

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra základního zpracování dřeva

**VLIV DRUHU MATERIÁLU NÁSTROJE NA KVALITU
OPRACOVANÉHO POVRCHU PŘI PODÉLNÉM FRÉZOVÁNÍ
DŘEVA A MATERIÁLŮ NA BÁZI DŘEVA**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Autor: Ing. Miroslav Sedlecký

Školitel: doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Praha 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Vliv druhu materiálu nástroje na kvalitu opracovaného povrchu při podélném frézování dřeva a materiálů na bázi dřeva“ vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací a doporučení školitele.

Souhlasím se zveřejněním disertační práce dle zákona č. 111/1998 Sb. O vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 20. 7. 2017

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD. za odborné vedení při zpracování disertační práce.

Dále patří mé poděkování prof. RNDr. Marianu Babiakovi, CSc. dr.h.c. a Ing. Miroslavu Gašparíkovi, PhD. za odbornou pomoc v průběhu zpracování disertační práce.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, především své manželce za podporu a pomoc při studiu.

Abstrakt

Disertační práce je zaměřena na zjištění jakosti obráběného povrchu při bočním podélném frézování deskových materiálů. Jako zástupce materiálů byly vybrány smrková spárovková deska, surová MDF deska a jednostranně laminovaná MDF deska. Výběr zástupců z rostlého dřeva a ze dřeva dezintegrovaného byl zvolen kvůli porovnání poměrně velkého rozdílu mezi těmito materiály z hlediska homogenity. Dalšími srovnávanými faktory jsou parametry obrábění (řezná rychlost – 20, 30, 40, 60 m/s a podávací rychlost 4, 8, 11 m/min) a užití různých druhů materiálu nástrojů (HW1, HW2, HW1 CrTiN), mezi kterými je aplikován i nástroj s povlakem. Na základě zjištění závislosti těchto faktorů na jakost povrchu byla vyhodnocena vhodnost použití zkoumaných nástrojů pro jednotlivé materiály a byly stanoveny optimální parametry pro obrábění sledovaných typů materiálů. Jakost byla vyhodnocena pomocí průměrných aritmetických úchylek profilu drsnosti „Ra“ a vlnitosti „Wa“, které byly měřeny pomocí dvou nezávislých metod, a to bezkontaktní a kontaktní. Díky použití dvou metod se dá vyhodnotit, jestli jsou metody srovnatelné, případně která je vhodnější pro drsnost či vlnitost povrchu. Dalším přínosem disertační práce je zjištění energetické náročnosti obráběcího procesu, který řekne hodně o ekonomické stránce obrábění.

Klíčová slova

Podélné frézování, jakost povrchu, středně hustá vláknitá deska, smrková spárovková deska, nástrojové povlaky

Abstract

The thesis is focused on the determination of the quality of the machined surface by the edge longitudinal milling of the panel materials. Spruce edge-glued panel, raw MDF and one-side laminated MDF were selected as representative materials. The selection of representatives of solid wood and disintegrated wood was chosen to compare a large difference between these materials in terms of homogeneity. Other comparative factors were the machining parameters (cutting speed – 20, 30, 40, 60 m/s and feed rate 4, 8, 11 m/min) and a use of different types of tools material (HW1, HW2, HW1 CrTiN), among which a coated tool was used as well. Based on the determination of the dependence of these factors on the surface quality, the suitability of the use of the examined tools for the experimental materials was evaluated and optimal parameters for machining of the materials were determined. The quality is evaluated using mean arithmetic deviations of the roughness „Ra“ and the waviness „Wa“ profile, measured by two methods, namely contactless method and contact method. Considering using of two methods, it is possible to compare their results and to verify which one is more suitable for measuring roughness profile and waviness profile. Another contribution of the thesis is brought by a measurement of the power consumption of the machining process, which may tell us a lot about the economic aspect of machining.

Key Words

Longitudinal milling, surface quality, medium-density fiberboard, spruce edge-glued panel, tool coats

OBSAH

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK	8
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	10
1 ÚVOD	15
2 CÍLE PRÁCE.....	18
3 ROZBOR PROBLEMATIKY	19
3.1 Frézování	19
3.1.1 Kinematika frézovacího procesu.....	25
3.1.1.1 Výpočet řezné rychlosti	25
3.1.1.2 Výpočet posuvné rychlosti.....	26
3.1.1.3 Výpočet posuvu na zub.....	26
3.2 Nástroje pro obrábění	26
3.2.1 Úhlová geometrie břitu.....	27
3.2.2 Materiály pro výrobu nástrojů	28
3.2.3 Povlakování nástrojů	29
3.2.3.1 Technologie aplikace povlaků	30
3.2.3.2 Ekologické hledisko metody CVD a PVD	30
3.2.3.3 Mechanická úprava nástrojů před aplikací PVD a CVD povlaků	31
3.3 Frézovaný materiál.....	34
3.3.1 Materiály na bázi dřeva	36
3.3.1.1 Spárovka	37

3.3.1.2	Středně hustá vláknitá deska	39
3.4	Energetická náročnost procesu	41
3.4.1	Práce a řezný výkon	44
3.4.1.1	Výpočet práce	44
3.4.1.2	Výpočet práce na odebrání materiálu A_e z hlediska pohybu ...	45
3.4.1.3	Výpočet výkonu a příkonu.....	45
3.5	Měření jakosti povrchu.....	48
3.5.1	Definování průměrných aritmetických úchylek profilu drsnosti a vlnitosti	49
3.5.2	Faktory ovlivňující jakost povrchu	58
4	METODIKA.....	63
4.1	Použité materiály.....	65
4.2	Použité nástroje a frézovací hlava.....	65
4.2.1	Frézovací žiletkové nože	65
4.2.2	Frézovací hlava	68
4.3	Strojní vybavení	69
4.3.1	Frézka	69
4.3.2	Podávací zařízení	69
4.3.3	Formátovací kotoučová pila	70
4.4	Přístrojové vybavení.....	70
4.4.1	Měřicí přístroj METREL Power Q plus MI 2392.....	70
4.4.2	Kontaktní profilometr FORM TALYSURF 50 Intra	71
4.4.3	Laserový profilometr LEXT 3D OLS4100	72
4.5	Zjištění hustoty a vlhkosti.....	73
4.5.1	Zjištění hustoty.....	73
4.5.2	Zjištění vlhkosti	73
4.6	Příprava zkušebních vzorků.....	74

4.7	Metodika měření energetické náročnosti obráběcího procesu.....	74
4.8	Metodika měření průměrných aritmetických úchylek profilu drsnosti a vlnitosti	76
4.8.1	Nastavení kontaktního a bezkontaktního profilometru	76
4.9	Statistické zpracování dat	77
5	VÝSLEDKY A DISKUZE	79
5.1	Energetická náročnost	79
5.2	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti „Ra“ – kontaktní a bezkontaktní metoda.....	90
5.3	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti „Wa“ – kontaktní a bezkontaktní.....	108
6	ZÁVĚR.....	127
6.1	Celkové shrnutí	127
6.2	Přínos pro vědu	130
6.3	Přínos pro praxi.....	131
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	133

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

ANOVA	Analysis of variance (analýza rozptylu)
apod.	a podobně
atd.	a tak dále
Cca	circa (přibližně)
CNC	computer numeric control (číslicové řízení počítačem)
CVD	chemical vapour deposition (chemické povlakování)
DTD	dřevotřísková deska
et al.	Et alii (a kolektiv)
HM	hard metal (tvrdokov)
HSS	high speed steel (rychlořezná ocel)
HW	tvrdokov (podle Leitz Lexikon)
MDF	medium-density fibreboard (vláknitá deska se střední hustotou neboli středně tvrdá vláknitá deska)
MDF-L	medium-density fibreboard – laminated (polotvrdá dřevovláknitá deska - laminovaná)
např.	například
OSB	oriented strand board (deska z orientovaných třísek)
PVD	physical vapour deposition (fyzikální povlakování)
SP	spárovka
SSP	smrková spárovka
tj.	to je
VD	vláknitá deska

Chemické prvky

Al	hliník
C	uhlík
Cl	chlór
Cr	chrom
H	vodík
K	draslík
N	dusík
Na	sodík
O	kyslík
Si	křemík
Ti	titan
Zr	zirkonium

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1: Základní pojmy při frézování (Vaňák, 2007)	20
Obr. 2: Válcové frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a)	21
Obr. 3: Kuželové frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a)	22
Obr. 4: Čelní frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a)	22
Obr. 5: Čelní-kuželové frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a)	23
Obr. 6: Způsoby frézování z hlediska použití (Siklienka <i>et al.</i> , 2013)	24
Obr. 7: Technologické schéma válcového frézování (Siklienka <i>et al.</i> , 2013)	25
Obr. 8: Úhlová geometrie nástroje (Siklienka <i>et al.</i> , 2013).....	27
Obr. 9: Pracovní úhlová geometrie nástroje (Siklienka, <i>et al.</i> , 2013)	28
Obr. 10: Ukázka očištění břitu strippingem (Holubář <i>et al.</i> , 2005)	33
Obr. 11: Ukázka mikroupravy břitu omíláním (Šíma a Janků, 2007)	34
Obr. 12: Průřez spárovkou s jednotlivými dílci navazujícími na sebe pod úhly 90°, 45° a 30° (Özkaya, 2011).....	37
Obr. 13: Poptávka a nabídka spárovek v západní Evropě v letech 1991 až 2011 (Dilik <i>et al.</i> , 2012)	38
Obr. 14: Rozvržení celosvětové produkce MDF podle oblastí v roce 2015 (FAO, 2017).....	41
Obr. 15: Faktory ovlivňující energetickou náročnost obráběcího procesu zohledněny v předkládané práci.....	42
Obr. 16: Profil povrchu (ČSN EN ISO 4287, 1999).....	49
Obr. 17: Vývojový diagram pro posuzování povrchu.....	50
Obr. 18: Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti (ČSN EN ISO 4287, 1999).....	51
Obr. 19: Složky profilu povrchu	52
Obr. 20: Prvek profilu (ČSN EN ISO 4287, 1999).....	53
Obr. 21: Největší výška výstupků profilu (ČSN EN ISO 4287, 1999)	54
Obr. 22: Největší hloubka prohlubní profilu (ČSN EN ISO 4287, 1999).....	55
Obr. 23: Největší výška profilu (ČSN EN ISO 4287, 1999)	55
Obr. 24: Výška prvků profilu (ČSN EN ISO 4287, 1999)	56
Obr. 25: Faktory ovlivňující jakost povrchu zohledněny v předkládané práci	58

Obr. 26: Šířka vlnek (Lisičan, 1996).....	59
Obr. 27: Kategorizace souborů zkušebních těles.....	64
Obr. 28: Použité žiletkové nože.....	66
Obr. 29: Nástroj HW1 5x a 50x zvětšený	67
Obr. 30: Nástroj HW2 5x a 50x zvětšený	67
Obr. 31: Nástroj HW1 CrTiN 5x a 50x zvětšený	67
Obr. 32: Frézovací hlava FELDER.....	68
Obr. 33: Měřicí přístroj METREL Power Q plus MI 2392.....	70
Obr. 34: Kontaktní profilometr FORM TALYSURF 50 Intra.....	71
Obr. 35: Princip indukčního snímače (Havelková a Hiklová, 2014).....	71
Obr. 36: Laserový profilometr LEXT 3D measuring laser microscope OLS4100.....	72
Obr. 37: Zapojení přístroje METREL Power Q plus (METREL, 2017)	75
Obr. 38: Ukázka softwarového prostředí Metrel Power View	75
Obr. 39: Vliv řezné rychlosti na řezný příkon	82
Obr. 40: Vliv podávací rychlosti na řezný příkon	83
Obr. 41: Vliv typu nástroje na řezný příkon.....	84
Obr. 42: Vliv druhu materiálu na řezný příkon	85
Obr. 43: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na řeznou sílu během bočního frézování MDF	86
Obr. 44: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na řeznou sílu během bočního frézování MDF-L	87
Obr. 45: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na řeznou sílu během bočního frézování SSP.....	88
Obr. 46: Vliv řezné rychlosti na drsnost	94
Obr. 47: Vliv podávací rychlosti na drsnost.....	96
Obr. 48: Vliv typu nástroje na drsnost	97
Obr. 49: Vliv druhu materiálu na drsnost.....	98
Obr. 50: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnost povrchu MDF – kontaktní metoda	101
Obr. 51: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnost povrchu MDF – bezkontaktní metoda.....	102

Obr. 52: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnost povrchu MDF- L – kontaktní metoda.....	103
Obr. 53: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnost povrchu MDF-L – bezkontaktní metoda	104
Obr. 54: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnost povrchu SSP – kontaktní metoda	105
Obr. 55: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnost povrchu SSP – bezkontaktní metoda.....	106
Obr. 56: Měření pomocí Form Talysurf50 Intra a Lext 3D OLS4100	107
Obr. 57: Vliv řezné rychlosti na vlnitost.....	113
Obr. 58: Vliv podávací rychlosti na vlnitost	114
Obr. 59: Vliv typu nástroje na vlnitost.....	115
Obr. 60: Vliv druhu materiálu na vlnitost	116
Obr. 61: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost povrchu MDF – kontaktní metoda.....	120
Obr. 62: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost povrchu MDF – bezkontaktní metoda.....	121
Obr. 63: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost povrchu MDF - L – kontaktní metoda	122
Obr. 64: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost povrchu MDF -L – bezkontaktní metoda.....	123
Obr. 65: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost povrchu SSP – kontaktní metoda.....	124
Obr. 66: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost povrchu SSP – bezkontaktní metoda.....	125

Tab. 1: Vývoj produkce vybraných materiálů na bázi dřeva v letech 2000 až 2015 (FAO, 2017).....	40
Tab. 2: Parametry jakosti povrchu podle normy ČSN EN ISO 4287 (1999)	
Tab. 3: Výškové parametry profilu povrchu (výstupky a prohlubně) podle ČSN EN ISO 4287 (1999)	51
Tab. 4: Výškové parametry profilu povrchu (průměrné hodnoty pořadnic) ... podle ČSN EN ISO 4287 (1999)	54 56
Tab. 5: Délkové a tvarové parametry profilu povrchu podle ČSN EN ISO 4287 (1999)	57
Tab. 6: Křivky a odpovídající parametry profilu povrchu podle ČSN EN ISO 4287 (1999)	57
Tab. 7: Vlastnosti použitých materiálů	65
Tab. 8: Vlastnosti použitých nástrojů.....	66
Tab. 9: Technické parametry použitých nástrojů.....	66
Tab. 10: Parametry spodní svislé frézky FVS ,ED, APT Line II	69
Tab. 11: Parametry podavače materiálu MAGGI, STEFF 2034	69
Tab. 12: Parametry formátovací kotoučové pily SCM si300 class.....	70
Tab. 13: Vlastnosti objektivu MPLAPON50XLEXT	72
Tab. 14: Parametry měření podle normy ČSN EN ISO 4287 (1999)	77
Tab. 15: Vyhodnocení testovaných faktorů na základě hodnoty „P“ (Gaff a Gaborik, 2009)	78
Tab. 16: Průměrné hodnoty řezného příkonu	80
Tab. 17: Vliv faktorů na řezný příkon.....	81
Tab. 18: Průměrné hodnoty drsnosti měřené kontaktní metodou.....	91
Tab. 19: Průměrné hodnoty drsnosti měřené bezkontaktní metodou	92
Tab. 20: Vliv faktorů a jejich vzájemné působení na drsnost – kontaktní metoda	93
Tab. 21: Vliv faktorů a jejich vzájemné působení na drsnost – bezkontaktní metoda.....	93
Tab. 22: Vliv faktorů na drsnost s využitím Duncanova testu – kontaktní metoda	99

Tab. 23: Vliv faktorů na drsnost s využitím Duncanova testu – bezkontaktní metoda.....	100
Tab. 24: Průměrné hodnoty vlnitosti – kontaktní metoda.....	109
Tab. 25: Průměrné hodnoty vlnitosti – bezkontaktní metoda.....	110
Tab. 26: Vliv různých faktorů na vlnitost – kontaktní metoda.....	111
Tab. 27: Vliv různých faktorů na vlnitost – bezkontaktní metoda	111
Tab. 28: Vliv faktorů na vlnitost s využitím Duncanova testu – kontaktní metoda	118
Tab. 29: Vliv faktorů na vlnitost s využitím Duncanova testu – bezkontaktní metoda.....	119

1 ÚVOD

Dřevo jako materiál je vlastně přírodní kompozit složený ze svazků celulóзовých vláken, které jsou obklopeny ligninem. Jeho unikátní vlastnosti ho předurčují pro všestranné použití. Kromě rostlého dřeva ve formě kulatiny a řeziva nacházejí širší využití i materiály na bázi dřeva (Požgaj, 1997). Díky vzrůstajícímu technickému pokroku se zvyšují možnosti zpracování dřeva a výroby technologicky dokonalejších materiálů (Hoadley, 1990). Materiály na bázi dřeva do určité míry zachovávají výhodné a překonávají nevýhodné vlastnosti dřeva.

Materiály na bázi dřeva jsou materiály vytvořeny buďto pomocí tlaku a tepla, které působí na směs dřevních částic (dřevní prach, piliny, vlákna, třísky) a živice nebo slepením a následným lisováním z menších kousků dřeva a dých dohromady. Je velmi důležité se těmito materiály věnovat a dále zkoumat možnosti jejich využití a jejich zpracování. Z hlediska obrábění těchto materiálů je frézování velmi častým způsobem obrábění.

Frézování patří mezi základní typy opracování dřeva a dřevních materiálů, kde rotačním pohybem frézovací hlavy dochází k odběru určité vrstvy materiálu, a tím ke změně jeho rozměrů a tvaru (Jamberová *et al.*, 2016; Krauss *et al.*, 2016; Vančo *et al.*, 2016). Optimálním výsledkem frézování je kvalita opracovaného povrchu, která je vhodná pro další technologický proces. Rovinné frézování je proces vhodný pro dřevo a materiály na bázi dřeva (například spárovka), kde se dosahuje výsledná kvalita povrchu rozhodující pro povrchovou úpravu a konečný vzhled (Rousek a Kopecký, 2005). Boční frézování je typickým procesem pro dřevní materiály, které jsou vyrobeny lisováním (MDF, DTD), a to hlavně z technologického hlediska pro následující operaci olepování. Ovšem může se použít pro všechny typy materiálů na bázi dřeva, hlavně při nepravidelných a zaoblených tvarech výrobků. Při frézování je zapotřebí optimálního nastavení parametrů a hlavně užití nástrojů, které udrží požadovanou kvalitu při nízkých nákladech.

Pro aglomerované materiály se stále častěji používají nástroje s anorganickým povlakem na bázi kovů. Povlaky se zpravidla aplikují pomocí metody PVD (Physical Vapour Deposition - povlakování pomocí fyzikální interakce) a CVD

(Chemical Vapour Deposition - povlakování pomocí chemických procesů). Rozdíl mezi metodou PVD a CVD spočívá v tom, že u fyzikálních metod je zdroj kovu přítomný v pevném stavu (Holubář *et al.* 2009). U chemických metod je přiváděn do reakčního prostoru ve formě páry prchavé sloučeniny. Vlastnosti povlaků nanesené oběma metodami jsou při shodném složení prakticky stejné. Před samotným nánosem povlaku se většinou musí upravit povrch materiálu, na který je povlak aplikovaný (Karvankova *et al.*, 2003; Benlatreche *et al.*, 2009). Rozdíl mezi PVD a CVD metodou je hlavně v ekologii procesu, přičemž méně náročný proces na ekologické zatížení je PVD metoda. Nástroje s povlakem zlepšují výslednou kvalitu obrobku a to hlavně díky svým lepším vlastnostem, jako je např. nižší drsnost povrchu nástroje (Holubář *et al.*, 2009).

Všeobecně kvalita frézovaného povrchu záleží na vlastnostech dřeva (druh dřeva, směru zpracování) nebo dřevních materiálů (typ materiálu, následná povrchová úprava), parametrech frézování (úběr, řezná rychlost, podávací rychlost, typ nástroje, pozice řezného klínu vůči obrobku) a vlastnostech nástroje (materiál, geometrie a úprava nástroje) (Darmawan *et al.*, 2001; McKenzie *et al.*, 2001; Huang *et al.*, 2003; Sandak a Negri, 2005; Warcholinski *et al.*, 2011). Při frézování je velmi důležité, na co je obrobek dále určen, proto musí každý obrobený materiál vykazovat určitou kvalitu. Dříve se kvalita měřila pouze smyslově. Dnes při vyšších nárocích je pro měření jakosti užíváno sofistikovanějších přístrojů. Jakost obrobeného povrchu se dá zaznamenat pomocí profilometrů a to kontaktních a bezkontaktních (Davim, 2011).

Kombinace vlastností materiálu společně s parametry frézování je zásadní i pro celkovou spotřebu energie při obrábění. Spotřeba energie, často reprezentována řezným příkonem, je důležitým faktorem výrobního procesu, který se podílí na nákladech na výrobu výrobku, tj. na jeho celkové ceně (Quintana *et al.*, 2011; Mandić *et al.*, 2015; Kubš *et al.*, 2016). Může být cíleně změněn použitím vhodných nástrojů a nastavením optimálních parametrů frézování, hlavně řezné a podávací rychlosti (Darmawan *et al.*, 2011).

Jak bylo popsáno výše, jakost povrchu a energetickou náročnost ovlivňuje celá řada faktorů, které jsou navzájem propojeny a určují výsledný obrobek a to, jakým

způsobem ho docílíme. Kombinace všech faktorů je tak rozsáhlé a důležité téma, že je potřeba se mu věnovat a zaměřit se na jednotlivé faktory. Stále vznikají nové a nové materiály, ať už obráběné nebo materiály určené k jejich obrábění, u kterých je důležité znát jejich vlastnosti a to, jak se budou chovat v obráběcím procesu.

2 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem práce je zjistit vhodnost užití frézovacích nožů při obrábění plošných materiálů ze dřeva i na bázi dřeva.

Na základě výsledků zjistit závislosti mezi proměnnými faktory:

1. Materiál nástroje: fréza HW1, fréza HW2, fréza HW1 CrTiN.
2. Obráběný materiál: MDF, MDF-L, SSP.
3. Podávací rychlost: 4 m/min, 8 m/min, 11 m/min.
4. Řezná rychlost: 20 m/s, 30 m/s, 40 m/s, 60 m/s.

na sledované charakteristiky, kterými jsou:

1. Množství aktivní energie spotřebované při obrábění
2. Kvalita povrchu, která byla hodnocena pomocí:
 - Ra – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti
 - Wa – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu vlnitosti,

přičemž průměrné aritmetické úchylky povrchu drsnosti a vlnitosti byly hodnoceny dvěma nezávislými metodami a to metodou kontaktní (profilometr FORM TALYSURF 50 Intra) a bezkontaktní (profilometr OLYMPUS LEXT 3D OLS4100).

Výsledky disertační práce by měly posloužit pro zhodnocení jednotlivých parametrů a určení jejich vlivu na řezný proces.

Z hlediska praxe je důležité vyhodnocení použitých fréz a nastavení řezných parametrů pro zachování určité jakosti výrobku s ohledem na co nejnižší náklady.

Dále bude důležitým výstupem zhodnocení dvou metod měření jakosti povrchu a jejich vzájemné porovnání.

V neposlední řadě bude možné použít výsledky této disertační práce jako základ pro návazné výzkumy, např. z hlediska opotřebení řezného klínu a vlivu opotřebení na jakost a energetiku procesu.

3 ROZBOR PROBLEMATIKY

Stěžejním tématem disertační práce je proces obrábění, v mém případě frézování. Frézování je velmi častý způsob obrábění materiálů na bázi dřeva. Při obrábění těchto materiálů se využívají nástroje s různými vlastnostmi a to hlavně v závislosti na obráběném materiálu. Na materiály, které jsou z rostlého dřeva, jako je spárovka, lze použít méně odolné nástroje, a naopak na aglomerované materiály např. MDF, se častěji používají nástroje tvrdší, ať už diamantové, nebo nástroje s povlakem z tvrdých kovů. Všechny výše uvedené faktory mají významný vliv na konečný výrobek, a to jak na jeho výslednou kvalitu, tak na energetickou náročnost procesu, tedy na jeho výsledné náklady.

3.1 Frézování

Problematikou obrábění, a tedy i frézování dřeva a materiálů na bázi dřeva, se zabývají především Davim J.P., Siklienka M., Kminiak R., Lisičan J., Wilkowski J., Rousek M., Prokeš S. a mnoho dalších.

Procesem frézování se rozumí řezání dřeva a materiálů na jeho bázi rotujícím nástrojem, který má řezné hrany na obvodu nástroje. Obrobek se posouvá ve směru kolmém nebo přibližně kolmém na osu rotace nástroje při daném úběru (šířka odebrané vrstvy). Šířka odebrané vrstvy musí být menší, než je šířka obrobku a poloměr nástroje (Siklienka a Kminiak, 2013a).

Podle hlavního řezného pohybu se obrábění rozděluje do čtyř kategorií (Prokeš, 1982).

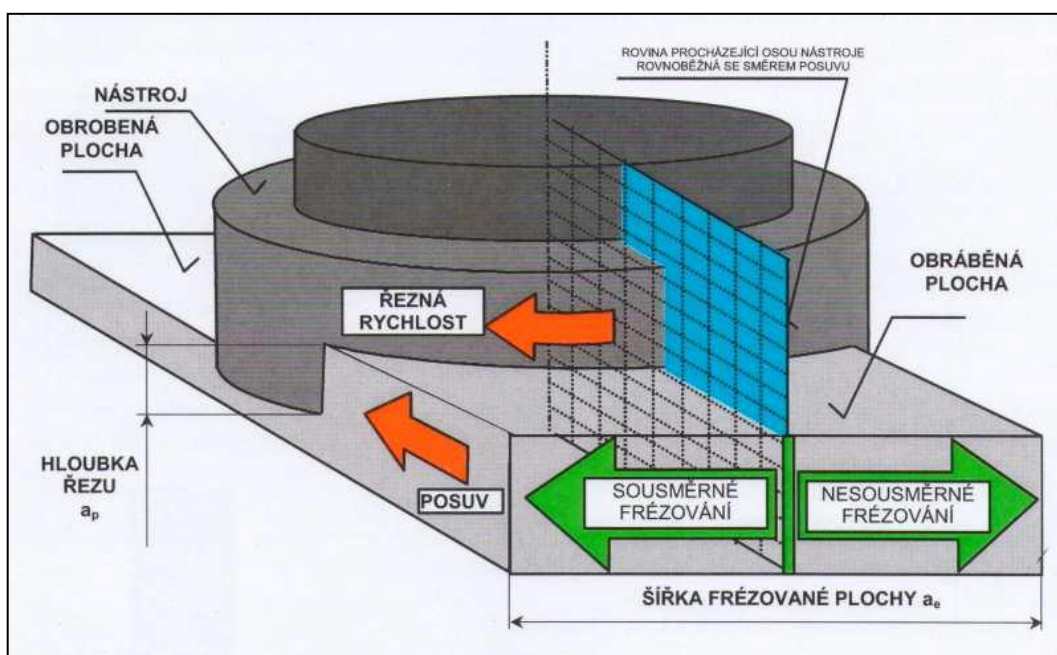
1. Rotační pohyb vykonává obrobek (soustružení).
2. Rotační pohyb vykonává nástroj (frézování, vrtání, zahlubování, broušení, řezání kotoučovou pilou).
3. Přímočarý vratný pohyb vykonává obrobek (hoblování).
4. Přímočarý vratný pohyb vykonává nástroj (obrážení, protlačování, protahování, řezání rámovou pilou, řezání pásovou pilou, pilování).

Z klasifikace mechanické technologie obrábění podle Prokeše (1982) vyplývá, že frézování je obrábění mechanické → s porušením vazby dřevních vláken → řezání → třískové → frézování.

Podle posuvu obrobku do řezu lze frézování provádět jako souběžné (sousměrné) (Obr. 1), protiběžné (nesousměrné) (Obr. 1), nebo čelní. Při frézování souběžném je posuv obrobku ve směru rotace nástroje a tloušťka třísky jde od maximální po minimální, při frézování protiběžném je naopak posuv obrobku proti směru rotace nástroje a tloušťka třísky jde od minimální po maximální, při frézování čelním jde o kombinaci ostatních způsobů.

Při souběžném (sousměrném) frézování směřuje výsledná řezná síla do materiálu, to umožňuje zmenšovat upínací síly. Zmenšuje se náchylnost stroje ke chvění. Je možné zvýšit posuv na zub při nezměněné trvanlivosti, a tím dosáhnout vyššího výkonu obrábění (Prokeš, 1982).

Při protiběžném (nesousměrném) frézování začíná řezná hrana každého zubu odřezávat vrstvu minimální tloušťky. Ve skutečnosti je vždy řezná hrana zaoblená a odebrání materiálu začíná vždy, když má vrstva nějakou tloušťku. Pokud je vrstva tenká, řezná hrana neřeže, ale pouze deformuje povrch (Prokeš, 1982).

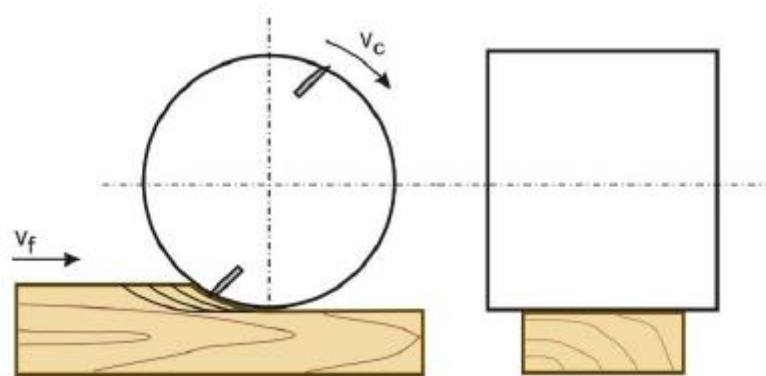


Obr. 1: Základní pojmy při frézování (Vaňák, 2007)

- **Obráběná plocha** - jedná se o plochu, z níž se odebírá vrstva materiálu, která se mění v třísku (Obr. 1).
- **Plocha řezu** - plocha, která se vytváří na obrobku břitem nástroje a tvoří přechod mezi obráběnou a obrobenou plochou (Obr. 1).
- **Obrobená plocha** - nově vytvořený povrch, vzniklý odebráním vrstvy materiálu (Obr. 1).

Podle polohy osy otáčení a podle ploch, které opisují břity nástroje, lze frézování rozdělit do čtyř skupin, a to na frézování válcové, kuželové, čelní a čelní kuželové (Lisičan *et al.*, 1996; Siklienka a Kminiak, 2013a).

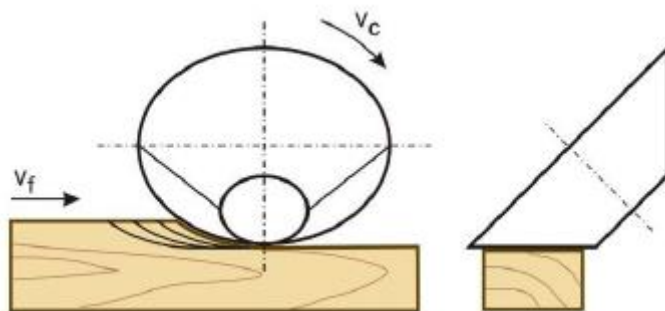
Během válcového frézování je osa rotace rovnoběžná s obráběnou plochou (Obr. 2). Při tomto frézování jsou nože na nástroji umístěny na jeho obvodu a opisují kružnici. Osa rotace je rovnoběžná s opracovanou plochou. Velikost posuvu na jedno otočení je dána vzdáleností posuvu bodu cykloidy (Lipták *et al.*, 1979).



Obr. 2: Válcové frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a)

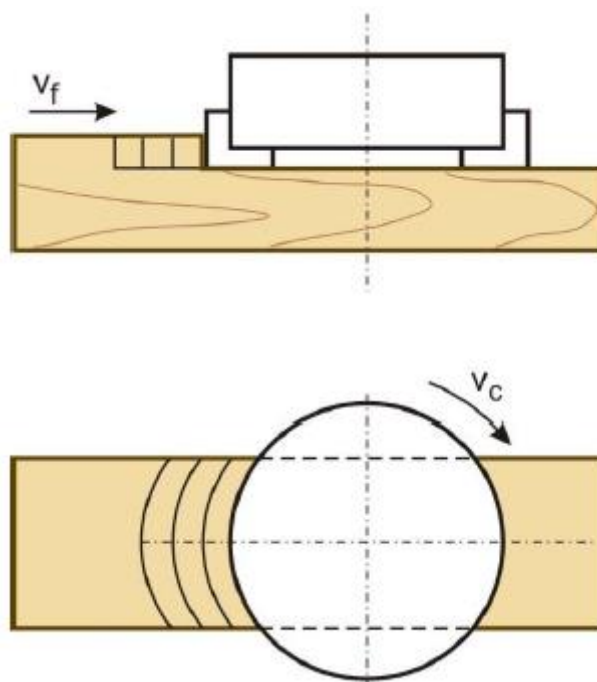
v_c – řezná rychlost, v_f – posuvná rychlost

Při kuželovém frézování je doporučen sklon osy rotace nástroje o 10° až 12° vůči obráběné ploše (Obr. 3). Během tohoto frézování je tloušťka třísky menší než při válcovém, díky tomu se může zvýšit rychlost posuvu až třikrát, a toto frézování je tedy velmi produktivní i se zachováním potřebné jakosti povrchu (Prokeš, 1982).



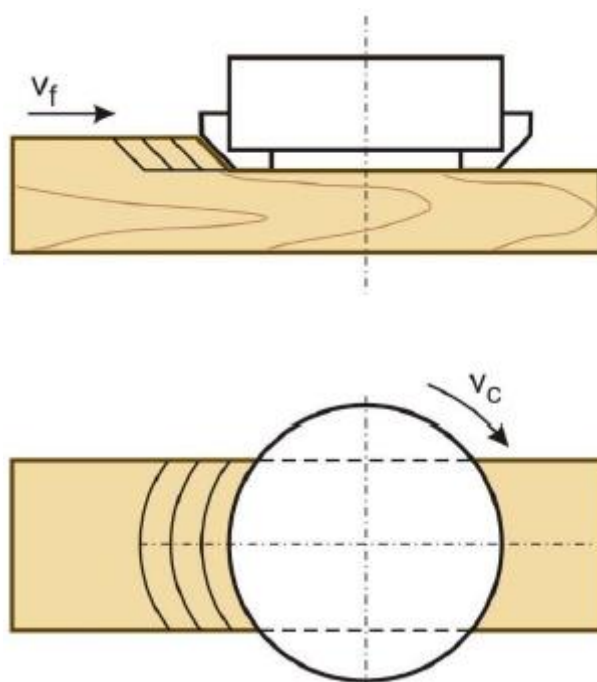
Obr. 3: Kuželové frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a)
 v_c – řezná rychlost, v_f – posuvná rychlost

Při čelním frézování je osa rotace vůči opracované ploše kolmá (Obr. 4). Břity opisují kružnici a jsou umístěny zejména na čele nástroje. Jsou rovnoběžné s opracovanou plochou a odebírají většinu materiálu z obrobku (Prokeš, 1982). Dráha cykloidy vychází z pohybu zubů, které jsou umístěny na čele nástroje. Jestliže je průměr frézy roven šířce opracované plochy, nazýváme tento typ frézování plným (Lipták *et al.*, 1979).



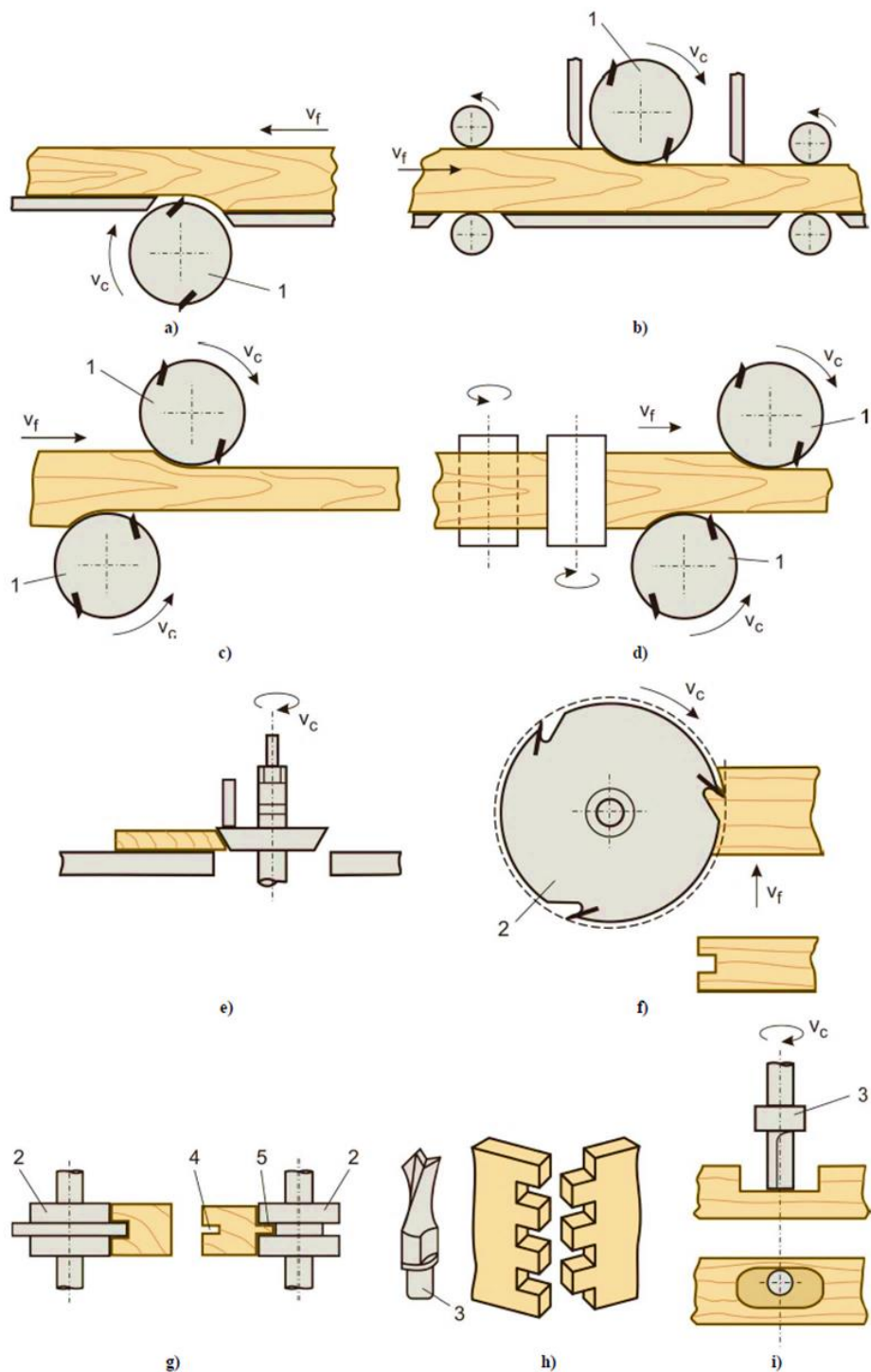
Obr. 4: Čelní frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a)
 v_c – řezná rychlost, v_f – posuvná rychlost

V průběhu čelního-kuželového frézování (Obr. 5) je osa rotace nástroje kolmá k opracované ploše a umístění břitů je na obvodu nástroje v určitém úhlu vůči ploše opracovaného povrchu (Prokeš, 1982). Při tomto frézování dochází k podélnému až příčnému frézování. Kvůli tomu je nepříznivě ovlivněna kvalita opracovaného povrchu, zejména drsnost. Je tedy nezbytné, aby šířka opracované plochy nepřesáhla polovinu průměru nástroje. Velkou výhodou je energetická náročnost procesu, kdy je tento způsob efektivnější v porovnání s válcovým frézováním až o 30% (Krjažev, 1963).



Obr. 5: Čelní-kuželové frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a)
 v_c – řezná rychlost, v_f – posuvná rychlost

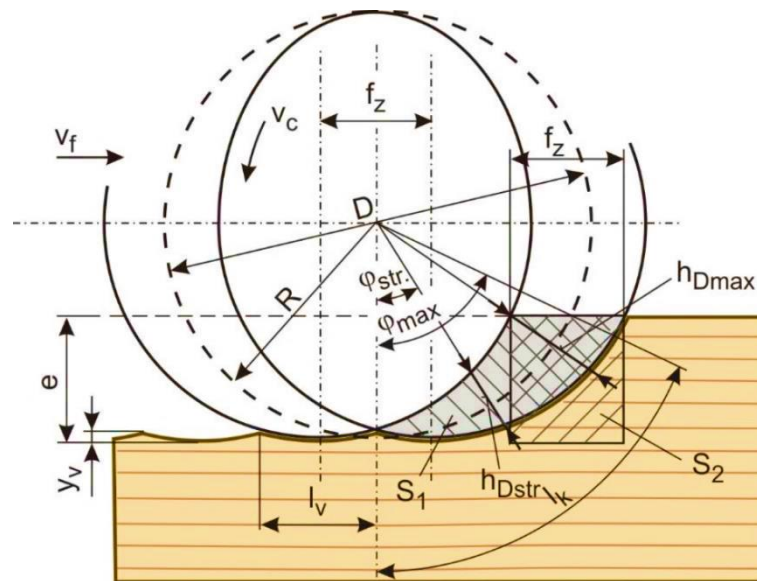
Na obrázku 6 jsou zobrazeny technologické způsoby frézování z hlediska použití: a) srovnávání, b) jednostranné tloušťkování, c) dvoustranné tloušťkování, d) čtyřstranné frézování, e) tvarové frézování, f) čepování, g) frézování drážky a pera, h) frézování spojů rybinovací frézou, i) kopírování stopkovou frézou.



Obr. 6: Způsoby frézování z hlediska použití (Siklienka a Kminiak, 2013a)
 v_f – rychlost posuvu, v_c – řezná rychlost, 1 – nožový hřídel,
 2 – kotoučová fréza, 3 – stopková fréza, 4 – drážka, 5 – pero

3.1.1 Kinematika frézovacího procesu

Kinematika oddělování třísky při frézování je znázorněna na obrázku 7. V praxi však narazíme na rozdíl mezi skutečným a nominálním průřezem třísky, a to z důvodu otupení břitu, nepřesnosti chodu vřetene, odchylek břitů od řezné kružnice, nepravidelnosti chodu podávacího zařízení a především vlivem odštipování a nestejnorodosti hmoty obrobku (Prokeš, 1982).



Obr. 7: Technologické schéma válcového frézování (Siklienka a Kminiak, 2013a)

D – průměr řezné kružnice (průměr nástroje), R – poloměr nástroje, v_c – řezná rychlost, v_f – rychlost posuvu, e – úběr, f_z – posuv na zub, l_v – délka vlny, y_v – výška vlny, S_1 – plocha odříznutá průchodem řezné hrany přes obrobek, S_2 – plocha obdélníku o stranách e a f_z , h_{Dstr} – nominální střední tloušťka třísky, h_{Dmax} – nominální maximální tloušťka třísky, φ_{str} – střední úhel posuvného pohybu, φ_{max} – maximální úhel posuvného pohybu, l_k – délka kontaktního oblouku

3.1.1.1 Výpočet řezné rychlosti

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

Kde:

D – průměr frézy [mm]

n – otáčky frézy [ot/min].

3.1.1.2 Výpočet posuvné rychlosti

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

Kde:

f – posuv na otáčku frézy [mm]

f_z – posuv na zub [mm/zub]

n – otáčky frézy [ot/min]

z – počet řezných hran frézy [ks].

3.1.1.3 Výpočet posuvu na zub

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

Kde:

v_f – rychlost posuvu [m/min]

n – otáčky frézy [ot/min]

z – počet řezných hran frézy [ks].

3.2 Nástroje pro obrábění

Nástroje na obrábění do velké míry ovlivňují celý obráběcí proces. Mají významný vliv na průběh obrábění z hlediska energetické náročnosti procesu. Z uvedeného hlediska ovlivňuje energetiku hlavně nastavení řezných úhlů (Kubš *et al.*, 2017) a také opotřebení řezného klínu (Itaya a Tsuchiya, 2003). Dále se nástroj promítne do výsledné jakosti povrchu. Z hlediska jakosti je významným faktorem hlavně složení nožů (velikost zrna) a jejich drsnost, (Siklienka a Adamcová, 2012), následně i opotřebení řezného klínu, (Siklienka a Šustek, 2013b).

Lisičan (1996) definuje nástroj jako těleso, na kterém je jeden nebo několik břitů. Nástrojem rozumíme předmět, jenž slouží k oddělení předem stanoveného

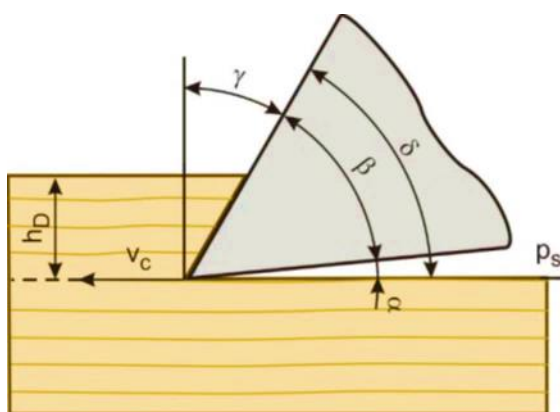
množství materiálu z obrobku. Po opracování nástrojem vznikne nová plocha, která by měla odpovídat jakostním požadavkům pro konkrétní typ opracování.

Prokeš (1982) rozděluje frézovací nástroje podle celkového provedení do čtyř kategorií. První skupinu tvoří celistvé frézy, které mohou být buď s otvorem (kružec) nebo se stopkou (dlabací frézy, vrchní frézy, rybinovací frézy). Další kategorii tvoří frézy s upnutými noži nebo zuby a řadí se sem nožové hřídele, nožové hlavy a čepovací kotouče. Třetí skupinou jsou dělené frézy složené obvykle ze dvou až tří kružců (např. soustavy na pero nebo drážku). Do poslední kategorie se řadí frézy složené (např. různé typy kružců ve spojení s pilovými kotouči).

V dnešní době se poměrně často setkáme s nástroji, kde materiál obrábí výměnné žiletkové nože nebo výměnné břitové destičky. Tyto nože a destičky se po otupení neostří. Každý takový nůž nebo destička se dá použít jednou až čtyřikrát v závislosti na počtu řezných hran (Holubář *et al.*, 2011a; Holubář *et al.*, 2011b).

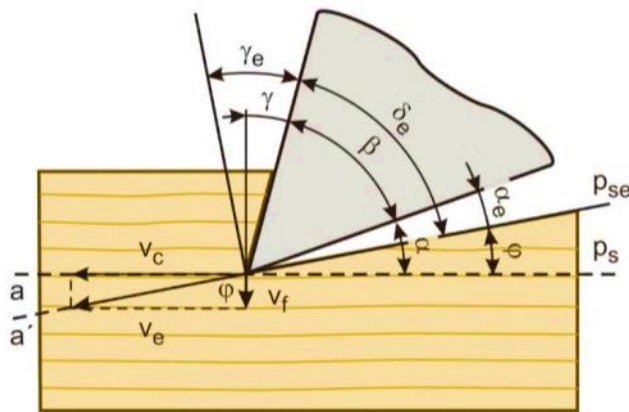
3.2.1 Úhlová geometrie bříty

Úhlová geometrie bříty je potřebná z hlediska určení geometrické polohy řezné hrany, čela a hřbetu nástroje. Rozeznáváme dvě skupiny úhlů, nástrojové (Obr. 8) a pracovní (Obr. 9).



Obr. 8 Úhlová geometrie nástroje (Siklienka a Kminiak, 2013a)

h_D – nominální tloušťka třísky, v_c – řezná rychlost, α – nástrojový úhel hřbetu,
 β – nástrojový úhel řezného klínu, γ – nástrojový úhel čela, δ – nástrojový řezný úhel,
 p_s – nástrojová základní rovina



Obr. 9 Pracovní úhlová geometrie nástroje (Siklienka a Kminiak, 2013a)

v_f – posuvná rychlost, v_e – pracovní rychlost, φ – úhel posuvného pohybu, α – nástrojový úhel hřbetu, β – nástrojový úhel řezného klínu, γ – nástrojový úhel čela, δ – nástrojový řezný úhel, α_e – pracovní úhel hřbetu, β_e – pracovní úhel řezného klínu, γ_e – pracovní úhel čela, δ_e – pracovní řezný úhel p_s – nástrojová základní rovina, p_{se} – pracovní základní rovina

3.2.2 Materiály pro výrobu nástrojů

Podle Humára (2008) se materiály na výrobu nástrojů pro obrábění rozdělují do pěti základních skupin:

1. Nástrojové oceli (nelegované, legované, rychlořezné a na lité nástroje).
2. Slinuté karbidy.
3. Cermety (CERamics + METal = keramika + kov).
4. Řezná keramika.
5. Supertvrdé materiály (syntetický diamant, PVD a CVD povlaky).

Materiál nástroje je velmi důležitý faktor. Různé materiály nám předurčují i to, jak dlouho lze s daným nástrojem obrábět, než se nástroj otupí natolik, že ho nelze použít (Adamcová, 2010). V dnešní době se stále více uplatňují nástroje ze supertvrdých materiálů, obzvláště při obrábění materiálů na bázi dřeva, které jsou v některých případech (např. MDF) hůře obrobitelné než rostlé dřevo. Nástroje ze syntetického diamantu jsou poměrně drahé, z tohoto důvodu jsou často využívány nástroje s povlakem (Sheikh-Ahmad *et al.*, 2003; Stewart, 2004).

3.2.3 Povlakování nástrojů

Podstatou aplikace povlaků na nástroje je zlepšení jejich zvolených vlastností a stavu povrchu materiálu pro jejich dlouhodobou funkci při optimálních výsledcích jakosti (Rudnicki *et al.*, 1998; Sheikh-Ahmad a Morita, 2002; Sheikh-Ahmad *et al.*, 2003).

Vlastnosti, které chceme zlepšit, jsou zejména otěruvzdornost, žáruvzdornost, změna elektrické vodivosti, tepelná vodivost a především tvrdost. Přičemž pro nástroje na obrábění dřeva a materiálů na jeho bázi chceme zlepšit především otěruvzdornost, tepelnou vodivost a tvrdost (Sheikh-Ahmad a Morita, 2002; Zindulka *et al.*, 2005; Jílek *et al.*, 2003; Nouveau *et al.*, 2010).

Povrchové úpravy materiálů nejenom vylepšují funkční vlastnosti, ale také rozšiřují možnosti využití v jiných oborech zájmu. S výzkumem a vývojem nových materiálů na bázi dřeva se vyvíjí i nové materiály na jejich obrábění (Gogolewski *et al.* 2009; Šíma a Zindulka, 2004).

Povrchová degradace nástrojů vlivem jejich opotřebení je doprovodným jevem při obrábění. Ochrana nástroje povlakem proti poškození povrchu je důležitá z hlediska udržení dostatečné jakosti obrobku (Mrkvica *et al.*, 2016). Podle výzkumu Sheikh-Ahmad a Morita (2002) mají povlaky významný vliv na snížení opotřebení řezného klínu v závislosti na obrobené vzdálenosti oproti materiálům bez povlaku.

Problematikou povlakování nástrojů se u nás zabývá především firma SHM s.r.o. Šumperk a firma LISS a.s. Rožnov pod Radhoštěm (člen švýcarské skupiny B.C.I. Groupe). V Evropě se problematikou povlakování zabývá především švýcarská skupina B.C.I., Blösch A.G. (Švýcarsko), BIPLATIT A.G. (Švýcarsko), se zastoupením v České republice, Francii, Německu, Maďarsku, Itálii, Rusku, Španělsku, Turecku, Šanghaji a v mnoha dalších zemích po celém světě.

Samotný obor povlaků prochází rozsáhlým vývojem a díky využití nových poznatků z chemie, biochemie, elektroniky, fyziky a dalších vědních oborů lze zlepšovat i povlaky samotné, ať už jejich složení nebo jejich aplikaci.

3.2.3.1 Technologie aplikace povlaků

Podle charakteru a způsobu úpravy povrchu můžeme rozdělit povlaky na dva způsoby:

1. Organické.
2. Anorganické.

Na nástroje pro obrábění dřeva a materiálů na bázi dřeva se používají zpravidla anorganické povlaky na bázi kovů (Kaczorowski *et al.*, 2012).

Pro povlakování vyměnitelných břitových destiček a žiletkových nožů se v principu dají definovat dvě metody, chemické povlakování z plynné fáze (CVD - Chemical vapour deposition) a fyzikální povlakování z plynné fáze (PVD - Physical vapour deposition). Metoda CVD využívá pro depozici směs chemicky reaktivních plynů (např. $TiCl_3$, CH_4 , $AlCl_3$ apod.) o vysoké teplotě 900 – 1100 °C. Metoda PVD využívá fyzikálních principů povlakování. Odpaření nebo odprášení materiálů obsažených v povlaku (Ti, Al, Cr aj.) je uskutečněno za pomoci ionizace a následně jsou tyto prvky nanесeny na nástroj. Rozdíl v těchto dvou metodách je především v jejich ekologii (Zindulka, 2004).

3.2.3.2 Ekologické hledisko metody CVD a PVD

PVD technologie jsou obecně šetrnější k životnímu prostředí oproti CVD technologiím. Je to především důsledek toho, že při použití PVD metody se nemusí používat nebezpečné chemické plyny a látky. Tento fakt vychází z definice jednotlivých metod. Při použití metody CVD je nositelem kovu většinou nějaký plyn (Cl, H atd.), zatímco při použití PVD metody je často použit samotný kov (Ti, Al, Cr a Zr) nebo jejich slitiny (Navišek *et al.*, 1995). Většina dnes vyrobených PVD povlaků je tvořena nitridy těchto prvků. Nitrid je sloučenina dusíku a dalšího prvku. Dusík je z ekologického hlediska neškodný plyn, který je obsažen v atmosféře, a to přibližně ze 78 %. Jako doprovodný plyn slouží argon, jehož obsah v atmosféře je asi 1 %. Jelikož celý PVD proces probíhá ve vakuu, odpadní plyny (již zmíněný dusík a argon) se nemohou přeměnit na oxidy, a odpadem jsou tedy pouze čisté plyny. Všechny další odpadní látky, jako jsou zbytky odpařovaných

kovů a jejich slitin, jsou recyklovány. CVD metoda povlakování má oproti PVD metodě z pohledu ekologie řadu nevýhod. Mezi nevýhody patří určitě vysoké teploty při aplikaci povlaku, dále používání rizikových plynů a odpady vzniklé při této metodě (Holubář *et al.*, 2009).

Samotné ekologické stránce obou metod nanášení prospívá i zvýšení životnosti povlaků. To se dá dosáhnout především dobrým přilnutím povlaků na podkladový materiál. Pro zlepšení přilnavosti povrchu prochází většina nástrojů před samotnou aplikací povlaku mechanickou úpravou.

3.2.3.3 Mechanická úprava nástrojů před aplikací PVD a CVD povlaků

Podle výzkumů, kterými se zabývali Šíma a Janků (2007) a Holubář *et al.* (2005), má úprava břitů před samotnou aplikací povlaku významný vliv na přilnavost povlaku a zdatně prodlužuje jeho životnost a ořeruvzdornost. Aby byla zajiřtřena co nejlepří přilnavost povlaku na nástroj, musí být povrch nástroje dokonale očiřtřen. Očiřtření lze provřst nřkolika zpřsoby. Mezi základnř zpřsoby očiřtření povrchu nástroje patřř odmařtření, mokře řiřtření, přskování, odjehlení ři stripping. Mezi sofistikovaneřřší, ačkoli mřně vyuřřované metody očiřtření nástroje před nanesenřm povlakovř vrstvy patřř řihání ve vakuu a omřlání v granulátech (Holubář *et al.*, 2005).

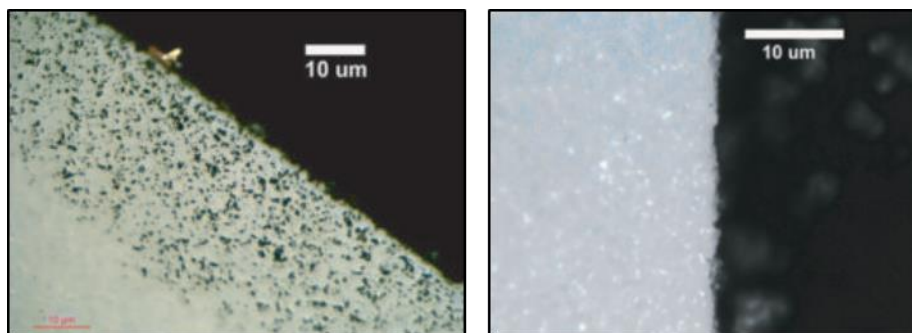
Základem řiřtření povrchu nástroje odmařtřenřm je odstranění konzervařních a jiných mastných látek přstřednictvřm přřmyslových odmařtřovadel na bázi ropných derivátů, které obsahujř dearomatizovanř uhlovodřky a tenzidy zabraňujřící nadmřrnřmu odpařování a zajiřřujřící dobrou smáčivost. Proces odmařtření je provřdřen v jednoduchých odmařtřovacřch zařřzenřch, které vyhovujř kapacitnřm potřebám a velikosti nástrojů.

Mokře řiřtření probřhá v mycř lázni s demineralizovanou vodou, do které se dávkovacřm řerpadlem dodávajř kapalnř čisticř přstředky (vřtřinou roztoky obsahujřící KON ři NaOH). Pro zvyřšení odmařtřovacího řčinku se mohou do mycř lázně přřdat malř dávky tenzidů (smáčedel), kyseliny citronovř nebo fosforeřnř. Zvyřšenřho řiřtřicího řčinku lze takř dosáhnout kombinováním kyselřho a zásaditřho přstředř v oddřlených nádobách. Po očiřtření nástroje v mycř lázni je

potřeba provést oplach, který odstraní zbytky čisticí lázně a zároveň ochrání očištěný povrch proti korozi pasivátorem. Aby na očištěném nástroji nevznikaly v důsledku vysychání zbytkové mapy, je nutné dosáhnout co nejrychlejšího osušení smáčených povrchů prostřednictvím odstředění či odpaření zbytkové kapaliny na vzduchu či ve vakuu (Holubář *et al.*, 2005).

Při sériové výrobě povlakových nástrojů se k očištění jejich povrchu nejčastěji používá metoda pískování. Touto metodou lze docílit odstranění pevných ulpívajících nečistot na povrchu i nečistot uchycených v mírně pórovitém povrchu. K očištění se nejčastěji používá abrazivo SiC nebo Al₂O₃ s velikostí abrazivních zrn od 20 do 100 μm. Aby se při pískování zabránilo některým negativním vlivům (např. nevhodné zaoblení hran), musí volba parametrů pískování vždy respektovat charakter nástroje, jeho funkční břity a plochy (Holubář *et al.*, 2005).

Při metodě strippování dochází chemickou nebo elektrochemickou cestou k odstranění starého povlaku u přebrušovaného nástroje. Při této metodě se povrch nástroje očišťuje silnými oxidačními činidly nebo s využitím elektrického proudu. Nástroje vyrobené z HSS jsou nejčastěji čištěny roztokem peroxidu vodíku, vody a tetranatriumdifosfátu při teplotě cca 70 °C. Ihned po očištění horkým peroxidem je nutné povrch nástroje opláchnout a krátkodobě pasivovat vhodným činidlem. U nástrojů vyrobených z HM je technologie strippování trochu komplikovanější, zejména kvůli obsahu kobaltu. Používají se při ní roztoky peroxidu v nižších koncentracích a provádí se při pokojové teplotě. Při této metodě čištění je potřeba dbát na její správné provedení, aby nedocházelo k nežádoucím účinkům, jako je např. narušení struktury materiálu vyleptáním kobaltu, což by způsobilo problémy při následném povlakování i použití nástrojů (Holubář *et al.*, 2005).

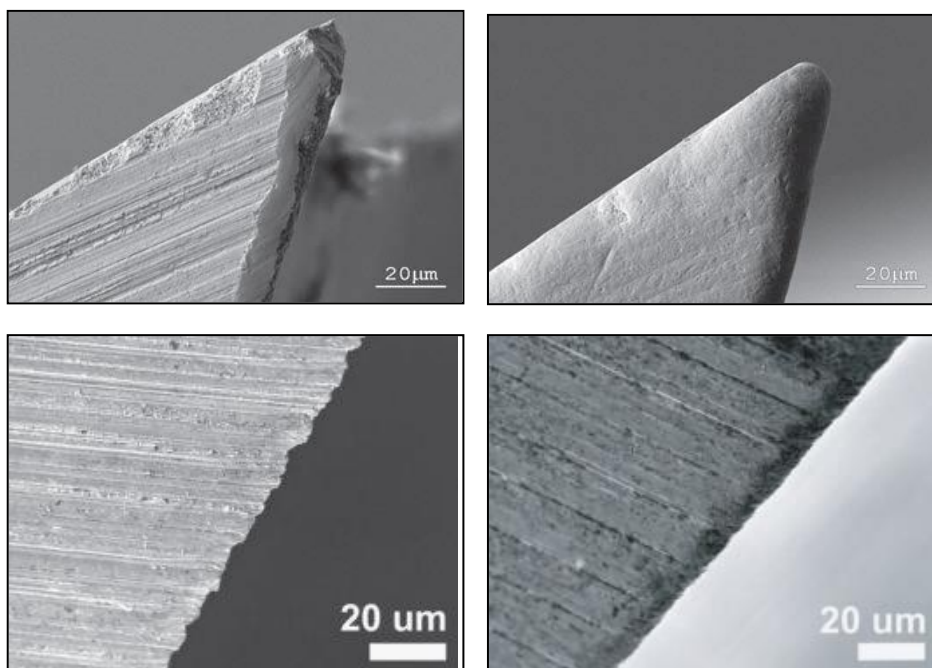


Obr. 10: Ukázka očištění břitu strippingem (vlevo špatné provedení - hluboké odleptání kobaltu; vpravo dobré provedení) (Holubář et al., 2005)

U nástrojů z HSS se k očištění povrchu nástrojů běžně používá metoda odjehlení, resp. kartáčování. Musí se však opět dbát na vhodnou volbu kartáče, protože v případě následného povlakování je nutné dodržet určité limitující podmínky (nevhodné jsou např. kartáče s plastovým vlasem, či některé mosazné kartáče). Při ručním odjehlení lze využít i různé pilníky nebo tkaniny s abrazivy.

Čištění povrchu nástroje žiháním ve vakuu probíhá při teplotách blízcích se povlakovacím teplotám. Vakuové žihání je vhodné pro některé HSS povrchy, ovšem vzhledem k její delší časové náročnosti se jedná o metodu méně využívanou oproti ostatním metodám.

Mezi mechanické způsoby očištění povrchu nástroje patří omílání v granulátech, kdy dochází k mikroúpravě břitu, což má zásadní vliv na dobrou adhezi vrstev na břitech. Aby nedocházelo k nerovnoměrnostem na břitu a následnému znehodnocení jeho řezného výkonu, hraje důležitou roli vhodně zvolený granulát a abrazivo, kvalita HM substrátů a v neposlední řadě kvalita obsluhy CNC brusek a brusných kotoučů. Vhodným technologickým postupem zvoleným při této metodě je možné docílit dobré adheze PVD vrstvy na břitech nástroje, zlepšit výsledný výkon či prodloužit jeho životnost.



Obr. 11: Ukázka mikroúpravy břítu omíláním (vlevo před úpravou; vpravo po úpravě)
(Šíma a Janků, 2007)

Finální úpravou, která může značně prodloužit životnost a kvalitu obrobku hned od počátku činnosti nástroje, je leštění po povlakování. Dochází tak k odstranění případných makročástic a snížení celkové drsnosti funkčních ploch a břitů. Provádí se zpravidla ručním leštěním tkaninami s abrazivem, kartáčováním nebo omíláním. Takto upravené nástroje mají i příznivý vliv na výslednou jakost frézovaného materiálu (Holubář *et al.*, 2005).

3.3 Frézovaný materiál

Celosvětově je problém materiálů jednoznačný. Stále rostoucí spotřeba lidské populace vyvíjí tlak na výrobce. Aby byl tento trend udržitelný, musí se vyvíjet stále nové materiály a také se ve velké míře věnovat recyklaci odpadů a jejich opětovnému použití. V celosvětovém měřítku se spotřeba dřevního materiálů stále navyšuje (FAO, 2017).

Tento trend probíhá i v dřevozpracujícím průmyslu. Při výrobě deskového materiálu z masivního dřeva (např. SP), lze vymanipulovat vady, a proto je možné

použit i méně jakostní řezivo. Při výrobě aglomerovaných materiálů na bázi dřeva je snaha o nahrazení masivního dřeva při zachování jeho dobrých a zlepšení jeho špatných vlastností. Navíc jsou aglomerované materiály vyvíjeny na určitý účel použití, takže se lze specializovat na ty vlastnosti, které jsou relevantní podle použití. Díky tomu se mnohé výzkumy stále zabývají novými materiály a úpravou již používaných materiálů.

Materiály na bázi dřeva jsou materiály vytvořeny buďto pomocí tlaku, tepla a živice nebo slepením a následným lisováním z menších kousků dřeva a dých dohromady.

První zmiňovaná skupina materiálů (HDF, MDF, DTD, OSB) je nejpoužívanější v nábytkářském a stavebním průmyslu. Všeobecně tyto materiály mají homogennější složení v porovnání s přírodním dřevem, které má naopak anizotropní charakter (Boucher *et al.*, 2007). Typickým příkladem je právě MDF. Středně hustá dřevovláknitá deska (MDF) je univerzální materiál na bázi dřeva, který se používá na nenosné účely ve výrobě nábytku, pro truhlářské výrobky, izolační panely a další použití v interiéru, protože má vysokou měrnou stabilitu, dobrou opracovatelnost a vysokou hladkost povrchu (Kowaluk *et al.*, 2009; Tratar *et al.*, 2014; Bendikiene a Pupelis, 2007). Protože má vyšší hustotu než přírodní dřevo a obsahuje velký podíl živice, dochází při jejím opracování k vyššímu opotřebenosti nástrojů (Morita *et al.*, 1998). Rovněž charakter MDF není zcela izotropní, ale spíše izotropní po určitých vrstvách, což bylo potvrzeno v celé řadě výzkumů (Aguilera *et al.*, 2000; Zerizer *et al.*, 2003; Boucher *et al.*, 2007; Davim *et al.*, 2009; Davim, 2010).

Druhá skupina materiálů (překližka, spárovková deska) má menší zastoupení a je specifická pro určité použití nebo konkrétní komponenty. Takovéto materiály se víc podobají dřevu a podíl jiných chemických látek (např. lepidel) v nich je minimální. Například spárovková deska (někdy nazývána i spárovka) je materiál, jehož celková šířka, případně i délka, může být vytvořena podle potřeby. Skládá se z malých kusů dřeva se čtvercovým nebo obdélníkovým průřezem, navzájem slepených bočními stranami k sobě. Na délku mohou být jednotlivé kusy dřeva spojeny pomocí nekonečného vlysu. Spárovky se nejčastěji používají na pracovní

desky kuchyňských linek a stolů, dveře, schody, okenní křídla nebo parapety (Mitchell a Lemaster, 2002; Sofuoglu, 2017). I když spárovky mají více heterogenní strukturu než rostlé dřevo, jejich vlastnosti jsou podobné (Sütçü, 2013).

3.3.1 Materiály na bázi dřeva

Kuklík a Kuklíková (2002) rozdělují materiály na bázi dřeva na:

1. Překližované materiály.
2. Vláknité desky.
3. Třískové desky.
4. Lepené lamelové dřevo.
5. Vrstvené dřevo.
6. Zhuštěné dřevo.
7. Modifikované dřevo.

Dělení materiálů na bázi dřeva je mnoho, a stále přibývají nové materiály, které je potřeba někam zařadit.

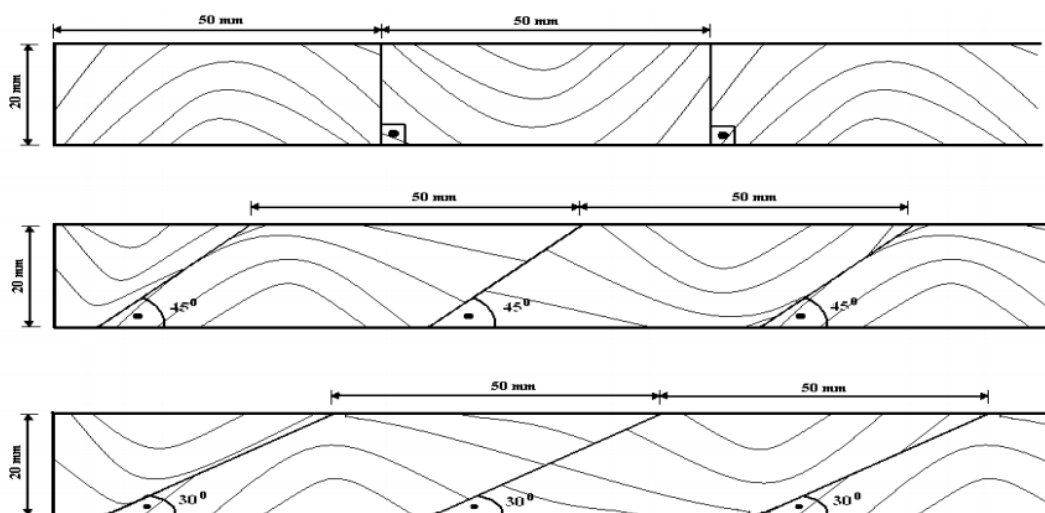
V současné době lze definovat mnoho druhů materiálů na bázi dřeva. Mezi překližované materiály se řadí dýhy (loupané, krájené, řezané), překližky (truhlářské, stavební, letecké atd.), spárovky, laťovky, lepené lamelové dřevo a různé výlisky. Mezi aglomerované materiály patří dřevotřískové desky, OSB a dřevovláknité desky. Některé aglomerované materiály mohou obsahovat přídavky nedřevěných materiálů, vznikají pak např. cementotřískové desky, sádrovláknité a cementovláknité desky, materiály s přídavkem gumy a kaučuku nebo materiály s přídavkem plastových hmot. Další kategorií mohou být modifikovaná dřeva, která se speciálně upravují pomocí teploty, tlaku (lisování) nebo chemicky.

Nevýhodou většiny materiálů na bázi dřeva je jejich lepení. Použitím chemických sloučenin se výrazně zhoršuje ekologie výroby. Vývoj tedy probíhá i v této oblasti. Posledním trendem je snižování množství použitých chemických sloučenin a snaha o jejich nahrazení přírodními látkami. Největším problémem z hlediska lidského organismu je formaldehyd, který se uvolňuje z lepených

materiálů (Sumin *et al.*, 2006; Baumann *et al.*, 2000). Snížením emisí formaldehydu se zabýval ve svém výzkumu Boran *et al.* (2011), který zjistil, že lze omezit emise, pokud se do močovinoformaldehydu přidají aminové sloučeniny. Jejich přidání ovšem zhoršuje vlastnosti desek, jako je bobtnání a nasákavost, a nepříznivě ovlivňuje i mechanické vlastnosti. Aglomerované materiály zpravidla obsahují více formaldehydu než např. spárovka, kde je lepidla použito minimální množství.

3.3.1.1 Spárovka

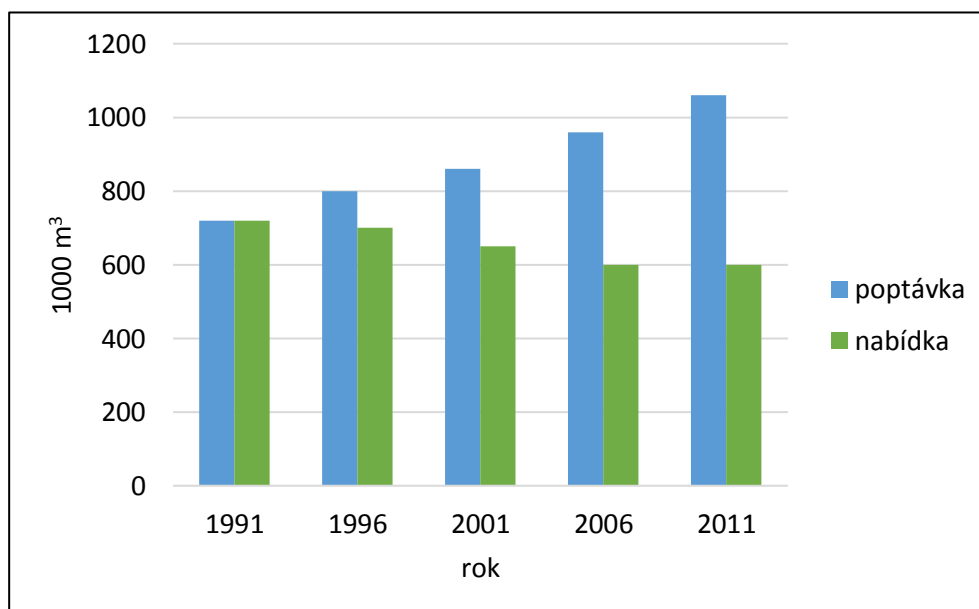
Spárovka (jednovrstvá masivní deska) je dřevěná konstrukční deska vyrobená slepením vlysů vedle sebe. Vlysy jsou buď v celých délkách (tzv. fix) nebo nastavované (tzv. nekonečný vlys). Někdy se do bočního spoje spárovek dodává vložené pero pro zlepšení soudržnosti. Také v této oblasti se uskutečnila řada výzkumů, které se zabývaly dalšími možnostmi zlepšení soudržnosti lepeného spoje. Özkaya (2011) ve svém výzkumu dospěl k závěru, že boční zkosení jednotlivých dílců má vliv na některé vlastnosti SP. Z jeho výsledků vyplývá, že nejlepší soudržnosti SP bylo dosaženo při zkosení hran pod úhlem 45° (Obr. 12).



Obr. 12: Průřez spárovkou s jednotlivými dílci navazujícími na sebe pod úhly 90° , 45° a 30° (Özkaya, 2011)

Mezi kladné vlastnosti spárovek patří především vizuální podoba rostlého dřeva a možnost výroby větších formátů desek. Cenné jsou rovněž i dobré mechanické vlastnosti srovnatelné s masivním dřevem, ovšem díky jejímu anizotropnímu charakteru je např. pevnost dřeva ve směru kolmém na vlákna přibližně 10-50 krát nižší, než v podélném směru (Böhm *et al.*, 2012). Díky poměrně dobrým vlastnostem SP, jak bylo popsáno výše, a zachování vzhledu dřeva, je tento materiál hojně užíván při výrobě stavebně truhlářských výrobků a také nábytku, proto se jeho spotřeba v Evropě značně zvyšuje.

Obrázek 13 zobrazuje vztah mezi poptávkou a nabídkou v západní Evropě v letech 1991 až 2011. Zatímco v roce 1991 nabídka uspokojovala poptávku, s postupem let se poptávka zvyšovala, zatímco nabídka klesala. V roce 2011 už poptávka převyšovala nabídku o 77 %. Tuto skutečnost lze vysvětlit tím, že údaje pocházejí ze studie pokrývající Německo a západní Evropu, kde byly výrobní závody postupně uzavřeny a přestěhovány do východní Evropy s nižšími náklady na výrobu (Dilik *et al.*, 2012). Tento trend lze pozorovat i v posledních letech, kdy se výroba přesouvá stále více na východ, kde lze dosáhnout ještě nižších výrobních nákladů (např. Čína).



Obr. 13: Poptávka a nabídka spárovek v západní Evropě v letech 1991 až 2011
(Dilik *et al.*, 2012)

3.3.1.2 Středně hustá vláknitá deska

Podle ČSN EN 316 (2009) jsou vláknité desky (VD) definovány jako vláknitý materiál tloušťky 1,5 mm a více, vyrobený z lignocelulosových vláken použitím ohřevu nebo tlaku. MDF se vyrábí z dřevěných vláken o hustotě 600 – 800 kg/m³ (Böhm *et al.*, 2012). MDF mají široké spektrum využití, jelikož struktura těchto desek umožňuje jejich následnou povrchovou úpravu laminováním, dýhováním nebo frézováním v ploše i hraně. Mají také velmi dobré mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti, které jsou obdobné jako u masivního dřeva (Wieloch, 2005).

V zájmu zachování trvale udržitelného rozvoje je v současné době prováděna řada výzkumů, která se zabývá zpracováním a využitím odpadních materiálů z různých odvětví (např. ze zemědělské produkce) k výrobě MDF. V rámci těchto studií se na výrobu MDF používá obilná sláma, sójová sláma, vlákna z palmového dřeva, ze zbytků z cukrové třtiny atd. MDF z pšeničné a sójové slámy mají podle výzkumu Ye *et al.* (2007) horší vlastnosti oproti MDF vyrobených z vláken z měkkého dřeva. Především jejich voděodolnost je horší a také se zhoršili vlastnosti jako modul pružnosti nebo vnitřní pevnost vazby. Podobné změny ve vlastnostech ukazuje i výzkum Ashori *et al.* (2009), kde zkoumá vlastnosti desek ze zbytků z cukrové třtiny. Při shrnutí výzkumů lze konstatovat, že desky z jiných než dřevěných materiálů mají horší vlastnosti, ale jsou cenově dostupnější a pro některé účely využití postačující (Ridzuan *et al.*, 2002). Výzkum Akgül *et al.* (2012) se zabýval nahrazením části materiálu pro MDF vlákny z *Rhododendron ponticum*, kde postupně zvyšoval obsah této složky a zkoumal vliv na drsnost povrchu. Prokázal závislost této složky na drsnost.

Výrobou MDF desek se v České republice zabývá Dřevozpracující družstvo Lukavec (DDL) se sídlem v Lukavci na Vysočině. Toto družstvo, zabývající se od roku 1953 výrobou řeziva, se v dnešní době soustředí na výrobu nábytkových dílců především z laminovaných dřevotřískových desek a MDF.

Na Evropském trhu se mezi nejvýznamnější výrobce MDF řadí rakouská společnost EGGER Groupe, kterou v roce 1961 založil Fritz Egger starší. Tento závod na výrobu dřevotřískových desek se stal základem rodinného podniku, který

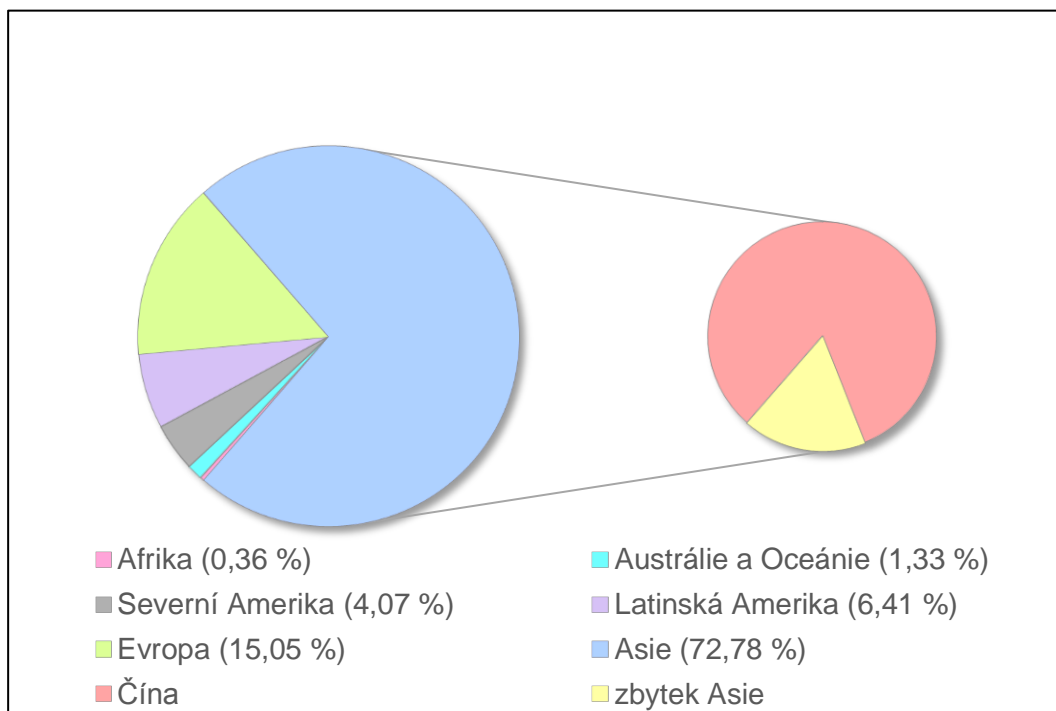
je dnes zastoupen po celé Evropě 17 výrobními místy na deskový materiál a z 21 odbytových kanceláří exportuje materiály do celého světa (EGGER, 2017). Dalším výrobcem MDF desek v Evropě je rakouská společnost Kronospan Groupe, která byla založena již v roce 1897. Dnes je zastoupena řadou výrobních závodů především v Evropě, ale také v Turecku, Číně a USA (Kronospan, 2017).

Tabulka 1 zobrazuje přehled vývoje produkce vybraných materiálů na bázi dřeva v letech 2000 až 2015 podle statistiky vedené organizací FAO (2017). V celosvětovém měřítku produkce MDF/HDF vzrostla oproti roku 2000 o 404 %.

Tab. 1: Vývoj produkce vybraných materiálů na bázi dřeva v letech 2000 až 2015 (FAO, 2017)

Rok	Oblast	Materiál				
		Vláknité desky		Třískové desky		Překližky
		MDF/HDF	ostatní	OSB	ostatní	
2000	ČR	75 000	0	0	720 000	115 000
	Evropa	8 380 493	1 099 993	1 585 000	38 849 616	5 855 031
	Svět	19 039 633	5 780 993	21 338 112	64 252 021	58 377 653
2005	ČR	90 000	0	530 000	688 000	165 000
	Evropa	12 704 400	1 331 600	3 347 000	43 734 210	7 336 902
	Svět	46 683 533	6 386 900	28 536 000	74 593 030	81 966 869
2010	ČR	46 000	0	526 000	559 000	204 000
	Evropa	11 142 651	2 950 640	4 923 564	41 364 967	6 858 796
	Svět	69 456 958	9 282 890	19 036 939	76 822 822	91 556 690
2011	ČR	28 900	13 100	525 000	527 000	181 000
	Evropa	11 307 532	3 045 322	4 843 268	42 031 685	7 398 357
	Svět	75 832 935	9 304 572	19 914 258	78 120 598	109 318 821
2012	ČR	29 000	12 000	517 000	516 000	178 000
	Evropa	11 780 364	3 073 394	5 350 065	40 299 229	7 534 659
	Svět	83 343 473	9 390 294	21 545 065	75 936 634	118 176 443
2013	ČR	29 000	12 000	519 000	513 000	180 000
	Evropa	12 115 310	3 115 925	5 702 916	40 322 165	7 840 303
	Svět	88 468 239	9 851 175	23 714 336	83 023 888	134 615 516
2014	ČR	30 000	11 000	530 000	506 000	181 000
	Evropa	13 491 619	3 009 481	5 891 747	41 411 743	8 208 646
	Svět	93 958 966	9 684 731	24 992 327	86 075 719	147 337 985
2015	ČR	32 000	12 000	521 000	519 000	180 000
	Evropa	14 437 666	3 041 765	6 941 837	40 955 500	8 294 612
	Svět	95 921 778	9 666 015	26 640 092	84 296 484	156 850 639

Obrázek 14 znázorňuje rozvržení celosvětové produkce MDF podle jednotlivých oblastí v roce 2015 s dílčím grafem, který poukazuje na dominantní postavení Číny ve výrobě MDF.

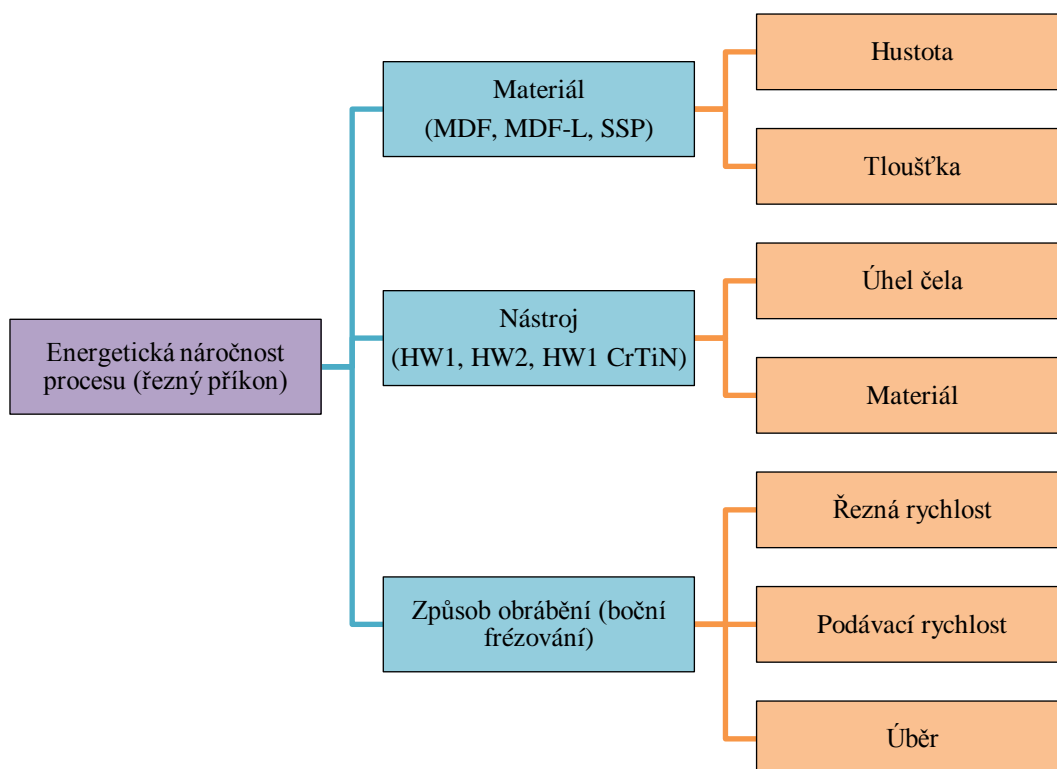


Obr. 14: Rozvržení celosvětové produkce MDF podle oblastí v roce 2015 (FAO, 2017)

3.4 Energetická náročnost procesu

Při každém zpracování dřevní suroviny, kdy je použito strojní zařízení, je velmi důležité hledisko energetické náročnosti obráběcího procesu. Spotřeba strojního vybavení se vždy promítne do celkové ceny výsledného produktu. Každý zpracovatel dřeva chce náklady na výsledný produkt mít co nejnižší. Snaha o snížení nákladů ovšem nesmí zhoršit kvalitu výsledného produktu. Při snižování energetické náročnosti také nesmíme opomenout kladný vliv na ekologii výroby. Při nižší spotřebě elektrické energie méně zatěžujeme životní prostředí, což je při současném zatížení planety velmi žádoucí.

Energetickou náročnost procesu ovlivňuje mnoho faktorů (Stewart, 1984). Některé faktory je možné ovlivnit a snížit tím celkové náklady na výrobek a některé, jako je např. materiál, lze ovlivnit jen částečně při zachování stejných vlastností konečného výrobku. Je důležité srovnávat nové materiály s již používanými a zkoumat jejich vzájemné závislosti.



Obr. 15: Faktory ovlivňující energetickou náročnost obráběcího procesu zohledněny v předkládané práci

Podle výzkumu Kviťková (2015a) lze snížit řezný příkon, pokud se sníží řezná rychlost a podávací rychlost. Tento výzkum probíhal na rostlém dřevě, ale předpoklad je takový, že závislost řezného příkonu na řezné a podávací rychlosti bude obdobná i u materiálů na bázi dřeva. To samé potvrdil ve svém výzkumu Barcík *et al.* (2010), který také zkoumal závislost řezného příkonu na řezné a podávací rychlosti u rostlého dřeva. Dále se obdobné problematice věnuje např. Kubš *et al.* (2016; 2017), kde je znovu potvrzeno, že při rostoucí řezné a podávací rychlosti se zvyšuje řezný příkon a zjištění je rozšířeno o porovnání vlivu úhlu čela

(γ) na řezný příkon. Zjistil, že se snížením úhlu čela (γ) se zvyšuje řezný příkon. Dále je tento vliv potvrzen i ve výzkumu Kubš a Barcík (2014). Stejný výsledek vlivu úhlu čela na řezný příkon potvrdil i Koch (1956). Z výše uvedeného vyplývá, vliv faktorů frézování na energetickou náročnost u rostlého dřeva, je důležité tyto závislosti potvrdit i u aglomerovaných materiálů na bázi dřeva ve srovnání s překližovanými materiály.

Wilkowski *et al.* (2011) zjistil ve svém výzkumu, že tepelně modifikované dřevo oproti dřevu neupravenému, vykazuje při obrábění nižší spotřebu energie.

Nástroj jako takový může ovlivnit celkovou energetickou náročnost obrábění v závislosti na jeho opotřebením. Itaya a Tsuchiya (2003) zjistili, že s opotřebením řezného klínu se snižuje schopnost nástroje obrábět materiál. To ve svém výzkumu, který se zaměřil na porovnání spotřeby energie obráběcího procesu a opotřebením nástroje, zjistil i Aknouche (2009). Ukázalo se, že s rostoucím opotřebením řezného klínu roste i spotřeba energie při obrábění.

Jako další velmi důležitý faktor, který ovlivňuje energetickou náročnost procesu, je velikost úběru materiálu. Tento faktor se dá těžko ovlivnit, protože se zpravidla musí nastavit určitý úběr tak, aby vznikl požadovaný výsledný obrobek. Nicméně závislost mezi úběrem a řezným příkonem je podle výzkumu Krauss (2016) následující: se zvýšením úběru se zvyšuje řezný příkon. Při ovlivnění energetické náročnosti se lze také zaměřit na obráběný materiál. Materiál, respektive jeho hustota, velmi ovlivňuje spotřebu energie procesu obrábění (Boucher *et al.*, 2007). Stejně jako velikost úběru, tak i materiál a jeho hustotu lze jen těžko ovlivnit. Nabízelo by se způsob snížení energetické náročnosti, pokud by se používal materiál s nižší hustotou (např. různé hustoty u MDF), ale většinou je předem dáno kde bude výsledný produkt použit a tím je dán i jeho materiál a také jeho kvalita.

Energetická náročnost procesu se dá vyjádřit různými veličinami, zpravidla se používá řezný příkon, který ukáže celkovou spotřebu stroje při obráběcím procesu.

3.4.1 Práce a řezný výkon

Vzorce v této podkapitole, která se věnuje výpočtům práce a řezného výkonu, jsou převzaty z publikace *Delenie a obrábanie dreva* (Siklienka a Kminiak, 2013a).

3.4.1.1 Výpočet práce

$$A_e = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \quad [J] \quad (4)$$

Kde:

A_1 – práce dispergovaná (práce pro vytvoření nového povrchu) [J]

A_2 – práce plastických deformací [J]

A_3 – práce pružných deformací [J]

A_4 – práce tření [J].

Práce na odebrání materiálu A_e se skládá z několika složek. Práce dispergovaná A_1 se spotřebuje na přemístění určitého množství molekul z vnitřní části obrobku na jeho povrch (Siklienka a Kminiak, 2013a).

Práce plastických deformací A_2 se spotřebuje na plastické deformace obrobku. To v praxi znamená, že musíme uvažovat jak plastickou deformaci obrobku, tak plastickou deformaci třísky. Velikost této práce ovlivňuje druh a jakost obrobku, geometrie řezného nástroje a řezné podmínky. Práce plastických deformací se mění na teplo (Siklienka a Kminiak, 2013a).

Práce pružných deformací A_3 se spotřebuje na deformace pružné. Tyto deformace vyvolá nůž při pohybu v obrobku. Práce pružných deformací se přemění na teplo (Siklienka a Kminiak, 2013a).

Práce tření A_4 se skládá ze dvou částí. První část je práce tření odcházející třísky po čele nástroje. Druhá část je práce tření hřbetu nástroje o obrobek. Práce je závislá na koeficientu vnějšího tření, který závisí na řezné rychlosti, řezném tlaku a teplotě, dále je tato práce závislá na úhlu řezného nástroje, na stavu řezných ploch nástroje a na typu třísky (Siklienka a Kminiak, 2013a).

3.4.1.2 Výpočet práce na odebrání materiálu A_e z hlediska pohybu

Práce potřebná na odebrání určitého množství materiálu z obrobku A_e je definovaná jako součet práce řezání a práce posuvu.

$$A_e = A_c + A_f \quad [J] \quad (5)$$

Kde:

A_c – práce řezání [J]

A_f – práce posuvu [J].

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

$$A_c = \int_0^t F_c * v_c * dt \quad [J] \quad (6)$$

Kde:

F_c – řezná síla [N]

v_c – řezná rychlost [m/s].

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

$$A_f = \int_0^t F_f * v_f * dt \quad [J] \quad (7)$$

Kde:

F_f – řezná síla [N]

v_f – posuvná rychlost [m/s].

3.4.1.3 Výpočet výkonu a příkonu

Řezný výkon P_c je množství práce vykonané za jednotku času.

$$P_c = \frac{A_c}{T} \quad [W] \quad (8)$$

Kde:

A_c – práce řezání [J]

T – čas [s].

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

$$P_c = F_c * v_c \quad [W] \quad (9)$$

Kde:

F_c – řezná síla [N]

v_c – řezná rychlost [m/s].

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

$$P_f = F_f * v_f \quad [W] \quad (10)$$

Kde:

F_f – posuvná síla [N]

v_f – posuvná rychlost [m/s].

Následně platí, že celkový výkon P je definován jako:

$$\begin{aligned} P &= (F_c + F_f) * (v_c + v_f) \\ P &= F_c * v_c + F_f * v_f + F_c * v_f + F_f * v_c \\ P &= P_c + P_f + F_c * v_f + F_f * v_c \end{aligned} \quad (11)$$

V případě, že platí $\varphi = 90^\circ$ potom:

$$\begin{aligned} F_c * v_f + F_f * v_c &= 0 \\ P &= P_c + P_f \quad [W] \end{aligned} \quad (12)$$

Kde:

P_c – řezný výkon [W]

P_f – výkon potřebný pro posuv [W].

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

$$P_p = \frac{W}{T} \quad [W] \quad (13)$$

Kde:

P_p – řezný příkon [W]

W – celková práce vykonaná strojem [J]

T - čas [s].

Dále je možné definovat řezný příkon jako součin napětí, proudu a účinníku (Peschel, 2002):

$$P_p = U * I * \cos \varphi \quad [W] \quad (14)$$

Kde:

U – napětí [V]

I – proud [A]

$\cos \varphi$ – účinník [-].

Přepočet mezi řezným výkonem P_c a příkon P_p je definován následovně:

$$P_p = \frac{P_c}{\eta} \quad [W] \quad (15)$$

Kde:

η - celková účinnost [-].

Princip měření řezného příkonu pomocí přístroje Metrel Power Q je založený na snímání změny odběru proudu I, aktuální hodnoty napětí U a na základě snímání fázového posunu účinníku $\cos \varphi$. Na základě těchto hodnot lze vypočítat příkon elektromotoru (vzorec 14).

3.5 Měření jakosti povrchu

Vývoj určování jakosti obrobeného povrchu doprovází samotné obrábění. Vždy se musí dosáhnout určité kvality v závislosti na použití výsledného produktu, případně v závislosti na další úpravě. Dříve nebyly nároky na jakost povrchu tak vysoké, stačilo užití porovnávacích metod. S postupným vývojem materiálů, nástrojů na obrábění a obráběcích strojů se však nároky na jakost a přesnost zvýšily a začaly se používat dotykové a bezdotykové profilometry (Tiryaki *et al.*, 2015).

Podle Rouska *et al.* (2010) lze rozdělit vyhodnocování kvality na tři metody:

- porovnávací,
- dotykové,
- bezdotykové.

Porovnávací metody jsou dvě, vizuální a porovnávací. Obě vycházejí z lidských smyslů, a proto jsou značně subjektivní. Porovnávací metoda je založena na hmatovém srovnání jednotlivých vzorků se stupnicí (etalony). Jde o snahu přiřadit jednotlivé vzorky co nejbližšímu etalonu stupnice. Jako další možnost je vizuální vyhodnocení zrakem. Při těchto metodách by měli být hodnotící zkušení odborníci z oboru, čímž se docílí lepších výsledků (Rousek *et al.*, 2010; Whitehouse, 2004; Stumbo, 1963).

Dotykové metody jsou založeny na přístrojovém měření. Přístroje na měření jakosti pomocí dotykové metody se nazývají drsnoměry. Nevýhoda dotykové metody je v možnosti poškození měřeného povrchu. Je zde totiž možnost, že při vyvinutí větší síly na měřený povrch mohou způsobit škrábance nebo jiné defekty (Rousek *et al.*, 2010; Whitehouse, 2004; Stumbo, 1963).

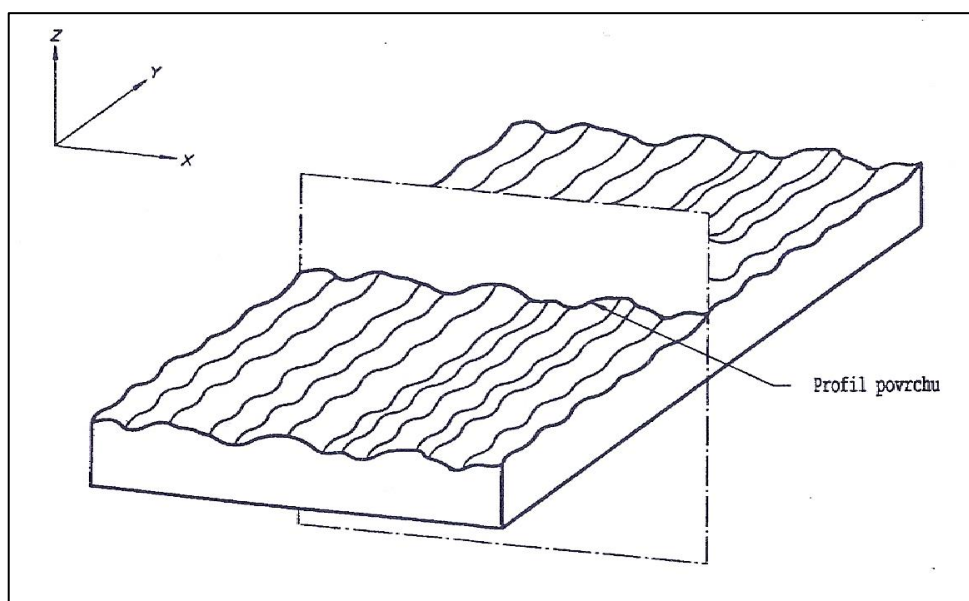
Bezdotykové metody jsou velmi přesné a v dnešní době se stále více využívají. Je poměrně velké množství bezdotykových metod, které fungují na odlišných systémech (fotometrické hodnocení, elektronové, skenovací, laserové atd.) (Rousek *et al.*, 2010; Whitehouse, 2004; Stumbo, 1963).

Jakost povrchu se zpravidla vyhodnocuje pomocí profilu drsnosti a vlnitosti. K vyhodnocení těchto profilů se ve většině výzkumů používají průměrné aritmetické úchytky profilu drsnosti a vlnitosti.

3.5.1 Definování průměrných aritmetických úchylek profilu drsnosti a vlnitosti

Průměrné aritmetické úchylky profilu drsnosti (R_a) a vlnitosti (W_a) jsou výškové parametry profilu. Dají se definovat jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky (ČSN EN ISO 4287, 1999).

Podle normy ČSN EN ISO 4287 (1999) je profil povrchu definován souřadnicovým systémem a skutečným povrchem. Souřadnicový systém je systém, ve kterém jsou definovány parametry struktury povrchu. Skutečný povrch je povrch omezující těleso a oddělující ho od okolního prostředí. Profil povrchu pak vzniká jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny.

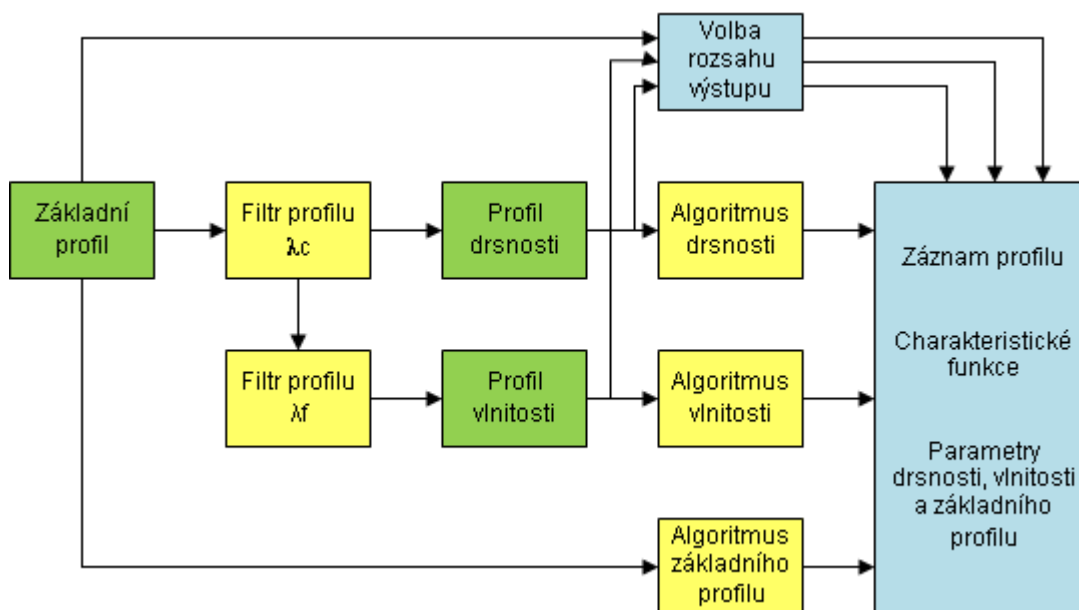


Obr. 16: Profil povrchu (ČSN EN ISO 4287, 1999)

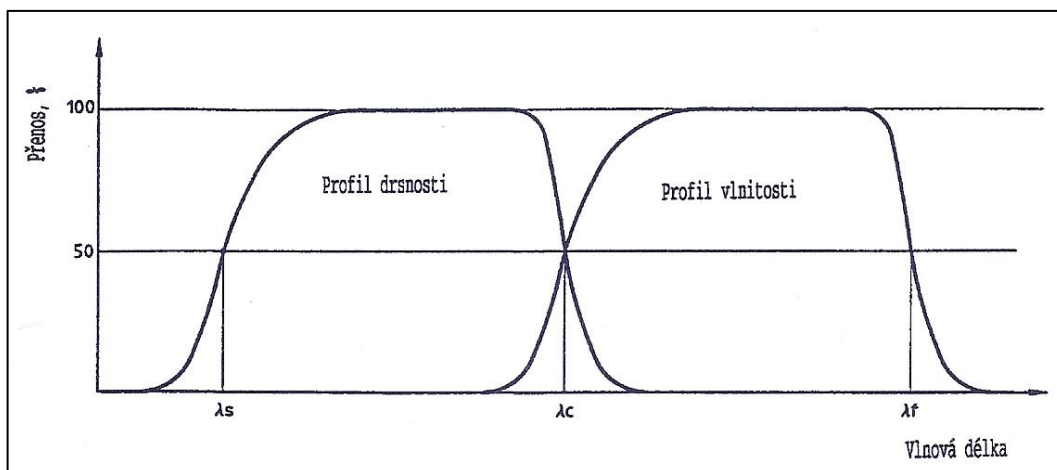
Profil povrchu slouží k odvození jednotlivých profilů, kterými jsou základní profil, profil drsnosti a profil vlnitosti. Na základě těchto profilů jsou dále charakterizovány jednotlivé parametry. Pro vyhodnocení struktury povrchu je potřeba provést oddělení jednotlivých složek profilu jejich filtrováním. Pro tyto účely se používá filtr profilu, který rozděluje profil na dlouhovlnné a krátkovlnné složky (ČSN EN ISO 4287, 1999).

- Filtr profilu λ_s : definuje rozhraní mezi úplně nejkratšími složkami vln přítomnými na povrchu a drsností.
- Filtr profilu λ_c : definuje rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti.
- Filtr profilu λ_f : definuje rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu.
- Cut-off je mezní vlnová délka filtru profilu.

Profil drsnosti je odvozen ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek pomocí filtru λ_c . Na základě profilu drsnosti lze vyhodnotit parametry drsnosti. Profil vlnitosti je odvozen postupnou aplikací filtru profilu λ_c a filtru λ_f na základní profil. Použitím filtru profilu λ_c dochází k potlačení krátkovlnných složek a filtrem λ_f dochází k potlačení dlouhovlnných složek. Na základě profilu vlnitosti lze vyhodnotit parametry vlnitosti (ČSN EN ISO 4287, 1999).



Obr. 17: Vývojový diagram pro posuzování povrchu



Obr. 18: Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti
(ČSN EN ISO 4287, 1999)

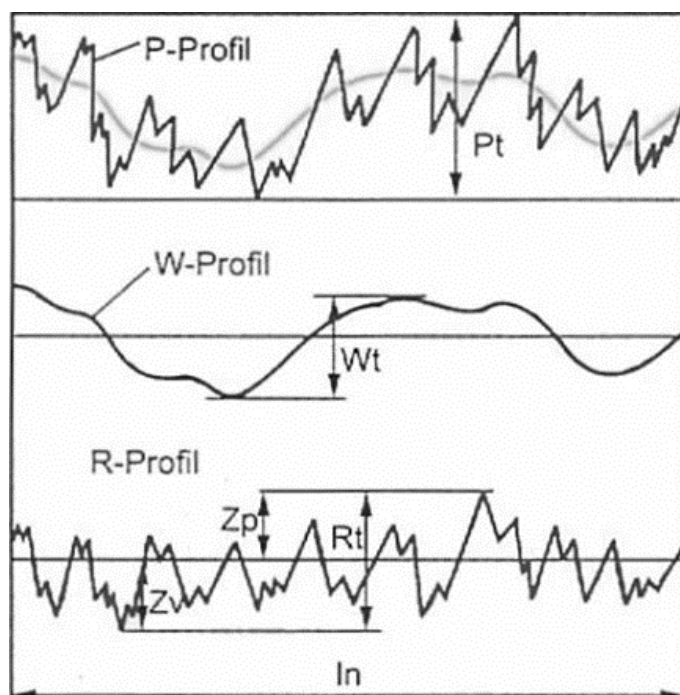
V tabulce 2 jsou definovány základní parametry jakosti povrchu podle ČSN EN ISO 4287 (1999).

Tab. 2: Parametry jakosti povrchu podle normy ČSN EN ISO 4287 (1999)

Název	Značení	Popis
Základní délka	l_p, l_r, l_w	Délka ve směru osy X použitá pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil.
Vyhodnocovaná délka	l_n	Délka ve směru osy X, použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu.
Geometrické parametry	P-parametr	Parametr vypočítaný ze základního profilu.
	R-parametr	Parametr vypočítaný z profilu drsnosti.
	W-parametr	Parametr vypočítaný z profilu vlnitosti.
Výstupek profilu		Z povrchu ven směřující část posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body na průsečíku profilu s osou X.
Prohlubeň profilu		Dovnitř směřující část posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body na průsečíku profilu s osou X.

Hodnota pořadnice	$Z(x)$	Výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x .
Výška výstupku profilu	Z_p	Vzdálenost mezi osou X a nejvyšším bodem výstupku profilu.
Hloubka prohlubně profilu	Z_v	Vzdálenost mezi osou X a nejnižším bodem prohlubně profilu.
Výška prvku profilu	Z_t	Součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu.
Šířka prvku profilu	X_s	Délka úseku osy X protínající prvek profilu.
Celková výška profilu	P_t, R_t, W_t	Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky.

Některé složky profilu povrchu jsou graficky znázorněny na obrázku 19 a vysvětlení jednotlivých prvků profilu je v tabulce 2.



Obr. 19: Složky profilu povrchu

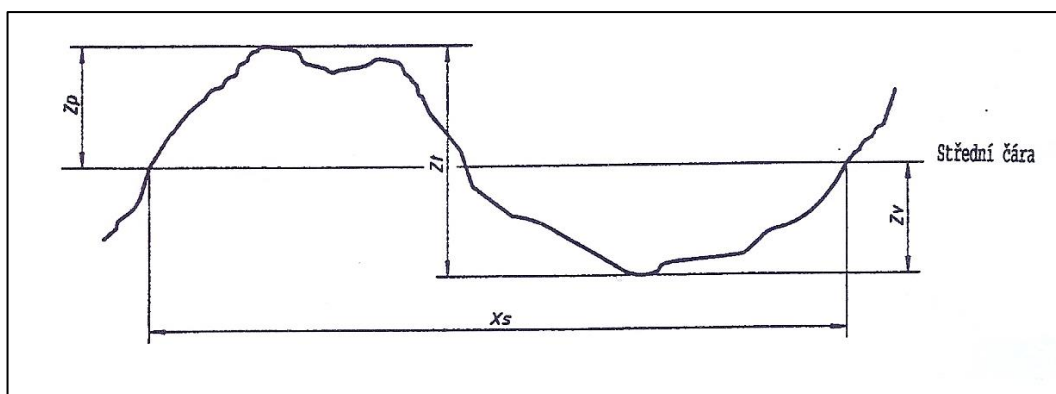
Výškové parametry (průměrné hodnoty pořadnic) mohou být podle ČSN EN ISO 4287 (1999) definovány průměrnou aritmetickou úchylkou posuzovaného profilu a délkové parametry mohou být definovány průměrnou šířkou prvků profilu.

Průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu (P_a , R_a , W_a) se vypočítají jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky podle vzorce (16), kde $l = l_p$, l_r případně l_w .

$$P_a, R_a, W_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (16)$$

Průměrná šířka prvků profilu (P_{Sm} , R_{Sm} , W_{Sm}) se vypočítá jako aritmetický průměr šířek X_{Si} prvků profilu v rozsahu základní délky podle vzorce (17).

$$P_{Sm}, R_{Sm}, W_{Sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{Si} \quad (17)$$



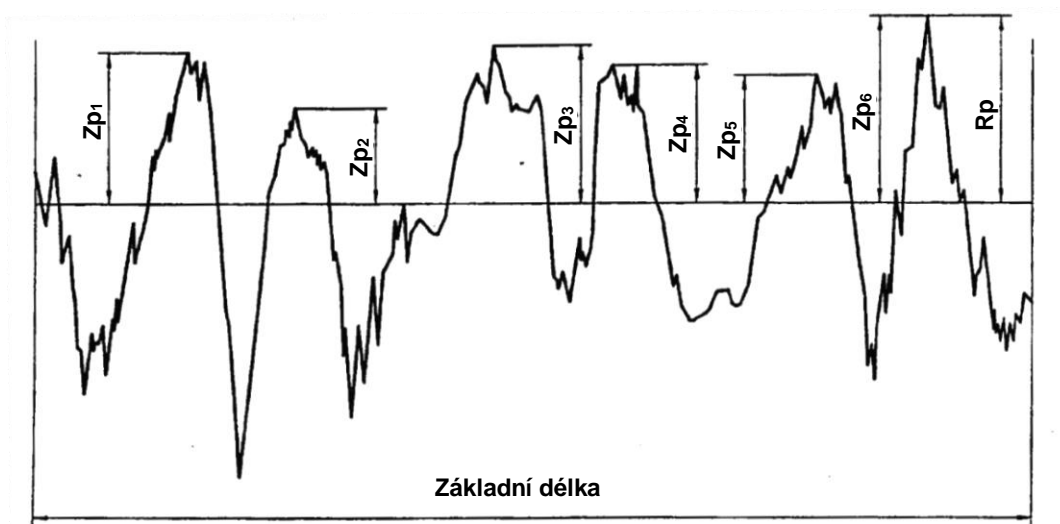
Obr. 20: Prvek profilu (ČSN EN ISO 4287, 1999)

ČSN EN ISO 4287 (1999) definuje 3 druhy středních čar profilu:

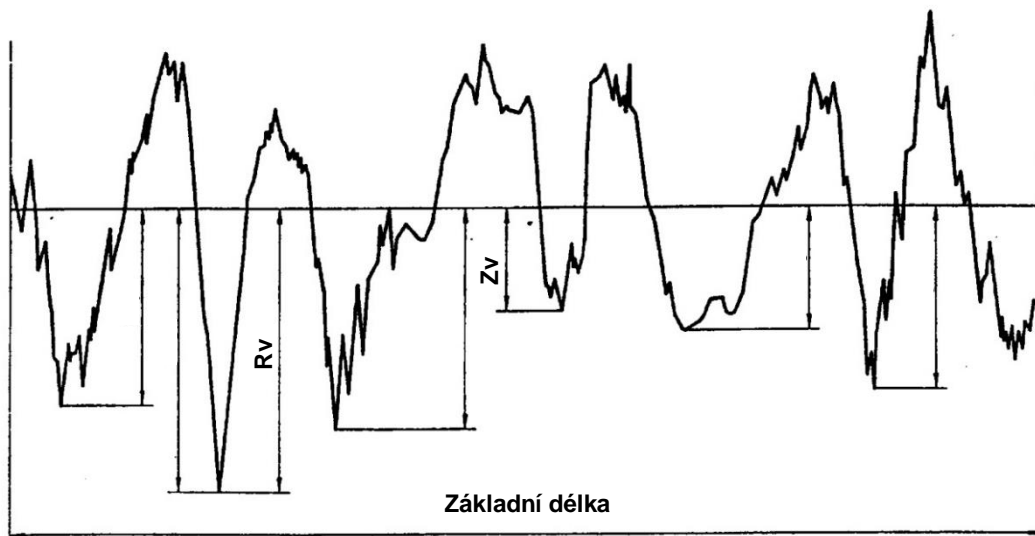
1. Střední čára profilu drsnosti odpovídá dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu λ_c .
2. Střední čára profilu vlnitosti odpovídá dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu λ_f .
3. Střední čára základního profilu je čára nejmenších čtverců přiléhajících jmenovitému tvaru základního profilu.

Tab. 3: Výškové parametry profilu povrchu (výstupky a prohlubně) podle ČSN EN ISO 4287 (1999)

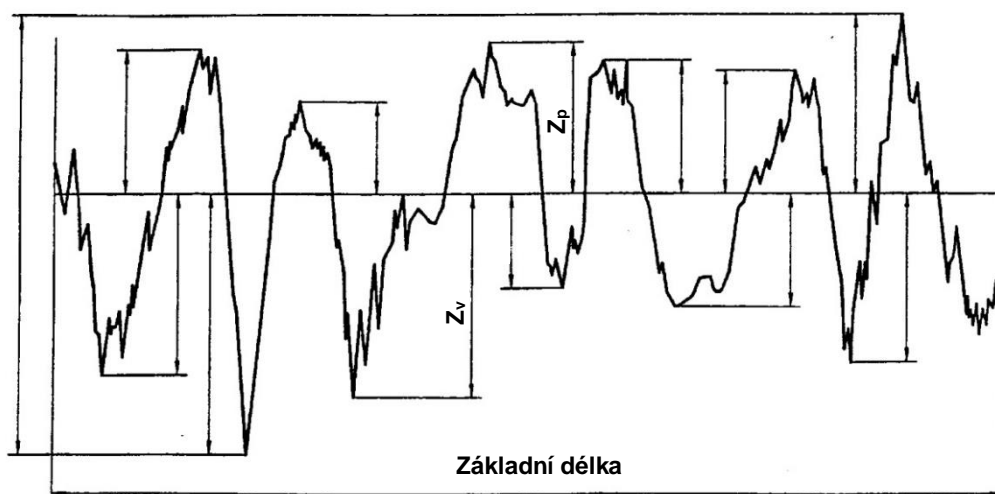
Název	Značení	Popis
Největší výška výstupku profilu	P_p, R_p, W_p	Výška Z_p nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky (Obr. 21).
Největší hloubka prohlubně profilu	P_v, R_v, W_v	Hloubka Z_v nejnížší prohlubně profilu v rozsahu základní délky (Obr. 22).
Největší výška profilu	P_z, R_z, W_z	Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnížší prohlubně profilu v rozsahu základní délky (Obr. 23).
Průměrná výška prvků profilu	P_c, R_c, W_c	Průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu v rozsahu základní délky (Obr. 24).
Celková výška profilu	P_t, R_t, W_t	Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnížší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky (Obr. 20).



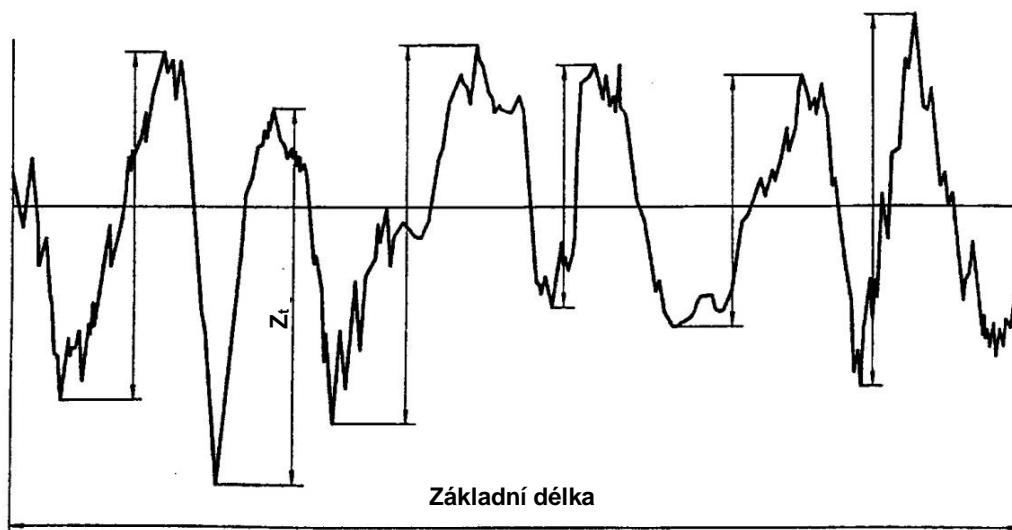
Obr. 21: Největší výška výstupků profilu (příklad profilu drsnosti) (ČSN EN ISO 4287, 1999) Z_p – výška výstupků profilu



Obr. 22: Největší hloubka prohlubní profilu (příklad profilu drsnosti) (ČSN EN ISO 4287, 1999) Z_v – hloubka prohlubně profilu



Obr. 23: Největší výška profilu (příklad profilu drsnosti) (ČSN EN ISO 4287, 1999) Z_p – výška výstupků profilu, Z_v – hloubka prohlubně profilu



Obr. 24: Výška prvků profilu (příklad profilu drsnosti) (ČSN EN ISO 4287, 1999)

Z_t – výška prvku profilu

Tab. 4: Výškové parametry profilu povrchu (průměrné hodnoty pořadnic)
podle ČSN EN ISO 4287 (1999)

Název	Značení	Popis
Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	P_a, R_a, W_a	Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.
Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu	P_q, R_q, W_q	Kvadratický průměr pořadnic $Z(x)$, v rozsahu základní délky.
Šikmost posuzovaného profilu	P_{sk}, R_{sk}, W_{sk}	Podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty P_q, R_q nebo W_q v rozsahu základní délky.
Špičatost posuzovaného profilu	P_{ku}, R_{ku}, W_{ku}	Podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty P_q, R_q nebo W_q v rozsahu základní délky.

Tab. 5: Délkové a tvarové parametry profilu povrchu podle ČSN EN ISO 4287 (1999)

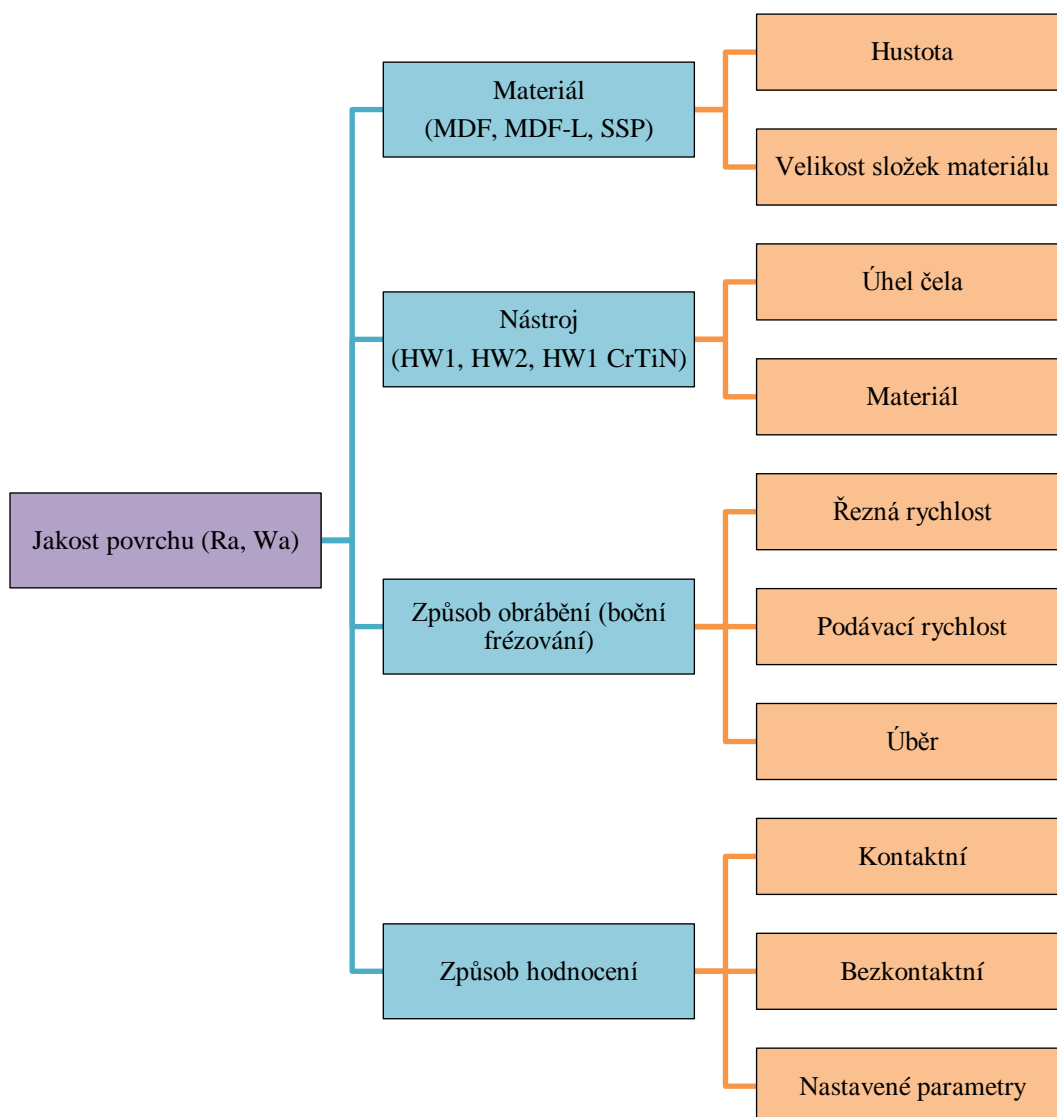
Název	Značení	Popis
Průměrná šířka prvků profilu	PSm, RSm, WSm	Aritmetický průměr šířek Xs prvků profilu v rozsahu základní délky.
Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu	PΔq, RΔq, WΔq	Kvadratický průměr sklonů pořadnic dZ/dX v rozsahu základní délky.

Tab. 6: Křivky a odpovídající parametry profilu povrchu podle ČSN EN ISO 4287 (1999)

Název	Značení	Popis
Materiálový poměr profilu (nosný podíl)	Pmr(c), Rmr(c), Wmr(c)	Poměr délky materiálu elementů profilu MI(c) na dané úrovni c, k vyhodnocované délce.
Křivka materiálového poměru profilu (nosná křivka)		Křivka představující materiálový poměr profilu v závislosti na výšce úrovně.
Rozdíl výšky úseku profilu	Pδc, Rδc, Wδc	Svislá vzdálenost mezi úrovněmi dvou úseků daného materiálového poměru.
Vzájemný materiálový poměr	Pmr, Rmr, Wmr	Materiálový poměr určený na úrovni části profilu Rδc, vztažený k úrovni C0.
Empirické rozdělení výšek profilu		Hustota pravděpodobnosti pořadnic Z(x) v rozsahu vyhodnocované délky.

3.5.2 Faktory ovlivňující jakost povrchu

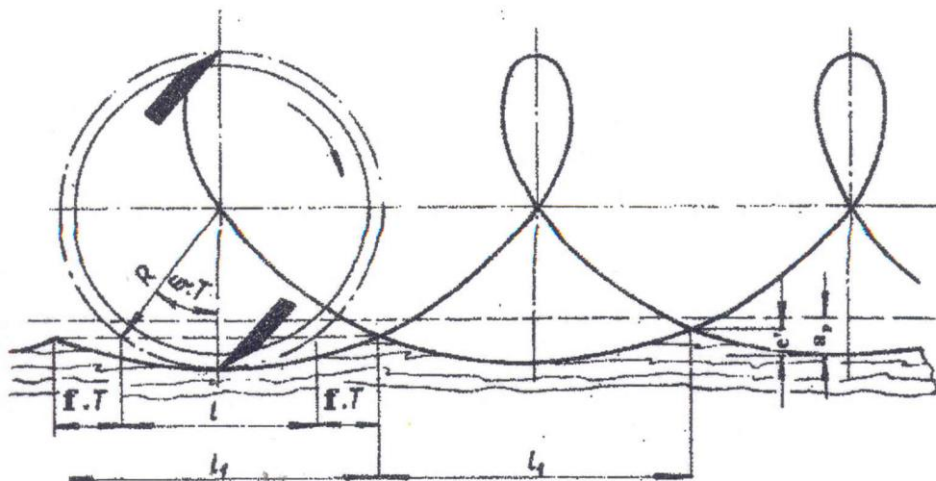
Je logické, že způsob jakým dochází k obrábění určitého materiálu, se musí promítnout do výsledné jakosti povrchu (Taylor *et al.*, 1999). Podle výzkumu Kilic *et al.* (2006), který se zabýval porovnáním drsnosti povrchu po řezání a broušení dřeva, se ukázal rozdíl mezi těmito způsoby obrábění, přičemž Ra při broušení dřeva vykazovalo nižší hodnoty. Každý způsob obrábění má svou specifickou problematiku, co se týká jakosti povrchu (Kminiak a Gaff, 2015; Sögütli, 2010).



Obr. 25: Faktory ovlivňující jakost povrchu zohledněny v předkládané práci

Dalším faktorem, který ovlivňuje jakost povrchu, je stáří materiálu. Podle výzkumu Ostman (1983) má stárnutí materiálů velmi nepříznivý vliv na jejich jakost. Zjistil, že umělé stárnutí ukazovalo větší zhoršení jakosti oproti přirozenému. Mezi další významné faktory z hlediska vlivu na jakost povrchu patří nastavení parametrů obráběcího procesu, použitý nástroj a jeho geometrie, ale taky materiál, který se obrábí (Sitkei a Magoss, 2003).

Při frézování, což je obrábění pomocí nástroje, který se otáčí, budou vznikat vlnky (Lisičan, 1996), neboli frézování vždy doprovází vznik vlnitosti na obrobeném povrchu (Jackson *et al.*, 2002). Při nerovnoměrném osazení nožů bude kvalita povrchu horší. Pokud budou nože osazeny správně, vzniklá vlnitost na obrobeném povrchu bude vypadat jako na Obr. 26.



Obr. 26: Šířka vlnek (Lisičan, 1996)
 R – poloměr řezné kružnice

Problematika jakosti obráběného povrchu a faktorů, které jakost ovlivňují, je téma, kterému se věnuje mnoho výzkumů a studií po celém světě. V následujících výzkumech jsou uvedeny různé faktory a jejich vliv na výslednou jakost povrchu po obrábění.

Podle výzkumu Kvietková *et al.* (2015d), který se věnoval vlnitosti (reprezentované aritmetickou úchylkou profilu vlnitosti – W_a) lze konstatovat, že při zvýšení řezné rychlosti tyto hodnoty klesaly. Naopak při zvyšování podávací

rychlosti hodnoty vlnitosti rostly. Vlnitost byla hodnocena na termicky modifikovaném dřevě javoru.

Rousek *et al.* (2010) zkoumal vliv řezné a podávací rychlosti při frézování smrku a buku, a dále porovnával různé metody hodnocení kvality povrchu. Z výzkumu vyplývá, že při použití některých metod nelze jednoznačně určit závislost řezných parametrů na jakost povrchu, oproti tomu při hodnocení expertní metodou se závislost prokázala. Konstatoval, že vliv řezné a posuvné rychlosti na jakost povrchu se prokázala, ale jasné závislosti lze jen těžko určit.

Škaljić *et al.* (2009) zkoumal vliv řezné rychlosti na Ra a dále vliv druhu materiálu na Ra. Statisticky významný rozdíl prokázal v některých případech. Při srovnání podávacích rychlostí 6 a 12 m/min se prokázal statisticky významný rozdíl u tří měřených materiálů, u dubu se významný rozdíl neprokázal. Při dalším srovnání podávací rychlosti 6 m/min s rychlostmi 18 a 24 m/min se statisticky významný rozdíl prokázal u všech zkoumaných druhů dřeva. Naopak při porovnání podávacích rychlostí 18 a 24 m/min se statisticky významný rozdíl neprokázal u žádné dřeviny.

Rousek *et al.* (2012a) ve svém výzkumu poukazuje na to, že v praktickém provozu nelze hodnotit vlnitost a drsnost odděleně. Tento fakt dokládá tvrzením, že drsnost a vlnitost se vždy vyskytuje na obráběném povrchu v určité kombinaci, a že lidské oko většinou nedovede rozlišit co je vlnitost a co drsnost. Dále konstatoval, že různé nástroje se chovají úplně jinak při obrábění různých druhů dřeva i při nastavení různých parametrů. Musí se tedy velmi pečlivě volit obráběcí nástroj v závislosti na technologických podmínkách v technologickém procesu.

Z výzkumu Wilkowski *et al.* (2015), který se zabýval mimo jiné vlivem řezných parametrů při frézování MDF, vyplývá, že při konstantních otáčkách vřetene a zvyšujících se hodnotách posuvu na zub se zvětšuje drsnost obrobeného povrchu.

Podle výsledků z výzkumu (Barcík *et al.*, 2014b), jenž se zabýval zkoumáním termicky modifikovaného dřeva borovice lesní při rovinném frézování, vyplývá závislost jednotlivých zkoumaných parametrů na výslednou jakost povrchu reprezentovanou průměrnou aritmetickou úchylkou profilu drsnosti (Ra). Podle závěrů tohoto výzkumu se dá definovat, že kvalita obrobeného povrchu závisí

na sledovaných faktorech seřazených podle významnosti od nejvýznamnějšího po nejméně významný: termická úprava, úhel čela, řezná rychlost a rychlost posuvu. Dále bylo ve výzkumu konstatováno, že termicky modifikované dřevo je značně nehomogenní materiál a tudíž jeho výsledný povrch je značně závislí nejen na způsobu obrábění, ale také na anatomické stavbě dřeva.

Kvietková *et al.* (2015b) se věnuje vlivu řezných parametrů (řezná rychlost a podávací rychlost) při frézování termicky modifikovaného březového dřeva. Je patrné, že se zvyšováním řezné rychlosti se snižovala průměrná aritmetická úchylka povrchu drsnosti (Ra) a opačný efekt se potvrdil u podávací rychlosti. Zvyšováním posuvné rychlosti se zvyšovala drsnost (Ra) obráběného povrchu. Ve svém dalším výzkumu (Kvietková *et al.*, 2015c), který se zabýval podobnou problematikou, ale z pohledu jiného materiálu (bukové dřevo) se opět prokázalo, že při zvýšení řezné rychlosti se snižovaly hodnoty Ra.

Siklienka a Adamcová (2012) zjišťovali vliv druhu materiálu nástroje na kvalitu opracovaného povrchu MDF. Zjistili, že chemické složení nožů (velikost zrna) a jejich drsnost ve velké míře ovlivňují kvalitu opracovaného povrchu.

Korkut a Akgül (2007) zkoumali závislost teploty sušení na výslednou jakost povrchu u dubu. Zjistili, že při vyšších teplotách sušení bylo dosaženo lepší jakosti povrchu.

Z výzkumu vlnitosti při frézování termicky modifikovaného březového dřeva (Gaff *et al.*, 2015) lze vyvodit závislosti řezné a podávací rychlosti na vlnitost reprezentovanou průměrnou aritmetickou úchylkou (Wa). Podle výzkumu se při rostoucí řezné rychlosti snižuje Wa. Při zvyšování podávací rychlosti se zvyšuje hodnota Wa. Nejlepšího povrchu z hlediska vlnitosti lze tedy dosáhnout při vysokých řezných rychlostech a co nejnižší podávací rychlosti.

Výzkum Bajić *et al.* (2008) se zabýval modelováním parametrů při čelním frézování. Poukázal na to, že nejvýznamnějším faktorem, který má vliv na drsnost povrchu, je podávací rychlost. Z tohoto výzkumu dále vychází, že nejlepší kvality z hlediska drsnosti povrchu lze dosáhnout při nízkých podávacích rychlostech a vysokých řezných rychlostech.

Novák *et al.* (2011) se ve svém výzkumu věnoval mimo jiné závislosti WSm (průměrná šířka prvků vlnitosti) na druhu dřeva. Zjistil rozdíly, které vycházely z různorodé stavby rostlého dřeva.

Thoma *et al.* (2015) se věnoval zkoumání problematiky vlivu jakosti povrchu v závislosti na druhu dřeviny, především její hustotě. Zjistil, že hustota jako taková nemá jasně daný vliv na drsnost povrchu dřeva. Větší vliv se prokázal spíše u stavby dřeva, která byla odpovědná za drsnost povrchu.

Vliv metody měření jakosti povrchu zjistil ve svém výzkumu Budakci *et al.* (2013), stejně jako Hendarto *et al.* (2006)

Bendikiene a Keturakis (2016) zjistili, že drsnost povrchu březového dřeva závisí především na anatomických vlastnostech daného druhu.

4 METODIKA

Metodiku disertační práce je možné na základě stanoveného cíle rozdělit do několika bodů.

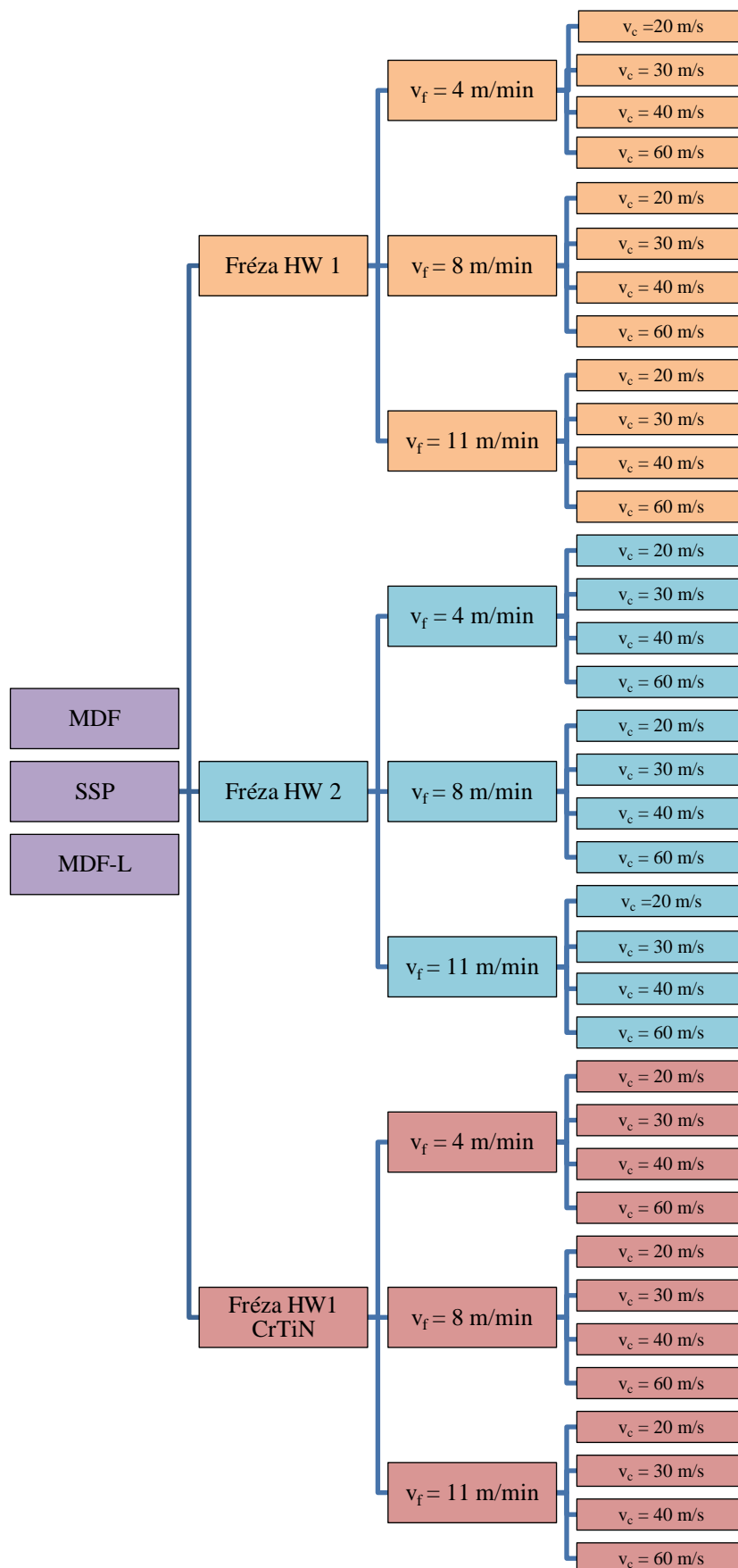
Zjištění vlivu vybraných faktorů:

1. Obráběný materiál: MDF, MDF-L, SSP.
2. Materiál nástroje: fréza HW1, fréza HW2, fréza HW1 CrTiN.
3. Podávací rychlost: 4 m/min, 8 m/min, 11 m/min.
4. Řezná rychlost: 20 m/s, 30 m/s, 40 m/s, 60 m/s.

na sledované charakteristiky, kterými jsou:

1. Množství aktivní energie spotřebované při obrábění.
2. Kvalita povrchu, která byla hodnocena pomocí:
 - Ra – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti,
 - Wa – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu vlnitosti.
3. Metoda měření kvality povrchu:
 - kontaktní metoda,
 - bezkontaktní metoda.

Následující schéma (Obr. 27) znázorňuje všechny proměnné faktory, z čehož vyplývá 108 variant pro zjištění energetické náročnosti procesu obrábění a následného zjištění Ra a Wa.



Obr. 27: Kategorizace souborů zkušebních těles
 (v_f - podávací rychlost; v_c - řezná rychlost)

4.1 Použité materiály

Materiály použité pro frézování byly MDF (medium-density fibreboard) v surovém stavu, MDF-L (medium-density fibreboard - laminated) s jednostrannou laminací a SSP (smrková spárovka).

Veškerý materiál byl zakoupen ve velkoplošných formátech u společnosti Démos-Trade a.s. Výrobce MDF a MDF-L byla firma DDL - Dřevozpracující družstvo Lukavec a výrobcem SSP byla firma Holzindustrie Schweighofer s.r.o., Tábor. MDF a MDF-L byly pořízeny v rozměrech 2790x2060x18 mm a SSP v rozměrech 2500x1220x18 mm.

Tab. 7: Vlastnosti použitých materiálů

Označení	Materiál	Hustota [kg/m ³]	Výrobce
MDF	Středně tvrdá dřevovláknitá deska	750	DDL - Dřevozpracující družstvo (Lukavec, Česká republika)
MDF-L	Středně tvrdá dřevovláknitá deska s laminací	730	DDL - Dřevozpracující družstvo (Lukavec, Česká republika)
SSP	Smrková spárovková deska	432	Holzindustrie Schweighofer s.r.o. (Tábor, Česká republika)

4.2 Použité nástroje a frézovací hlava

4.2.1 Frézovací žiletkové nože

Na samotné frézování byly použity tři rozdílné nástroje. Typové označení nožů je Leitz 5086, Leitz 6906 a jako poslední byl použit nůž typu Leitz 5086, na který byl aplikován povlak CrTiN pro zlepšení jeho kvality. Povlak byl vyroben společností SHM Šumperk a byl aplikován metodou PVD (physical vapour deposition). Všechny žiletkové nože byly zakoupeny od firmy Leitz v počtu: Leitz 5086 20 kusů a Leitz 6906 10 kusů. Přičemž 10 kusů Leitz 5086 bylo opatřeno povlakem CrTiN.



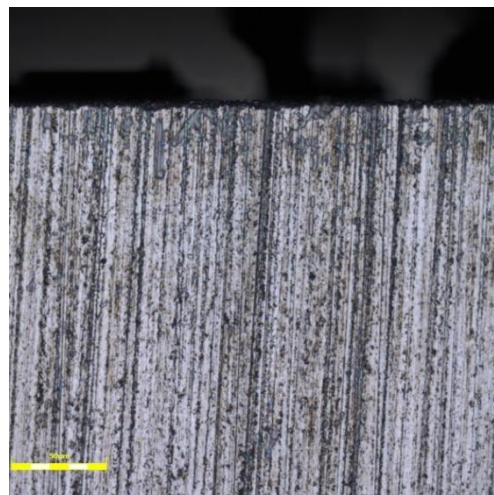
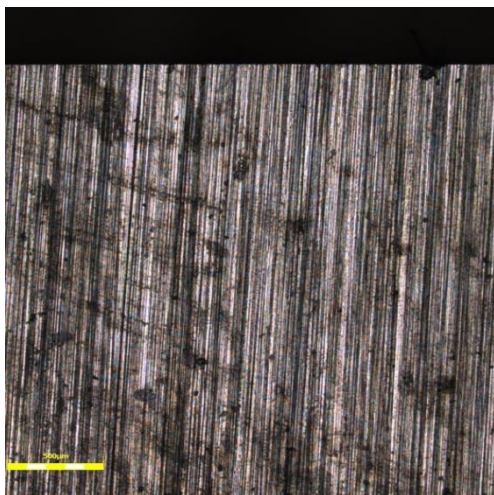
Obr. 28: Použité žiletkové nože

Tab. 8: Vlastnosti použitých nástrojů

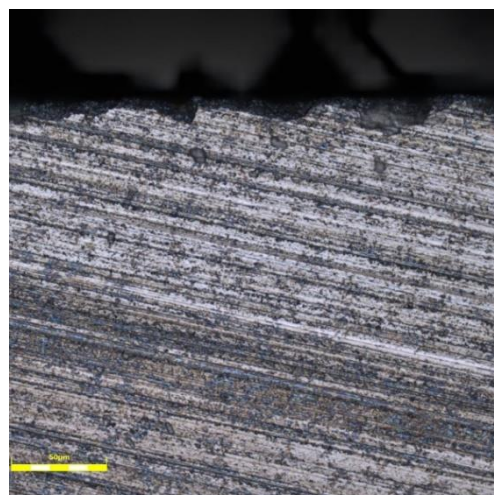
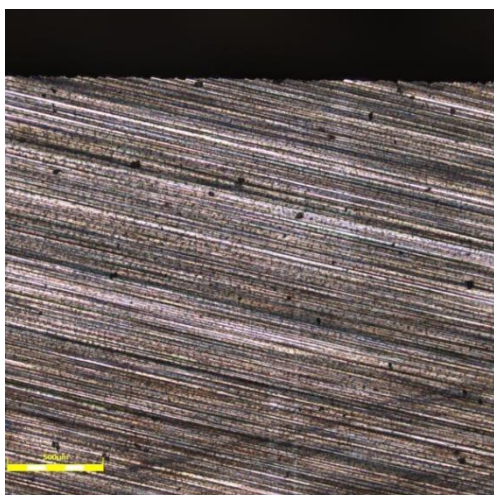
Označení	Materiál	Typ	Výrobce	Rozměry [mm]
HW1	Tvrdokov HW-05	Leitz 5086	Leitz Co.	50x12x1,5
HW2	Tvrdokov HW-03F	Leitz 6906	Leitz Co.	50x12x1,5
HW1 CrTiN	materiál HW1 + povlak CrTiN	Fréza s povlakem	SHM Šumperk	50x12x1,5

Tab. 9: Technické parametry použitých nástrojů

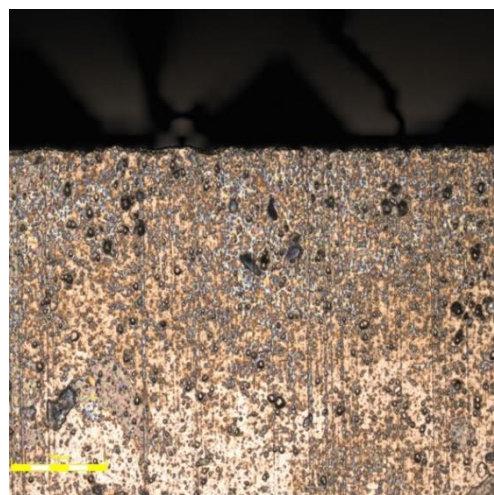
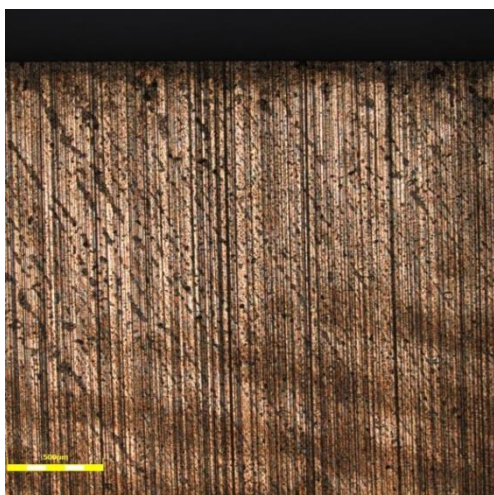
Označení	Mikrotvrdot [GPa]	Ra [μm]	Wa [μm]	Úhlová geometrie			
				Úhel hřbetu α	Úhel břítu β	Úhel čela γ	Úhel řezu δ
HW1	17	0,264	0,229	10°	60°	20°	70°
HW2	22	0,205	0,259				
HW1 CrTiN	30	0,154	0,082				



Obr. 29: Vlevo – nástroj HW1 5x zvětšený; Vpravo – nástroj HW1 50x zvětšený



Obr. 30: Vlevo – nástroj HW2 5x zvětšený; Vpravo – nástroj HW2 50x zvětšený



Obr. 31: Vlevo – nástroj HW1 CrTiN 5x zvětšený; Vpravo – nástroj HW1 CrTiN 50x zvětšený

4.2.2 Frézovací hlava

Frézovací hlava byla použita dvounožová o rozměrech 125x50x30 mm od společnosti Felder. Při frézování byly osazeny dvě totožné frézy. Při otáčkách vřetene 3000, 4500, 6000 a 9000 ot/min vychází řezná rychlost 20, 30, 40 a 60 m/s vypočtená podle vzorce:

$$vc = \frac{\pi * D * n}{60 * 1000} \quad [m/s] \quad (18)$$

Kde:

vc – řezná rychlost [m/s]

D – průměr frézovací hlavy [mm]

n – otáčky frézovací hlavy [ot/min].



Obr. 32: Frézovací hlava FELDER

4.3 Strojní vybavení

4.3.1 Frézka

Spodní svislá frézka FVS (ED, APT Line II; Tuttlingen, Německo) je určena na obrábění podélného i deskového materiálu a v závislosti na použité fríze lze obrábět aglomerované i masivní materiály. Pomocí přehození klínových řemenů lze nastavit požadované otáčky stroje a tím i řeznou rychlost.

Tab. 10: Parametry spodní svislé frézky FVS ,ED, APT Line II (Tuttlingen, Německo)

Proudová soustava	Příkon	Otáčky [ot/min]	Řezná rychlost pro průměr hlavy 125mm [m/s]	Rok výroby
360/220 V	4 kW	3000, 4500, 6000, 9000	20; 30; 40; 60	1975

4.3.2 Podávací zařízení

Podávací zařízení od firmy MAGGI je určeno pro posuv podélných dílců i deskového materiálu. Má čtyři fixní rychlosti, vpřed a vzad a měníme je takto: prvních dvou rychlostí docílíme záměnou ozubených kol uložených za krytem převodovky a další dvě rychlosti změníme otočením páčky vypínače na motoru s dvojitým vinutím (1400-2800 ot/min). Podávací zařízení je vybaveno přestavitelným univerzálním stojanem, který umožňuje nastavení stroje do libovolné pozice.

Tab. 11: Parametry podavače materiálu MAGGI, STEFF 2034 (Itálie)

Motor	Příkon kW	Otáčky [ot/min]	Podávací rychlost [m/min]	Rok výroby
400 V	0,6 – 0,8 kW	1400/2800	4, 8, 11, 22	2005

4.3.3 Formátovací kotoučová pila

Formátovací kotoučová pila SCM si300 class je vhodná pro řezání plošných materiálů na bázi dřeva i masivu. Pojezdový pracovní stůl o délce 3200 mm je vyroben z hliníkové slitiny s povrchovou úpravou.

Tab. 12: Parametry formátovací kotoučové pily SCM si300 class (Itálie)

Výkon motoru	Otáčky [ot/min]	Maximální výška řezu	Rok výroby
4 (5) kW	4000	100 mm	2012

4.4 Přístrojové vybavení

4.4.1 Měřicí přístroj METREL Power Q plus MI 2392

METREL je třífázový přístroj na analyzování kvality energie s přesností měření $\pm 3\%$ od společnosti METREL D.D. (Horjul, Slovinsko).



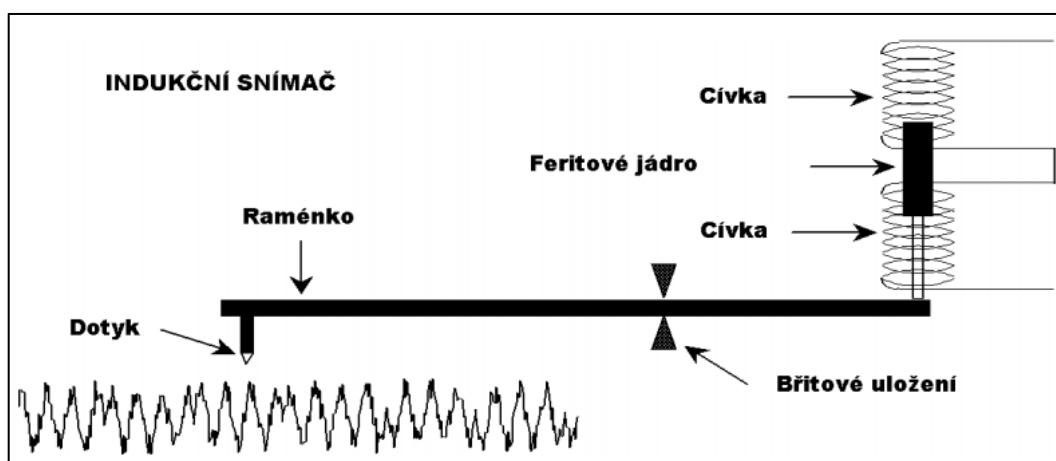
Obr. 33: Měřicí přístroj METREL Power Q plus MI 2392 (METREL, 2017)

4.4.2 Kontaktní profilometr FORM TALYSURF 50 Intra

Kontaktní přístroj FORM TALYSURF 50 Intra je drsnoměr na měření jakosti povrchu s 50 mm horizontální délkou snímání. Úchylka přímosti na 50 mm je 0,4 μm . Chyba měření kontaktního profilometru je $\pm 2 \%$.



Obr. 34: Kontaktní profilometr FORM TALYSURF 50 Intra



Obr. 35: Princip indukčního snímače (Havelková a Hiklová, 2014)

4.4.3 Laserový profilometr LEXT 3D OLS4100

Laserový mikroskop od společnosti Olympus, mimo jiné aplikovatelný pro zjišťování jakosti povrchu, je bezkontaktní optický přístroj na měření jakosti povrchu se zdrojem světla s polovodičovým laserem 405 nm s přesností měřených hodnot $\pm 2 \%$.

Tab. 13: Vlastnosti objektivu MPLAPON50XLEXT

Zvětšení	Zorné pole	Pracovní vzdálenost	Numerická apertura
1080x – 8640x	256-32 μm	0,35 mm	0,95



Obr. 36: Laserový profilometr LEXT 3D measuring laser microscope OLS4100

4.5 Zjištění hustoty a vlhkosti

4.5.1 Zjištění hustoty

Zjištění hustoty vzorků proběhlo podle normy ČSN EN 323 (1994).

Výpočet a vyjádření výsledků:

$$\delta_w = \frac{m_w}{a_w * b_w * l_w} = \frac{m_w}{V_w} \quad [kg/m^3] \quad (19)$$

Kde:

m_w – hmotnost zkušební tělesa při dané vlhkosti w [kg]

V_w – objem zkušební tělesa při dané vlhkosti w [m³]

δ_w – hustota zkušební tělesa při dané vlhkosti w [kg/m³]

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

4.5.2 Zjištění vlhkosti

Zjištění vlhkosti vzorků proběhlo podle normy ČSN EN 322 (1994). Hmotnostní vlhkost dřeva a materiálů na bázi dřeva byla stanovena jako procentuální podíl hmotnosti vody obsažené ve vlhkém vzorku a hmotnosti vzorku ve vysušeném stavu.

Výpočet a vyjádření výsledků:

$$W = \frac{m^1 - m^0}{m^0} * 100 \quad [\%] \quad (20)$$

Kde:

m^1 – hmotnost zkušební tělesa ve vlhkém stavu [g]

m^0 – hmotnost zkušební tělesa ve vysušeném stavu [g]

W – vlhkost [%].

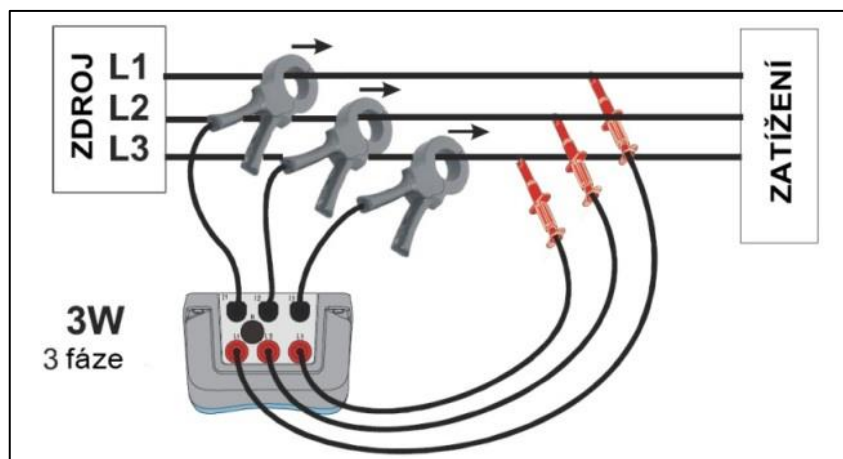
Výsledek se byl vyjádřen s přesností na 1,0 %.

4.6 Příprava zkušebních vzorků

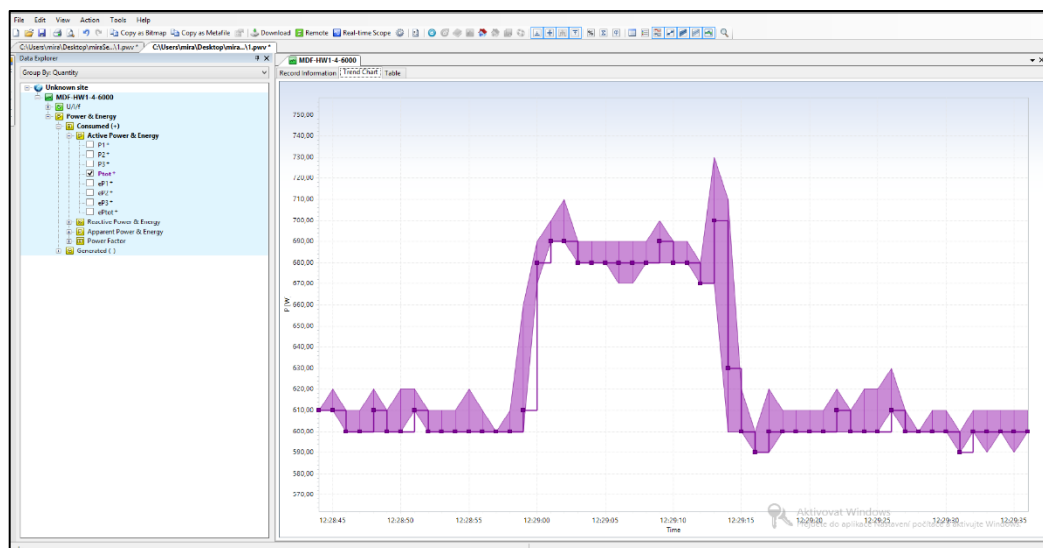
Veškerý deskový materiál byl naformátován na zkušební tělesa o rozměrech 500x500x18 mm. Rozměry byly zvoleny tak, aby se se zkušebním tělesem dalo snadno manipulovat při obrábění. Vzorky byly klimatizovány dva týdny při standardních podmínkách vlhkosti a teploty vzduchu ($\phi = (65 \pm 3) \%$ a $t = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$), tedy na vlhkost 12 %. Takto připravená zkušební tělesa byla obrobena frézku v daném nastavení. Délka frézované strany byla 500 mm a úběr materiálu byl 1 mm. Při obrábění se zaznamenala energetická náročnost procesu, a následně byl odebrán vzorek pro stanovení Ra a Wa o přibližných rozměrech 500x10x18 mm a byla označena jeho obrobená strana a směr podávání do řezu. Na zkušebních vzorcích se před zjišťováním Ra a Wa vyznačil střed vzorku a od tohoto středu se na každou stranu vyznačilo pět centimetr dlouhých úseků. Těchto 10 úseků se následně rozdělilo na tři 6 mm části (v rámci tloušťky 18 mm). Parametry drsnosti a vlnitosti se získávaly pouze ve středové oblasti takto označených vzorků.

4.7 Metodika měření energetické náročnosti obráběcího procesu

Při frézování byl přístroj Metrel MI 2392 připojen k frézce (viz Obr. 37) a propojen s počítačem, kde byl použit software Metrel PowerView (viz Obr. 38). Odečet hodnot proběhl každou 1 sekundu, přičemž přístroj zaznamenal i hodnoty, které byly naměřeny při volnoběhu stroje, a ty se musely později vyloučit. Zaznamenané hodnoty při frézování se musely následně odečíst z grafického nebo tabelového zápisu (viz Obr. 38). Cesta v softwaru Metrel PowerView pro odečet hodnot byla Power & Energy; Consumed (+); Active Power & Energy; Ptot⁺.



Obr. 37: Zapojení přístroje METREL Power Q plus (METREL, 2017)



Obr. 38: Ukázka softwarového prostředí Metrel Power View

4.8 Metodika měření průměrných aritmetických úchylek profilu drsnosti a vlnitosti

Měření drsnosti povrchu a vlnitosti povrchu materiálů bylo uskutečněno na Fakultě lesnické a dřevařské v Praze pomocí dvou metod, které byly následně porovnány:

1. kontaktní metoda - přístrojem od firmy TaylorHobson FORMTALYSURF 50 Intra 2 a
2. bezkontaktní metoda - přístrojem od firmy Olympus LEXT 3D measuring laser microscope OLS4100.

Jakost povrchu byla měřena podle normy ČSN EN ISO 4287 (1999) a ČSN EN ISO 4288 (1999).

Vzorky pro samotné měření měly přibližné rozměry 500x10x18 mm a byla u nich označena frézovaná strana a vyznačen směr posuvu. Jakost povrchu se měřila u klimatizovaných vzorků, uložených při standardních podmínkách vlhkosti a teploty vzduchu ($\phi = (65 \pm 3) \%$ a $t = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$), tedy při vlhkosti 12 %. Každý takto připravený vzorek byl změřen desetkrát, celkem tedy proběhlo 1080 měření.

4.8.1 Nastavení kontaktního a bezkontaktního profilometru

Kontaktní profilometr FORMTALYSURF 50 Intra 2 byl osazen standardním raménkem s kuželovým diamantovým hrotem $R=2 \mu\text{m}$. Byl použit Gaussův filtr a filtr profilu λ_c (viz tabulka 14).

Při měření jakosti povrchu bezkontaktním profilometrem LEXT 3D measuring laser microscope OLS4100 byla použita optika, která je předdefinovaná pro měření jakosti povrchu (MPlanApoN, 50x/0,95 LEXT, $\infty/0/\text{FN18}$). Poloměr světelného paprsku $R=0,2 \mu\text{m}$. Dále byl použit Gaussův filtr a filtr profilu λ_c (viz tabulka 14).

Následující tabulka zobrazuje nastavení profilometrů podle normy ČSN EN ISO 4287 (1999). Pro oba profilometry bylo použito stejné nastavení, které je v tabulce 14 zvýrazněno modře.

Tab. 14: Parametry měření podle normy ČSN EN ISO 4287 (1999)

Periodické profily	Parametry měření			
RSm [mm]	$\lambda c = lc$ [mm]	ln [mm]	lt [mm]	r_{tip} [μm]
$0,013 < RSm \leq 0,04$	0,08	0,4	0,48	2
$0,04 < RSm \leq 0,13$	0,25	1,25	1,5	2
$0,13 < RSm \leq 0,4$	0,8	4	4,8	2 nebo 5
$0,4 < RSm \leq 1,3$	2,5	12,5	15	5
$1,3 < RSm \leq 4$	8	40	48	10

4.9 Statistické zpracování dat

Úkolem statistického zpracování naměřených dat bylo vyhodnocení jednotlivých hodnot sledovaných proměnných znaků. Pro statistické vyhodnocování byl použit software Microsoft EXCEL 2013 (Microsoft, Redmont, Washington, Spojené státy americké) a STATISTICA 12 (Statsoft Inc., Tulsa, Oklahoma, Spojené státy americké).

Před zpracováním samotných analýz bylo zapotřebí vyloučit odlehlé výsledky a posoudit rozdělení četností. Při odhalení odlehlých výsledků bylo provedeno opravné měření na vyznačené části vzorku, kde byla chyba odhalena. Pro posouzení naměřených hodnot jakosti povrchu reprezentovaných Ra a Wa byla použita statistická metoda ANOVA. Testování bylo provedeno na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05 = 5\%$.

Vyloučení odlehlých hodnot bylo provedeno pomocí Dean-Dixonova testu. Nejdříve bylo potřeba seřadit výsledky podle velikosti a pro minimální a maximální hodnoty bylo určeno kritérium Q_1 a Q_n pomocí následujících vzorců:

$$Q_1 = \frac{(x_2 - x_1)}{(x_n - x_1)} \quad Q_n = \frac{(x_n - x_{n-1})}{(x_n - x_1)} \quad (21)$$

Poté bylo vypočítáno rozpětí hodnot rozdílem mezi minimální (x_1) a maximální (x_n) hodnotou. Vypočtené hodnoty Q byly porovnány s tabelovanou kritickou hodnotou Q_α pro daný počet hodnot (n) na předem zvolené hladině významnosti. Pokud byly vypočtené hodnoty Q větší nebo rovny kritické hodnotě Q_α , byly vyloučeny ze souboru. Pokud došlo k vyloučení hodnot, bylo třeba provést testování opakovaně, protože se tím změnilo i rozpětí mezi minimální a maximální hodnotou. Tímto postupem byly postupně vyloučeny všechny odlehlé hodnoty.

Následně bylo provedeno zjištění rozdělení četností, respektive prokázání normality zkoumaných dat. Normalita zkoumaných dat byla provedena na hladině významnosti $\alpha = 0,05 = 5\%$, a to za pomoci Shapiro–Wilksova testu.

Pro statistické vyhodnocení naměřených výsledků byla použita vícefaktorová analýza rozptylu v softwaru Statistica 12. Tato analýza rozptylu hodnotí účinky jednotlivých faktorů a jejich vzájemných kombinací. K tomuto ohodnocení účinku jednotlivých faktorů, i jejich vzájemnou kombinací, byl použit Fisherův F-test s hladinou významnosti $\alpha = 0,05 = 5\%$. F-test na základě hladiny významnosti P stanoví, zda a v jaké míře je sledovaný faktor statisticky významný (viz Tab. 15).

Tab. 15: Vyhodnocení testovaných faktorů na základě hodnoty „P“
(Gaff a Gaborik, 2009)

Hodnota P	Statistická významnost faktoru
$\emptyset P < 0,05$	vliv faktoru je statisticky významný
$\emptyset P > 0,05$	vliv faktoru není statisticky významný
$\emptyset P = 0,05$	vliv faktoru se nachází na hranici statistické významnosti
$\emptyset P = 0$	faktor působí
$\emptyset P < 0,001$	vliv faktoru je statisticky velmi významný
$\emptyset 0,001 < P < 0,01$	vliv faktoru je statisticky středně významný
$\emptyset 0,01 < P < 0,05$	vliv faktoru je statisticky málo významný

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

5.1 Energetická náročnost

Průměrné hodnoty řezného příkonu naměřené při jednotlivých souborech zkušebních těles, stejně jako variační koeficienty, jsou uvedeny v tabulce 16.

Tab. 16: Průměrné hodnoty řezného příkonu

Řezná rychlost (m/s)	Podávací rychlost (m/min)	Druh materiálu	Typ nástroje	Řezný příkon (W)	Typ nástroje	Řezný příkon (W)	Typ nástroje	Řezný příkon (W)
20	4	MDF	HW1	414 (3,2)	HW2	411 (2,2)	HW1 CrTiN	399 (3,6)
30	4		HW1	456 (2,1)	HW2	490 (1,8)	HW1 CrTiN	469 (5,2)
40	4		HW1	679 (16,5)	HW2	662 (2,3)	HW1 CrTiN	664 (2,9)
60	4		HW1	811 (2,2)	HW2	841 (2,2)	HW1 CrTiN	835 (1,7)
20	8		HW1	442 (3,4)	HW2	437 (3,9)	HW1 CrTiN	438 (7,8)
30	8		HW1	524 (6,5)	HW2	516 (4,4)	HW1 CrTiN	499 (7,2)
40	8		HW1	699 (7,5)	HW2	723 (1,3)	HW1 CrTiN	727 (2,3)
60	8		HW1	878 (5,4)	HW2	894 (5,9)	HW1 CrTiN	870 (7,3)
20	11		HW1	465 (4,0)	HW2	444 (6,4)	HW1 CrTiN	455 (6,0)
30	11		HW1	523 (10,9)	HW2	555 (4,9)	HW1 CrTiN	523 (5,8)
40	11		HW1	733 (4,6)	HW2	648 (8,9)	HW1 CrTiN	763 (3,3)
60	11		HW1	918 (4,8)	HW2	958 (3,7)	HW1 CrTiN	902 (4,2)
20	4	MDF- L	HW1	406 (2,5)	HW2	390 (2,4)	HW1 CrTiN	390 (3,9)
30	4		HW1	456 (2,1)	HW2	477 (2,6)	HW1 CrTiN	450 (4,3)
40	4		HW1	669 (1,1)	HW2	661 (1,9)	HW1 CrTiN	664 (1,1)
60	4		HW1	805 (2,2)	HW2	827 (1,8)	HW1 CrTiN	801 (3,5)
20	8		HW1	429 (6,2)	HW2	423 (5,5)	HW1 CrTiN	436 (4,9)
30	8		HW1	487 (3,8)	HW2	509 (5,5)	HW1 CrTiN	473 (6,5)
40	8		HW1	672 (1,1)	HW2	694 (3,8)	HW1 CrTiN	699 (5,3)
60	8		HW1	851 (4,5)	HW2	865 (5,3)	HW1 CrTiN	859 (4,2)
20	11		HW1	458 (5,1)	HW2	421 (8,2)	HW1 CrTiN	458 (1,8)
30	11		HW1	535 (6,2)	HW2	537 (6,5)	HW1 CrTiN	530 (5,7)
40	11		HW1	696 (6,5)	HW2	716 (8,5)	HW1 CrTiN	704 (7,1)
60	11		HW1	872 (5,2)	HW2	902 (4,2)	HW1 CrTiN	897 (1,8)
20	4	SSP	HW1	393 (2,4)	HW2	370 (4,6)	HW1 CrTiN	380 (3,0)
30	4		HW1	447 (3,1)	HW2	447 (2,1)	HW1 CrTiN	470 (3,0)
40	4		HW1	634 (2,2)	HW2	639 (3,8)	HW1 CrTiN	644 (2,5)
60	4		HW1	782 (2,3)	HW2	801 (3,0)	HW1 CrTiN	813 (1,5)
20	8		HW1	389 (7,8)	HW2	387 (5,7)	HW1 CrTiN	403 (1,4)
30	8		HW1	477 (2,4)	HW2	470 (3,0)	HW1 CrTiN	482 (3,1)
40	8		HW1	682 (3,2)	HW2	652 (2,3)	HW1 CrTiN	672 (3,5)
60	8		HW1	795 (2,4)	HW2	815 (2,6)	HW1 CrTiN	850 (4,2)
20	11		HW1	407 (6,5)	HW2	417 (3,7)	HW1 CrTiN	417 (1,4)
30	11		HW1	490 (3,5)	HW2	497 (8,1)	HW1 CrTiN	503 (1,2)
40	11		HW1	655 (5,4)	HW2	660 (6,4)	HW1 CrTiN	663 (6,2)
60	11		HW1	820 (1,2)	HW2	843 (4,5)	HW1 CrTiN	873 (1,7)

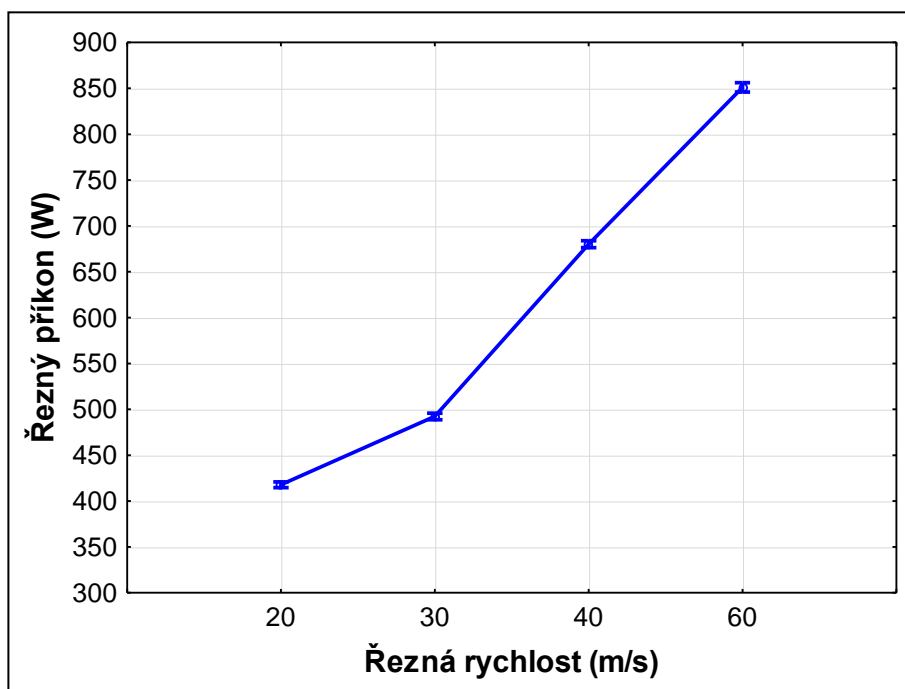
(Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty v %)

Výsledky statistické analýzy ANOVA potvrzují, že všechny faktory, stejně jako jejich vzájemná interakce, statisticky významně ($P < 0,05$) ovlivňují řezný příkon v průběhu bočního frézování (Tab. 17).

Tab. 17: Vliv faktorů na řezný příkon

Faktory	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti "p"
Intercept	603626871,3	1	603626871,3	1756682,0	0,000
Řezná rychlost	46131441,5	3	15377147,2	44750,8	0,000
Podávací rychlost	773732,7	2	386866,3	1125,9	0,000
Typ nástroje	10942,3	2	5471,2	15,9	0,000
Druh materiálu	496738,6	2	248369,3	722,8	0,000
Řezná rychlost × Podávací rychlost × Typ nástroje × Druh materiálu	95664,1	24	3986,0	11,6	0,000
Chyba	519549,8	1512,0	343,6		

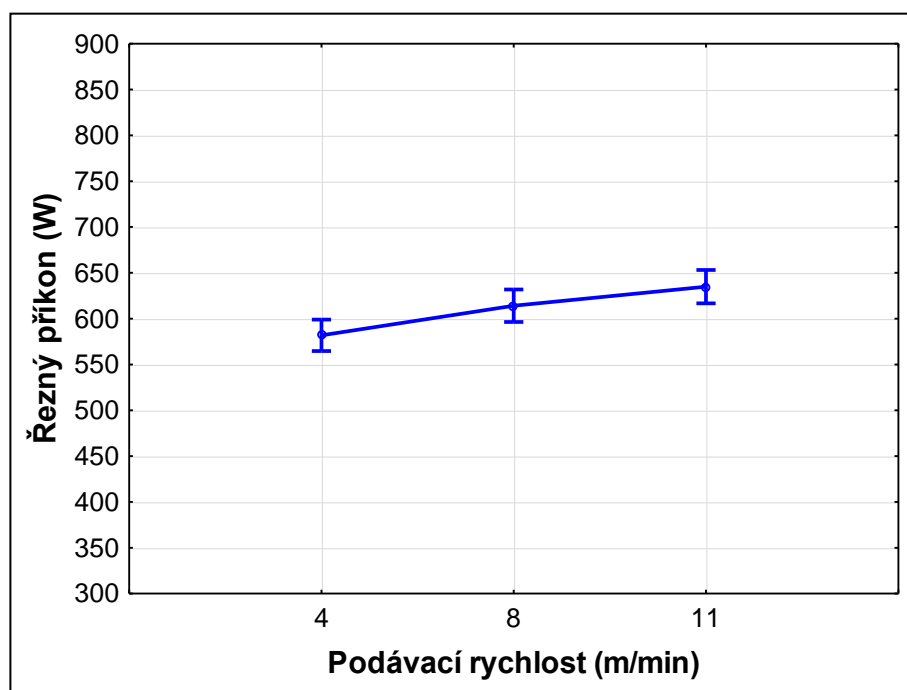
Vliv řezné rychlosti na řezný příkon má jasný charakter (Obr. 39). Se zvyšováním řezné rychlosti dochází ke zvyšování řezného příkonu. Nárůst hodnot řezného příkonu je mezi řeznými rychlostmi 20 a 30 m/s menší, pouze 17,7 %. Ovšem rozdíl hodnot mezi řeznými rychlostmi 30 a 40 m/s dosahuje nejvyšší hodnoty, tj. až 38,2 %. Tyto rozdíly jsou nevhodnější na porovnání, protože nárůst řezné rychlosti je o stejnou hodnotu (10 m/s). Hodnoty řezného příkonu, zjištěné při nejvyšší řezné rychlosti (60 m/s) dosahují hodnoty 851 W, což je o 25,5 % více, než v případě řezné rychlosti 40 m/s. Rozdíl hodnot řezného příkonu mezi nejnižší a nejvyšší řeznou rychlostí je 103,6 %. Pro proces frézování všeobecně platí, že s nárůstem řezné rychlosti roste i řezný výkon, což potvrzují i výsledky předchozích výzkumů autorů Morita *et al.* (1998), Aguilera a Martin (2001), Iskra *et al.* (2005) a Barčík *et al.* (2010).



Obr. 39: Vliv řezné rychlosti na řezný příkon

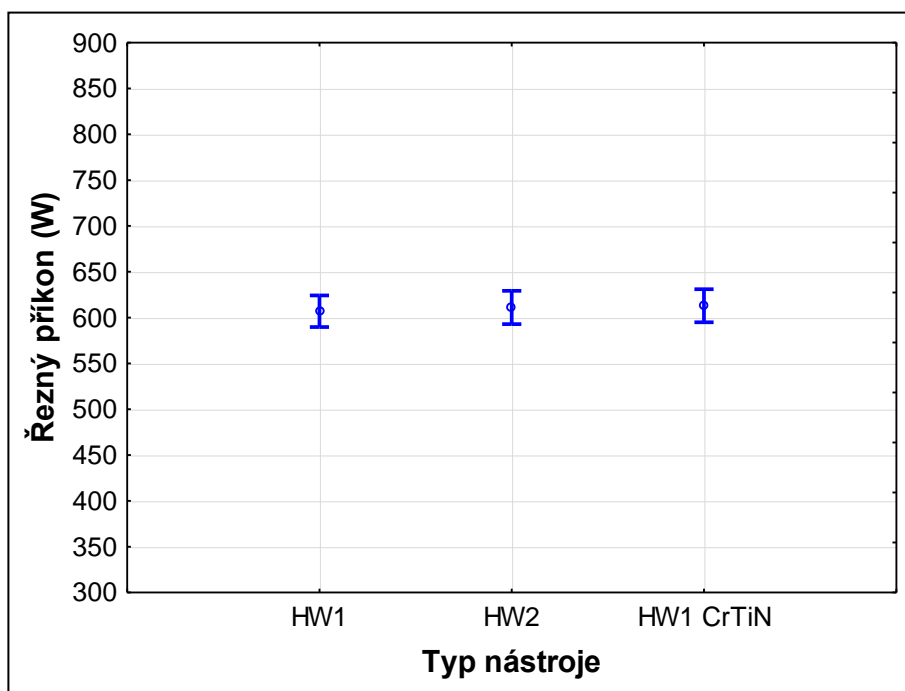
Vliv podávací rychlosti na řezný příkon má stejný charakter jako u řezné rychlosti, tj. s narůstání podávací rychlosti se zvyšuje i řezný příkon (Obr. 40). Na druhou stranu je třeba podotknout, že nárůst není tak značný a rozdíly v hodnotách řezného příkonu při jednotlivých podávacích rychlostech jsou menší. Řezný příkon zjištěný při podávací rychlosti 4 m/min dosahoval průměrnou hodnotu 582 W, zatím co u podávací rychlosti 11 m/min byl 635 W, což je nárůst o 9,1 %.

Vliv podávací rychlosti na řezný příkon potvrzují i výzkumy jiných autorů. Barcík *et al.* (2010) zkoumali vliv různých podávacích rychlostí a řezných rychlostí na spotřebu energie během rovinného frézování bukového dřeva. Zjistili, že se zvyšováním podávací rychlosti, při konstantním úhlu čela frézovací hlavy, dochází k nárůstu spotřeby energie. Rovněž výzkum Salca (2015), který se zabýval optimalizací procesu frézování černého bezu (*Sambucus nigra*), uvádí narůstání řezného příkonu při zvyšování podávací rychlosti.



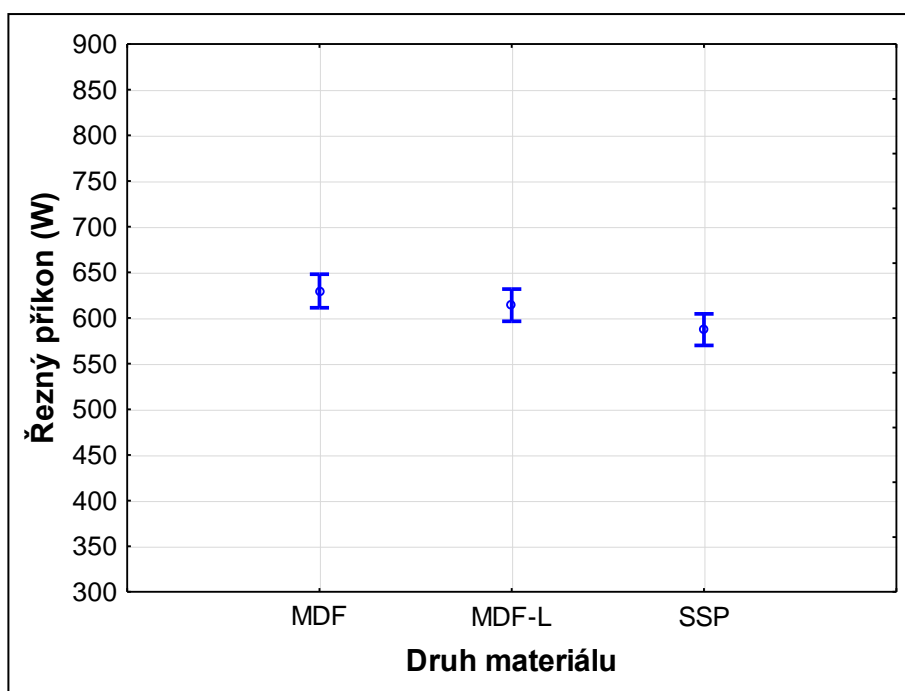
Obr. 40: Vliv podávací rychlosti na řezný příkon

Vliv druhu materiálu nástroje (Obr. 41) se sice projevil jako statisticky významný faktor, ovšem vliv tohoto faktoru byl ze všech nejmenší. Rozdíl mezi materiálem HW1 a HW2 dosáhl pouze 0,7 %. HW1 je materiál primárně určen pro frézování běžného dřeva, ale může být využit i pro některé materiály na bázi dřeva, zatímco HW2 je primárně navržen pro tvrdší materiály na bázi dřeva. HW1 s povlakem CrTiN dosahoval mírně vyšších hodnot řezného příkonu, ovšem hodnoty byly pouze o 1 % vyšší v porovnání s HW1. Tento povlak je aplikován pro zvýšení tvrdosti, zlepšení odolnosti vůči korozi nebo oxidaci a snížení otupování břitu (Labidi *et al.*, 2005, Nouveau *et al.*, 2007). Nicméně právě nanosený povlak způsobuje nerovný povrch čepele, čímž je ovlivněno její tření o dřevo během frézování. Zvýšené tření způsobuje nárůst spotřeby energie. Popsaný vliv povlaku potvrzují i výzkumy autorů Su *et al.* (1996), Faga a Settineri (2006) a Warcholinski *et al.* (2011), ovšem tento vliv je závislý na jeho složení, tloušťce a metodě nanášení.



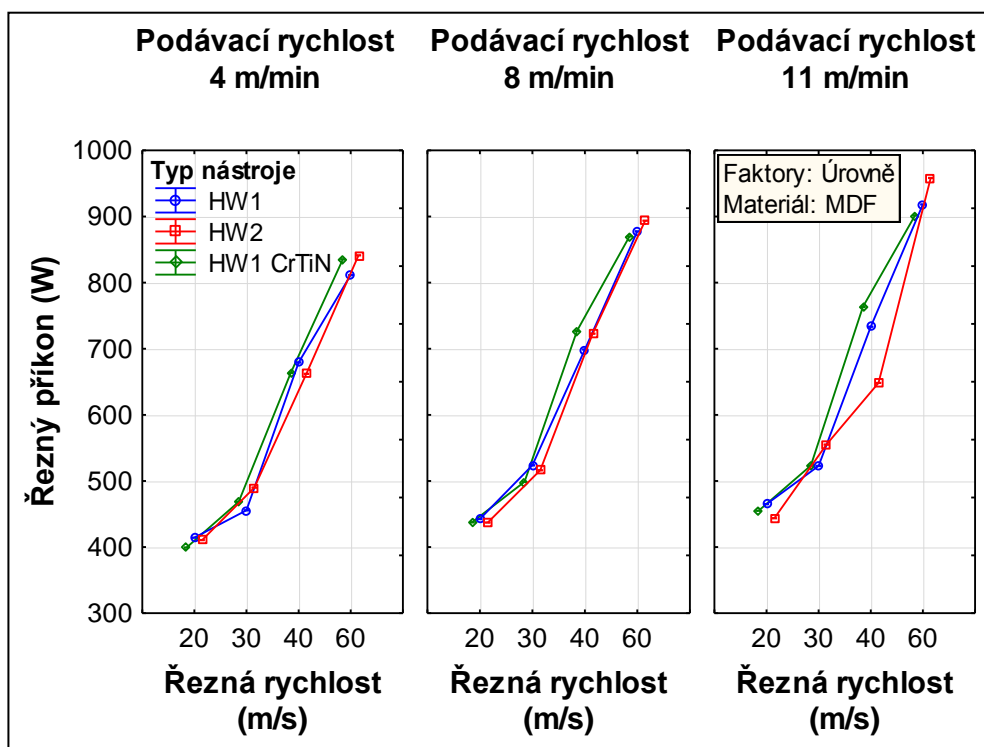
Obr. 41: Vliv typu nástroje na řezný příkon

Řezný příkon naměřený při různých materiálech (Obr. 42) je striktně závislý na jejich hustotě, která je ovlivněná složením. Podle očekávání byl nejvyšší průměrný řezný příkon 630 W zjištěn při obrábění MDF, protože má i nejvyšší hustotu ze všech tří sledovaných materiálů. Mírně nižší řezný příkon byl naměřen u jednostranně laminované MDF, a to 624 W, což potvrzuje i mírně nižší hustota zjištěná před frézováním. Rozdíl v hodnotách řezného příkonu mezi nimi byl pouze 1 %. SSP dosáhla nejnižší řezný příkon 587 W, což je logické z pohledu její nižší hustoty v porovnání s MDF.



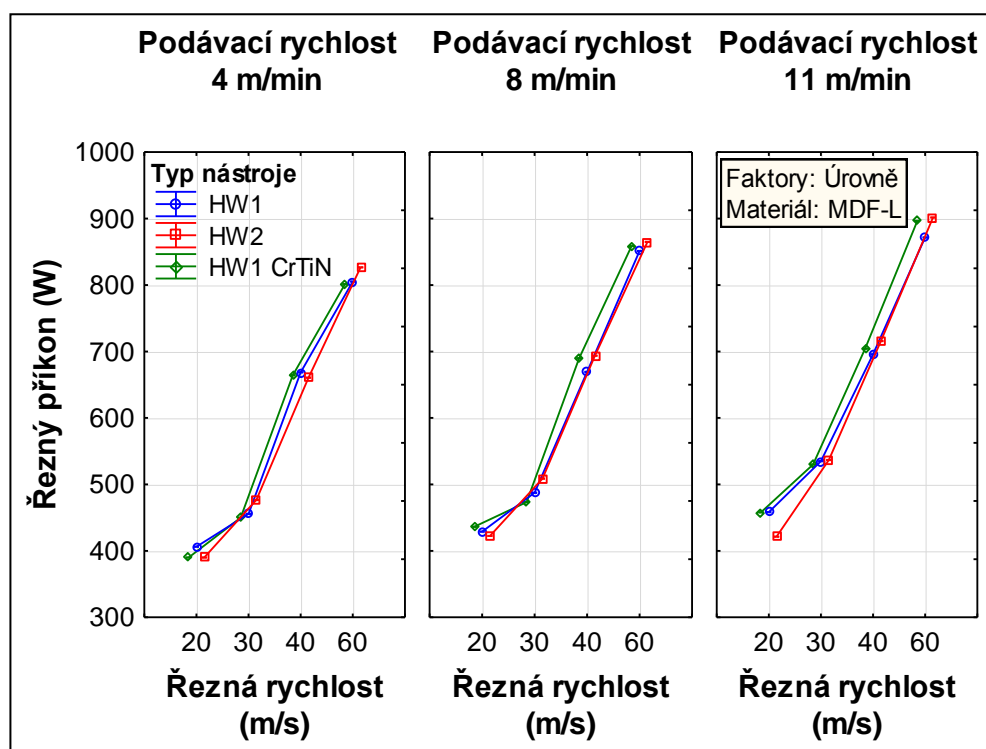
Obr. 42: Vliv druhu materiálu na řezný příkon

Obrázky 43, 44 a 45 znázorňují vliv všech faktorů na řezný příkon MDF, MDF-L a SSP. Z porovnání těchto grafů je také zřejmé, že nejvyšší řezný příkon byl zjištěn při nelaminované MDF (Obr. 43 a Tab. 16), což má za následek hlavně její hustota. Hustota MDF není ovlivněna jen objemem dřevních vláken, ale i obsahem živice. Právě ta je z velké části zodpovědná za abrazivnější charakter MDF. Rovněž dříve zmiňovaná izotropie MDF po vrstvách, kde vnější vrstvy jsou tvrdší než středové vrstvy (Khazaeian *et al.*, 2010), vede k rozdílnému tření a nerovnoměrnému úberu materiálu. Oba tyto vlivy urychlují otupování nástroje, a tím zvyšují spotřebu energie (Aknouche *et al.*, 2009).



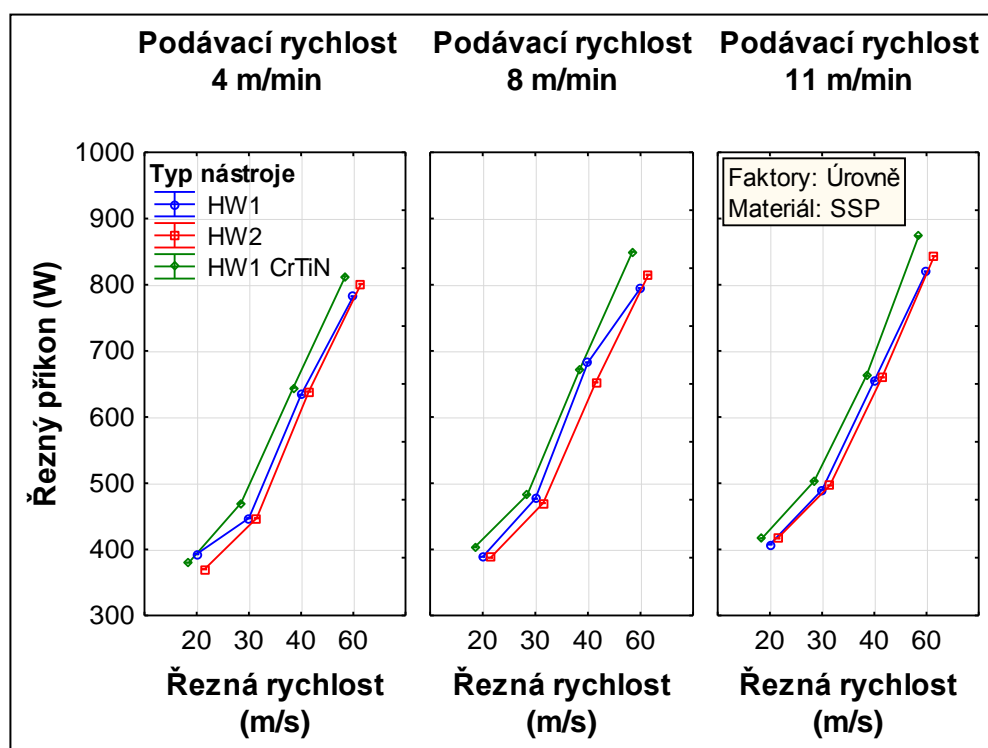
Obr. 43: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na řeznou sílu během bočního frézování MDF

U jednostranně laminované MDF se prokázalo, že laminace neměla na řezný příkon podstatný vliv (Obr. 44 a Tab. 16). Hodnoty řezného příkonu byly mírně nižší v porovnání s neupravenou MDF. Protože laminace je jen na jedné straně a její tloušťka je velice malá, tato povrchová úprava nemůže zásadně ovlivnit řezný příkon během bočního frézování. Rozdíl v hodnotách řezného příkonu pro jednotlivé typy MDF mohly být způsobeny určitým rozdílem v jejich hustotě. MDF-L měla mírně nižší hustotu v porovnání se standardní neupravenou MDF.



Obr. 44: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na řeznou sílu během bočního frézování MDF-L

Nejnižší řezný příkon byl zjištěn při bočním frézování SSP (Obr. 45 a Tab. 16). Jak již bylo uvedeno, SSP má nejnižší hustotu, takže je zde předpoklad, že řezný příkon bude také nejnižší (Aguilera a Martin, 2001). Ovšem při porovnání hustot mezi MDF a SSP je jasné, že řezný příkon není v tomto případě závislý jen na ní. SSP má na rozdíl od MDF anizotropní charakter odvozený z rostlého dřeva, ze kterého se skládá. Anizotropie SSP je odvozena ze struktury jednotlivých latěk dřeva, které nejsou stejné, protože obsahují různou orientaci latěk mezi sebou, suky, pryskyřičné kanálky, nebo různé šířky letokruhů. Tyto rozdíly ovlivňují frézování při každém přechodu frézovací hlavy jinak, což má vliv na celkovou spotřebu energie. Všeobecně spárovkové desky mají více heterogenní strukturu než samotné rostlé dřevo (Sütçü, 2013). Tento fakt je možné vysvětlit určitou mírou zhuštění, které vzniká při lepení spárovkových desek.



Obr. 45: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na řeznou sílu během bočního frézování SSP

Ovlivnit celkovou spotřebu energie v procesu frézování je možné různými způsoby. Nejčastější metodou je změna uhlové geometrie nástroje nebo zvýšení počtu čepelí ve frézovací hlavě. Tato změna pozitivně ovlivňuje opracování povrchu a dokáže snížit řezný odpor. Stejný efekt je možné dosáhnout i umístěním, respektive polohou, čepele v nástroji vůči směru frézování nebo frézované ploše. Většinou se používají nástroje s rovným řezným břitem. Přímé řezné břity způsobují nerovnoměrné rozdělení, stlačování a poškození struktury dřevních buněk v blízkosti povrchu, což vede k nárůstu řezné síly (Darmawan *et al.*, 2011). Naklonění řezné hrany dokáže nejenom změnit řeznou sílu, ale i výslednou kvalitu povrchu, protože již nepatrná změna v úhlu řezné hrany nástroje sníží řeznou sílu. Úhel řezné hrany nástroje je zvláště důležitý pro DTD a MDF s jednostrannou nebo oboustrannou laminací, které jsou náchylné na poškozování povrchu vlivem frézování (Boucher *et al.*, 2007).

Nejvyšší řezný příkon byl zjištěn během bočního frézování MDF, mírně nižší hodnoty dosáhla MDF-L a nejnižší hodnoty měla SSP. Řezný příkon naměřený během bočního frézování SSP byl o 7,3 % nižší v porovnání s MDF. Typ nástroje ve vztahu k jeho materiálu a úpravě neměl výraznější vliv na řezný příkon. Ovšem nejvyšší hodnoty byly zjištěny při čepeli HW1 s povlakem CrTiN. Mírně nižší hodnoty dosáhla čepel HW2 a nejnižší hodnoty byly zjištěny u HW1 bez úpravy. Na druhou stranu, rozdíl v hodnotách řezného příkonu mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou dosáhl pouze 1 %. Zvyšování řezné rychlosti vedlo k nárůstu řezného příkonu. Nejvýznamnější rozdíl byl zjištěn mezi řeznými rychlostmi 30 a 40 m/s. Podávací rychlost měla stejný vliv na řezný příkon jako řezná rychlost, i když rozdíly v hodnotách řezného příkonu mezi jednotlivými podávacími rychlostmi nebyly tak výrazné. Rozdíl v hodnotách řezného příkonu naměřených při nejnižší a nejvyšší podávací rychlosti byl 9,1 %.

5.2 Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti „Ra“ – kontaktní a bezkontaktní metoda

Průměrné hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu drsnosti „Ra“, naměřených při jednotlivých souborech zkušebních těles, stejně jako jejich variační koeficienty, jsou uvedené v tabulkách 18 a 19.

Tab. 18: Průměrné hodnoty drsnosti měřené kontaktní metodou

Řezná rychlost (m/s)	Podávací rychlost (m/min)	Druh materiálu	Typ nástroje	Ra (μm)	Typ nástroje	Ra (μm)	Typ nástroje	Ra (μm)
20	4	MDF	HW1	21 (6,4)	HW2	25 (6,8)	HW1 CrTiN	23 (16,9)
30	4		HW1	21 (8,1)	HW2	27 (6,4)	HW1 CrTiN	29 (9,7)
40	4		HW1	24 (4,5)	HW2	24 (8,4)	HW1 CrTiN	24 (8,8)
60	4		HW1	21 (4,5)	HW2	27 (5,7)	HW1 CrTiN	24 (5,3)
20	8		HW1	22 (3,9)	HW2	28 (6,6)	HW1 CrTiN	23 (6,8)
30	8		HW1	23 (8,9)	HW2	29 (4,8)	HW1 CrTiN	24 (6,3)
40	8		HW1	24 (7,4)	HW2	24 (4,2)	HW1 CrTiN	25 (6,5)
60	8		HW1	26 (8,9)	HW2	24 (5,3)	HW1 CrTiN	25 (6,1)
20	11		HW1	22 (4,1)	HW2	24 (6,6)	HW1 CrTiN	23 (9,4)
30	11		HW1	24 (4,4)	HW2	27 (6,7)	HW1 CrTiN	27 (7,7)
40	11		HW1	22 (8,7)	HW2	25 (12,6)	HW1 CrTiN	24 (4,5)
60	11		HW1	24 (5,1)	HW2	25 (6,8)	HW1 CrTiN	25 (5,8)
20	4	MDF- L	HW1	18 (6,2)	HW2	19 (6,2)	HW1 CrTiN	17 (7,0)
30	4		HW1	18 (8,8)	HW2	22 (8,0)	HW1 CrTiN	20 (6,1)
40	4		HW1	17 (5,9)	HW2	20 (4,1)	HW1 CrTiN	18 (3,8)
60	4		HW1	17 (8,2)	HW2	19 (5,5)	HW1 CrTiN	20 (7,4)
20	8		HW1	18 (9,0)	HW2	20 (9,3)	HW1 CrTiN	18 (9,5)
30	8		HW1	21 (5,7)	HW2	22 (5,0)	HW1 CrTiN	20 (5,1)
40	8		HW1	18 (5,7)	HW2	21 (4,9)	HW1 CrTiN	19 (6,1)
60	8		HW1	18 (5,9)	HW2	20 (5,5)	HW1 CrTiN	20 (4,5)
20	11		HW1	19 (7,5)	HW2	21 (9,2)	HW1 CrTiN	19 (7,9)
30	11		HW1	18 (5,2)	HW2	19 (6,6)	HW1 CrTiN	20 (7,2)
40	11		HW1	19 (5,9)	HW2	20 (8,7)	HW1 CrTiN	21 (9,8)
60	11		HW1	21 (8,5)	HW2	19 (6,2)	HW1 CrTiN	19 (5,7)
20	4	SSP	HW1	5 (11,4)	HW2	7 (11,5)	HW1 CrTiN	8 (14,4)
30	4		HW1	6 (7,1)	HW2	6 (15,0)	HW1 CrTiN	5 (16,8)
40	4		HW1	6 (19,3)	HW2	7 (19,9)	HW1 CrTiN	4 (21,0)
60	4		HW1	5 (17,4)	HW2	5 (16,9)	HW1 CrTiN	3 (33,0)
20	8		HW1	6 (8,2)	HW2	7 (7,8)	HW1 CrTiN	8 (16,1)
30	8		HW1	8 (14,0)	HW2	7 (18,4)	HW1 CrTiN	7 (15,1)
40	8		HW1	5 (11,0)	HW2	8 (10,1)	HW1 CrTiN	5 (11,2)
60	8		HW1	5 (12,6)	HW2	7 (18,9)	HW1 CrTiN	6 (14,5)
20	11		HW1	7 (7,3)	HW2	6 (13,1)	HW1 CrTiN	6 (8,6)
30	11		HW1	9 (5,7)	HW2	9 (13,7)	HW1 CrTiN	8 (7,3)
40	11		HW1	6 (11,8)	HW2	7 (11,7)	HW1 CrTiN	4 (12,3)
60	11		HW1	5 (14,7)	HW2	7 (11,5)	HW1 CrTiN	6 (16,8)

(Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty v %)

Tab. 19: Průměrné hodnoty drsnosti měřené bezkontaktní metodou

Řezná rychlost (m/s)	Podávací rychlost (m/min)	Druh materiálu	Typ nástroje	Ra (μm)	Typ nástroje	Ra (μm)	Typ nástroje	Ra (μm)
20	4	MDF	HW1	27 (16,4)	HW2	29 (14,7)	HW1 CrTiN	28 (15,6)
30	4		HW1	26 (13,4)	HW2	31 (15,9)	HW1 CrTiN	37 (5,7)
40	4		HW1	25 (10,6)	HW2	28 (14,4)	HW1 CrTiN	27 (14,6)
60	4		HW1	24 (10,3)	HW2	33 (14,0)	HW1 CrTiN	31 (11,5)
20	8		HW1	27 (14,4)	HW2	31 (13,9)	HW1 CrTiN	29 (15,7)
30	8		HW1	26 (16,2)	HW2	33 (11,6)	HW1 CrTiN	27 (16,5)
40	8		HW1	25 (11,9)	HW2	28 (11,8)	HW1 CrTiN	28 (14,0)
60	8		HW1	30 (13,0)	HW2	30 (9,6)	HW1 CrTiN	29 (16,3)
20	11		HW1	27 (16,6)	HW2	30 (15,2)	HW1 CrTiN	26 (16,1)
30	11		HW1	28 (16,1)	HW2	30 (11,3)	HW1 CrTiN	32 (9,9)
40	11		HW1	25 (13,8)	HW2	26 (10,2)	HW1 CrTiN	29 (14,8)
60	11		HW1	25 (8,1)	HW2	29 (10,8)	HW1 CrTiN	28 (13,3)
20	4	MDF- L	HW1	24 (14,1)	HW2	27 (14,1)	HW1 CrTiN	25 (6,8)
30	4		HW1	23 (10,6)	HW2	27 (17,2)	HW1 CrTiN	23 (13,6)
40	4		HW1	19 (11,1)	HW2	26 (13,9)	HW1 CrTiN	23 (15,6)
60	4		HW1	21 (12,1)	HW2	23 (17,5)	HW1 CrTiN	25 (12,8)
20	8		HW1	23 (10,0)	HW2	25 (9,3)	HW1 CrTiN	25 (14,8)
30	8		HW1	25 (11,2)	HW2	27 (14,8)	HW1 CrTiN	25 (5,8)
40	8		HW1	22 (16,9)	HW2	27 (12,2)	HW1 CrTiN	24 (13,9)
60	8		HW1	21 (15,5)	HW2	26 (9,7)	HW1 CrTiN	26 (14,2)
20	11		HW1	24 (13,9)	HW2	26 (16,4)	HW1 CrTiN	24 (9,2)
30	11		HW1	19 (9,6)	HW2	23 (14,8)	HW1 CrTiN	25 (9,8)
40	11		HW1	24 (14,3)	HW2	27 (16,0)	HW1 CrTiN	27 (6,4)
60	11		HW1	24 (10,4)	HW2	25 (9,3)	HW1 CrTiN	22 (10,9)
20	4	SSP	HW1	7 (15,8)	HW2	7 (15,5)	HW1 CrTiN	13 (8,3)
30	4		HW1	8 (15,0)	HW2	5 (8,5)	HW1 CrTiN	10 (9,2)
40	4		HW1	6 (15,0)	HW2	5 (15,5)	HW1 CrTiN	7 (13,0)
60	4		HW1	8 (6,8)	HW2	2 (11,1)	HW1 CrTiN	8 (11,8)
20	8		HW1	9 (12,9)	HW2	5 (13,6)	HW1 CrTiN	12 (10,6)
30	8		HW1	7 (8,8)	HW2	4 (15,0)	HW1 CrTiN	11 (13,9)
40	8		HW1	7 (9,5)	HW2	5 (6,8)	HW1 CrTiN	8 (11,6)
60	8		HW1	7 (5,9)	HW2	4 (8,0)	HW1 CrTiN	7 (9,8)
20	11		HW1	8 (14,1)	HW2	7 (12,4)	HW1 CrTiN	10 (9,1)
30	11		HW1	11 (16,5)	HW2	6 (16,9)	HW1 CrTiN	12 (9,9)
40	11		HW1	9 (14,9)	HW2	4 (12,0)	HW1 CrTiN	6 (12,7)
60	11		HW1	6 (9,9)	HW2	4 (13,6)	HW1 CrTiN	7 (13,3)

(Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty v %)

Výsledky statistické analýzy ANOVA prokázaly, že hladina významnosti “P“ je u všech faktorů nižší než 0,05. Výsledky tedy potvrzují, že všechny faktory, stejně jako jejich vzájemná interakce, statisticky významně ovlivňují drsnost obrobeného povrchu měřenou kontaktní i bezkontaktní metodou (Tab. 20 a 21). Statistická významnost byla potvrzena i po použití Duncanova testu na naměřené výsledky (Tab. 22 a 23).

Tab. 20: Vliv faktorů a jejich vzájemné působení na drsnost - kontaktní metoda

Faktory	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti “p“
Intercept	302561,2	1	302561,2	145531,5	0,000
Řezná rychlost	331,6	3	110,5	53,2	0,000
Podávací rychlost	147,9	2	73,9	35,6	0,000
Typ nástroje	685,9	2	342,9	165,0	0,000
Druh materiálu	63539,6	2	31769,8	15281,2	0,000
Řezná rychlost × Podávací rychlost × Typ nástroje × Druh materiálu	414,4	24	17,3	8,3	0,000
Chyba	2020,8	972	2,1		

Tab. 21: Vliv faktorů a jejich vzájemné působení na drsnost – bezkontaktní metoda

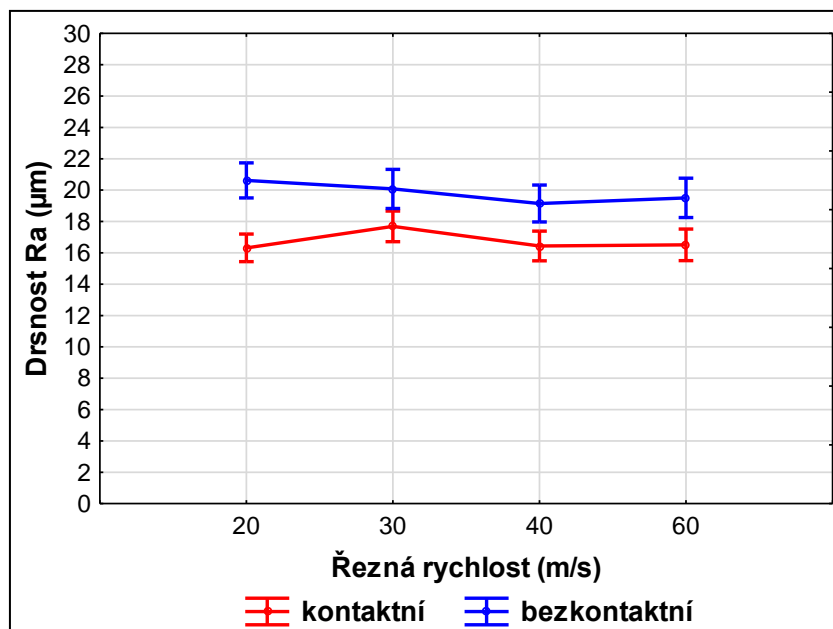
Faktory	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti “p“
Intercept	425041,9	1	425041,9	50622,1	0,000
Řezná rychlost	340,2	3	113,4	13,5	0,000
Podávací rychlost	120,2	2	60,1	7,1	0,001
Typ nástroje	1515,5	2	757,8	90,2	0,000
Druh materiálu	88349,6	2	44174,8	5261,1	0,000
Řezná rychlost × Podávací rychlost × Typ nástroje × Druh materiálu	2119,1	24	88,3	10,5	0,000
Chyba	8161,3	972	8,4		

Z obrázku 46 je patrné, že nejvyšších hodnot drsnosti zjišťované kontaktní metodou bylo dosaženo při řezné rychlosti 30 m/s. Při ostatních sledovaných řezných rychlostech se neprojevil statisticky významný rozdíl.

Bezkontaktní metoda měření drsnosti prokázala, že nejnižší hodnoty Ra se projevily při řezné rychlosti 40 m/s, zatímco nejvyšší hodnoty byly zaznamenány při řezné rychlosti 20 m/s.

Při porovnání obou metod měření drsnosti se ukázal významný rozdíl a to u všech řezných rychlostí, které byly zkoumány. Přičemž nejbližší hodnoty se projevily při řezné rychlosti 30 m/s (průměrné hodnoty u bezkontaktní metody byly o 13,5 % vyšší než u kontaktní) a největší rozdíly v hodnotách byly při řezné rychlosti 20 m/s (průměrné hodnoty u bezkontaktní metody byly o 26,39 % vyšší než u kontaktní). Vyšší naměřené hodnoty Ra vykazuje bezkontaktní metoda.

Všeobecně lze však konstatovat, že vyšší řezná rychlost způsobuje zlepšení kvality povrchu a snížení řezné síly (Costes a Larricq, 2002). Stejně tak podle Davim *et al.* (2009) se drsnost povrchu snižuje s nárůstem řezné rychlosti. Podobné závislosti potvrdil i Yasir *et al.* (2016).



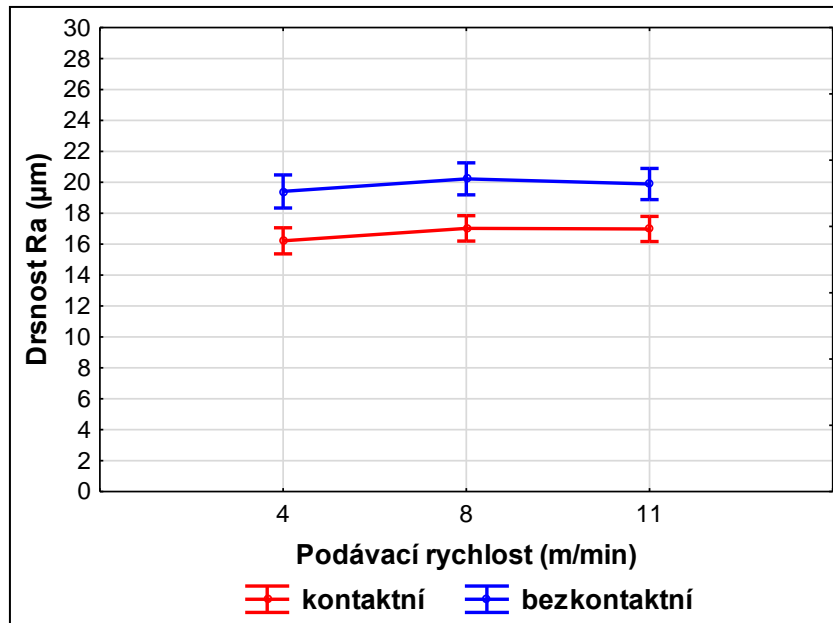
Obr. 46: Vliv řezné rychlosti na drsnost

Nejnižších hodnot drsnosti při měření kontaktní metodou bylo dosaženo při podávací rychlosti 4 m/min (16,21 μm). V případě podávací rychlosti 8 a 11 m/min byly naměřené hodnoty statisticky významně vyšší, než při podávací rychlosti 4 m/min. Mezi hodnotami drsnosti naměřenými při podávací rychlosti 8 m/min a 11 m/min nebyl potvrzený významný rozdíl, a sice jen 0,23 %, přičemž hodnota drsnosti pro podávací rychlost 8 m/min byla nejvyšší.

Při měření drsnosti bezkontaktní metodou byla rovněž nejnižší hodnota zaznamenána při podávací rychlosti 4 m/min (19,41 μm). Nejvyšší hodnoty drsnosti bylo dosaženo při podávací rychlosti 8 m/min (20,22 μm). Obdobně jako u kontaktní metody měření R_a , byly i v případě podávací rychlosti 8 a 11 m/min naměřené hodnoty drsnosti bezkontaktní metodou statisticky významně vyšší, než při podávací rychlosti 4 m/min. Statisticky významný rozdíl se tedy potvrdil mezi hodnotami drsnosti při podávacích rychlostech 4 a 8 m/min (nárůst o 4 %) a mezi hodnotami drsnosti při podávacích rychlostech 4 a 11 m/min (nárůst o 2,4 %).

Při srovnání metody kontaktní a bezkontaktní se znovu prokázal statisticky významný rozdíl a to u všech podávacích rychlostí. Z obrázku 47 je vidět, jak se jednotlivé křivky téměř kopírují v obdobných odstupech. Průměrné hodnoty u bezkontaktní metody byly u podávací rychlosti 4 m/min o 19,69 % vyšší než u kontaktní, u podávací rychlosti 8 m/min byly vyšší o 18,81 % a u nejvyšší zkoumané podávací rychlosti byly vyšší o 17,13 %. Na základě zjištěných výsledků při zkoumání podávací rychlosti lze konstatovat, že vyšší naměřené hodnoty R_a vykazuje bezkontaktní metoda.

Škaljic *et al.* (2009) během svého výzkumu při obrábění jedlového dřeva zjistil, že při zvyšování podávací rychlosti z 6 m/min na 12 m/min bylo statisticky významné zvýšení R_a ale při dalším zvyšování podávací rychlosti na 18 m/min se již statisticky významný rozdíl neprokázal. Podle Davim *et al.* (2009) se zvyšuje drsnost povrchu se zvyšující se rychlostí posuvu. Dále byla stejná závislost potvrzena ve výzkumu Maher (2008), a sice se zvyšující se podávací rychlostí se zvyšuje drsnost povrchu.



Obr. 47: Vliv podávací rychlosti na drsnost

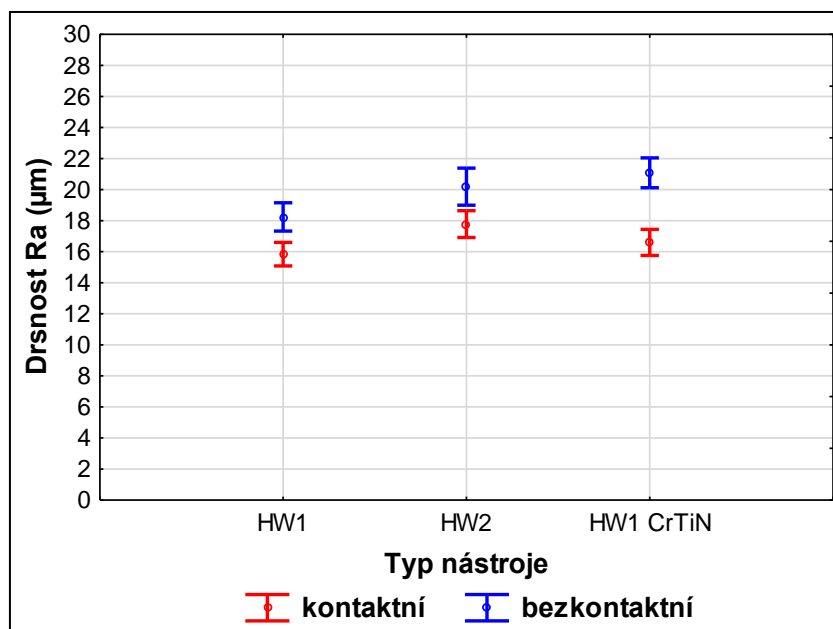
Druh použitého nástroje je z pohledu kvality povrchu velmi významným faktorem. Nejnižší hodnoty drsnosti zjišťované kontaktní metodou byly naměřené při použití nástroje HW1 (15,84 µm), statisticky nevýznamný nárůst hodnot drsnosti se projevil při použití nástroje HW1 CrTiN (16,6 µm). Nejvyšší hodnoty drsnosti dosáhl povrch po frézování nástrojem HW2 (17,78 µm), v tomto případě se ukázal statisticky významný nárůst (12,3 %) v porovnání s hodnotami naměřenými při použití nástroje HW1.

Při měření drsnosti bezkontaktní metodou byly nejnižší hodnoty zjištěné po použití nástroje HW1 (18,24 µm), stejně jako u měření kontaktní metodou. Při porovnání nástrojů HW1 a HW2 můžeme pozorovat statisticky významný nárůst o 10,7 %. Nejvyšší hodnoty drsnosti byly naměřeny po použití nástroje HW1 CrTiN (21,08 µm).

Znovu se projevil statisticky významný rozdíl mezi kontaktní a bezkontaktní metodou. Největší rozmezí hodnot bylo zjištěno při obrábění pomocí nože HW1 CrTiN, kdy byly průměrné hodnoty u bezkontaktní metody o 27,01 % vyšší než u kontaktní metody. V případě nože HW1 byly průměrné hodnoty měřené bezkontaktní metodou o 15,19 % vyšší než hodnoty naměřené kontaktní metodou. Nejmenší rozdíl se projevil u nože HW2, kdy průměrné hodnoty naměřené

bezkontaktní metodou byly o 13,57 % vyšší, než hodnoty zjišťované kontaktní metodou. Naměřené výsledky při zkoumání typu nástroje prokázaly, že vyšší hodnoty Ra vykazuje bezkontaktní metoda. Herdarto *et al.* (2006) ve svém výzkumu zjistil mimo jiné vliv různých metod vyhodnocování drsnosti povrchu. Zjistili, změny v hodnotách mezi metodami, v závislosti na použité filtraci a částečné rozdílnosti některých metod.

Všeobecně lze říci, že typ nástroje je parametr, který ovlivňuje drsnost povrchu a to jak materiál nástroje, tak úhel břitu a také jeho opotřebení (Kminiak *et al.*, 2016).



Obr. 48: Vliv typu nástroje na drsnost

Z pohledu kvality obráběné plochy je materiál faktorem s nejdůležitějším vlivem ze všech sledovaných faktorů (Obr. 49). Při obrábění SSP byla zjištěna průměrná hodnota drsnosti měřená kontaktní metodou 6,29 μm, zatímco při obrábění MDF-L byla tato hodnota 19,43 μm a u materiálu MDF dokonce až 24,49 μm. Z toho vyplývá, že v případě materiálu se mezi všemi sledovanými soubory projevil statisticky velmi významný rozdíl.

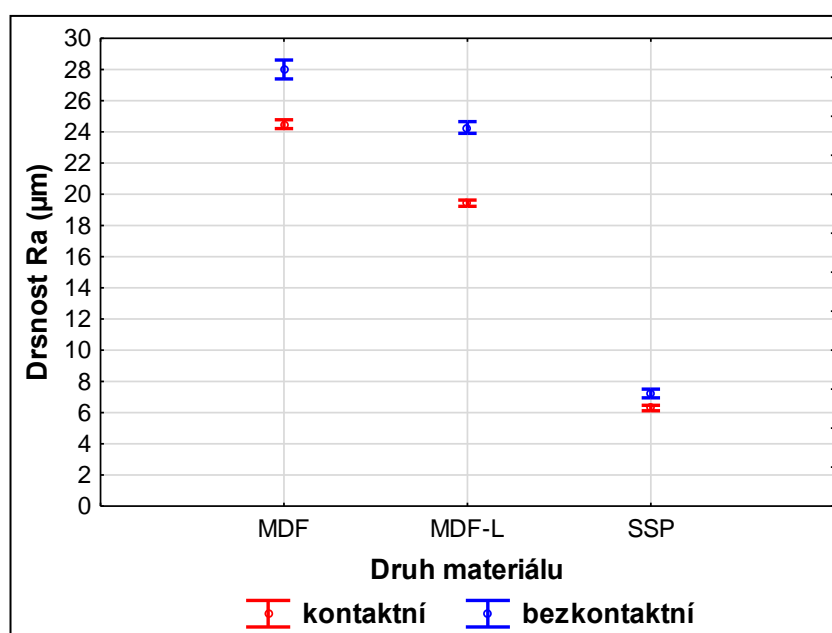
Statisticky velmi významný rozdíl se projevil i u hodnot drsnosti naměřených bezkontaktní metodou. Průměrná hodnota drsnosti po obrábění SSP byla nejnižší

ze všech tří testovaných materiálů (7,23 μm), u MDF-L byla průměrná hodnota drsnosti 24,28 μm a u MDF průměrná hodnota drsnosti dosáhla až na 28,0 μm .

I u posledního sledovaného kritéria (druh materiálu) se ukázal významný rozdíl mezi kontaktní a bezkontaktní metodou měření drsnosti povrchu. Průměrné hodnoty při měření bezkontaktní metodou jsou u SSP o 14,89 % vyšší než průměrné hodnoty měřené kontaktní metodou. V případě MDF byl tento nárůst 14,32 %. Největší procentuální nárůst průměrných hodnot drsnosti byl zaznamenán u materiálu MDF-L (25,01 %). Stejně jako u ostatních sledovaných faktorů, i u druhu materiálu vykazuje vyšší naměřené hodnoty R_a bezkontaktní metoda.

Bylo prokázáno, že hustoty materiálů mají velký vliv na charakteristiky obrobitelnosti (Lin *et al.*, 2006). Na základě zjištěných výsledků měřených kontaktní i bezkontaktní metodou lze konstatovat, že nejvyšší hodnoty drsnosti vykazovala MDF a naopak nejnižší drsnost se projevila u SSP. Vliv druhu materiálu se projevil jako statisticky velmi významný činitel ovlivňující drsnost obráběného povrchu.

Laina *et al.* (2017) ve svém výzkumu zjistil, že proces obrábění velmi ovlivňuje výslednou drsnost povrchu, stejně jako druhy dřevin.



Obr. 49: Vliv druhu materiálu na drsnost

Tabulky 22 a 23 znázorňují vyhodnocení vlivu faktorů na drsnost měřenou kontaktní a bezkontaktní metodou pomocí Duncanova testu.

Z výsledků hodnot drsnosti měřených kontaktní metodou je zřejmý statisticky významný rozdíl mezi hodnotami naměřenými při řezné rychlosti 20 a 30 m/s. Při řezných rychlostech 20, 40 a 60 m/s se statisticky významný rozdíl v hodnotách drsnosti neprokázal. Vliv typu nástroje se ve všech sledovaných případech potvrdil jako velmi významně působící faktor s hladinou významnosti $P = 0,000$. Účinek podávací rychlosti koresponduje s výsledky na obrázku 47, ze kterého je zřejmé, že rozdíly v drsnosti změnou podávací rychlosti z 8 na 11 m/min nebyly velké. Vliv druhu materiálu se projevil jako velmi významný faktor s hladinou významnosti $P = 0,000$.

Tab. 22: Vliv faktorů na drsnost s využitím Duncanova testu - kontaktní metoda

Č.	Řezná rychlost (m/s)	(1) 16,316	(2) 17,690	(3) 16,438	(4) 16,507
1	20		0,000	0,328	0,148
2	30	0,000		0,000	0,000
3	40	0,328	0,000		0,578
4	60	0,148	0,000	0,578	

Č.	Podávací rychlost (m/min)	(1) 16,215	(2) 17,019	(3) 16,979
1	4		0,000	0,000
2	8	0,000		0,705
3	11	0,000	0,705	

Č.	Typ nástroje	(1) 15,838	(2) 17,776	(3) 16,599
1	HW1		0,000	0,000
2	HW2	0,000		0,000
3	HW1 CrTiN	0,000	0,000	

Č.	Druh materiálu	(1) 24,494	(2) 19,426	(3) 6,292
1	MDF		0,000	0,000
2	MDF-L	0,000		0,000
3	SSP	0,000	0,000	

Hodnoty drsnosti naměřené bezkontaktní metodou vypovídají o tom, že v případě řezné rychlosti se projevil statisticky významný rozdíl při rychlostech 20 a 30 m/s. Mezi řeznými rychlostmi 40 a 60 m/s se statisticky významný rozdíl v hodnotách drsnosti neprokázal, což je patrné i z obrázku 46, kde je zřejmé, že rozdíly v drsnosti změnou řezné rychlosti ze 40 na 60 m/s nebyly velké. Mezi podávacími rychlostmi 8 a 11 m/min se statisticky významný rozdíl v hodnotách drsnosti neprokázal. Obdobně jako u kontaktní metody měření drsnosti se vliv typu nástroje ve všech sledovaných případech potvrdil jako velmi významně působící faktor s hladinou významnosti $P = 0,000$, stejně jako vliv druhu materiálu.

Tab. 23: Vliv faktorů na drsnost s využitím Duncanova testu – bezkontaktní metoda

Č.	Řezná rychlost (m/s)	(1) 20,621	(2) 20,079	(3) 19,146	(4) 19,507
1	20		0,030	0,000	0,000
2	30	0,030		0,000	0,022
3	40	0,000	0,000		0,147
4	60	0,000	0,022	0,147	

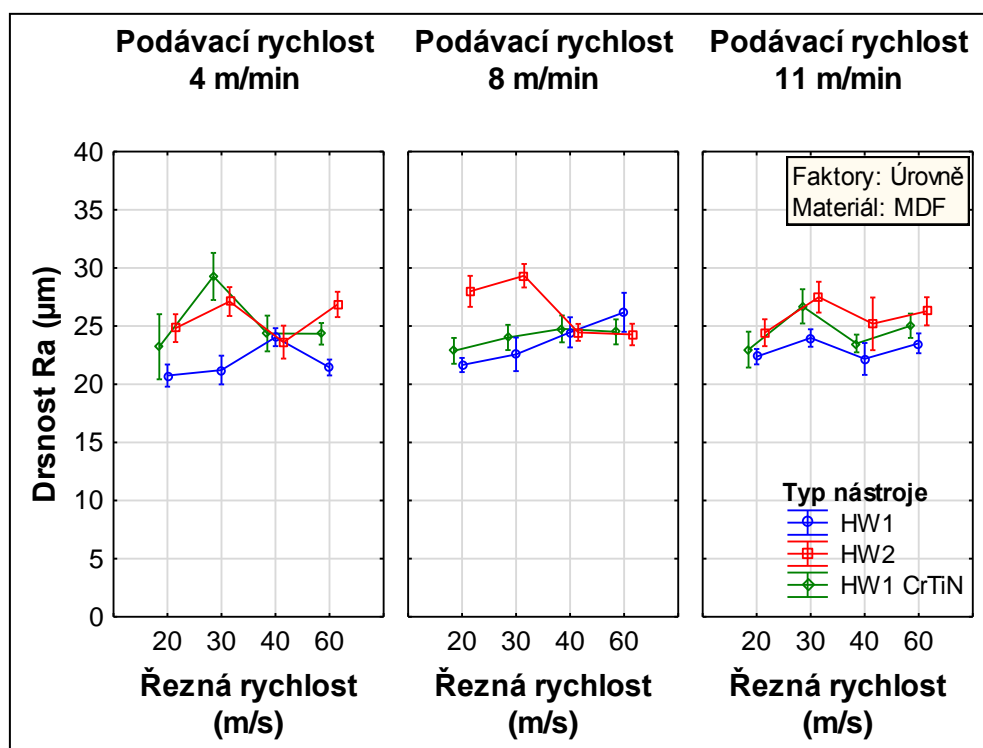
Č.	Podávací rychlost (m/min)	(1) 19,407	(2) 20,220	(3) 19,888
1	4		0,000	0,026
2	8	0,000		0,125
3	11	0,026	0,125	

Č.	Typ nástroje	(1) 18,244	(2) 20,189	(3) 21,082
1	HW1		0,000	0,000
2	HW2	0,000		0,000
3	HW1 CrTiN	0,000	0,000	

Č.	Druh materiálu	(1) 28,002	(2) 24,284	(3) 7,2287
1	MDF		0,000	0,000
2	MDF-L	0,000		0,000
3	SSP	0,000	0,000	

Obrázky 50 až 55 znázorňují synergický účinek všech čtyř sledovaných faktorů (řezná rychlost, podávací rychlost, typ nástroje a druh materiálu) na hodnoty drsnosti. Ve všech sledovaných interakcích se účinek materiálu významně podílel na změně naměřených hodnot. Dalším velmi významně působícím faktorem ovlivňujícím synergický účinek sledovaných faktorů je typ nástroje.

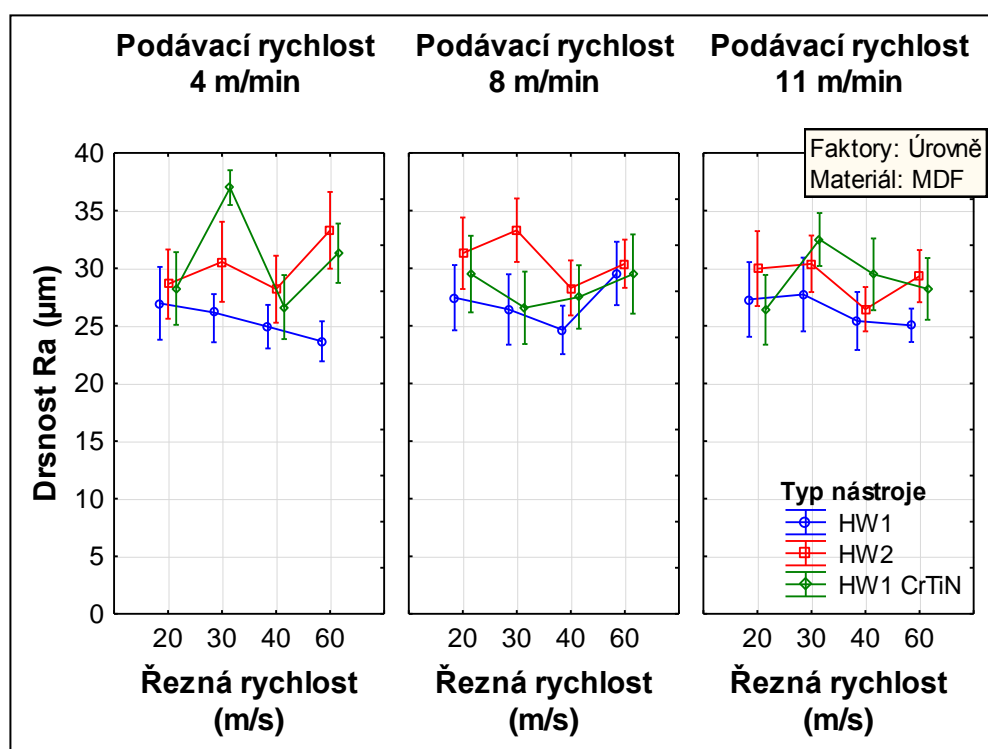
Při obrábění MDF se ukázalo, že nejnižších hodnot Ra naměřených kontaktní metodou bylo dosaženo při použití frézy HW1, podávací rychlosti 4 m/min a řezné rychlosti 20, 30 a 60 m/s. Hodnota Ra byla v těchto případech shodná a to 21 μm . Nejnižší hodnota byla tedy dosažena při nejnižší podávací rychlosti (posuvu na zub), k čemuž dospěl i výzkum, kterým se zabývali Wilkowski *et al.* (2015). Nejvyšší hodnota pro frézu HW1 byla 26 μm a to při nastavení řezné rychlosti 60 m/s a podávací rychlosti 8 m/min. Maximální hodnoty Ra při obrábění MDF bylo dosaženo při použití fréz HW2 a HW1 CrTiN kdy byla tato hodnota 29 μm , pro nastavení HW2 – řezná rychlost 30 m/s a podávací rychlost 8 m/min a pro HW1 CrTiN – řezná rychlost 30 m/s a podávací rychlost 4 m/min. Interval pro veškeré hodnoty Ra byl tedy 21- 29 μm .



Obr. 50: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnost povrchu MDF – kontaktní metoda

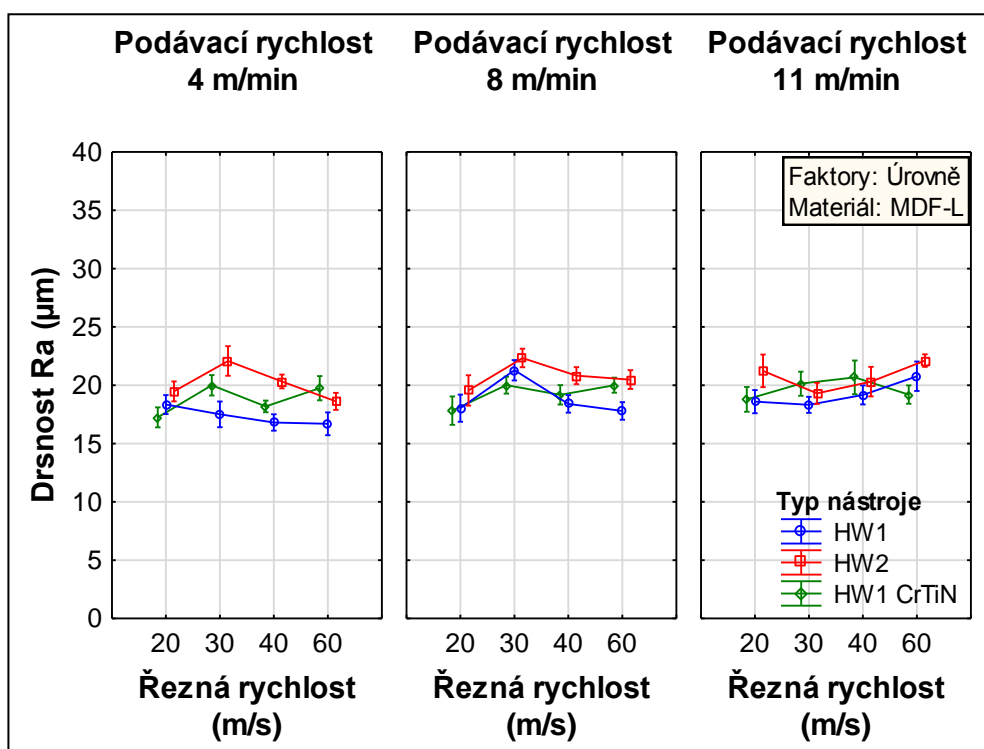
Po použití bezkontaktní metody měření Ra při obrábění MDF bylo zjištěno, že se hodnoty pohybují v intervalu od 24 μm do 37 μm . Nejnižší hodnota Ra byla naměřena po použití frézy HW1 při podávací rychlosti 4 m/min a řezné rychlosti 60 m/s. Naopak nejvyšší hodnota byla zaznamenána u frézy HW1 CrTiN při podávací rychlosti 4 m/min a řezné rychlosti 30 m/s.

Naměřené hodnoty ukazují, že většiny nejlepších výsledných hodnot drsnosti bylo dosaženo při použití žiletkového nože HW1, i když se nejnižších hodnot nedosáhlo při všech kombinacích faktorů. Průběh ostatních nožů se jeví nejednoznačně.



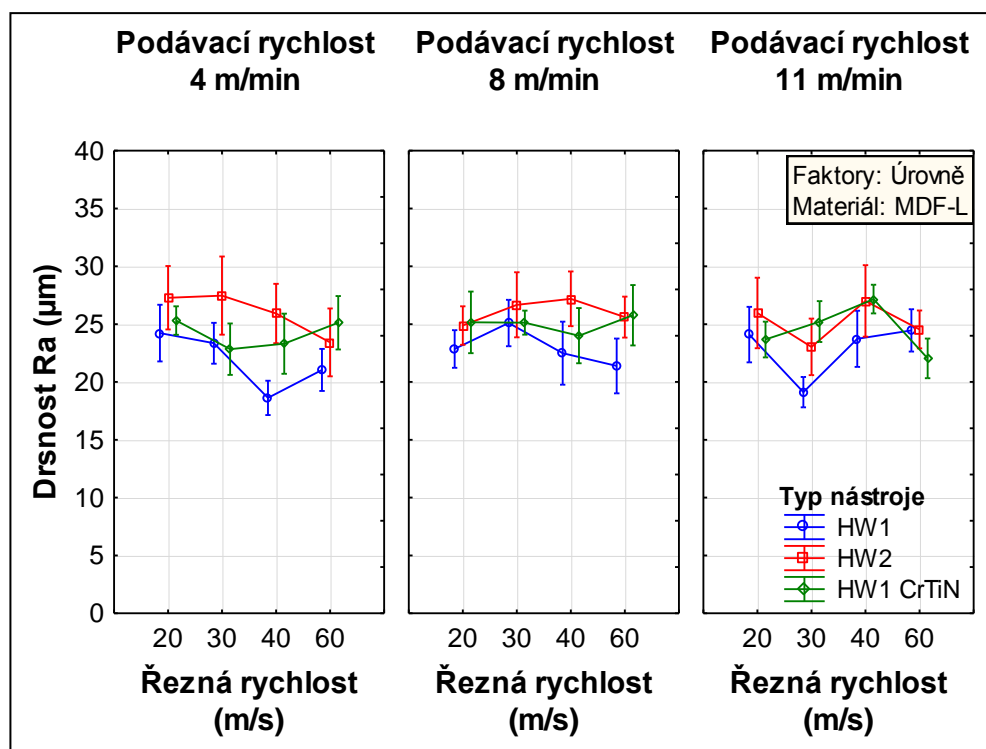
Obr. 51: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnost povrchu MDF – bezkontaktní metoda

Při obrábění MDF s jednostrannou laminací byly hodnoty Ra naměřené kontaktní metodou v intervalu od 17 μm do 22 μm . Při porovnání s MDF tedy nižší a v užším intervalu. Minima bylo dosaženo při podávací rychlosti 4 m/min a to pro frézu HW1 při řezných rychlostech 40 a 60 m/s a pro frézu HW1 CrTiN při řezné rychlosti 20 m/s. Naopak nejvyšší hodnoty Ra bylo dosaženo frézou HW2 při řezné rychlosti 30 m/s a podávacích rychlostech 4 a 8 m/min.



Obr. 52: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnost povrchu MDF-L – kontaktní metoda

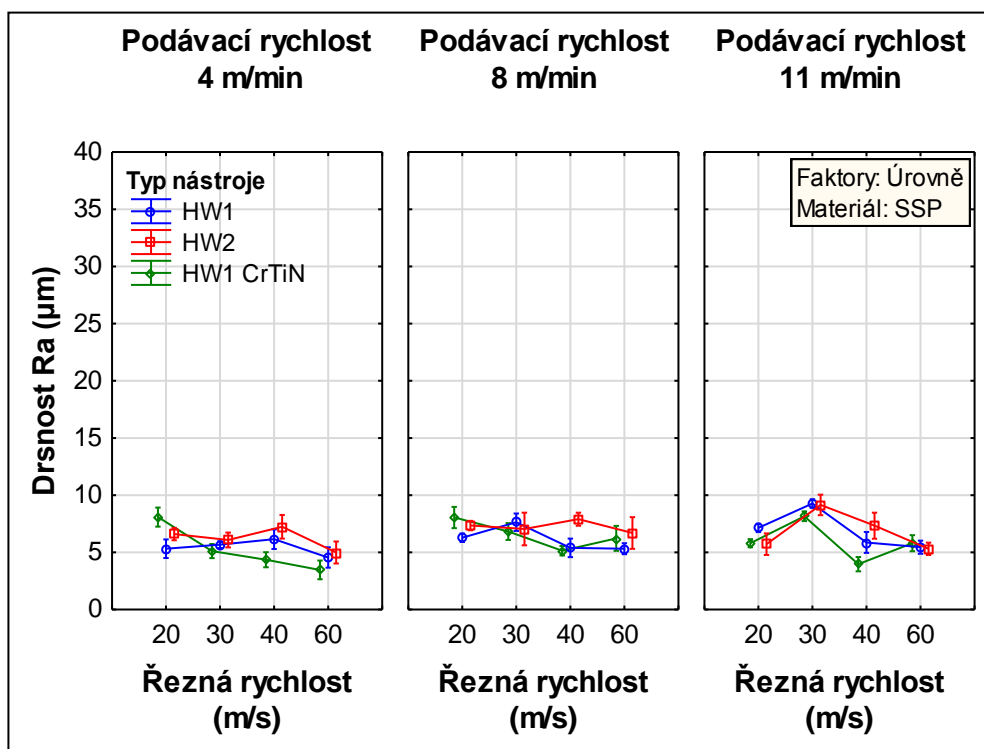
Při bezkontaktní metodě měření drsnosti povrchu MDF-L nabývaly hodnoty Ra intervalu od 19 μm do 27 μm . Minimální hodnoty byly zjištěny pro frézu HW1, a sice při podávací rychlosti 4 m/min a řezné rychlosti 40 m/s a při podávací rychlosti 11 m/min a řezné rychlosti 30 m/s. Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány po použití fréz HW2 a HW1 CrTiN. Po použití frézy HW2 byla hodnota 27 μm zjištěna v pěti případech, a to při podávací rychlosti 4 m/min a řezných rychlostech 20 a 30 m/s, při podávací rychlosti 8 m/min a řezných rychlostech 30 a 40 m/s a při podávací rychlosti 11 m/min a řezné rychlosti 40 m/s. Po použití frézy HW1 CrTiN byla hodnota 27 μm zjištěna pouze v jednom případě, a sice při podávací rychlosti 11 m/min a řezné rychlosti 40 m/s.



Obr. 53: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnost povrchu MDF-L - bezkontaktní metoda

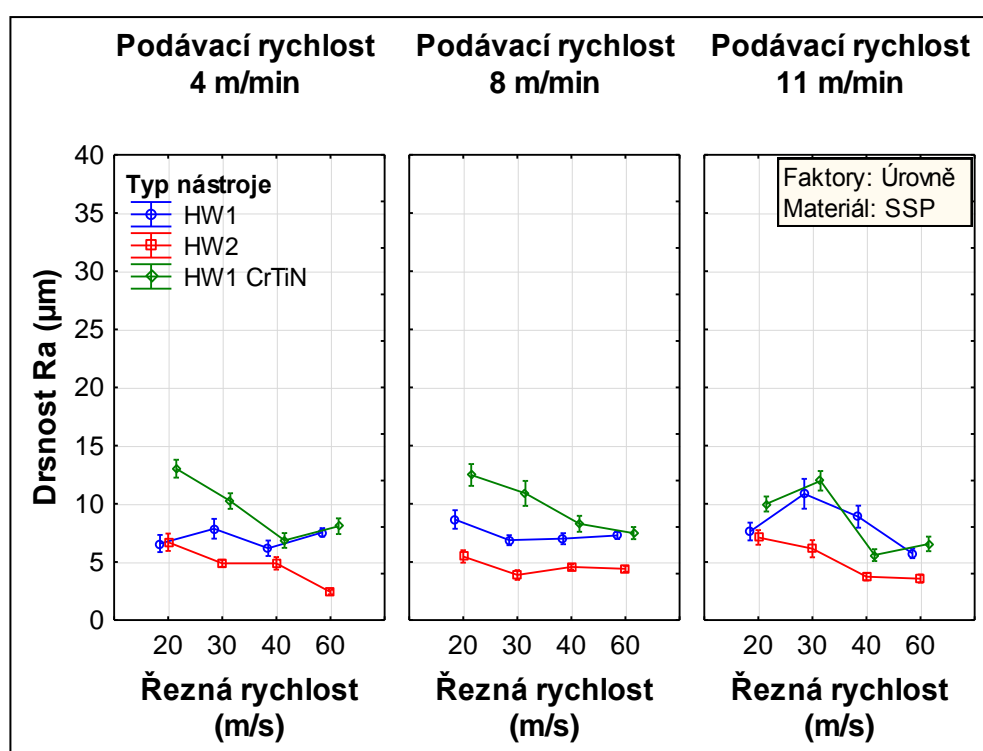
Při zjišťování R_a po obrábění SSP byly hodnoty celkově nižší než při obrábění MDF a MDF-L. Interval hodnot R_a po měření kontaktní metodou byl v rozmezí 3 až 9 μm , přičemž minima bylo dosaženo v jednom případě, při nastavení řezné rychlosti 60 m/s a podávací rychlosti 4 m/min s použitím frézy HW1 CrTiN. Maxima z intervalu hodnot bylo dosaženo při použití fréz HW1 a HW2 při řezné rychlosti 30 m/s a podávací rychlosti 11 m/min.

Naměřené výsledky vypovídají o tom, že u tohoto druhu materiálu nelze jednoznačně specifikovat, který typ nástroje by byl vhodnější pro dosažení co nejmenší drsnosti obráběného povrchu, neboť zde hraje velkou roli původní struktura a uspořádání buněk rostlého dřeva (směr, letokruhy apod.).



Obr. 54: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnost povrchu SSP – kontaktní metoda

Hodnoty Ra po obrábění SSP při měření bezkontaktní metodou nabývaly hodnot v intervalu od 2 μm do 13 μm . Nejmenší hodnota Ra byla zjištěna po použití frézy HW2 při podávací rychlosti 4 m/min a řezné rychlosti 60 m/s. Naopak nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u frézy HW1 CrTiN při podávací rychlosti 4 m/min a řezné rychlosti 20 m/s. Podobné závislosti prokázal ve svém výzkum Škaljic *et al.* (2009), který se zabýval závislostí podávací rychlosti na jakosti povrchu při obrábění jedlového dřeva. Tedy se zvýšením řezné rychlosti se snižuje drsnost.



Obr. 55: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na drsnost povrchu SSP – bezkontaktní metoda

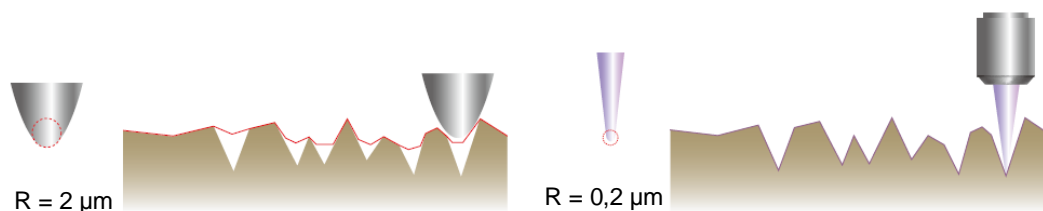
Všeobecně lze konstatovat, že řezná rychlost dosáhla statisticky významný vliv na hodnoty drsnosti, ovšem tento vliv neměl jasný charakter a rozdíly v drsnosti dosažené při jednotlivých rychlostech nebyly výrazné. Nejvýrazněji se projevila řezná rychlost 30 m/s, a to v největší míře u MDF. Vliv podávací rychlosti se projevila jednoznačně, tj. se zvyšováním podávací rychlosti docházelo k přímo úměrnému nárůstu hodnot drsnosti. Ovšem, rozdíly v drsnosti zjištěné při nejvyšší a nejnižší podávací rychlosti byly pouze 4,7%. Nejvyšší drsnost byla naměřena po

použití nástroje HW2, mírně nižší hodnoty byly zjištěny u nástroje HW1 s povlakem CrTiN a nejnižší u nástroje HW1. Vliv obráběného materiálu se projevil nejvýrazněji. Drsnost zjištěná po frézování MDF dosahovala hodnot, které byly o 26,3% vyšší než hodnoty u MDF-L a dokonce až o 28,9% vyšší v porovnání s drsností zjištěné u SSP.

Zvýšení podílů tepla z řezného procesu odvedeného třískou díky vysoké relativní rychlosti třísky vzhledem k ploše čela řezného klínu a současným zvýšením kvality řezné hrany má za následek snížení tepelného a mechanického namáhání nástroje, čím se logicky prodlouží jeho trvanlivost a životnost. Když se podstatně zvýší množství tepla odvedeného třískou, tak se velikost tepelného toku do obrobku, nástroje a stroje sníží, přičemž se rovněž sníží řezné síly, co posléze vyústí do zvýšení přesnosti obrobku a také kvality jeho povrchu.

Při porovnání kontaktní a bezkontaktní metody měření Ra se prokázal významný rozdíl u všech faktorů (viz obrázky 46, 47, 48 a 49). Tento rozdíl v naměřených hodnotách při totožném nastavení obou profilometrů je způsoben v největší míře rozdílným poloměrem R (hrotu ramínka/ optického paprsku) viz obrázek 56. Díky tomuto rozdílu v poloměru lze použít optický profilometr na přesné měření profilu drsnosti. Při zjišťování drsnosti je v dnešní době potřebné znát přesnou hodnotu a je vidět že kontaktní profilometr ji mírně zkresluje oproti optickému profilometru.

Ze závěrů Budakci *et al.* (2013) vyplývá, že laserová metoda je vhodnější pro zjišťování jakosti než metoda kontaktní.



Obr. 56: Vlevo – měření pomocí *Form Talysurf 50 Intra*; Vpravo – *Lext 3D OLS4100*
(OLYMPUS, 2017)

5.3 Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti „Wa“ – kontaktní a bezkontaktní

Průměrné hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu vlnitosti „Wa“, naměřených při jednotlivých souborech zkušebních těles, stejně jako jejich variační koeficienty, jsou uvedené v tabulkách 24 a 25.

Tab. 24: Průměrné hodnoty vlnitosti – kontaktní metoda

Řezná rychlost (m/s)	Podávací rychlost (m/min)	Druh materiálu	Typ nástroje	Vlnitost (μm)	Typ nástroje	Vlnitost (μm)	Typ nástroje	Vlnitost (μm)	
20	4	MDF	HW1	28 (11.0)	HW2	30 (14.4)	HW1 CrTiN	33 (13.5)	
30	4		HW1	25 (11.3)	HW2	28 (10.3)	HW1 CrTiN	33 (10.7)	
40	4		HW1	29 (12.7)	HW2	26 (10.1)	HW1 CrTiN	28 (19.2)	
60	4		HW1	31 (12.3)	HW2	29 (13.7)	HW1 CrTiN	30 (6.3)	
20	8		HW1	24 (8.1)	HW2	33 (9.8)	HW1 CrTiN	26 (12.0)	
30	8		HW1	29 (19.0)	HW2	35 (15.5)	HW1 CrTiN	33 (18.4)	
40	8		HW1	28 (10.0)	HW2	28 (10.5)	HW1 CrTiN	28 (9.8)	
60	8		HW1	30 (18.9)	HW2	27 (8.1)	HW1 CrTiN	30 (8.3)	
20	11		HW1	37 (10.7)	HW2	32 (19.6)	HW1 CrTiN	28 (17.3)	
30	11		HW1	26 (16.1)	HW2	31 (11.7)	HW1 CrTiN	32 (12.5)	
40	11		HW1	22 (11.2)	HW2	30 (15.8)	HW1 CrTiN	26 (10.6)	
60	11		HW1	25 (9.6)	HW2	28 (10.8)	HW1 CrTiN	27 (14.3)	
20	4		MDF- L	HW1	19 (12.3)	HW2	24 (14.4)	HW1 CrTiN	28 (14.0)
30	4			HW1	25 (15.9)	HW2	26 (13.4)	HW1 CrTiN	26 (15.9)
40	4	HW1		18 (15.2)	HW2	22 (10.9)	HW1 CrTiN	19 (17.2)	
60	4	HW1		28 (12.4)	HW2	22 (10.7)	HW1 CrTiN	21 (11.8)	
20	8	HW1		20 (13.6)	HW2	21 (19.5)	HW1 CrTiN	21 (10.9)	
30	8	HW1		24 (17.7)	HW2	24 (10.0)	HW1 CrTiN	31 (16.4)	
40	8	HW1		19 (9.4)	HW2	22 (13.9)	HW1 CrTiN	20 (8.6)	
60	8	HW1		20 (19.0)	HW2	20 (12.1)	HW1 CrTiN	20 (10.6)	
20	11	HW1		21 (8.3)	HW2	24 (14.4)	HW1 CrTiN	27 (13.1)	
30	11	HW1		18 (11.3)	HW2	21 (19.1)	HW1 CrTiN	25 (19.2)	
40	11	HW1		19 (15.4)	HW2	20 (11.0)	HW1 CrTiN	22 (19.4)	
60	11	HW1		26 (15.1)	HW2	22 (8.9)	HW1 CrTiN	20 (8.1)	
20	4	SSP		HW1	15 (15.3)	HW2	26 (10.2)	HW1 CrTiN	22 (6.6)
30	4			HW1	14 (16.2)	HW2	16 (12.1)	HW1 CrTiN	15 (17.6)
40	4		HW1	29 (17.7)	HW2	24 (16.7)	HW1 CrTiN	13 (19.1)	
60	4		HW1	14 (17.8)	HW2	19 (15.6)	HW1 CrTiN	11 (12.9)	
20	8		HW1	26 (16.7)	HW2	19 (19.2)	HW1 CrTiN	25 (17.8)	
30	8		HW1	20 (10.7)	HW2	20 (9.8)	HW1 CrTiN	18 (10.9)	
40	8		HW1	21 (10.9)	HW2	40 (15.4)	HW1 CrTiN	18 (11.3)	
60	8		HW1	17 (18.5)	HW2	20 (13.9)	HW1 CrTiN	17 (11.2)	
20	11		HW1	32 (12.7)	HW2	45 (8.3)	HW1 CrTiN	19 (8.2)	
30	11		HW1	21 (19.4)	HW2	59 (16.5)	HW1 CrTiN	16 (15.8)	
40	11		HW1	26 (19.2)	HW2	23 (16.6)	HW1 CrTiN	12 (11.9)	
60	11		HW1	19 (11.2)	HW2	18 (20.4)	HW1 CrTiN	14 (14.4)	

(Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty v %.)

Tab. 25: Průměrné hodnoty vlnitosti – bezkontaktní metoda

Řezná rychlost (m/s)	Podávací rychlost (m/min)	Druh materiálu	Typ nástroje	Vlnitost (μm)	Typ nástroje	Vlnitost (μm)	Typ nástroje	Vlnitost (μm)
20	4	MDF	HW1	31 (13,8)	HW2	33 (15,1)	HW1 CrTiN	39 (15,7)
30	4		HW1	24 (11,6)	HW2	25 (16,0)	HW1 CrTiN	34 (15,5)
40	4		HW1	24 (15,2)	HW2	27 (12,9)	HW1 CrTiN	34 (14,3)
60	4		HW1	19 (8,7)	HW2	32 (15,7)	HW1 CrTiN	33 (14,3)
20	8		HW1	25 (14,6)	HW2	37 (14,5)	HW1 CrTiN	28 (15,4)
30	8		HW1	26 (12,6)	HW2	35 (12,2)	HW1 CrTiN	24 (13,9)
40	8		HW1	28 (13,9)	HW2	35 (7,7)	HW1 CrTiN	30 (15,2)
60	8		HW1	32 (5,8)	HW2	23 (12,0)	HW1 CrTiN	34 (10,5)
20	11		HW1	31 (17,0)	HW2	30 (16,4)	HW1 CrTiN	32 (8,7)
30	11		HW1	34 (8,5)	HW2	25 (11,1)	HW1 CrTiN	38 (12,8)
40	11		HW1	26 (12,1)	HW2	34 (8,6)	HW1 CrTiN	25 (14,4)
60	11		HW1	24 (16,3)	HW2	27 (13,7)	HW1 CrTiN	25 (7,6)
20	4	MDF- L	HW1	18 (11,6)	HW2	26 (11,9)	HW1 CrTiN	26 (15,1)
30	4		HW1	26 (18,0)	HW2	24 (9,4)	HW1 CrTiN	22 (16,4)
40	4		HW1	17 (21,2)	HW2	25 (8,1)	HW1 CrTiN	21 (14,9)
60	4		HW1	26 (14,8)	HW2	25 (10,9)	HW1 CrTiN	23 (11,5)
20	8		HW1	22 (11,4)	HW2	25 (8,5)	HW1 CrTiN	18 (19,6)
30	8		HW1	24 (14,7)	HW2	24 (13,6)	HW1 CrTiN	34 (17,5)
40	8		HW1	19 (15,0)	HW2	23 (14,7)	HW1 CrTiN	19 (16,8)
60	8		HW1	27 (13,7)	HW2	18 (12,7)	HW1 CrTiN	22 (19,1)
20	11		HW1	23 (14,6)	HW2	24 (12,8)	HW1 CrTiN	27 (14,9)
30	11		HW1	19 (15,0)	HW2	23 (14,5)	HW1 CrTiN	28 (16,0)
40	11		HW1	21 (7,0)	HW2	19 (16,5)	HW1 CrTiN	22 (27,8)
60	11		HW1	28 (13,9)	HW2	24 (14,8)	HW1 CrTiN	20 (17,4)
20	4	SSP	HW1	16 (14,4)	HW2	19 (16,4)	HW1 CrTiN	26 (12,3)
30	4		HW1	12 (8,4)	HW2	17 (8,3)	HW1 CrTiN	14 (11,5)
40	4		HW1	25 (11,0)	HW2	16 (13,4)	HW1 CrTiN	15 (15,0)
60	4		HW1	15 (12,5)	HW2	14 (10,6)	HW1 CrTiN	14 (13,1)
20	8		HW1	23 (4,1)	HW2	14 (13,2)	HW1 CrTiN	25 (14,5)
30	8		HW1	23 (5,2)	HW2	16 (11,3)	HW1 CrTiN	14 (10,5)
40	8		HW1	24 (8,5)	HW2	17 (15,4)	HW1 CrTiN	26 (7,1)
60	8		HW1	17 (15,6)	HW2	16 (9,4)	HW1 CrTiN	19 (12,4)
20	11		HW1	33 (10,8)	HW2	16 (16,5)	HW1 CrTiN	17 (12,8)
30	11		HW1	23 (9,5)	HW2	17 (9,4)	HW1 CrTiN	16 (13,4)
40	11		HW1	37 (9,7)	HW2	16 (15,2)	HW1 CrTiN	18 (14,9)
60	11		HW1	15 (14,3)	HW2	16 (8,4)	HW1 CrTiN	14 (13,4)

(Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty v %.)

V tabulkách 26 a 27 jsou uvedené výsledky více faktorové analýzy rozptylu hodnotící účinek jednotlivých faktorů a jejich vzájemnou interakci na hodnoty W_a , měřené kontaktní a bezkontaktní metodou. Na základě hodnot hladiny významnosti “P” lze konstatovat, že účinek všech faktorů, stejně jako jejich vzájemnou interakci, je možné považovat za statisticky významný, jak u kontaktní metody měření vlnitosti, tak u bezkontaktní metody. Statistická významnost se potvrdila i po aplikaci Duncanova testu na naměřené výsledky (Tab. 28 a 29).

Tab. 26: Vliv různých faktorů na vlnitost – kontaktní metoda

Faktory	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti “P”
Intercept	628866,4	1	628866,4	11780,2	0,000
Řezná rychlost	2575,663	3	858,554	16,083	0,000
Podávací rychlost	794,482	2	397,241	7,441	0,001
Typ nástroje	3187,782	2	1593,891	29,858	0,000
Druh materiálu	12919,6	2	6459,839	121,009	0,000
Řezná rychlost × Podávací rychlost × Typ nástroje × Druh materiálu	7245,892	24	301,912	5,656	0,000
Chyba	51888,2	972	53,383		

Tab. 27: Vliv různých faktorů na vlnitost – bezkontaktní metoda

Faktory	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti “P”
Intercept	620162,2	1	620162,2	56558,08	0,000
Řezná rychlost	2042,5	3	680,8	62,09	0,000
Podávací rychlost	364,3	2	182,1	16,61	0,000
Typ nástroje	321,9	2	160,9	14,68	0,000
Druh materiálu	19266,1	2	9633,0	878,52	0,000
Řezná rychlost × Podávací rychlost × Typ nástroje × Druh materiálu	5920,2	24	246,7	22,50	0,000
Chyba	10658,0	972	11,0		

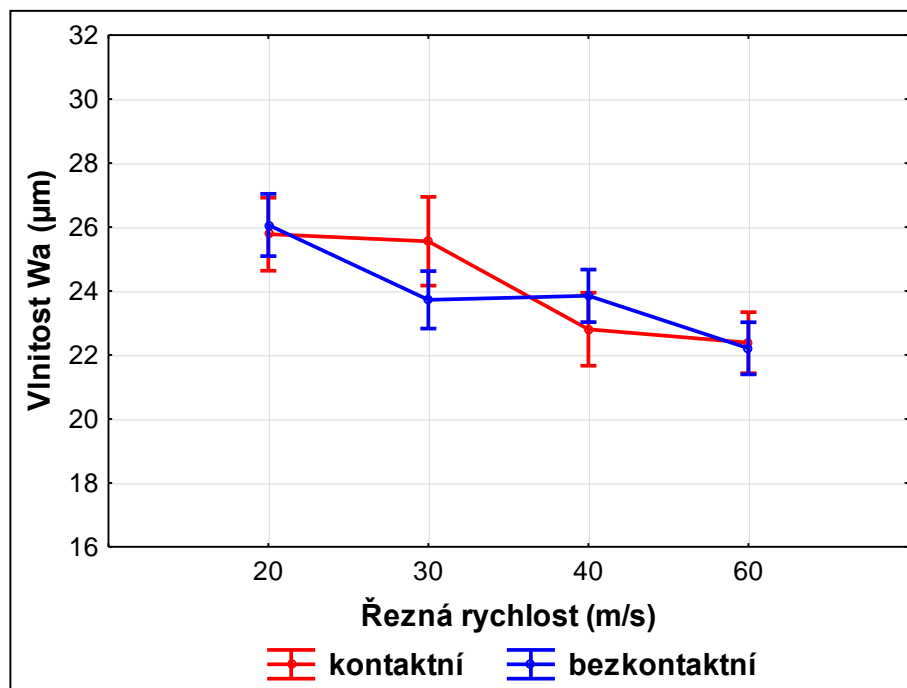
Z grafického vyhodnocení (Obr. 57) je patrný vliv řezné rychlosti nástroje na vlnitost. Kontaktní metoda měření vlnitosti obráběného povrchu prokázala, že nejnižší hodnoty W_a byly zaznamenány při řezné rychlosti 60 m/s, zatímco nejvyšší hodnoty se projeví při řezné rychlosti 20 m/s.

Při bezkontaktní metodě měření vlnitosti došlo k obdobným výsledkům minimálních a maximálních hodnot, jako u kontaktní metody měření. Nejnižší hodnoty vlnitosti byly zjištěny při řezné rychlosti 60 m/s a maximálních hodnot dosahovala vlnitost při řezné rychlosti 20 m/s.

Z výsledků naměřených hodnot vlnitosti kontaktní i bezkontaktní metodou je patrné, že s rostoucí řeznou rychlostí klesají hodnoty vlnitosti. Ke stejné závislosti dospěli během svého výzkumu i Gaff *et al.* (2015). Dalo by se říci, že z hlediska vlnitosti je nejvhodnější větší řezná rychlost, která zajišťuje nejméně vlnitý povrch obrobené plochy. Vzhledem k tomu, že řezný proces ovlivňuje více faktorů a všechny naměřené hodnoty vlnitosti odpovídají normám, měly by se při volbě nastavení zvážit i další faktory, jako jsou energetika procesu a další jakostní vlastnosti povrchu.

Keturakis a Juodeikienė (2007) ukázali závislosti mezi jakostí povrchu a řeznou rychlostí. Se zvyšující se řeznou rychlostí se zlepšila výsledná jakost.

Při porovnání metod měření vlnitosti nebyly prokázány statisticky významné rozdíly. Průběh ovšem ukazuje, že při řezné rychlosti 30 a 40 m/s byly hodnoty obráceny. Tedy pro kontaktní metodu je W_a při řezné rychlosti 30 m/s vyšší než pro 40 m/s a naopak pro bezkontaktní metodu jsou vyšší hodnoty pro 40 m/s. Ze závěrů výzkumu Ohlídal (2010) vyplývá, že optické metody zjišťování textury povrchu nejsou v praxi tak časté ale velmi dobře by mohli doplnit metody kontaktní profilometrie.



Obr. 57: Vliv řezné rychlosti na vlnitost

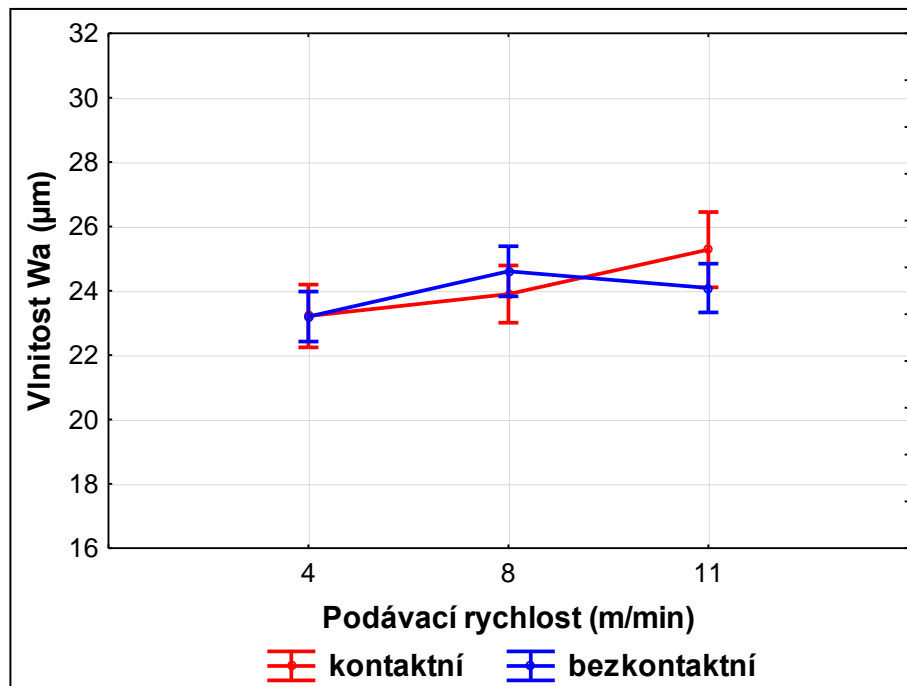
Vliv podávací rychlosti na vlnitost obráběného povrchu zachycuje obrázek 58. U kontaktní metody měření vlnitosti je patrný nárůst hodnot W_a se zvyšující se podávací rychlostí. Zatímco nejmenší průměrné hodnoty vlnitosti byly zaznamenány při podávací rychlosti 4 m/min (23,22 μm), nejvyšší hodnoty W_a byly zjištěny při podávací rychlosti 11 m/min (25,28 μm), což je nárůst o 8,9 %.

Bezkontaktní metoda měření vlnitosti prokázala, že stejně jako u kontaktní metody měření, byly nejnižší hodnoty naměřeny při podávací rychlosti 4 m/min (23,2 μm). Naopak nejvyšší hodnoty vlnitosti obráběného povrchu byly zaznamenány při podávací rychlosti 8 m/min (24,61 μm).

Vlnitost povrchu, ať už její ukazatel střední aritmetická odchylka profilu nebo největší výška profilu, s nárůstem podávací rychlosti stoupá, což znamená, že kvalita povrchu klesá. Tuto skutečnost zachycuje obrázek 58. Příčiny tohoto poklesu jsou v kvalitě povrchu (vlnitost a drsnost) skutečné řezné hrany, plastických deformací řezné plochy a v chvění. Pokud vzniká chvění, může docházet v oblasti celkem malých posuvů k většímu nárůstu drsnosti, než při posuvech větších. Podobné zjištění přinesl i výzkum Rousek *et al.* (2012b).

Keturakis a Juodeikienė (2007) ukázali závislosti mezi jakostí povrchu a podávací rychlostí. Se zvýšením podávací rychlosti se jakost snížila.

U podávacích rychlostí se neprokázal statisticky významný rozdíl mezi metodou kontaktní a bezkontaktní. Přičemž z obrázku 58 je patrné, že při podávací rychlosti 4 m/min jsou hodnoty téměř totožné, u porovnání rychlostí 8 a 11 m/min mají hodnoty pro metodu bezkontaktní klesající tendenci, naopak u metody kontaktní mají vzestupnou tendenci.



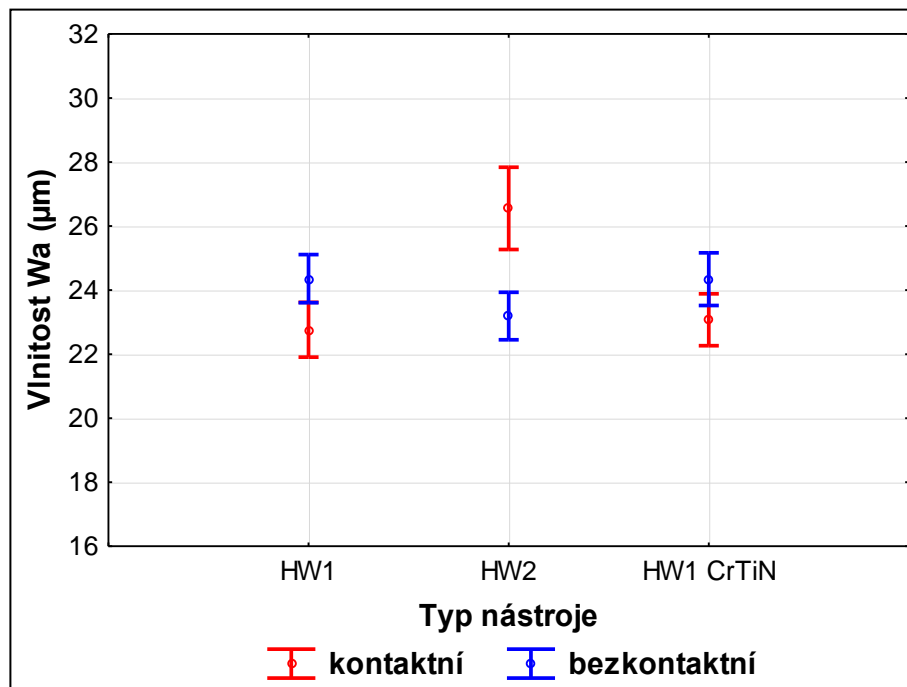
Obr. 58: Vliv podávací rychlosti na vlnitost

Z grafického vyhodnocení (Obr. 59) je vidět vliv použitého materiálu nástroje na vlnitost. Materiál HW1 se v případě kontaktního měření vlnitosti projevil jako nejvhodnější na dělení jednotlivých materiálů z pohledu vlnitosti povrchu po rovinném frézování. Trvanlivost řezného klínu nástroje odpovídá velikosti otupení řezné hrany. Největší vlnitost byla zjištěna u nástroje HW2, ale i v tomto případě je nástroj vhodný na dělení materiálů, protože naměřené hodnoty jsou v rámci normy.

Při bezkontaktní metodě měření vlnitosti obráběného povrchu dosahoval nejmenších hodnot W_a nástroj HW2 (23,19 μm), zatímco ostatní testované nástroje, HW1 a HW1 CrTiN, vykazovaly podobné výsledné hodnoty vlnitosti.

Vliv materiálu nástroje na kvalitu povrchu při frézování potvrdili ve svém výzkumu i Siklienka a Adamcová (2012).

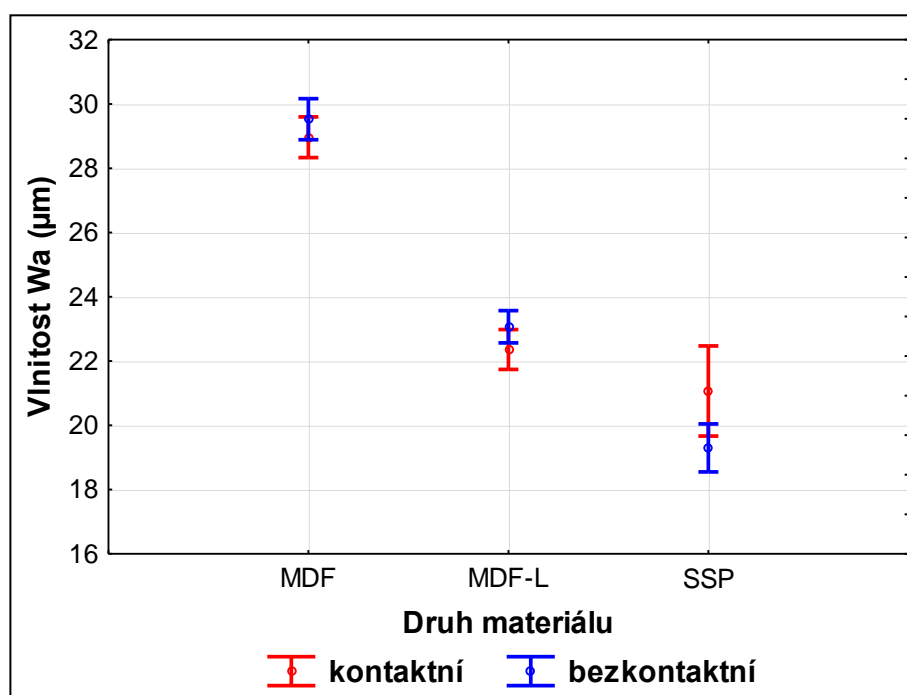
Při srovnání metod měření vlnitosti lze konstatovat, že u nástroje HW2 se prokázal statisticky významný rozdíl. Průměrné hodnoty vlnitosti při měření kontaktní metodou jsou u nástroje HW2 o 14,5 % vyšší než průměrné hodnoty měřené bezkontaktní metodou. U ostatních typů nástrojů se statisticky významný rozdíl neprokázal. Takto velký rozdíl mohl být částečně způsoben chybou měření, která u obou profilometrů dosahuje $\pm 2\%$, a také z části praktickou nemožností změření naprosto totožných míst kontaktní a bezkontaktní metodou. Budacki *et al.* (2013) zjistil, že pro přesnější vyhodnocení jakosti povrchu je laserová metoda vhodnější než kontaktní.



Obr. 59: Vliv typu nástroje na vlnitost

Vliv obráběného materiálu na vlnitost povrchu je zachycený na obrázku 60, ze kterého je patrné, že kontaktní metoda potvrdila stejný trend ve výsledcích jako bezkontaktní metoda měření vlnitosti. V obou případech se nejvyšší hodnoty vlnitosti projevily u MDF. Při frézování vznikají na povrchu vlnovité nerovnosti, a to v závislosti od počtu nožů, otáčkách nástroje a na rychlosti posuvu. Počet vlněk na jednotku délky (cm) je rozhodujícím faktorem kvality obrobeneho dílce. Při obrábění masivního dřeva je akceptované 6 vlněk na 1 cm. Při obrábění MDF, vzhledem k jemnější struktuře materiálu, je pro dobrý jakostní povrch nutné docílit minimálně 8 vln na 1 cm (Hrázský a Král, 2004; 2007). U smrkové spárovky se kvalita povrchu z pohledu vlnitosti projevila jako nejlepší z použitých materiálů.

Mezi kontaktní a bezkontaktní metodou měření vlnitosti se neprokázal statisticky významný rozdíl a to u všech zkoumaných materiálů.



Obr. 60: Vliv druhu materiálu na vlnitost

Tabulky 28 a 29 znázorňují vyhodnocení vlivu faktorů na vlnitost měřenou kontaktní a bezkontaktní metodou prostřednictvím Duncanova testu.

Při vyhodnocení výsledků vlnitosti naměřených kontaktní metodou lze pozorovat statisticky významný rozdíl mezi hodnotami naměřenými při řezných rychlostech 20 a 40 m/s a mezi hodnotami zjištěnými při řezných rychlostech 20 a 60 m/s. Při porovnání řezné rychlosti 30 m/s s ostatními hodnotami se rovněž prokázal statisticky významný rozdíl v porovnání s hodnotami naměřenými při řezných rychlostech 40 a 60 m/s. Naopak statisticky významný rozdíl se neprokázal mezi hodnotami naměřenými při řezných rychlostech 20 a 30 m/s a také mezi hodnotami při řezných rychlostech 40 a 60 m/s. Účinek podávací rychlosti se projevil jako statisticky významný mezi rychlostmi 4 a 11 m/min a mezi rychlostmi 8 a 11 m/min. Statisticky významný rozdíl se neprokázal mezi podávacími rychlostmi 4 a 8 m/min. Vliv typu nástroje se v případě frézy HW2 v porovnání s ostatními potvrdil jako velmi významně působící faktor s hladinou významnosti $P = 0,000$. Mezi nástroji HW1 a HW1 CrTiN nebyl prokázán statisticky významný rozdíl. Vliv druhu materiálu se prokázal jako významně působící faktor ve všech sledovaných případech s hladinou významnosti $P = 0,000$.

Tab. 28: Vliv faktorů na vlnitost s využitím Duncanova testu – kontaktní metoda

Č.	Řezná rychlost (m/s)	(1) 25,777	(2) 25,555	(3) 22,806	(4) 22,385
1	20		0,724	0,000	0,000
2	30	0,724		0,000	0,000
3	40	0,000	0,000		0,504
4	60	0,000	0,000	0,504	

Č.	Podávací rychlost (m/min)	(1) 23,217	(2) 23,897	(3) 25,278
1	4		0,212	0,000
2	8	0,212		0,011
3	11	0,000	0,011	

Č.	Typ nástroje	(1) 22,763	(2) 26,554	(3) 23,075
1	HW1		0,000	0,566
2	HW2	0,000		0,000
3	HW1 CrTiN	0,566	0,000	

Č.	Druh materiálu	(1) 28,965	(2) 22,360	(3) 21,067
1	MDF		0,000	0,000
2	MDF-L	0,000		0,018
3	SSP	0,000	0,018	

Při vyhodnocení výsledků vlnitosti naměřených bezkontaktní metodou se v případě řezné rychlosti prokázal statisticky významný rozdíl s hodnotou $P = 0,000$ u všech sledovaných parametrů, kromě hodnot naměřených mezi řeznými rychlostmi 30 a 40 m/s. Vliv podávací rychlosti se projevil u všech zjišťovaných parametrů jako statisticky velmi významný. Typ nástroje se, stejně jako u kontaktní metody, projevil jako významně působící faktor s hladinou významnosti $P = 0,000$ v případě frézy HW2 v porovnání s ostatními nástroji. Mezi nástroji HW1 a HW1 CrTiN nebyl prokázán statisticky významný rozdíl. Vliv druhu materiálu se rovněž jako u kontaktní metody projevil jako významně působící faktor ve všech sledovaných případech.

Tab. 29: Vliv faktorů na vlnitost s využitím Duncanova testu – bezkontaktní metoda

Č.	Řezná rychlost (m/s)	(1) 26,066	(2) 23,724	(3) 23,852	(4) 22.210
1	20		0,000	0,000	0,000
2	30	0,000		0,653	0,000
3	40	0,000	0,653		0,000
4	60	0,000	0,000	0,000	

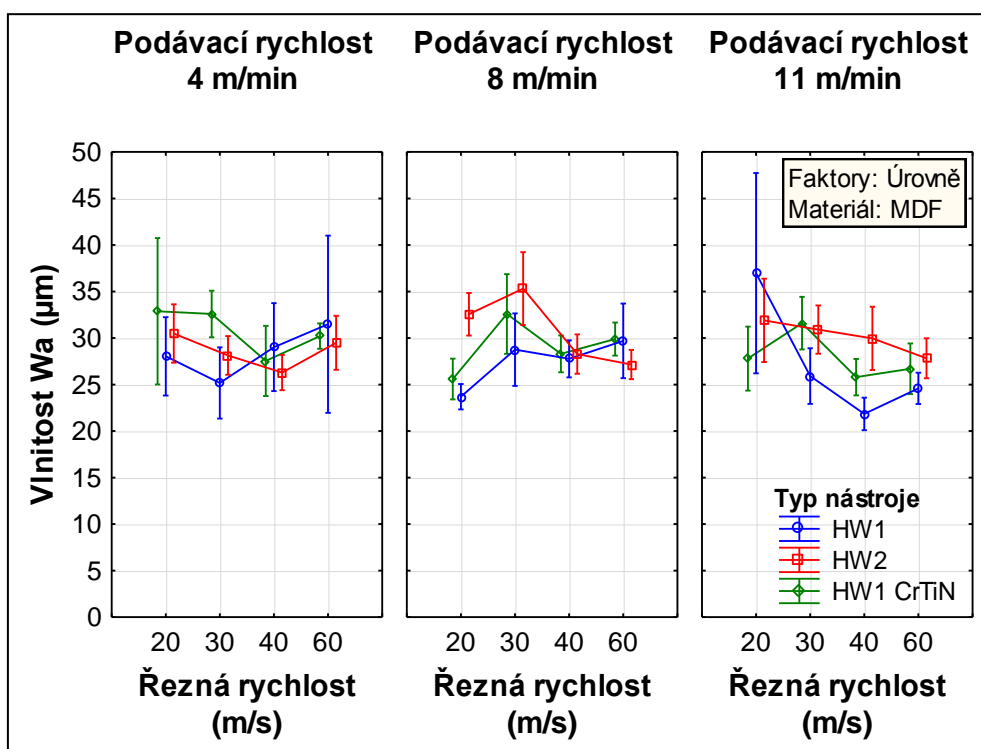
Č.	Podávací rychlost (m/min)	(1) 23,198	(2) 24,605	(3) 24,086
1	4		0,000	0,000
2	8	0,000		0,036
3	11	0,000	0,036	

Č.	Typ nástroje	(1) 24,358	(2) 23,191	(3) 24,340
1	HW1		0,000	0,942
2	HW2	0,000		0,000
3	HW1 CrTiN	0,942	0,000	

Č.	Druh materiálu	(1) 29,525	(2) 23,067	(3) 19,297
1	MDF		0,000	0,000
2	MDF-L	0,000		0,000
3	SSP	0,000	0,000	

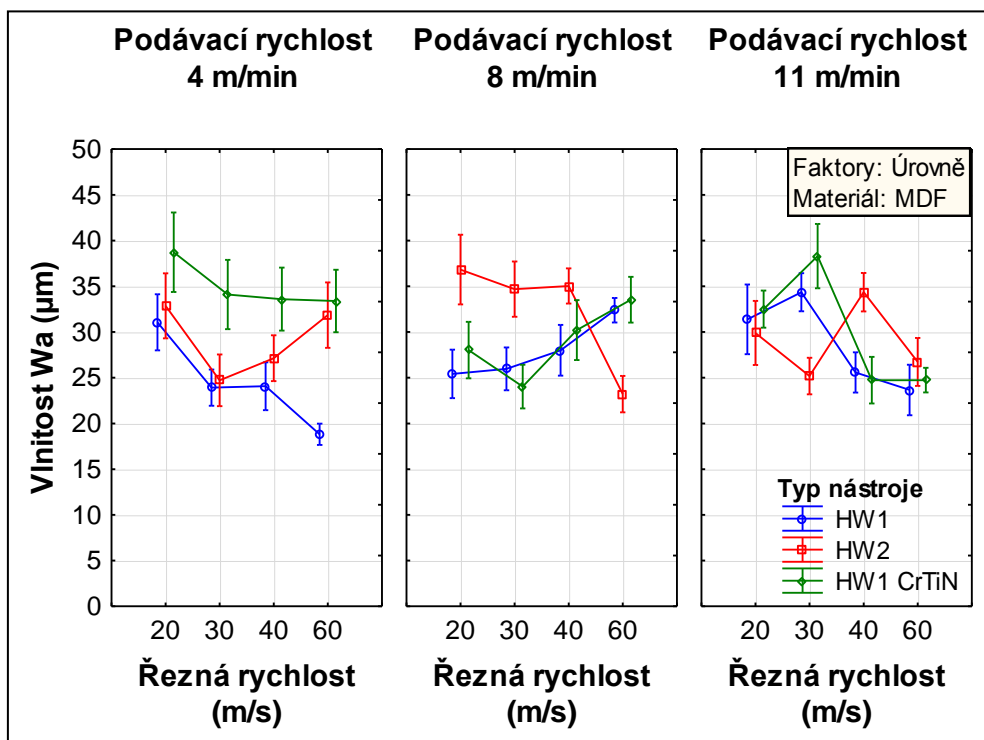
Obrázky 61 až 66 znázorňují vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost pro MDF, MDF-L a SSP.

Při bočním frézování MDF bylo nejlepší kvality povrchu z hlediska vlnitosti měřené kontaktní metodou dosaženo při použití nástroje HW1 při řezné rychlosti 40 m/s a podávací rychlosti 11 m/min. Nástroj s povlakem CrTiN dosáhl nejnižší průměrné hodnoty při stejném nastavení parametrů. Naopak nejvyšší hodnoty vlnitosti byly dosaženy při nižších řezných rychlostech. Pro HW1 byla řezná rychlost 20 m/s a pro nástroje HW2 a HW1 CrTiN to bylo 30 m/s. Všechny průměrné hodnoty se pohybují v intervalu 22 μm až 37 μm , viz obrázek 61.



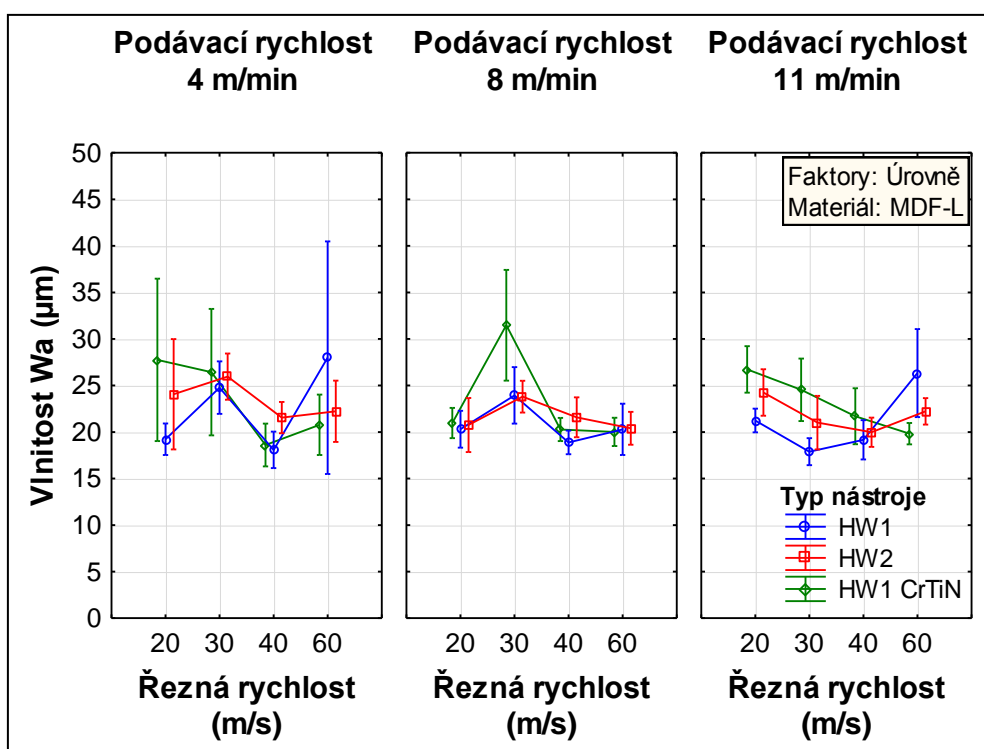
Obr. 61: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost povrchu MDF – kontaktní metoda

Při bezkontaktní metodě měření vlnitosti bylo zjištěno, že se průměrné hodnoty pohybují v intervalu 19 μm až 39 μm . Nejnižší hodnoty vlnitosti bylo dosaženo po použití nástroje HW1, řezné rychlosti 60 m/s a podávací rychlosti 4 m/min. Nejvyšší hodnota vlnitosti byla naměřena nástrojem s povlakem CrTiN při řezné rychlosti 20 m/s a podávací rychlosti 4 m/min.



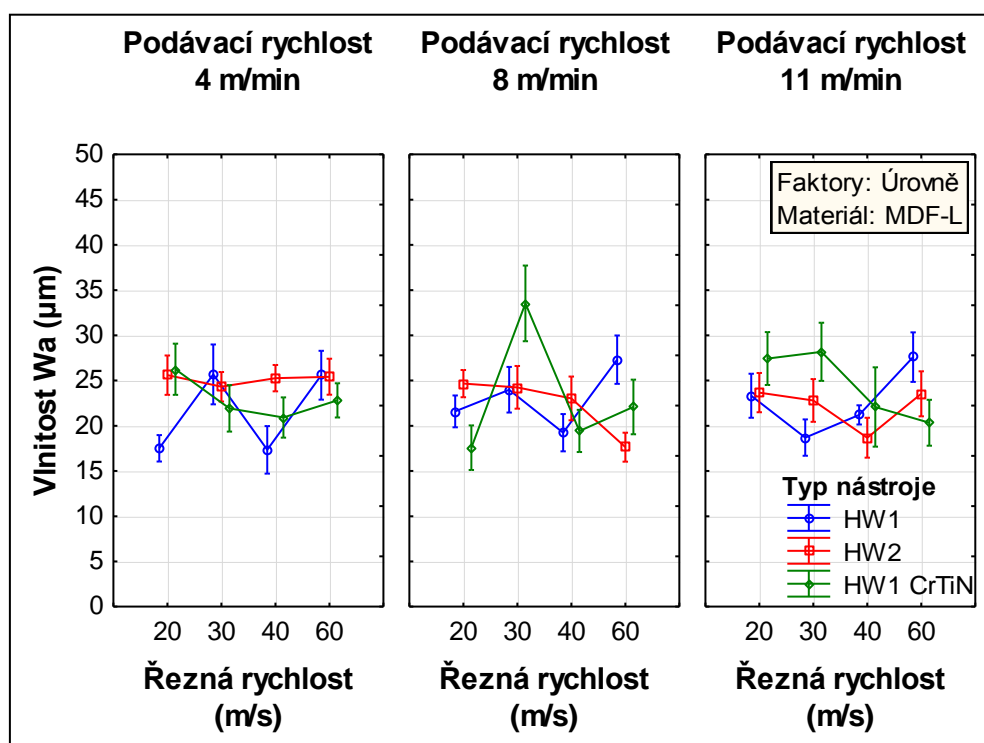
Obr. 62: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost povrchu MDF – bezkontaktní metoda

Při obrábění MDF-L se průměrné hodnoty vlnitosti měřené kontaktní metodou pohybují v intervalu 18 až 31 μm . Nejvyšší průměrná hodnota 31 μm byla změřena při řezné rychlosti 30 m/s a podávací rychlosti 8 m/min při použití nástroje s povlakem HW1 CrTiN. Nejnižší hodnoty byly změřeny při řezné rychlosti 40 m/s a podávací rychlosti 4 m/min a to u nástroje HW1 a HW1 CrTiN. Nástroj HW2 dosáhl nejlepší kvality povrchu z hlediska vlnitosti ve dvou kombinacích nastavení parametrů a to při řezné rychlosti 60 m/s a podávací rychlosti 8 m/min a dále při řezné rychlosti 40 m/s a podávací rychlosti 11 m/min (Obr. 63).



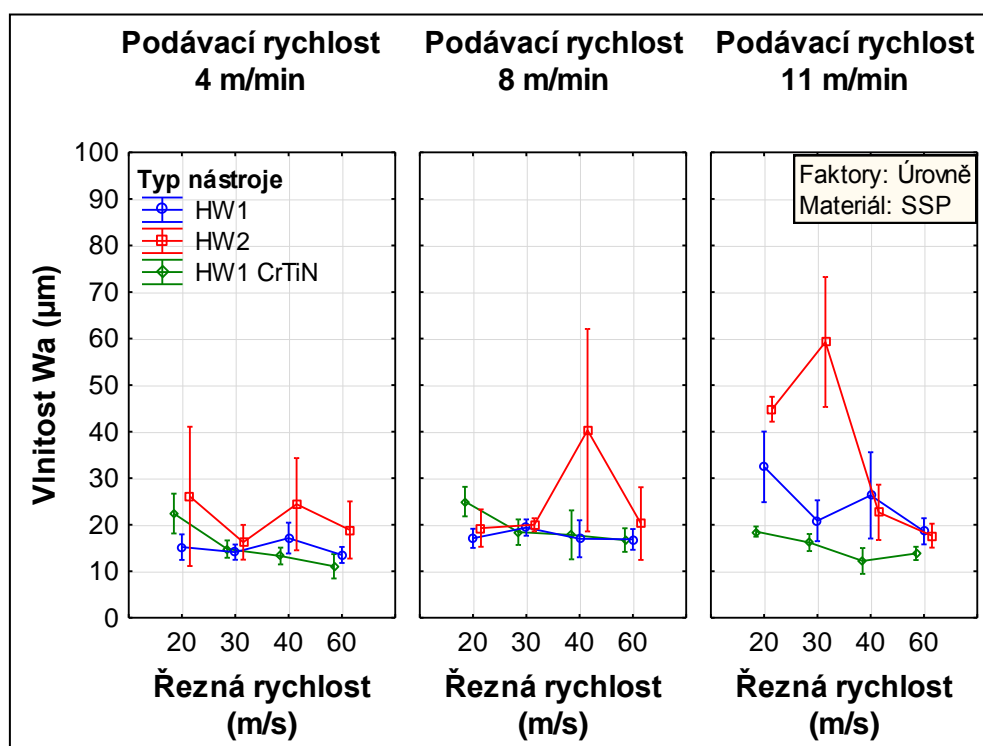
Obr. 63: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost povrchu MDF-L – kontaktní metoda

Průměrné hodnoty vlnitosti zjišťované bezkontaktní metodou nabývaly hodnot v intervalu od 17 μm do 34 μm . Stejně jako u kontaktní metody měření vlnitosti, byla i u bezkontaktní metody zjištěna nejvyšší průměrná hodnota W_a po použití nástroje HW1 CrTiN při řezné rychlosti 30 m/s a podávací rychlosti 8 m/min (34 μm). Nejnižší průměrné hodnoty (17 μm) byly zaznamenány při následující kombinaci parametrů: fréza HW1, řezná rychlost 40 m/s a podávací rychlost 4 m/min.



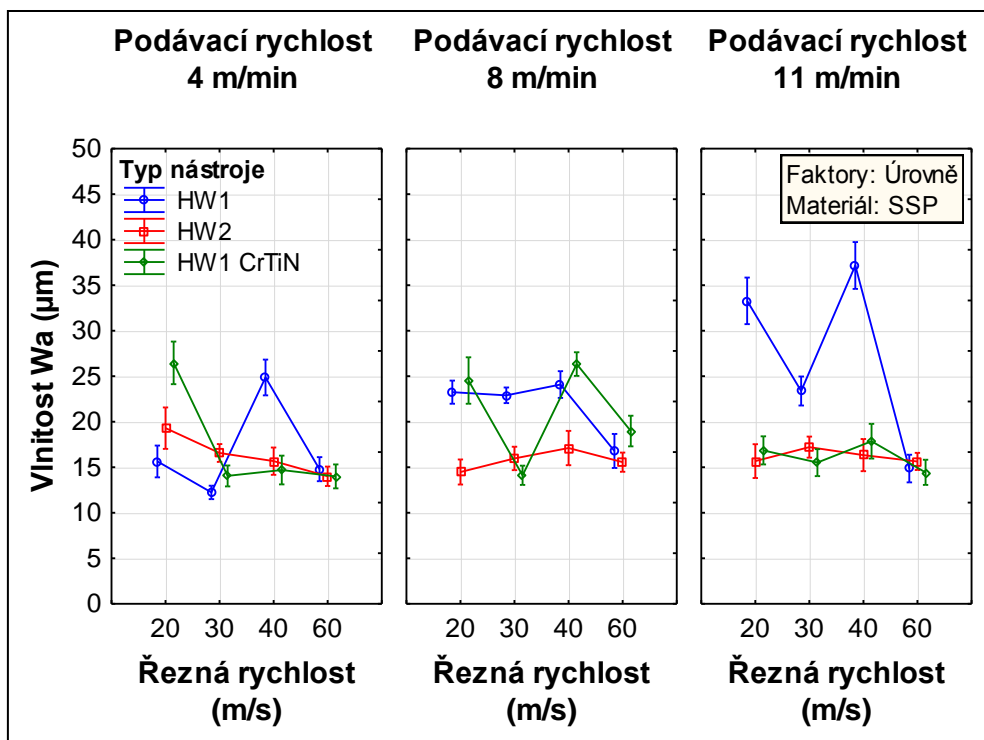
Obr. 64: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost povrchu MDF-L – bezkontaktní metoda

U SSP nabýval interval průměrných hodnot vlnitosti měřených kontaktní metodou od 11 do 59 μm . Nejnižší hodnota vlnitosti byla dosažena aplikací nástroje s povlakem HW1 CrTiN při řezné rychlosti 60 m/s a podávací rychlosti 4 m/min. Oproti tomu nejvyšší hodnota (59 μm) byla dosažena při použití nástroje HW2 při vysoké podávací rychlosti 11 m/min a nízké řezné rychlosti 30 m/s (viz Obrázek 65).



Obr. 65: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost povrchu SSP – kontaktní metoda

Hodnoty vlnitosti po obrábění SSP při měření bezkontaktní metodou nabývaly hodnot v intervalu od 12 μm do 37 μm . Nejmenší hodnota W_a byla zaznamenána po použití frézy HW1 a sice, při řezné rychlosti 30 m/s a podávací rychlosti 4 m/min. Nejvyšší hodnoty byly zjištěny rovněž u frézy HW1, a to při nastavení řezné rychlosti na 60 m/s a podávací rychlosti na 8 m/min.



Obr. 66: Vliv řezné rychlosti, podávací rychlosti a typu nástroje na vlnitost povrchu SSP – bezkontaktní metoda

Nejširší interval průměrných hodnot byl naměřen u SSP, což je zapříčiněno nehomogenní strukturou rostlého dřeva oproti homogenní struktuře MDF ve středové oblasti, kde byla vlnitost měřena. Nejnižší i nejvyšší průměrná hodnota vlnitosti byla dosažena při frézování SSP. MDF i MDF-L nemá v průměrných hodnotách tak velké výkyvy. U SSP je evidentní, že se nejlepších hodnot dosáhlo při nízké podávací rychlosti. Při obrábění MDF a MDF-L byla minima spíše při vyšších řezných rychlostech při obsazení všech podávacích rychlostí.

Na základě zjištěných výsledků je možné konstatovat, že po obrábění jednotlivých materiálů se smrková spárovka projevila z pohledu sledovaného faktoru jako nejideálnější. Z vlastností dřevořezných nástrojů použitých při frézování se z pohledu vlnitosti povrchu ukázal nástroj HW1 jako nejvhodnější při obrábění a použitých kombinací parametrů. Změny řezné rychlosti v procesu rovinného frézování způsobily snížení hodnoty střední aritmetické odchylky profilu vlnitosti. Řezná rychlost má vliv na kvalitu opracovaného povrchu. Pokud bychom chtěli dosáhnout vyšší kvality opracovaného povrchu, museli bychom zvolit vyšší řeznou rychlost a v případě posuvné rychlosti je potřeba volit co nejnižší hodnoty. Při změně posuvné rychlosti během procesu rovinného frézování došlo k opačné změně, kde při zvyšování tohoto parametru nastal nárůst střední aritmetické odchylky profilu vlnitosti.

Jak bylo konstatováno ve výzkumu Rousek *et al.* (2010), výška vlnek je teoreticky dána právě parametry frézování otáčkami a posuvem.

Aby se zabezpečila přiměřená reakce na postupnost opotřebování nástrojů během procesu frézování, je to i obrobek, a ne jen nástroj, který by se měl měřit (monitorování poklesu průměru řezu může být zbytečné při procesu bočního frézování). Ohuchi a Murase (2005, 2006) zjistili, že všeobecně je to obrobek, spíše než nástroj, který by měl být měřen přiměřeným způsobem odpovídajícím opotřebení nástroje.

6 ZÁVĚR

6.1 Celkové shrnutí

Řezné materiály, jejich vlastnosti a specifický vliv při obrábění určitých typů materiálů, patří mezi klíčové činitele při vytváření technologicko-výrobních postupů přípravy výroby v procesech technologie obrábění. Každý řezný materiál má své charakteristické vlastnosti a schopnosti, vyplývající z chemického složení, struktury, způsobu výroby, tepelného zpracování a jiných důležitých parametrů.

K základním výsledkům práce můžeme zařadit poznatky:

1. O spotřebě energie při bočním frézování různých materiálů, při různých parametrech a užitím různých typů nástrojů:
 - a) Nejvyšší hodnoty řezného příkonu byly zjištěny během bočního frézování MDF, mírně nižší hodnoty dosáhla MDF-L a nejnižší hodnoty byly dosaženy při frézování SSP. Řezný příkon naměřený během bočního frézování SSP byl o 7,3 % nižší v porovnání s MDF.
 - b) Typ nástroje ve vztahu k jeho materiálu a úpravě neměl výraznější vliv na řezný příkon. Nejvyšší hodnoty byly zjištěny při použití nože HW1 s CrTiN povlakem. Mírně nižší hodnoty dosáhl nůž HW2 a nejnižší hodnoty byly zjištěny u HW1 bez úpravy. Rozdíl v hodnotách řezného příkonu mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou dosáhl pouze 1 %.
 - c) Zvyšování řezné rychlosti vedlo k nárůstu řezného příkonu. Největší rozdíl byl mezi řeznými rychlostmi 30 a 40 m/s.
 - d) Podávací rychlost měla stejný vliv na řezný příkon jako řezná rychlost, i když rozdíly v hodnotách řezného příkonu mezi jednotlivými podávacími rychlostmi nebyly tak výrazné. Rozdíl

v hodnotách řezného příkonu naměřených při nejnižší a nejvyšší podávací rychlosti byl 9,1 %.

2. O optimálních parametrech obrábění vybraných velkoplošných materiálů s důrazem na (Ra) kvalitu opracovaného povrchu:

- a) Všeobecně, řezná rychlost dosáhla statisticky významného vlivu na hodnoty drsnosti, ovšem tento vliv neměl jasný charakter a rozdíly v drsnosti dosažené při jednotlivých rychlostech nebyly výrazné. Nejvýrazněji se projevila řezná rychlost 30 m/s (kontaktní) a 20 a 30 m/s (bezkontaktní).
- b) Vliv podávací rychlosti se projevil jednoznačně, tj. se zvyšováním podávací rychlosti docházelo k přímo úměrnému nárůstu hodnot drsnosti. Ovšem rozdíly v drsnosti zjištěné při nejvyšší a nejnižší podávací rychlosti byly pouze 4,7 % (kontaktní) a 4,1 % (bezkontaktní).
- c) U kontaktní metody byla nejvyšší drsnost naměřena po použití nástroje HW2, mírně nižší hodnoty byly zjištěny u HW1 CrTiN a nejnižší hodnoty u HW1.

U bezkontaktní metody byla nejvyšší drsnost naměřena po použití nástroje HW1 CrTiN, mírně nižší hodnoty byli zjištěny u HW2 a nejnižší hodnoty u HW1.

- d) Vliv obráběného materiálu na Ra se projevil nejvýrazněji. Drsnost zjištěná po frézování MDF dosahovala hodnot, které byly o 26,3 % (kontaktní) respektive o 15,3 % (bezkontaktní) vyšší, než hodnoty u MDF-L, a dokonce až o 289 % (kontaktní), respektive o 287 % (bezkontaktní) vyšší v porovnání s drsností zjištěné u SSP.

3. O optimálních parametrech obrábění vybraných velkoplošných materiálů s důrazem na (Wa) kvalitu opracovaného povrchu:

- a) Na základě statistických výsledků je možné konstatovat, že po obrábění jednotlivých materiálů se smrková spárovka prokázala z pohledu vlnitosti jako nejideálnější. V porovnání MDF a MDF-L vykazovala lepší hodnoty vlnitosti MDF-L.
- b) Při kontaktní metodě se z dřevořezných nástrojů použitých při frézování z pohledu vlnitosti povrchu jako nejvhodnější prokázal nástroj HW1, o něco vyšších hodnot bylo dosaženo aplikací nástroje HW1 CrTiN a nejhorší kvality z hlediska vlnitosti bylo dosaženo nástrojem HW2.

Při bezkontaktní metodě se z dřevořezných nástrojů použitých při frézování z pohledu vlnitosti povrchu jako nejvhodnější prokázal nástroj HW2, o něco vyšších hodnot bylo dosaženo aplikací nástroje HW1 CrTiN a nejhorší kvality z hlediska vlnitosti bylo dosaženo nástrojem HW1.

- c) Změna řezné rychlosti v procesu bočního frézování způsobila snížení vlnitosti. Řezná rychlost má vliv na kvalitu opracovaného povrchu. Pokud chceme dosáhnout vyšší kvality opracovaného povrchu, musíme volit vyšší řeznou rychlost.
- d) Při změně posuvné rychlosti v průběhu procesu frézování došlo k opačné změně, než u řezné rychlosti. Při zvyšování podávací rychlosti došlo k nárůstu vlnitosti.

4. O metodě identifikace kvality povrchu:

- a) Vliv na drsnost povrchu (R_a) se mezi metodou kontaktní a bezkontaktní ukázal jako statisticky významný u všech sledovaných faktorů (obráběný materiál, nástroj, řezná a podávací rychlost), přičemž metodou bezkontaktní byly naměřeny vyšší hodnoty, což bylo způsobeno v největší míře rozdílným poloměrem hrotu raménka/paprsku laseru, jejichž hodnoty jsou $2 \mu\text{m}$ / $0,2 \mu\text{m}$. Průměrné navýšení

všech faktorů u bezkontaktní metody vůči metodě kontaktní bylo o 18,47 %.

- b) Významný vliv na vlnitost povrchu (W_a) se mezi hodnocenými metodami neprokázal. Pouze v jednom případě se ukázal významný rozdíl a to při užití nástroje HW2. Tento rozdíl mohl být způsoben částečně chybou měření obou přístrojů, která dosahuje hodnot ± 2 % a také měřením rozdílné části povrchu, kde v praxi nelze dosáhnout naprosto totožného místa při měření kontaktní a bezkontaktní metodou. Všeobecně lze konstatovat, že pro měření vlnitosti lze použít obě metody zastoupené danými přístroji.

6.2 Přínos pro vědu

Význam předkládané práce pro vědu spočívá zejména v souhrnu, srovnání a doplnění poznatků, které se zabývají danou problematikou. I když se dosavadní výzkumy někdy neshodují v tom, zdali je nutné měřené veličiny především R_a a W_a vyhodnocovat společně, je jisté, že v celkovém měřítku si lze udělat lepší obraz o obráběcím procesu, ale vyhodnocení jednotlivých veličin samostatně lze z vědeckého hlediska pochopit. Vlnitost a drsnost jsou dvě rozdílné veličiny, které hodnotí jakost povrchu ze dvou úhlů pohledu a energetická náročnost je samostatný ukazatel obráběcího procesu.

Práce poskytuje informace o tom:

1. Jak jednotlivé faktory ovlivňují řezný příkon. Dále ukazuje srovnání s dalšími autory a doplňuje tyto informace o další kombinace nastavení parametrů a použití nových materiálů nástrojů a jejich srovnání z hlediska řezného příkonu.
2. Jak jednotlivé faktory mohou ovlivnit průměrnou aritmetickou úchytku profilu drsnosti (R_a). Ukazuje zákonitosti mezi zvolenými faktory a drsností

povrchu u zvolených materiálů. Tyto hodnoty jsou důležité pro následné výzkumy, např. opotřebení nástrojů a vliv tohoto opotřebení na drsnost povrchu.

3. Jak jednotlivé faktory mohou ovlivnit průměrnou aritmetickou úchylku profilu vlnitosti (W_a). I vlnitost je velmi důležitý parametr, který je při frézování vždy přítomen. Z výsledků práce lze poukázat na zákonitosti mezi obráběcím procesem a jeho vlivem na vlnitost.
4. Jakou metodu aplikovat pro vědecké hodnocení jakosti povrchu. Z vědeckého hlediska se jako lepší metoda prokázala bezkontaktní. Má přesnější výsledky, a tedy pro vědu a následné statistické zhodnocení je přínosnější. I přes vyšší pořizovací a následné náklady optických přístrojů je tedy vhodnější. Další výhodou bezkontaktní metody je opakovatelnost měření, protože nemůže dojít k poškození vzorku, oproti raménku u kontaktní metody. V neposlední řadě je velkou výhodou optického přístroje širší využití z vědeckého hlediska.

6.3 Přínos pro praxi

I přesto, že se obdobnou problematikou zabývá mnoho autorů, je důležité z pohledu praxe dále zkoumat nově vzniklé nástrojové materiály přímo v obráběcím procesu a porovnávat je s materiály již používanými. I když teorie mluví celkem jasně, právě přímá aplikace nám ukáže opravdový průběh jednotlivých procesů obrábění. Po této aplikaci v praxi je důležité zhodnocení výsledků pomocí metod, na které odkazují ostatní výzkumy, aby mohly být zhodnoceny globálně.

Všechny měřené veličiny (R_a , W_a a řezný příkon) je důležité z hlediska praxe hodnotit společně, protože při samotném obrábění se tyto faktory vždy vyskytují ve vzájemné interakci. Průměrné aritmetické úchylky povrchu drsnosti a vlnitosti (R_a a W_a) hodnotí výsledný obrobek z hlediska jakosti a energetická náročnost (řezný příkon) z hlediska spotřeby elektrické energie, tedy části nákladů a ekologického faktoru výroby.

Práce poskytuje informace o tom:

1. Při jakých kombinacích faktorů dosáhneme nejnižší hodnoty spotřebované energie. I když je spotřeba energie jen část celkových nákladů na výsledný výrobek, dají se díky optimálnímu nastavení parametrů řezného procesu tyto náklady snížit. Dále snížení spotřeby energie sníží ekologickou zátěž vyplývající z výroby.
2. Při jakém nastavení parametrů výroby se dosáhne vhodné drsnosti povrchu Ra. To vše má v praxi za následek zvýšení pružnosti výroby, což se promítne do produktivity práce. Produktivita práce má následně velký vliv na celkové náklady. Jako další se díky znalosti nastavení parametrů zvýší výsledná jakost povrchu a to se promítne do výsledné jakosti finálního výrobku.
3. Při jakém nastavení parametrů výroby se dosáhne vhodné vlnitosti povrchu Wa. Obdobně jako u drsnosti se nastavení nejvýhodnějších parametrů pro výslednou vlnitost promítne do efektivity výroby a tudíž i do produktivity práce. To vše má velký vliv na celkové náklady. Vlnitost má významný vliv na konečnou jakost výrobku. Lepší celková jakost zvyšuje cenu výrobku.
4. Jakou metodu aplikovat do praxe. Z hlediska vlnitosti jsou obě metody zastupitelné, u drsnosti už je tomu jinak. Metoda bezkontaktní ukazuje přesnější výsledky, ale ne vždy jsou takto přesné výsledky zapotřebí. Pokud porovnáme pořizovací ceny jednotlivých přístrojů, metoda kontaktní vychází levněji v řádech statisíců až milionů korun, a i následná údržba hovoří kladně pro metodu kontaktní. Z hlediska rychlosti měření byly obě metody při užitém nastavení srovnatelné, ale při zvyšování měřených délek se jednoznačně jako rychlejší metoda prokázala kontaktní. Jako jednoznačná výhoda bezkontaktního přístroje je jeho širší možnost využití.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Literární zdroje

- ADAMCOVÁ, E. Porovnanie opotrebenia drevo rezného nástroja z rýchloreznej a nástrojovej ocele pri frézovaní smreka. *Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva*. 2010, roč. 7, č. 1, s. 13-21. ISBN 978-80-228-2143-8.
- AGUILERA, A.; MARTIN, P. Machining qualification of solid wood of *Fagus silvatica* L. and *Picea excelsa* L.: cutting forces, power requirements and surface roughness. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2001, roč. 59, č. 6, s. 483-488. ISSN 0018-3768.
- AGUILERA, A.; MÉAUSOONE, P-J.; MARTIN, P. Wood material influence in routing operations: the MDF case. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2000, roč. 58, č. 4, s. 278-283. ISSN 0018-3768.
- AKGÜL, M.; KORKUT, S.; ÇAMLIBEL, O.; CANDAN, Z.; AKBULUT, T. Wettability and surface roughness characteristics of medium density fiberboard panels from rhododendron (*Rhododendron ponticum*) biomass. *Maderas: Ciencia y Tecnología*. 2012, roč. 14, č. 2, s. 185-193. ISSN 0717-3644.
- AKNOUCHE, H.; OUTAHYON, A.; NOUVEAU, C.; MARCHAL, R.; ZERIZER, A.; BUTAUD, J. C. Tool wear effect on cutting forces: In routing process of Aleppo pine wood. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, roč. 209, č. 6, s. 2918-2922. ISSN 0924-0136.
- ASHORI, A.; NOURBAKHSH, A.; KAREGARFARD, A. Properties of Medium Density Fiberboard Based on Bagasse Fibers. *Journal of Composite Materials*. 2009, roč. 43, č. 18, s. 1927-1934. ISSN 0021-9983.

- BAJIĆ, D.; LELA, B.; ŽIVKOVIĆ, D. Modeling of machined surface roughness and optimization of cutting parameters in face milling. *Metalurgija*. 2008, roč. 47, č. 4, s. 331-334. ISSN 0543-5846.
- BARČÍK, Š.; KMINIAK, R.; ŘEHÁK, T.; KVIETKOVÁ, M. The influence of selected factors on energy requirements for plain milling of beech wood. *Journal of Forest Science*. 2010, roč. 56, č. 5, s. 243-250. ISSN 1212-4834.
- BAUMANN, M. G. D.; LORENZ, L. F.; BATTERMAN, S. A.; ZHANG, G-Z. Aldehyde emissions from particleboard and medium density fibreboard products. *Forest Products Journal*. 2000, roč. 50, č. 9, s. 75-82. ISSN 0015-7473.
- BENDIKIENE, R.; KETURAKIS, G. The effect of tool wear and planning parameters on birch wood surface roughness. *Wood research*. 2016, roč. 61, č. 5, s. 791-798. ISSN 1336-4561.
- BENDIKIENE, R.; PUPELIS, E. Application of surfaced cutters for machining of wood-based materials. *Wood Research*. 2007, roč. 61, č. 1, s. 155-162. ISSN 1336-4561.
- BENLATRECHE, Y.; NOUVEAU, C.; MARCHAL, R.; FERREIRA MANTINS, J.-P.; AKNOUCHE, H. Applications of CrAIN ternary systém in wood machining of medium density fibreboard (MDF). *Wear*. 2009, roč. 267, č. 5-8, s. 1056-1061. ISSN 0043-1648.
- 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.
- BORAN, S.; USTA, M.; GÜMÜSKAYA, E. Decreasing formaldehyde emission from medium density fiberboard panels produced by adding different amine compounds to urea formaldehyde resin. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2011, roč. 31, č. 7, s 674-678. ISSN 0143-7496.
- BOUCHER, J.; MÉAUSOONE, P-J.; MARTIN, P.; AUCHET, S.; PERRIN, L. Influence of helix angle and density variation on the cutting force in wood-based products machining. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007, roč. 189, č. 1-3, s. 211-218. ISSN 0924-0136.

- BUDAKÇI, M.; İLÇE, A. C.; GÜRLEYEN, T.; UTAR, M. Determination of the surface roughness of heat-treated wood materials planed by the cutters of a horizontal milling machine. *BioResources*. 2013, roč. 8, č. 4, s. 3189-3199. ISSN 1930-2126.
- COSTES, J.-P.; LARRICQ, P. Towards high cutting speed in wood milling. *Annals of Forest Science*. 2002, roč. 59, č. 9, s. 857-865.
- DARMAWAN, W.; GOTTLÖBER, C.; OERTEL, M.; WAGENFÜHR, A.; FISCHER, R. Performance of helical edge milling cutters in planing wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2011, roč. 69, č. 4, s. 565-572. ISSN 0018-3768.
- DARMAWAN, W.; TANAKA, Ch.; USUKI, H.; OHTANI, T. Performance of coated carbide tools when grooving wood-based materials: effect of work materials and coating materials on the wear resistance of coated carbide tools. *Journal of Wood Science*. 2001, roč. 47, s. 94-101. ISSN 1435-0211.
- DAVIM, J. P. *Wood Machining*. 1. vyd. Londýn: ISTE Ltd, 2011. 288 s. ISBN: 978-1-84821-315-9.
- DAVIM, J. P. *Surface Integrity in Machining*. 1. vyd. London: Springer. 2010. 215 s. ISBN 978-1-84882-973-5.
- DAVIM, J. P.; CLEMENTE, V. C.; SILVA, S. Surface Roughness Aspects in Milling MDF (medium density fibreboard). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009, roč. 40, č. 1, s. 49-55. ISSN 0268-3768.
- DILIK, T.; ERDINLER, S.; KURTOGLU, A. Edge Glued Wood Panel Technology and an Assessment on the Development of Edge Glued Wood Panel Industry. *American Journal of Applied Sciences*. 2012, roč. 9, č. 10, s. 1625-1635. ISSN 1546-9239.
- FAGA, M. G.; SETTINERI, L. Innovative anti-wear coatings on cutting tools for wood machining. *Surface and Coatings Technology*. 2006, roč. 201, č. 6, s. 3002-3007. ISSN 0257-8972.

- GAFF, M.; KVIETKOVÁ, M.; GAŠPARÍK, M.; KAPLAN, L.; BARCÍK Š. Effect of selected parameters on the surface waviness in plane milling of thermally modified birch wood. *BioResources*. 2015, roč. 10, č. 4, s. 7618-7626. ISSN 1930-2126.
- GAFF, M.; GÁBORÍK, J. *Vlastnosti povrchu dřeva modifikovaného reliéfováním*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 2009. 81 s. ISBN 978-80-228-2035-6.
- GOGOLEWSKI, P.; KLIMKE, J.; KRELL, A.; BEER, P. Al₂O₃ tools towards effective machining of wood-based materials. *Journal of Materials Progressing Technology*. 2009, roč. 209, s. 2231-2236. ISSN 0924-0136.
- HAVELKOVÁ, M.; HIKLOVÁ, H. *Mapování povrchu pevných těles se zaměřením na kontaktní profilometrii*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci. 2014. 48 s. ISBN 978-80-244-4043-9.
- HENDARTO, B.; SHAYAN, E.; OZARSKA, B.; CARR, R. Analysis of roughness of a sanded wood surface. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006, roč. 28, č. 7-8, s. 775-780. ISSN 1433-3015.
- HOADLEY, R. B. *Identifying wood: accurate results with simple tools*. Newton: Taunton Press. 1999. 223 s. ISBN 09-423-91047.
- HOLUBÁŘ, P.; JÍLEK, M.; ŠÍMA, M.; MAIXNER, V. Aplikace Triplecoating na VBD. *The International Conference NEWTECH 2011 on Advanced Manufacturing Engineering*. 2011a, ISBN 978-80-214-4267-2.
- HOLUBÁŘ, P.; ŠÍMA, M.; MAIXNER, V. Aplikace nových modifikací třívrstevných PVD povlaků. *MM Průmyslové spektrum*. 2011b, roč. 4, s. 18-19. ISSN 1212-2572.
- HOLUBÁŘ, P.; JANKŮ, R.; ZINDULKA, O. Ekonomické a ekologické efekty PVD technologie. *MM Průmyslové spektrum*. 2009, roč. 8,9, s. 56-58. ISSN 1212-2572.
- HOLUBÁŘ, P.; ŠÍMA, M.; ZINDULKA, O. Technologie úprav nástrojů před a po povlakování. *MM Průmyslové spektrum*. 2005, roč. 9, s. 70-72. ISSN 1212-2572.
- HRÁZSKÝ, J.; KRÁL, P. *Kompozitní materiály na bázi dřeva: Část I.: Aglomerované materiály*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 2007. 253 s. ISBN 978-80-7375-034-3.

- HRÁZSKÝ, J.; KRÁL, P. *Kompozitní materiály na bázi dřeva. Část 1: Aglomerované materiály: cvičení*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 2004. 132 s. ISBN 80-7157-751-0.
- HUANG, Y. S.; CHEN, S. S.; TANG, J.-L. Analyses of rotating disc cutting of wood. *Taiwan Journal of Forest Science*. 2003, roč. 18, č. 4, s. 263-271. ISSN 1026-4469.
- HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing. 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- ISKRA, P.; TANAKA, C.; OHTANI, T. Energy balance of the orthogonal cutting process. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2005, roč. 63, č. 5, s. 358-364. ISSN 0018-3768.
- 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.
- JACKSON, M. R.; PARKIN, R. M.; BROWN, N. Waves on wood. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2002, roč. 216, č. 4, s. 475-497. ISSN 0954-4054.
- JAMBEROVÁ, Z.; VANČO, M.; BARCÍK, Š.; GAFF, M.; ČEKOVSKÁ, H.; KUBŠ, J.; KAPLAN, L. Influence of processing factors and species of wood on granulometric composition of juvenile poplar wood chips. *BioResources*. 2016, roč. 11, č. 4, s. 9572-9583. ISSN 1930-2126.
- JÍLEK, M.; HOLUBÁŘ, P.; CSELLE, T.; MORSTEIN, M. Nová průmyslová technologie povlakování. *MM Průmyslové spektrum*. 2003, roč. 4, s. 48-49. ISSN 1212-2572.
- KACZOROWSKI, W.; BATORY, D.; SZAMAŃSKI, W.; NIEDZIELSKI, P. Carbon-based layers for mechanical machining of wood-based materials. *Wood Science and Technology*. 2012, roč. 46, č. 6, s. 1097-1108. ISSN 0043-7719.
- KARVANKOVA, P.; VEPREK-HEIJMAN, M.G.J.; ZINDULKA, O.; BERGMAIER, A.; VEPREK, S. Superhard nc- TiN/a-BN and nc- TiN/a- TiB_x/a-BN coatings prepared by plasma CVD and PVD: a comparative study of their

- properties. *Surface and Coating Technology*. 2003, roč. 163-164, s. 149-156. ISSN 0257-8972.
- KETURAKIS, G.; JUODEIKIENĖ, I. Investigation of milled wood surface roughness. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2007, roč. 13, č. 1, s. 47-51. ISSN 1392-1320.
- KHAZAEIAN, A.; MAZOMEI, Z.; TABARSA T. Evaluation of MDF edge surface quality during milling. *Journal of Wood and Forest Sciences*. 2010, roč. 1, č. 17, s. 49-63. ISSN 2322-2077.
- KILIC, M.; HIZIROGLU, S.; BURDURLU, E. Effect of machining on surface roughness of wood. *Building and Environment*. 2006, roč. 41, č. 8, s. 1074-1078. ISSN 0360-1323.
- KMINIAK, R.; GAFF, M. Roughness of surface created by transversal sawing of spruce, beech, and oak wood. *BioResources*. 2015, roč. 10, č. 2, s. 2873-2887. ISSN 1930-2126.
- KMINIAK, R.; SIKLIENKA, M.; ŠUSTEK, J. Impact of Tool Wear on the Quality of the Surface in Routing of MDF Boards by Milling Machines with Reversible Blades. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen*. 2016, roč. 58, č. 2, s. 89-100. ISSN 1336-3824.
- KOCH, L. An analysis of the lumber planning process: Part II. *Forest Products Journal*. 1956, roč. 6, č. 10, s. 393-402.
- KORKUT, S.; AKGÜL, M. Effect of drying temperature on surface roughness of oak (*Quercus petraea* ssp. *iberica* (Steven ex Bieb) Krassiln) veneer. *Building and environment*. 2007, roč. 42, č. 5, s. 1931-1935. ISSN 0360-1323.
- KOWALUK, G.; SZYMANSKI, W.; PALUBICKI, B.; BEER, P. Examination of Tools of Different Materials Edge Geometry for MDF Milling. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2009, roč. 67, č. 2, s. 173-176. ISSN 0018-3768.
- KRAUSS, A.; PIERNIK, M.; PINKOWSKI, G. Cutting power during milling of thermally modified pine wood. *Drvna Industrija*. 2016, roč. 67, č. 3, s. 215-222. ISSN 0012-6772.

- KUBŠ, J.; BARCÍK, Š. Vliv úhlu čela na energetickou náročnost při rovinném frézování termicky modifikovaného bukového dřeva. *Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva*. 2014, roč. 9, č. 1, s. 97-104. ISSN 1339-8350.
- KUBŠ, J.; GAFF, M.; BARCÍK, Š. Factors Affecting the Consumption of Energy during the Milling of Thermally Modified and Unmodified Beech Wood. *BioResources*. 2016, roč. 11, č. 1, s. 736-747. ISSN 1930-2126.
- KUBŠ, J.; GAŠPARÍK, M.; GAFF, M.; KAPLAN, L.; ČEKOVSÁ, H.; JEŽEK, J.; ŠTÍCHA, V. Influence of Thermal Treatment on Power Consumption during Plain Milling of Lodgepole Pine (*Pinus contorta* subsp. *murrayana*). *BioResources*. 2017, roč. 12, č. 1, s. 407-418. ISSN 1930-2126.
- KUKLÍK P.; KUKLÍKOVÁ A. Materiály na bázi dřeva. *Lesnická práce*. 2002, roč. 81, č. 6, s. 260-261. ISSN 0322-9254.
- KVIETKOVÁ, M. The Effect of thermal treatment of birch wood on the cutting power of plain milling. *BioResources*. 2015a, roč. 10, č. 4, s. 8528 – 8538. ISSN 1930-2126.
- KVIETKOVÁ, M.; GAFF, M.; GAŠPARÍK, M.; KAPLAN, L.; BARCÍK, Š. Surface Quality of Milled Birch Wood after Thermal Treatment at Various Temperatures. *BioResources*. 2015b, roč. 10, č. 4, s. 6512-6521. ISSN 1930-2126.
- KVIETKOVÁ, M.; GAŠPARÍK, M.; GAFF, M. Effect of thermal treatment on surface quality of beech wood after plane milling. *BioResources*. 2015c, roč. 10, č. 3, s. 4226-4238. ISSN 1930-2126.
- KVIETKOVÁ, M.; GAŠPARÍK, M.; KAPLAN, L. Corrugation of Thermally Modified Maple Wood at Milling. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Forestry and Wood Technology*. 2015d, č. 91, s. 111-114. ISSN 1898-5912.
- KRJAŽEV, N. A. *Cilindričeskoe i koničeskoe frezerovanije drevesiny*. Moskva: Goslesbumizdat. 1963. 200 s.
- LABIDI, C.; COLLET, R.; NOUVEAU, C.; BEER, P.; NICOSIA, S.; DJOUADI, M. A. Surface treatments of tools used in industrial wood machining. *Surface and Coating Technoogy*. 2005, roč. 200, č. 1-4, s. 118-122. ISSN 0257-8972.

- LAINA, R.; SANZ-LOBERA, A.; VILLASANTE, A.; LOPÉZ-ESPÍ, P.; MARTÍNEZ-ROJAS, J. A.; ALPUENTE, J.; SÁNCHEZ-MONTERO, R.; VIGNOTE, S. Effect of the anatomical structure, wood properties and machining conditions on surface roughness of wood. *Maderas. Ciencia y tecnología*. 2017, roč. 19, č. 2, s. 203-212. ISSN 0717-3644.
- LIN, R.; van HOUTS, J.; BHATTACHARYYA, D. Machinability Investigation of Medium-density Fibreboard. *Holzforschung*. 2006, roč. 60, č. 1, s. 71-77. ISSN 018-3830.
- LIPTÁK, O.; BÉKÉS, J.; HERBANSKÝ, L.; HRUBEC, J.; KISSOCZY, Š.; VALČUHA, Š.; ZONGOR, J. *Technológia výroby – obrábanie*. 1. vyd. Praha: SNTL – nakladatelství technické literatury. 1979. 445 s. ISBN 63-565-79.
- LISIČAN, J. *Teória a technika spracovania dreva*. 2. vyd. Zvolen: MATCENTRUM. 1996. 626 s. ISBN 80-967315-6-4.
- MAHER, I. *Surface Roughness Prediction in End-Milling Process*. Disertační práce. Egypt: Assiut University, Faculty of Engineering. 2008. 162 s.
- MANDIC, M.; SVRZIC, S.; DANON, G. The comparative analysis of two methods for the power consumption measurement in circular saw cutting of laminated particle board. *Wood Research*. 2015, roč. 60, č. 1, s. 125-136. ISSN 1336-4561.
- MCKENZIE, W. M.; KO, P.; CVITKOVIC, R.; RINGLER, M. Towards a model predicting cutting forces and surface quality in routing layered boards. *Wood Science and Technology*. 2001, roč. 35, č. 6, s. 563-569. ISSN 0043-7719.
- MITCHELL, P.; LEMASTER, R. Investigation of machine parameters on the surface quality in routing soft maple. *Forest Products Journal*. 2002, roč. 52, č. 6, s. 85-90. ISSN 0015-7473.
- MORITA, T; BANSHOYA, K.; TSUTSUMOTO, T.; MURASE, Y. Effects of work materials on cutting performance of diamond-coated cemented carbide tools. *Forest Product Journal*. 1998, roč. 48, č. 5, s. 43-50. ISSN 0015-7473.
- MRKVICA, I.; NESLUŠAN, M.; ČEP, R.; SLÉHA, V. Properties and Comparison of PVD Coatings. *Tehnički vjesnik*. 2016, roč. 23, č. 2, s. 569-574. ISSN 1330-3651.

- NAVINŠEK, B.; PANJAN, P.; CVELBAR, A. Characterization of low temperature CrN and TiN (PVD) hard coatings. *Surface and Coatings Technology*. 1995, roč. 74-75, č. 1, s. 155-161. ISSN 0257-8972.
- NOUVEAU, C.; JORAND, J.; DECES-PETIT, C.; LABIDI C.; DJOUADI, M. A. Influence of carbide substrates on tribological properties of chromium and chromium nitride coatings: application to wood machining. *Wear*, 2005, roč. 258, č. 1-4, s. 157-216. ISSN 0043-1648.
- NOUVEAU, C.; LABIDI, C.; MARTIN, J.-P. F.; COLLET, R.; DJOUADI, A. Application of CrAlN coatings on carbide substrates in routing of MDF. *Wear*. 2007, roč. 263, č. 7-12, s. 1291-1299. ISSN 0043-1648.
- NOVÁK, V.; ROUSEK, M.; KOPECKÝ, Z. Assessment of wood surface quality obtained during high speed milling by use of non-contact method. *Drvna Industrija*. 2011, roč. 62, č. 2, s. 103-115. ISSN 0012-6772.
- OHLÍDAL, M. *Optické metody hodnocení textury povrchu v mikrometrové oblasti*. Brno: Ústav fyzikálního inženýrství FSI VUT. 2010. 29 s.
- OHUCHI, T.; MURASE, Y. Milling of wood and wood-based materials with a computerized numerically controlled router IV: Development of automatic measurement system for cutting edge profile of throw-away type straight bit. *Journal of Wood Science*. 2005, roč. 51, č. 3, s. 278-281. ISSN 1435-0211.
- OHUCHI, T.; MURASE, Y. Milling of wood and wood-based materials with a computerized numerically controlled router V: Development of adaptive control grooving system corresponding to progression of tool wear. *Journal of Wood Science*. 2006, roč. 52, č. 5, s. 395-400. ISSN 1435-0211.
- OSTMAN, B. A. L. Surface roughness of wood-based panels after aging. *Forest Products Journal*. 1983, roč. 33, č. 7/8, s. 35-42. ISSN 0015-7473.
- ÖZKAYA, K. The effects of different edge joinings on the resistance of edge glued wooden panels. *Engineering Science and Technology*. 2011, roč. 14, č. 2, s. 53-58. ISSN 2215-0986.
- PESCHEL, P. *Dřevařská příručka: tabulky, technické údaje*. Praha: Sobotáles. 2002. 320 s. ISBN 80-85920-84-0.

- POŽGAJ, A.; CHOVANEC, D.; KURJATKO, S.; BABIAK, M. *Štruktúra a Vlastnosti Dreva*. Bratislava: Príroda a. s. 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.
- PROKEŠ, S. *Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva*. 3. vyd. Praha: SNTL – nakladatelství technické literatury. 1982. 584 s. ISBN 04-833-82.
- QUINTANA, G.; CIURANA, J.; RIBATALLADA, J. Modelling power consumption in ball-end milling operations. *Materials and Manufacturing Processes*. 2011, roč. 26, č. 5, s. 746-756. ISSN 1042-6914.
- RIDZUAN, R.; SHALER, S.; MOHD, A. J. Properties of medium density fibreboard from oil palm empty fruit bunch fibre. *Journal of Oil Palm Research*. 2002, roč. 14, č. 2, s. 34-40. ISSN 1511-2780.
- ROUSEK, M.; KOPECKÝ, Z. Monitoring of power consumption in high-speed milling. *Drvna Industrija*. 2005, roč. 53, č. 3, s. 121-126. ISSN 0012-6772.
- ROUSEK, M.; KOPECKÝ, Z.; CHLEBOVSKÝ, R. Dodržení kvality obrábění dřeva frézováním ve vazbě na povrchové úpravy. *Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva*. 2010, roč. 7, č. 1, s. 141-150. ISBN 978-80-228-2143-8.
- ROUSEK, M.; KOPECKÝ, Z.; NOVÁK, V.; KOWALSKI, M. Hodnocení kvality povrchu dřeva po frézování. *Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva*. 2012a, roč. 8, č. 1, s. 297-304. ISBN 978-80-228-2385-2.
- 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.
- RUDNICKI, J.; BEER, P.; SOKOLOWSKA, A.; MARCHAL, R. Low-temperature ion nitriding used for improving the durability of the steel knives in the wood rotary peeling. *Surface and Coatings Technology*. 1998, roč. 107, č. 1, s. 20-23. ISSN 0257-8972.
- SALCA, E. A. Optimization of wood milling schedule - A case study. *ProLigno*. 2015, roč. 11, č. 4, s. 525-530. ISSN-L 1841-4737.

- SANĐAK, J.; NEGRI, M. Wood surface roughness – what is it? *Proceedings of the 17th International Wood Machining Seminar, Volume 1, Rosenheim, Germany, 29 – 30 September*. 2005, s. 242 – 250.
- SHEIKH-AHMAD, J. Y.; STEWART, J. S.; FELĐ, H. Failure characteristics of diamond-coated carbides in machining wood-based composites. *Wear*. 2003, roč. 255, č. 7-12, s. 1433-1437. ISSN 0043-1648.
- SHEIKH-AHMAD, J. Y.; MORITA, T. Tool coatings for wood machining: Problems and prospects. *Forest Products Journal*. 2002, roč. 52, č. 10. s 43-51. ISSN 0015-7473.
- SIKLIENKA, M.; KMINIAK, R. *Delenie a obrábání dřeva*. Technická univerzita vo Zvolene. 2013a. 207 s. ISBN 978-80-228-2618-1.
- SIKLIENKA, M.; ŠUSTEK, J. *Energetická náročnosť a kvalitatívne ukazovatele v procesoch pílenia bukoveho dřeva*. Technická univerzita vo Zvolene. 2013b. 99 s. ISBN 978-80-228-2609-9.
- SIKLIENKA, M.; ADAMCOVÁ, E. Výskum vplyvu materiálu reverzibilných nožov stopkových nástrojov na kvalitu opracovaného povrchu MDF. *Trieskové a beztrieskové obrábání dřeva*. 2012, roč. 8, č. 1, s. 315-323. ISBN 978-80-228-2385-2.
- SIKLIENKA, M.; ŠUSTEK, J. Problems of quantification of roughness at woodworking of natural woods. *Proceedings of the Wood - Machine - Tool – Workpiece 1, Poznan: Faculty of Wood Technology, Poland*. 2007, s. 65-66.
- SITKEI, G.; MAGOSS, E. Optimum surface roughness of solid woods affected by internal structure and woodworking operations. *Proceedings of the 16th International Wood Machining Seminar, Matsue, Japan*. 2003, s. 366-371.
- ŠÍMA, M.; JANKŮ, R. Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky. *MM Průmyslové spektrum*. 2007, roč. 4, s. 72-73. ISSN 1212-2572.
- ŠÍMA, M.; ZINDULKA, O. Měření vlastností povlaků na nástrojích. *MM Průmyslové spektrum*. 2004, roč. 6, s. 30-31. ISSN 1212-2572.

- ŠKALJIĆ, N.; BELJO-LUČIĆ, R.; ČAVLOVIĆ, A.; OBUĆINA, M. Effect of feed rate and wood species on roughness of machined surface. *Drvna Industrija*. 2009, roč. 60, č. 4, s. 229-234. ISSN 0012-6772.
- SOFUOGLU, S. D. Determination of optimal machining parameters of massive wooden edge glued panels which is made of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using Taguchi design method. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2017, roč. 75, č. 1, s. 33-42. ISSN 0018-3768.
- SÖĞÜTLÜ, C. The effect of the feeding direction and feed rate of planing on the surface roughness of oriental beech and Scotch pine woods. *Wood Research*. 2010, roč. 55, č. 4, s. 67-78. ISSN 1336-4561.
- STEWART, H. A. Cryogenic treatment of tungsten carbide reduces tool wear when machining medium density fiberboard. *Forest Products Journal*. 2004, roč. 54, č. 2, s. 53-56. ISSN 0015-7473.
- STEWART, H. A. Result force and surface quality from some face-milling variables. *Forest Products Journal*. 1984, roč. 34, č. 5, s. 21 - 24. ISSN 0015-7473.
- STUMBO, D. A. Surface texture, measuring methods. *Forest Products Journal*. 1963, roč. 12, č. 7, s. 299–303. ISSN 0015-7473.
- SU, Y. L.; YAO, S. H.; WU, C. T. Comparisons of characterizations and tribological performance of TiN and CrN deposited by cathodic arc plasma deposition proces. *Wear*. 1996, roč. 199, č. 1, s. 132-141. ISSN 0043-1648.
- SUMIN, K.; JIN-A, K.; HYUN-JOONG K.; SHIN DO, K. Determination of formaldehyde and TVOC emission factor from wood-based composites by small chamber method. *Polymer Testing*. 2006, roč. 25, č. 5, s. 605-614. ISSN 0142-9418.
- SÜTÇÜ, A. Investigation of parameters affecting surface roughness in CNC routing operation on wooden EGP. *BioResources*. 2013, roč. 8, č. 1, s. 795-805. ISSN 1930-2126.
- TAYLOR, J. B.; CARRANO, A. L.; LEMASTER, R. L. Quantification of process parameters in a wood sanding operation. *Forest Product Journal*. 1999, roč. 49, č. 5, s. 41–46. ISSN 0015-7473.

- THOMA, H.; PERI, L.; LATO, E. Evaluation of wood surface roughness depending on species characteristics. *Maderas. Ciencia y Tecnología*. 2015, roč. 17, č. 2, s. 285-292. ISSN 0717-3644.
- 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.
- TRATAR, J.; PUSAVEC, F.; KOPAC, J. Tool wear in terms of vibrations effects in milling medium-density fibreboard with an industrial robot. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014, roč. 28, č. 11, s. 4421-4429. ISSN 1738-494X.
- VANČO, M.; JAMBEROVÁ, Z.; BARCÍK, Š.; GAFF, M.; ČEKOVSKÁ, H.; KUBŠ, J.; KAPLAN, L. The effect of selected technical, technological and material factors on the size of juvenile poplar wood chips generated during face milling. *BioResources*. 2016, roč. 12, č. 3, s. 4881-4896. ISSN 1930-2126.
- VAŇÁK, A. *Technologie frézování: pracovní listy*. Šumperk: Střední odborná škola a Střední odborné učiliště. 2007. 101 s.
- WARCHOLINSKI, B.; GILEWICZ, A.; RATAJSKI, J. Cr₂N/CrN multilayer coating for wood machining tools. *Tribology International*. 2011, roč. 44, č. 9, s. 1076-1082. ISSN 0301-679X.
- 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.
- WILKOWSKI, J.; CZARNIAK, P.; GÓRSKI, J.; JABŁOŃSKI, M.; PACEK, P.; PODZIEWSKI, P.; SZYMANOWSKI, K.; SZYMONA, K. Influence of Cutting Parameters on Surface Roughness of MDF Board After Milling and Sanding. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Forestry and Wood Technology*. 2015, č. 92, s. 473-476. ISSN 1898-5912.
- WILKOWSKI, J.; GRZEŚKUEWICZ, M.; CZARNIAK, P.; SIWEK, I.; JAVOREK, L.; PAULINY, D. Influence of thermal modification of oak wood on cutting forces during milling. *Drewno material ekologiczny: konferencja naukowa Wydziału*

Technologii Drewna SGGW, Warszawa: Wydział Technologii Drewna SGGW. 2011, s. 309-314. ISBN 83-86980-88-5.

WHITEHOUSE, D. *Surfaces and their Measurement*. 1. vyd. London: Kogan Page Science. 2004. 395 s. ISBN 1-9039-9660-0.

YASIR, M.; GINTA T. L.; ARIWAHOEDI, B.; ALKALI, A. U.; DANISH, M. Effect of Cutting Speed and Feed Rate on Surface Roughness of AISI 316L SS Using End-Milling. *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016, roč. 11, č. 4, s. 2496-2500. ISSN 1819-6608.

YE, X. P.; JULSON, J.; KUO, M.; WOMAC, A.; MYERS, D. Properties of medium density fiberboards made from renewable biomass. *Bioresource Technology*. 2007, roč. 98, č. 5, s. 1077-1084. ISSN 0960-8524.

ZERIZER, A.; MARTIN, P.; SALES, Ch.; TRIBOULOT, P. Edge machinability of MDF effect of surface quality and consequence for gluing. *Science & Technologies*. 2003, roč. 20, č. 1, s. 83-87. ISSN 1111-5041.

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

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

Internetové zdroje

FAO. *Food and Agriculture Organization of the United Nations* [online]. © FAO 2017 [cit. 2.7.2017]. Dostupné z: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>

EGGER. *Naše firemní skupina*. [online]. © Skupina EGGER 2017 [cit. 4.7.2017]. Dostupné z: https://www.egger.com/shop/cs_CZ/o-firme-egger/nase-firemni-skupina

Kronospan. *Kronology*. [online]. © 2017 Kronospan Worldwide [cit. 4.7.2017]. Dostupné z: <http://www.kronospan-worldwide.com/organisation/kronology/>

METREL. *MI 2392 PowerQ Plus*. [online]. © METREL 2017 [cit. 12.7.2017]. Dostupné z: [https://www.arc.ro/userfiles/docs/METREL%20Files/Analizoare%](https://www.arc.ro/userfiles/docs/METREL%20Files/Analizoare%20MI%202392%20PowerQ%20Plus.pdf)

20de%20energie/Fisiere%20disponibile/Metrel%20MI%202392%20Power%20Q%20Plus.pdf

OLYMPUS. *LEXT 3D OLS4100, manuál*. [online]. © OLYMPUS 2017 [cit. 12. 7. 2017]. Dostupné z: http://www.techsansystem.co.kr/image/4100/OLS4100_.pdf

Zákony, normy a vyhlášky

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

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

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

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

ČSN EN 316. *Dřevovláknité desky – Definice, klasifikace a značky*. Praha: Český normalizační institut, 2009. 12s.

ČSN ISO 3002-1. *Rezné nástroje. Základné veličiny pri rezaní a brúsení Časť 1: Geometria aktívnej časti rezných nástrojov. Základné termíny, súradnicové sústavy, nástroje a pracovné úhly, lamače triesky*. Praha: Český normalizační institut, 1993. 68 s.

Publikace autora související s disertační prací

SEDLECKÝ, M.; SARVAŠOVÁ KVIETKOVÁ, M. Surface Waviness of Medium-density fiberboard (MDF) and Edge-glued panel (EGP) after Edge Milling. *Wood Research*. 2017, roč. 62, č. 3, s. 459-470. ISSN 1336-4561.

BARCÍK, Š.; GAŠPARÍK, M.; HOUSKA, A.; RAZUMOV, E. Y.; SEDLECKÝ, M. Vliv technologických faktorů na kvalitu opracování povrchu při frézování termicky modifikovaného borovicového dřeva. *Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva*. 2014b, roč. 9, č. 1, s. 11-22. ISBN 978-80-228-2658-7.

