfrézované vzdálenosti	91
11.2.2 Nejvyšší výška profilu drsnosti „Rz“ v závislosti na odfrézované vzdálenosti	92
11.2.3 Průměrná šířka prvků drsnosti „RSm“ v závislosti na odfrézované vzdálenosti	93
11.2.4 Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti „Wa“ v závislosti na odfrézované vzdálenosti	94
11.2.5 Nejvyšší výška profilu vlnitosti „Wz“ v závislosti na odfrézované vzdálenosti	95
11.2.6 Průměrná šířka prvků vlnitosti „WSm“ v závislosti na odfrézované vzdálenosti	96
12 DISKUSE	97
13 PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI	99
14 ZÁVĚR	100
15 ZDROJE	101
16 PŘÍLOHY	106

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Dráha břitu nástroje v záběru.....	18
Obr. 2: Hlavní druhy frézování	19
Obr. 3: Válcové frézování	20
Obr. 4: Kuželové frézování	21
Obr. 5: Čelní frézování.....	21
Obr. 6: Čelně-kuželové frézování	22
Obr. 7: Sousedné frézování	22
Obr. 8: Nesousedné frézování	23
Obr. 9: Schéma oddělování třísky	24
Obr. 10: Geometrie nástroje	29
Obr. 11: Schéma CNC stroje.....	31
Obr. 12: Stopková fréza	36
Obr. 13: Řezný klín	37
Obr. 14: Základní pojmy při hodnocení kvality	39
Obr. 15: Schéma výroby MDF	42
Obr. 16: Silo na dřevní vlákno	43
Obr. 17: Formátování desek.....	44
Obr. 18: Kategorizace souborů zkušebních těles	45
Obr. 19: MDF desky z DDL	46
Obr. 20: Fréza GRUING	47
Obr. 21: Fréza VYDONE.....	48
Obr. 22: CNCWEEKE VENTURE 06S	49
Obr. 23: Formátovací kotoučová pila SCN si400 class	50
Obr. 24: FORM TALYSURF 50 Intra:.....	51
Obr. 25: Průběh frézování	51
Obr. 26: Rozměry vzorku.....	52
Obr. 27: Připravené vzorky	52
Obr. 28: Rozměry vzorku.....	53
Obr. 29: Hustotní profil MDF Frézovací	55
Obr. 30: Hustotní profil MDF Standard.....	55
Obr. 31: Měření kvality frézovaného povrchu pomocí FORM TALYSURF 50 I ntra	56

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Parametry frézy GRUING	47
Tab. 2: Parametry frézy VYDONE	48
Tab. 3: Průměrná hustota	53
Tab. 4: Průměrná vlhkost	54
Tab. 5: Průměrné hodnoty měřených parametrů drsnosti a vlnitosti	58
Tab. 6: Směrodatná odchylka hodnot měřených parametrů drsnosti a vlnitosti	59
Tab. 7: Duncanov test znázorňující vliv jednotlivých parametrů na faktor drsnosti Ra	64
Tab. 8: Duncanov test znázorňující vliv jednotlivých parametrů na faktor drsnosti Rz	69
Tab. 9: Duncanov test znázorňující vliv jednotlivých parametrů na faktor RSm drsnosti RSm	74
Tab. 10: Duncanov test znázorňující vliv jednotlivých parametrů na faktor vlnitosti Wa	79
Tab. 11: Duncanov test znázorňující vliv jednotlivých parametrů na faktor vlnitosti Wz	84
Tab. 12: Duncanov test znázorňující vliv jednotlivých parametrů na faktor vlnitosti WSm	89

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Vliv materiálu na parametr drsnosti Ra	60
Graf 2: Vliv otáček nástroje na parametr drsnosti Ra	60
Graf 3: Vliv rychlosti posunu nástroje na parametr drsnosti Ra	61
Graf 4.: Vliv velikosti úběru na parametr drsnosti Ra	61
Graf 5: Vliv vybraných parametrů na parametr drsnosti Ra u MDF desky Frézovací	62
Graf 6.: Vliv vybraných parametrů na parametr drsnosti Ra u MDF desky Standard	63
Graf 7: Vliv materiálu na parametr drsnosti Rz	65
Graf 8: Vliv otáček nástroje na parametr drsnosti Rz	65
Graf 9: Vliv rychlosti posunu nástroje na parametr drsnosti Rz	66
Graf 10: Vliv velikosti úběru na parametr drsnosti Rz	66
Graf 11: Vliv vybraných parametrů na parametr drsnosti Rz u MDF desky Frézovací	67
Graf 12: Vliv vybraných parametrů na parametr drsnosti Rz u MDF desky Standard	68
Graf 13: Vliv materiálu na parametr drsnosti RSm	70
Graf 14: Vliv otáček nástroje na parametr drsnosti RSm	70
Graf 15: Vliv rychlosti posunu nástroje na parametr drsnosti RSm	71
Graf 16: Vliv velikosti úběru na parametr drsnosti RSm	71
Graf 17: Vliv vybraných parametrů na parametr drsnosti RSm u MDF desky Frézovací	72
Graf 18: Vliv vybraných parametrů na parametr drsnosti RSm u MDF desky Standard	73
Graf 19: Vliv materiálu na parametr vlnitosti Wa	75
Graf 20: Vliv otáček nástroje na parametr vlnitosti Wa	75
Graf 21: Vliv rychlosti posunu nástroje na parametr vlnitosti Wa	76
Graf 22: Vliv velikosti úběru na parametr vlnitosti Wa	76
Graf 23: Vliv vybraných parametrů na parametr vlnitosti Wa u MDF desky Frézovací	77
Graf 24: Vliv vybraných parametrů na parametr vlnitosti Wa u MDF desky Standard	78
Graf 25: Vliv materiálu na parametr vlnitosti Wz	80

Graf 26: Vliv otáček nástroje na parametr vlnitosti Wz	80
Graf 27: Vliv rychlosti posunu nástroje na parametr vlnitosti Wz	81
Graf 28: Vliv velikosti úběru na parametr vlnitosti Wz.....	81
Graf 29: Vliv vybraných parametrů na parametr vlnitosti Wz u MDF desky Frézovací.....	82
Graf 30: Vliv vybraných parametrů na parametr vlnitosti Wz u MDF desky Standard	83
Graf 31: Vliv materiálu na parametr vlnitosti WSm.....	85
Graf 32: Vliv otáček nástroje na parametr vlnitosti WSm.....	85
Graf 33: Vliv rychlosti posunu nástroje na parametr vlnitosti WSm.....	86
Graf 34: Vliv velikosti úběru na parametr vlnitosti WSm	86
Graf 35: Vliv vybraných parametrů na parametr vlnitosti WSm u MDF desky Frézovací.....	87
Graf 36: Vliv vybraných parametrů na parametr vlnitosti WSm u MDF desky Standard.....	88
Graf 37: Vliv odfrézované vzdálenosti na parametr drsnosti Ra	91
Graf 38: Vliv odfrézované vzdálenosti na parametr drsnosti Rz	92
Graf 39: Vliv odfrézované vzdálenosti na parametr drsnosti RSm.....	93
Graf 40: Vliv odfrézované vzdálenosti na parametr vlnitosti Wa.....	94
Graf 41: Vliv odfrézované vzdálenosti na parametr vlnitosti Wz.....	95
Graf 42: Vliv odfrézované vzdálenosti na parametr vlnitosti WSm	96

1 ÚVOD

Na obrábění dřeva a materiálů na jeho bázi se využívá několik základních operací a mezi ně frézování patří. Jedná se o proces, jehož hlavním pracovním pohybem je rotace frézovacího nástroje (frézy) kolem své osy. Při tomto pohybu vnikají jednotlivé řezné části nástroje do materiálu a odebírá tak jeho určitou část (třísku). Materiál během procesu se buď proti nástroji současně posouvá (proces srovnávání, ...), anebo je pevně upevněn a posuvný pohyb vykonává nástroj (frézování na CNC strojích). Díky široké škále strojů a nástrojů, které se mohou na tento druh obrábění využít je možné touto metodou opracovávat rovinné i tvarové plochy a zaměřit se na jejich přesný tvar a kvalitu (Davim, 2011; Tanaskovic, 1968).

V současné době, kdy se vyrábějí čím dál náročnější a složitější produkty, se i mnohem více dbát na jejich přesnost a rychlost výroby, proto i do nábytkářské výroby vstupují CNC stroje. Tyto stroje jsou především součástí výrobních provozů s větším objemem produkce. Umožňují totiž maximálně zrychlit výrobu, snížit finální cenu výrobku a snadný přechod na jiný druh výrobku pouhou změnou programu, případně změnou nástroje (Štulpa, 2006). Díky těmto vlastnostem zasahují do dřevařského průmyslu především co se týče ekonomie.

Právě z důvodu ekonomie se i v dnešní době čím dál více využívají aglomerované materiály na bázi dřeva. Je sice pravda, že surové dřevo je přírodně obnovitelná surovina, ale v dnešní době ji máme pouze v omezeném množství, a tak se musí zpracovat i méně kvalitní dřevní hmota, a to právě na aglomerované materiály. Tyto materiály mají také do určité míry v porovnání se dřevem lepší vlastnosti, a i to je tedy důvod pro jejich výrobu a využití. Tyto materiály jsou tvořeny z drobných dřevních částic (dřevní prach, piliny, vlákna, třísky) za pomoci vysokého tlaku, teploty, případně i lepidla. Z hlediska opracování těchto materiálů je frézování velmi častým způsobem obrábění (Kaděra 2003).

Důležité však je, že veškeré výrobky směřují ke konkrétnímu zákazníkovi, který vyžaduje určitou kvalitu, jak na pohled, tak na dotek. Je tedy velmi důležitá kvalita obrobeneho povrchu. Stejně to má i firma Dřevozpracující družstvo Lukavec (DDL), která pomocí CNC strojů vyrábí širokou škálu nábytkových dílců z MDF desek. Pro takovou firmu, která produkuje velké množství nábytkových dílců, je velmi nepříjemná a finančně náročná reklamace jednotlivých dílců zaměřující se především na jejich kvalitu povrchu.

Tento problém mě zaujal na tolik, že jsem se rozhodl DDL pomoci. Právě proto se tato diplomová práce zaměřuje na zjištění kvality povrchu po frézování na CNC strojích aglomerovaných materiálů, konkrétně MDF desek vyrobených právě v Lukavci. Na tuto práci bude dále navazovat povrchová úprava vzorků vyrobených při stejných parametrech a následně měření kvality povrchu po nastříkání laku. Velká část výrobků se totiž vrací zpět do DDL na reklamaci právě až po povrchové úpravě.

2 CÍL PRÁCE

Práce má hlavní cíl experimentálním způsobem zjistit a následně vyhodnotit faktory ovlivňující kvalitu povrchu (drsnost a vlnitost) při obrábění frézováním na CNC strojích dvou druhů MDF o dvou různých hustotách. Měřenými parametry drsnosti a vlnitosti jsou:

- průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti „Ra“
- nejvyšší výška profilu drsnosti „Rz“
- průměrná šířka prvků drsnosti „RSm“
- průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti „Wa“
- nejvyšší výška profilu drsnosti „Wz“
- průměrná šířka prvků drsnosti „WSm“

Na základě těchto sledovaných parametrů určit optimální kombinace parametrů frézování a těmi pro tuto práci jsou:

- vyhodnotit vliv následujících faktorů a jejich kombinací na kvalitu povrchu:
 - rychlost otáček vřetene (25000, 20000, 15000 ot/min)
 - rychlost posuvu (15, 10, 5 m.min⁻¹)
 - velikost úběru (2, 3 mm)
- vyhodnotit vliv odfrézované vzdálenosti (otupení nástroje) na kvalitu povrchu:
 - vzdálenost (50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 3000, 4000 m)

3 OBRÁBĚNÍ

Historie obrábění sahá již daleko do naší minulosti. Ze začátku se ovšem jednalo pouze o obrábění ruční. Šlo o opracování veškerých materiálů, které měli dříve lidé k dispozici jako kůži, kámen a mimo jiné i dřevo. Postupem času si člověk začal veškerou práci usnadňovat, a tak postupným vývojem vzniklo obrábění strojní (ale ani ruční obrábění nevyumizelo) (Kvietková, 2015).

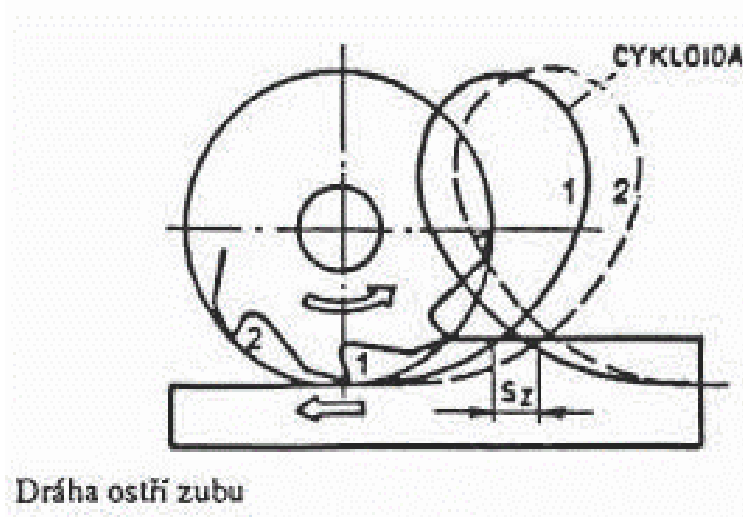
Jedna z mnoha definic obrábění zní: Soubor technologických procesů a postupů potřebných pro přeměnu materiálu na polotovár nebo na hotový výrobek, při kterých je dosaženo přesných rozměrů, tvaru a jakosti povrchu (Kvietková, 2015; Prokeš, 1982). Při strojním obrábění se těchto efektů dosáhne řezným nástrojem, který odděluje určitou vrstvu materiálu (třísku).

Strojní obrábění se využívá všude, kde je na prvním místě rychlost a přesnost. To se dále dělí na obrábění třískové a beztřískové. Tyto dva druhy se liší tím, že u třískového obrábění vzniká vedlejší produkt, povětšinou odpad, u beztřískového nikoliv. Využívanější technologie je ta, při které je hlavní pohyb řezný a vzniká při něm tříska, má větší rozsah možností typů výrobků a není tak náročný na technologii ((Lisičan, 1988; Kvietková 2015). Proces obrábění se rozděluje do čtyř základních skupin, a to právě podle hlavního řezného pohybu:

- 1) Cykloidní pohyb vykonává přímo obrobek (soustružení);
- 2) Cykloidní pohyb vykonává pouze nástroj (řezání kotoučovou pilou, zahlubování, frézování, broušení, vrtání);
- 3) Přímocharý vratný pohyb při obrábění vykonává přímo obrobek (hoblování);
- 4) Přímocharý vratný pohyb při obrábění vykonává nástroj (řezání pásovou pilou, pilování, protlačování, řezání rámovou pilou) (Prokeš 1982).

4 FRÉZOVÁNÍ

Problematika této práce je zaměřena na obrábění dřeva procesem frézování. Jedná se o technologii mechanického třískového obrábění, při kterém vzniká nežádoucí odpad (třísky, piliny, prach). Tato technologie je využívána na obrábění rovinných nebo tvarových ploch otáčivým vícebřitým nástrojem (frézou, frézovací hlavou). Nástroj jako takový se otáčí kolem své osy a svými zuby po obvodu postupně odebírá určité množství materiálu ve tvaru krátké třísky. Při této technologii jsou zapotřebí dva základní pohyby, a to hlavní otáčivý pohyb nástroje a vedlejší posuvný pohyb obrobku nebo nástroje. Jednotlivé frézovací břity vykonávají tyto pohyby. Z toho vyplývá, že dráha břitů v záběru je ve tvaru cykloidy (Obr. 1) (Lisičan, 1988; Afanasiev 1962).



Obr. 1: Dráha břítu nástroje v záběru

Dráha ostří zubu [online] (12.3.2021)

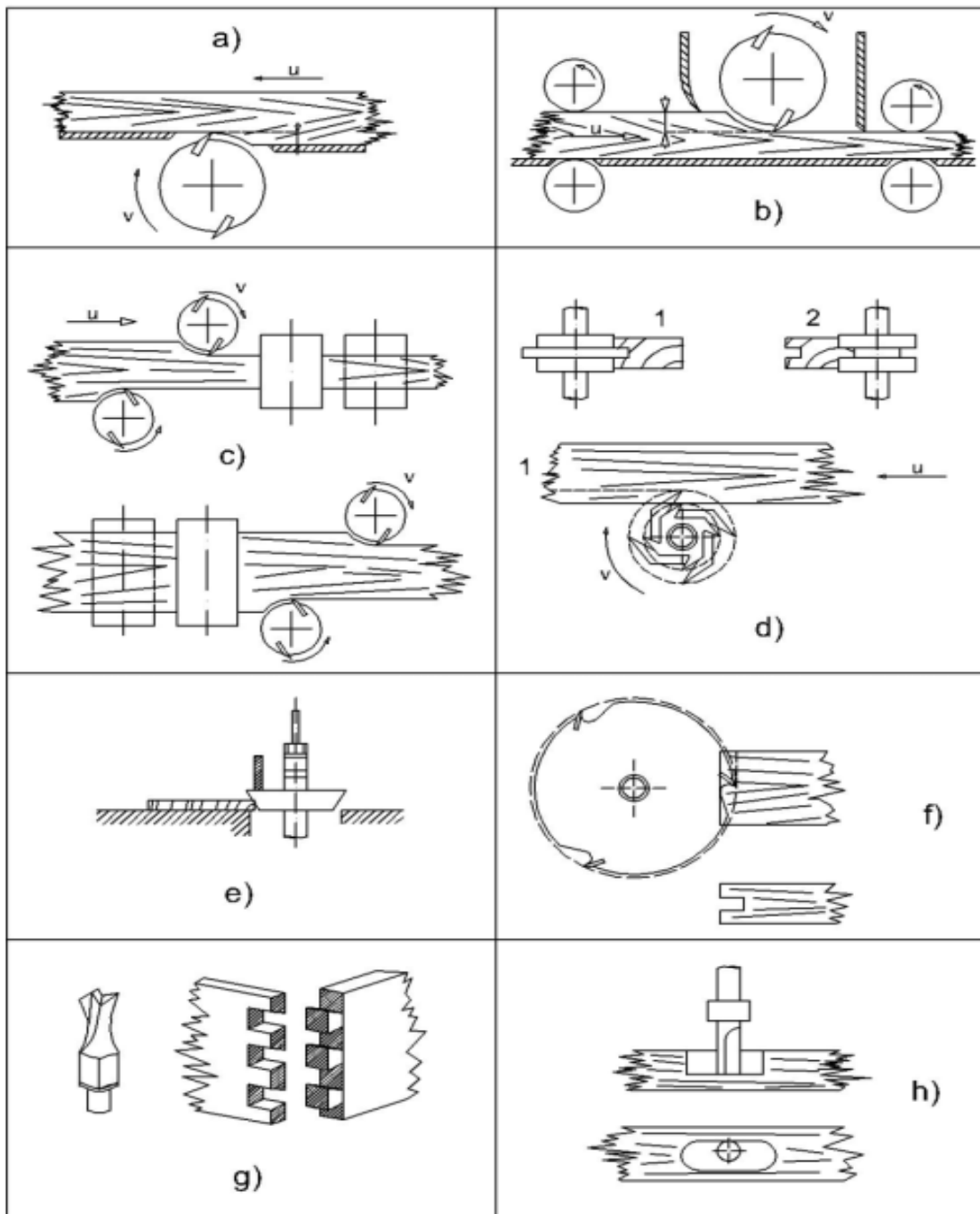
1 – první zub v záběru a jeho dráha, 2 – druhý zub v záběru a jeho dráha

Hlavním účelem frézování je dát dílci přesné rozměry, tvar a kvalitu obráběné plochy. Díky těmto vlastnostem má ve dřevařské výrobě významné místo a je jednou z hlavních operací při opracování dřeva a materiálů na jeho bázi (Prokeš, 1982).

V dnešní době máme k dispozici širokou škálu nástrojů a strojů, je tedy možné obrábět rovinné plochy, ale také plochy tvarové, šikmé, drážky, polodrážky, rotační plochy atd (Kvietková, 2015).

4.2 Základní technologické způsoby frézování

- a) rovinné („srovnávání“ a „tloušťkování“),
- b) křivoploché (frézování křivé plochy),
- c) profilovací (frézování různých profilů),
- d) speciální (např. frézování reliéfů) (Prokeš 1982).



Obr. 2: Hlavní druhy frézování

(Prokeš 1982)

a) srovnávání, b) tloušťkování, c) dvoustranné frézování, d) frézování péra a drážky, e) frézování úhlovou frézou, h) frézování vrchní frézou

4.3 Rozdělení frézování

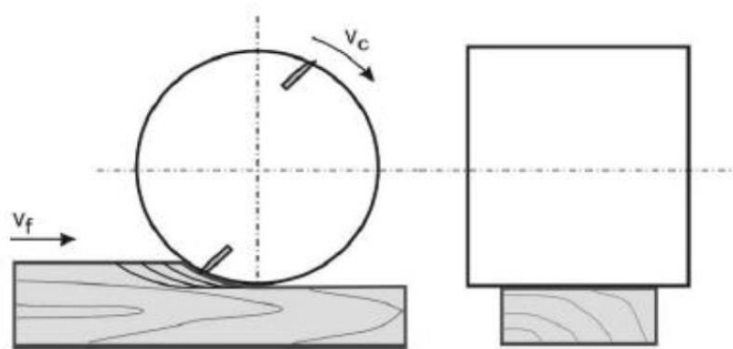
Frézování jako takové má několik základních technologických parametrů, podle kterých lze rozdělit do určitých skupin. Toto rozdělení je podle:

- 1) osy otáčení a ploch opsaných řeznými klíny,
- 2) vzájemného pohybu nástroje a obrobku,
- 3) tvaru obrobeneé plochy (Prokeš 1982).

4.3.1 Podle osy otáčení a ploch opsaných řeznými klíny

Jedná se o nejběžnější rozdělení druhů frézování, kdy je podstatný tvar frézovacího nástroje, umístění osy otáčení a tvar ploch, které při pohybu opisují jednotlivé břity nástroje.

- a) **Válcové** – Jako frézovací nástroj se používá válec s několika obvodovými noži, osu otáčení má umístěnou v jeho středu a je kolmá k obráběné ploše. (Obr. 3) (Prokeš 1982).



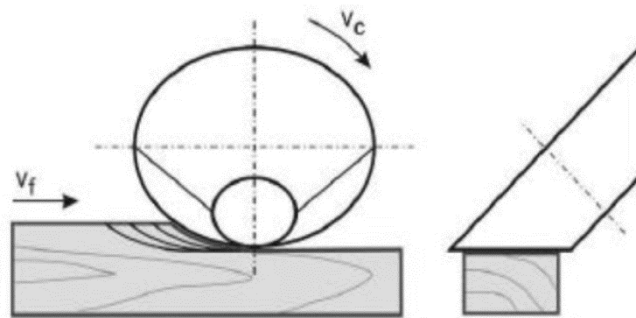
Obr. 3: Válcové frézování

(Siklienka a Kminiak 2013a)

v_c – řezná rychlost, v_f – podávací rychlost

- b) **Kuželové** – Při tomto frézování je osa rotace vůči obráběné ploše nakloněna pod určitým úhlem (doporučuje se $10^\circ - 12^\circ$) a tuto válcovou plochu opisují i jednotlivé břity nástroje (Obr. 4) (Prokeš, 1982). Čelní část břitu je rovnoběžná s odebíraným povrchem a boční část pracuje téměř kolmo ke směru dřevních vláken, podobá se tedy frézování válcovému. Tento druh frézování se využívá v sériové výrobě

zejména díky možnosti použití vysokých rychlostí posuvu. Je tomu tak, protože tloušťka odebrané třísky je menší vůči válcovému frézování (Řasa a Gabriel, 2005).

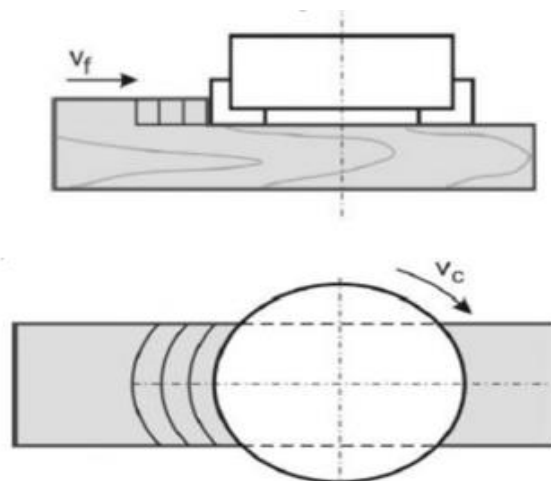


Obr. 4: Kuželové frézování

(Siklienka a Kminiak 2013a)

v_c – řezná rychlost, v_f – podávací rychlost

- c) **Čelní** – Použitý frézovací nástroj má osu otáčení umístěnou v samotném středu a je přímo kolmá k povrchu, který je obráběn. Jednotlivé břity opisují při rotaci tvar kružnice (Prokeš, 1982). Břity na boční straně pracují principiálně stejně jako břity při výše zmiňovaném válcovém frézování, zatímco z čelní strany jsou rovnoběžné s odebíraným povrchem. Toto frézování se využívá u většiny tvarových a stopkových fréz. (Obr. 5) (Řasa a Gabriel, 2005).

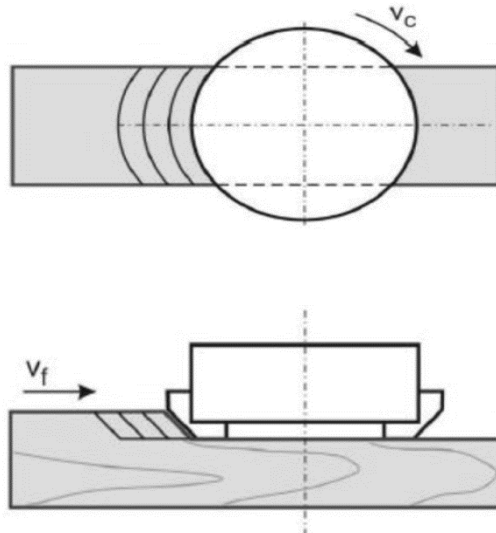


Obr. 5: Čelní frézování

(Siklienka a Kminiak, 2013a)

v_c – řezná rychlost, v_f – rychlost posuvu

d) Čelně-kuželové – Osa rotace je umístěna stejně jako u čelního frézování, tedy ve středu nástroje kolmá k obráběnému povrchu. Neliší se ani plochou, kterou opisují nože, je tedy kruhová. Liší se pouze tvarem nožů na boční straně, které jsou v určitém úhlu vůči ploše (Obr.6) (Prokeš, 1982).

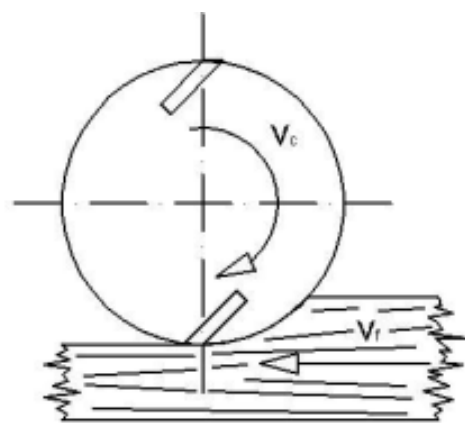


Obr. 6: Čelně-kuželové frézování
(Siklienka a Kminiak, 2013a)
 v_c – řezná rychlost, v_f – podávací rychlost

4.3.2 Podle vzájemného pohybu nástroje a obrobku

a) Frézování sousledné

Můžeme se s ním také setkat pod názvem sousměrné. Jedná se o takový druh frézování, kdy směr otáčení frézy je shodný (rovnoběžný) s posuvem obrobku nebo nástroje (Obr.7). Díky těmto pohybům se zuby frézy zařezávají přímo do plného materiálu v maximálním průřezu třísky. Nulový průřez tak končí na obrobené ploše, která je tak kvalitnější v porovnání s nesousledným frézováním. Tento typ frézování má jednu výhodu. Řezná síla má směr dolů, čímž pomáhá držet obrobek na stole frézky. Má ovšem i jednu velkou nevýhodu, že v průběhu frézování vznikají velké rázy (Kvietková, 2015).

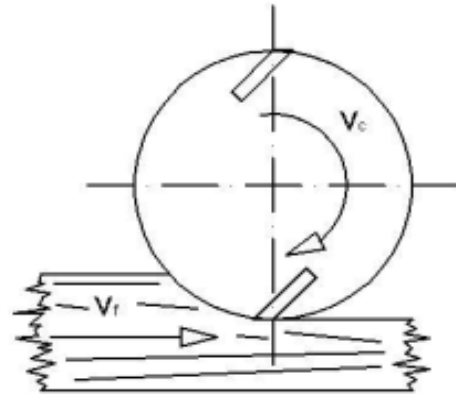


Obr. 7: Sousledné frézování
(Lisičan, 1996)
 v_c – řezná rychlost, v_f – podávací rychlost

b) Frézování nesousledné

Neboli nesousměrné je nazýván takový způsob frézování, při kterém pohyby otáčení frézy a směr posuvu působí proti sobě (Obr.8). Pak je tedy jasné, že při tomto způsobu je zvětšován postupně průřez tloušťky třísky od nuly do maxima (Kvietková 2015).

Tento způsob frézování má jednu hlavní nevýhodu, že řezná síla působí směrem vzhůru, má tedy tendenci obrobek nadzvedávat od pracovního stolu. Musí tedy platit, že síly upínací míří proti síle řezné rychlosti (Mikolášik, 1981).



Obr. 8: Nesousledné frézování
(Lisičan, 1996)

v_c – řezná rychlost, v_f – podávací rychlost

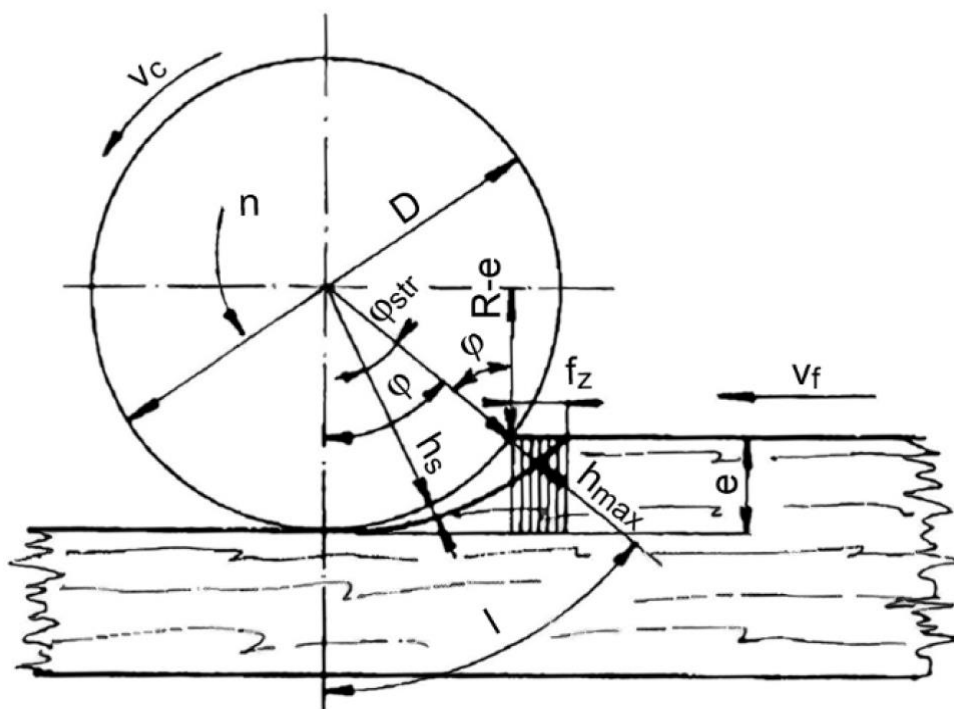
4.3.3 Podle tvaru obrobenej plochy

- a) **Rovinné** – mezi tento druh frézování můžeme zařadit: srovnávání, tloušťkování a vícestranné frézování, tedy takové technologické operace, kde nám jde především o kvalitu plochy a hrany.
- b) **Tvarové** – frézování, kterým se mění především tvar obráběného materiálu (ozdobná zaoblení, výroba spojů, ...).
- c) **Objemové** – kopírovací frézování (Barcík et al., 2013).

5 KINEMATIKA FRÉZOVÁNÍ

Jedná se o souhrn všech činitelů (řezných podmínek), které přímo ovlivňují proces frézování. Je velmi důležité, aby proces frézování probíhal tak, jak má, tedy především produktivně a hospodárně. Proto je podstatné jednotlivé řezné podmínky znát a vědět, jak proces ovlivňují.

Řezné podmínky můžeme rozdělit do dvou skupin. Jedna je základní, kam řadíme: řeznou rychlost (v_c), posuvnou rychlost (v_f) a hloubku řezu (e). Do druhé skupiny patří další činitelé, kteří také frézování ovlivňují: řezný materiál, druh obráběného materiálu, velikost a tvar průřezu třísky, geometrie nástroje a celková tuhost obráběcí soustavy (Kvietková, 2015).



Obr. 9: Schéma oddělování třísky

(Barčík, 2009)

v_f – rychlost posuvu (m/min), v_c – řezná rychlost (m/s), h_{max} – maximální tloušťka (mm), h_s – tloušťka odřezávané vrstvy (mm), e – hloubka řezu (mm), f_z – posuv na zub (mm), D – průměr nástroje (mm), úhel záběru zubu ($^\circ$), střední úhel ($^\circ$)

5.1 Základní řezné podmínky

Řezná rychlost

Udává rychlost pohybu řezného nástroje v jednotkách [m.s⁻¹]. Vypočítá se jako obvodová rychlost bodů ostří na obvodu nástroje – frézy. Vzorec pro její výpočet je:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60000} \text{ [m.s}^{-1}\text{]} \quad (1)$$

Kde:

v_c – řezná rychlost [m.s⁻¹]

D – řezný průměr frézy [mm]

n – otáčky frézy [min⁻¹]

Posuv

Jedná se o délku dráhy udávané v mm, kterou urazí obrobek (nebo nástroj) za jednu minutu. Posuv jako takový můžeme rozdělit na: posuv do řezu (řezná rychlost) v_f , posuv na otáčku w_m a posuv na zub w_z . Pokud se tyto rychlosti zvyšují, zvyšuje se i řezný odpor.

$$w_m = \frac{v_f \cdot 1000}{n} \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]} \quad (2)$$

$$v_f = \frac{w_m \cdot n}{1000} \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]} \quad (3)$$

$$w_z = \frac{w_m \cdot 1000}{n \cdot z} \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]} \quad (4)$$

Kde:

w_m – posuv na otáčku [m.min⁻¹],

v_f – posuvná rychlost [m.min⁻¹],

n – počet otáček za minutu [ot/min]

w_z – posuv na zub

z – počet zubů (Kvietková, 2015).

Hloubka řezu (úběr)

Jedná se o vzdálenost naměřenou mezi obráběnou a obrobenou plochou. Tedy o množství materiálu ubraného řezným nástrojem udávající se v milimetrech (Barcík, 2009).

5.2 Další faktory ovlivňující proces frézování

Teoretická délka třísky:

$$L = \frac{D}{2} \cdot \arctg(\varphi + \phi) = \frac{\pi \cdot D \cdot (\varphi + \phi)}{360^\circ} \approx 0,0175 \cdot R \cdot \varphi \quad [\text{mm}] \quad (5)$$

Kde:

D – řezný průměr frézy [mm],

R – poloměr řezné kružnice [mm],

Φ – úhel styku dřevních vláken s nástrojem [°],

φ' – posunutý úhel styku dřevních vláken [°].

Při splněních kritérií, kterými jsou: větší průměr frézy, malá tloušťka třísky odebírané vrstvy a menších podávací rychlost je možné použít vztah jednodušší.

$$L = R \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{a_p}{R}} = \sqrt{D \cdot a_p} = \frac{f_z \cdot a_p}{h_{ch-str}} \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

Kde:

D – řezný průměr frézy [mm],

R – poloměr řezné kružnice [mm],

a_p – tloušťka odebírané vrstvy [mm],

f_z – posuv na zub [mm/zub],

h_{ch-str} – střední vrstva odebírané třísky [mm].

Teoretická střední tloušťka třísky:

$$h_{ch-str} = \frac{f_z \cdot a_p}{L} \approx \frac{f_z \cdot a_p}{\sqrt{a_p \cdot D}} \approx f_z \sqrt{\frac{a_p}{D}} \approx \frac{f_z \cdot 1000}{n \cdot z} \cdot \sqrt{\frac{a_p}{D}} \text{ [mm]} \quad (7)$$

Kde:

D – řezný průměr frézy [mm],

L – teoretická délka třísky [mm],

a_p – tloušťka odebírané vrstvy [mm],

f_z – posuv na zub [mm/zub],

n – otáčky frézovacího nástroje [ot/min],

z – počet zubů.

Teoretická maximální tloušťka třísky:

$$h_{ch-max} \approx f_z \sin \varphi \approx 2 \cdot h_{ch-str} \text{ [mm]} \quad (8)$$

f_z – posuv na zub [mm/zub],

φ – úhel styku dřevních vláken s nástrojem [°],

h_{ch-str} – střední vrstva odebírané třísky [mm].

Okamžitá tloušťka odebírané vrstvy:

$$h_\varphi = f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [mm]} \quad (9)$$

Kde:

f_z – posuv na zub [mm/zub],

φ_i – záběrový úhel [°].

Druh obráběného materiálu

Každý materiál se řadí do příslušné třídy obrobitelnosti. Obrobitelnost jako taková se stanovuje v závislosti na materiálu, druhu a způsobu obrábění (Lisičan 1978).

Řezaný materiál

Základní fyzikální vlastnosti materiálů jako je hustota a tvrdost ovlivňují proces frézování. Materiály s nižšími hodnotami těchto vlastností jsou schopny být obráběny vyššími řeznými rychlostmi, aniž by se předčasně zkracovala trvanlivost nástroje a ovlivňoval povrch obrobku. (Barcík, 2009). Vliv na obrobitelnost dřeva a materiálů na jeho bázi má také jeho vlhkost. Vlhké dřevo se obtížně obrábí, přestože klade menší řezný odpor. Obrobitelnost dřeva ovlivňuje také jeho zdravotní stav. Dřevo poškozené houbami bývá sice měkčí, ale přesto se nedá obrábět s požadovanou čistotou.

Geometrie řezného nástroje

Aby břit mohl odebírat třísky, musí k tomu být náležitě upraven. Každý zub má klínovité provedení zakončené břitem tvořeným dvěma plochami (čelem a hřbetem), u jejichž průřezu vznikne ostří, které má za úkol odřezávat třísky. Čím ostřejší klín břit má, tím snadněji vniká do materiálu.

Celý obráběcí (frézovací) proces vzniká působením břitu na obráběný materiál. Proto jsou důležité jednotlivé parametry řezného nástroje (Obr. 10), které do jisté míry ovlivňují kvalitu povrchu, tvarovou a rozměrovou přesnost obráběného dílce. Tyto parametry ovlivňují i velikost jednotlivých složek řezných sil (Barcík, 2009). Celý břit se skládá z několika úhlů:

a) Úhel hřbetu α (10° - 15°)

b) Úhel břitu β (60° - 70°)

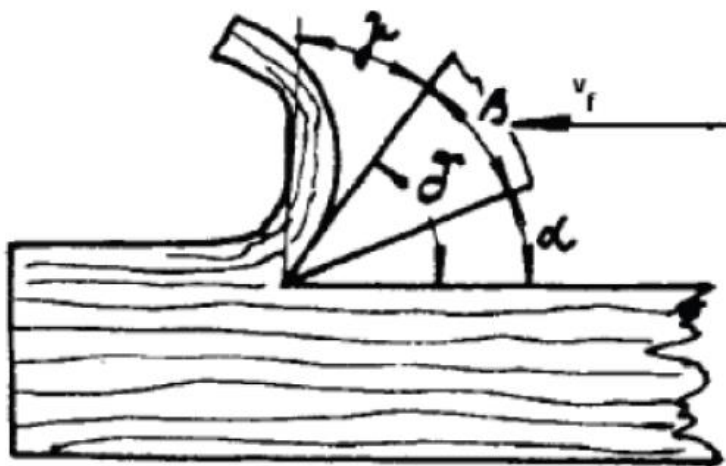
c) Úhel čela γ (20° - 30°).

Součet všech uvedených úhlů (úhlu čela, úhlu břitu a úhlu hřbetu) je 90° :

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ \quad (10)$$

Součet úhlu hřbetu a úhlu řezného klínu udává úhel řezu δ :

$$\alpha + \beta = \delta = 90^\circ - \gamma \quad (11)$$



Obr. 10: Geometrie nástroje

(Lisičan, 1996)

α – úhel hřbetu, β – úhel břitu, γ – úhel čela, δ – úhel řezu, v_f – posuvná rychlost

Tuhost obráběcí soustavy

Tuhost jednotlivých částí frézovací soustavy může do jisté míry ovlivnit proces frézování. Proto je velmi důležité zajistit správnou tuhost celé soustavy. Řadíme sem tuhost obráběcího stroje, obráběcího nástroje, upínacího zařízení a obrobku (Prokeš, 1978).

6 CNC STROJE

Zkratka CNC vznikla z anglického názvu Computerized Numerical Control, po přeložení dostáváme název počítačové číslicové řízení. Jedná se tedy o stroje, které jsou během celého procesu výroby řízeny vlastním počítačem (schéma, jak přesně fungují je vyobrazené na Obr. 11 (Štulpa 2006; Marek a Blecha, 2010)). Tyto stroje tak mohou fungovat s vysokou přesností, rychlostí a flexibilitou. Umožňují tzv. pružnou automatizaci neboli snadný přechod na jiný typ výrobku pouhou změnou počítačového výrobního programu a případnou výměnou obráběcího nástroje (Kvietková, 2015; ; Marek a Blecha, 2010). Jako veškerá využívaná technologie mají i CNC stroje své výhody a nevýhody.

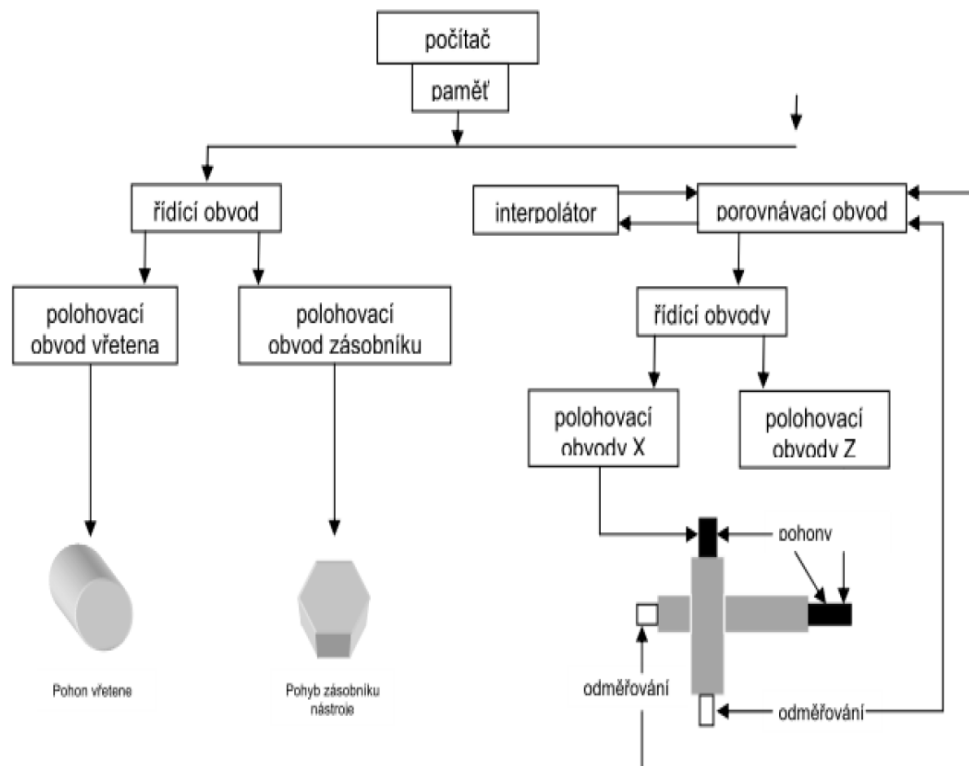
Výhody:

- Automatizace výrobního procesu
 - snížení počtu zaměstnanců,
 - zvýšení efektivity práce,
 - možnost nepřetržitého provozu.
- Vysoká přesnost a rychlost opracování.
- Odstranění technologických přestávek pro nové nastavení stroje.
- Vysoká spolehlivost a univerzálnost stroje s poměrně malou údržbou.
- Velká pružnost výroby s ohledem na rozsah sortimentů a možnost zapojení do výrobní linky.

Nevýhody:

- Poměrně velké pořizovací a provozní náklady.
- Větší nároky na odbornou obsluhu.
- Nižší rychlost výroby v poměru s velkosériovou výrobou na jednotlivých specializovaných strojích (Kráal a Šrajjer 2008).

Na výrobu je v dnešní době kladeno několik protichůdných požadavků tak, aby mohla odolávat konkurenci. Těmito požadavky je vyrábět levně, rychle a kvalitně, což není vůbec jednoduché propojit. Kvalitní výrobek není jednoduché vyrobit levně a rychle, ale právě CNC technologie dokáže tyto parametry sjednotit tak, aby vyhovovaly jak výrobcí, tak i zákazníkovi (Král a Šrajer 2008).



Obr. 11: Schéma CNC stroje
(Schéma CNC [online] (11.2.2021))

6.1 Historie CNC strojů

Na přesném datu vývoje strojů na třískové obrábění dřeva se neshodují ani odborníci, ale velká část z nich tvrdí, že se začaly vyvíjet na přelomu 18. a 19. století v době průmyslové revoluce.

Třískové obrábění se využívalo pouze při manuální činnosti, což se změnilo ve 20. století příchodem automatizace a řízení výroby. I dění kolem CNC strojů se začíná rozbíhat, konkrétně se začínají vyvíjet samostatné komponenty, výrobní soustavy a systémy řízení. V dalším průběhu si tyto stroje prošly několika složitými vývojovými etapami (vývojové stupně).

a) Stroje 1. vývojového stupně

V dřívějších dobách byly používány NC stroje, které fungovaly na principu běžných konvenčních strojů, ale byly řízeny číslicově. S těmito stroji se v dnešní době v provozu už nesetkáme zejména proto, že výroba na nich je nepřesná a málo spolehlivá (Kvietková, 2015).

b) Stroje 2. vývojového stupně

Stroje tohoto stupně jsou řízeny v obecných cyklech. Jejich hlavní předností jsou revolverové hlavy, které umožňují automatickou výměnu nástroje, ale opotřebované nástroje je zapotřebí měnit ručně (Kvietková, 2015).

c) Stroje 3. vývojového stupně

Do této vývojové skupiny jsou řazeny stroje, které jsou využívány v automatických výrobních soustavách a jejich novou vlastností je výměna obrobků, která probíhá automaticky. Ovšem stejně jako u strojů předešlého stupně probíhá výměna opotřebovaného nástroje ručně. Nespornou výhodou těchto strojů je jejich stavební konstrukce, což příznivě ovlivňuje ekonomiku výroby (Kvietková, 2015).

d) Stroje 4. vývojového stupně

V tomto stupni probíhá automaticky výměna nástrojů i obrobků, jde tedy o plně automatické stroje. Jsou zde vyvinuty i všechny druhy mezioperační dopravy včetně manipulace s trísčkami. Začínají se zde využívat nové moderní metody jako například laserové paprsky atd. Jedním z největších pokroků tohoto stupně je, že výměna opotřebovaných nástrojů již neprobíhá ručně, ale automaticky ze zásobníku (Kvietková, 2015).

e) Stroje 5. vývojového stupně

V průběhu obrábění jsou využívány měřicí sondy, které měří rozměr obrobku. Jsou zde také využívány tzv. mechatronické prvky. Pátý stupeň umožňuje také kompenzaci chyb polohování nebo korekci programu pro dodržení rozměrů z výkresu. Také se zde využívá optimalizace řezných podmínek a laserové odměřování polohy (Kvietková, 2015).

f) Stroje 6. vývojového stupně

Šestý vývojový stupeň je poslední a mohl se tedy poučit se ze všech předchozích chyb, proto je ze všech nejvyspělejší. Pro ovládání těchto strojů se využívají kvalitní řídicí systémy a dalším jejich kladem je rychlá výměna nástroje (Kvietková, 2015).

6.2 Rozdělení CNC strojů

CNC stroje můžeme rozdělit podle několika hledisek a to:

- 1) dle počtu druhů operací,
- 2) dle tvaru obráběného obrobku,
- 3) dle druhu informací,
- 4) dle systému řízení a výkonnosti,
- 5) dle vykonané práce (Kvietková, 2015).

Dle počtu druhů operací

- a) **Jedno-profesní** – stroje provádí pouze jednu operaci obrábění při jednom upnutí. Řadí se sem CNC frézy CNC soustruhy, ...
- b) **Více-profesní** – stroje umí provádět více operací při jednom upnutí obrobku. Řadíme sem veškerá obráběcí centra např. obráběcí centra pro výrobu skříňových součástí (Kvietková, 2015).

Dle tvaru obráběného obrobku

Výrobek může mít podle přání zákazníka mnoho různých tvarů a podle nich se dělí stroje do tří skupin:

- a) stroje vyžívané na obrábění obrobků rotačního tvaru,
- b) stroje pro výrobu skříňových obrobků,
- c) stroje umožňující výrobu rotačních i nerotačních součástí (Kvietková, 2015).

Dle druhu informací

- a) informace o geometrii obrábění (údaje o pohybu nástroje a obrobku)
- b) informace o technologii obrábění – lineární ovládání funkcí (posuv, frekvence, otáčení)
- c) pomocné a přípravné informace – (například tuhost suportu, oběh chladicího média) (Kvietková, 2015).

Dle řízení stroje

- a) **Polohové řízení** – dochází k polohování stroje ve všech třech osách současně anebo postupně. Samotný řezný pohyb nemá souvislost s tímto polohováním, protože nástroj je během tohoto procesu mimo obrobek. Tento proces řízení je nejčastěji využíván u vrtacích automatů.
- b) **Úsekové řízení** – proces obrábění probíhá podél jednotlivých os převážně rovnoběžně. Samozřejmě je možné dosáhnout i šikmých pohybů, a to současným pohybem podél dvou os při stejném posuvu. Toto řízení je využíváno u jednoduchých frézek, dělicích pil, strojů pro obrábění hran,
- c) **Souvislé řízení** – proces obrábění probíhá podél všech os stroje současně a nezávisle na sobě. Aby mohly být vyrobeny např. kruhové tvary a mnoho dalších je možné ke každé z jednotlivých os přiřazení různé variabilní rychlosti (Král a Šrajer 2008).

Dle vykonané práce

- a) **CNC stroje pro obrábění** – soustruhy, frézky, brusky, obráběcí centra, stroje pro dělení materiálu, stroje pro nekonvenční obrábění (drátové řezačky, laserové vrtačky, plazmové řezačky atd.)
- b) **Ostatní CNC stroje** – lisy, ohýbačky, dopravní manipulátory atd. (Kvietková, 2015).

6.3 Základní části CNC strojů

Většina z využívaných strojů se skládá z několika základních částí a to:

- stojan – základní nosná konstrukce stroje,
- lože s pohonem nebo posuvnými prvky,
- obráběcí hlava (sestavy nástrojů, elektrovřeteno neboli agregát),
- stůl s upínacími systémy,
- ovládací panel,
- bezpečnostní prvky,
- odsávání,
- příslušenství (přípravky, nářadí atd.),
- zařízení pro výměnu nástrojů (jen u některých) (Král a Šrajer 2008).

6.4 Souřadnicový systém CNC strojů

Pro sestavení plánu obrábění je důležité, aby byly jednotlivé kroky naprogramovány. Je potřeba převést pojezdové dráhy nástrojů i obrobků do číselné podoby a k tomu nám poslouží souřadnicové osy, které mají svou podobu pro CNC stroje danou na základě normy ISO 842.

Systém souřadnic, který se využívá právě pro CNC stroje se nazývá kartézský. Jde o systém pravotočivý a pravoúhlý s osami X, Y, Z. Názvy os se mohou měnit například na U, V, W a to ve chvíli, kdy jsou na stroji další doplňkové pohyby v osách X, Y, Z. Pokud se bude obrobek pohybovat proti nástroji, budou se osy označovat X', Y', Z'. Písmeny A, B, C jsou označovány otáčivé pohyby, které jsou rovnoběžně s osami X, Y, Z.

7 NÁSTROJE PRO CNC

Nástroj je jedním z podstatných prvků celé obráběcí soustavy s určitými vlastnostmi, které umožňují obráběcí proces.

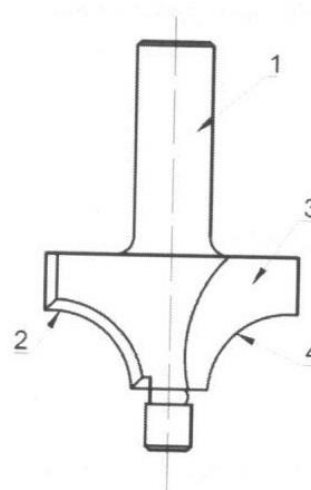
Známé jsou dva způsoby obrábění tedy třískové a beztřískové. CNC stroje se mohou využít na oba tyto způsoby, přičemž se liší právě použitý nástroj. U třískového obrábění dochází při samotném procesu k oddělení určité části materiálu (tříška) rezným nástrojem (stopkové frézy, pilové kotouče a vrtáky) a tak materiál dostává potřebné rozměry a tvar. Tříška vzniklá při tomto procesu je zpravidla odpad. Při obrábění beztřískovém dává nástroj (laiser, vodní paprsek) obrobku tvar za působení vysokých teplot a tlaku bez vzniku třísky.

Každý z jednotlivých druhů obrábění vyžaduje příslušný rezný nástroj a odlišný rezný klín (Barcík et al., 2013).

7.2 Frézovací nástroje využívané na CNC strojích

Frézovací nástroj je rotační prvek obráběcí soustavy osazený jedním nebo několika reznými břity, sloužící k procesu třískového obrábění, tedy oddělení určité vrstvy materiálu (třísky) z obrobku. Vzniká tak plocha nová (obrobená plocha) ta by měla mít požadovanou kvalitu povrchu, která je potřebná pro navazující práci s obrobkem (Lisičan, 1996; Itaya a Tsuchiya, 2003).

Jako nástroj pro frézování na CNC strojích se využívají stopkové frézy, kterými je možné provádět obrábění plošných, prostorových obrobků a nábytkových dílců. Stopkové frézy (Obr. 12) se liší svým tvarem, čímž se liší i jejich využití. Používají se na frézování hran (obrobku dát přesné rozměry a tvar), tvarování hran, drážek, polodrážek, rybin, případně různých profilů do plochy atd. Konstrukce nástroje závisí na způsobu jeho upnutí v pracovním agregátu prostřednictvím upínacího systému (Barcík et al., 2013).



Obr. 12: Stopková fréza

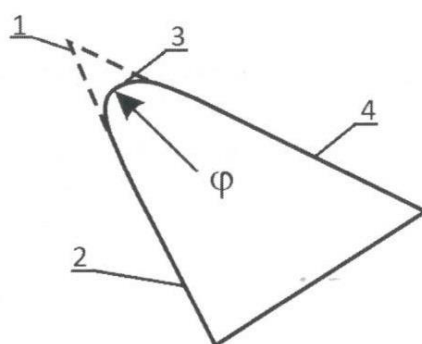
(Barcík, et al.)

1 – stopka, 2 – břit, 3 – čelo, 4 – rezná hrana

7.2.1 Opotřebení nástroje

Během celého procesu frézování dochází ke kontaktu nástroje s materiálem, jehož důsledkem je vznik obrobeného povrchu, třísky a bohužel i opotřebení řezného klínu nástroje. To vzniká účinkem tření vznikajícím právě mezi materiálem a pracovní částí nástroje (řezný klín).

Tato část nástroje je tvořena dvěma plochami – rovinou čela a rovinou hřbetu (Obr.13), jejichž průnik nám vytváří ideální řeznou hranu (Siklienka a Šustek, 2013b; Barcík et al., 2013).



Obr. 13: Řezný klín

(Barcík, et al, 2013)

1 – ideální řezný klín, 2 – čelo řezného klínu, 3 – skutečný klín, 4 – hřbet řezného klínu

7.2.2 Upnutí nástrojů

Nástroj se nesmí během celého procesu obrábění hýbat a měnit svou pozici, musí se tak vyvarovat působení mnoha vnějších sil (řezná síla, setrvačná síla a jiné), které musí vyrovnávat jeho řádné upnutí. Přesné uložení a upnutí nástroje ovlivňuje přesnost a kvalitu obrábění. Má i vliv na bezpečnost práce, jelikož CNC stroje využívají vysoké řezné rychlosti a rychlosti posuvu, mohlo by při chybném upevnění nástroje dojít ke zranění pracovníka.

Při obrábění složitých výrobků je povětšinou zapotřebí velké množství nástrojů, aby byla výroba co nejefektivnější a nejekonomičtější, je třeba nástroje rychle, a hlavně přesně vyměnit (Kráal a Šrajer, 2008; Barcík et al., 2013).

8 PLOCHA OBRÁBĚNÉHO MATERIÁLU

Při procesu obrábění tedy i frézování vznikají na obrobku tři plochy:

- a) **Obráběná plocha** – původní plocha obrobku, která je během procesu obráběna a je tak nahrazena plochou novou.
- b) **Řezná plocha** – vytváří se během obráběcího procesu přímo za břitem nástroje.
- c) **Obrobená plocha** – konečná plocha vzniklá obráběním a tvoří ji zbytky plochy řezné.

8.1 Kvalita obrobené plochy

Kvalitu výrobku můžeme definovat jako souhrn vlastností definovaných výrobcem a spotřebitelem podle různých kritérií. V procesu frézování se kritéria týkají především kvality povrchu a tvarové přesnosti (Csanády, et al., 2015).

Tento proces je hojně využíván v praxi na obrábění dřeva, především proto že ve většině případů je povrch kvalitnější v porovnání s povrchy řezanými (Barčík et al., 2013). Přesto všechno nelze dosáhnout stoprocentně hladkého povrchu, ale vždy obrobky po frézování vykazují určité nerovnosti povrchu. Jedná se o velmi malé odchylky od požadovaného tvaru, ale bohužel významně ovlivňují další pracovní operace, především povrchovou úpravu dílce (Csanády, et al., 2015).

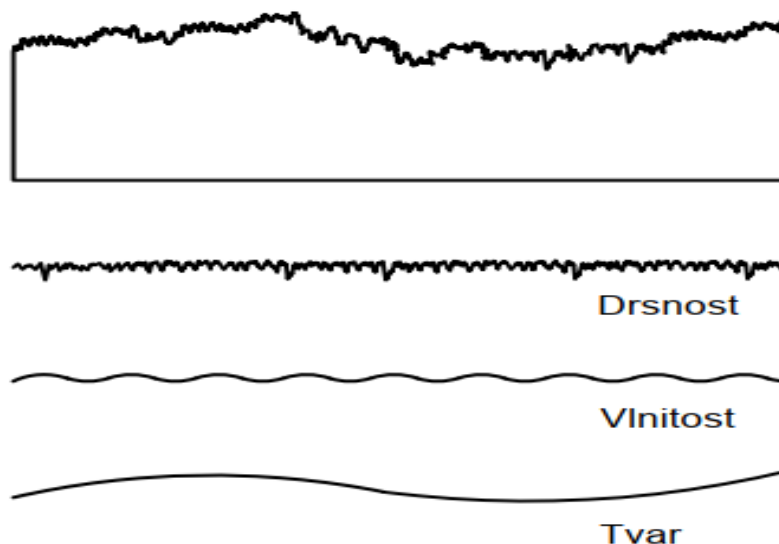
Tyto odchylky se projevují dvěma typy změn a to mikroskopickými (drsnost) a makroskopickými (vlnitost, rýhy, vyvýšeniny, částečně vytrhaná vlákna). Všechny tyto změny se na povrchu vyskytují nepravidelně, kromě vlnitosti ta se na povrchu vytváří téměř v pravidelných opakujících se vyvýšeninách a prohlubeninách, které mají téměř stejný tvaru a rozměry (Lisičan, 1984; Davim, 2010)

8.1.1 Základní pojmy při hodnocení kvality

a) **Drsnost** – neboli mikronerovnost je nejmenší nerovnost vznikající při procesu obrábění. Jedná se určité vady, které zanechá na povrchu řezný nástroj. Ty jsou na povrchu umístěny periodicky nebo náhodně. V dřevařském průmyslu mají tyto vady příslušnou charakteristiku dle příslušné normy ČSN 490231. Řadí se sem chlupatost, vytrhaná vlákna, makrostavba obráběného materiálu a také vlnky způsobené nástrojem nevyjímaje vyštípaná vlákna dlabaných a vrtaných otvorů (ČSN 490231). Parametr drsnosti se značí písmenem R (Rousek, et al., 2012; Csanády, et al., 2015).

b) Vlnitost – také se můžeme setkat s názvem makronerovnosti, jedná se o rozměrnější vady v porovnání s drsností povrchu. Tvar vlnek vzniká proto, že frézování je takové obrábění, při kterém je tříska odebrána rotačním pohybem nástroje (Lisičan, 1996). U vlnitosti je velmi důležité osazení nožů na použitých nástrojích, pokud jsou osazeny nerovnoměrně, v závislosti se zhorší i kvalita povrchu naopak rovnoměrné (správné) osazení nožů zajistí kvalitnější obráběný povrch s rovnoměrnými vlnkami (Obr.15). Parametr vlnitosti se značí písmem W (Rousek, et al., 2012).

c) Tvar – největší nerovnosti povrchu, které nejsou závislé na drsnosti a vlnitosti. Tuto vadu nejčastěji může způsobovat nedostatečné tuhé upnutí obráběné součásti nebo určité vady vodících ploch případně jiná deformace. Parametr tvaru se značí písmenem P (Rousek, et al., 2012).



Obr. 14: Základní pojmy při hodnocení kvality
(Dzurenda, et al., 2008)

Tři typy nerovností (Obr.14), které jsou výše popsány, se nikdy neobjevují samostatně, ale vždy společně v určitém poměru. Je však důležité, aby byl každý typ měřen a hodnocen jednotlivě. Měřicí přístroje využívají filtry, kterými se struktura povrchu rozčlení na jednotlivé složky dle rozteče nerovností. Správnost měření ovlivní právě správně zvolený filtr (Dzurenda et al., 2008; Davim, 2010).

8.1.2 Měření kvality povrchu

Od určité doby v naší historii začal doprovázet proces obrábění důraz na kvalitu obrobené plochy. V dnešní době je jakost povrchu velmi důležitá v závislosti právě na dalším použití výsledného produktu, případně pro další navazující práce např. povrchovou úpravu. Postupem času se zvyšovaly nároky na obrobenou plochu, a tím se i vyvíjí technologie pro její měření. Dříve stačila celkem primitivní porovnávací metoda ovšem nyní, kdy nároky se více a více zvyšují, využívají se dotykové a bezdotykové profilometry (Tiryaki, et al., 2015). Jak již bylo zmíněno výše, pro zjišťování kvality povrchu máme dnes tři metody:

- Porovnávací
- Dotykové
- Bezdotykové

Pro tuto práci bylo využito právě měření dotykové neboli kontaktní. Pro tuto metodu měření se využívají speciální přístroje, které se nazývají drsnoměry. Jedná se o přístroj, který po měřeném povrchu pohybuje ramínkem a určitou silou přitlačenou jehlou, měří její příslušné pohyby na povrchu. Díky tomu, že jehla je v přímém kontaktu s měřeným materiálem, má tato metoda jednu velkou nevýhodu. Je zde možnost, že při vyvinutí větší síly na povrch může dojít k jeho poškození (škrábance nebo jiné defekty) (Rousek, et al., 2012b).

V této práci se povrch vyhodnocoval pomocí profilu vlnitosti a drsnosti. Aby tyto profily mohly být vyhodnoceny využívá se jako i ve většině podobných výzkumů jejich průměrné aritmetické úchyly.

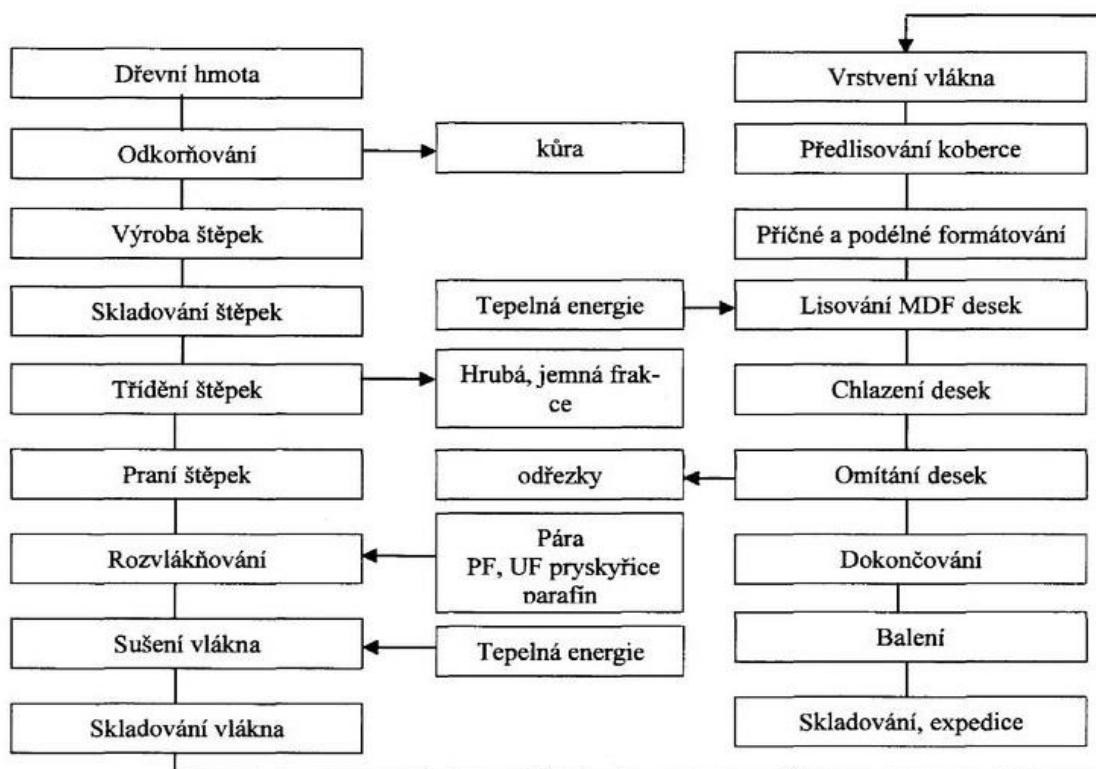
9.3 MDF deska (Medium Density Fiberboard)

Jedná se desku řadící se mezi dřevovláknité, má střední hustotu od 350 do 850 kg/m³(nazývaná také jako středně tvrdá vláknitá deska). Je vyráběna suchým způsobem výroby spojením ligninocelulosových vláken za použitím ohřevu, tlaku a lepidla. Podle jejich dalšího využití se liší i použitá lepidla. Močovinoformaldehydové lepidlo je využíváno na desky určené do interiéru s nízkým obsahem vlhkosti, naopak na desky určené do vlhčího prostředí se používá fenolformaldehydové případně melaminformaldehydové lepidlo. Samotná deska má celkem velké množství dobrých vlastností, ale jednou z nejdůležitějších je homogenita v celém průřezu desky, což umožňuje kvalitní opracování hran a ploch frézováním případně jiné opracování. Její další vlastnosti jsou vysoká hodnota pevnosti v tahu kolmo na plochu (rozlupčivosti), vysoká měrná stabilita a hladkost povrchu. Také se celkem snadno povrchově upravuje laminováním, dýhováním nebo pigmentovým lakováním (Wieloch, 2005; Böhm, et al., 2012).

V České republice se MDF desky vyrábí ve firmě Dřevozpracující družstvo Lukavec, známé spíše pod zkratkou DDL. Sídlo firmy je na Vysočině v městysu Lukavec. Touto výrobou se zabývá již od roku 1992 pod obchodním názvem LUHOPOL. Desky jsou dodávány v tloušťce 10–40 mm, v emisní třídě E0,5; E1. Desky použité na tuto práci jsou právě vyrobené v Lukavci.

9.4 Výroba MDF

Konečnému produktu MDF předchází dlouhý a složitý proces výroby. Celý tento proces je znázorněný na schématu (Obr. 15).



Obr. 15: Schéma výroby MDF
(Schéma výroby MDF [online] (11.2.2021))

9.4.1. Výroba MDF v Lukavci

Výroba štěpky

Celý proces začíná rozsekáním suroviny na štěpku, což probíhá na bubnových tří nožových sekačkách. Této samotné operaci předchází zkracování a detekce kovu. Odtud je štěpka přemísťována do 5 zásobních bunkrů dle druhu – BO, KPZ, BK, bílá vykoupená štěpka, pilino-štěpka z pilnice. Dle receptury a dalších kritérií desky se stanovuje poměr jednotlivých surovin a pomocí šnekových dopravníků je štěpka promíchána a dopravena k síťovému třídiči.

Výroba vlákna

V síťovém třídiči dochází k odloučení nevhodné frakce štěpky, ty jsou přemístěny pomocí vzduchového potrubí na výrobu DTD. Vytríděná štěpka postupuje

do pračky štěpek, kde se omývá vodou z důvodu dodání tepelné energie (především v zimních měsících) a aby se zbavila minerálních látek a dalších nečistot. Tato voda je používána v uzavřeném okruhu, čistí se a používá znovu. Aby se štěpka zbavila přebytkové vody, kterou si nese z pračky, prochází přes šnekový dopravník se sítím.

Dále se přesouvá na proces plastifikace – změkčení – pomocí horké páry o teplotě 175 °C a do defibrátoru, kde dochází k samotnému rozvlákňování za pomoci dvou nejdůležitějších částí rotoru a statoru.

Na to navazuje proces, při kterém dochází k aplikaci lepidla a dalších komponentů (močovina, emulze, melamin, ...) pomocí trysek, které tyto látky nanášejí na vlákno pod vysokým tlakem.

Vrstvicí zásobník

Směs je přesouvána pomocí horkého vzduchu potrubím do vrstvicího zásobníku, během čehož dochází k vysušení vlákna na požadovanou vlhkost (Vlákno nesmí být ani vlhké ani přesušené. Obě tyto varianty by měly vliv na kvalitu vyráběných desek). Díky tomuto procesu, kdy je dřevní hmota v kontaktu pouze s horkým vzduchem a ne přímo s plamenem (jako u sušení třísek při výrobě DTD), nehrozí zde nebezpečí vznícení.



Obr. 16: Silo na dřevní vlákno

Lisování

Vlákno je ze zásobníku nanášeno na vrstvicí pás, kde se i kontroluje plošná hmotnost (kg/m^2) pásovou vahou. Takto navrstvený koberec postupuje přes předlis do etážového lisu se 4 etážemi.

Lisovací čas a tlak je specifický dle receptury a technologie pro jednotlivé druhy a tloušťky desek. (DDL vyrábí desky pro několik zákazníků, pro které se liší vyráběné desky dle jejich požadavků)

Desky putují z lisu na formátovací linku, kde jsou uzpůsobeny na požadované rozměry dle zákazníka.

Takto připravené desky musí určitou dobu chladnout v „turniketu“ (doba se odvíjí od výrobní technologie). Takto připravené desky musí nejméně 24 hodin zrát a pak se teprve přesouvají na konečnou operaci, kterou je tloušťková egalizace broušením.

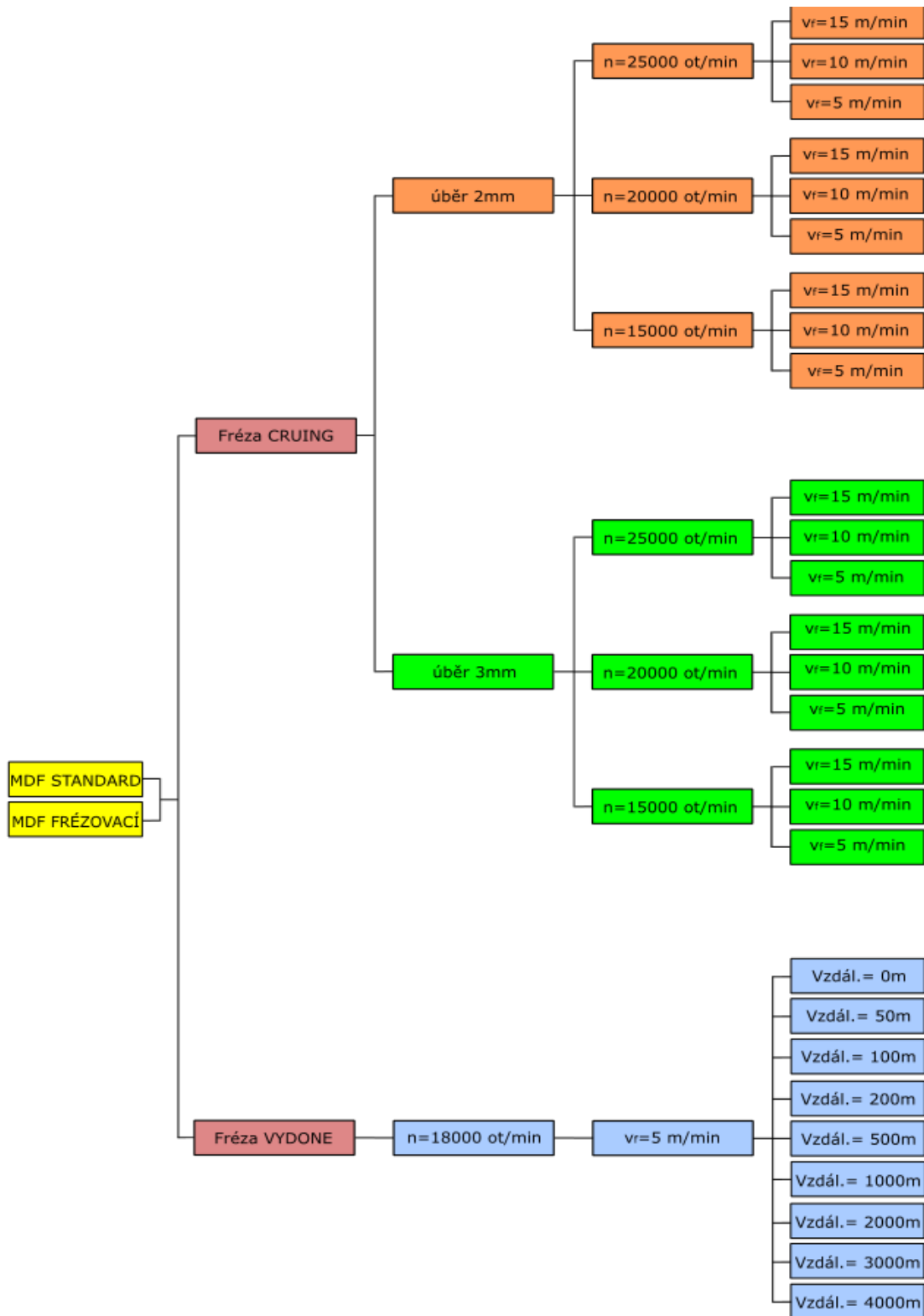
Sklad

Desky jsou skladovány v areálu DDL. Některé desky putují k zákazníkům a některé jsou zpracovávány dále přímo v Lukavci.



Obr. 17: Formátování desek

10 METODIKA PRÁCE



Obr. 18: Kategorizace souborů zkušebních těles
 v_f – rychlost posuvu, n – otáčky

10.1 Použité materiály

Materiály použité pro frézování byly MDF (medium-density fibreboard) vyrobené v Dřevozpracujícím družstvu Lukavec (Obr. 19), kde pro samotnou výrobu využívá tři základní dřeviny v určitém poměru a to přibližně 75 % smrku, 15 % buku a 5 % borovice, kdy je důležitá i kvalita příslušné suroviny a zbývajících 5 % jsou pojiva potřebné na spojení vláken. Kombinace těchto surovin ovlivňuje hustotu a další vlastnosti materiálu a jsou tedy uzpůsobeny podle požadavků zákazníka.

Konkrétně byly tedy využity desky o dvou různých hustotách a to MDF „Standard“ a MDF „frézování“, které jsou i dále využívány v DDL na výrobu nábytkových dílců procesem frézování na CNC strojích.

Pro tuto práci byly využity MDF desky o základních rozměrech 2790x2060x18 mm. Rozdíly mezi těmito deskami dle parametrů po výrobě v DDL jsou udané v přílohách č. 1 a 2.



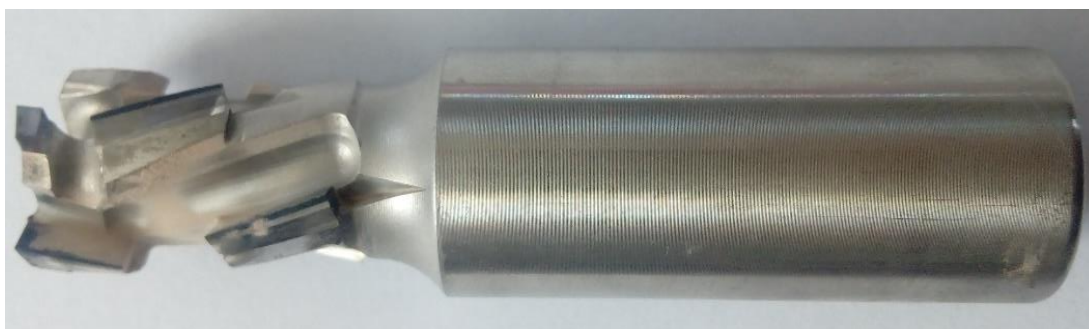
Obr. 19: MDF desky z DDL
MDF z DDL [online] (17.3.2021)

10.2 Použité frézovací nástroje

Pro tuto práci byly využity dva typy frézovacích nástrojů, a to fréza CRUING a fréza VYDONE. Oba tyto nástroje byly zapůjčeny z Dřevozpracujícího družstva v Lukavci, kde jsou využívány na výrobu nábytkových dílců s MDF.

10.2.1 Fréza CRUING

Tato fréza má přesné označení CRUING DP 2M3 03D E5 (Obr.20). Přesné rozměry jsou uvedeny v Tab.1. Využívá se na mnoho technologických operací konkrétně na formátování, srovnávání a drážkování. Fréza má 7 přesně umístěných zubů osazených DP destičkami (polykrystalický diamant).



Obr. 20: Fréza GRUING

Tab. 1: Parametry frézy GRUING

GRUING	
L= 84 mm	
L1=27 mm	
L2=50 mm	
D=18 mm	
d=20 mm	
n.max= 25000 ot/min	

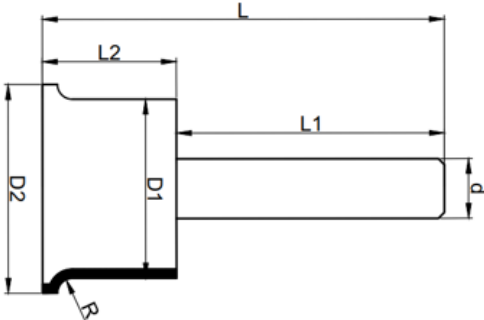
10.2.2 Fréza VYDONE

Přesné označení této frézy je VYDONE: HW 55x38; S20 (Obr.21). Jedná se o nástroj využívaný na dokončení bočních ploch výrobku a jednostranné zaoblení hrany (přesné rozměry jsou v Tab. 2) Fréza je osazena 4 HW noži (nepovlakované slinuté karbidy).



Obr. 21: Fréza VYDONE

Tab. 2: Parametry frézy VYDONE

VYDONE	
L= mm	
L1= 100mm	
L2=50 mm	
D1= 38mm	
D2= 55mm	
d=20 mm	
R=2 mm	
n.max= 18000 ot/min	

10.3 Strojní vybavení

Pro maximální přiblížení se výrobě v DDL bylo pro proces frézování využito CNC obráběcí centrum.

10.3.1 CNC

CNC obráběcí centrum WEEKE VENTURE 06S (Obr.22), které je určeno na výrobu nábytkových dílců různými obráběcími procesy (frézování, vrtání, řezání,). Celý proces obrábění veškeré jeho příkazy jsou zadány do počítače, který nadále řídí práci stroje. Veškeré změny řezných podmínek lze změnit pouze za pomoci změny v počítačovém programu.



Obr. 22: CNCWEEKE VENTURE 06S

10.3.2 Formátovací kotoučová pila

Formátovací kotoučová pila SCM si400 class (Obr.24) se nejčastěji využívá právě pro formátování plošných materiálů na bázi dřeva, ale i na řezání masivu.

Díky celkem rozměrnému pojezdovému pracovnímu stolu 3200 x 3200 mm je možné pracovat s velkými formáty především aglomerovaných materiálů na bázi dřeva. Stůl je vyroben z povrchově upravené hliníkové slitiny.

Pila je opatřena dvěma elektromotory, z nichž jeden o síle 5,5 (7) kW pohání hlavní pilový kotouč a druhý o výkonu 0,75 (0,9) kW pohání kotouč předřezu.



Obr. 23: Formátovací kotoučová pila SCN si400 class

10.4. Měřicí zařízení

Přístroj pro kontaktní měření drsnosti a jakosti povrchu FORM TALYSURF 50 Intra. Je konstruován firmou TaylorHobson ve Velké Británii.

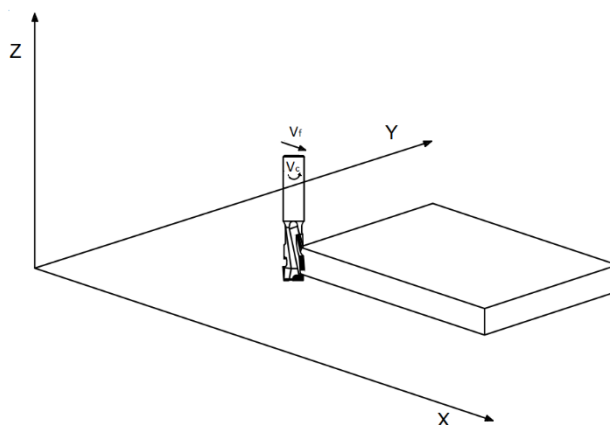


Obr. 24: FORM TALYSURF 50 Intra:

10.5 Příprava zkušebních vzorků

Veškeré celoplošné MDF desky byly především kvůli snadné manipulaci před obráběním (frézováním) naformátovány na rozměry 600x1000x18 mm za pomoci formátovací pily.

Takto připravený materiál byl po dobu několika týdnů klimatizován ve standardních podmínkách při teplotě $\pm 20^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkosti vzduch $\pm 70\%$. Po uplynutí této doby jsem materiál podrobil obrábění na CNC stroji, konkrétně se jednalo o frézování hran (Obr. 26). Délka frézované strany byla 1000 mm. Při procesu frézování frézou CRUING jsem měnil vybrané parametry, tedy rychlost otáček vřetene, rychlost posuvu a velikost úběru. Naopak u frézy VYDONE jsem všechny parametry ponechal a kladl důraz na vzdálenost, kterou nástroj urazil v procesu odebrání materiálu.



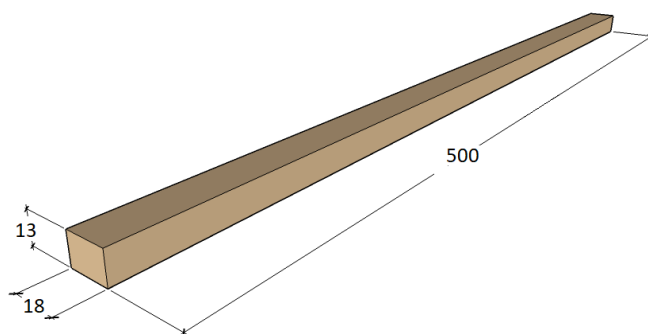
Obr. 25: Průběh frézování

v_c – řezná rychlost, v_f – podávací rychlost, x, y, z – směrové osy

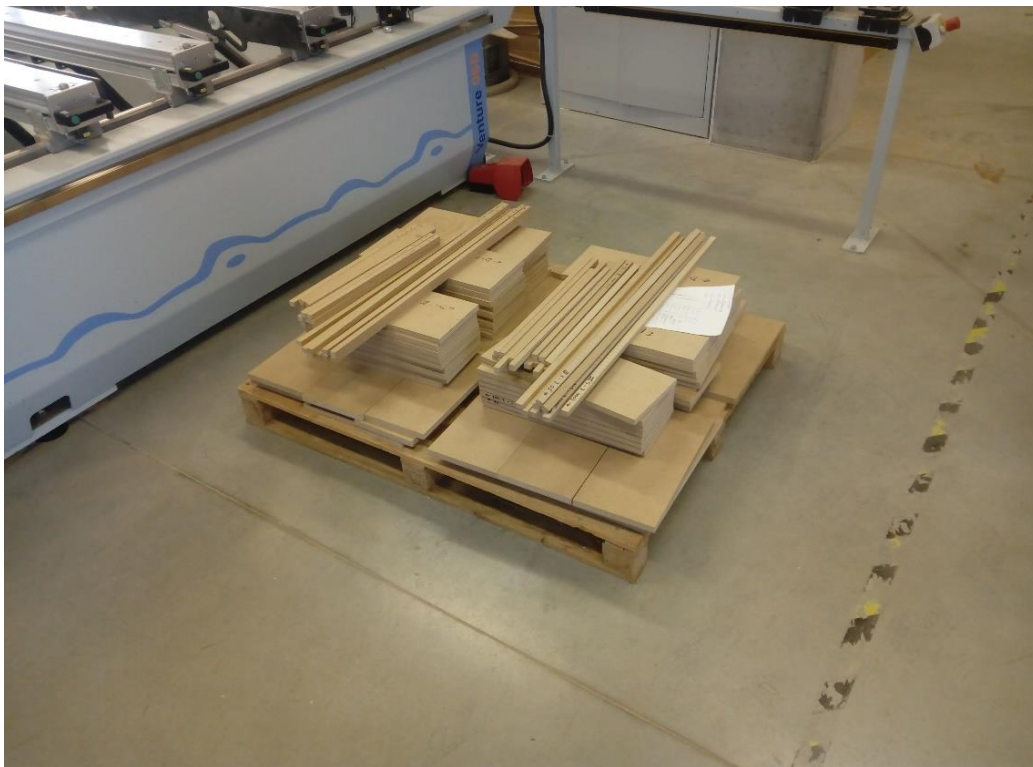
Následně jsem v předem určených úsecích odebral vzorek pro stanovení

příslušných parametrů drsnosti a vlnitosti o přibližných rozměrech 500x13x18 mm na kterých jsem označil jeho obrobenou stranu, směr posunu nástroje a další označení abych si usnadnil další potřebnou identifikaci.

Na zkušebních vzorcích jsem před samotným zjišťováním kvality obrobeného povrchu vyznačil určitou vzdálenost od okraje. Od ní jsem označil deset úseků 1,5 cm dlouhých proto, aby měření probíhalo ve stejných místech u jednotlivých vzorků. Jednotlivé parametry drsnosti a vlnitosti jsem získal právě z těchto označených úseků na vzorku.



Obr. 26: Rozměry vzorku



Obr. 27: Připravené vzorky

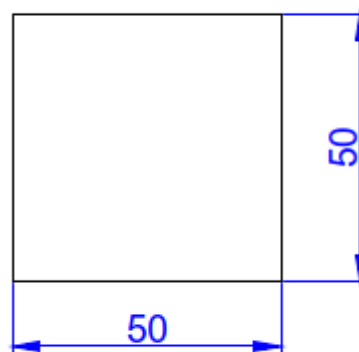
10.6 Měření fyzikálních a mechanických vlastností materiálu

Veškeré tyto vlastnosti do určité míry ovlivňují proces frézování, a proto je důležité předem znát jejich hodnoty.

10.6.1 Hustota

Jedná se o měření přímo určené na MDF, jak ukládá norma ČSN EN 323 (1994). Podstatou je získat z naměřených hodnot rozměrů a hmotnosti hustotu materiálu.

Vzorek byl odebrán v příslušných rozměrech, a to délka 50 mm, šířka 50 mm, a tloušťka je v našem případě 18 mm, přesně z určitého místa z plochy desky, jak udává norma. Samotné měření probíhalo za pomoci posuvného měřítka a laboratorních vah (veškeré naměřené hodnoty viz příloha). Pro zpracování jednotlivých naměřených dat jsem použil vzorec:



Obr. 28: Rozměry vzorku

$$\delta w = \frac{mw}{(a_w * b_w * l_w)} = \frac{mw}{V_w} \quad [kg * m^3] \quad (12)$$

Kde:

m_w – hmotnost zkušebního tělesa při dané vlhkosti w [kg],

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

δw – hustota zkušebního tělesa při dané vlhkosti w [kg/m^3],

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

Tab. 3: Průměrná hustota

Deska	Hustota (g/cm^3)
Frézování	0,84
Standard	0,80

10.6.2 Vlhkost

Příprava vzorků probíhala dle normy ČSN EN 322 (1994). Připravený vzorek odpovídal rozměrům vzorků pro zjišťování hustoty, tedy 50 x 50 x 18 mm (š x t x l). Byly provedeny dvě vážení, jak říká norma, z nichž jedno po několikátýdenní klimatizaci v podmínkách školních dílen a druhé po absolutním vysušení příslušného vzorku (mezi získáním těchto hodnot bylo provedeno několik kontrolních měření). Takto získané hmotnosti byly dosazeny do vzorce a vypočtena vlhkost příslušného vzorku.

$$W = (m_1 - m_0) / m_0 * 100 [\%] \quad (13)$$

Kde:

m₁ – hmotnost zkušebního tělesa ve vlhkém stavu [g],

m₀ – hmotnost zkušebního tělesa ve vysušeném stavu [g],

W – vlhkost [%].

Tab. 4: Průměrná vlhkost

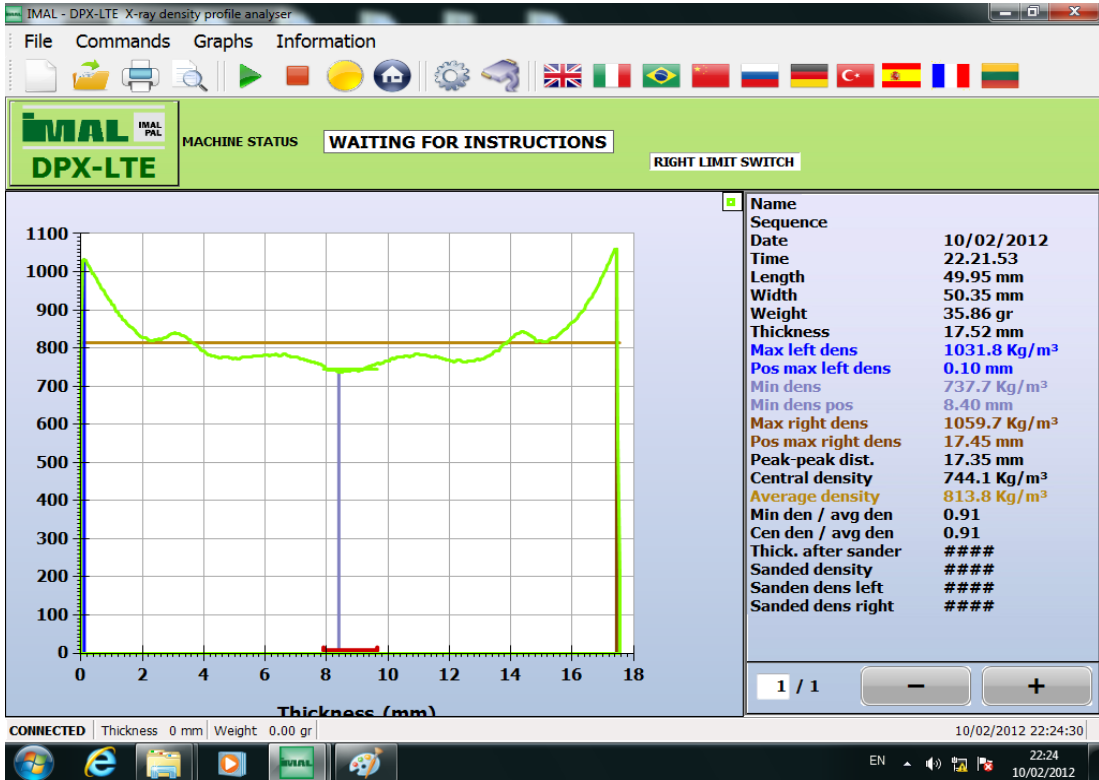
Deska	Vlhkost (%)
Frézování	5,48
Standard	4,77

10.6.3 Hustotní profil

Jelikož se jedná o materiál, který je plošně lisovaný, liší se hustota v celém průřezu desky. Lisovací čas a tlak je specifický dle receptury a technologie pro jednotlivé druhy a tloušťky desek. Ovlivňují tak zhuštění vláken na povrchu desky, a naopak menší zhuštění v jejím středu. Hustotní profil pro obě požitá desky je znázorněn na Obr. 29 a Obr. 30.



Obr. 30: Hustotní profil MDF Frézovací



Obr. 29: Hustotní profil MDF Standard

10.7 Metodika měření profilu drsnosti a vlnitosti

Celý proces měření určitých parametrů drsnosti a vlnitosti jsem prováděl na Fakultě lesnické a dřevařské v Praze. Konkrétně jsem využil kontaktní metodu, na kterou jsem využil přístroj od firmy TaylorHobson FORMTALYSURF 50 Intra. Během celého procesu jsem postupoval dle příslušné normy ČSN EN ISO 4287 (1999).

U připravených vzorků o rozměrech 500x13x18 mm jsem označil frézovanou stranu, směr frézování a další parametry potřebné pro správnost údajů. Samotné měření jsem prováděl u těchto vzorků, které byly klimatizované (uložené) ve standardních podmínkách, kdy průměrná vlhkost vzduchu byla $65 \pm 3 \%$ a teplota $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$), tedy při vlhkosti 12 %. Každý takto připravený vzorek jsem změřil desetkrát v předem určených bodech tak, aby měření na všech vzorcích bylo provedeno ve stejném místě.



Obr. 31: Měření kvality frézovaného povrchu pomocí FORM TALYSURF 50 Intra

11 VÝSLEDKY PRÁCE

Z měření jednotlivých parametrů drsnosti (R_a , R_z , R_{Sm}) a vlnitosti (W_a , W_z , W_{Sm}) jsem získal 360 hodnot pro vzorky opracované frézou CRUING a 180 hodnot pro vzorky opracované frézou VYDONE. Pro následné zpracování těchto naměřených údajů jsem využil dva počítačové softwary.

Pro zaznamenání hodnot a jejich další zpracování průměrů a směrodatných odchylek byl využit program Microsoft EXCEL 2016 (Microsoft, Redmont, Washington, Spojené státy americké).

Pro další zpracování hodnot pomocí statistické metody ANOVA byl využitý program STATISTICA 12 (Statsoft Inc., Tulsa, Oklahoma, Spojené státy americké). K vyobrazení výsledků na hladině významnosti $0,05 = 5 \%$ byly využity grafy a Duncenov test.

Před samotným zpracováním dat bylo zapotřebí vyloučit odlehlé hodnoty a potvrdit normalitu rozdělení dat. Normalita zkoumaných dat byla provedena pomocí Shapiro-Wilksova testu na hladině významnosti $p = 0,05$. Vyloučení odlehlých hodnot bylo provedeno pomocí Dean-Dixonova testu.

11.1 Výsledky pro frézu GRUING

Jednotlivé parametry drsnosti a vlnitosti vzorků vyrobené touto frézou jsem změřil po změně předem zvolených kombinací parametrů frézování (rychlost otáčení, rychlost posuvu a velikost úběru).

Průměrné hodnoty měřených parametrů drsnosti a vlnitosti jsou uvedeny v Tab.5 a jejich směrodatné odchylky v Tab.6.

Tab. 5: Průměrné hodnoty měřených parametrů drsnosti a vlnitosti

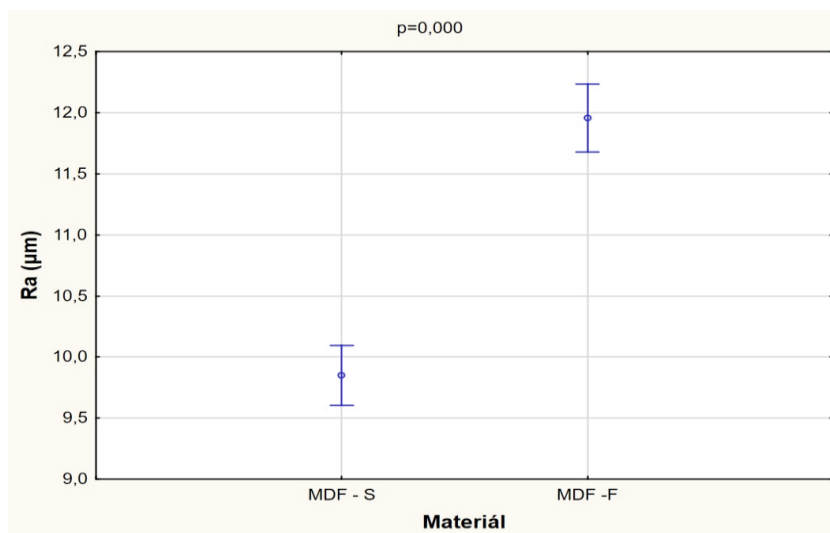
Materiál	Otáčky (ot/min)	Posuv (m/min)	Úběr (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)	RSm (μm)	Wa (μm)	Wz (μm)	WSm (μm)
MDF - S	25000	5	2	8,95	59,25	508,30	8,59	17,99	564,74
MDF - S	25000	10	2	11,01	74,99	586,70	7,64	15,27	555,79
MDF - S	25000	15	2	11,26	77,73	565,66	8,78	20,16	471,65
MDF - S	25000	5	3	7,87	53,55	533,71	6,43	13,08	518,78
MDF - S	25000	10	3	8,80	61,77	508,49	6,37	13,96	627,69
MDF - S	25000	15	3	11,00	75,24	537,25	7,92	16,14	529,71
MDF - S	20000	5	2	8,99	54,78	530,78	6,09	12,09	662,68
MDF - S	20000	10	2	9,79	67,42	559,55	7,98	17,78	620,73
MDF - S	20000	15	2	11,40	78,69	534,29	7,33	17,89	619,40
MDF - S	20000	5	3	9,071	60,875	597,878	6,027	12,992	622,55
MDF - S	20000	10	3	10,05	68,88	554,33	7,03	16,17	578,50
MDF - S	20000	15	3	10,81	75,71	586,77	7,40	17,79	548,72
MDF - S	15000	5	2	8,53	58,46	593,92	5,90	12,48	551,33
MDF - S	15000	10	2	9,24	66,67	569,13	10,41	20,99	743,84
MDF - S	15000	15	2	10,49	70,75	493,13	7,40	17,50	584,35
MDF - S	15000	5	3	8,69	57,29	556,79	6,70	13,68	765,57
MDF - S	15000	10	3	9,99	65,38	531,33	7,14	15,29	679,99
MDF - S	15000	15	3	11,33	75,27	578,57	7,80	18,63	624,11
MDF - F	25000	5	2	9,58	56,71	514,31	7,62	17,46	702,49
MDF - F	25000	10	2	11,93	77,37	555,33	9,60	22,07	636,67
MDF - F	25000	15	2	12,89	90,21	535,04	8,96	19,67	549,71
MDF - F	25000	5	3	9,70	579,60	579,60	8,04	16,08	674,72
MDF - F	25000	10	3	11,80	76,54	626,28	9,98	20,99	663,40
MDF - F	25000	15	3	15,00	89,89	606,83	11,03	20,48	615,64
MDF - F	20000	5	2	11,22	74,20	653,50	8,47	19,04	770,13
MDF - F	20000	10	2	11,96	79,22	548,36	9,07	18,11	945,66
MDF - F	20000	15	2	12,53	84,18	534,43	9,52	23,31	510,12
MDF - F	20000	5	3	11,41	89,85	804,34	8,45	18,58	523,65
MDF - F	20000	10	3	11,70	77,22	563,22	7,74	17,20	518,69
MDF - F	20000	15	3	13,01	86,01	550,39	9,36	20,40	832,46
MDF - F	15000	5	2	11,28	83,23	622,20	9,68	17,88	635,70
MDF - F	15000	10	2	12,38	82,23	575,68	9,42	19,59	725,35
MDF - F	15000	15	2	12,49	82,33	608,90	11,04	24,85	688,01
MDF - F	15000	5	3	10,94	70,92	639,47	8,60	18,60	632,48
MDF - F	15000	10	3	12,76	81,55	531,89	7,48	17,46	558,01
MDF - F	15000	15	3	12,63	91,62	664,34	11,61	26,91	623,27

Tab. 6: Směrodatná odchylka hodnot měřených parametrů drsnosti a vlnitosti

Materiál	Otáčky (ot/min)	Posuv (m/min)	Úběr (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)	RSm (μm)	Wa (μm)	Wz (μm)	WSm (μm)
MDF - S	25000	5	2	1,02	7,93	76,64	7,75	11,48	230,00
MDF - S	25000	10	2	1,62	8,04	60,77	2,80	6,52	149,64
MDF - S	25000	15	2	1,32	5,61	82,31	3,50	7,24	80,03
MDF - S	25000	5	3	0,81	6,24	89,96	1,63	4,27	107,88
MDF - S	25000	10	3	1,16	8,83	74,56	2,29	4,39	143,63
MDF - S	25000	15	3	0,75	6,91	91,61	2,27	4,82	110,49
MDF - S	20000	5	2	1,02	8,27	74,85	2,08	4,35	124,48
MDF - S	20000	10	2	0,94	6,81	80,12	3,11	5,74	144,60
MDF - S	20000	15	2	1,40	7,41	87,34	1,73	3,97	259,35
MDF - S	20000	5	3	1,13	5,88	83,80	2,14	2,96	139,40
MDF - S	20000	10	3	0,63	3,48	68,05	2,28	5,62	149,73
MDF - S	20000	15	3	1,47	9,80	156,21	1,89	6,36	138,45
MDF - S	15000	5	2	0,79	7,00	71,30	1,64	3,21	187,31
MDF - S	15000	10	2	1,46	10,46	98,65	3,65	6,78	175,17
MDF - S	15000	15	2	1,44	7,97	101,76	2,52	7,01	180,19
MDF - S	15000	5	3	2,19	10,99	109,40	2,10	3,01	149,10
MDF - S	15000	10	3	0,85	3,97	57,96	2,31	5,37	170,16
MDF - S	15000	15	3	1,23	11,44	95,70	2,34	5,61	181,53
MDF - F	25000	5	2	1,18	6,57	65,30	1,81	3,17	167,49
MDF - F	25000	10	2	1,52	9,65	87,37	2,81	5,31	177,04
MDF - F	25000	15	2	1,20	12,48	101,82	3,46	5,36	74,47
MDF - F	25000	5	3	1,27	5,18	58,16	3,21	4,93	234,25
MDF - F	25000	10	3	0,92	5,32	141,79	3,84	8,26	141,84
MDF - F	25000	15	3	1,43	28,76	103,23	3,74	5,10	197,39
MDF - F	20000	5	2	1,17	7,98	107,85	2,05	6,03	217,90
MDF - F	20000	10	2	1,67	13,82	104,43	3,71	6,99	899,17
MDF - F	20000	15	2	1,43	14,48	89,33	3,30	8,95	154,26
MDF - F	20000	5	3	2,05	20,64	240,49	2,71	4,48	107,97
MDF - F	20000	10	3	0,91	9,88	102,60	2,80	4,72	101,69
MDF - F	20000	15	3	1,16	7,86	91,91	2,97	7,38	140,22
MDF - F	15000	5	2	0,87	12,68	94,45	3,31	5,68	227,89
MDF - F	15000	10	2	1,86	11,52	102,87	2,80	5,58	220,86
MDF - F	15000	15	2	1,10	6,83	134,81	3,80	6,57	227,80
MDF - F	15000	5	3	2,03	12,19	98,77	2,58	4,04	264,07
MDF - F	15000	10	3	1,45	9,13	76,89	1,54	2,94	151,69
MDF - F	15000	15	3	1,89	14,80	150,00	3,51	7,15	140,95

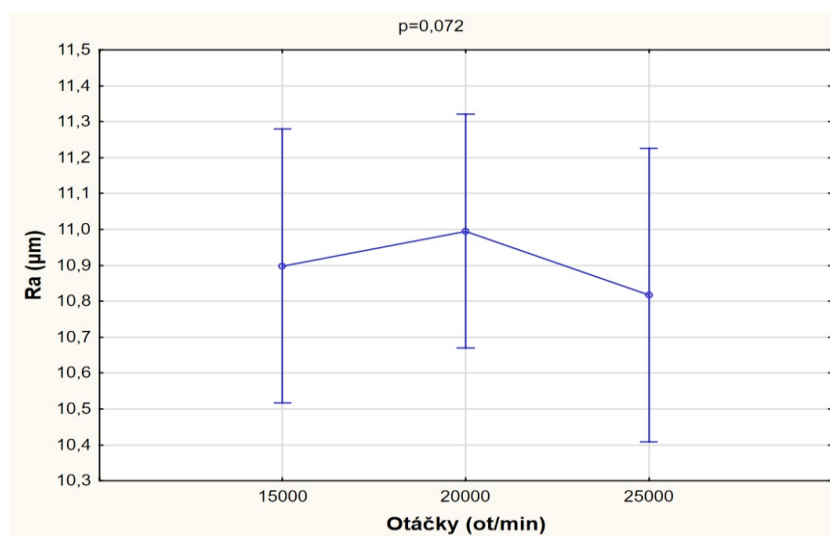
11.1.1 Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti „Ra“

Jak jsem již zmiňoval, použil jsem na tuto práci materiál MDF o dvou různých hustotách, což mělo vliv na parametr drsnosti povrchu Ra, který je jasně patrný z grafu 1. Deska MDF Standard má nižší hustotu, což ovlivnilo, že hodnoty průměrných aritmetických úchylek profilu drsnosti jsou o 16,73 % nižší než u MDF desky Frézovací. Zvýšení hustoty způsobí v řezný odpor materiálu což má vliv právě i na hodnoty Ra.



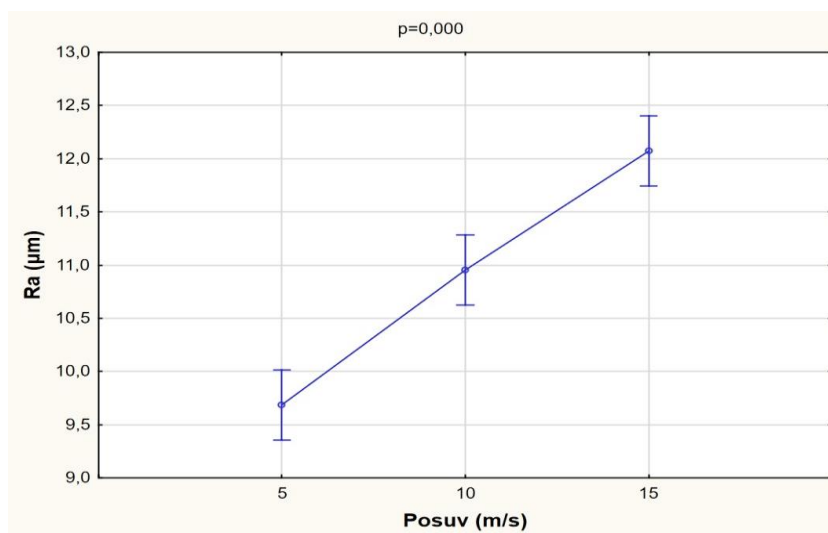
Graf 1: Vliv materiálu na parametr drsnosti Ra

Z grafu 2, respektive z jeho hladiny významnosti $p = 0,072$, není dokázán statisticky významný rozdíl naměřených hodnot Ra při jednotlivých změnách otáček. Nejnižší hodnoty byly naměřeny při nevyšší hodnoty otáček 25 000 ot/min



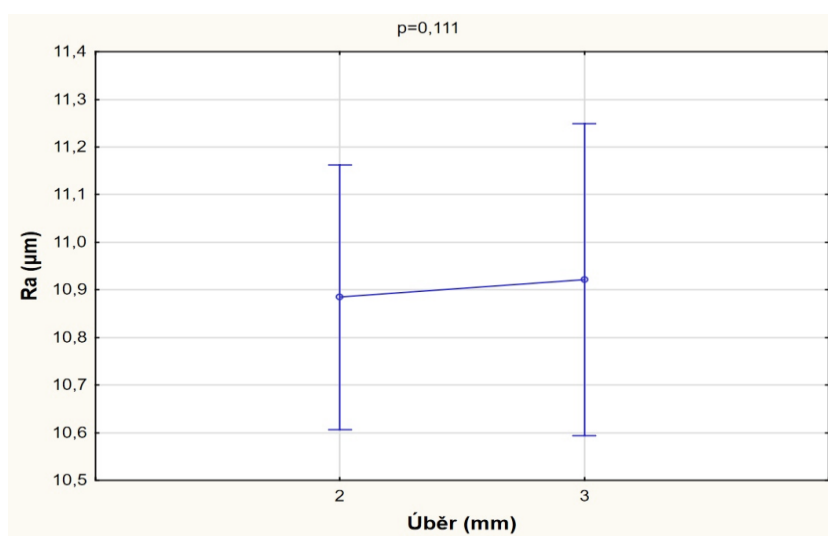
Graf 2: Vliv otáček nástroje na parametr drsnosti Ra

Z grafu 3 je patrná závislost Ra na posuvu nástroje, když se postupně zvyšuje rychlost posuvu nástroje rovnoměrně se zvyšuje i hodnota Ra. Nejnížší hodnoty drsnosti Ra jsou naměřeny při nejnižším použitém posuvu 5 m/min a jsou o 19,76 % nižší než u nejvyšší použité rychlosti posuvu 15 m/min. Důvodem je zvýšení přísunu odřezávaného materiálu, což má vliv na kvalitu jeho odfrézování.



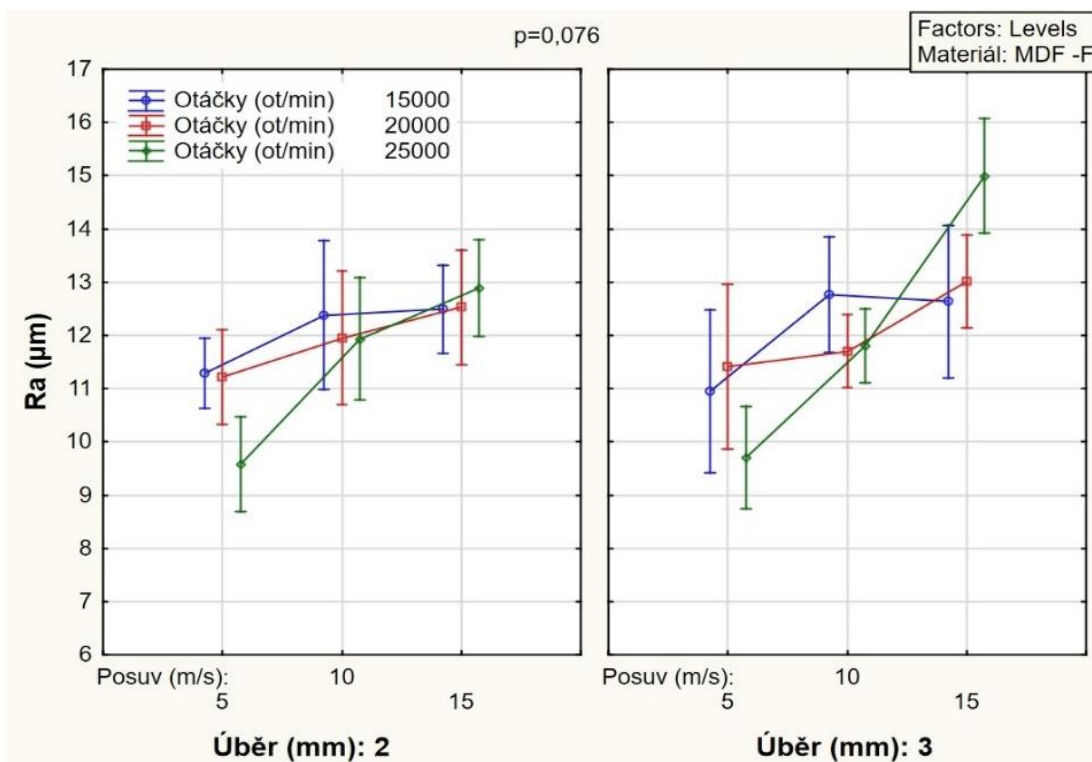
Graf 3: Vliv rychlosti posuvu nástroje na parametr drsnosti Ra

Hodnoty drsnosti (Ra) naměřené po změnách velikosti úběru nejsou statisticky významné, což znázorňuje grafu 4 a jeho hladiny významnosti $p=0,111$. Na grafu je patrné určité zvýšení průměrné hodnoty v závislosti na zvětšení úběru materiálu.



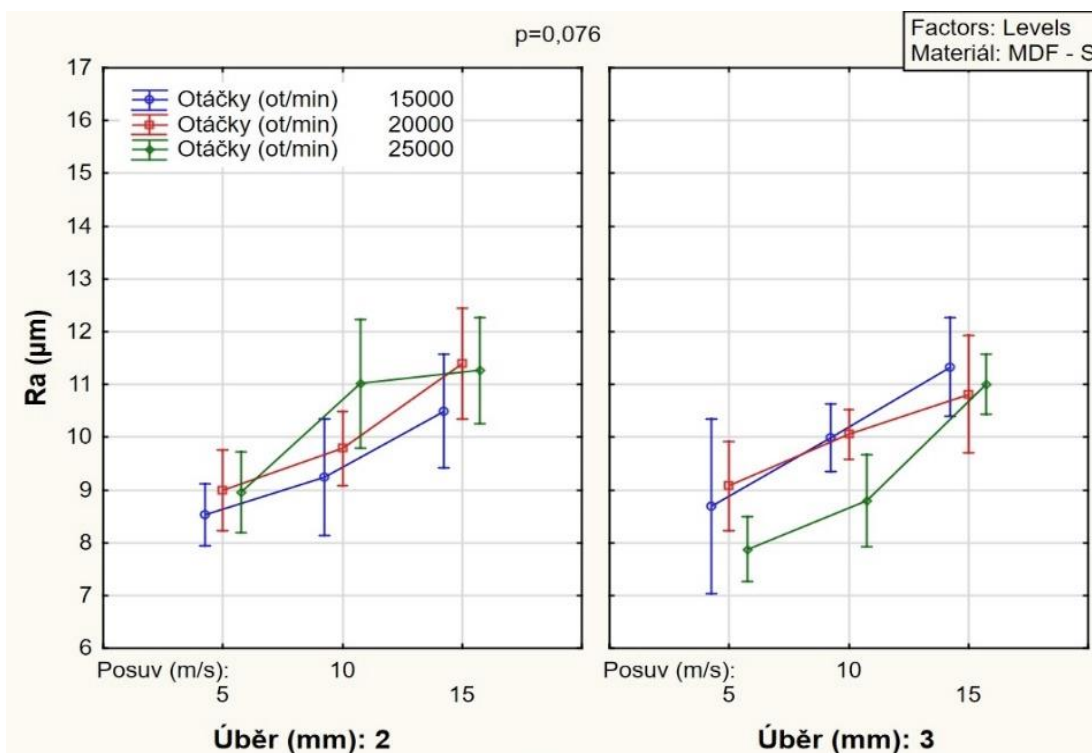
Graf 4: Vliv velikosti úběru na parametr drsnosti Ra

Vliv kombinace všech parametrů u MDF desky Frézovací na Ra je znázorněn na grafu 5. Nejvyšší hodnoty drsnosti byli naměřeny při kombinaci nejvyšších otáčkách 25 000 ot/min, nejvyšší rychlosti posuvu 15 m/min a úběru 3 mm. Naopak nejnižší hodnoty byli naměřeny také při těchto otáčkách, ale naopak při nejnižší použité rychlosti posuvu 5 m/min a úběru 2 mm. Procentuálně vyjádřený rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou je 36,12 %.



Graf 5: Vliv vybraných parametrů na parametr drsnosti Ra u MDF desky Frézovací

Naopak výsledky pro MDF desku Standard jsou znázorněné v grafu 6, kde při kombinaci rychlosti otáček 25 000 ot/min, rychlosti posuvu 5 m/min a úběru 3 mm je hodnota Ra nejnižší. Nevyšší hodnota Ra je u kombinace rychlosti otáček 20 000 ot/min, rychlosti posuvu 15 m/min a úběru 3 mm. Přesnější vyobrazení výsledků na hladině významnosti je pomocí Duncenova testu (viz příloha č. 3).



Graf 6: Vliv vybraných parametrů na parametr drsnosti Ra u MDF desky Standard

Tab. 7 znázorňuje vliv jednotlivých parametrů na faktor drsnosti Ra pomocí Duncanova testu. Červeně jsou označeny kombinace hodnot se statisticky významnými rozdíly.

V jedné části tabulky je znázorněn vliv materiálu na drsnost (Ra) a je viditelné, že naměřené hodnoty potvrdily materiál jako velmi významně působící faktor s hladinou významnosti $P = 0,000$. Stejně tomu tak je v části, která vyhodnocuje vliv posunu na Ra. Naopak z dalších částí tabulky je patrné, že z hodnot naměřených v závislosti otáček na Ra a velikosti úběru na Ra se statisticky významný rozdíl hodnot drsnosti neprokázal.

Tab. 7: Duncanov test znázorňující vliv jednotlivých parametrů na faktor drsnosti Ra

	Materiál	1	2
1	MDF - S		0,000
2	MDF - F	0,000	

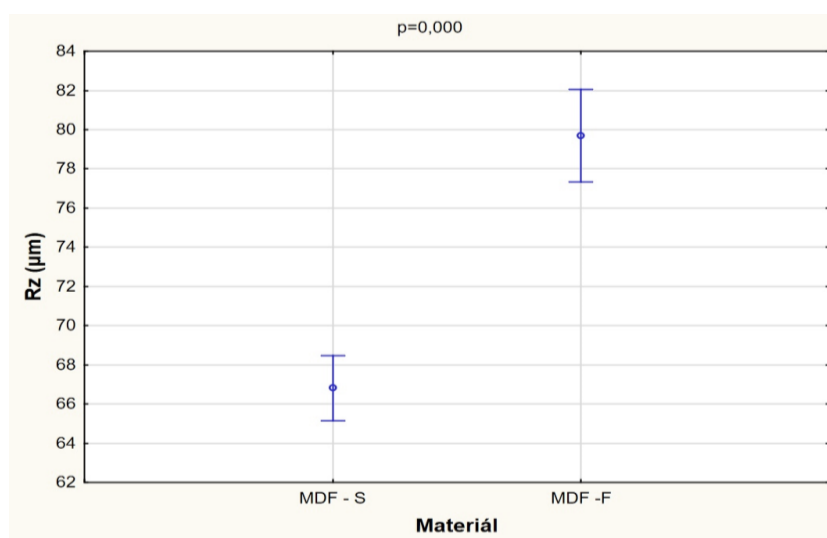
	Otáčky (ot/min)	1	2	3
1	15000		0,596	0,657
2	20000	0,596		0,362
3	25000	0,657	0,362	

	Posuv (m/min)	1	2	3
1	5		0,000	0,000
2	10	0,000		0,000
3	15	0,000	0,000	

	Úběr (mm)	1	2
1	2		0,000
2	3	0,000	

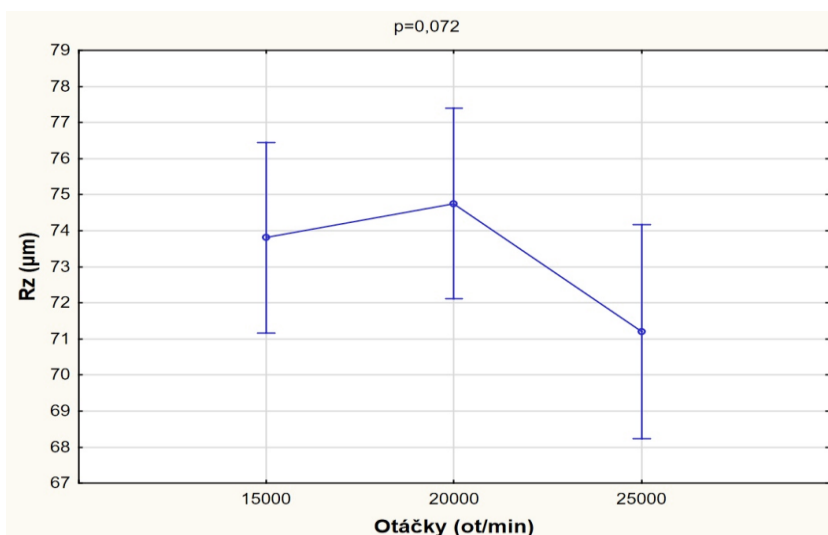
11.1.2 Nejvyšší výška profilu drsnosti „Rz“ pro frézu GRUING

Dalším měřeným parametrem drsnosti byla nejvyšší výška profilu drsnosti Rz a její závislost na materiálu, konkrétně v tomto případě na jeho hustotě, je znázorněný na grafu 7. Nejnižší hodnoty byly naměřeny pro desku Standard a naopak nejvyšší hodnoty pro desku Frézovací. Hodnoty desek MDF-S jsou o 16,15 % nižší než u desek MDF-F.



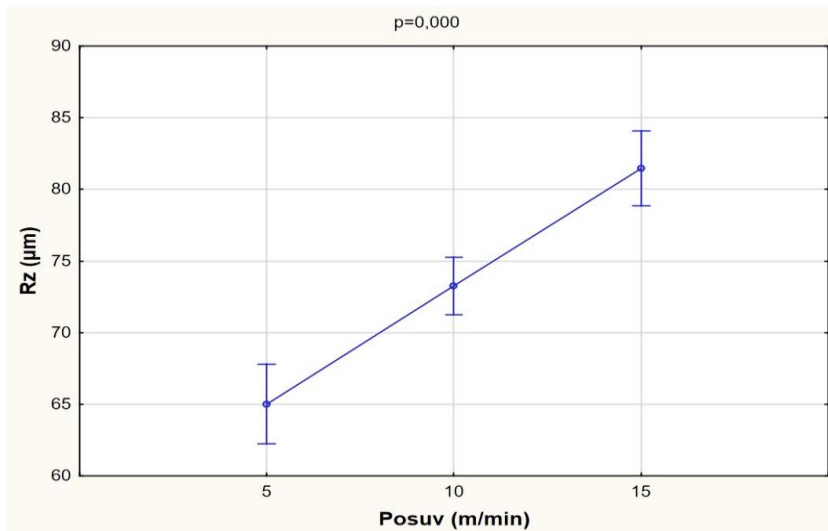
Graf 7: Vliv materiálu na parametr drsnosti Rz

Z Grafu 8, respektive z jeho hladiny významnosti $p = 0,072$, není dokázán statisticky významný rozdíl naměřených hodnot Ra při jednotlivých změnách otáček.



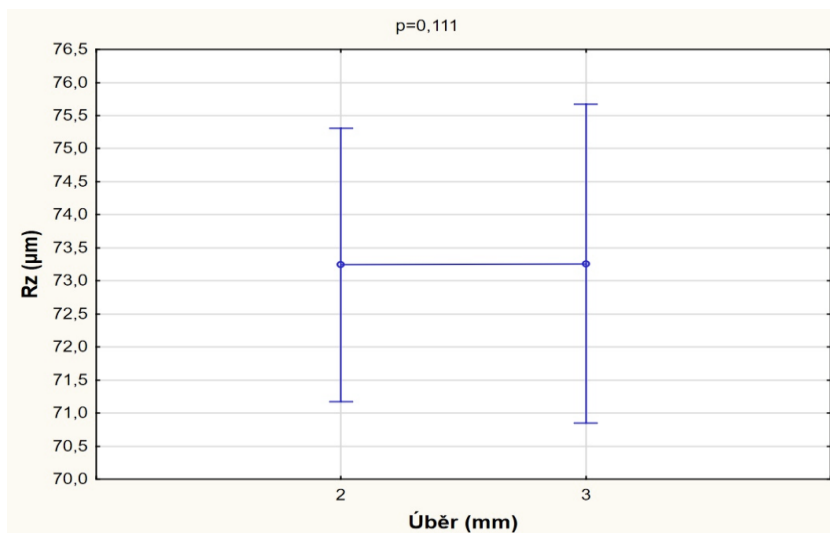
Graf 8: Vliv otáček nástroje na parametr drsnosti Rz

Rychlost posuvu nástroje ovlivňuje i parametr drsnosti Rz, jejich závislost je znázorněna na grafu 9. Jedná se o rovnoměrný růst hodnot drsnosti v závislosti na zvyšující se rychlosti posuvu. Procentuální rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou Rz je 20,19 %



Graf 9: Vliv rychlosti posuvu nástroje na parametr drsnosti Rz

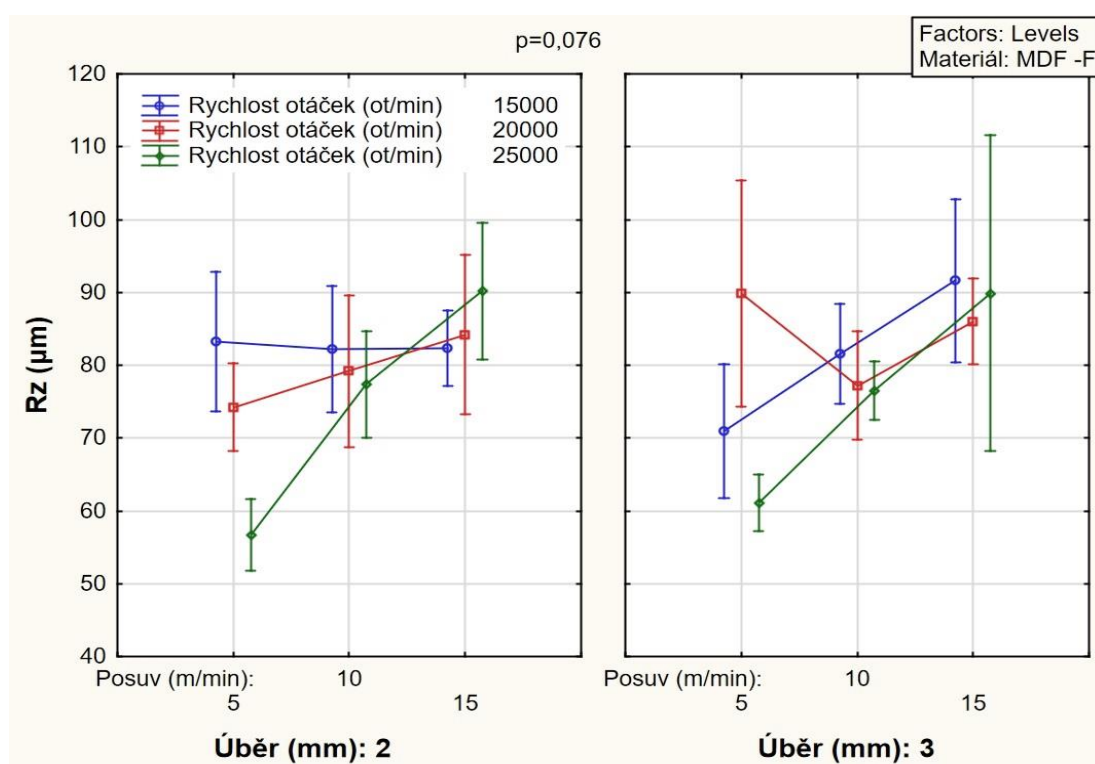
Vzájemný vztah mezi úběrem a parametrem drsnosti Rz není dle naměřených hodnot na hladině významnosti $p=0,111$ statisticky významný, viz graf 10.



Graf 10: Vliv velikosti úběru na parametr drsnosti Rz

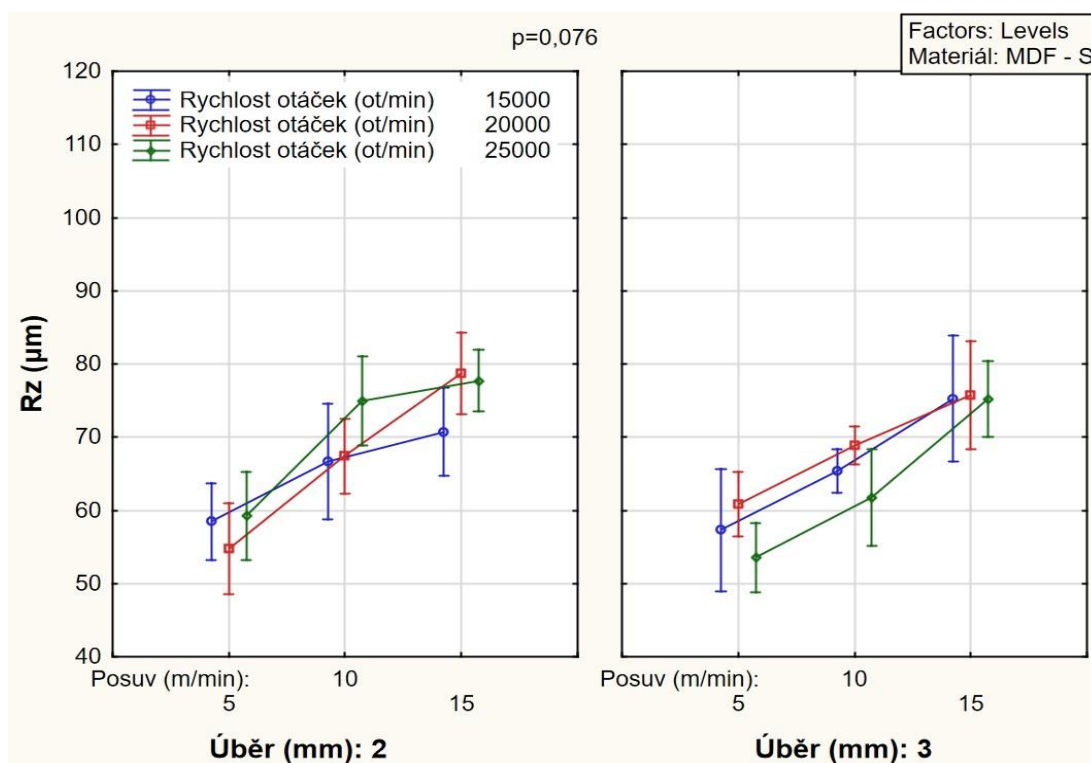
Grafy 11 a 12 znázorňují synergický účinek všech tří sledovaných faktorů (řezná rychlost, podávací rychlost a velikost úběru) na hodnoty parametru drsnosti Rz. V obou sledovaných interakcích se účinek materiálu významně podílel na změně naměřených hodnot.

Rozsah průměrných hodnot získaných pro MDF desku Frézovací je v intervalu od 56 μm do 92 μm . Nejnižší hodnota Rz byla naměřena při rychlosti otáček 25 000 ot/min, rychlosti posuvu 5 m/min a úběru 2 mm. Naopak při rychlosti otáček 15 000 ot/min, rychlosti posuvu 15 m/min a úběru 3 mm byla průměrná hodnota Rz nejvyšší.



Graf 11: Vliv vybraných parametrů na parametr drsnosti Rz u MDF desky Frézovací

Při obrábění MDF Standard byly hodnoty Rz v intervalu od 53 μm do 79 μm . V porovnání s MDF Frézovací se tedy jedné o hodnoty nižší a v užším intervalu. Minima bylo dosaženo při rychlosti otáček 25 000 ot/min, rychlosti posuvu 5 m/min a úběru 3 mm. Naopak nejvyšší hodnoty Rz bylo dosaženo při rychlosti otáček 20 000 ot/min, rychlosti posuvu 15 m/min a úběru 2 mm.



Graf 12: Vliv vybraných parametrů na parametr drsnosti Rz u MDF desky Standard

Tab. 8 znázorňuje vyhodnocení vlivu faktorů na parametr drsnosti (Rz) pomocí Duncanova testu.

Hodnoty Rz naměřené po změně materiálu a při změně rychlosti posunu jsou součástí tabulky a jejich rozdíl je statisticky významný. Stejně tak je i statisticky významný rozdíl mezi hodnotami naměřenými u přechodu otáček z 20 000 ot/min na 25 000 ot/min a naopak. U vlivu velikosti úběru a dalšího přechodu rychlosti otáček se nepodařil prokázat statisticky významný rozdíl. Vliv kombinace parametrů frézování na Rz pomocí Duncanova testu je uveden v příloze č. 4.

Tab. 8: Duncanov tes znázorňující vliv jednotlivých parametrů na faktor drsnosti Rz

	Materiál	1	2
1	MDF - S		0,000
2	MDF -F	0,000	

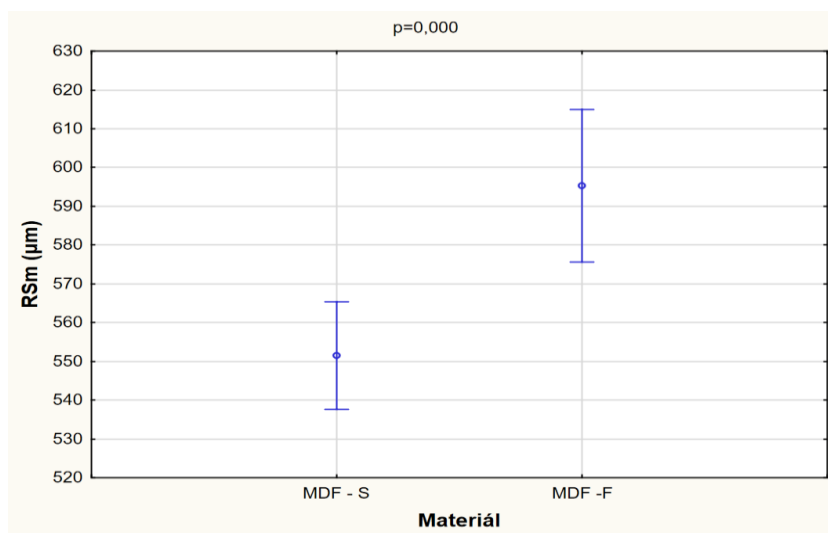
	Otáčky (ot/min)	1	2	3
1	15000		0,518	0,074
2	20000	0,518		0,020
3	25000	0,074	0,020	

	Posuv (m/min)	1	2	3
1	5		0,000	0,000
2	10	0,000		0,000
3	15	0,000	0,000	

	Úběr (mm)	1	2
1	2		0,990
2	3	0,990	

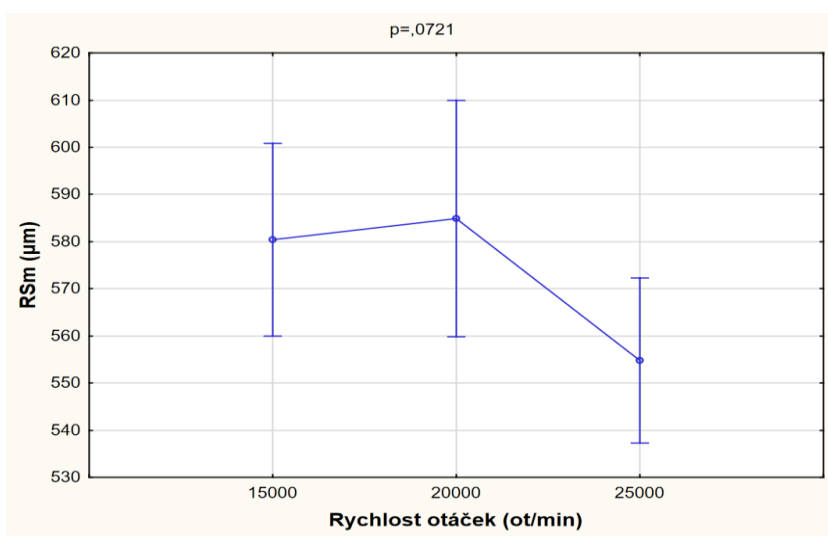
11.1.3 Průměrná šířka prvků drsnosti „RSm“ pro frézu GRUING

Z pohledu drsnosti obráběné plochy je materiál, konkrétně jeho hustota, velmi důležitým faktorem (Graf 13). Při obrábění MDF desky Standard byla zjištěna průměrná hodnota drsnosti 551,48 μm , zatímco při obrábění MDF desky Frézovací byla tato hodnota 595,23 μm . Z toho vyplývá, že v případě materiálu se mezi všemi sledovanými soubory projevily statisticky velmi významný rozdíl.



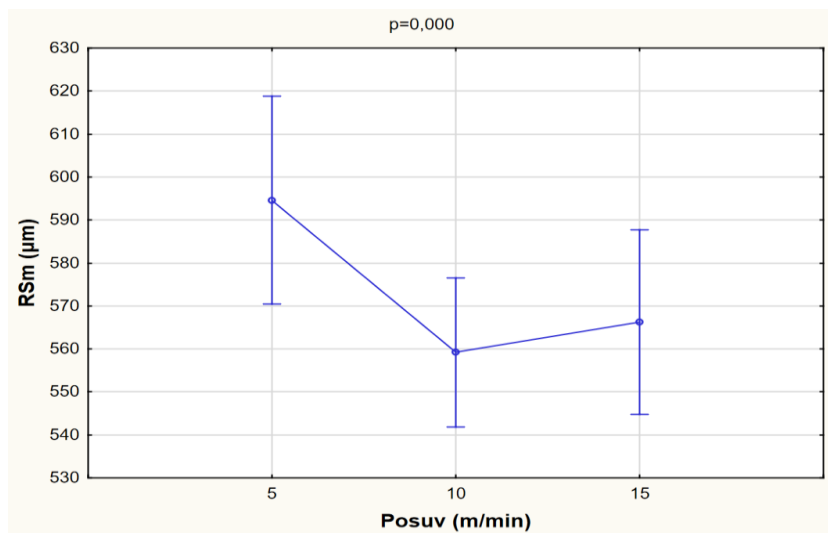
Graf 13: Vliv materiálu na parametr drsnosti RSm

U průměrných hodnoty RSm měřených po změně otáček nástroje nebyl prokázán statisticky významný rozdíl viz graf 14.



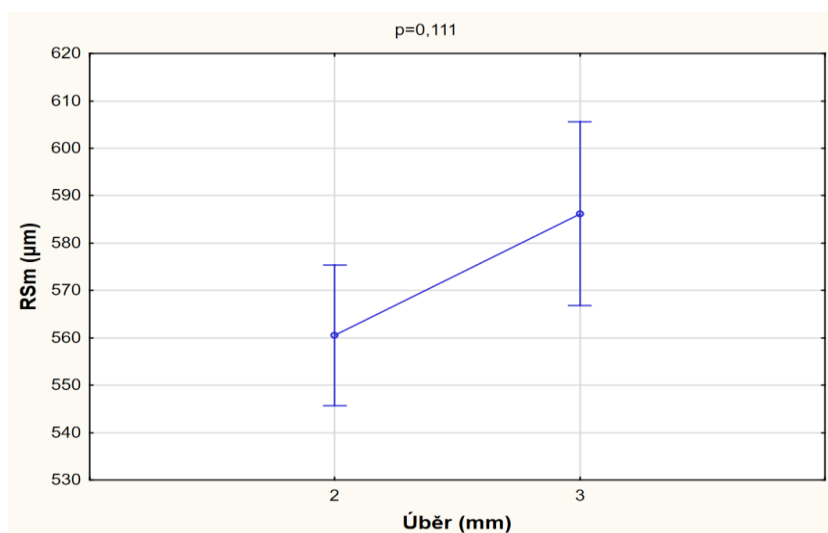
Graf 14: Vliv otáček nástroje na parametr drsnosti RSm

Graf 15 znázorňuje vliv rychlosti posunu na parametr drsnosti RSm, který nemá stejný průběh jako u předchozích parametrů drsnosti Ra a Rz. Dochází k určitému postupnému poklesu průměrných hodnot RSm v závislosti na stoupající rychlosti posunu. Nevyšší hodnoty RSm byly naměřeny při posunu 5 m/min a naopak nejnižší při posunu 10 m/min. Procentuální rozdíl mezi těmito hodnotami je 5,95 %



Graf 15: Vliv rychlosti posunu nástroje na parametr drsnosti RSm

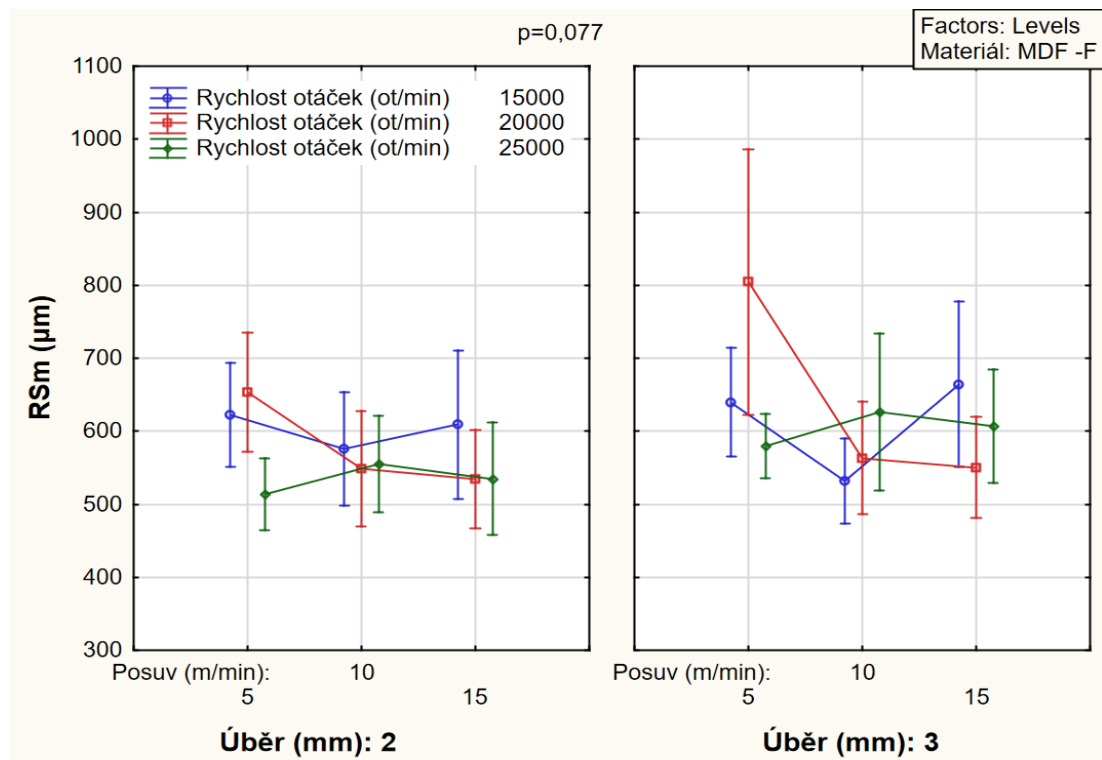
Při změně velikosti úběru se nepodařilo prokázat statisticky významný rozdíl hodnot RSm (viz graf 16).



Graf 16: Vliv velikosti úběru na parametr drsnosti RSm

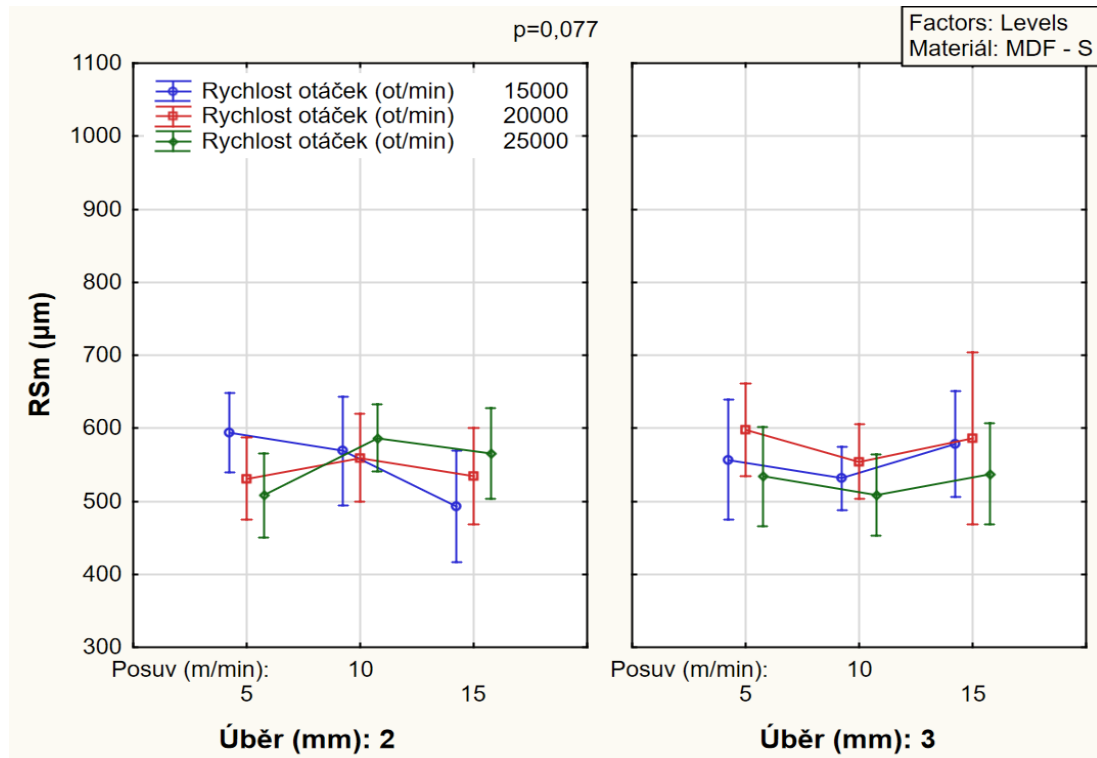
Grafy 17 a 18 znázorňují synergický účinek řezné rychlosti, podávací rychlosti a velikosti úběru na průměrné hodnoty šířky prvků drsnosti RSm. Jeden z nevýznamnějších parametrů, který se podílel na změně naměřených hodnot Rsm, je právě materiál.

Rozsah průměrných hodnot získaných pro MDF desku Frézovací je v intervalu od 514 mm do 805 mm. Nejnižší hodnota RSm byla naměřena při rychlosti otáček 25 000 ot/min, rychlosti posuvu 5 m/min a úběru 2 mm. Naopak při rychlosti otáček 15 000 ot/min, rychlosti posuvu 5 m/min a úběru 3 mm byla průměrná hodnota RSm nejvyšší.



Graf 17: Vliv vybraných parametrů na parametr drsnosti RSm u MDF desky Frézovací

Při obrábění MDF Standard byly hodnoty RSm v intervalu od 493 μm do 600 μm , jedná se tedy o hodnoty nižší a v užším intervalu než u desky Frézovací. Minima bylo dosaženo při rychlosti 15 000 ot/min, rychlosti posuvu 15 m/min a úběru 2 mm. Naopak nejvyšší hodnoty RSm bylo dosaženo při rychlosti 20 000 ot/min, rychlosti posuvu 5 m/min a úběru 3 mm. Ne u všech hodnot pro účinek všech tří sledovaných faktorů je dokázán statisticky významný rozdíl, pro lepší přehlednost je zapotřebí Duncenuv test viz příloha č. 5.



Graf 18: Vliv vybraných parametrů na parametr drsnosti RSm u MDF desky Standard

Vyhodnocení vlivu faktorů na parametr drsnosti RSm pomocí Duncanova testu je udáno v tab. 9. Červeně uvedené hodnoty udávají statisticky významný rozdíl mezi příslušnými průměrnými hodnotami drsnosti RSm. Dvě části tabulky, konkrétně vliv materiálu a velikost úběru, mají vliv na tento parametr drsnosti a jejich rozdíl je statisticky významný. Stejně tomu tak je v části tabulky zabývající se vlivem rychlosti otáček při změně z 20 000 ot/min na 25 000 ot/min a zpět a při změně podávací rychlosti z 5 m/min na 10 a 15 m/min. Rozdíl zbývajících naměřených hodnot je statisticky nevýznamný.

Tab. 9: Duncanov test znázorňující vliv jednotlivých parametrů na faktor RSm

	Materiál	1	2
1	MDF - S		0,000
2	MDF - F	0,000	

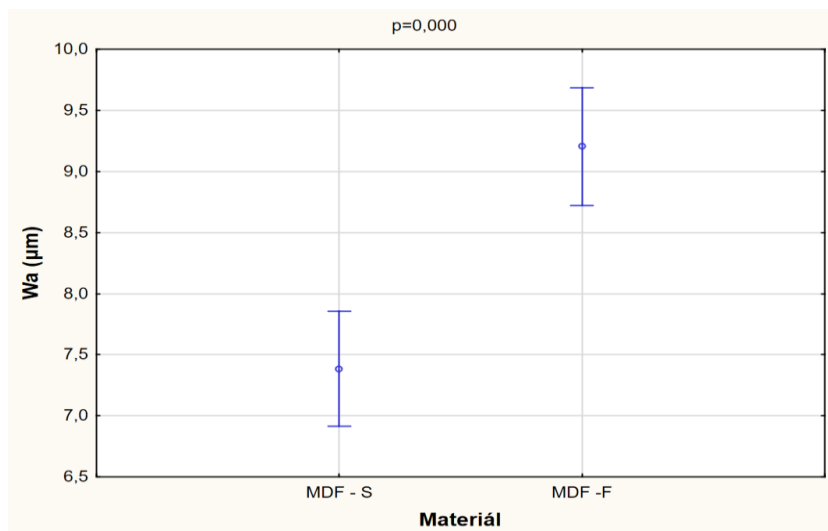
	Otáčky (ot/min)	1	2	3
1	15000		0,755	0,068
2	20000	0,755		0,042
3	25000	0,068	0,042	

	Posuv (m/min)	1	2	3
1	5		0,016	0,044
2	10	0,016		0,613
3	15	0,044	0,613	

	Úběr (mm)	1	2
1	2		0,025
2	3	0,025	

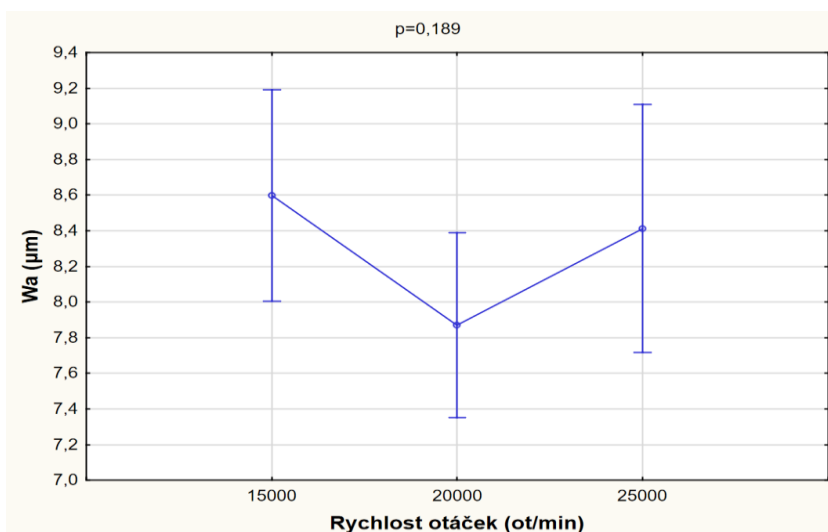
11.1.4 Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti „Wa“ pro frézu GRUING

Vliv materiálu na parametr vlnitosti povrchu Wa dokazuje graf 19. Vyšší hodnoty Wa má deska MDF Frézovací 9,20 μm . MDF deska Standard má tyto hodnoty o něco nižší 7,38 μm . Procentuální rozdíl těchto hodnot je 19,78%



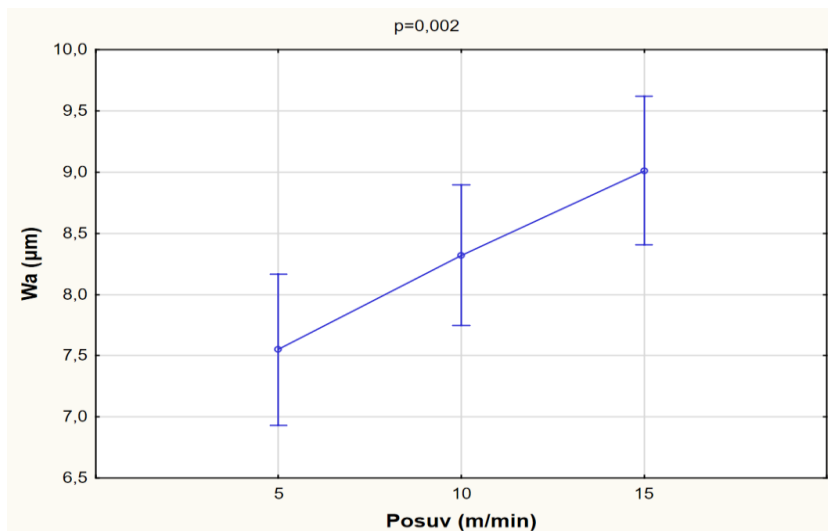
Graf 19: Vliv materiálu na parametr vlnitosti Wa

U průměrných hodnot Wa měřených po změně otáček nástroje nebyl prokázán statisticky významný rozdíl viz graf 20.



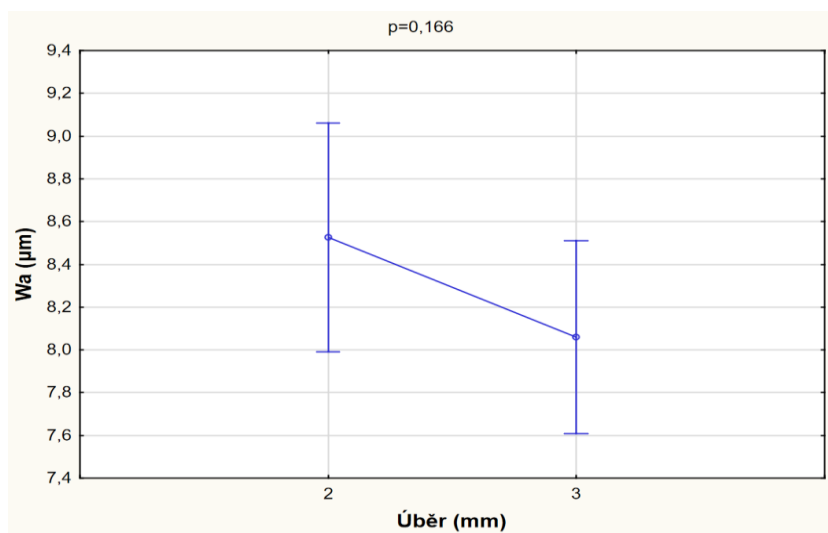
Graf 20: Vliv otáček nástroje na parametr vlnitosti Wa

Z grafu 21 je patrná závislost W_a na posuvu nástroje. Když dochází k postupnému zvyšování rychlosti posuvu nástroje, zvyšuje se i hodnota W_a . Nejnižší hodnoty vlnitosti W_a jsou naměřeny při nejnižším použitém posuvu 5 m/min a jsou o 16,20 % menší než u nejvyšší použité rychlosti posuvu 15 m/min.



Graf 21: Vliv rychlosti posuvu nástroje na parametr vlnitosti W_a

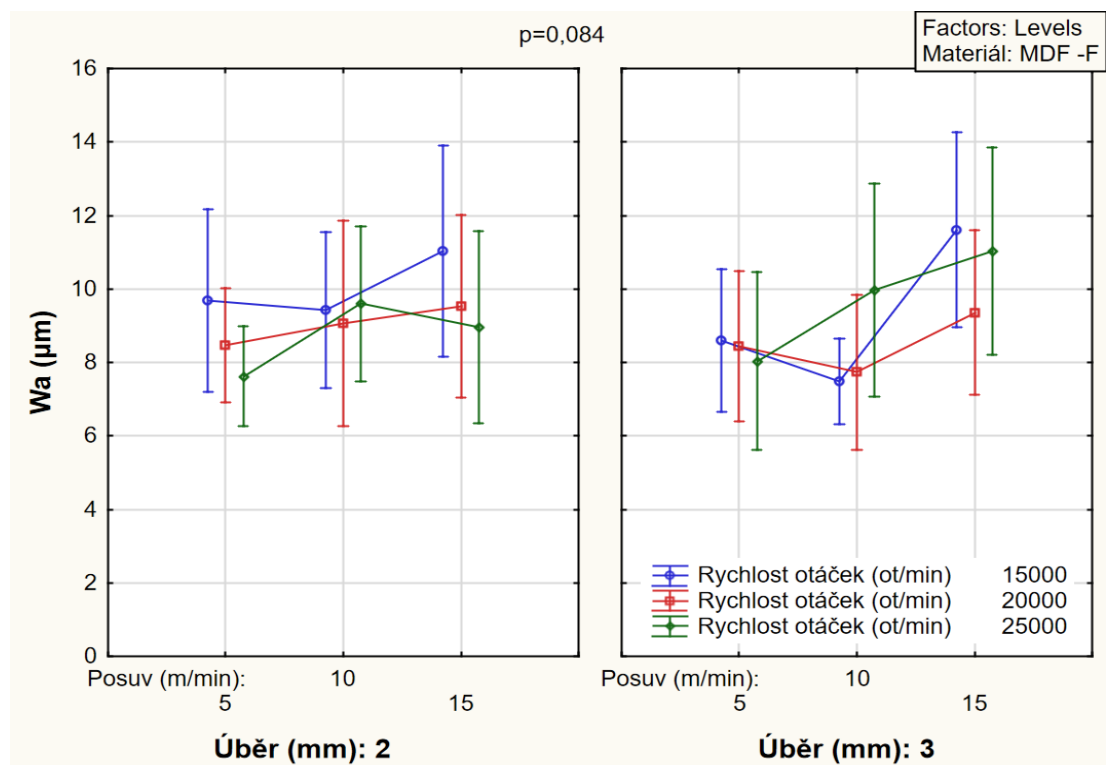
U průměrných hodnot W_a měřených po změně úběru nebyl prokázán statisticky významný rozdíl viz graf 22.



Graf 22: Vliv velikosti úběru na parametr vlnitosti W_a

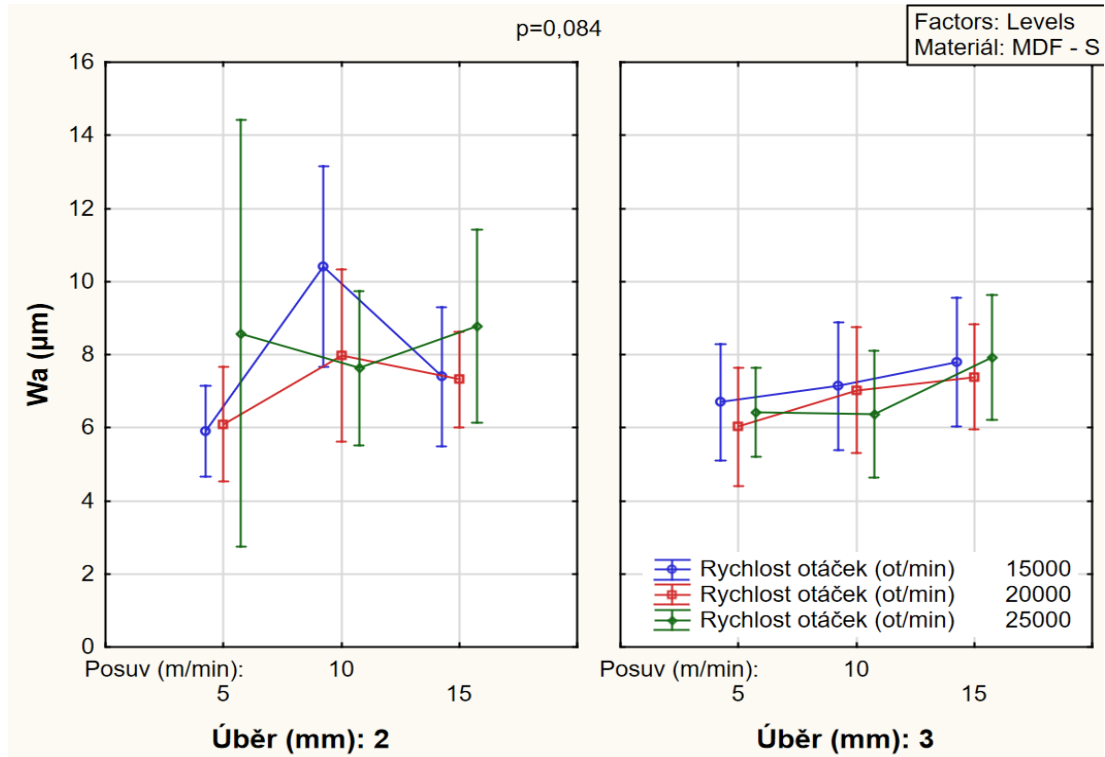
Synergický účinek všech tří sledovaných faktorů (řezná rychlost, podávací rychlost a velikost úběru) na průměrnou aritmetickou úchylku profilu vlnitosti W_a pro jednotlivé MDF znázorňují grafy 23 a 24.

Rozsah průměrných hodnot získaných pro MDF desku frézovací je v intervalu od 7,5 μm do 11,5 μm . Minimálních hodnot bylo dosaženo při 25 000 ot/min, rychlosti posuvu 5 m/min a úběru 2 mm. Naopak nejvyšší hodnoty bylo dosaženo při nejnižších použitých otáčkách (15 000 ot/min) nejvyšší rychlosti posuvu 15 m/min a úběru 3 mm. Nejvyšší naměřená hodnota je o 34,78 % menší oproti nejnižší



Graf 23: Vliv vybraných parametrů na parametr vlnitosti W_a u MDF desky Frézovací

Hodnoty W_a v závislosti na kombinaci frézovacích parametrů u MDF desky Standard jsou znázorněny na grafu 24. Jejich interval je v rozsahu od 5,9 μm do 10,5 μm . U úběru 3 mm je jasně patrná tendence růstu hodnot W_a v závislosti na rychlosti posunu, které při úběru 2 mm není patrná.



Graf 24: Vliv vybraných parametrů na parametr vlnitosti W_a u MDF desky Standard

Tab. 10 znázorňuje vliv jednotlivých parametrů na faktor vlnitosti W_a pomocí Duncanova testu. Červeně jsou označeny kombinace hodnot se statisticky významnými rozdíly.

Statistickou významnost naměřených hodnot byla pomocí tohoto testu dokázána pouze u závislosti W_a na materiálu (hustotě) a určité hodnoty závislosti posuvu závislé na rychlosti posuvu. U zbývajících hodnot se nepodařilo prokázat statistickou významnost naměřených hodnot. Vliv veškerých kombinací parametrů frézování na W_a znázorněných pomocí Duncanova testu jsou uvedeny v příloze č. 6.

Tab. 10: Duncanov test znázorňující vliv jednotlivých parametrů na faktor vlnitosti W_a

	Materiál	1	2
1	MDF - S		0,326
2	MDF - F	0,326	

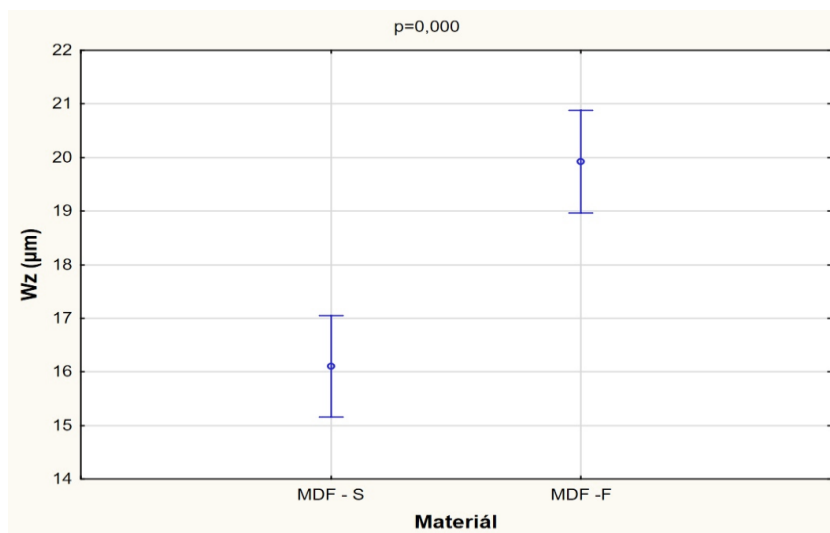
	Otáčky (ot/min)	1	2	3
1	15000		0,112	0,971
2	20000	0,112		0,125
3	25000	0,971	0,125	

	Posuv (m/min)	1	2	3
1	5		0,337237	0,260077
2	10	0,337237		0,809245
3	15	0,260077	0,809245	

	Úběr (mm)	1	2
1	2		0,193
2	3	0,193	

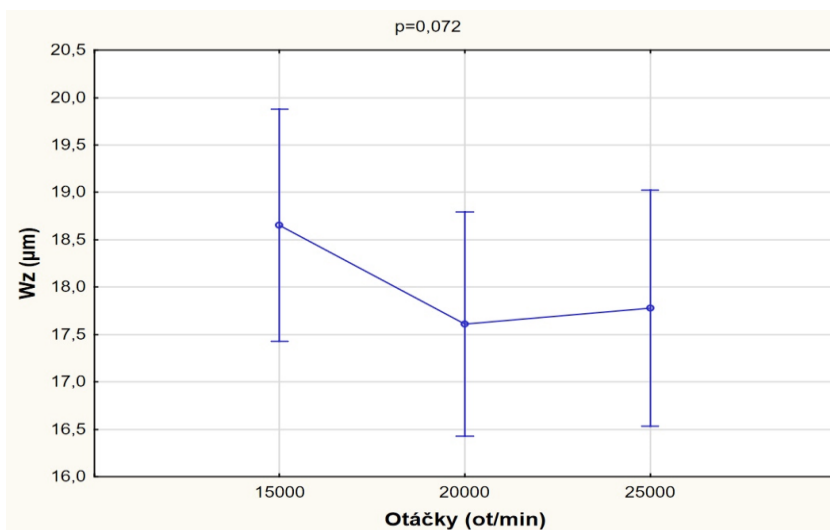
11.1.5 Nejvyšší výška profilu vlnitosti „Wz“ pro frézu GRUING

Nejvyšší výška profilu vlnitosti je závislá na materiálu, což dokazuje graf 25. Nejvyšší průměrná hodnota Wz odpovídá MDF Frézovací z čehož vyplývá, že nejnižší hodnota odpovídá MDF Standard. Rozdíl mezi těmito hodnotami procentuálně činí 19,18 %.



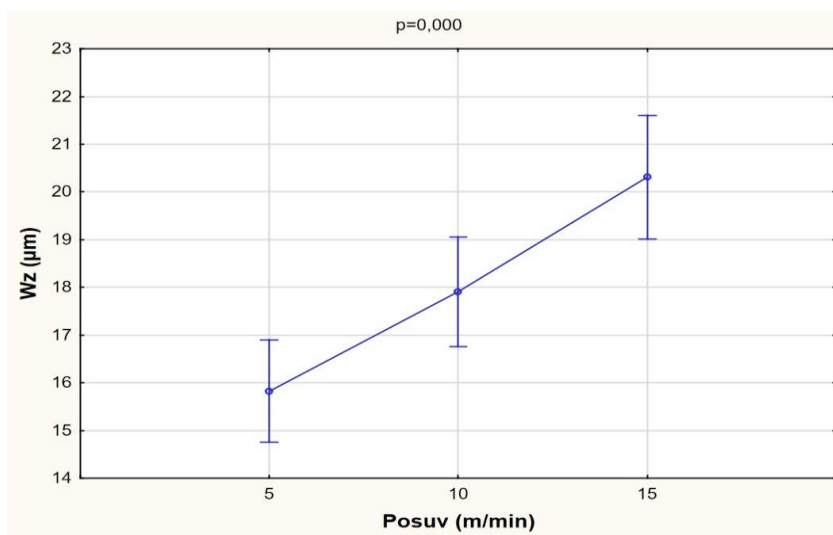
Graf 25: Vliv materiálu na parametr vlnitosti Wz

Graf 26, konkrétně jeho hladina významnosti $p=0,072$, ukazuje, že naměřené hodnoty Wz po změnách rychlosti otáček neprokazují statisticky významný rozdíl.



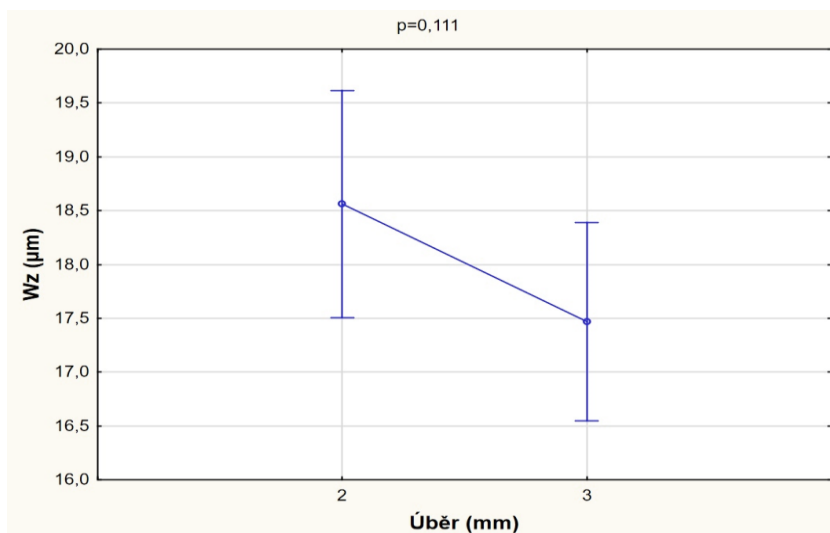
Graf 26: Vliv otáček nástroje na parametr vlnitosti Wz

Při zvyšování rychlosti posuvu dochází k rovnoměrnému růstu hodnot parametru vlnitosti W_z . Nejnižší průměrná hodnota vlnitosti W_z odpovídá vzorkům obráběným při rychlosti posuvu 5 m/min, naopak nejvyšší hodnota odpovídá rychlosti 15 m/min. Nejnižší průměrná hodnota je o 22,06 % nižší oproti nejvyšší.



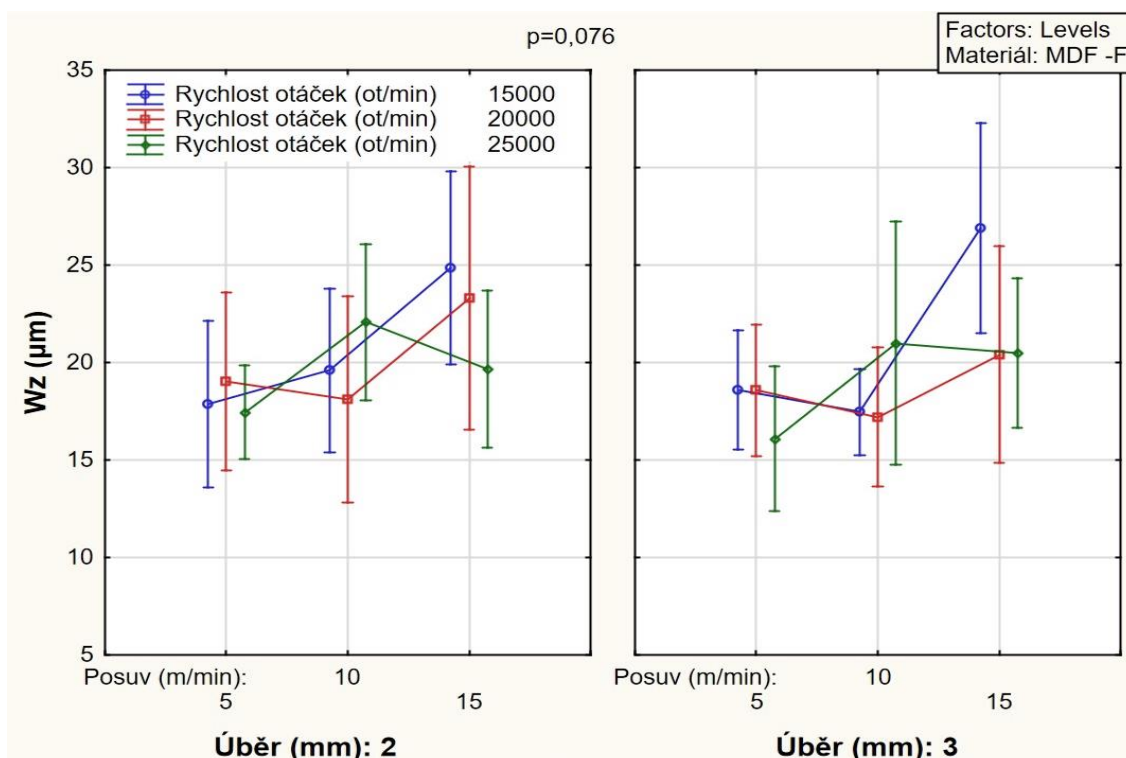
Graf 27: Vliv rychlosti posuvu nástroje na parametr vlnitosti W_z

Hladina významnosti $p=0,111$ v grafu 28 poukazuje na statisticky nevýznamný rozdíl mezi naměřenými hodnotami W_z po změně úběru.



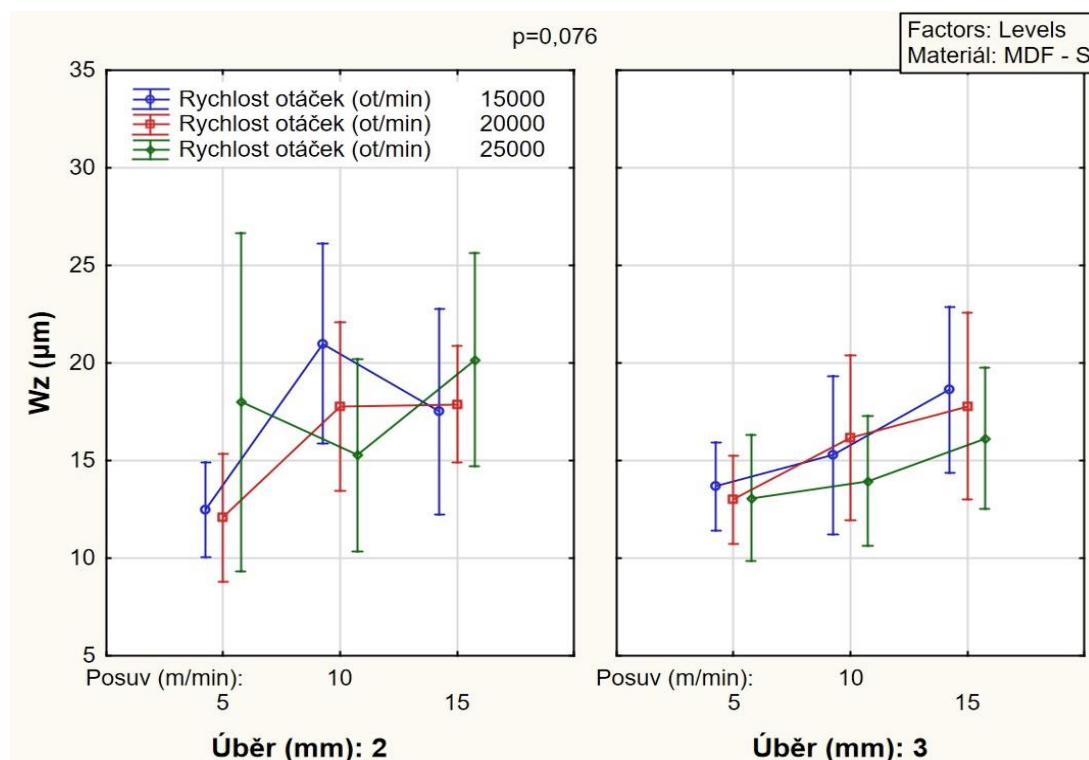
Graf 28: Vliv velikosti úběru na parametr vlnitosti W_z

Jak ovlivňují veškeré použité faktory frézování (rychlost otáčení, rychlost posuvu a velikost úběru) parametr vlnitosti Wz u MDF desky Frézovací znázorňuje graf 29. Nejvyšší hodnoty Wz byly naměřeny při kombinaci rychlosti otáček 15 000 ot/min, nejvyšší rychlosti posuvu 15 m/min a úběru 3 mm. Naopak nejnižší hodnoty byly naměřeny při nejvyšší rychlosti otáčení 25 000 m/min a při nejnižší použité rychlosti posuvu 5 m/min a úběru 3 mm. Procentuálně vyjádřený rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou je 40,25 %.



Graf 29: Vliv vybraných parametrů na parametr vlnitosti Wz u MDF desky Frézovací

Vliv kombinace všech použitých parametrů frézování na Wz u MDF desky Standard je znázorněn v grafu 30. Nejvyšší hodnota Wz je u kombinace rychlosti otáček 15 000 ot/min, rychlosti posuvu 10 m/min a úběru 2 mm. Přesnější vyobrazení výsledků na hladině významnosti je pomocí Duncenova testu (viz příloha č. 7).



Graf 30: Vliv vybraných parametrů na parametr vlnitosti Wz u MDF desky Standard

Tab. 11 znázorňuje vliv jednotlivých faktorů na parametr vlnitosti Wz pomocí Duncanova testu. Červeně jsou označeny kombinace hodnot se statisticky významnými rozdíly.

V jedné části tabulky je znázorněn vliv materiálu na vlnitost (Wz) a je viditelné, že naměřené hodnoty potvrdily materiál jako velmi významně působící faktor s hladinou významnosti $P = 0,000$. Stejně tomu tak je v části, která vyhodnocuje vliv rychlosti posunu na Wz. Naopak z dalších částí tabulky je patrné, že z hodnot naměřených v závislosti otáček na Wz a velikosti úběru na Wz se statisticky významný rozdíl drsnosti neprokázal.

Tab. 11: Duncanov test znázorňující vliv jednotlivých parametrů na faktor vlnitosti Wz

	Materiál	1	2
1	MDF - S		0,000
2	MDF - F	0,000	

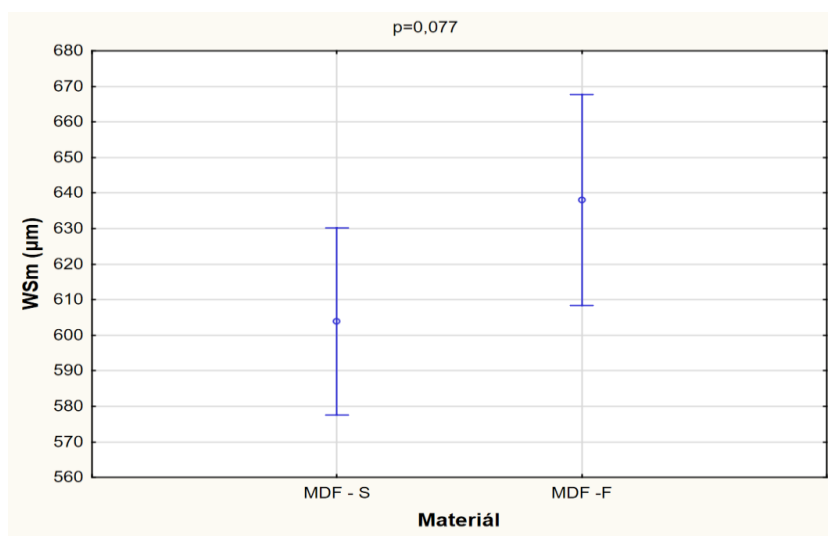
	Otáčky (ot/min)	1	2	3
1	15000		0,221	0,273
2	20000	0,221		0,834
3	25000	0,273	0,834	

	Posuv (m/min)	1	2	3
1	5		0,009	0,000
2	10	0,009		0,003
3	15	0,000	0,003	

	Úběr (mm)	1	2
1	2		0,093
2	3	0,093	

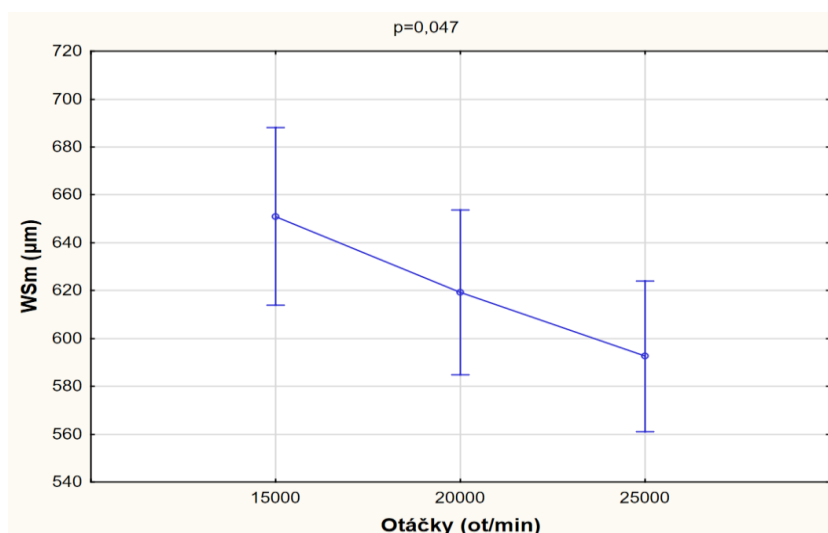
11.1.6 Průměrná šířka prvků vlnitosti „WSm“ pro frézu GRUING

Vliv materiálu na hodnoty WSm nejsou statisticky významné, což dokazuje graf 31 a jeho hladina významnosti $p=0,077$.



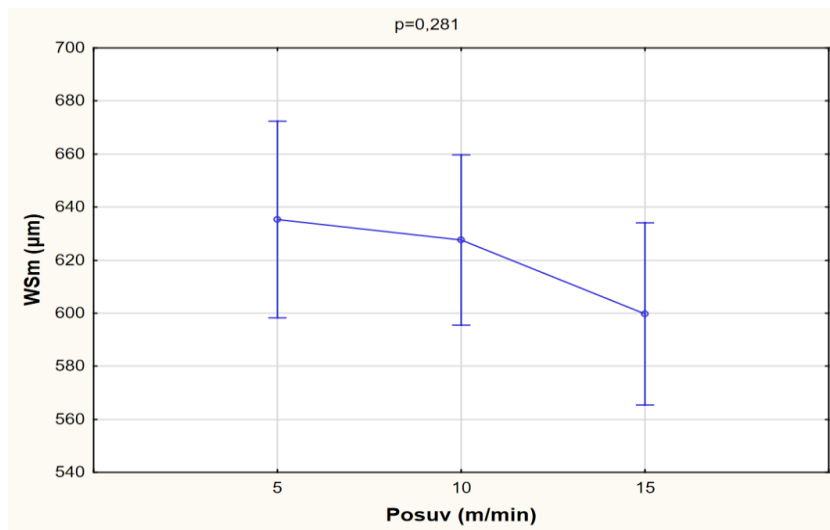
Graf 31: Vliv materiálu na parametr vlnitosti WSm

Z grafu 32 je patrná závislost otáček na průměrnou šířku prvků vlnitosti WSm. Při postupném zvyšování otáček dochází k rovnoměrnému snižování hodnot WSm, tedy zlepšení kvality plochy. Nejnižší průměrná hodnota WSm je naměřena u 25 000 ot/min a tato hodnota je o 9,01 % nižší než nejvyšší hodnota naměřená při 15 000 ot/min.



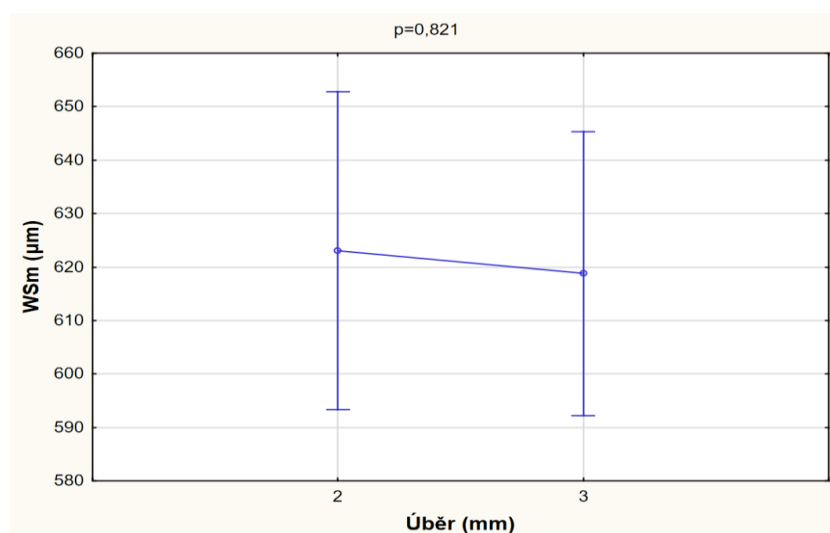
Graf 32: Vliv otáček nástroje na parametr vlnitosti WSm

Ani při změnách podávací rychlosti se nepodařilo prokázat statistickou významnost naměřených hodnot WSm, což znázorňuje graf 33 a jeho hladina významnosti $p=0,281$. Na grafu je patrný určitý pokles hodnot WSm v závislosti na vzrůstající podávací rychlosti.



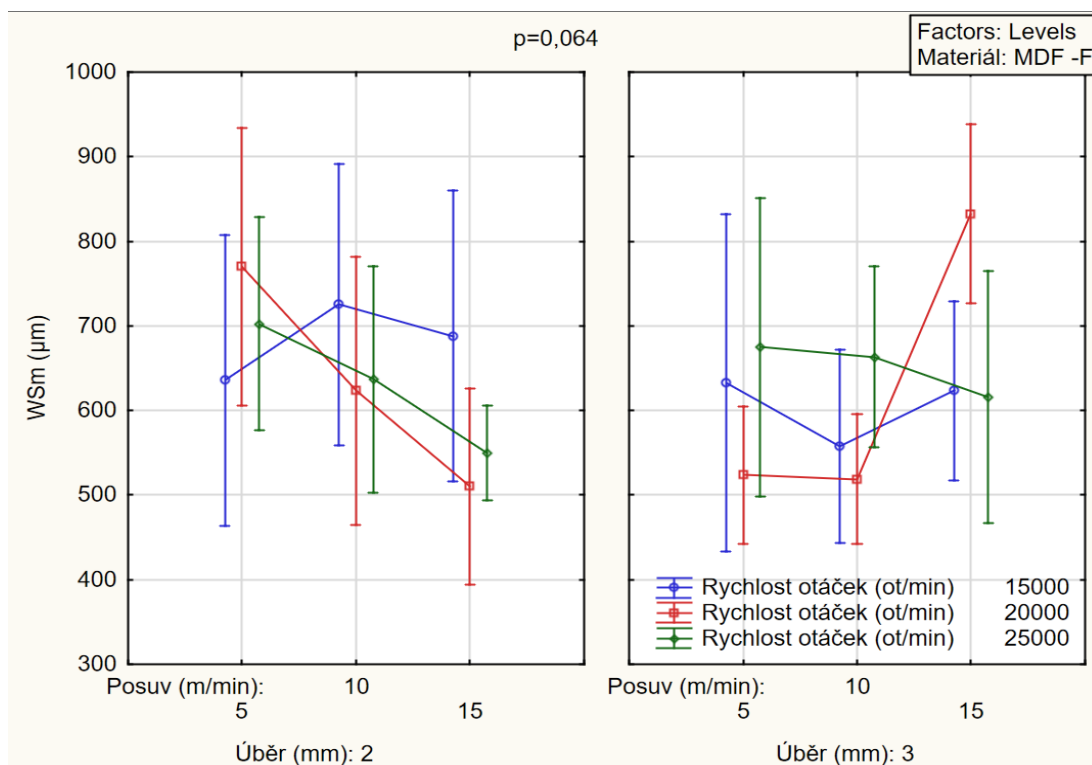
Graf 33: Vliv rychlosti posunu nástroje na parametr vlnitosti WSm

Hodnoty parametru vlnitosti (WSm) naměřené po změnách velikosti úběru nejsou statisticky významné, což je patrné z grafu 34 a jeho hladiny významnosti $p=0,111$.



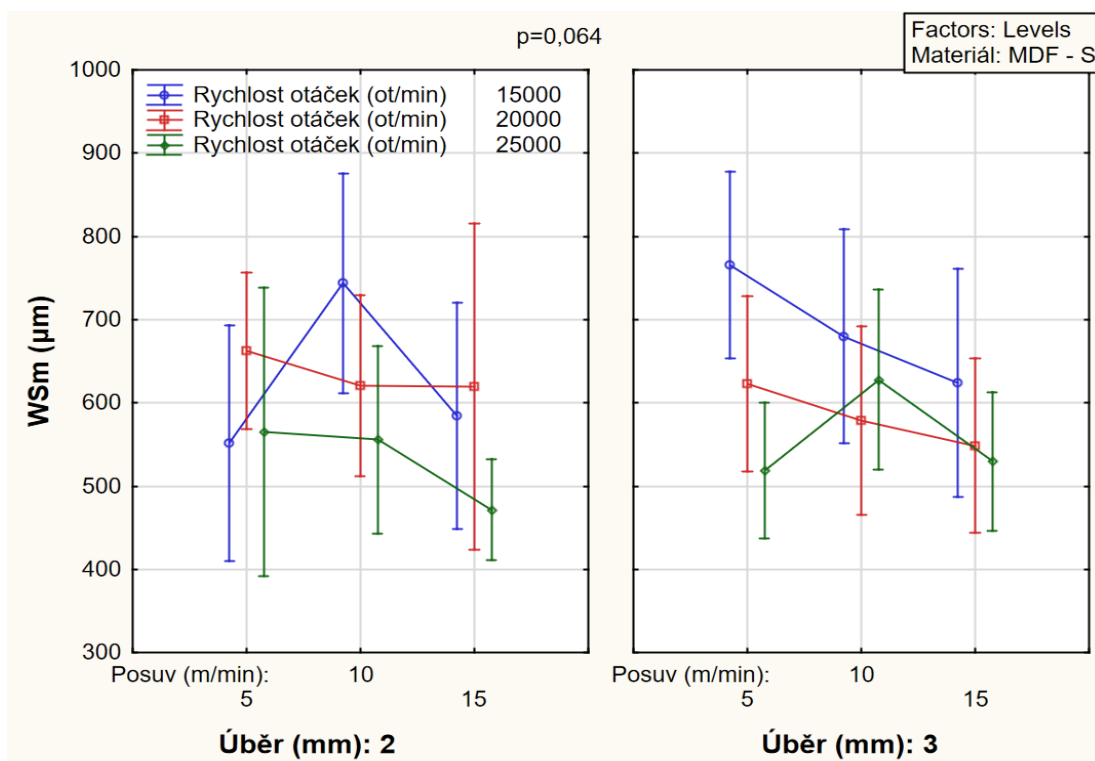
Graf 34: Vliv velikosti úběru na parametr vlnitosti WSm

Hodnoty WSm v závislosti na kombinaci frézovacích parametrů u MDF desky Frézovací jsou znázorněny na grafu 35. Jeho interval je v rozsahu od 523,6 μm do 523,6 μm . U úběru 2 mm je jasně patrná tendence poklesu hodnot WSm v závislosti na rychlosti posunu, které při úběru 3 mm není patrný.



Graf 35: Vliv vybraných parametrů na parametr vlnitosti WSm u MDF desky Frézovací

Hodnoty WSm naměřené pro MDF desku Standard jsou znázorněné na grafu 36. Naměřené hodnoty průměrné šířky profilu vlnitosti vyobrazené v intervalu od 471,65 μm do 765,57 μm . Nejvyšší naměřené hodnoty jsou naměřeny při nejnižších otáčkách 15 000 ot/min, nejmenším použité rychlosti posunu 5 m/min a úběru 3 mm. Naopak nejnižší naměřená hodnota WSm je při otáčkách 25 000 ot/min, rychlosti posunu 15 m/min a úběru 2 mm.



Graf 36: Vliv vybraných parametrů na parametr vlnitosti WSm u MDF desky Standard

Vyhodnocení vlivu faktorů na parametr vlnitost WSm pomocí Duncanova testu je udáno v tab. 12, kde červeně uvedené hodnoty udávají statisticky významný rozdíl mezi příslušnými průměrnými hodnotami vlnitost WSm.

Statistická významnost hodnot byla pouze prokázána mezi změnou otáček z 15 000 ot/min na 25 000 ot/min a zpět. U dalších parametrů se nepodařilo prokázat statistickou významnost naměřených hodnot. Kombinace všech zkoumaných parametrů zpracovaných pomocí Duncanova testu jsou uvedeny v příloze č. 8.

Tab. 12: Duncanov test znázorňující vliv jednotlivých parametrů na faktor vlnitosti WSm

	Materiál	1	2
1	MDF - S		0,038
2	MDF - F	0,038	

	Otáčky (ot/min)	1	2	3
1	15000		0,874	0,072
2	20000	0,874		0,082
3	25000	0,072	0,082	

	Posuv (m/min)	1	2	3
1	5		0,534	0,247
2	10	0,534		0,092
3	15	0,247	0,092	

	Úběr (mm)	1	2
1	2		0,376
2	3	0,376	

11.2 Výsledky pro frézu VYDONE

Jednotlivé parametry drsnosti a vlnitosti vzorků vyrobené touto frézou byly měřeny po odfrézování určité vzdálenosti, kterou nástroj urazil v procesu frézování. Průměrné naměřené hodnoty drsnosti a vlnitosti jsou uvedeny v Tab. 13 a jejich směrodatné odchylky v Tab. 14.

Tab. 1: Průměrné hodnoty drsnosti a vlnitost

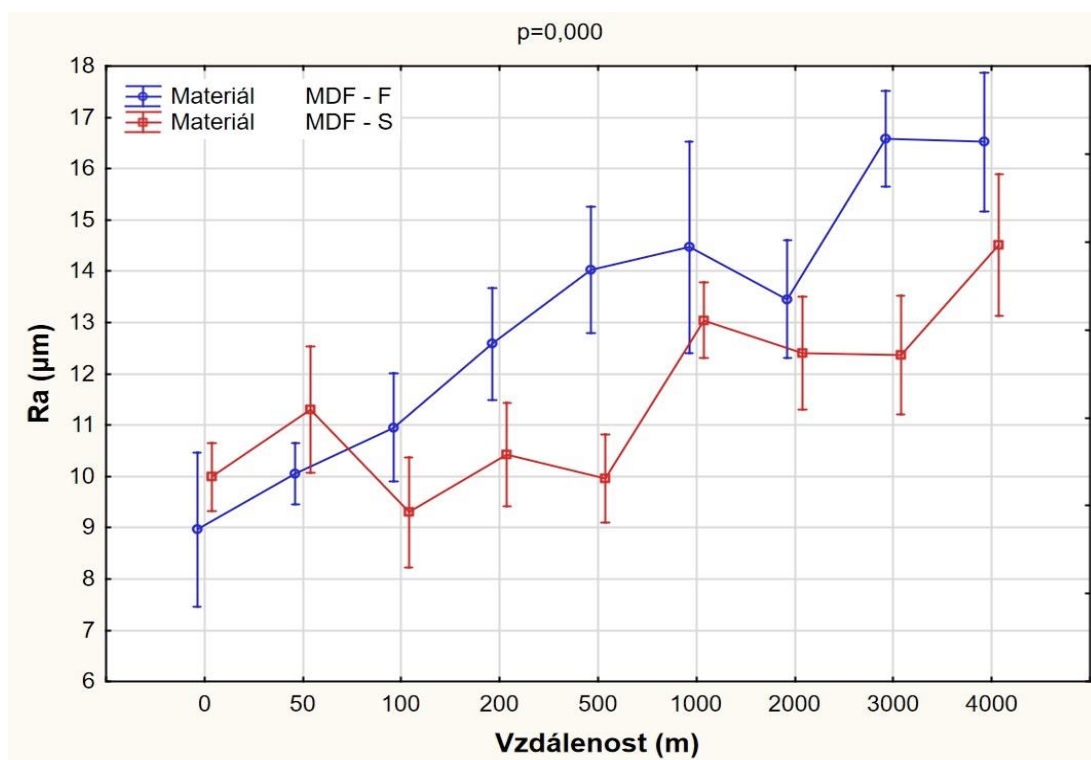
Materiál	Vzdálenost (m)	Ra (μm)	Rz (μm)	RSm (μm)	Wa (μm)	Wz (μm)	WSm (μm)
MDF - F	0	8,96	62,36	494,76	6,07	14,55	663,68
MDF - F	50	10,05	73,59	512,57	7,26	15,91	520,50
MDF - F	100	10,96	75,69	536,96	6,43	13,42	492,84
MDF - F	200	12,59	89,02	572,07	9,39	22,34	509,47
MDF - F	500	14,03	92,49	516,98	10,27	23,19	653,00
MDF - F	1000	14,47	97,74	660,35	9,83	20,04	714,77
MDF - F	2000	13,46	91,49	482,49	12,42	21,92	596,61
MDF - F	3000	16,58	102,75	550,80	12,61	27,13	655,96
MDF - F	4000	16,52	103,94	543,70	15,66	25,66	810,26
MDF - S	0	9,99	73,31	492,88	7,64	16,03	535,23
MDF - S	50	11,30	77,52	492,88	7,77	18,00	702,61
MDF - S	100	9,30	67,16	462,57	7,32	13,95	555,15
MDF - S	200	10,43	77,84	542,00	7,96	17,83	685,11
MDF - S	500	9,96	74,36	528,35	6,99	16,51	689,27
MDF - S	1000	13,05	88,12	522,15	10,84	23,69	739,44
MDF - S	2000	12,40	87,11	584,10	8,79	20,22	784,88
MDF - S	3000	12,37	81,63	585,45	9,13	20,23	669,08
MDF - S	4000	14,51	96,64	548,33	9,72	20,87	716,94

Tab. 3: Směrodatná odchylka hodnot drsnosti a vlnitost

Materiál	Vzdálenost (m)	Ra (μm)	Rz (μm)	RSm (μm)	Wa (μm)	Wz (μm)	WSm (μm)
MDF - F	0	2,0	14,7	112,7	1,6	4,2	262,6
MDF - F	50	0,8	5,7	58,5	1,1	2,0	161,3
MDF - F	100	1,4	6,2	102,6	2,8	4,3	201,2
MDF - F	200	1,4	10,7	90,4	3,5	7,8	173,6
MDF - F	500	1,6	11,9	51,0	4,0	5,3	202,8
MDF - F	1000	2,7	19,9	153,4	2,6	6,8	119,1
MDF - F	2000	1,5	12,9	62,8	3,0	5,5	121,2
MDF - F	3000	1,2	10,3	76,8	3,4	10,1	259,1
MDF - F	4000	1,8	6,9	73,3	2,2	8,6	200,5
MDF - S	0	0,87	8,81	81,13	4,32	6,36	90,85
MDF - S	50	1,62	10,56	138,77	2,86	6,11	210,61
MDF - S	100	1,42	11,02	69,71	2,71	4,72	168,78
MDF - S	200	1,33	7,79	124,83	1,38	4,03	199,24
MDF - S	500	1,14	8,20	130,84	2,51	6,15	168,21
MDF - S	1000	0,98	9,46	51,50	2,88	6,88	159,37
MDF - S	2000	1,47	14,13	156,58	1,40	3,54	170,15
MDF - S	3000	1,54	8,75	89,00	2,67	5,27	270,52
MDF - S	4000	1,84	11,21	101,35	2,35	5,56	184,04

11.2.1 Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti „Ra“ v závislosti na odfrézované vzdálenosti

Z grafu 37 je patrná závislost průměrné aritmetické odchylky profilu drsnosti na vzdálenosti, kterou nástroj urazí v procesu frézování. Nejnížší hodnoty Ra jsou naměřené ve vzdálenosti 0 m tedy první obrobena plocha naostřeným nástrojem. Naopak nejvyšší hodnota je naměřena u vzdálenosti 4000 m, jedná se tedy o průběžný růst těchto hodnot. Dále je zde také patrný rozdíl mezi oběma materiály, kdy deska s nižší hustotou (Standard) má nejvyšší hodnoty Ra (při vzdálenosti 4000 m) o 12,17 % nižší než u desky Frézovací.

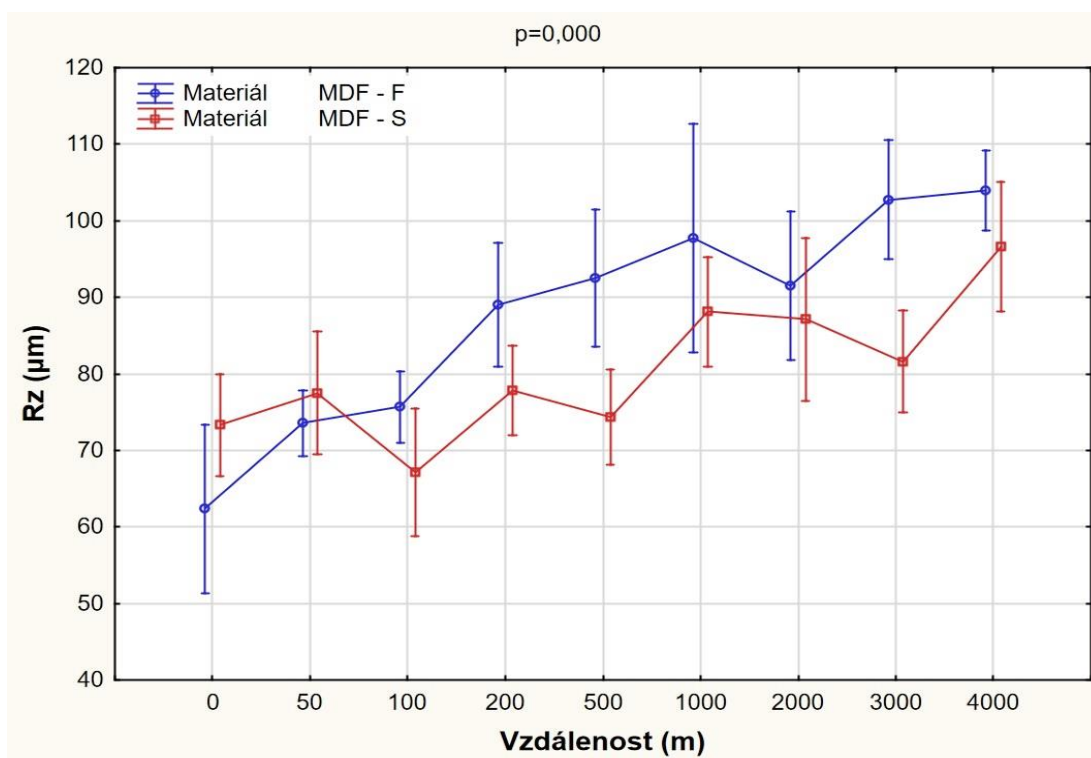


Graf 37: Vliv odfrézované vzdálenosti na parametr drsnosti Ra

Během celého procesu nejspíše dochází k postupnému otupování nástroje (změně tvaru řezného klínu), které je závislé právě na množství odfrézovaného materiálu. Tedy čím více odebere nástroj materiálu se úměrně k tomu i otupuje a tím právě dochází k znesnadňování vnikání nástroje do materiálu a tím postupnému zhoršování drsnosti povrchu. Další interpretace výsledků této závislosti je vyhodnocena pomocí Duncenova testu v příloze č. 9.

11.2.2 Nejvyšší výška profilu drsnosti „Rz“ v závislosti na odfrézované vzdálenosti

Vlivem posuvné vzdálenosti na drsnost povrchu Rz se zabírá graf 38. Stejně tak jako u grafu předešlého je vidět postupný růst hodnot, ale v tomto případě nejvyšších hodnot profilu drsnosti mezi vzdáleností 0 m a 4000 m a též je i viditelný určitý rozdíl mezi oběma materiály. Nejvyšší hodnot Rz u obou desek bylo dosaženo při největší vzdálenosti, ale právě díky rozdílným hustotám je patrné, že deska Standard dosáhla při této vzdálenosti o 7,02 % nižších hodnot než deska Frézovací.

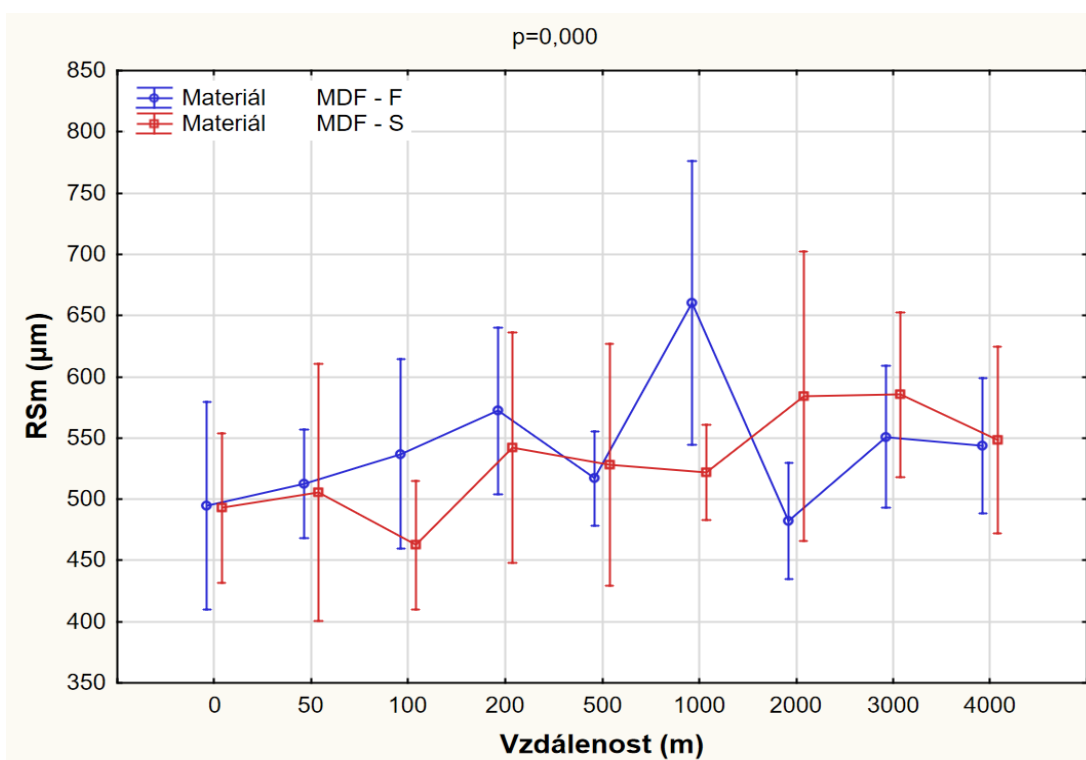


Graf 38: Vliv odfrézované vzdálenosti na parametr drsnosti Rz

Postupné zvyšování hodnot nejvyšší výšky profilu drsnosti Rz má zřejmě stejný důvod jako parametr Ra, tedy postupné otupování nástroje. Domnívám se, že během celého procesu dochází k většímu a většímu zaoblení řezné části. Od určitého zaoblení může docházet ke znesnadnění vníkaní řezné části do materiálu, a tak se zvyšuje i jeho odpor proti odřezávání, a proto se parametr drsnosti Rz postupně zhoršuje. Tato závislost je znázorněna pomocí Duncenova testu v příloze č.10.

11.2.3 Průměrná šířka prvků drsnosti „RSm“ v závislosti na odfrézované vzdálenosti

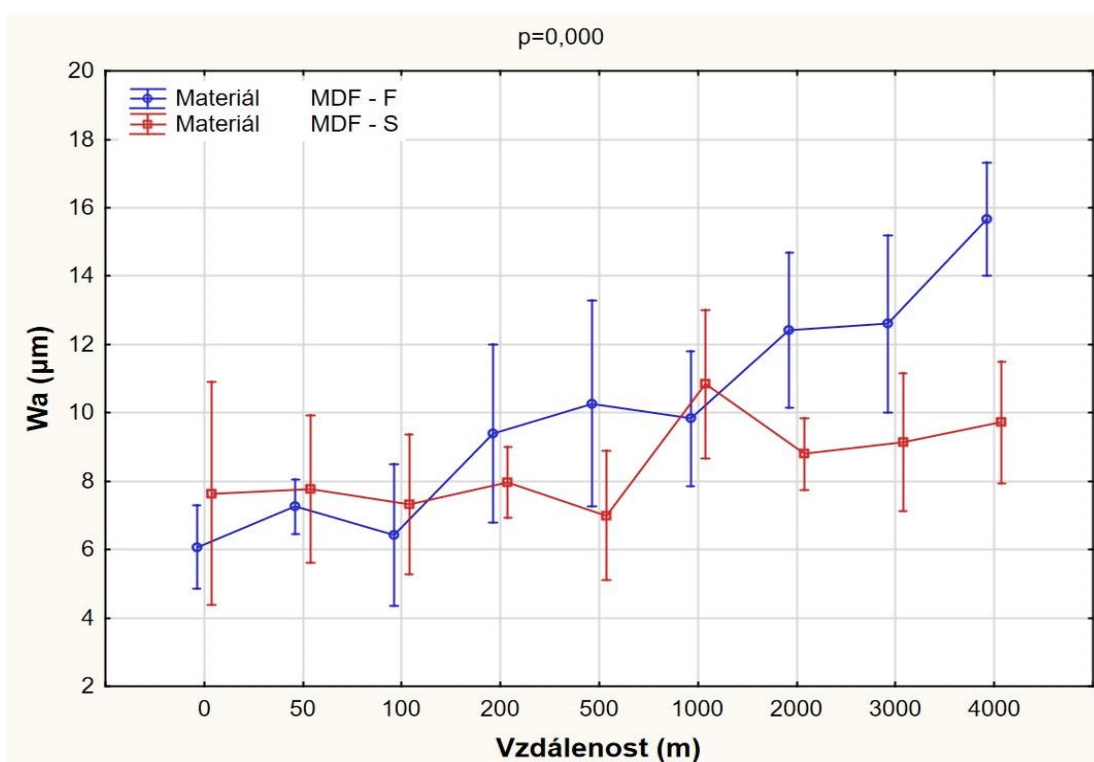
Odfrézovaná vzdálenost má i vliv na průměrnou šířku prvku drsnosti (viz graf 39). Parametr drsnosti RSm v závislosti na vzdálenosti roste mnohem pomaleji v porovnání s předešlými grafy pro parametr Ra a Rz. Nejvyšší hodnota byla naměřena při vzdálenosti 1000 m což mohla způsobit mikroskopická vada na vzorku v místě měření. Odlišný průběh grafu lišící se s parametry Ra a Rz je způsoben samotnou měřenou veličinou. Hodnoty zpracované pomocí Duncenova testu jsou znázorněny v příloze č. 11.



Graf 39: Vliv odfrézované vzdálenosti na parametr drsnosti RSm

11.2.4 Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti „Wa“ v zvilosti na odfrézované vzdálenosti

Postupný růst hodnot vlnitost parametru Wa je vyobrazen na grafu 40. Stejně jako u předešlých hodnot drsnosti je zde u vlnitosti viditelný postupný růst od vzdálenosti 0, kde jsou naměřené průměrné aritmetické úchylky profilu vlnitost nejnižší, až po vzdálenost 4000 m, kde jsou naopak hodnoty nejvyšší. Z toto grafu je i viditelný rozdíl mezi oběma materiály, přičemž ale u obou materiálů mají tendenci hodnoty Wa postupně růst. Nejvyšší hodnota u MDF-S je o 37,74 % nižší než nejvyšší hodnota MDF-F.

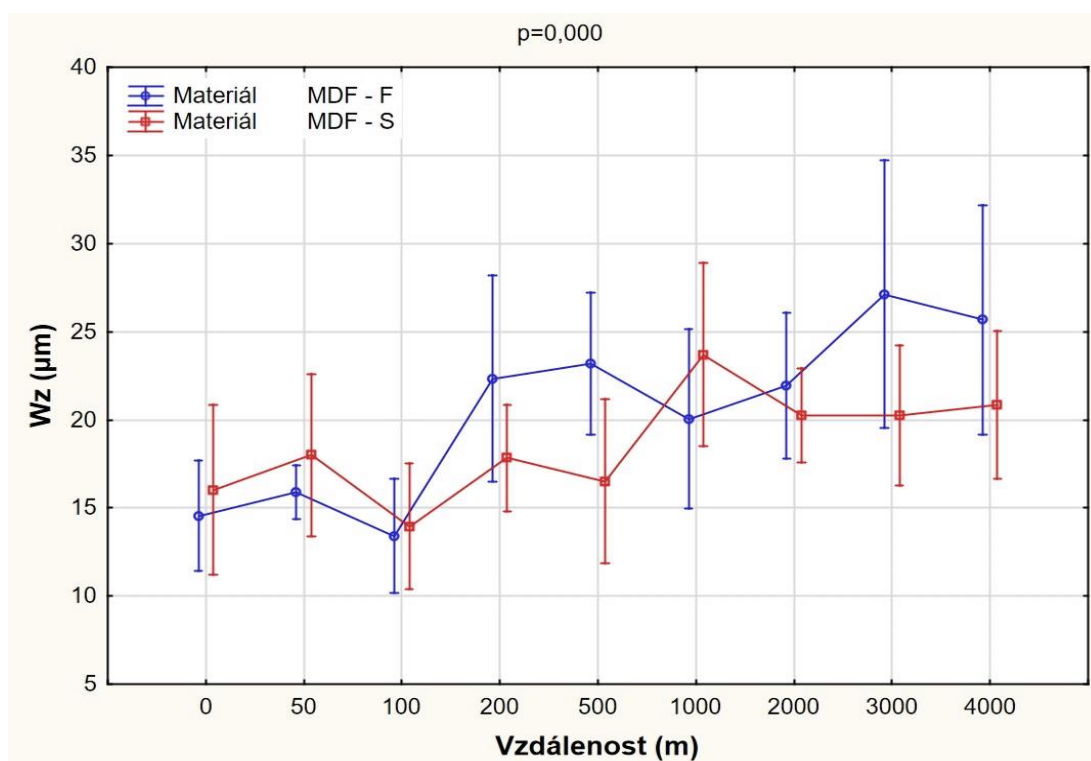


Graf 40: Vliv odfrézované vzdálenosti na parametr vlnitosti Wa

Domnívám se že i na parametr vlnitosti Wa má určitý vliv právě otupování nástroje, kdy během celého procesu dochází k postupnému otupení nástroje, a tedy i ke změně velikosti obvodu frézy. Dále pak otupování ztěžuje vnikání ostří do materiálu, což může způsobit určité chvění nástroje. Oba tyto důvody přispívají ke zhoršení průměrných aritmetických úchylek profilu vlnitosti Wa. V příloze č. 12 jsou tyto hodnoty zpracovány pomocí Duncenova testu.

11.2.5 Nejvyšší výška profilu vlnitosti „Wz“ v závislosti na odfrézované vzdálenosti

Graf 41 znázorňuje, že čím více je zvýšena vzdálenost, kterou urazí nástroj v procesu frézování, tím se zvyšují i hodnoty parametru vlnitosti. U obou MDF desek je patrný postupný nárůst hodnot Wz v závislosti na odfrézované vzdálenosti. Nejvyšší hodnoty Wz u obou materiálů jsou naměřeny při vzdálenosti 4000 m. Tato hodnota je u MDF-S o 18,67 % nižší než u MDF-F.

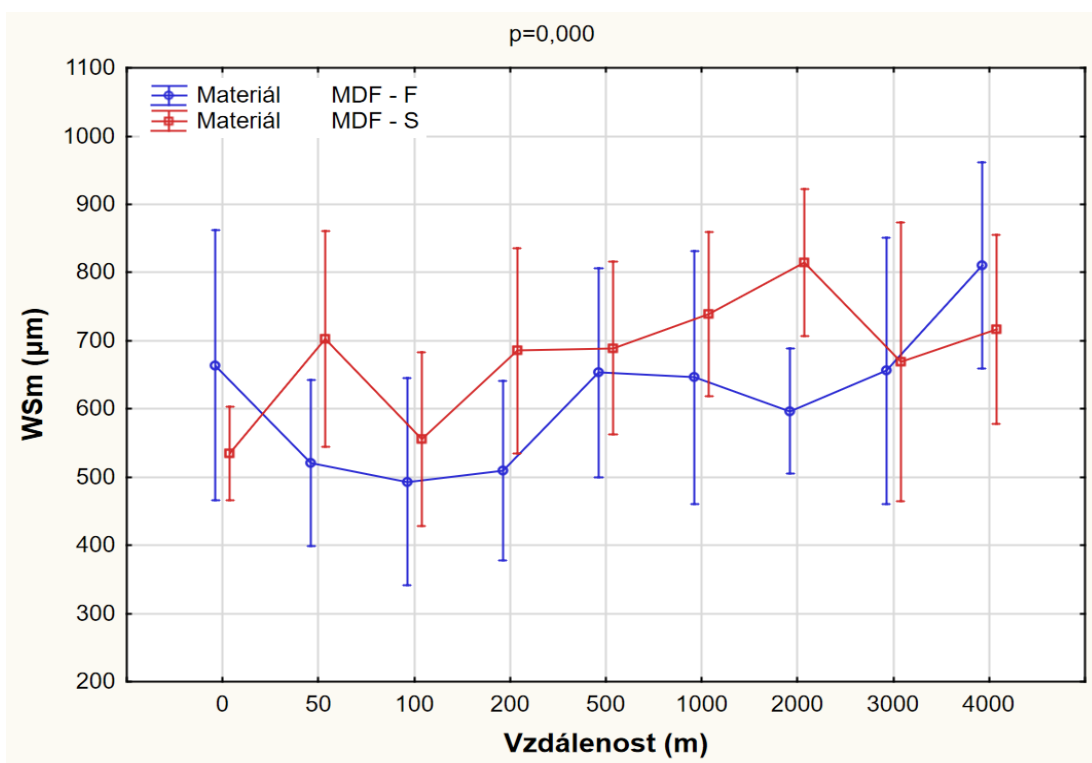


Graf 41: Vliv odfrézované vzdálenosti na parametr vlnitosti Wz

Parametr vlnitosti Wz v závislosti na vzdálenosti, kterou nástroj urazí ve frézovacím procesu, má podobný průběh jako parametry Wa. Důvody způsobující zvyšování těchto hodnot jsou také stejné tedy změna tvaru frézy a způsobené chvění nástroje. Duncenův test zpracovávající tyto hodnoty je uveden v příloze č. 13.

11.2.6 Průměrná šířka prvků vlnitosti „WSm“ v zvilosti na odfrézované vzdálenosti

I průměrnou šířku prvku vlnitosti WSm ovlivňuje délka odfrézovaného materiálu což znázorňuje graf 42. stejně jako u parametru RSm je nárůst hodnot velmi pozvolný. Vyhodnocení hodnot neukazuje jasnou tendenci.



Graf 42: Vliv odfrézované vzdálenosti na parametr vlnitosti WSm

12 DISKUSE

Již v minulosti se řada výzkumníků zabývala kvalitou obrobené plochy po procesu frézování různých materiálů od masivního dřeva po materiály na jeho bázi (MDF, ...) např. Rousek, et al. (2014); Kminiak a Banski, (2017); Kaplan, (2015) a mnoho dalších.

Právě materiál byl důležitým parametrem pro porovnání této práce s dalšími. Technickými parametry a materiálem se tomuto experimentu nejvíce blíží práce Pinkowski et al, (2011). Tato práce se věnují kvalitě povrchu MDF desky vznikající při procesu frézování.

1. Při změnách parametrů frézování byla v této práci dokázána závislost na měřených parametrech drsnosti. Největší vliv na drsnost má materiál a jeho hustota, kdy podobnému závěru se dopracoval i Laina et al. (2017) a Sedlecký (2017). Na základě zjištěných výsledků lze konstatovat, že deska s vyšší hustotou MDF – F (Frézovací) má vyšší hodnoty parametrů drsnosti oproti MDF – S (Standard). Materiál o vyšší hustotě klade vyšší rezný odpor, což pravděpodobně ovlivňuje i kvalitu frézovaného materiálu. Navzdory názvu desky byly u MDF Frézovací naměřeny horší hodnoty. Tato deska je vyráběna přímo na přání zákazníka a pro její výrobu jsou využívány kratší vlákna v porovnání s MDF Standard, a tak při procesu frézování může docházet k jejich vytrhávání, což pravděpodobně ovlivnilo výslednou kvalitu povrchu po frézování. Právě délka vláken může ovlivnit tzv. chlupacení po aplikaci nátěru, a právě tento problém bude dále řešen v navazující práci ve spolupráci s DDL.

Dalším podstatným parametrem byla podávací rychlost, která také ovlivňuje parametry drsnosti, kdy s postupně stoupající podávací rychlostí se rovnoměrně zhoršuje drsnost povrchu. Což se shoduje i s prací Sütücü a Karagöz (2012). Při zvyšování rychlosti posuvu se zvyšuje množství materiálu posunutého na zub, což pravděpodobně způsobí zvýšení rezného odporu, a tedy i zhoršení frézovaného povrchu.

I další parametry jako otáčky a velikost úběru mají určitý vliv na konečnou drsnost povrchu, což je patrné z práce Kminiak et al., (2017). V této práci ale nebyla prokázána statistická významnost naměřených hodnot drsnosti pro tyto dva parametry.

2. Změny parametrů při frézování ovlivňují i kvalitu povrchu s ohledem na parametry vlnitosti.

Některé hodnoty ukazatelů, jako střední aritmetická odchylka profilu a největší výška profilu, s nárůstem podávací rychlosti stoupají, což znamená, že kvalita povrchu klesá (Sedlecký, 2017).

Dalším faktorem, který vlnitost ovlivňuje je materiál konkrétně jeho hustota, kdy MDF deska s vyšší hustotou má i vyšší hodnoty vlnitosti.

Z grafů v této práci je patrné, že i další použité parametry frézování mají určitý vliv na vlnitost povrchu, což potvrzuje i práce Sedlecký et al., (2018), ale v této práci se nepodařilo prokázat statistický význam naměřených hodnot po změnách rychlosti otáček a velikosti úběru.

3. I vzdálenost, kterou nástroj urazí ve frézovacím procesu ovlivňuje kvalitu povrchu především co se týče parametrů drsnosti. Při postupném zvyšování této vzdálenosti dochází i k růstu hodnot parametrů drsnosti, což znamená, že se kvalita obrobene plochy zhoršuje k čemuž i ve své práci dospěli Siklienka a Adamcová, (2012).

Dalším prvkem, který také ovlivňuje kvalitu je opět materiál (jeho hustota), kdy je patrný nárůst hodnot drsnosti u MDF desky s vyšší hustotou (MDF Frézovací).

13 PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI

Operace frézování je na tolik rozšířená, a proto si zaslouží zvýšenou pozornost. Samotný proces v závislosti na kvalitě opracovaného povrchu může být ovlivněn mnoha vlivy. Proto i v dnešní době najdou určité kombinace vlivů, které nejsou plně prozkoumány a je potřebné se jim věnovat

Přínos pro vědu

Přínosem pro vědu je především ucelený soubor výsledků z oblasti obrábění MDF desek. Na tento výzkum bude navázáno další částí zaměřující se na kvalitu povrchu po aplikaci nátěrových hmot.

Přínosem také může být poznatek o rozdílnosti dvou stejných materiálu (MDF), které se liší pouze hustotou a hustotním profilem.

Přínos pro praxi

Výsledky této práce budou využity v provozu Dřevozpracujícího družstva v Lukavci, konkrétně při jejich výrobě nábytkových dílců z MDF desek. Přičemž tato práce přináší poznatek o určitých parametrech frézování konkrétně o jejich vlivu na kvalitu povrchu. Tyto parametry může snadno ovlivnit obsluha jich nastavení, a proto je velmi důležité určit správné kombinace těchto parametrů. Nejdůležitějším poznatek je vliv rychlosti posuvu na kvalitu opracovaného povrchu. Tato rychlost by měla být co nejnižší, aby nedocházelo k rychlému přísunu materiálu, a tedy i k nedokonalosti jeho odfrézování. Bohužel takovéto snížení by v provozech s velkým objemem výroby výrazně prodloužilo čas na opracování jednoho dílce, proto je důležitá kombinace s maximálními otáčkami nástroje.

14 ZÁVĚR

Operace frézování je jedna z nejdůležitějších při obrábění dřeva a materiálů na jeho bázi. Na tento proces lze do určité míry použít velké množství strojů, ale pro tuto práci bylo využito CNC obráběcí centrum. Tyto stroje jsou v praxi požívány hlavně díky jejich rychlosti a přesnosti. Ale díky jejich vysoké ceně jsou využívány většinou tam kde je velký objem výroby hlavně výroba sériová. Právě kvůli tomu množství může jakákoliv chyba v tomto procesu ovlivnit celou sérii, proto je důležité se tomuto tématu věnovat.

Záměrem teoretické části mé práce bylo informovat a upozornit na určitou problematiku procesu frézování MDF desek, konkrétně se jednalo o výslednou kvalitu opracovaného povrchu. Hlavním cílem této práce bylo zjistit, jaký vliv mají určité parametry frézování, které lze snadno ovlivnit (hustota materiálu, otáčky, rychlost posuvu, úběr a množství odfrézovaného materiálu) na výslednou kvalitu obrobeneho povrchu.

V první části pokusu byla použita fréza se zuby osazenými polykrystalickým diamantem, kde docházelo při frézování obou druhů MDF ke změnám určitých parametrů (otáčky, rychlost posuvu, úběr) a ty právě ovlivnily určité parametry drsnosti a vlnitosti. Nejvíce proces frézování ovlivnila hustota materiálu, tedy konkrétně deska s vyšší hustotou mají vyšší hodnoty drsnosti a vlnitosti. Dalším faktorem byla rychlost posuvu, kdy při jejím zvyšování dochází k růstu hodnot drsnosti a vlnitosti. V této práci se bohužel nepodařilo prokázat statistickou významnost parametrů kvality na otáčky a velikost úběru.

Pro druhou část pokusu byla použita fréza s noži osazenými nepovlakovanými slinutými karbidy, kde sledovaným parametrem byla vzdálenost, kterou nástroj urazí v procesu frézování. V tomto případě byl výsledek celkem očekávaný a odpovídá i literatuře věnující se podobnému problému. Ze získaných výsledků je jasné, že čím více se zvyšuje vzdálenost, dochází k určitému otupení nástroje a tím ke zhoršení obrobeneho povrchu. Konkrétně ke zhoršení parametrů drsnosti a vlnitosti, které byly v této práci měřeny.

Souběžně s touto prací vznikali při stejných obráběcích parametrech vzorky pro navazující práci. Tyto vzorky konkrétně jejich opracované hrany budou povrchově upravené lakem. Na takto připravených vzorcích bude dále zkoumána kvalita povrchu. Cílem návazné práce je pomoci DDL s reklamacemi právě po povrchové úpravě.

15 ZDROJE

Literární zdroje

- 1) AFANASIEV, P., S., *Derevoobrabatyvajuščie mašiny*, Spravočnik, Gosudarstvenoe naučnotekničeskoe izdateljstvo, Moskva, 1962. 575 s.
- 2) BARCÍK, Š., KVIETKOVÁ, M., BOMBA, J., SIKLIENKA, M., *Dřevoobráběcí nástroje - údržba a provozování: vysokoškolská učebnice*. 1.vyd. Praha: Powerprint, 2013. 355 s. ISBN 978-80-87415-80-1.
- 3) BARCÍK, Š., *Technika pre výrobu nábytku*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. ISBN: 978-80-228-2055-4.
- 4) BÖHM, M.; REISNER, J., BOMBA, J., *Materiály na bázi dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. 2012. 183 s. ISBN 978-80-213-2251-6.
- 5) CSANÁDY, E.; MAGOSS, E.; *Mechanics of Wood Machining*; Springer 2013; s 202; ISBN 978-3642299544
- 6) CSANÁDY, E. et al.; *Quality of Machined Wood Surfaces*; Springer 2015; 978-3-319-22418-3
- 7) DAVIM, J. P. *Wood machining*. London: Wiley, 2011. ISBN 978-1-84821-315-9.
- 8) DAVIM, J. P. *Surface Integrity in Machining*. 1. vyd. London: Springer. 2010. 215 s. ISBN 978-1-84882-973-5.
- 9) DZURENDA, L a kol. *Vplyv techniky na kvalitu deleného a obrábaného dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. 140 s. ISBN 978-80-228-1923-7
- 10) ITAYA, S.; TSUCHIYA, A. Development of CrN coated tool to create smooth surface of solid wood aiming to mit sanding process in furniture production. *Proceeding of the 16th International Wood Machining Seminar, Matsue, Japan*. 2003. s. 74-81.
- 11) KADĚRA, V., *Materiály, učebnice pro odborná učiliště, obor truhlářské práce*, 1.vyd. Praha: PARTA, s.r.o, 2003. 80 s. ISBN 80-7320-041-4.
- 12) KAPLAN, L., *Vliv technologicko-technických a materiálových faktorů rovinného frézování termicky modifikovaného březového dřeva na kvalitu opracování povrchu*, Praha 2015. 105 s. Diplomová práce na České zemědělské univerzitě v Praze, fakultě lesnické a dřevařské.

- 13) KRÁL, P.; ŠRAJER, J. *CNC obráběcí centra*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2008. ISBN 978-80-7375-163-0.
- 14) KMINIAK, R., BANSKI, A. and CHAKHOV, D. K. *Influence of the thickness of removed layer on the quality of created surface during milling the MDF on CNC machining centers*. in *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen-2017*. 59, 2, pp. 137–146.
- 15) KMINIAK, R.; BANSKI, A., *Variability of surface quality of MDF boards at nesting milling on CNC machining centers*. in *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen-2017*. 59, 1, pp. 121–130.
- 16) KMINIAK, R., SIKLIENKA, M., and 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 xylogologiae Zvolen*, 58(2): 89–100, 2016 DOI: 10.17423/afx.2016.58.2.10
- 17) KVIETKOVÁ, M. *Obrábění dřeva*. 1. vyd. Praze: Česká zemědělská univerzita, Fakulta lesnická a dřevařská, 2015. 295 s. ISBN 978-80-213-2604-0.
- 18) 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.
- 19) LISIČAN, J. *Teória a technika spracovania dreva*. 2. vyd. Zvolen: MATCENTRUM. 1996. 626 s. ISBN 80-967315-6-4.
- 20) LISIČAN, J. *Obrábanie a delenie drevných materiálov*. Zvolen: Vysoká škola lesnícka a drevárska vo Zvolene, 1988. 412 s. Š 3730/1986-30
- 21) LISIČAN, J. *Základy obrábania a delenia drevných materiálov*, Zvolen: ES – VŠLD, 1984 s. 190-377
- 22) MAREK, J.; BLECHA, P. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.
- 23) PINKOWSKI, G., SZYMANSKIS, W., GILEWICZ, A. and WARCHOLINSKI, B. *Surface roughness aspects in machine cutting of medium density fibreboards (MDF) with modified cutters on a CNC woodworking machine*. *Annals of Warsaw University of Life Sciences–SGGW. Forestry and Wood Technology*. 2011;75:202–9.

- 24) PROKEŠ, S. *Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva*. 3. vyd. Praha: SNTL – nakladatelství technické literatury. 1982. 584 s. ISBN 04-833-82
- 25) ROUSEK, M., KOPECKÝ, Z., NOVÁK, V., a KOWALSKI, M., *Hodnocení kvality povrchu dřeva po frézování*, Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, 2012, s. 297 – 304, ISBN 978-80-228-2385-2
- 26) ROUSEK, M.; WILKOWSKI, J.; NOVÁK, V.; KRONTORÁD, K., *Vliv otupení nožů na drsnost povrchu dřeva při čelním frézování*, Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, 2014, s. 251 – 257, ISSN 1339-8350
- 27) 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.
- 28) ŘASA, J.; GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-337-1.
- 29) SEDLECKÝ, M. *Vliv druhu materiálu nástroje na kvalitu opracovaného povrchu při podélném frézování dřeva a materiálů na bázi dřeva*. Praha, 2017. 148 s. Diplomová práce na České zemědělské univerzitě v Praze, fakultě lesnické a dřevařské.
- 30) SEDLECKÝ, M., KVIETKOVÁ, S. M., KMINIAK, R., and KAPLAN, L. *Medium-density fiberboard and edge-glued panel after edge milling - surface waviness after machining with different parameters measured by contact and contactless method*, Wood Research 2018, 63(4), 683-698
- 31) SIKLIENKA, M.; KMINIAK, R. *Delenie a obrábanie dreva*. Technická univerzita vo Zvolene. 2013a. 207 s. ISBN 978-80-228-2618-1.
- 32) SIKLIENKA, M.; ADAMCOVÁ, E., *Viskum vplyvu materiálu reverzibilných nožov stopkových nástrojov na kvalitu opracovaného povrchu MDF*, Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, 2012, s. 315 – 323. ISBN 978-80-228-2385-2
- 33) SIKLIENKA, M.; ŠUSTEK, J. *Energetická náročnosť a kvalitatívne ukazovatele v procesoch pilenia bukového dreva*. Technická univerzita vo Zvolene. 2013b. 99 s. ISBN 978-80-228-2609-9.
- 34) SÜTCÜ, A. and KARAGÖZ, Ü. *Effect of machining parameters on surface quality after face milling of MDF*, Wood Research. 2012; 57, 231-240

- 35) ŠTULPA, M. *CNC obráběcí stroje a jejich programování*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-207-8.
- 36) TANASKOVIĆ, Ž. *Mašinski alat za obradu drveta*. Sarajevo: "Svjetlost,", 1968.
- 37) TIRYAKI, S.; HAMZAÇEBI, C.; MALKOÇOĞLU, A. Evaluation of process parameters for lower surface roughness in wood machining by using Taguchi design methodology. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2015, roč. 73, č. 4, s. 537–545. ISSN 0018-3768.
- 38) WIELOCH, G., Smoothing of profiles on surfaces of MDF Boards by friction method with the rotational Tools. *Drvna Industrija*. 2005, roč. 4, č. 5, s. 50-55. ISSN 0012-6772.

Internetové zdroje

- 1) Dráha ostří zubu při frézování [online] (12.3.2021). Dostupné: <https://www.google.cz/search?q=Dr%C3%A1ha+ost%C5%99%C3%AD+zubu+p%C5%99i+fr%C3%A9zov%C3%A1n%C3%AD&sxsrf=ALeKk00c6KUH5ha2B->
- 2) Schéma CNC [online] (11.2.2021). Dostupné: [https://www.google.cz/search?q=2\)%09Sch%C3%A9ma+CNC+&tbm=isch&ved=2ahUKEwi7mNSjwPvAhUO_hoKHaSIBrQQ2-cCegQIABAA&oq=2\)%09Sch%C3%A9ma+CNC+&gs_lcp](https://www.google.cz/search?q=2)%09Sch%C3%A9ma+CNC+&tbm=isch&ved=2ahUKEwi7mNSjwPvAhUO_hoKHaSIBrQQ2-cCegQIABAA&oq=2)%09Sch%C3%A9ma+CNC+&gs_lcp)
- 3) Schéma výroby MDF [online] (11.2.2021). Dostupné: <https://www.google.cz/search?q=sch%C3%A9ma+v%C3%BDroby+mdf&sxsrf=ALeKk01IamToSpCwOHPmwTGFfjg4Og5jdg:1618571529980&source=lnms&tb>
- 4) *MDF z DDL* [online] (17.3.2021). Dostupné: https://www.google.cz/search?q=DDL+MDF&tbm=isch&ved=2ahUKEwjOmb3plNjvAhUs5IUKHdJ7CikQ2-cCegQIABAA&oq=DDL+MDF&gs_lcp=CgNpbWcQAzoICAAQsQM

Využité normy

1. 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.
2. 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.
3. ČSN EN ISO 322. Dosky z dřeva: Zisťovanie vlhkosti. Praha: Český normalizační institut, 1994. 7 s.
4. ČSN EN ISO 323. Dosky z dřeva: Zisťovanie hustoty. Praha: Český normalizační institut, 1994. 7 s.

16 PŘÍLOHY

Seznam příloh

Příloha č. 1: Technický list DDL pro MDF Standard	107
Příloha č. 2: Technický list DDL na výrobu MDF Frézovací	108
Příloha č. 3 Duncenův test závislosti Ra na otáčkách, posuvu a úběru	109
Příloha č. 4: Duncenův test závislosti Rz na otáčkách, posuvu a úběru	110
Příloha č. 5: Duncenův test závislosti RSm na otáčkách, posuvu a úběru.....	111
Příloha č. 6: Duncenův test závislosti Wa na otáčkách, posuvu a úběru	112
Příloha č. 7: Duncenův test závislosti Wz na otáčkách, posuvu a úběru	113
Příloha č. 8: Duncenův test závislosti WSm na otáčkách, posuvu a úběru	114
Příloha č. 9: Duncenův test závislosti Ra na odfrézované vzdálenosti.....	115
Příloha č. 10: Duncenův test závislosti Rz na odfrézované vzdálenosti	116
Příloha č. 11: Duncenův test závislosti RSm na odfrézované vzdálenosti	117
Příloha č. 12: Duncenův test závislosti Wa na odfrézované vzdálenosti.....	118
Příloha č. 13: Duncenův test závislosti Wz na odfrézované vzdálenosti.....	119
Příloha č. 14: Duncenův test závislosti WSm na odfrézované vzdálenosti	120

Příloha č. 1: Technický list DDL pro MDF Standard



30. 10. 2019

Technický list – LUHOPOL MDF deska typ Standard Technical Data Sheet – LUHOPOL MDF Board type Standard

MDF desky jsou určeny pro použití pro nenosné účely v nábytkářství, truhlářství, frézářských dílnách a další použití v interiéru. Struktura desek umožňuje kvalitní zpracování povrchu frézováním a lakováním. Hladký povrch (upravený broušením), pevné hrany, homogenita a výborná obrábělnost patří ke skvělým vlastnostem tohoto výrobku. Ve všech parametrech vyhovují normám [EN 622-1](#) a [EN 622-5](#).

MDF boards are intended for use for non-structural purposes in furniture, joinery, milling workshops and other interior use. Structure of the board enables high-quality milling surface treatment and painting. Smooth surface (modified grinding), solid edge, homogeneity and excellent machinability are great features of this product. All parameters comply with the standards [EN 622-1](#) and [EN 622-5](#).

Základní formát Basic format: 2.800 x 1.840 mm

Skladový program v těchto tloušťkách *Stock program in these thicknesses:* 8, 10, 12, 15, 16, 18, 19, 22, 24, 25, 28, 30, 32, 36, 38 a 40 mm

Ostatní tloušťky do 4 týdnů při odběru minimálně 50 m³

Other thicknesses up to 4 weeks for the demand of at least 50 m³

Tloušťka Thickness	[mm]	> 9 - 12	> 12 - 19	> 19 - 30	> 30 - 40	Zkušební metoda Test method
Hustota Tolerance hustoty ±7 % Density Density tolerance	[kg/m ³]	770	750	720	650	ČSN EN 323
Bobtnání po 24 hod Thickness swelling 24 hrs	[%]	15	12	10	8	ČSN EN 317
Rozlupčivost Internal bond strength	[N/mm ²]	0,60	0,55	0,55	0,50	ČSN EN 319
Pevnost v ohybu Bending strength	[N/mm ²]	32	30	24	18	ČSN EN 310
Modul pružnosti v ohybu Modulus of elasticity in bending	[N/mm ²]	3200	3000	2400	2000	ČSN EN 310
Tolerance tloušťky Thickness tolerance	[mm]	±0,20		±0,30		ČSN EN 324-1
Rozměrové tolerance Size tolerance		±2,00 mm/m, max. 5 mm				ČSN EN 324-1
Tolerance pravouhlosti Squareness tolerance		2,0 mm/m				ČSN EN 324-2
Tolerance přímosti boků Edge straightness tolerance		1,5 mm/m				ČSN EN 324-2
Obsah písku, váhově Sand content, weight	[%]	≤ 0,03				ISO 3340
Absorpce povrchu Surface absorption	[mm]	> 150	---			ČSN EN 382-1
Vlhkost Moisture content	[%]	4 - 9				ČSN EN 322
Obsah formaldehydu Formaldehyde content		CARB (Phase 2), EPA TSCA Title VI - §770 IKEA (IOS-MAT-0003)				ČSN EN ISO 12460-5 ASTM E 1333/ASTM D 6007
		Perforátorová hodnota Perforator value	≤ 5 mg/100g			
Emise formaldehydu Formaldehyde emission		Třída E1 (EN 622-1) Class E1				ČSN EN ISO 12460-5 ČSN EN 717-1
		Perforátorová hodnota Perforator value	≤ 8 mg/100g			
Emise formaldehydu Formaldehyde emission		Třída E1 - LE (ChemVerbotsV) Class E1 - LE (ChemVerbotsV)				ČSN EN 717-1
		Emisní hodnota Emission value	≤ 0,05 ppm			
Standardní broušení Standard sanding		K150				---
Reakce na oheň dle ČSN EN 13 986 Reaction to fire according EN 13 986		D-s2,d0				---

Dřevozpracující družstvo, Lukavec čp. 9, CZ - 394 26, TEL.: +420 565 411 111, FAX: +420 565 445 251
E-mail: ddl@ddl.cz; Web: www.ddl.cz

Příloha č. 2: Technický list DDL na výrobu MDF Frézovací



14. 1. 2020

Technický list – LUHOPOL MDF deska typ Frézování Technical Data Sheet – LUHOPOL MDF Board type Milling

MDF desky jsou určeny pro použití pro nosné účely v nábytkářství, truhlářství, frézářských dílnách a další použití v interiéru. Díky zvláště jemným vláknům a optimalizovanému hustotnímu profilu je tato deska vhodná především pro 3-D čelní plochy nábytku jako jsou kuchyňská dvířka. Hladký povrch (upravený broušením), pevné hrany, homogenost a výborná obrábělnost patří ke skvělým vlastnostem tohoto výrobku. Ve všech parametrech vyhovují normám EN 622-1 a EN 622-5.

MDF boards are intended for use for non-structural purposes in furniture, joinery, milling workshops and other interior use. Due to its particularly fine fibers and optimized density profile, this board is particularly suitable for 3-D fronts of furniture such as kitchen doors. Smooth surface (modified by grinding), solid edges, homogeneity and excellent machinability are among the great features of this product. All parameters comply with the standards EN 622-1 and EN 622-5.

Základní formát Basic format: 2.800 x 1.840 mm

Skladový program v těchto tloušťkách Stock program in these thicknesses: 16, 18, 22, 36, 38 a 40 mm

Ostatní tloušťky do 4 týdnů při odběru minimálně 50 m³ Other thicknesses up to 4 weeks for the demand of at least 50 m³

Tloušťka Thickness	[mm]	> 12 - 19	> 19 - 30	> 30 - 40	Zkušební metoda Test method
Hustota Tolerance hustoty ±7 % Density Density tolerance	[kg/m ³]	790	740	680	ČSN EN 323
Bobtnání po 24 hod Thickness swelling 24 hrs	[%]	12	10	8	ČSN EN 317
Rozlupčivost Internal bond strength	[N/mm ²]	0,75	0,60	0,55	ČSN EN 319
Pevnost v ohybu Bending strength	[N/mm ²]	33	28	18	ČSN EN 310
Modul pružnosti v ohybu Modulus of elasticity in bending	[N/mm ²]	3500	2800	2200	ČSN EN 310
Tolerance tloušťky Thickness tolerance	[mm]	±0,20	±0,30		ČSN EN 324-1
Rozměrové tolerance Size tolerance		±2,00 mm/m, max. 5 mm			ČSN EN 324-1
Tolerance pravoúhlosti Squareness tolerance		2,0 mm/m			ČSN EN 324-2
Tolerance přímosti boků Edge straightness tolerance		1,5 mm/m			ČSN EN 324-2
Obsah písku, váhově Sand content, weight	[%]	≤ 0,03			ISO 3340
Absorpce povrchu Surface absorption	[mm]	> 150	---		ČSN EN 382-1
Vlhkost Moisture content	[%]	4 - 9			ČSN EN 322
Obsah formaldehydu Formaldehyde content		CARB (Phase 2), EPA TSCA Title VI - §770 IKEA (IOS-MAT-0003)			ČSN EN ISO 12460-5 ASTM E 1333/ASTM D 6007
		Perforátorová hodnota Perforator value	≤ 5 mg/100g		
Emise formaldehydu Formaldehyde emission		Emisní hodnota Emission value	≤ 0,11 ppm		ČSN EN ISO 12460-5 ČSN EN 717-1
		Třída E1 (EN 622-1) Class E1			
		Perforátorová hodnota Perforator value	≤ 8 mg/100g		
Emise formaldehydu Formaldehyde emission		Emisní hodnota Emission value	≤ 0,124 mg/m ³		ČSN EN 717-1
		Třída E1 - LE (ChemVerbotsV) Class E1 - LE (ChemVerbotsV)			
Emise formaldehydu Formaldehyde emission		Emisní hodnota Emission value	≤ 0,05 ppm		ČSN EN 717-1
Standardní broušení Standard sanding		K150			---
Reakce na oheň dle ČSN EN 13 986 Reaction to fire according EN 13 986		D-s2,d0			---

Dřevozpracující družstvo, Lukavec čp. 9, CZ - 394 26, TEL.: +420 565 411 111, FAX: +420 565 445 251
E-mail: ddl@ddl.cz; Web: www.ddl.cz

Příloha č. 3 Duncenův test závislosti Ra na otáčkách, posuvu a úběru

	Otáčky (ot/min)	Posuv (m/min)	Úběr (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	15000	5	2		0,841	0,071	0,003	0,002	0,000	0,660	0,488	0,058	0,060	0,000	0,000	0,178	0,021	0,002	0,430	0,000	0,000
2	15000	5	3	0,841		0,050	0,002	0,001	0,000	0,550	0,397	0,040	0,041	0,000	0,000	0,219	0,029	0,001	0,345	0,000	0,000
3	15000	10	2	0,071	0,050		0,255	0,190	0,025	0,151	0,230	0,894	0,891	0,026	0,031	0,002	0,000	0,195	0,254	0,015	0,000
4	15000	10	3	0,003	0,002	0,255		0,811	0,247	0,011	0,023	0,290	0,264	0,252	0,282	0,000	0,000	0,835	0,030	0,186	0,001
5	15000	15	2	0,002	0,001	0,190	0,811		0,326	0,006	0,014	0,223	0,215	0,326	0,347	0,000	0,000	0,962	0,019	0,255	0,002
6	15000	15	3	0,000	0,000	0,025	0,247	0,326		0,000	0,000	0,032	0,031	0,966	0,887	0,000	0,000	0,319	0,001	0,836	0,031
7	20000	5	2	0,660	0,550	0,151	0,011	0,006	0,000		0,761	0,129	0,134	0,000	0,000	0,088	0,007	0,007	0,681	0,000	0,000
8	20000	5	3	0,488	0,397	0,230	0,023	0,014	0,000	0,761		0,202	0,210	0,001	0,001	0,051	0,003	0,015	0,891	0,000	0,000
9	20000	10	2	0,058	0,040	0,894	0,290	0,223	0,032	0,129	0,202		0,988	0,033	0,040	0,001	0,000	0,227	0,247	0,000	0,000
10	20000	10	3	0,060	0,041	0,891	0,264	0,215	0,031	0,134	0,210	0,988		0,032	0,037	0,001	0,000	0,214	0,245	0,001	0,000
11	20000	15	2	0,000	0,000	0,026	0,252	0,326	0,966	0,000	0,001	0,033	0,032		0,912	0,000	0,000	0,324	0,001	0,816	0,033
12	20000	15	3	0,000	0,000	0,031	0,282	0,347	0,887	0,000	0,001	0,040	0,037	0,912		0,000	0,000	0,356	0,001	0,748	0,029
13	25000	5	2	0,178	0,219	0,002	0,000	0,000	0,000	0,088	0,051	0,001	0,001	0,000	0,000		0,287	0,000	0,041	0,000	0,000
14	25000	5	3	0,021	0,029	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,287		0,000	0,002	0,000	0,000
15	25000	10	2	0,002	0,001	0,195	0,835	0,962	0,319	0,007	0,015	0,227	0,214	0,324	0,356	0,000	0,000		0,020	0,247	0,000
16	25000	10	3	0,430	0,345	0,254	0,030	0,019	0,001	0,681	0,891	0,232	0,245	0,001	0,001	0,041	0,002	0,020		0,000	0,000
17	25000	15	2	0,000	0,000	0,015	0,186	0,255	0,836	0,000	0,000	0,020	0,020	0,816	0,748	0,000	0,000	0,247		0,000	0,039
18	25000	15	3	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,031	0,000	0,000	0,000	0,000	0,033	0,029	0,000	0,000	0,002	0,000	0,039	

Příloha č. 4: Duncenův test závislosti Rz na otáčkách, posuvu a úběru

	Otáčky (ot/min)	Posuv (mm/min)	Úběr (mm)	Rz																	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	15000	5	2		0,085	0,380	0,512	0,182	0,002	0,093	0,279	0,519	0,538	0,010	0,015	0,001	0,000	0,206	0,636	0,001	0,004
2	15000	5	3	0,085		0,011	0,021	0,002	0,000	0,914	0,006	0,023	0,000	0,000	0,000	0,087	0,073	0,003	0,184	0,000	0,000
3	15000	10	2	0,380	0,011		0,783	0,602	0,029	0,014	0,799	0,768	0,727	0,088	0,112	0,000	0,000	0,652	0,202	0,000	0,000
4	15000	10	3	0,512	0,021	0,783		0,455	0,016	0,025	0,621	0,967	0,914	0,053	0,070	0,000	0,000	0,497	0,291	0,000	0,000
5	15000	15	2	0,182	0,002	0,602	0,455		0,085	0,003	0,760	0,443	0,414	0,198	0,227	0,000	0,000	0,921	0,082	0,000	0,000
6	15000	15	3	0,002	0,000	0,029	0,016	0,085		0,000	0,050	0,015	0,013	0,599	0,517	0,000	0,000	0,075	0,004	0,003	0,000
7	20000	5	2	0,093	0,914	0,014	0,025	0,003	0,000		0,007	0,025	0,027	0,000	0,000	0,085	0,067	0,004	0,000	0,000	0,000
8	20000	5	3	0,279	0,006	0,799	0,621	0,760	0,050	0,007		0,610	0,575	0,133	0,164	0,000	0,000	0,819	0,138	0,000	0,000
9	20000	10	2	0,519	0,021	0,768	0,967	0,443	0,015	0,610	0,610		0,940	0,052	0,069	0,000	0,000	0,486	0,295	0,000	0,000
10	20000	10	3	0,538	0,023	0,727	0,914	0,414	0,013	0,575	0,575	0,940		0,046	0,062	0,000	0,000	0,456	0,307	0,009	0,009
11	20000	15	2	0,010	0,000	0,088	0,053	0,198	0,599	0,133	0,133	0,046	0,046		0,873	0,000	0,000	0,184	0,003	0,000	0,000
12	20000	15	3	0,015	0,000	0,112	0,070	0,227	0,517	0,000	0,164	0,052	0,062	0,873		0,000	0,000	0,219	0,004	0,000	0,000
13	25000	5	2	0,001	0,087	0,000	0,000	0,000	0,000	0,085	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,857	0,000	0,000	0,000	0,000
14	25000	5	3	0,000	0,073	0,000	0,000	0,000	0,000	0,067	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,857		0,000	0,000	0,000	0,000
15	25000	10	2	0,206	0,003	0,652	0,497	0,921	0,075	0,004	0,819	0,486	0,456	0,184	0,219	0,000	0,857		0,096	0,000	0,000
16	25000	10	3	0,636	0,184	0,202	0,291	0,082	0,000	0,192	0,138	0,295	0,307	0,003	0,004	0,003	0,000	0,857		0,059	0,000
17	25000	15	2	0,001	0,000	0,022	0,011	0,088	0,885	0,000	0,038	0,010	0,009	0,526	0,450	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
18	25000	15	3	0,004	0,000	0,049	0,027	0,125	0,805	0,000	0,078	0,026	0,023	0,751	0,657	0,000	0,000	0,000	0,113	0,001	0,715

Příloha č. 5: Duncenův test závislosti RSm na otáčkách, posuvu a úběru

	Otáčky (ot/min)	Posuv (m/min)	Úběr (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	15000	5	2		0,773	0,352	0,072	0,180	0,697	0,666	0,009	0,201	0,237	0,082	0,335	0,020	0,221	0,358	0,327	0,177	0,361
2	15000	5	3	0,773		0,485	0,119	0,268	0,527	0,862	0,005	0,296	0,343	0,134	0,465	0,038	0,322	0,493	0,454	0,264	0,497
3	15000	10	2	0,352	0,485		0,343	0,613	0,210	0,566	0,001	0,659	0,737	0,373	0,921	0,152	0,703	0,970	0,900	0,605	0,992
4	15000	10	3	0,072	0,119	0,343		0,614	0,032	0,156	0,000	0,573	0,509	0,936	0,379	0,555	0,536	0,352	0,389	0,612	0,344
5	15000	15	2	0,180	0,268	0,613	0,614		0,096	0,331	0,000	0,932	0,841	0,652	0,685	0,313	0,879	0,628	0,680	0,985	0,615
6	15000	15	3	0,697	0,527	0,210	0,032	0,096		0,445	0,021	0,109	0,132	0,038	0,198	0,007	0,122	0,096	0,193	0,094	0,216
7	20000	5	2	0,666	0,862	0,566	0,156	0,331	0,445		0,003	0,363	0,416	0,174	0,552	0,054	0,393	0,583	0,541	0,327	0,566
8	20000	5	3	0,009	0,005	0,001	0,000	0,000	0,021	0,003		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001
9	20000	10	2	0,201	0,296	0,659	0,573	0,932	0,109	0,363	0,000		0,886	0,611	0,713	0,288	0,937	0,674	0,728	0,922	0,661
10	20000	10	3	0,237	0,343	0,737	0,509	0,841	0,132	0,416	0,000	0,886		0,547	0,791	0,250	0,951	0,751	0,802	0,832	0,738
11	20000	15	2	0,082	0,134	0,373	0,936	0,652	0,038	0,174	0,000	0,611	0,547		0,411	0,532	0,574	0,383	0,421	0,642	0,374
12	20000	15	3	0,335	0,465	0,921	0,379	0,665	0,198	0,552	0,000	0,713	0,791	0,411		0,171	0,757	0,944	0,972	0,659	0,926
13	25000	5	2	0,020	0,038	0,152	0,555	0,313	0,007	0,054	0,000	0,288	0,250	0,532	0,171		0,266	0,156	0,176	0,307	0,152
14	25000	5	3	0,221	0,322	0,703	0,536	0,879	0,122	0,393	0,000	0,937	0,951	0,574	0,757	0,286		0,718	0,771	0,870	0,705
15	25000	10	2	0,358	0,493	0,970	0,352	0,628	0,214	0,583	0,001	0,674	0,751	0,383	0,944	0,156	0,718		0,922	0,621	0,976
16	25000	10	3	0,327	0,454	0,900	0,389	0,680	0,193	0,541	0,000	0,728	0,802	0,421	0,972	0,176	0,771	0,922		0,675	0,904
17	25000	15	2	0,177	0,264	0,605	0,612	0,985	0,094	0,327	0,000	0,922	0,832	0,642	0,659	0,307	0,870	0,621	0,675		0,608
18	25000	15	3	0,361	0,497	0,992	0,344	0,615	0,216	0,586	0,001	0,661	0,738	0,374	0,926	0,152	0,705	0,976	0,904	0,608	

Příloha č. 6: Duncenův test závislosti W_a na otáčkách, posuvu a úběru

	Otáčky (ot./min)	Posuv (m/min)	Úběr (mm)	1																															
				2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18															
1	15000	5	2		0,887	0,084	0,671	0,245	0,121	0,662	0,643	0,538	0,708	0,587	0,605	0,758	0,674	0,142	0,496	0,361	0,194	0,489	0,475	0,718	0,525	0,777	0,801		0,477	0,667	0,944	0,525	0,264		
2	15000	5	3	0,887		0,065	0,756	0,203	0,096	0,746	0,727	0,468	0,795	0,514	0,531	0,674	0,728	0,289	0,293	0,579	0,348	0,286	0,274	0,928	0,317	0,860	0,833	0,667		0,275	0,446	0,195	0,074		
3	15000	10	2	0,084	0,065		0,034	0,535	0,831	0,033	0,030	0,244	0,039	0,217	0,207	0,142	0,496	0,361	0,115	0,048	0,286	0,274	0,928	0,317	0,860	0,833	0,667		0,275	0,446	0,195	0,074			
4	15000	10	3	0,671	0,756	0,034		0,124	0,053	0,976	0,948	0,324	0,942	0,361	0,376	0,496	0,361	0,115	0,048	0,286	0,274	0,928	0,317	0,860	0,833	0,667		0,275	0,446	0,195	0,074				
5	15000	15	2	0,245	0,203	0,535	0,124		0,654	0,121	0,115	0,540	0,138	0,496	0,480	0,361	0,115	0,048	0,286	0,274	0,928	0,317	0,860	0,833	0,667		0,275	0,446	0,195	0,074					
6	15000	15	3	0,121	0,096	0,831	0,053	0,654		0,051	0,048	0,319	0,060	0,286	0,275	0,194	0,194	0,048	0,286	0,274	0,928	0,317	0,860	0,833	0,667		0,275	0,446	0,195	0,074					
7	20000	5	2	0,662	0,746	0,033	0,976	0,121	0,051		0,967	0,317	0,924	0,354	0,369	0,489	0,489	0,489	0,489	0,489	0,489	0,489	0,489	0,489	0,489	0,489	0,489	0,489	0,489	0,489	0,489	0,489	0,489	0,489	
8	20000	5	3	0,643	0,727	0,030	0,948	0,115	0,048	0,967		0,305	0,898	0,341	0,356	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	
9	20000	10	2	0,538	0,468	0,244	0,324	0,540	0,319	0,317	0,305		0,350	0,921	0,892	0,718	0,718	0,718	0,718	0,718	0,718	0,718	0,718	0,718	0,718	0,718	0,718	0,718	0,718	0,718	0,718	0,718	0,718	0,718	
10	20000	10	3	0,708	0,795	0,039	0,942	0,138	0,060	0,924	0,898	0,350		0,388	0,402	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	
11	20000	15	2	0,587	0,514	0,217	0,361	0,496	0,286	0,354	0,341	0,921	0,388		0,963	0,777	0,777	0,777	0,777	0,777	0,777	0,777	0,777	0,777	0,777	0,777	0,777	0,777	0,777	0,777	0,777	0,777	0,777	0,777	
12	20000	15	3	0,605	0,531	0,207	0,376	0,480	0,275	0,369	0,356	0,892	0,402	0,963		0,801	0,801	0,801	0,801	0,801	0,801	0,801	0,801	0,801	0,801	0,801	0,801	0,801	0,801	0,801	0,801	0,801	0,801	0,801	
13	25000	5	2	0,758	0,674	0,142	0,496	0,361	0,194	0,489	0,475	0,718	0,525	0,777	0,801		0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	
14	25000	5	3	0,644	0,728	0,031	0,944	0,115	0,048	0,964	0,994	0,305	0,896	0,342	0,358	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477
15	25000	10	2	0,495	0,428	0,269	0,293	0,579	0,348	0,286	0,274	0,928	0,317	0,860	0,833	0,667		0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	
16	25000	10	3	0,724	0,642	0,165	0,467	0,387	0,211	0,469	0,445	0,758	0,497	0,818	0,841	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	
17	25000	15	2	0,376	0,320	0,367	0,209	0,733	0,462	0,204	0,195	0,748	0,229	0,692	0,671	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	
18	25000	15	3	0,171	0,139	0,682	0,081	0,799	0,821	0,078	0,074	0,413	0,090	0,375	0,362	0,264	0,264	0,264	0,264	0,264	0,264	0,264	0,264	0,264	0,264	0,264	0,264	0,264	0,264	0,264	0,264	0,264	0,264	0,264	

Příloha č. 7: Duncenův test závislosti Wz na otáčkách, posuvu a úběru

	Otáčky (ot/min)	Posuv (m/min)	Úběr (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	15000	5	2		0,660	0,030	0,595	0,010	0,001	0,844	0,772	0,243	0,511	0,022	0,101	0,279	0,760	0,144	0,323	0,046	0,189
2	15000	5	3	0,660		0,079	0,904	0,032	0,004	0,784	0,856	0,432	0,794	0,060	0,212	0,488	0,282	0,542	0,110	0,351	
3	15000	10	2	0,030	0,079		0,096	0,674	0,254	0,046	0,057	0,305	0,124	0,877	0,074	0,459	0,323	0,229	0,847	0,377	
4	15000	10	3	0,595	0,904	0,096		0,041	0,005	0,711	0,779	0,485	0,873	0,074	0,273	0,639	0,365	0,601	0,131	0,463	
5	15000	15	2	0,010	0,032	0,674	0,041		0,415	0,017	0,022	0,166	0,056	0,768	0,354	0,665	0,273	0,595	0,293		
6	15000	15	3	0,001	0,004	0,254	0,005	0,415		0,001	0,002	0,334	0,097	0,299	0,102	0,829	0,086	0,595	0,293		
7	20000	5	2	0,844	0,784	0,046	0,711	0,017	0,001		0,909	0,312	0,618	0,034	0,139	0,639	0,192	0,405	0,067	0,247	
8	20000	5	3	0,772	0,856	0,057	0,779	0,022	0,002	0,909		0,354	0,681	0,042	0,164	0,581	0,223	0,453	0,081	0,283	
9	20000	10	2	0,243	0,432	0,305	0,485	0,166	0,035	0,312	0,354		0,566	0,253	0,600	0,156	0,729	0,822	0,380	0,852	
10	20000	10	3	0,511	0,794	0,124	0,873	0,056	0,008	0,618	0,681	0,566		0,097	0,300	0,365	0,387	0,688	0,166	0,471	
11	20000	15	2	0,022	0,060	0,877	0,074	0,768	0,299	0,034	0,042	0,253	0,097		0,492	0,220	0,392	0,186	0,746	0,318	
12	20000	15	3	0,101	0,212	0,568	0,247	0,354	0,102	0,139	0,164	0,600	0,300	0,492		0,543	0,058	0,829	0,481	0,675	
13	25000	5	2	0,279	0,482	0,268	0,538	0,142	0,028	0,353	0,398	0,910	0,622	0,220	0,543		0,183	0,665	0,339	0,780	
14	25000	5	3	0,760	0,488	0,015	0,434	0,004	0,000	0,639	0,581	0,156	0,365	0,010	0,058	0,183		0,086	0,216	0,023	
15	25000	10	2	0,144	0,282	0,459	0,323	0,273	0,071	0,192	0,223	0,729	0,387	0,392	0,829	0,665	0,086		0,595	0,293	
16	25000	10	3	0,323	0,542	0,229	0,601	0,117	0,022	0,405	0,453	0,822	0,688	0,186	0,481	0,898	0,216	0,595		0,293	
17	25000	15	2	0,046	0,110	0,847	0,131	0,565	0,200	0,067	0,081	0,380	0,166	0,746	0,675	0,339	0,023	0,554	0,293		0,463
18	25000	15	3	0,189	0,351	0,377	0,399	0,215	0,051	0,247	0,283	0,852	0,471	0,318	0,709	0,780	0,117	0,853	0,702	0,463	

Příloha č. 8: Duncenův test závislosti WSm na otáčkách, posuvu a úběru

	Otáčky (ot/min)	Posuv (mm/min)	Úběr (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	15000	5	2		0,253	0,127	0,763	0,637	0,729	0,184	0,786	0,037	0,605	0,734	0,289	0,652	0,968	0,971	0,570	0,348	0,797
2	15000	5	3	0,253		0,660	0,373	0,455	0,394	0,818	0,173	0,315	0,107	0,151	0,911	0,450	0,258	0,261	0,508	0,041	0,175
3	15000	10	2	0,127	0,660		0,204	0,262	0,219	0,809	0,080	0,519	0,045	0,068	0,602	0,258	0,131	0,132	0,301	0,041	0,081
4	15000	10	3	0,763	0,373	0,204		0,839	0,950	0,282	0,597	0,068	0,440	0,548	0,418	0,857	0,768	0,778	0,901	0,235	0,602
5	15000	15	2	0,637	0,455	0,262	0,839		0,877	0,353	0,490	0,094	0,349	0,443	0,500	0,973	0,653	0,745	0,302	0,782	0,434
6	15000	15	3	0,729	0,394	0,219	0,950	0,877		0,300	0,569	0,074	0,415	0,519	0,440	0,895	0,739	0,901	0,149	0,461	
7	20000	5	2	0,184	0,818	0,809	0,282	0,353	0,300		0,121	0,407	0,071	0,104	0,750	0,348	0,188	0,191	0,389	0,024	0,122
8	20000	5	3	0,786	0,173	0,080	0,597	0,490	0,569	0,121		0,020	0,772	0,918	0,201	0,502	0,780	0,775	0,432	0,471	0,995
9	20000	10	2	0,037	0,315	0,519	0,068	0,094	0,074	0,407	0,020		0,009	0,016	0,282	0,092	0,038	0,039	0,112	0,002	0,020
10	20000	10	3	0,605	0,107	0,045	0,440	0,349	0,415	0,071	0,772	0,009		0,830	0,127	0,360	0,594	0,592	0,302	0,615	0,766
11	20000	15	2	0,734	0,151	0,068	0,548	0,443	0,519	0,104	0,918	0,016	0,830		0,176	0,455	0,719	0,718	0,388	0,503	0,916
12	20000	15	3	0,289	0,911	0,602	0,418	0,500	0,440	0,750	0,201	0,282	0,127	0,176		0,499	0,294	0,298	0,550	0,050	0,203
13	25000	5	2	0,652	0,450	0,258	0,857	0,973	0,895	0,348	0,502	0,092	0,360	0,455	0,499		0,662	0,667	0,883	0,184	0,505
14	25000	5	3	0,968	0,258	0,131	0,768	0,650	0,739	0,188	0,780	0,038	0,594	0,719	0,294	0,662		0,995	0,583	0,343	0,782
15	25000	10	2	0,971	0,261	0,132	0,778	0,653	0,745	0,191	0,775	0,039	0,592	0,718	0,298	0,667	0,995		0,585	0,340	0,780
16	25000	10	3	0,570	0,508	0,301	0,760	0,901	0,796	0,399	0,432	0,112	0,302	0,388	0,550	0,883	0,583	0,585		0,149	0,434
17	25000	15	2	0,348	0,041	0,014	0,235	0,178	0,220	0,024	0,471	0,002	0,615	0,503	0,050	0,184	0,343	0,340	0,149		0,461
18	25000	15	3	0,797	0,175	0,081	0,602	0,492	0,572	0,122	0,995	0,020	0,766	0,916	0,203	0,505	0,782	0,780	0,434	0,461	

Příloha č. 9: Duncenův test závislosti Ra na odfrézované vzdálenosti

	Materiál	Vzdálenost (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	MDF - F	0		0,190	0,016	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,205	0,004	0,646	0,080	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000
2	MDF - F	50	0,190		0,247	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,930	0,121	0,355	0,607	0,906	0,000	0,000	0,003	0,003	0,000
3	MDF - F	100	0,016	0,247		0,045	0,000	0,000	0,002	0,000	0,233	0,636	0,046	0,472	0,232	0,010	0,070	0,067	0,067	0,000
4	MDF - F	200	0,000	0,002	0,045		0,071	0,000	0,264	0,000	0,001	0,110	0,000	0,000	0,001	0,527	0,801	0,781	0,781	0,000
5	MDF - F	500	0,000	0,000	0,000	0,071		0,547	0,436	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,208	0,076	0,045	0,045	0,045	0,000
6	MDF - F	1000	0,000	0,000	0,000	0,547	0,194		0,194	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,076	0,192	0,190	0,190	0,000
7	MDF - F	2000	0,000	0,000	0,002	0,264	0,436	0,194		0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,576	0,192	0,190	0,193
8	MDF - F	3000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,007	0,000	0,929	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006
9	MDF - F	4000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,007	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006
10	MDF - S	0	0,205	0,930	0,233	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000		0,111	0,111	0,378	0,575	0,968	0,000	0,003	0,003	0,000
11	MDF - S	50	0,004	0,121	0,636	0,110	0,001	0,000	0,008	0,000	0,111	0,111	0,015	0,015	0,263	0,111	0,031	0,157	0,145	0,000
12	MDF - S	100	0,646	0,355	0,046	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,378	0,015		0,173	0,367	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13	MDF - S	200	0,080	0,607	0,472	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,575	0,263	0,173		0,566	0,001	0,014	0,014	0,014	0,000
14	MDF - S	500	0,200	0,906	0,232	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,968	0,111	0,367	0,566		0,000	0,000	0,003	0,003	0,000
15	MDF - S	1000	0,000	0,000	0,010	0,527	0,208	0,076	0,576	0,000	0,000	0,031	0,000	0,001	0,000		0,409	0,404	0,404	0,074
16	MDF - S	2000	0,000	0,003	0,070	0,801	0,046	0,076	0,192	0,000	0,003	0,157	0,000	0,014	0,003	0,409		0,963	0,963	0,074
17	MDF - S	3000	0,000	0,003	0,067	0,781	0,045	0,076	0,190	0,000	0,003	0,145	0,000	0,014	0,003	0,404	0,074	0,963	0,963	0,074
18	MDF - S	4000	0,000	0,000	0,000	0,019	0,538	0,953	0,193	0,006	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,074	0,074	0,010	0,010	0,010

Příloha č. 10: Duncenův test závislosti Rz na odfrézované vzdálenosti

	Material	Vzdálenost (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	MDF - F	0		0,047	0,022	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,045	0,009	0,356	0,008	0,037	0,000	0,000	0,001	0,000
2	MDF - F	50	0,047		0,706	0,009	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000	0,958	0,499	0,245	0,477	0,882	0,014	0,022	0,182	0,000
3	MDF - F	100	0,022	0,706		0,024	0,004	0,000	0,007	0,000	0,000	0,683	0,725	0,147	0,700	0,798	0,034	0,049	0,304	0,000
4	MDF - F	200	0,000	0,009	0,024		0,533	0,138	0,634	0,018	0,011	0,009	0,051	0,000	0,054	0,013	0,862	0,732	0,198	0,184
5	MDF - F	500	0,000	0,001	0,004	0,533		0,344	0,848	0,071	0,048	0,001	0,011	0,000	0,012	0,002	0,451	0,366	0,067	0,424
6	MDF - F	1000	0,000	0,000	0,000	0,138	0,344		0,279	0,335	0,263	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,107	0,078	0,006	0,832
7	MDF - F	2000	0,000	0,002	0,007	0,634	0,848	0,279		0,052	0,034	0,002	0,018	0,000	0,019	0,003	0,545	0,450	0,091	0,354
8	MDF - F	3000	0,000	0,000	0,000	0,018	0,071	0,335	0,052		0,819	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,008	0,008	0,000	0,270
9	MDF - F	4000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,048	0,263	0,034	0,819		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,204
10	MDF - S	0	0,045	0,958	0,683	0,009	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000		0,482	0,236	0,458	0,851	0,013	0,021	0,174	0,000
11	MDF - S	50	0,009	0,499	0,725	0,051	0,011	0,000	0,018	0,000	0,000	0,482		0,081	0,951	0,571	0,068	0,092	0,460	0,001
12	MDF - S	100	0,356	0,245	0,147	0,000	0,000	0,000	0,018	0,000	0,000	0,482	0,081		0,076	0,210	0,000	0,000	0,015	0,000
13	MDF - S	200	0,008	0,477	0,700	0,054	0,012	0,001	0,019	0,000	0,000	0,458	0,081	0,076		0,550	0,070	0,000	0,465	0,001
14	MDF - S	500	0,037	0,882	0,798	0,013	0,002	0,000	0,003	0,000	0,000	0,851	0,571	0,210	0,550		0,020	0,029	0,219	0,000
15	MDF - S	1000	0,000	0,014	0,034	0,862	0,451	0,107	0,545	0,012	0,007	0,013	0,068	0,000	0,070	0,020		0,846	0,241	0,147
16	MDF - S	2000	0,000	0,022	0,049	0,732	0,366	0,078	0,450	0,008	0,004	0,021	0,092	0,000	0,092	0,029	0,846		0,292	0,110
17	MDF - S	3000	0,001	0,182	0,304	0,198	0,067	0,006	0,091	0,000	0,000	0,174	0,460	0,015	0,465	0,219	0,241	0,292		0,010
18	MDF - S	4000	0,000	0,000	0,000	0,184	0,424	0,832	0,354	0,270	0,204	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,147	0,110	0,010	

Příloha č. 11: Duncenův test závislosti RSm na odfrézované vzdálenosti

	Material	Vzdálenost (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	MDF - F	0		0,728	0,460	0,191	0,678	0,003	0,811	0,345	0,402	0,969	0,819	0,547	0,414	0,550	0,619	0,131	0,127	0,363
2	MDF - F	50	0,728		0,658	0,311	0,927	0,008	0,585	0,514	0,587	0,713	0,885	0,372	0,601	0,768	0,852	0,225	0,219	0,537
3	MDF - F	100	0,460	0,658		0,533	0,709	0,027	0,350	0,802	0,896	0,446	0,578	0,202	0,916	0,857	0,773	0,408	0,401	0,832
4	MDF - F	200	0,191	0,311	0,533		0,345	0,092	0,132	0,656	0,596	0,183	0,261	0,063	0,585	0,444	0,387	0,801	0,794	0,644
5	MDF - F	500	0,678	0,927	0,709	0,345		0,010	0,540	0,560	0,635	0,662	0,826	0,339	0,650	0,825	0,914	0,251	0,246	0,584
6	MDF - F	1000	0,003	0,008	0,027	0,092	0,010		0,001	0,039	0,033	0,003	0,006	0,000	0,032	0,018	0,013	0,133	0,117	0,038
7	MDF - F	2000	0,811	0,585	0,350	0,132	0,540	0,001		0,253	0,301	0,828	0,665	0,677	0,311	0,428	0,825	0,086	0,083	0,268
8	MDF - F	3000	0,345	0,514	0,802	0,656	0,560	0,039	0,253		0,890	0,332	0,445	0,138	0,870	0,691	0,617	0,488	0,488	0,959
9	MDF - F	4000	0,402	0,587	0,896	0,596	0,635	0,033	0,301	0,890		0,388	0,512	0,169	0,972	0,775	0,696	0,462	0,457	0,923
10	MDF - S	0	0,969	0,713	0,446	0,183	0,662	0,003	0,828	0,332	0,388		0,803	0,554	0,400	0,535	0,603	0,124	0,121	0,350
11	MDF - S	50	0,819	0,885	0,578	0,261	0,826	0,006	0,665	0,445	0,512	0,803		0,433	0,525	0,681	0,758	0,184	0,180	0,466
12	MDF - S	100	0,547	0,372	0,202	0,063	0,339	0,000	0,677	0,138	0,169	0,554	0,433		0,176	0,257	0,300	0,038	0,036	0,148
13	MDF - S	200	0,414	0,601	0,916	0,585	0,650	0,032	0,311	0,870	0,972	0,400	0,525	0,176		0,790	0,711	0,453	0,446	0,902
14	MDF - S	500	0,550	0,768	0,857	0,444	0,825	0,018	0,428	0,691	0,775	0,535	0,681	0,257	0,790		0,897	0,333	0,327	0,717
15	MDF - S	1000	0,619	0,852	0,773	0,387	0,914	0,013	0,488	0,617	0,696	0,603	0,758	0,300	0,711	0,897		0,286	0,280	0,642
16	MDF - S	2000	0,131	0,225	0,408	0,801	0,251	0,133	0,086	0,516	0,462	0,124	0,184	0,038	0,453	0,333	0,286		0,977	0,503
17	MDF - S	3000	0,127	0,219	0,401	0,794	0,246	0,117	0,083	0,517	0,457	0,121	0,180	0,036	0,446	0,327	0,280	0,977		0,500
18	MDF - S	4000	0,363	0,537	0,832	0,644	0,584	0,038	0,268	0,959	0,923	0,350	0,466	0,148	0,902	0,717	0,642	0,503	0,500	

Příloha č. 12: Duncenův test závislosti Wa na odfrézované vzdálenosti

Materiál	Vzdálenost (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	MDF - F	0	0,414	0,784	0,031	0,006	0,015	0,000	0,000	0,000	0,303	0,271	0,402	0,225	0,510	0,001	0,078	0,048	0,018
2	MDF - F	50	0,414	0,553	0,168	0,054	0,100	0,000	0,000	0,000	0,786	0,724	0,960	0,639	0,838	0,020	0,312	0,223	0,114
3	MDF - F	100	0,784	0,553	0,056	0,012	0,028	0,000	0,000	0,000	0,419	0,379	0,539	0,321	0,666	0,003	0,125	0,080	0,033
4	MDF - F	200	0,031	0,168	0,056	0,549	0,754	0,039	0,030	0,000	0,246	0,275	0,176	0,322	0,123	0,331	0,668	0,840	0,803
5	MDF - F	500	0,006	0,054	0,012	0,549	0,738	0,117	0,101	0,000	0,089	0,104	0,057	0,130	0,331	0,659	0,333	0,448	0,694
6	MDF - F	1000	0,015	0,100	0,028	0,754	0,738	0,068	0,056	0,000	0,156	0,178	0,106	0,216	0,070	0,469	0,488	0,631	0,930
7	MDF - F	2000	0,000	0,000	0,039	0,117	0,068	0,888	0,888	0,017	0,001	0,001	0,000	0,002	0,000	0,223	0,014	0,026	0,063
8	MDF - F	3000	0,000	0,000	0,030	0,101	0,056	0,888	0,019	0,019	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,202	0,011	0,020	0,050
9	MDF - F	4000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017	0,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	MDF - S	0	0,303	0,786	0,419	0,246	0,089	0,156	0,001	0,000	0,917	0,917	0,810	0,816	0,658	0,037	0,425	0,315	0,174
11	MDF - S	50	0,271	0,724	0,379	0,275	0,104	0,178	0,001	0,000	0,917	0,748	0,748	0,883	0,603	0,045	0,462	0,347	0,197
12	MDF - S	100	0,402	0,960	0,539	0,176	0,057	0,106	0,000	0,000	0,810	0,748	0,661	0,661	0,812	0,022	0,323	0,232	0,120
13	MDF - S	200	0,225	0,639	0,321	0,322	0,130	0,216	0,001	0,000	0,816	0,883	0,661	0,661	0,812	0,022	0,522	0,400	0,236
14	MDF - S	500	0,510	0,838	0,666	0,123	0,035	0,070	0,000	0,000	0,658	0,603	0,812	0,526	0,603	0,102	0,241	0,167	0,080
15	MDF - S	1000	0,001	0,020	0,003	0,331	0,659	0,469	0,223	0,202	0,037	0,045	0,022	0,058	0,012	0,182	0,182	0,260	0,439
16	MDF - S	2000	0,078	0,312	0,125	0,668	0,333	0,488	0,014	0,000	0,425	0,462	0,323	0,522	0,241	0,182	0,796	0,796	0,526
17	MDF - S	3000	0,048	0,223	0,080	0,840	0,448	0,631	0,026	0,020	0,315	0,347	0,232	0,400	0,167	0,260	0,796	0,796	0,526
18	MDF - S	4000	0,018	0,114	0,033	0,803	0,694	0,930	0,063	0,050	0,174	0,197	0,120	0,236	0,080	0,439	0,526	0,526	0,675

Příloha č. 13: Duncenův test závislosti Wz na odfrézované vzdálenosti

	Materiál	Vzdálenost (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	MDF - F	0		0,632	0,710	0,021	0,010	0,097	0,028	0,000	0,001	0,627	0,297	0,834	0,313	0,537	0,006	0,090	0,093	0,062
2	MDF - F	50	0,632		0,431	0,059	0,032	0,211	0,077	0,000	0,003	0,966	0,522	0,520	0,546	0,844	0,022	0,198	0,203	0,146
3	MDF - F	100	0,710	0,431		0,007	0,003	0,047	0,011	0,000	0,000	0,423	0,175	0,850	0,187	0,352	0,002	0,043	0,045	0,028
4	MDF - F	200	0,021	0,059	0,007		0,765	0,490	0,881	0,136	0,292	0,062	0,195	0,012	0,182	0,084	0,658	0,516	0,506	0,629
5	MDF - F	500	0,010	0,032	0,003	0,765		0,350	0,676	0,210	0,416	0,034	0,123	0,005	0,114	0,047	0,861	0,372	0,363	0,464
6	MDF - F	1000	0,097	0,211	0,047	0,490	0,350		0,565	0,034	0,096	0,215	0,474	0,067	0,467	0,263	0,285	0,948	0,950	0,794
7	MDF - F	2000	0,028	0,077	0,011	0,881	0,676	0,565		0,110	0,247	0,081	0,236	0,018	0,222	0,107	0,577	0,594	0,579	0,712
8	MDF - F	3000	0,000	0,000	0,000	0,136	0,210	0,034	0,110		0,506	0,001	0,005	0,000	0,005	0,001	0,256	0,038	0,036	0,056
9	MDF - F	4000	0,001	0,003	0,000	0,292	0,416	0,096	0,247	0,606		0,003	0,021	0,000	0,019	0,005	0,486	0,038	0,832	0,822
10	MDF - S	0	0,627	0,966	0,423	0,062	0,034	0,215	0,081	0,001	0,003		0,534	0,513	0,555	0,866	0,023	0,203	0,210	0,152
11	MDF - S	50	0,297	0,522	0,175	0,195	0,123	0,474	0,236	0,005	0,021	0,534		0,228	0,950	0,624	0,093	0,465	0,483	0,379
12	MDF - S	100	0,834	0,520	0,850	0,012	0,005	0,067	0,018	0,000	0,000	0,513	0,228		0,241	0,433	0,003	0,062	0,064	0,041
13	MDF - S	200	0,313	0,546	0,187	0,182	0,114	0,467	0,222	0,005	0,019	0,555	0,950	0,241		0,643	0,085	0,449	0,461	0,360
14	MDF - S	500	0,537	0,844	0,352	0,084	0,047	0,263	0,107	0,001	0,005	0,866	0,624	0,433	0,643		0,033	0,251	0,261	0,192
15	MDF - S	1000	0,006	0,022	0,002	0,658	0,861	0,285	0,577	0,256	0,486	0,023	0,093	0,003	0,085	0,033		0,304	0,297	0,387
16	MDF - S	2000	0,090	0,198	0,043	0,516	0,372	0,948	0,594	0,038	0,105	0,203	0,465	0,062	0,449	0,251	0,304		0,998	0,832
17	MDF - S	3000	0,093	0,203	0,045	0,506	0,363	0,950	0,579	0,036	0,101	0,210	0,483	0,064	0,461	0,261	0,297	0,998		0,822
18	MDF - S	4000	0,062	0,146	0,028	0,629	0,464	0,794	0,712	0,056	0,143	0,152	0,379	0,041	0,360	0,192	0,387	0,832	0,822	

Příloha č. 14: Duncenův test závislosti WSm na odfrézované vzdálenosti

	Materiál	Vzdálenost (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	MDF - F	0		0,195	0,126	0,166	0,914	0,869	0,528	0,933	0,184	0,240	0,715	0,315	0,829	0,805	0,493	0,175	0,953	0,625
2	MDF - F	50	0,195		0,780	0,905	0,217	0,231	0,461	0,214	0,008	0,873	0,107	0,727	0,142	0,135	0,052	0,007	0,183	0,083
3	MDF - F	100	0,126	0,780		0,857	0,145	0,157	0,337	0,142	0,003	0,682	0,064	0,558	0,088	0,083	0,028	0,003	0,117	0,048
4	MDF - F	200	0,166	0,905	0,857		0,187	0,201	0,411	0,006	0,166	0,294	0,088	0,659	0,119	0,112	0,042	0,005	0,155	0,067
5	MDF - F	500	0,914	0,217	0,145	0,187		0,944	0,569	0,161	0,166	0,262	0,654	0,341	0,764	0,740	0,445	0,152	0,877	0,569
6	MDF - F	1000	0,869	0,231	0,157	0,201	0,944		0,589	0,147	0,294	0,278	0,618	0,355	0,724	0,700	0,415	0,139	0,833	0,535
7	MDF - F	2000	0,528	0,461	0,337	0,411	0,569	0,589		0,056	0,535	0,347	0,654	0,422	0,407	0,209	0,052	0,505	0,289	0,289
8	MDF - F	3000	0,933	0,214	0,142	0,184	0,974	0,924	0,566	0,166	0,262	0,262	0,669	0,341	0,779	0,755	0,456	0,157	0,885	0,582
9	MDF - F	4000	0,184	0,008	0,003	0,006	0,161	0,147	0,056		0,012	0,012	0,294	0,021	0,245	0,251	0,443	0,860	0,195	0,345
10	MDF - S	0	0,240	0,873	0,682	0,795	0,284	0,278	0,535	0,012			0,138	0,829	0,179	0,170	0,070	0,226	0,108	0,108
11	MDF - S	50	0,715	0,107	0,064	0,088	0,654	0,618	0,347	0,294	0,138			0,190	0,860	0,885	0,710	0,288	0,226	0,108
12	MDF - S	100	0,315	0,727	0,558	0,659	0,341	0,355	0,664	0,341	0,021	0,829	0,190		0,241	0,231	0,103	0,019	0,299	0,152
13	MDF - S	200	0,829	0,142	0,088	0,119	0,764	0,724	0,422	0,245	0,245	0,179	0,860	0,241		0,964	0,610	0,235	0,882	0,759
14	MDF - S	500	0,805	0,135	0,083	0,112	0,740	0,700	0,407	0,251	0,251	0,170	0,885	0,231	0,964		0,628	0,243	0,839	0,780
15	MDF - S	1000	0,493	0,052	0,028	0,042	0,445	0,415	0,209	0,443	0,443	0,070	0,710	0,103	0,610	0,628		0,446	0,517	0,808
16	MDF - S	2000	0,175	0,007	0,003	0,005	0,152	0,139	0,052	0,157	0,960	0,011	0,288	0,019	0,235	0,243	0,446		0,186	0,341
17	MDF - S	3000	0,953	0,183	0,117	0,155	0,877	0,833	0,505	0,885	0,195	0,226	0,746	0,299	0,862	0,839	0,517	0,186		0,653
18	MDF - S	4000	0,625	0,083	0,048	0,067	0,569	0,535	0,289	0,582	0,345	0,108	0,877	0,152	0,759	0,780	0,808	0,341	0,653	