

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nábytku, designu a bydlení

Optimalizace parametrů obrábění materiálů na bázi dřeva

Disertační práce

Autor: Ing. Eva Šebelová

Školitel: doc. Ing. Josef Chladil, CSc.

Obor: Procesy tvorby nábytku

Brno, 2014

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci: Optimalizace parametrů obrábění materiálů na bázi dřeva vypracovala samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědoma, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 Autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity o tom, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne: 4. 8. 2014

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala všem, kteří přispěli ke vzniku této disertační práce. Největší poděkování patří mému školiteli doc. Ing. Josefu Chladilovi, CSc. za vedení této práce, cenné rady, připomínky a motivaci a Ing. Vítu Novákovi, Ph.D. za spolupráci při měření jednotlivých experimentů.

Dále bych ráda poděkovala následujícím kolegům a institucím:

prof. Ing. Imrichu Lukovicsovi, CSc. a doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za možnost realizace experimentů ve spolupráci s Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně.

Ing. Janu Tippnerovi, Ph.D. a Ing. Tomáši Kolářovi, Ph.D. za zkoušku akustického měření a pořízení snímků opotřebovaných břitů.

Dr. Peterovi Rademacherovi za odborné konzultace v rámci projektu InWood.

Firmě ZKL Brno, a.s. za půjčení měřicího přístroje Passametr Somet.

Interní grantové agentuře Lesnické a dřevařské fakulty Mendelovy univerzity v Brně za realizaci a podporu projektu IGA 33/2012.

V neposlední řadě děkuji celé rodině a blízkým za podporu při studiu, toleranci a trpělivost.

Ing. Eva Šebelová

Optimalizace parametrů obrábění materiálů na bázi dřeva

Optimization of machining parameters of wood based materials

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na optimalizaci řezných podmínek pro obrábění materiálů na bázi dřeva, kdy řezné podmínky jsou tedy voleny tak, aby bylo zajištěno co nejefektivnější obrobení daného výrobku. Vlastní vyhodnocení parametrů řezných podmínek pak vychází z experimentálního posouzení závislosti mezi interakcí řezného nástroje a obráběného materiálu při použití proměnných parametrů řezání. Avšak experimenty potřebné k získání dostatečného množství dat jsou velmi časově, finančně i materiálově náročné. Je nutné posoudit trvanlivost řezného nástroje, dále obráběný materiál a jeho vhodnost k obrábění a následně z těchto výsledků stanovit optimální řezné podmínky. Cílem práce tedy bylo vytvořit nový přístup pro efektivní obrábění. Je založen na metodickém postupu stanovení optimálních řezných podmínek pro materiály na bázi dřeva na základě znalostí o jejich vlastnostech ve vztahu k procesu obrábění.

Klíčová slova: řezné podmínky, opotřebení nástroje, trvanlivost, obrobitelnost, optimalizace.

ABSTRACT

The work is focused on the optimization of cutting conditions for wood-based materials machining where the cutting conditions are thus selected to ensure the most efficient machining of the product. Cutting conditions parameters evaluation is based on experimental assessment of interaction between the cutting tool and machined material using a variable cutting parameters. However, experiments needed to obtain a sufficient amount of data are very time consuming, expensive and material consuming as well. It is necessary to consider life-time of the cutting tool, as well as the type of material and its suitability for machining and then to determine the optimal cutting conditions. The aim of this work was to create a new approach for efficient machining. It is based on the methodical procedure of the optimal cutting conditions determination for wood-based materials using knowledge about their properties in relation to the machining process.

Keywords: cutting conditions, tool wear, tool-life, machinability, optimization.

Obsah

1	ÚVOD	12
2	CÍL PRÁCE	14
3	MATERIÁLY NA BÁZI DŘEVA	15
3.1	FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ NA BÁZI DŘEVA	17
3.1.1	<i>Masivní dřevo</i>	19
3.1.2	<i>Překližované materiály</i>	22
3.1.3	<i>Aglomerované materiály</i>	25
3.1.4	<i>Kompozitní materiály</i>	29
4	OBRÁBĚNÍ MATERIÁLŮ	32
4.1	OBROBEK	33
4.1.1	<i>Vlastnosti obráběného materiálu na bázi dřeva</i>	33
4.2	NÁSTROJ	35
4.2.1	<i>Nástrojové materiály</i>	36
4.2.2	<i>Geometrie řezného nástroje</i>	39
4.3	ŘEZNÉ PODMÍNKY	41
4.4	TEPLO A TEPLOTA V PROCESU ŘEZÁNÍ.....	41
4.5	ZÁKLADNÍ METODY OBRÁBĚNÍ.....	43
4.5.1	<i>Soustružení</i>	43
4.5.2	<i>Frézování</i>	44
4.5.3	<i>Vrtání</i>	48
5	OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ	49
6	TVANLIVOST BŘITU	51
6.1	ZÁVISLOST TRVANLIVOSTI NÁSTROJE NA ŘEZNÉ RYCHLOSTI	51
7	OBROBITELNOST	56
7.1	SOUČINITEL OBROBITELNOSTI.....	57
7.2	ČINITELÉ OVLIVŇUJÍCÍ OBROBITELNOST	58
7.2.1	<i>Vliv řezného materiálu</i>	58
7.2.2	<i>Vliv obráběného materiálu</i>	58
7.3	SKUPINY A TŘÍDY OBROBITELNOSTI	58
8	OPTIMALIZACE PROCESU OBRÁBĚNÍ	60
8.1	HODNOCENÍ PROCESU OBRÁBĚNÍ Z HLEDISKA MINIMÁLNÍCH NÁKLADŮ	61
8.2	HODNOCENÍ PROCESU OBRÁBĚNÍ Z HLEDISKA MAXIMÁLNÍ VÝROBNOSTI.....	64
9	METODIKA	67
10	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	69

10.1	PROJEKT IGA 33/2012	69
10.1.1	<i>Strojní zařízení a nástroj</i>	70
10.1.2	<i>Pracovní podmínky</i>	71
10.1.3	<i>Měřicí zařízení</i>	72
10.1.4	<i>Metodika</i>	72
10.1.5	<i>Výsledky měření</i>	75
10.2	STANOVENÍ OBROBITELNOSTI PŘEKLIŽOVANÉ DESKY	87
10.2.1	<i>Měřicí přípravek</i>	87
10.2.2	<i>Metodika</i>	89
10.2.3	<i>Výsledky měření</i>	90
10.3	STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ ZÁVISLOSTI TRVANLIVOSTI NA ŘEZNÉ RYCHLOSTI	97
10.3.1	<i>DTD-L</i>	97
10.3.2	<i>PDP</i>	98
10.4	DALŠÍ EXPERIMENTY	99
10.4.1	<i>FT UTB Zlín – Ústav výrobního inženýrství</i>	99
10.4.2	<i>FSI VUT Brno – Ústav strojírenské technologie</i>	106
10.4.3	<i>LDF Mendelu – Ústav nauky o dřevě</i>	107
11	OPTIMALIZACE PROCESU OBRÁBĚNÍ	109
11.1	HODNOTA OPTIMÁLNÍ TRVANLIVOSTI NÁSTROJŮ PRO MINIMÁLNÍ CELKOVÉ NÁKLADY	109
11.2	HODNOTA OPTIMÁLNÍ TRVANLIVOSTI NÁSTROJŮ PRO MAXIMÁLNÍ VÝROBNOST.....	110
11.3	STANOVENÍ OPTIMÁLNÍCH ŘEZNÝCH PODMÍNEK Z HLEDISKA MINIMÁLNÍCH NÁKLADŮ.....	110
11.3.1	<i>Materiál DTD-L</i>	111
11.3.2	<i>Materiál MDF</i>	111
11.3.3	<i>Materiál PDP</i>	111
11.4	STANOVENÍ OPTIMÁLNÍCH ŘEZNÝCH PODMÍNEK Z HLEDISKA MAXIMÁLNÍ VÝROBNOSTI.....	111
11.4.1	<i>Materiál DTD-L</i>	111
11.4.2	<i>Materiál MDF</i>	112
11.4.3	<i>Materiál PDP</i>	112
12	DISKUZE	113
13	ZÁVĚR	115
14	SUMMARY	118
15	PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY	120

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma zahrnující široký sortiment materiálů na bázi dřeva.....	16
Obr. 2 Přehled materiálů na bázi dřeva.....	16
Obr. 3 Podíl velkoplošných materiálů v roce 2010.....	17
Obr. 4 Hustota materiálů na bázi dřeva.....	18
Obr. 5 Základní dřevní elementy	19
Obr. 6 Dubové prkno	21
Obr. 7 Spárovka	21
Obr. 8 Biodeska – třívrstvá deska z rostlého dřeva.....	22
Obr. 9 Průřez sedmivrstvou překližkou s vyznačenou linií symetrie.....	23
Obr. 10 Truhlářská překližka	24
Obr. 11 Lat'ovka.....	24
Obr. 12 Třívrstvá dřevotřísková deska.....	27
Obr. 13 Dřevovláknitá deska se střední hustotou - MDF.....	29
Obr. 14 Podlahový dílec (vylehčený) z WPC	30
Obr. 15 Příklad plastové imitace dřeva - PUR.....	31
Obr. 16 Vybrané metody obrábění.....	32
Obr. 17 Základní plochy na obrobku	33
Obr. 18 Nástroj – základní plochy a ostří	36
Obr. 19 Přehled základních vlastností jednotlivých nástrojových materiálů	37
Obr. 20 Přehled základních nástrojových úhlů	40
Obr. 21 Rozložení tepelné energie	43
Obr. 22 Základní pohyby při soustružení.....	44
Obr. 23 Válcové frézování: a) nesousledné b) sousledné	46
Obr. 24 Čelní frézování: a) symetrické b) nesymetrické	46
Obr. 25 Průřez třísky a jmenovitá tloušťka třísky h_i	47
Obr. 26 Základní formy opotřebení břitu nástroje	49
Obr. 27 Průběh opotřebení VB, VR a KT.....	50
Obr. 28 Průběh závislosti $KR = f(T)$	52
Obr. 29 Průběh závislosti $T = f(v_c)$	53
Obr. 30 Používaný CNC stroj	70
Obr. 31 Stopková fréza	71
Obr. 32 Použité břitové destičky	71
Obr. 33 Přístroj Passamet Somet	72
Obr. 34 Měření opotřebení břitu na základě hmotnosti břitu.....	73
Obr. 35 Průběh závislosti $KR = f(t)$ – průměrné opotřebení břitů U1a a U2a	75

Obr. 36 Průběh závislosti $KR = f(t)$ – průměrné opotřebení břitů U1b a U2b.....	76
Obr. 37 Průběh závislosti $KR = f(t)$ – průměrné opotřebení břitů U3a a U4a	77
Obr. 38 Průběh závislosti $KR = f(t)$ – průměrné opotřebení břitů U3b a U4b.....	78
Obr. 39 Průběh závislosti $KR = f(t)$ pro jednotlivé rychlosti $v_{c1}, v_{c2}, v_{c3}, v_{c4}$	78
Obr. 40 Průběh závislosti $KR = f(t)$ – průměrné opotřebení břitů M1a a M2a.....	79
Obr. 41 Průběh závislosti $KR = f(t)$ – průměrné opotřebení břitů M1b a M2b.....	80
Obr. 42 Průběh závislosti $KR = f(t)$ pro jednotlivé rychlosti v_{c1} a v_{c2}	81
Obr. 43 Průběh závislosti $T = f(v_c)$ (DTD-L).....	82
Obr. 44 Průběh závislosti $T = f(v_c)$ (MDF).....	84
Obr. 45 Průběh závislosti $T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m}$ pro oba materiály.....	85
Obr. 46 Schéma a popis měřicího přípravku.....	87
Obr. 47 Měřicí přípravek – 3D model.....	88
Obr. 48 Měřicí přípravek – výrobek	88
Obr. 49 Nastavení nulové hodnoty na číselníkovém úchylkoměru.....	89
Obr. 50 Průběh závislosti $KR = f(t)$ – průměrné opotřebení břitů P1a a P2a.....	91
Obr. 51 Průběh závislosti $KR = f(t)$ – průměrné opotřebení břitů P1b a P2b	92
Obr. 52 Průběh závislosti $KR = f(t)$ – průměrné opotřebení břitů P3a a P4a.....	93
Obr. 53 Průběh závislosti $KR = f(t)$ pro jednotlivé rychlosti v_{c1}, v_{c2}, v_{c3}	93
Obr. 54 Průběh závislosti $T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m}$	95
Obr. 55 Průběh závislosti $T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m}$ pro oba materiály.....	96
Obr. 56 Grafické znázornění závislosti $T = f(v_c)$ s intervalem spolehlivosti (DTD-L).....	98
Obr. 57 Grafické znázornění závislosti $T = f(v_c)$ s intervalem spolehlivosti (PDP)	98
Obr. 58 Strojní a nástrojové vybavení.....	100
Obr. 59 Proces utváření třísky při obrábění buku, $v_f = 470 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	101
Obr. 60 Proces utváření třísky při obrábění buku, $v_f = 720 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	101
Obr. 61 Proces utváření třísky při obrábění materiálu Ebaboard, $v_f = 470 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	101
Obr. 62 Proces utváření třísky při obrábění materiálu Ebaboard, $v_f = 720 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	102
Obr. 63 Digitální mikroskop a podmínky laboratoře	102
Obr. 64 Snímky třísky buku lesního: vlevo zvětšení 10x, vpravo zvětšení 30x	103
Obr. 65 Snímek třísky materiálu Ebaboard, zvětšení 30x.....	103
Obr. 66 Tepelná bilance při obrábění bukového dřeva, $v_f = 420 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	104
Obr. 67 Tepelná bilance při obrábění bukového dřeva, $v_f = 720 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	105
Obr. 68 Tepelná bilance při obrábění materiálu Ebaboard, $v_f = 720 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	105
Obr. 69 Tepelná bilance při obrábění duralu, $v_f = 65 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	106
Obr. 70 Měření geometrie břitu řezného nástroje	107
Obr. 71 Fotografie opotřebovaného břitu.....	108

Seznam tabulek

Tab. 1	Hodnoty indexu obrobitelnosti pro zařídění materiálů (ref. vzorek-třída 11).....	59
Tab. 2	Řezné podmínky – DTD-L, řezná rychlost $477 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	75
Tab. 3	Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – průměrné opotřebení břitů U1a a U2a.....	75
Tab. 4	Řezné podmínky – DTD-L, řezná rychlost $716 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	76
Tab. 5	Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – prům. opotřebení břitů U1b a U2b	76
Tab. 6	Řezné podmínky – DTD-L, řezná rychlost $895 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	76
Tab. 7	Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – prům. opotřebení břitů U3a a U4a.....	77
Tab. 8	Řezné podmínky – DTD-L, řezná rychlost $1074 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	77
Tab. 9	Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – prům. opotřebení břitů U3b a U4b	77
Tab. 10	Přehled technologických parametrů a odpovídajících trvanlivostí T_1 - T_4	78
Tab. 11	Řezné podmínky – MDF, řezná rychlost $716 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	79
Tab. 12	Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – prům. opotřebení břitů M1a a M2a .	79
Tab. 13	Řezné podmínky – MDF, řezná rychlost $1074 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	80
Tab. 14	Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – prům. opotřebení břitů M1b a M2b.	80
Tab. 15	Přehled technologických parametrů a odpovídajících trvanlivostí T_1 a T_2	81
Tab. 16	Tabulka hodnot trvanlivosti T a rychlosti v_c	82
Tab. 17	Tabulka výpočtu exponentu m a konstant C_T a C_V	82
Tab. 18	Tabulka hodnot trvanlivosti T a rychlosti v_c	83
Tab. 19	Tabulka výpočtu exponentu m a konstant C_T a C_V	83
Tab. 20	Hodnoty řezných rychlostí při zvolené trvanlivosti a index kinetické obrobitelnosti....	86
Tab. 21	Řezné podmínky – PDP, řezná rychlost $477 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	90
Tab. 22	Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – prům. opotřebení břitů P1a a P2a....	91
Tab. 23	Řezné podmínky – PDP, řezná rychlost $299 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	91
Tab. 24	Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – prům. opotřebení břitů P1b a P2b ...	91
Tab. 25	Řezné podmínky – PDP, řezná rychlost $239 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	92
Tab. 26	Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – prům. opotřebení břitů P3a a P4a....	92
Tab. 27	Přehled technologických parametrů a odpovídajících trvanlivostí T_1 - T_3	93
Tab. 28	Tabulka hodnot trvanlivosti T a rychlosti v_c	94
Tab. 29	Tabulka výpočtu exponentu m a konstant C_T a C_V	94
Tab. 30	Hodnoty řezných rychlostí při zvolené trvanlivosti a index kinetické obrobitelnosti....	96
Tab. 31	Hodnoty indexu obrobitelnosti pro zařídění materiálů (ref. vzorek-třída 14).....	97
Tab. 32	Tabulka hodnot pro program Minitab (DTD-L)	97
Tab. 33	Tabulka hodnot pro program Minitab (PDP).....	98
Tab. 34	Strojní zařízení a pracovní podmínky	100
Tab. 35	Tabulka hodnot exponentu m a konstant C_T a C_V pro jednotlivé materiály.....	115

Tab. 36 Tabulka hodnot výpočtu indexů kinetické obrobitelnosti pro jednotlivé materiály.....	116
Tab. 37 Tabulka zařídění materiálů se zařazením ref. vzorku do třídy 14.....	116
Tab. 38 Tabulka hodnot optimálních řezných rychlostí z hlediska minimálních nákladů.....	116
Tab. 39 Tabulka hodnot optimálních řezných rychlostí z hlediska maximální výrobnosti.....	117

Seznam použitých symbolů

f - funkce

v_c – řezná rychlost [$m \cdot min^{-1}$]

f_z – posuv frézy na zub [mm]

D – průměr frézy [mm]

n – otáčky nástroje [$ot \cdot mm^{-1}$] a počet měření ve vzorci lineární regrese [-] (6.7)

v_f – posuvová rychlost [$mm \cdot min^{-1}$]

z – počet zubů frézy [-]

T – čas, trvanlivost nástroje [min]

Q – celková tepelná energie [J]

F_c – řezná složka obrábění [N]

t – čas řezného procesu [min]

Q_{pd} – teplo vzniklé v oblasti primární plastické deformace při tvorbě třísky [J]

Q_γ – teplo vzniklé v oblasti tření třísky s čelem nástroje [J]

Q_α – teplo vzniklé v oblasti tření hřbetu s obrobenou plochou [J]

Q_t – teplo odvedené do třísky [J]

Q_n – teplo odvedené do nástroje [J]

Q_o – teplo odvedené do obrobku [J]

Q_{pr} – teplo odvedené do řezného prostředí [J]

h_i – jmenovitá tloušťka třísky [mm]

φ_i – úhel pohybu posuvu [$^\circ$]

h_{max} – maximální jmenovitá tloušťka [mm]

φ_{max} – maximální úhel pohybu posuvu [$^\circ$]

VB – hřbetní opotřebení nástroje [mm]

KR – radiální opotřebení nástroje [mm]

a_p – šířka záběru ostří [mm]

f_0 – posuv na otáčku [mm]

m – exponent [-]

C_T – konstanta [-]

C_V – konstanta [-]

a – proměnná ve směrnici přímky, nahrazuje exponent m [-]
b - proměnná ve směrnici přímky, nahrazuje $\log C_T$ [-]
x – proměnná ve směrnici přímky, nahrazuje $\log v_c$ [-]
y - proměnná ve směrnici přímky, nahrazuje $\log T$ [-]
 K_V - index (součinitel) kinetické obrobitelnosti [-]
q – kvocient určený geometrickou řadou R10 [-]
 N_C – celkové náklady [Kč]
 N_S – náklady na strojní práci [Kč]
 N_V – náklady na vedlejší práci [Kč]
 N_N – náklady na nástroje [Kč]
 t_S – strojní čas [min]
 D_S – náklady na 1 hod práce na pracovišti (práce stroje, dělníka, režijní náklady) [Kč]
 M_S – mzda dělníka [Kč/hod]
 R_S – režijní náklady (údržba, energie, odpisy) [%]
L – délka dráhy pohybu břitu nástroje při záběru [mm]
 t_V – vedlejší čas (doba na upínání a měření obrobku, přestávky) [min]
 N_{IN} – náklady na 1 ostrý nástroj [Kč]
 $z_{vým}$ – počet výměn nástroje při výrobě n součástí [-]
 C_N – pořizovací cena nástroje [Kč]
 C_O – zbytková hodnota nástroje [Kč]
x – počet možných použití nástroje [-]
 N_{VBD} – náklady na břitové destičky na 1 ostrý nástroj zahrnující i výměnu [Kč]
 C_{VBD} – cena 1 vyměnitelné břitové destičky [Kč]
p – počet břitových destiček na 1 nástroji [-]
b – počet ostří na 1 břitové destičce [-]
 T_{opt} – optimální trvanlivost
 t_N – čas na nástroje [min]
 $t_{vým}$ – čas potřebný k výměně nástroje [min]

1 ÚVOD

Optimalizace řezného procesu je velmi komplikovaný proces, který zahrnuje mnoho činitelů, jež jsou ve vzájemné interakci – jedná se o stroj, nástroj, obrobek a příp. i přípravek. Představuje činnost umožňující stanovení takových podmínek řezného procesu k dosažení kvalitativního, kvantitativního a ekonomického hlediska obrábění co nejlépe.

Problematika optimalizace parametrů obrábění materiálů na bázi dřeva je v současné době zcela neprozkoumanou oblastí. Je to především proto, že experimenty potřebné ke stanovení optimálních řezných podmínek jsou velmi náročné časově, finančně i z hlediska spotřeby materiálu. Jednou z vlastností obráběných materiálů je jejich obrobiteľnosť, což v prípade materiálů na bázi dřeva dosud nebylo zkoumáno. K jejímu určení slouží experimenty, ve kterých je sledováno opotřebenění břitu nástroje za čas v souvislosti se zvolenými řeznými podmínkami. Pojem optimalizace je tedy spojen se stanovením řezných podmínek, které zajistí nejefektivnější obrobení předepsaného výrobku. Pro vlastní vyhodnocení parametrů řezných podmínek je třeba provést experimentální posouzení závislosti mezi interakcí řezného nástroje a obráběného materiálu při použití proměnných parametrů řezání. Tato práce je tedy založena na stanovení trvanlivosti břitu vycházející z křivek opotřebenění nástroje v závislosti na použitých řezných podmínkách.

Metodika této disertační práce (poznatky a postupy řešení) je založena na teorii obrábění kovových materiálů. Neexistuje literatura, která by se touto problematikou zabývala u materiálů na bázi dřeva. Z části se tomuto tématu věnují výrobci řezných nástrojů, které se využívají v nábytkářském průmyslu. Avšak řezné podmínky, které uvádějí, jsou pouze doporučené a neodpovídají širokému sortimentu používaných materiálů ve výrobě. Experimentální část je tedy založena na principech určování obrobiteľnosti kovů a stanovení optimálních řezných podmínek pro kovové materiály, a je aplikována na materiály na bázi dřeva.

Proces řezání dřevěných materiálů a materiálů na bázi dřeva se odlišuje od procesu řezání kovových materiálů především tím, že se jedná o materiály se zcela odlišnými vlastnostmi z hlediska nejen deformačních procesů. Vlastní (masivní) dřevěné materiály, ale většinou i aglomerované a vrstvené materiály, mají výrazně

odlišné vlastnosti v jednotlivých směrech zatěžování – axiálním, radiálním a tangenciálním.

Při sledování jejich působení v řezných procesech je vždy třeba zvažovat i jejich působení na řezný nástroj, kde se výrazně projevují odlišné vlastnosti z hlediska jejich působení na proces opotřebení nástroje. Na rozdíl od kovů, kde bývá nejčastěji sledováno opotřebení nástroje na hřbetní ploše, je toto opotřebení u těchto materiálů stěží sledovatelné. Vlastní proces řezání a působení obráběného materiálu na řezný nástroj z hlediska jeho otupování souvisí i s jeho obrobiteľností.

Vzhledem k tomu, že tedy neexistuje literatura zabývající se otázkou stanovení obrobiteľnosti nebo optimalizací řezného procesu materiálů na bázi dřeva, nebylo možné vytvořit přehled o současném stavu řešené problematiky. Zároveň tím, že tato práce vychází z teorie obrábění kovů, bylo nezbytné definovat základní pojmy. Z toho důvodu je následující text teoretické části zaměřen na výčet nejdůležitějších poznatků vztahujících se k tématu disertační práce.

2 CÍL PRÁCE

Cílem disertační práce bylo navrhnout metodiku, která bude sloužit k rozdělení materiálů na bázi dřeva do skupin a tříd, které vyjadřují jejich vlastnosti z hlediska procesu obrábění. Tyto vlastnosti byly zjišťovány experimentálně, kdy byly posuzovány vybrané materiály na bázi dřeva ve vztahu k řeznému nástroji. Tato experimentální činnost představovala velké množství měření v proměnlivých podmínkách a byla založena na následujícím postupu:

- byl sledován proces opotřebení břitu při obrábění jednotlivých materiálů;
- byla stanovena závislost trvanlivosti nástroje na řezné rychlosti;
- byla určena obrobitelnost materiálů (jejich vhodnost k obrábění).

Na základě rozdělení materiálů z hlediska jejich vlastností ve vztahu k obrábění byl pak určen postup při volbě řezných podmínek z hlediska optimalizace. Proces optimalizace řezných podmínek byl pak posuzován ze dvou hledisek. První hledisko bylo zaměřeno na ekonomičnost procesu řezání, kdy byly sledovány náklady na řezný proces. Druhé hledisko se zabývalo produktivitou obrábění, kdy byl sledován minimální čas na výrobu daného počtu součástí.

Cílem práce bylo tedy vytvořit metodický postup pro stanovení optimálních řezných podmínek pro materiály na bázi dřeva na základě znalostí o jejich vlastnostech ve vztahu k procesu obrábění. Vzhledem k tomu, že se touto problematikou u materiálů na bázi dřeva dosud nikdo nezabýval, tato práce tak představuje zcela nový přístup k hospodárnému způsobu obrábění.

3 MATERIÁLY NA BÁZI DŘEVA

Vývoj materiálů na bázi dřeva byl iniciován zejména z důvodu vzniku produktů, které by eliminovaly nežádoucí vlastnosti dřeva a využívaly jeho pozitivní vlastnosti. Vyznačují se především velkoplošnými rozměry, vyšší odolností vůči vnějším vlivům a stejnoměrností mechanických vlastností. (Král a Hrázský, 2008)

Vzhledem k tomu, že masivní dřevo má jiné vlastnosti ve směru podél vláken a jiné ve směru kolmém na vlákna, je možné nežádoucí vlastnosti dřeva upravovat vhodným konstrukčním řešením. Využívá se křížové lepení jednotlivých vrstev materiálu, kdy sousední vrstvy jsou na sebe kolmé nebo vlákna sousedních vrstev svírají určitý úhel. Při výrobě velkoplošných materiálů se využívá mechanického rozdělení elementů dřeva, kdy jednotlivé drobné části se spojují zpravidla lisováním za působení tlaku teploty a většinou lepidla do jednoho celku tak, aby konečný produkt odpovídal zadaným požadavkům za současného snížení vlhkostní roztažnosti.

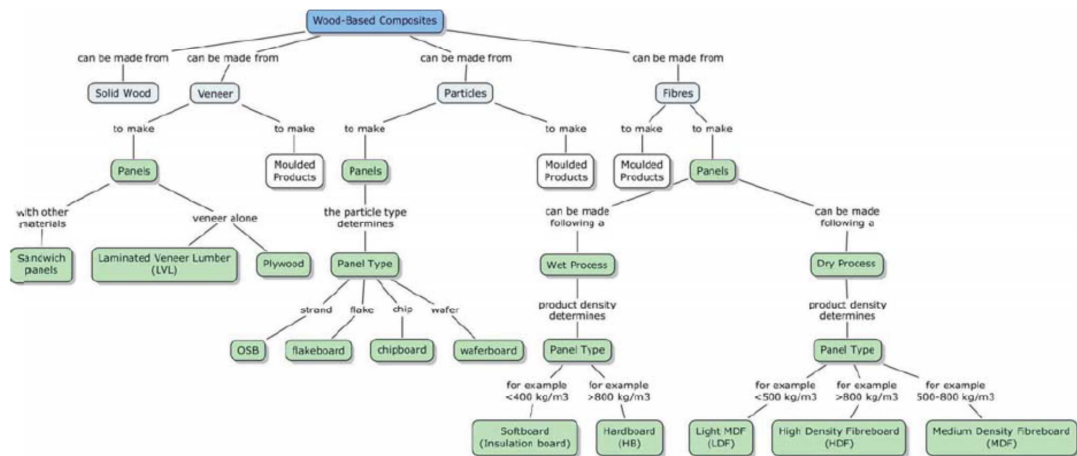
Různorodost struktury, kvality a vlastností dřeva je tedy u materiálů na bázi dřeva regulována. Anizotropní chování těchto materiálů je možné upravovat velikostí a orientací částic, jednotlivým konstrukčním řešením apod. Výhodou těchto materiálů je řízená úprava jejich vlastností v jednotlivých směrech podle potřebných požadavků.

Kompozitní materiály také vykazují nižší variabilitu mechanických vlastností než nehomogenní přírodní materiál – masivní dřevo. (Baker, 2002)

Základní rozdělení dřevěných materiálů:

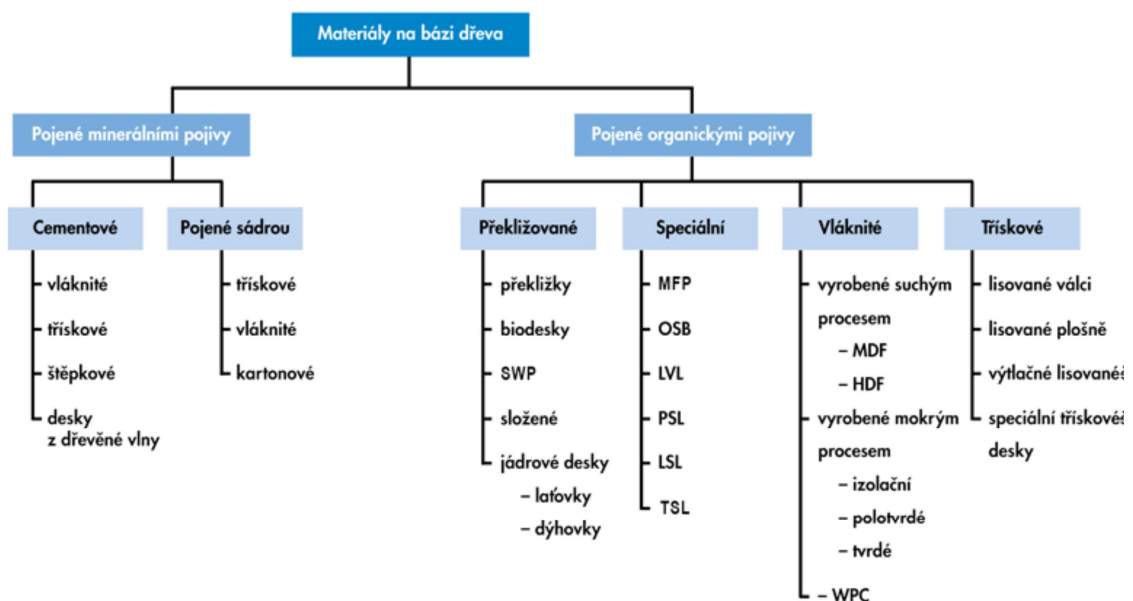
- masivní materiály
- překližované materiály
- aglomerované materiály
- kompozitní materiály.

Masivní materiály mají původní uspořádání a strukturu dřevních buněk (spárovky, bidesky), překližované materiály jsou materiály, vzniklé překližením různých vrstev, které jsou vůči sobě kolmé nebo pod určeným úhlem (překližky, laťovky, lamely), aglomerované materiály jsou charakteristické spojením malých dřevních elementů za působení tlaku a lepidla (DTD, DVD) a kompozitní materiály jsou heterogenní materiály, které jsou složeny z různých surovin s odlišnými vlastnostmi. Mezi kompozitní materiály se zařazují také materiály aglomerované a překližované. (Böhm a kol. 2012)



Obr. 1 Schéma zahrnující široký sortiment materiálů na bázi dřeva¹

Materiály na bázi dřeva lze dělit také podle způsobu konstrukčního zpracování a použitého pojiva (obr. 2).



Obr. 2 Přehled materiálů na bázi dřeva²

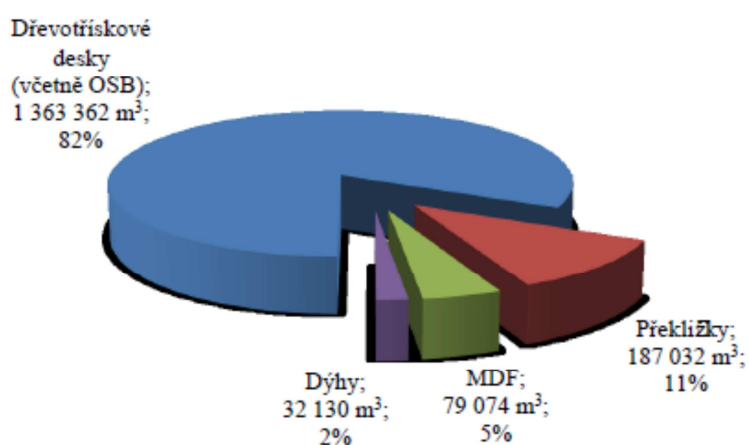
Vysvětlivky: SWP (*Solid Wood Panel*) - vícevrstvá deska z masivního dřeva, MFP (*multifunkční panel*) – multifunkční deska, OSB (*Oriented Strand Board*) – deska z orientovaných plochých třísek, LVL (*Laminated Veneer Lumber*) – vrstvené dřevo ze souboru dých, PSL (*Parallel Strand Lumber*), LSL (*Laminated Strand Lumber*), TSL

¹ THOEMEN, H., IRLE, M., SERNEK, M., 2010. Wood-based Panels - An Introduction for Specialists. Uxbridge, Brunel University Press, 283 p. ISBN 978-190-2316-826.

² BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J., 2012. Materiály na bázi dřeva. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2251-6.

(*Triangular Strand Lumber*) – kompozitní materiály na bázi dřeva pro nosné účely, MDF (*Medium Density Fibreboard*) – dřevovláknitá deska se střední hustotou, HDF (*Hard Density Fibreboard*) – tvrdá dřevovláknitá desky. (Böhm a kol. 2012)

Böhm a kol. (2012) uvádí, že nejrozšířenější a nejpoužívanější velkoplošné materiály jsou DTD (dřevotřískové desky), MDF (dřevovláknité desky se střední hustotou), OSB desky (desky s orientovaných třísek) a překližky. V následujícím grafu je zobrazen podíl jednotlivých druhů materiálů a množství jejich výroby v České republice v roce 2010.



Obr. 3 Podíl velkoplošných materiálů v roce 2010³

3.1 Fyzikální a mechanické vlastnosti materiálů na bázi dřeva

„Na mechanicko-fyzikální vlastnosti (a na způsoby aplikace) materiálů na bázi dřeva mají výrazný vliv téměř všechny výrobní parametry. Mezi nejpodstatnější se obvykle uvádí: druh dřeviny, velikost, geometrie, orientace, formování a kvalita třísek, typ a množství použitého lepidla a přídavných látek a lisovací faktory (lisovací čas, teplota a tlak, rychlost uzavírání lisu, vlhkost, chemické reakce při lepení třísek, plastifikace, formát výrobku), které vzájemnou interakcí v průběhu lisování třískového koberce usměrňují zejména tvorbu hustotního profilu charakterizující rozložení hustoty v deskách.“ (Böhm a kol. 2012, s. 27)

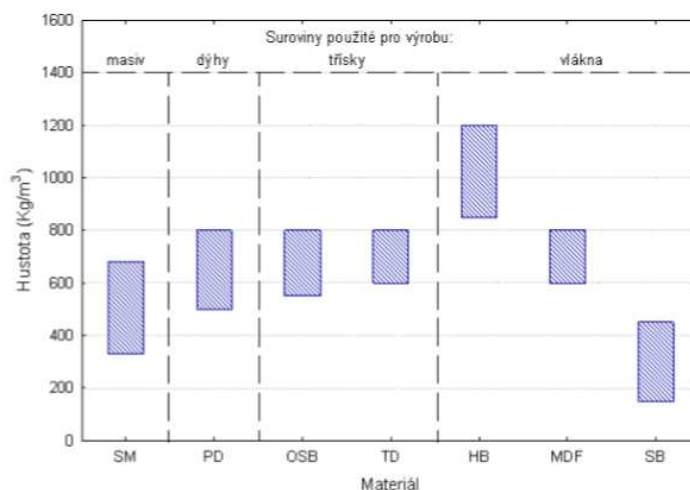
Obecně platí, že se zvyšující se hustotou se velikost částic zmenšuje (dochází k lepšímu formování) a zlepšují se mechanické vlastnosti materiálu (při zachování

³ BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J., 2012. Materiály na bázi dřeva. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2251-6.

konstantní vlhkosti), současně však klesá pevnost, jestliže se jedná o materiály se stejnou hustotou.

Z hlediska obrábění dřeva jsou mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu důležitým faktorem. Mezi důležité vlastnosti dřeva patří i obrobitelnost dřeva. Je ovlivněna zejména směrem vláken u masivního dřeva a velikostí a orientací částic u materiálů na bázi dřeva, dále vlhkostí dřeva, hustotou a příčným hustotním profilem, pevností, pružností a tvrdostí dřeva. (Varkoček a kol. 2004)

Obrobitelnost neboli vhodnost materiálu k obrábění je jednou ze stěžejních vlastností materiálu z hlediska jeho zpracování. Bohužel se však touto vlastností nezabývá žádná literatura. Z toho důvodu byla podstatná část projektu IGA (33/2012) zaměřena právě na obrobitelnost materiálů na bázi dřeva. Vzhledem k tomu, že úzce souvisí s optimalizací obráběcího procesu, je tedy důležitou součástí také disertační práce. Problematikou obrobitelnosti se zabývá kapitola 7.



Obr. 4 Hustota materiálů na bázi dřeva⁴

Mezi základní dřevní elementy pro výrobu materiálů na bázi dřeva patří: dýhy, třísky, dřevní částice a vlákna. Vlastnosti materiálů na bázi dřeva mohou být tak ovlivňovány změnou rozměru a geometrie dřevních elementů a jejich kombinací, reorganizací a vrstvením. Základní elementy jsou zobrazeny na obr. 5. (Bergman et al. 2010)

⁴ BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J., 2012. Materiály na bázi dřeva. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2251-6.



Obr. 5 Základní dřevní elementy⁵

zleva po směru hodinových ručiček: hobliny, piliny, vlákna, třísky, velké ploché třísky – „wafers“ a „strands“

Následující text bude zaměřen na přehled vybraných představitelů materiálů na bázi dřeva a jejich základních vlastností.

3.1.1 Masivní dřevo

Dřevo je lehký a pevný materiál, který dobře snáší velké zatížení, má dobré tepelněizolační vlastnosti a tlumí vibrace. Vede slabě elektrický proud, má rezonanční vlastnosti a nepodléhá korozi. Dobře se opracovává řeznými nástroji, spojuje lepením i mechanicky pomocí hřebíků a vrutů. Snadno se přepravuje. (Král a Hrázský, 2008)

Desky z masivního dřeva patří mezi základní produkty s dlouhou tradicí. Masivní dřevo je v nábytkářském průmyslu hojně využíváno, zatímco ve stavebnictví je jeho využití nižší. Je to zejména z důvodu značně odlišných vlastností dřeva oproti běžně používaným materiálům. Böhm a kol. (2012) uvádí následující vlastnosti desek:

Pozitivní vlastnosti desek z rostlého dřeva:

- přírodní zdravotně nezávadný materiál
- charakter přírodního masivního dřeva
- vysoká pevnost v ohybu
- poměr nízké objemové hmotnosti a vysoké pevnosti
- nízká emise škodlivých látek
- tvarová stálost (vícevrstvé desky)

⁵ BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J., 2012. Materiály na bázi dřeva. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2251-6.

Negativní vlastnosti desek z rostlého dřeva:

- hygroscopicita (schopnost látek pohlcovat vlhkost) a s ní spojené změny rozměrů při změně vlhkosti
- nehomogenita (různorodost struktury, kvality a vlastností)
- anizotropie (nestejněměrnost vlastností v různých směrech – mechanické vlastnosti v podélném směru jsou mnohonásobně vyšší než vlastnosti v příčném směru)
- nízká odolnost proti hnilobě, působení vysokých teplot, otevřenému ohni, vodě
- vady dřeva (suky, trhliny) snižují fyzikálně-mechanické vlastnosti.

Většinu z uvedených nedostatků rostlého dřeva lze určitým způsobem eliminovat pomocí fyzikálně-mechanického nebo chemického působení – např. působení vysokého tlaku a teploty, překlížení jednotlivých vrstev dřeva, retardační a antiseptická úprava dřeva, vliv lepidel, použití folií apod. (Král a Hrázský, 2008)

Mezi základní představitele masivního dřeva patří deskové řezivo, spárovky a biodesky.

3.1.1.1 Deskové řezivo

Deskové řezivo je zařazováno mezi nejjednodušší produkty na bázi dřeva. Má unifikované rozměry, pravidelný tvar a stanovený průřez, podle jehož tvaru a rozměrů se řezivo dělí na deskové, hráněné a polohráněné. Mezi deskové řezivo je zahrnováno řezivo omítané i neomítané s tloušťkou do 100 mm kdy platí, že šířka je větší nebo rovna dvojnásobné tloušťce. Používá se na výrobu polotovarů a konečných produktů a velmi často je využíváno na výrobu spárovek. (Böhm a kol. 2012) Příklad deskového řeziva je uveden na obr. 6.

3.1.1.2 Spárovky

Spárovky patří mezi konstrukční desky, které jsou vyrobeny slepením několika přířezů (vlysů) z masivního dřeva. Jednotlivé přířezy jsou buď celé délky spárovky, nebo nastavované nekonečným vlysem. Jsou lepeny PVAC (polyvinylacetátovým) lepidlem a na jejich výrobu se nejčastěji používá smrk, borovice, buk, dub, olše a javor. (Král a Hrázský 2008)

Mezi přednosti spárovek patří srovnatelné mechanické vlastnosti jako u rostlého dřeva, možnost výroby velkých formátů a v neposlední řadě přirozený vzhled rostlého dřeva. Nevýhody spárovek jsou zejména anizotropie a poměrně velká náchylnost na změnu vlhkosti (bobtnání, sesychání a borcení). Použití spárovek je nejvíce zastoupeno v nábytkářském odvětví, dále ve výrobě pevných obalů, výroba schodů a dveří. (Böhm a kol. 2012) Příklad spárovky je uveden na obr. 7.



Obr. 6 Dubové prkno⁶



Obr. 7 Spárovka⁷

⁶ BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J., 2012. Materiály na bázi dřeva. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2251-6.

⁷ BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J., 2012. Materiály na bázi dřeva. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2251-6.

3.1.1.3 *Biodesky*

Biodeska je třívrstvá konstrukční deska z rostlého dřeva, která je vyrobena křížovým slepením tří vrstev spárovek. Středová vrstva je tvořena nejčastěji smrkovým řezivem, na vrchní vrstvy se používá smrk, topol, bříza, buk, dub, olše a javor. (Král a Hrázský 2008)

Překlížením jednotlivých vrstev je dosaženo odstranění anizotropního charakteru desky, lepší tvarová stálost a výrazně nižší množství lepidla oproti aglomerovaným materiálům. Nevýhodou těchto desek je poměrně náročná výroba. Biodesky se používají v nábytkářství, truhlářství a stavebnictví jako nosníky, konstrukční prvky a bednicí dílce. (Böhm a kol. 2012)



Obr. 8 Biodeska – třívrstvá deska z rostlého dřeva⁸

3.1.2 **Překližované materiály**

Na výrobu vrstvených plošně slepovaných překližovaných materiálů (překližek, laťovek, lamel) se používají loupané dýhy, které se spojují do velkoplošných pásů a následně se rozstíhají na požadované rozměry. Tyto materiály si tak zachovávají přírodní vzhled dřeva. Název vznikl podle dříve používaného lepidla – klihu. (Böhm a kol. 2012)

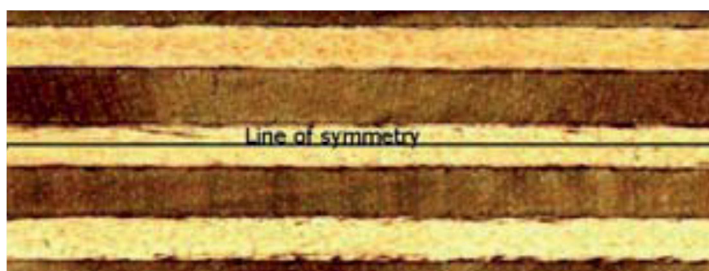
3.1.2.1 *Překližky*

Překližka je deskový produkt vyrobený zcela nebo převážně z listů dýh. Je složena z lichého počtu vrstev tak, že směr vláken jedné vrstvy a sousední vrstvy je vůči

⁸ BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J., 2012. Materiály na bázi dřeva. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2251-6.

sobě kolmý. Vrstva může obsahovat pouze jeden list dýhy nebo celý soubor dýh (složený z lichého nebo sudého počtu listů dýh), přičemž vlákna jsou rovnoběžná v celém souboru. Vnější vrstvy a všechny liché vrstvy v překližce mají směr vláken rovnoběžný s delším rozměrem desky. (Bergman et al. 2010)

Lichý počet vrstev překližky zajišťuje stabilitu desky a symetrický průřez tloušťkou, kdy spodní polovina je zrcadlovým obrazem horní poloviny. Jestliže je třívrstvá překližka ponořena do vody, bobtnání dýh je vyvážené a deska tak zůstane plochá. Další dýhy proto musí být přidány v párech, aby byla zachována symetrie desky. (Thoemen et al. 2010)



Obr. 9 Průřez sedmivrstvou překližkou s vyznačenou linií symetrie⁹

Překližka je vyráběna křížovým lepením plošných vrstev dýh. Křížením vrstev jsou pak částečně odstraněny vlastnosti masivního dřeva, např. anizotropie. Překližky se mohou vyrábět v různých úpravách – do suchého, vlhkého či mokrého prostředí. Podle použité dřeviny a její tloušťky, počtu vrstev, druhu použitého lepidla a povrchové úpravy je určen konečný vzhled překližky i její fyzikální a mechanické vlastnosti. Vyrábí se z listnatých i jehličnatých dýh, např. smrku, borovice, topolu, břízy, buku, olše apod. Jejich tloušťka se pohybuje od 2 - 40 mm. Lze je dokončovat povrchovou úpravou nebo nalisováním folií. Jsou vyráběny jako velkoplošné nebo tvarové. (Böhm a kol. 2012)

Mezi výhody překližek patří izotropní charakter a výrazná pevnost v ohybu v podélném i příčném směru. Překližky mají vynikající rozměrovou stálost a menší náchylnost na změny vlhkosti oproti masivnímu dřevu. Mají široké využití v interiéru ve výrobě nábytku, opláštění konstrukcí, ale i ve stavebnictví jako stavební překližky. (Bergman, 2010)

⁹ THOEMEN, H., IRLE, M., SERNEK, M., 2010. Wood-based Panels - An Introduction for Specialists. Uxbridge, Brunel University Press, 283 p. ISBN 978-190-2316-826.



Obr. 10 Truhlářská překližka¹⁰

3.1.2.2 Lat'ovky

Lat'ovka je vyrobena oboustranným překlížením lat'kového středu dýhou. Středová vrstva je tvořena jehličnatým řezivem, nejčastěji smrkem a borovicí, vrchní dýhy jsou nejčastěji z topolu, buku, břízy a olše. Běžně se lat'ovky dodávají v tloušťkách 16 a 19 mm. Vynikají poměrně vysokou pevností (hlavně v ohybu v podélném směru středových latěk) a nízkou hmotností oproti aglomerovaným materiálům. Jsou běžně dokončovány povrchovými úpravami, boční plochy dílců je nutné olepovat hranami. (Hrázský a Král 2007, Böhm a kol. 2012)



Obr. 11 Lat'ovka¹¹

¹⁰ BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J., 2012. Materiály na bázi dřeva. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2251-6.

¹¹ BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J., 2012. Materiály na bázi dřeva. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2251-6.

3.1.3 Aglomerované materiály

Aglomerované materiály jsou materiály vyrobené z dřevních nebo jiných lignocelulózových částic, Jejich výroba spočívá v desagregaci dřevního materiálu na drobné částice (třísky, vlákna) a následné aglomeraci těchto částic za použití lepidla (většinou), teploty a tlaku. Jako základní vstupní suroviny se z ekonomického hlediska zpracovávají piliny, dřevní odpad nebo méně kvalitní sortiment, pilařské odřezky a podobné suroviny, které není možné jiným způsobem výhodně zpracovat. (Král a Hrázský 2008, Böhm a kol. 2012)

Hrázský a Král (2007) uvádí následující přednosti aglomerovaných materiálů:

- velkoplošné rozměry
- izotropní a homogenní struktura materiálu (bez vad)
- široký sortiment (pevnost, hustota, tloušťka, apod.)
- dobré mechanické a akustické vlastnosti
- nízká tepelná vodivost
- možnost použití běžných spojovacích prostředků včetně lepení a povrchové úpravy
- velmi nízké nároky na vstupní suroviny

Využití aglomerovaných materiálů je velmi široké zejména díky uvedeným přednostem těchto materiálů. Jsou využívány v nábytkářství, stavebnictví, truhlářství, ve výrobě obalů, v dopravě i např. ve výstavnictví. Vyrábí se i materiály, které jsou opatřeny speciální povrchovou úpravou (odolnost proti ohni, vlhkosti apod.).

Mezi aglomerované materiály se řadí dřevotřískové, dřevovláknité desky a speciální desky pojené minerálními pojivy. (Král a Hrázský 2008)

3.1.3.1 Dřevotřískové desky (DTD)

Dřevotřísková deska je obecný pojem pro materiál vyrobený z dřevěných třísek, které jsou vyráběny v rozmanitých tvarech a velikostech. Dřevěné třísky jsou spojeny pomocí syntetického lepidla, vysokého tlaku a teploty. Pro výrobu dřevotřískových desek je z lignocelulózového materiálu použito přibližně 95% dřeva. Zbytek tvoří převážně sezónní plodiny, jako je len, bagasa a obilná sláma. (Thoemen et al. 2010)

Jedná se o nejrozšířenější a nejvíce vyráběný aglomerovaný materiál. Vyrábí se lisováním dřevních nebo lignocelulózových částic za tepla s použitím lepidla. Nejčastěji se používají co nejlevnější vstupní suroviny (zbytkové dřevo, pilařské odřezky, hnědé štěpky, třísky z obrábění dřeva, dřevo z těžebních zbytků apod.) K lepení se nejčastěji používají močovinoformaldehydová lepidla (UF), pro zvýšení vodovzdornosti desek se používají i lepidla fenolformaldehydová (PF) nebo melaminformaldehydová (MEF).

Dřevotřískové desky jsou vyráběny plošným lisováním, výtláčným lisováním (extrudováním) a válcovým (kalandrovým) lisováním. Způsoby výroby se navzájem liší technologií výroby – směrem a způsobem lisování a uložením třísek vzhledem k ploše třískového koberce. (Hrázský a Král 2007, Böhm a kol. 2012)

Typicky jsou vyráběny ve vrstvách, ale na rozdíl od OSB desek (*Oriented Strand Board*) jsou povrchové vrstvy třískových desek z jemnějších třísek a středová vrstva z hrubšího materiálu. Výsledkem je hladší povrch pro laminování, dýhování a dokončování povrchovou úpravou. (Bergman et al. 2010)

Třískové desky se vyrábí v různých tloušťkách a mohou být jednovrstvé (vyráběny výtláčným nebo plošným lisováním), třívrstvé nebo pětivrstvé (vyráběny plošným lisováním). Nejrozšířenější jsou desky třívrstvé. Pro zajištění hladkého povrchu desek se mohou používat tzv. mikrotřísky, které tvoří zvláštní kategorii povrchových třísek. (Hrázský a Král 2007, Böhm a kol. 2012)

Král a Hrázský (2008) uvádí rozdělení dřevotřískových desek podle velikosti a tvaru třísek na:

- dřevotřískové desky,
- desky z velkoplošných třísek (Waferboard),
- desky z orientovaných třísek (OSB),
- desky z jiných částic (pazdeřové desky).

Vlastnosti dřevotřískových desek jsou ovlivněny především velikostí třísek, druhem použité dřeviny i druhem lepidla. Mezi jejich výhody je možné zařadit využití dřevní hmoty bez nároků na kvalitu vstupní suroviny, použití celé řady lignocelulózových materiálů (bambus, papyrus, konopné a lněné pazdeří, stonky bavlníku apod.), dále pak velkoplošnost, izotropní vlastnosti desek, aplikovatelnost povrchových úprav povrchů i bočních ploch. Třískové desky je také možné vyrábět s různou objemovou hmotností, tj. i s různými mechanickými vlastnostmi, jsou

odolnější proti vlhkosti než masivní dřevo. Mezi nežádoucí vlastnosti patří horší mechanické vlastnosti oproti masivnímu dřevu, nelze je použít v exteriéru, pro zlepšení estetického vzhledu je nutné tyto materiály dýhovat, laminovat nebo foliovat. Třískové desky nejsou vhodné pro tvarové opracování. (Hrázský a Král 2007, Böhm a kol. 2012)



Obr. 12 Třívrstvá dřevotřísková deska¹²

Použití dřevotřískových desek je rozšířeno zejména v nábytkářském průmyslu. Surové DTD se používají na neviditelné dílce čalouněného nábytku, dýhované a laminované desky na výrobu bytového, koupelnového, kuchyňského a kancelářského nábytku. Využití mají také ve výrobě obalů a jako nosná vrstva nebo podkladový materiál podlah. (Král a Hrázský 2008, Böhm a kol. 2012)

Podle ČSN EN 312 (Třískové desky – Požadavky, 2011) se dřevotřískové desky rozdělují na následující druhy:

- P1 – Desky pro všeobecné účely pro použití v suchém prostředí
- P2 – Desky pro vnitřní vybavení (včetně nábytku) pro použití v suchém prostředí
- P3 – Nenosné desky pro použití ve vlhkém prostředí
- P4 – Nosné desky pro použití v suchém prostředí
- P5 – Nosné desky pro použití ve vlhkém prostředí
- P6 – Zvlášť zatížitelné nosné desky pro použití v suchém prostředí
- P7 – Zvlášť zatížitelné nosné desky pro použití ve vlhkém prostředí

¹² BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J., 2012. Materiály na bázi dřeva. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2251-6.

3.1.3.2 Dřevovláknité desky (DVD)

ČSN EN 316 (Vláknité desky. Definice, klasifikace a značky, 2009) definuje dřevovláknité desky jako vláknitý materiál o tloušťce od 1,5 mm, který je vyrobený z lignocelulózových vláken za použití teploty a tlaku, jehož soudržnost zajišťují zplstnatěná vlákna (mají přirozenou lepivost) a případně i přídavek syntetické pryskyřice. Na výrobu dřevovláknitých desek se používá kvalitní bílá štěpka, většinou z jehličnatého dřeva. Desky je možné vyrábět bez pojiva nebo s přídavkem fenolformaldehydové pryskyřice. Zvýšení odolnosti proti působení vlhkosti zajišťují hydrofobizační prostředky – obvykle parafinová emulze. Vyrábějí se suchým nebo mokrým způsobem, v několika tloušťkách, s rozdílnou tvrdostí a hustotou a různou úpravou povrchu. Hustota dřevovláknitých desek má velký vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti. (Hrázský a Král 2007, Böhm a kol. 2012)

Termín dřevovláknité desky zahrnuje tvrdé, polotvrdé a měkké vláknité desky. Od dřevotřískových desek se liší zejména fyzickou podstatou dřevních elementů. Vzhledem k tomu, že dřevo je svojí povahou vláknité, dřevovláknité desky tak využívají přirozené pevnosti dřeva ve větší míře než desky dřevotřískové. (Bergman et al. 2010)

Měkké dřevovláknité desky se vyrábí mokrou cestou s použitím lepidla a parafínu.

Polotvrdé dřevovláknité desky (dřevovláknité desky se střední hustotou - MDF) se vyrábí suchou cestou s použitím močovinoformaldehydového lepidla pro desky určené do suchého prostředí. Desky určené pro použití ve vlhkém prostředí se používají fenolformaldehydová a melaminformaldehydová lepidla.

Tvrdé dřevovláknité desky se dříve vyráběly mokrým způsobem, proto byl na rubové straně viditelný otisk síta. Nyní výroba těchto desek probíhá suchou cestou. (Hrázský a Král 2007, Böhm a kol. 2012)

3.1.3.2.1 Dřevovláknité desky se střední hustotou (MDF)

Dřevovláknité desky se střední hustotou jsou také označovány jako polotvrdé vláknité desky, zkráceně MDF (Medium Density Fibreboard). Vyrábí se v tloušťkách od 2 do 100 mm a v nejrůznějších formátech. Jejich hustota se pohybuje v rozmezí od 500 do 900 kg·m⁻³, přičemž hustota má tendenci se zvyšovat se snižující se tloušťkou desek. Povrchové vrstvy MDF jsou hladké s vysokou hustotou, při použití barviva ve

výrobním procesu jsou desky vyráběny v barevné škále od růžovohnědé do tmavě hnědé. (Thoemen et al. 2010)

Mezi nejvýznamnější vlastnosti MDF jsou homogenita v celém průřezu materiálu, hladký a stabilní povrch. Tyto vlastnosti umožňují opracování materiálu tvarovým frézováním boků i ploch desek. Další výhody MDF jsou vysoká mechanická pevnost a rozměrová stabilita, které jsou dány jemnou strukturou vláken. Další pozitivní vlastností oproti dřevotřískovým deskám je pevnost v tahu kolmo na plochu (pevnost vrutu v boční ploše).

Na výrobu MDF se používají jehličnaté, listnaté i exotické dřeviny, jsou vyráběny zejména jako jednovrstvé, ale mohou se vyrábět i vícevrstvé. Mají široké použití, nejčastěji ve výrobě nábytku – tvarové dílce, stylový, moderní nábytek. Široké použití je také na kuchyňský nábytek – dvířka, čela zásuvek apod. (Hrázský a Král 2007, Böhm a kol. 2012)



Obr. 13 Dřevovláknitá deska se střední hustotou - MDF¹³

3.1.4 Kompozitní materiály

3.1.4.1 Dřevoplastové kompozity

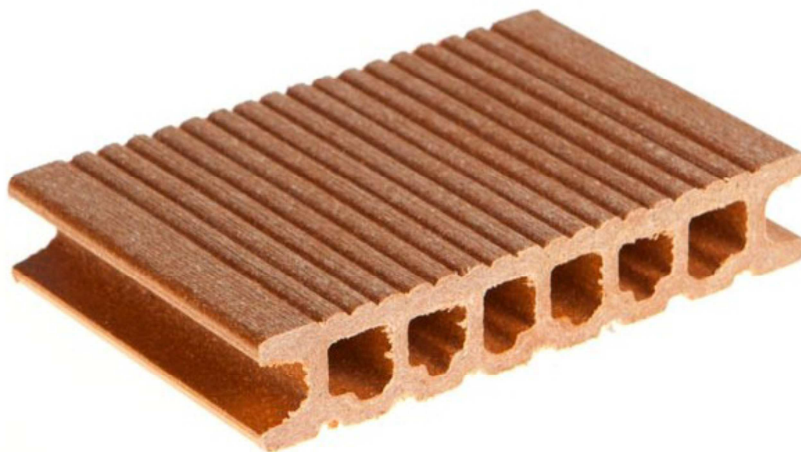
Dřevoplastové kompozity se označují zkratkou WPC – *Wood Plastic Composites*. Vyrábí se ze směsi dřevní hmoty jehličnanů (třísky, dřevní vlákna, piliny) a plastového polymeru ve formě milimetrových kuliček (vysokotlaký polyetylen, polypropylen) a zušlechťujících přísad (pojiva, smáčedla, UV stabilizátory). Podíl dřeva je různý, nejčastěji je v poměr dřevní hmoty mezi 40 až 80%, optimálně však 60%

¹³ BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J., 2012. Materiály na bázi dřeva. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2251-6.

dřeva a 40% polymeru. Nejpoužívanější dřeviny na výrobu WPC jsou smrk a borovice. (Böhm a kol. 2012)

Mechanické vlastnosti dřevoplastových kompozitů obecně spadají mezi vlastnosti masivního dřeva a neplněných plastů. Většina komerčně využívaných dřevoplastových kompozitů má podstatně nižší tuhost než masivní dřevo, ale vyšší než neplněné plasty. Jsou-li vystaveny vlhkosti a změnám teploty, v porovnání s řezivem a plasty mají WPC vyšší rozměrovou stabilitu, vyšší tuhost a odolnost proti hnilobě. Jedním z hlavních důvodů vzniku dřevoplastových kompozitů bylo zvýšení tuhosti materiálu. Přídavkem dřevní složky do plastu je možné zvýšit i pevnost, ale pouze v případě, že dřevěné komponenty působí jako výztuž s dobrou vazbou mezi oběma složkami. (Bergman et al. 2010)

Obecně jsou vlastnosti WPC závislé na volbě použitých surovin, druhu polymeru a aditivech. Jsou velmi odolné proti zvýšené vlhkosti, absorbují max. 20-30% vody, mají dobré mechanické vlastnosti, vysokou tvrdost, dobrou rozměrovou a barevnou stálost a celkovou odolnost. Mají však poměrně vysokou hustotu a při vyšších teplotách tečou. Používají se hlavně v exteriéru díky odolnosti proti vlhku a dlouhodobé trvanlivosti. Jsou využívány zpravidla na venkovní podlahy (terasy) s protiskluzovým rýhovaným povrchem, střešní krytiny i obklady staveb. Dodávají se často s drážkami pro možný stavebnicový systém. (Böhm a kol. 2012)

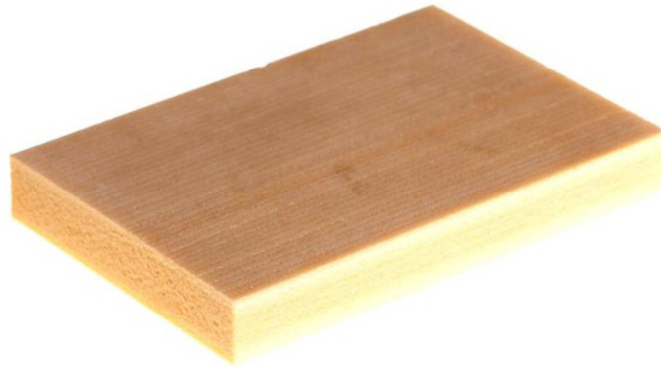


Obr. 14 Podlahový dílec (vylehčený) z WPC¹⁴

¹⁴ BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J., 2012. Materiály na bázi dřeva. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2251-6.

3.1.4.2 *Plastové imitace dřeva*

Jedná se o zcela samostatnou kategorii materiálů, které jsou celoplastové, neobsahují žádné dřevní elementy a pouze dřevo imitují (imitace struktury a textury dřeva a materiálů na bázi dřeva). Nejčastěji používaným plastem pro tyto materiály je PUR (polyuretan) a PS (polystyren). (Böhm a kol. 2012)



Obr. 15 Příklad plastové imitace dřeva - PUR¹⁵

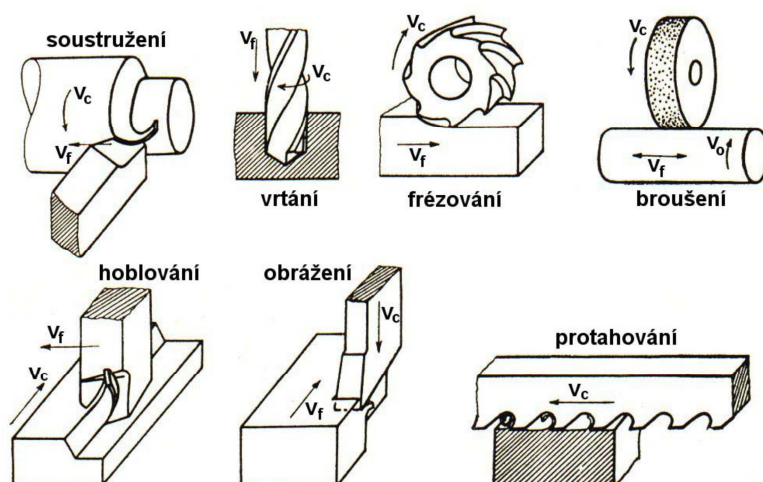
¹⁵ BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J., 2012. Materiály na bázi dřeva. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2251-6.

4 OBRÁBĚNÍ MATERIÁLŮ

Prokeš (1978) uvádí, že obrábění je technologický proces, kterým je získáván tvar obrobku požadované geometrie, rozměru a jakosti obrobených ploch. Rozlišují se základní způsoby zpracování – bez narušení nebo s narušením vzájemných vazeb dřevních vláken. Předpoklad pro zpracování materiálů na bázi dřeva bez narušení vazeb dřevních vláken je schopnost trvalé plastické deformace dřeva. Předpoklad pro zpracování materiálů na bázi dřeva s narušením vazeb dřevních vláken je jeho dělitelnost. Při zpracování vniká nástroj do obrobku a odděluje zvolenou část.

Kocman (2011) uvádí, že při obrábění se používají nástroje s definovanou geometrií břitu. Mezi základní metody obrábění strojírenských součástí patří soustružení, frézování, vrtání, vyhrubování, vystružování a zahlubování, vyvrtávání, hoblování a obrážení, protahování a protlačování. Při využívání těchto metod je důraz kladen na přesnost obrobené plochy.

Varkoček (2004) rozděluje obrábění materiálů na bázi dřeva na třískové a beztřískové. Mezi třískové obrábění patří následující operace: řezání, frézování, soustružení a okružení, vrtání, dlabání, hoblování, škrabání, broušení, rašplování a pilování, leštění. Mezi beztřískové operace patří hlazení (smykovým třením za studena, smykovým třením za tepla a valivým třením za tepla), dále beztřískové obrábění koncentrovanou energií (laserem, vodním paprskem) a tvarování (ohýbáním a tvarovým lisováním).



Obr. 16 Vybrané metody obrábění¹⁶

¹⁶ HUMÁR, A. Výrobní technologie I: Studijní opory pro podporu samostudia v oboru „Strojírenská technologie [online]. Citováno 11. března 2014. Dostupné na World Wide Web: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TL_TO-1cast.pdf>

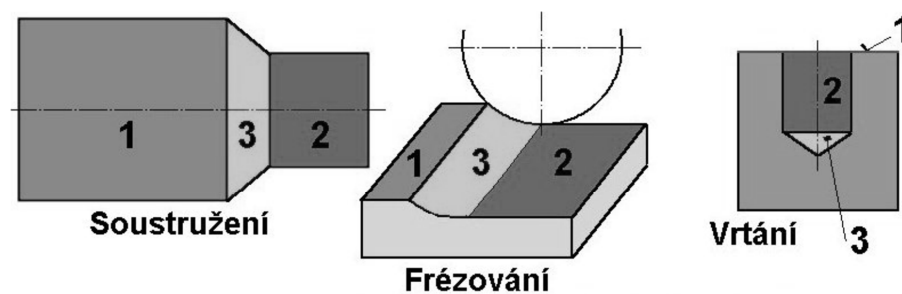
Při obrábění je materiál obrobku oddělován břitem nástroje. Vlastní proces oddělování je charakterizován jako řezání, neboli řezný proces, a probíhá za určitých zvolených řezných podmínek. Rozlišují se tři základní typy řezného procesu – kontinuální (souvislý, nepřetržitý – např. soustružení), diskontinuální (nesouvislý – např. hoblování) a cyklický (opakující se – např. frézování). Výchozí materiál, který je určen pro obrábění se nazývá polotovar. (Kocman, 2011)

4.1 Obrobek

Obrobek je součást, která vznikla z polotovaru obráběním. Je charakterizován třemi základními plochami:

- a) obráběná plocha
- b) obrobená plocha
- c) přechodová plocha.

Obráběná plocha je ta část obrobku, která se bude obrábět. Obrobená plocha je část, která je již obrobená, má definované rozměry, tvar i polohu a požadovanou jakost obrobené plochy. Její parametry jsou závislé na komplexu technologických faktorů, vlastnostech obráběcího stroje, vlastnostech nástroje a obrobku a řezných podmínkách při obrábění. Plocha přechodová je vytvořená působením ostří řezného nástroje. (Humár, 2003)



Obr. 17 Základní plochy na obrobku: 1) obráběná část; 2) obrobená část; 3) přechodová část¹⁷

4.1.1 Vlastnosti obráběného materiálu na bázi dřeva

Prokeš (1978) uvádí, že při obrábění dřeva vstupují do řezného procesu jeho fyzikální, mechanické i technologické vlastnosti. Vlastnosti dřeva jsou závislé na anatomické stavbě dřeva a jeho chemickém složení. Z fyzikálních vlastností se jedná

¹⁷ HUMÁR, A., 2003. Technologie I: Technologie obrábění – 1. část. Studijní opory pro magisterskou formu studia [online] citováno 11. března 2014. Dostupné na World Wide Web: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf

především o objemovou hmotnost, tepelnou a elektrickou vodivost, z mechanických vlastností se významnou měrou uplatňuje pevnost, tvrdost a plastičnost dřeva a z technologických vlastností zejména dělitelnost a obrobitelnost.

Přehled základních fyzikálních, mechanických a technologických vlastností dřeva ve vztahu k řeznému procesu (Prokeš, 1978):

- objemová hmotnost – platí: čím vyšší je objemová hmotnost, tím vyšší je řezný odpor při obrábění za stejných technologických podmínek,
- vlhkost dřeva – významně ovlivňuje řezný odpor a elektrickou vodivost a tím i trvanlivost břitu,
- pevnost dřeva – je síla odporu, kterou vyvíjí dřevo proti dělení částí. Při působení menších sil, dochází na povrchu dřeva k pružným deformacím, které se projevuje stlačováním vláken. Při působení velkých sil dochází k trvalé deformaci, jestliže je překročena mez pružnosti, příp. mez pevnosti dřeva.
- tvrdost dřeva – je síla odporu, kterou vyvíjí dřevo proti vnikání nástroje. Zvyšuje se se vzrůstající objemovou hmotností a se snižujícím se obsahem vody. Výrazný podíl na tvrdosti dřeva má hustota librifonních vláken, resp. tloušťka buněčných stěn (udává se 3-7 μm). Se vzrůstajícím zastoupením librifonních vláken ve dřevě a se vzrůstající tloušťkou jejich stěn, roste i tvrdost dřeva. (Šlezingerová a Gandelová, 2005)
- dělitelnost – je základní podmínkou pro obráběcí proces,
- obrobitelnost – jedná se o souhrn vlastností, které určují vztah mezi obráběným a řezným materiálem. Více v kap. 5.

Hodnocení mechanických vlastností dřeva je podmíněno jeho nehomogenní vláknitou stavbou. Směr dřevních vláken má výrazný vliv zejména na řezný odpor, rozhodující je i pevnost a délka samotných vláken.

Obrábění vrstveného a aglomerovaného dřeva je ovlivňováno přítomností vytvrzené pryskyřice a objemovou hmotností materiálu. Lepidlo (příp. minerální a jiné složky) v materiálu zvyšuje abrazivnost. (Prokeš, 1978)

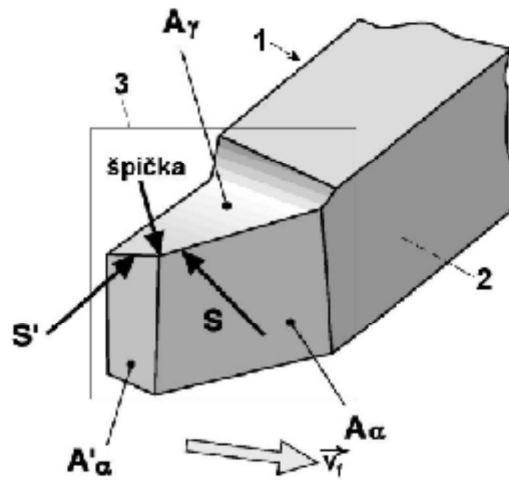
4.2 Nástroj

Nástroj je činitel, který slouží k oddělování materiálu (třísky) z obráběného předmětu, přičemž realizaci řezného procesu umožňuje vzájemná interakce nástroje s obrobkem. (Forejt, 2006) Mezi základní části nástroje patří:

- řezná část – je tvořena prvky nástroje, které vytváří třísku. Je tvořena čelem, hřbetem a ostřím nástroje. Pokud se jedná o vícezubý nástroj, pak každý zub (břit) má svoji řeznou část (na obr. 18 označeno jako 3);
- břit – jedná se o prvek řezné části umožňující realizaci řezání. Jedná se o průsečík čela a hřbetu, je zhotoven z řezných materiálů;
- upínací část (stopka) – část nástroje určená k upínání nástroje do obráběcího stroje (na obr. 18 označeno jako 1);
- základna – jedná se o plochou část upínací části nástroje. Není vždy přesně určena a slouží pro umístění a orientaci nástroje při ostření, kontrole nebo jeho výrobě (na obr. 18 označeno jako 2).

Každý nástroj je dále definovaný jednotlivými plochami. Jsou označeny písmenem A s příslušným indexem písmena řecké abecedy podle jejího druhu. Plochy jsou děleny na hlavní a vedlejší s tím, že vedlejší plochy jsou označeny čárkou (Čep, 2007; Kocman, 2011):

- hřbet nástroje – hlavní hřbet je označován A_α a jedná se o plochu směrem k přechodové ploše obrobku, vedlejší hřbet A_α' je plocha směrem k obrobené ploše.
- čelo nástroje – je označováno A_γ , jedná se o plochu, po níž odchází tříska;
- ostří – jedná se o průsečík hřbetu a čela nástroje. Dělí se na hlavní a vedlejší ostří. Hlavní ostří S vytváří přechodovou plochu na obrobku, vedlejší ostří S' slouží k dokončovací práci na obrobené ploše;
- špička nástroje – leží na spojnici hlavního a vedlejšího ostří.



Obr. 18 Nástroj – základní plochy a ostří¹⁸

4.2.1 Nástrojové materiály

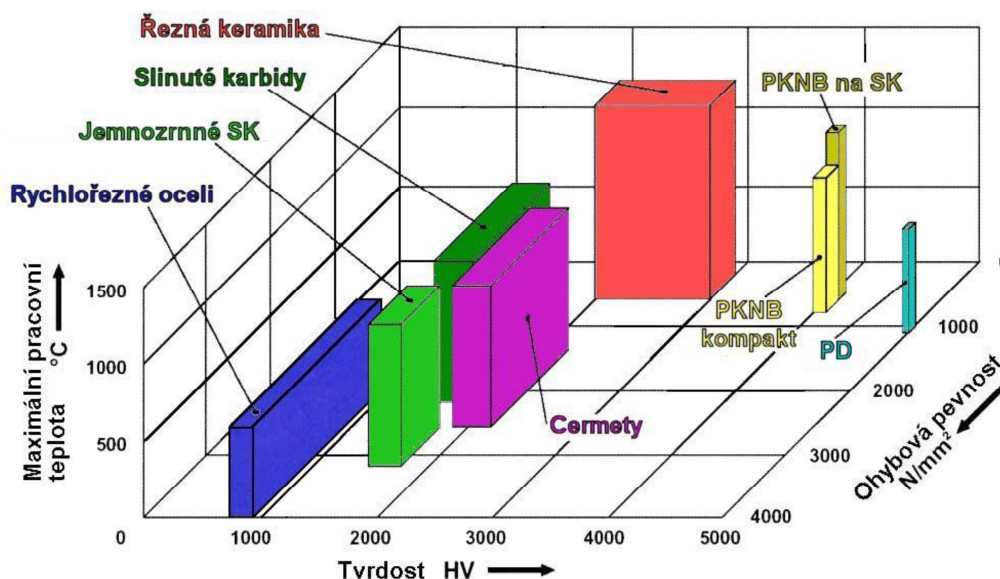
Vlastnosti řezného nástroje významně ovlivňují průběh a výsledek řezného procesu. Jsou definovány charakteristikou nástrojového materiálu, mezi jehož základní vlastnosti by měla patřit tvrdost, houževnatost, odolnost proti opotřebení, pevnost v ohybu a tepelná vodivost při vysokých teplotách. (Humár, 2008)

Kocman (2011) uvádí následující nástrojové materiály pro výrobu řezných nástrojů:

- nástrojové oceli
- stellite
- slinuté karbidy – SK
- cermety
- keramické nástrojové materiály – KM
- supertvrdé řezné materiály – PKNB a PKD
- přírodní diamant

Na obr. 19 jsou zobrazeny základní vlastnosti jednotlivých nástrojových materiálů, tj. tvrdosti, ohybové pevnosti a pracovní teploty.

¹⁸ ČEP, R., 2007. Technologie II [online] citováno 24. července 2014. Dostupné na World Wide Web: <http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf>



Obr. 19 Přehled základních vlastností jednotlivých nástrojových materiálů (tvrdość, ohybová pevnost, teplota)¹⁹

4.2.1.1 Nástrojové oceli

Nástrojové oceli se dělí na 3 základní skupiny:

- nelegované – uhlíkové
- nízkolegované
- vysokolegované – rychlořezné oceli (RO, příp. HSS)

Podle podílu přísad – legur²⁰ (Si, Cr, Mn, Va, Ni, W, Co apod.), se upravují jejich vlastnosti jako tvrdość, pevnost a houževnatost.

Rychlořezné oceli mají nízkou tvrdość, ale vysokou houževnatost. Jsou vhodné pro obrábění nízkou řeznou rychlostí a jsou určeny k výrobě tvarově složitých nástrojů (Humár, 2003).

4.2.1.2 Stelity

Jedná se o řezné slitiny s vysokým podílem karbidů chromu (20 – 40% Cr), wolframu (10 – 30% W) a kobaltu (až 55% Co), které zvyšují houževnatost. Stelity tvoří přechod mezi rychlořeznou ocelí a slinutým karbidem. Jsou křehké a nekujné. (Humár, 2008)

¹⁹ HUMÁR, A. Výrobní technologie I: Studijní opory pro podporu samostudia v oboru Strojírenská technologie [online]. Citováno 11. března 2014. Dostupné na World Wide Web: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TL_TO-1cast.pdf>

²⁰ Pozn.: Legury jsou látky rozpustné v tekuté oceli.

4.2.1.3 Slinuté karbidy

Humár (2006) zařazuje slinuté karbidy (SK) mezi tvrdé nástrojové materiály. Jsou velmi pevné a používají se pro obrábění vysokou posuvovou rychlostí. Nejsou vhodné pro obrábění vysokou řeznou rychlostí. Nástroje ze slinutých karbidů jsou křehké, dochází u nich k vydrolování břitu a snesou zahřátí na teplotu až 900°C.

Jsou vyrobeny spékáním (slinováním) karbidů wolframu (WC), titanu (TiC), chromu (CrC), tantalu (TaC) a dalších prvků, přičemž pojivem je vždy kobalt (Co), který je houževnatý. Rozdělují se do tří skupin podle složení a použití při obrábění (Humár, 2008):

- skupina K (označená červenou barvou): WC + Co + (TaC.NbC) – vhodná pro obrábění materiálů vytvářející krátkou třísku (např. litina, nekovové materiály),
- skupina P (označená modrou barvou): WC + TiC + Co + (TaC.NbC) – vhodná pro obrábění materiálů vytvářející dlouhou třísku (např. uhlíkové a slitinové oceli),
- skupina M (označená žlutou barvou): WC + TiC + TaC.NbC + Co – vhodná pro obrábění materiálů vytvářející dlouhou a střední třísku (např. lité oceli).

Slinuté karbidy mohou být povlakované karbidy, nitridy, oxidy nebo jejich kombinacemi – např. karbidem titanu (TiC), nitridem titanu (TiN), karbonitridem titanu (TiCN) nebo oxidem hlinitým (Al₂O₃ – keramika). Povlakování se může provádět jako jednovrstvé nebo vícevrstvé. Povlakované SK se mohou používat při vysokých posuvových i řezných rychlostech s vysokým úběrem materiálu. (Humár, 2008)

4.2.1.4 Cermety

Mají vysokou tvrdost i při vyšších teplotách, ale nízkou houževnatost a používají se pro vyšší posuvové i řezné rychlosti. Jejich základní složení je: TiC + TiN + Ni, Mo. (Humár, 2003)

4.2.1.5 Keramické řezné materiály

Jedná se o krystalické materiály na bázi nekovových sloučenin. Mezi jejich základní vlastnosti patří vysoká tvrdost a nízká houževnatost. Dělí se na oxidickou a nitridovou, příp. vyztuženou keramiku.

Nejčastěji se používají se dva druhy – na bázi AL_2O_3 a Si_3N_4 . Řezná keramika na bázi AL_2O_3 se používá pro vysokou řeznou rychlost a nízkou posuvovou rychlost vzhledem k nízké houževnatosti a vysoké tvrdosti za tepla. Keramika na bázi Si_3N_4 se používá pro vyšší posuvové rychlosti, má vyšší houževnatost, ale rychle se opotřebovává. (Kocman, 2011)

4.2.1.6 Supertvrde řezné materiály

Mezi supertvrde řezné materiály patří polykrystalický kubický nitrid boru – PKNB a polykrystalický diamant – PD. Mají vysokou tvrdost a pevnost v tlaku a používají se na specifické aplikace včetně obrábění neželezných materiálů. Řezné materiály na bázi diamantu se nesmí používat k obrábění ocelí a litin vzhledem ke svojí afinitě k železu (diamant je uhlík v kubické modifikaci). Doporučuje se chlazení řeznými kapalinami. (Humár, 2006)

4.2.2 Geometrie řezného nástroje

Geometrie řezného nástroje značně ovlivňuje proces utváření a odvod třísky, velikost a rozložení řezné síly, kvalitu, přesnost a drsnost obrobenej plochy, trvanlivost nástroje a hospodárnost řezného procesu. Parametry geometrie jsou charakterizovány jednotlivými úhly, které jsou definovány ve dvou soustavách - rovině nástrojové nebo pracovní. Nástrojová rovina je rovina statická, která se používá pro výrobu, konstrukci nebo ostření nástrojů. Pracovní rovina je rovina kinetická, která definuje geometrii nástroje v procesu řezání. (Čep, 2007; Humár, 2003) Základní geometrie nástroje je definována následujícími úhly (Csanády a Magoss, 2012):

Úhel hřbetu α_0 – jedná se o úhel mezi hřbetem nástroje a nástrojovou rovinou ostří, obvyklá hodnota úhlu je 8-12°. Má značný vliv natření nástroje o obrobek a vznik tepla, tuhost břitu a trvanlivost nástroje. S rostoucí velikostí úhlu hřbetu, tím menší vzniká tření a nůž se méně zahřívá.

Úhel břitu β_0 – jedná se o úhel mezi čelem a hřbetem nástroje. Ovlivňuje odpor materiálu obrobku, se snižující se velikostí úhlu břitu, tím snadněji nůž vniká do obrobku. Příliš malý úhel břitu způsobuje rychlé otupení nástroje, příp. ulomení apod.

Úhel čela γ_0 – jedná se o úhel mezi čelem nástroje a nástrojovou zadní rovinou. Ovlivňuje proces utváření třísky, silové poměry a opotřebení nástroje. S rostoucí velikostí úhlu čela tříska snadněji odchází po čele, ale nástroj ztrácí pevnost. Úhel čela

nabývá kladných, ale i záporných hodnot. Negativní úhel čela se používá pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů.

Úhel řezu δ_0 – jedná se o úhel mezi čelem nástroje a nástrojovou rovinou ostří. Jeho velikost je dána součtem úhlu hřbetu a břitu.

Úhel nastavení hlavního ostří κ – ovlivňuje rozložení sil v procesu obrábění, tvar třísky a délku ostří v záběru.

Úhel nastavení vedlejšího ostří κ' – ovlivňuje drsnost obrobené plochy a tuhost a opotřebení špičky nástroje.

Úhel špičky ε – ovlivňuje tuhost břitu, velikost hlavního řezného odporu a kvalitu obrobeného povrchu.

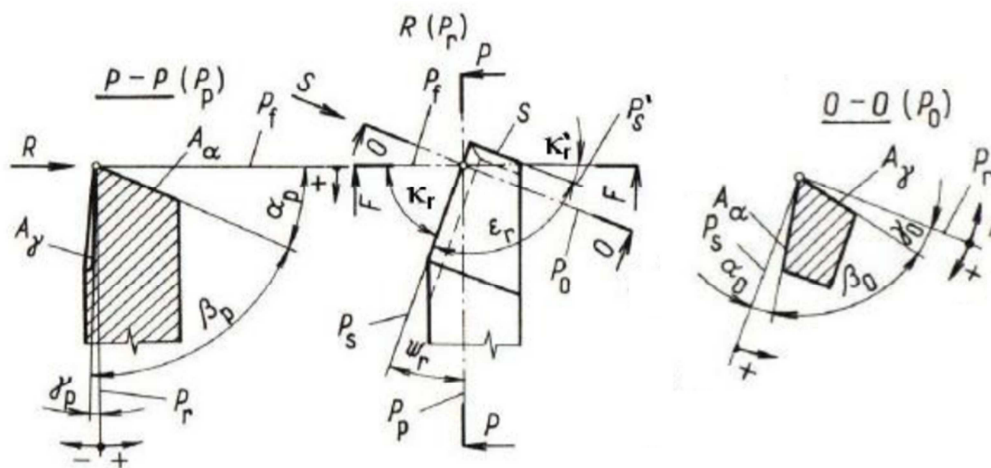
Úhel sklonu hlavního ostří λ – ovlivňuje tuhost břitu, směr odvodu třísky z místa řezu a opotřebení břitu.

Mezi nástrojovými úhly platí následující matematická závislost:

$$\alpha + \beta + \chi = 90^\circ \quad (4.1)$$

$$\alpha + \beta = \delta \quad (4.2)$$

$$\kappa + \kappa' + \varepsilon = 180^\circ \quad (4.3)$$



Obr. 20 Přehled základních nástrojových úhlů ²¹

²¹ ČEP, R., 2007. Technologie II [online] citováno 24. července 2014. Dostupné na World Wide Web: < http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf>

4.3 Řezné podmínky

Volba řezných podmínek vychází z interakce mezi nástrojem a obrobkem. Závisí tedy na výběru druhu použité frézy, druhu práce a požadované jakosti obrobené plochy. (Kocman, 2011)

Mezi základní technologické podmínky patří řezná rychlost $v_c [m \cdot min^{-1}]$ a posuv na zub $f_z [mm]$. Řezná rychlost je běžně stanovována výrobcem nářadí s ohledem na druh a vlastnosti obráběného materiálu. Je definována vztahem:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} \quad [m \cdot min^{-1}] \quad (4.4)$$

kde: D – průměr frézy [mm]
 n – otáčky nástroje [$ot \cdot mm^{-1}$]

Hodnota posuvu na zub $f_z [mm]$ je obvykle stanovena výrobcem řezného nářadí. Tato hodnota souvisí s druhem a objemem odebíraného materiálu, který se vměstná do zubové mezery. (Kocman, 2011) V praxi bývá také udávána rychlost posuvová $v_f [mm \cdot min^{-1}]$, která je dána vztahem:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad [mm \cdot min^{-1}] \quad (4.5)$$

kde: f_z – posuv frézy na zub [mm]
 z – počet zubů frézy [-]
 n – otáčky nástroje [$ot \cdot mm^{-1}$]

Na stroji se nastavuje otáčkový stupeň. Jedná se o otáčky nástroje $n [ot \cdot mm^{-1}]$, pro které platí následující vztah:

$$n = \frac{10^3 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \quad [ot \cdot min^{-1}] \quad (4.6)$$

kde: v_c – řezná rychlost [$m \cdot min^{-1}$]
 D – průměr frézy [mm]

4.4 Teplo a teplota v procesu řezání

Teplo v procesu obrábění materiálu vzniká přeměnou vynaložené práce. Téměř veškerá mechanická energie vynaložená na řezání spojená s procesem vytváření třísky se mění v energii tepelnou. Literatura uvádí, že 95 – 98% energie se přemění v teplo.

Výjimku tvoří pružné deformace, jejichž podíl nepřesahuje 5% a většinou tvoří pouze zanedbatelnou část celkové práce – max. 2%. Množství tepla v procesu obrábění je dáno vztahem (Čep, 2011):

$$Q = F_c \cdot v_c \cdot t \quad [J] \quad (4.7)$$

kde Q – celková tepelná energie [J]

F_c – řezná složka obrábění [N]

v_c – řezná rychlost [$m \cdot min^{-1}$]

t – čas řezného procesu [min]

V procesu řezání vznikají tři zdroje tepla, které se nachází v oblasti primární plastické deformace při tvorbě třísky, v oblasti čela nástroje, kde se vyvíjí tření mezi třískou a čelem nástroje, a v oblasti mezi hřbetem nástroje a obrobenou plochou, kde dochází rovněž ke tření. (Čep, 2011) Tedy:

$$Q = Q_{pd} + Q_\gamma + Q_\alpha \quad [J] \quad (4.8)$$

kde Q – celková tepelná energie [J]

Q_{pd} – teplo vzniklé v oblasti primární plastické deformace při tvorbě třísky [J]

Q_γ – teplo vzniklé v oblasti tření třísky s čelem nástroje [J]

Q_α – teplo vzniklé v oblasti tření hřbetu s obrobenou plochou [J]

Vzniklé teplo je pak dále šířeno kondukcí nebo konvekcí do třísky, nástroje, obrobku a do řezného prostředí. (Kocman, 2011)

$$Q = Q_t + Q_n + Q_o + Q_{pr} \quad [J] \quad (4.9)$$

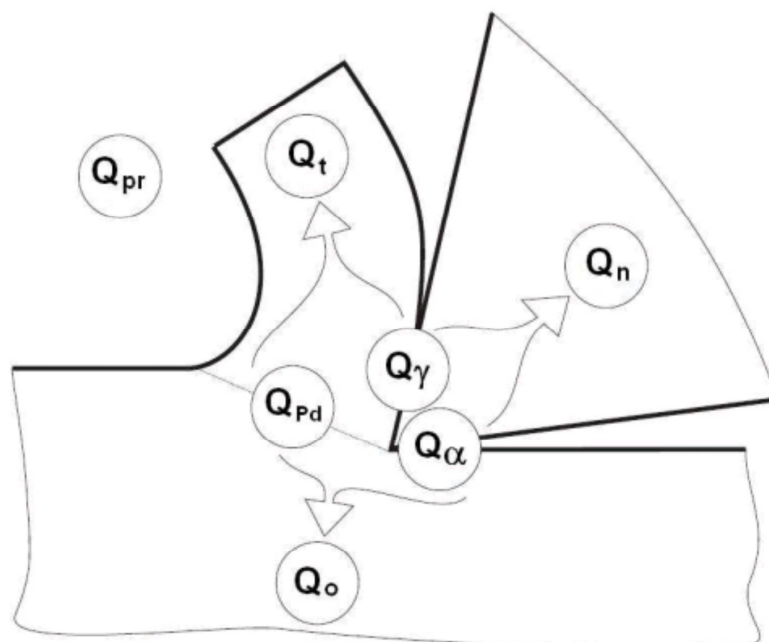
kde Q – celková tepelná energie [J]

Q_t – teplo odvedené do třísky [J]

Q_n – teplo odvedené do nástroje [J]

Q_o – teplo odvedené do obrobku [J]

Q_{pr} – teplo odvedené do řezného prostředí [J]



Obr. 21 Rozložení tepelné energie²²

Přítomnost tepla může negativně ovlivňovat řezné vlastnosti nástroje, mechanické vlastnosti materiálu a proces utváření třísky. Současně má také vliv i na deformační procesy oddělovaného materiálu na čele a hřbetě nástroje. Z toho důvodu se sleduje množství vzniklého a odvedeného tepla v daném místě a čase – tepelná bilance. (Šebelová a Chladil, 2013)

Tepelná bilance je tedy rovnice charakterizující rovnováhu mezi množstvím tepla, které vzniká v procesu řezání a množstvím tepla, které je odvedeno do prvků obráběcího systému.

$$Q = F_c \cdot v_c = Q_{pd} + Q_{\gamma} + Q_{\alpha} = Q_t + Q_n + Q_o + Q_{pr} \quad [J] \quad (4.10)$$

4.5 Základní metody obrábění

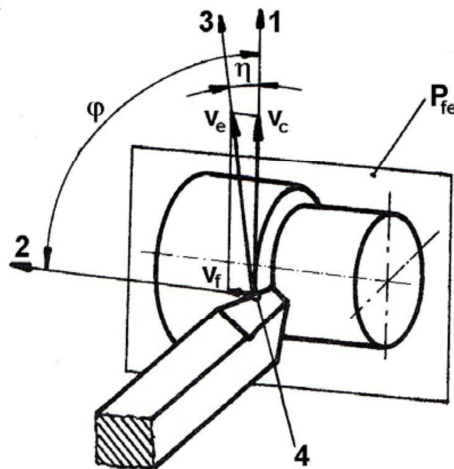
Mezi základní řezné operace patří frézování, vrtání a soustružení.

4.5.1 Soustružení

Soustružení je využíváno k výrobě rotačních součástí, při kterém se nejčastěji používají jednobřité nástroje. Je prováděno na soustruzích. Jedná se o nejjednodušší metodu obrábění, kdy hlavní pohyb je rotační a provádí ho obrobek, a vedlejší pohyb je

²² SZLAUR, V., 2012. Analýza procesů obrábění kovových materiálů se zaměřením na energetické aspekty [online]. Citováno 22. července 2014. Dostupné na World Wide Web: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55049>

přímočarý podélně, příčně nebo kombinovaně vůči ose rotace a provádí ho nástroj. (Kocman 2011)



Obr. 22 Základní pohyby při soustružení

1 - hlavní pohyb, 2 – posuvový pohyb, 3 – řezný pohyb, 4 – bod ostří, P_{fe} – pracovní rovina (boční) ²³

Prokeš (1978) rozděluje soustružení na podélné (osové), tangenciální (tečné) a radiální (čelní). Podélné soustružení je charakteristické umístěním břitu v úrovni osy otáčení obráběného materiálu a posuv je rovnoběžný s osou otáčení. Tangenciální soustružení je charakteristické příčným pohybem nože (kolmo k otáčení obrobku), přičemž břit je s osou otáčení rovnoběžně nebo v určitém úhlu. Radiální soustružení je typické nastavením nože v úrovni osy otáčení obrobku jako u podélného soustružení, ale posuvový pohyb je příčně k ose otáčení.

4.5.2 Frézování

Frézování je proces, při kterém je využíván vícebřitý nástroj k vytvoření rovinného nebo tvarového povrchu. Je prováděno na frézkách. Rozlišují se tři základní typy fréz – válcová, čelní a stopková. (Shaw, 2005)

Kocman (2011) definuje frézování jako obráběcí metodu, při které je materiál obrobku odebírán břity otáčejícího se nástroje. Posuv nejčastěji vykonává obráběná součást, většinou kolmo k ose nástroje. Moderní frézovací stroje mohou provádět proměnlivé posuvné pohyby plynule ve více směrech (víceosá obráběcí centra, víceosé CNC frézky). Charakter řezného procesu je přerušovaný, zuby frézy střídavě odřezávají krátké třísky proměnné tloušťky.

²³ HUMÁR, A. Výrobní technologie I: Studijní opory pro podporu samostudia v oboru „Strojírenská technologie [online]. Citováno 11. března 2014. Dostupné na World Wide Web: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TL_TO-1cast.pdf>

Prokeš (1978) uvádí, že frézování je obrábění nástrojem, který se otáčí, přičemž nominální tloušťka třísky se mění v průběhu záběru od nuly do S_{max} a směr posuvu je kolmo k ose otáčení nástroje. Tento způsob je používán k vyvážení obrobků s hladkým povrchem, tvarovými plochami a s přesnými rozměry. Materiály na bázi dřeva se frézují ve všech směrech, ale nejčastěji podél dřevních vláken. Smysl otáčení je většinou volen nesousledný, tzn. proti směru posuvu.

Rozlišují se čtyři druhy obrábění vzhledem k poloze osy otáčení a ploch, které opisují břity nástroje:

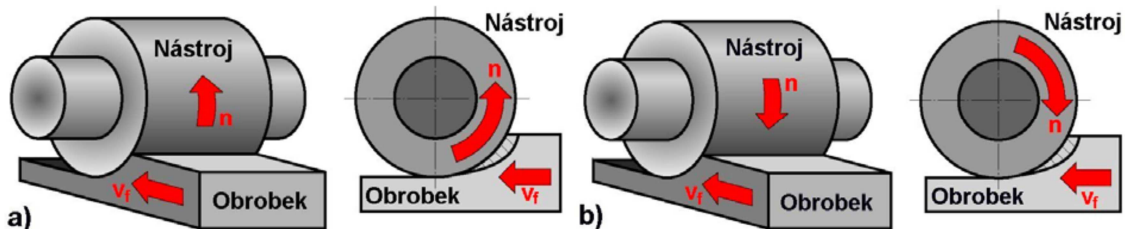
- a) válcové – osa nástroje je rovnoběžná s plochou obrobku
- b) čelní – osa nástroje je kolmá k ploše obrobku

U válcového frézování jsou zuby frézy pouze na obvodu nástroje, přičemž kolmo k ose frézy a směru posuvu se nastavuje hloubka odebírané vrstvy.

V závislosti na kinematice obrábění se rozlišuje sousledné a nesousledné frézování. Při vzájemném pohybu nástroje a obrobku vznikají v průběhu frézování kinematické nerovnosti. Rozdíl v těchto nerovnostech je z praktického hlediska u obou způsobů zanedbatelný, avšak názory jednotlivých autorů v otázce opotřebování břitu při použití sousledného nebo nesousledného smyslu otáčení frézy se liší.

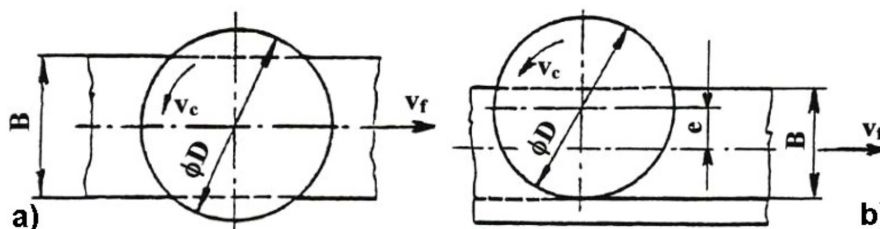
- a) sousledné frézování – označuje se také sousměrné. Nástroj se pohybuje ve směru posuvu obrobku, tloušťka třísky je proměnlivá - mění se z maximální hodnoty na hodnotu minimální. Obrobená plocha vzniká při výstupu nástroje z materiálu. Prokeš (1978) uvádí, že z hlediska jakosti obrobené plochy je sousledné frézování vhodnější, protože záběr zubů je dokončován při minimální tloušťce třísky. To může eliminovat vytrhávání vláken povrchu obrobku i u otupených nástrojů. Je však nutné dbát na průběh vláken. Mezi nevýhody sousledného frézování patří rychlejší otupování břitů nástroje, které je způsobeno větší délkou odebírané třísky, nárazy břitu na obráběný materiál (dochází k namáhání břitu na počátku záběru – je odebírána maximální tloušťka třísky S_{max}) a silnou deformací třísky.
- b) nesousledné frézování – označuje se také protisměrné. Nástroj se pohybuje proti směru posuvu obrobku, obrobená plocha se vytváří při vnikání nástroje do obráběného materiálu. Tloušťka třísky je proměnlivá – mění se z minimální hodnoty na maximální. Kocman (2011) uvádí, že při nesousledném frézování dochází k prokluzu břitu po ploše, která byla vytvořena předcházejícím břitem. Mezi obráběným materiálem a břitem tak vznikají deformace a účinky síly, které

způsobují vyšší opotřebení břitů. Vnikání nástroje do obrobku při nesousledném frézování také způsobuje stlačení obráběného materiálu. (Kocman, 2011; Prokeš, 1978)



Obr. 23 Válcové frézování: a) nesousledné b) sousledné²⁴

U čelního frézování jsou zuby frézy na obvodu i čele nástroje, přičemž ve směru osy frézy se nastavuje hloubka odebírané vrstvy. U tohoto typu frézování se podle poměru šířky obráběné plochy vzhledem k průměru frézy a podle polohy osy frézy vzhledem k obráběné ploše rozlišuje frézování symetrické nebo nesymetrické. (Kocman, 2011)



Obr. 24 Čelní frézování: a) symetrické b) nesymetrické²⁵

4.5.2.1 Vznik a průřez třísky

Tříška je obvykle malá část materiálu, která vznikla odřezáním od povrchu obrobku za pomoci řezného nástroje.

Při obrábění materiálů na bázi dřeva dochází v místě kontaktu břitu s obrobkem k deformaci – stlačení dřevních vláken. K oddělování třísky tak dochází až po překročení určité míry napětí. Tvorba třísky je u materiálů na bázi dřeva provázána vznikem trhlin (zejména u nehomogenních materiálů). Prokeš (1978) popisuje vlivy na tvar a vlastnosti třísky:

²⁴ HUMÁR, A., 2003. Technologie I: Technologie obrábění – 1. část. Studijní opory pro magisterskou formu studia [online] citováno 11. března 2014. Dostupné na World Wide Web: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf

²⁵ HUMÁR, A., 2003. Technologie I: Technologie obrábění – 1. část. Studijní opory pro magisterskou formu studia [online] citováno 11. března 2014. Dostupné na World Wide Web: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf

- druh a vlastnosti obráběného materiálu (teplota, vlhkost, mechanické vlastnosti apod.)
- směr dřevních vláken v souvislosti s pohybem nástroje
- geometrie nástroje
- zvolené řezné podmínky (řezná rychlost, posuv na zub, apod.)
- způsob obrábění (sousedné, nesousedné)
- způsob odvádění třísek

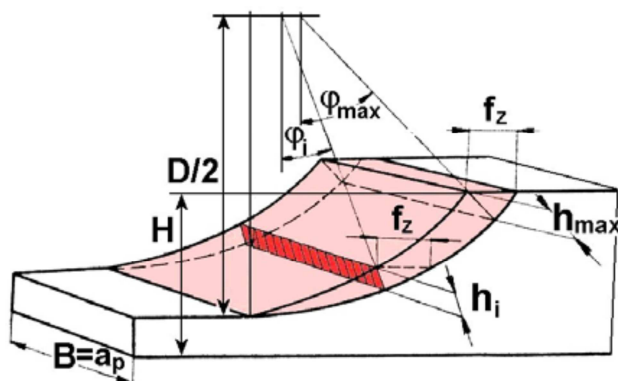
Nejdůležitějším znakem třísky je průřez, který charakterizuje její tvar a rozměry. Dále se rozlišují jednotlivé typy třísek podle způsobu vzniku a vzhledu.

Průřez třísky je závislý na smyslu otáčení frézy. Při válcovém sousledném frézování se tloušťka odřezávané třísky mění z maximální hodnoty na hodnotu nulovou. Při frézování nesousedném nabývá hodnot od nulové do maximální. Jmenovitá tloušťka třísky h_i je nastavená tloušťka třísky vycházející z hodnoty posuvu na zub a je charakterizována vztahem (Humár, 2003):

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [mm] \quad (4.11)$$

kde: f_z – posuv na zub [mm]

φ_i – úhel pohybu posuvu [°]



Obr. 25 Průřez třísky a jmenovitá tloušťka třísky h_i ²⁶

Jmenovitou tloušťku třísky je možné vyjádřit v libovolném místě průřezu třísky. Tato hodnota úzce souvisí s geometrií řezného nástroje, která je popsána v kapitole 4.2.2. Jmenovitá tloušťka třísky u fréz s přímými zuby odpovídá hodnotě posuvu na zub. Velikost maximální jmenovité tloušťky třísky h_{max} je vyjádřena vztahem:

²⁶ HUMÁR, A., 2003. Technologie I: Technologie obrábění – 1. část. Studijní opory pro magisterskou formu studia [online] citováno 11. března 2014. Dostupné na World Wide Web: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf

$$h_{\max} = f_z \cdot \sin \varphi_{\max} \quad [mm] \quad (4.12)$$

kde: f_z – posuv na zub [mm]

φ_{\max} – maximální úhel pohybu posuvu [°]

4.5.3 Vrtání

Vrtání je vytváření kruhových otvorů pomocí nástroje – vrtáku. Směr posuvu vrtání je rovnoběžný s osou rotace nástroje. Hlavní funkci plní čelní břity. Výběr nástroje pro vrtací operace je závislý zejména na pracovních podmínkách, směru dřevních vláken, hloubce a průměru a požadované přesnosti vrtaného otvoru a produktivitě práce. Při vrtacích operacích je obtížné odvádět třísky, proto je nutné brát v úvahu zvýšené zahřívání nástroje. (Prokeš, 1978)

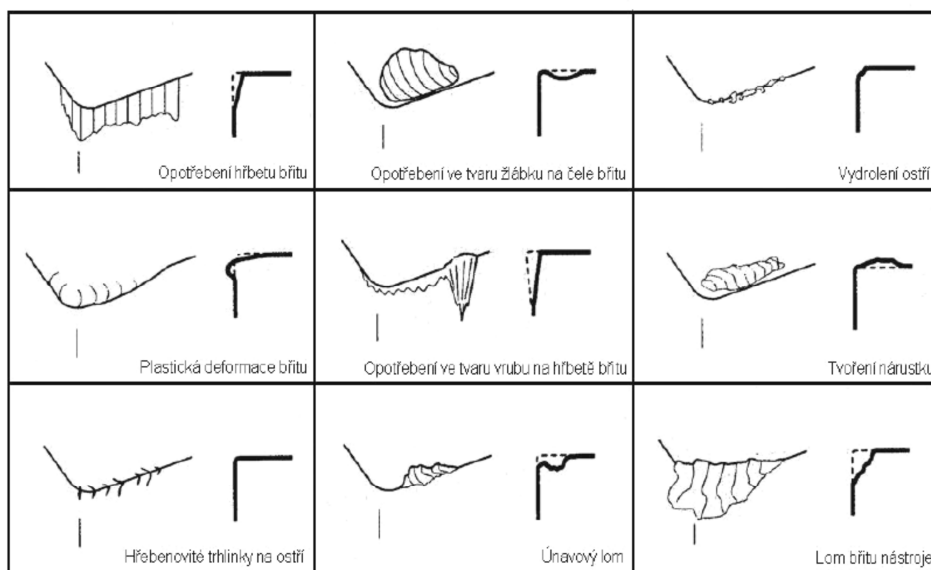
Kocman (2011) definuje vrtání jako metodu pro zhotovování nebo zvětšování již předvrtaných děr. Hlavní pohyb vykonává nástroj. Pohyb je rotační, posuv nástroje je ve směru osy vrtáku, která je ve směru kolmém k obráběné ploše.

Pro vrtací operace materiálů na bázi dřeva se rozlišují vrtáky pro vrtání v podélném směru a vrtáky pro vrtání v příčném směru dřevních vláken. Nástroje pro příčné vrtání jsou kromě hlavních břitů (většinou kolmo k ose otáčení nástroje) opatřeny také břity přeřezávacími, které slouží k redukci vytrhávání nebo rozhrnování vláken materiálu. Oproti tomu hlavní břity vrtáků pro podélné vrtání svírají s osou otáčení ostrý úhel. Nejčastějším typem vrtáků pro materiály na bázi dřeva jsou vrtáky šroubovitě, které se od nástrojů používaných na kovové součásti liší menším úhlem stoupání šroubovice - dřevo: 22-30°, hliník: 45°. (Prokeš, 1978)

5 OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ

Obráběcí proces je charakterizovaný vznikem tepla, které vzniká na čele a hřbetu nástroje. Materiál břítu je tak značně tepelně namáhán, čím se může vytvořit dynamický faktor ve chvíli, kdy břit z materiálu vystupuje a opět do něj vniká. Při obrábění kovů se při utváření třísky vytváří čistý kovový povrch, zejména díky vysokému tlaku a teplotě. Tento povrch má pak tendence k chemickým a difuzním reakcím mezi materiálem břítu a obráběným materiálem, protože většina obráběných materiálů obsahuje částice se stejnou (nebo podobnou) tvrdostí jako materiál břítu. Dochází tedy k abrazi. (Kocman, 2011; Čep a Petru, 2011)

Opotřebování je tedy obecně složité zatěžování břítu, které vzniká kombinací tepelných, chemických, mechanických a abrazivních faktorů. (Píška a kol, 2003; Vasilko a kol, 1991) Mimo opotřebení formou abraze, difuze a oxidace, dochází při obrábění materiálů s nízkou tepelnou vodivostí k opotřebení provázené plastickou deformací břítu. Je důležité si uvědomit, že v důsledku působení fyzikálních a chemických vlivů na nástroj při obrábění, dochází ke změnám tvaru nástroje i kvality jeho pracovních ploch. Postupně se mění geometrie břítu, poloměr ostří nástroje a drsnost pracovních ploch se zhoršuje. (Chladil, 1989) V závislosti na obráběném materiálu, materiálu břítu nástroje a technologických podmínkách řezného procesu se na břítu projevuje opotřebení. Základní formy opotřebení nástroje jsou zobrazeny na obr. 26.

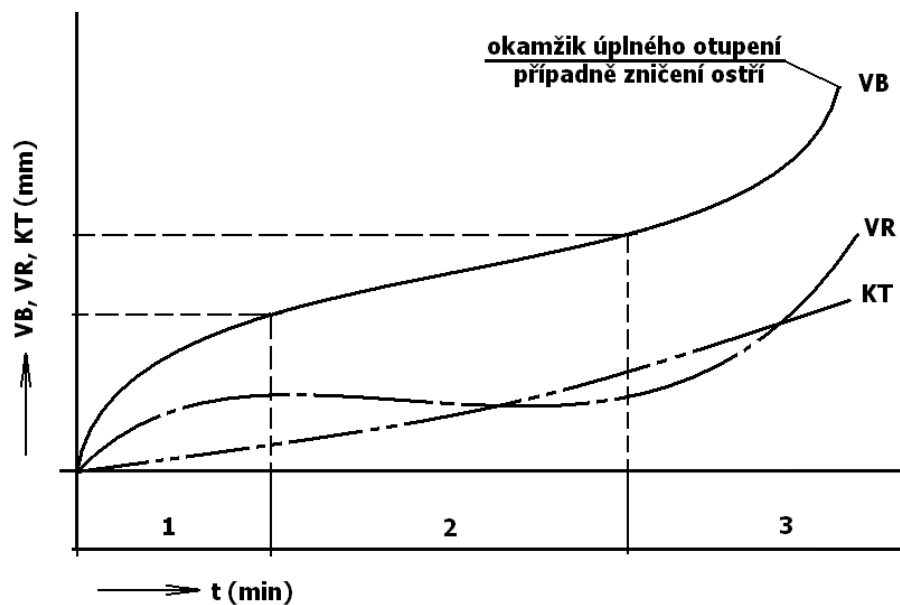


Obr. 26 Základní formy opotřebení břítu nástroje²⁷

²⁷ ČEP, R., PETRŮ, J. Experimentální metody v obrábění [online] citováno 13. července 2014. Dostupné na World Wide Web: <http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_komplet_finish.pdf>

Znalost mechanismů a typů opotřebení vede k optimálnímu způsobu obrábění z hlediska nákladů. Jestliže je dosaženo vyváženého opotřebení pomocí správné volby řezného materiálu, geometrie břitu, technologických podmínek obrábění i materiálu obrobku, potom je možné zajistit optimální trvanlivost nástroje. (Čep, 2005)

Průběh opotřebení je nejčastěji zobrazován jako závislost opotřebení na čase řezného procesu, tedy $VB = f(T)$. Je znázorňován pomocí křivek opotřebení, které jsou charakterizovány třemi oblastmi.



Obr. 27 Průběh opotřebení VB, VR a KT²⁸

Křivky opotřebení ukazují vztah mezi mírou opotřebení a časem obrábění nebo celkovou délkou řezných drah. V grafu na obr. 27 jsou znázorněny tři oblasti. Oblast 1 je oblast počátečního opotřebení. Relativně vysoká míra opotřebení je způsobena zrychleným opotřebením nástroje, které souvisí se záběhem nástroje a poškozením povrchových vrstev nástroje během výrobního procesu nebo ostření. Oblast 2 je oblastí lineárního opotřebení, která znázorňuje běžnou provozní oblast nástroje. Opotřebení je konstantní. Oblast 3 je oblast nadměrného opotřebení. Zrychlené opotřebení je obvykle spojováno s vysokými řeznými silami, teplotou, vibracemi nástroje a poklesem tvrdosti řezného materiálu. Běžně by nástroj v této oblasti neměl být používán. (Davim, 2008)

²⁸ ČEP, R., PETRŮ, J. Experimentální metody v obrábění [online] citováno 13. července 2014. Dostupné na World Wide Web: <http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_komplet_finish.pdf>

6 TVANLIVOST BŘITU

Trvanlivost nástroje je doba, po kterou je břit v provozuschopném stavu v procesu obrábění. Je to doba, po kterou nástroj pracuje od naostření (nasazení do řezného procesu) po jeho otupení (ukončení provozuschopného stavu). Je to tedy doba, po kterou nástroj efektivně plní požadované funkce. Jedná se o základní charakteristiku řezného procesu. V závislosti na metodě obrábění je možné trvanlivost nástroje posuzovat i hlediska veličin úměrných výrobnosti, např. dle obrobené plochy, délky pohybu nástroje, objemu odebraného materiálu nebo podle počtu obrobených součástí. Následující text je však zaměřen na vyjádření trvanlivosti jako doby práce nástroje $T [min]$ z důvodu jejího vyjádření řeznými parametry (v_c, f_o, a_p, n). V technologické praxi se za kritérium ukončení provozuschopného stavu nástroje považuje opotřebení břitu nástroje, avšak mohou být diagnostikovány i další parametry jako drsnost obrobené plochy nebo změna rozměru obrobené plochy apod. (Chladil, 1989; Kocman, 2011)

Jestliže dojde k opotřebení břitu, pak je třeba jej nahradit novým břitem nebo jeho přeastřením, v případě vyměnitelných břitových destiček lze destičku otočit. Součet trvanlivostí za dobu používání do úplného vyřazení je charakterizován tzv. životností nástroje, která je dána průměrnou trvanlivostí ostří nástroje a počtem možných naostření břitů. (Kocman, 2011)

Velikost opotřebení břitu slouží ke stanovení trvanlivosti nástroje pro jednotlivé případy obrábění. Kritické opotřebení nástroje definuje tzv. kritérium otupení. Jedná se o přípustnou míru opotřebení, která není přesně stanovena. Závisí na několika faktorech – způsobu obrábění, druhu práce, druhu obráběného a řezného materiálu atd.

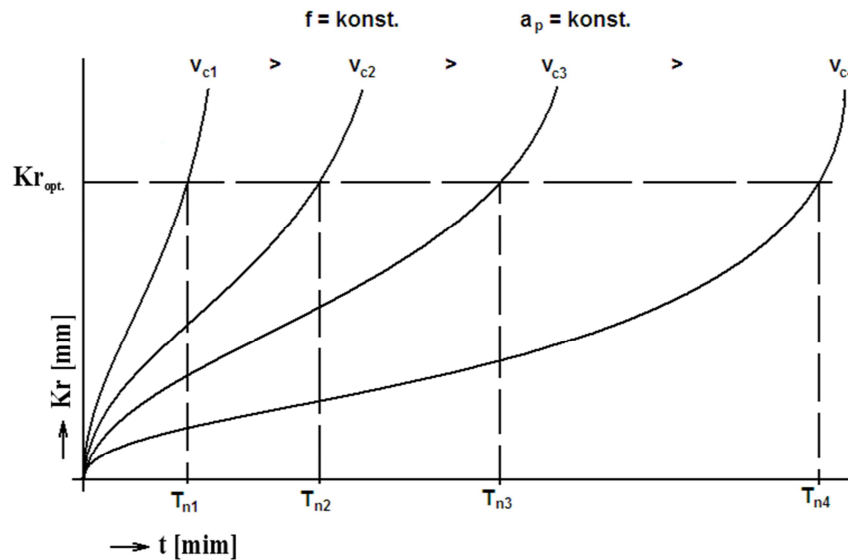
Trvanlivost břitu je závislá na řezných podmínkách, geometrii a materiálu břitu, materiálu obrobku, druhu namáhání nástroje a způsobu obrábění.

6.1 Závislost trvanlivosti nástroje na řezné rychlosti

Trvanlivost břitu je nejvíce ovlivňována řeznou rychlostí v_c . Experimentální stanovení závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti, tj. $T = f(v_c)$ se provádí při použití několika řezných rychlostí. Je nutné zajistit, aby ostatní pracovní podmínky byly konstantní. Průběh opotřebení na hřbetě nástroje je znázorněn pomocí křivek opotřebení pro jednotlivé řezné rychlosti v diagramu $VB = f(T)$, resp. $KR = f(T)$ pro radiální opotřebení. Poté je stanoveno kritérium opotřebení KR_{opt} . V grafu jsou v místě

průsečíku křivek opotřebení se zvolenou mírou otupení vyneseny přímky protínající osu x , které určují jednotlivé trvanlivosti odpovídající řezným rychlostem. V grafu (obr. 28) jsou vykresleny křivky pro čtyři různé rychlosti – v_1, v_2, v_3 a v_4 ., přičemž platí (Kocman, 2011):

$$v_{c1} < v_{c2} < v_{c3} < v_{c4} ; T_1 > T_2 > T_3 > T_4 \quad (6.1)$$



Obr. 28 Průběh závislosti $KR = f(T)$ ²⁹

Získané hodnoty $T_x - T_y$, resp. v uvedeném případě $T_1 - T_4$, se pak zaznamenají do diagramu $T = f(v_c)$ vyjadřující závislost trvanlivosti nástroje na řezné rychlosti, která je charakterizována Taylorovým vztahem ve tvaru (Kocman, 2011):

$$T = C_T \cdot v_c^{-m} \quad [min] \quad (6.2)$$

příp.
$$v_c = C_V \cdot T^{\frac{1}{m}} \quad [m \cdot min^{-1}] \quad (6.3)$$

$$C_V = C_T^{\frac{1}{m}} \quad (6.4)$$

kde T – trvanlivost nástroje [min]

v_c – řezná rychlost [$m \cdot min^{-1}$]

m – exponent [-]

C_T – konstanta [-]

C_V – konstanta [-]

²⁹ ČEP, R., PETRŮ, J. Experimentální metody v obrábění [online] citováno 13. července 2014. Dostupné na World Wide Web: <http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_komplet_finish.pdf>

Graf zobrazený v lineárních souřadnicích je ve tvaru exponenciální křivky a po převedení do logaritmických souřadnic má tvar přímky. Rovnice přímky je dána směrnici přímky a :

$$y = a \cdot x + b \quad (6.5)$$

resp.
$$\log T = -m \cdot \log v_c + \log C_T \quad (6.6)$$

Pro výpočet směrnice přímky se používá statistická metoda lineární regrese, která představuje aproximaci daných hodnot přímkou pomocí metody nejmenších čtverců (Chladil, 1989), kdy výpočet jednotlivých parametrů a (tj. exponent m) a b (tj., konstanta C_T) je dán následující vztahy:

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (6.7)$$

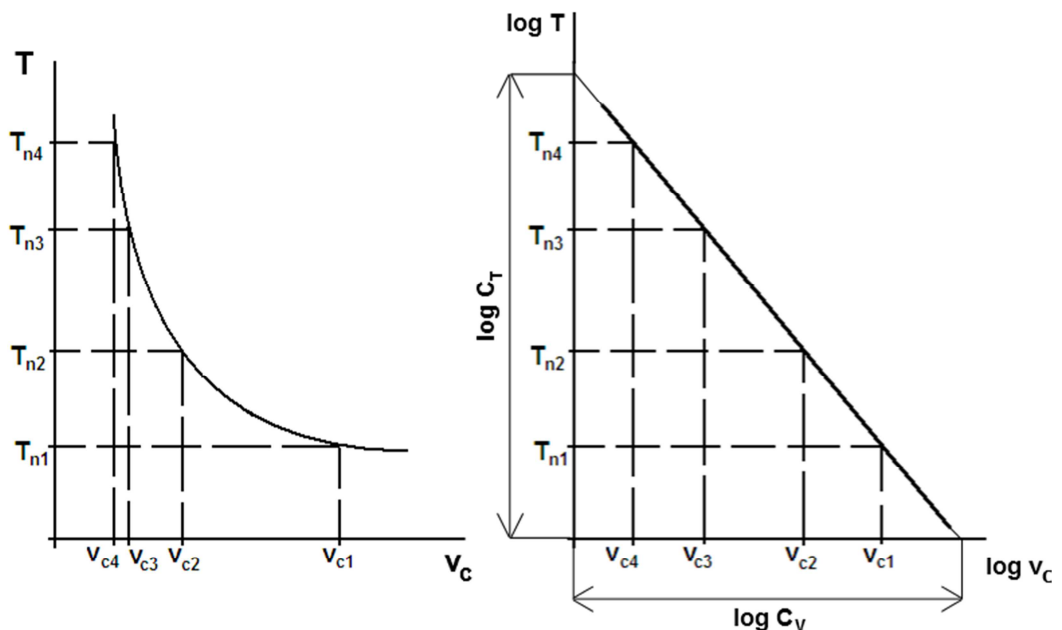
kde $x = \log v_c$

$y = \log T$

$a = \text{exponent } m$

$b = \text{konstanta } C_T$

$n = \text{počet naměřených hodnot}$



Obr. 29 Průběh závislosti $T = f(v_c)$ ³⁰

³⁰ ČEP, R., PETRŮ, J. Experimentální metody v obrábění [online] citováno 13. července 2014. Dostupné na World Wide Web: <http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_komplet_finish.pdf>

Hodnoty konstant C_T a C_V odpovídají úsekům na ose x a y , resp. $\log v_c$ a $\log T$ – viz obr. 24. Jejich velikost určuje polohu křivky závislosti $T = f(v_c)$, přičemž platí, že se vzrůstající hodnotou těchto konstant, roste i řezná rychlost. (Čep, 2007) Rozsahy konstant C_T a C_V :

$$C_T - 10^3 - 10^6$$

$$C_V - 10^1 - 10^3$$

Hodnota exponentu m odpovídá směrnici přímky a a odpovídá úhlu $tg \alpha$.

$$m = -tg \alpha \quad (6.8)$$

Hodnotu trvanlivosti nástroje je možné vypočítat ze závislosti $T = f(v_c)$ v případě, že je použit stejný rozsah pracovních podmínek, stejný řezný nástroj a stejný způsob obrábění. (Chladil, 1989) Pak platí:

$$v_c^m \cdot T = konst. \quad (6.9)$$

$$v_{c1}^m \cdot T_1 = v_{c2}^m \cdot T_2 \quad (6.10)$$

$$m \cdot \log v_{c1} + \log T_1 = m \cdot \log v_{c2} + \log T_2 \quad (6.11)$$

$$m = \frac{\log T_2 - \log T_1}{\log v_{c1} - \log v_{c2}} \quad (6.12)$$

Taylorův vztah, tj. rovnice (6.2), je jedním z nejdůležitějších vztahů v teorii obrábění. Vyjadřuje vliv určitých činitelů na efektivnost obrábění. Trvanlivost bříty T je závislá na nástrojovém materiálu, obráběném materiálu a řezných podmínkách. Velikost úhlu α (exponentu m) graficky znázorňuje průběh závislosti $T = f(v_c)$ a charakterizuje vlastnosti řezného nástroje. Určuje vliv změny řezné rychlosti na změnu trvanlivosti nástroje. Nabývá hodnot 1,2 – 12. Nízké hodnoty exponentu m vyjadřují nízkou citlivost na změnu řezné rychlosti. (Chladil, 1989)

Rozsahy exponentu m pro jednotlivé nástrojové materiály:

$m = 1,5 - 2,5$	řezná keramika
$m = 2,5 - 5$	slinuté karbidy
$m = 5 - 8$	rychlořezné oceli
$m = 8 - 10$	nástrojové oceli

Při dodržení konstantních pracovních podmínek, je trvanlivost závislá také na posuvu f_z a šířce záběru ostří a_p . Tato závislost je určována experimentálně, kdy je v procesu obrábění použita zvolená řada posuvů f_z a řada šířek záběru ostří a_p ve vztahu k řezné rychlosti. Výpočet závislosti trvanlivosti břitu na šířce záběru ostří a posuvu je dán komplexním Taylorovým vztahem ve tvaru (Kocman, 2011):

$$v_c = f(a_p, f, T) = C_{VT} \cdot T^{-\frac{1}{m}} \cdot a_p^{-x_v} \cdot f^{-y_v} \quad (6.13)$$

7 OBROBITELNOST

Čep (2011) uvádí, že obrobiteľnosť, resp. řezivost je souhrn fyzikálních a chemických vlastností materiálů na průběh a výsledky procesu řezání. Je to jedna z nejdůležitějších vlastností materiálu, která charakterizuje míru schopnosti daného materiálu být zpracován některou metodou obrábění. Je určujícím faktorem pro výběr řezných podmínek a pro funkci nástroje.

Kocman (2011) uvádí, že pod pojmem obrobiteľnosť je označena technologická vlastnost materiálu, která určuje jeho vhodnost k obrábění. Je závislá na fyzikálních a mechanických vlastnostech materiálu, na způsobu výroby, jeho tepelném zpracování a chemickém složení a jeho struktuře. Vyjmenované vlastnosti pak ovlivňují ekonomické, kvalitativní i kvantitativní výsledky obrábění. Obrobiteľnosť je také závislá na řezných podmínkách a způsobu obrábění, proto je úzce spjata s pojmem řezivost materiálu, která zahrnuje fyzikální vlastnosti břítu nástroje.

Chladil (1989) uvádí, že obrobiteľnosť zahrnuje souhrn vlastností materiálu, které určují jeho vhodnost k obrábění a je charakterizována stupněm obrobiteľnosti. Stupeň obrobiteľnosti určuje poměr nákladů na obrobění součásti ze zkoušeného (testovaného) materiálu a referenčního materiálu, přičemž musí být dodrženy stejné technologické podmínky obrábění (nástroj, přesnost, výrobní zařízení apod.). Při srovnávání materiálů je pak materiál s lepší obrobiteľností charakterizován kratším časem obrábění, menším opotřebením nástroje a nižší spotřebou energie výrobního zařízení. Řezivost je dána schopností nástroje produktivně obrábět. Jedná se o vlastnost materiálu nástroje, která je závislá na vlastnostech materiálu, řezných podmínkách a dalších faktorech. Řezivost je posuzována stejným způsobem jako obrobiteľnosť, kdy je porovnáván zkoušený materiál s referenčním při stejných technologických podmínkách. Obrobiteľnosť i řezivost je určena trvanlivostí břítu.

Obrobiteľnosť je posuzována z několika hledisek:

- vlivu obráběného materiálu na intenzitu otěru nástroje,
- vlivu na proces utváření třísky,
- kvality nového povrchu,
- energetické bilance řezného procesu apod.

Obecně je obrobiteľnosť a ŕezivosť dĕlena na absolútnej (komplexnej) a relatívnej (pomĕrnou).

Absolútnej obrobiteľnosti, resp. ŕezivosti, vyžaduje urĕení komplexnĕch vztahů. Zahrnuje vliv obrábĕného materiálu na ŕezné síly, trvanlivost, tvar třísky, drsnost povrchu apod. Je to velice složitý proces urĕení všech vztahů k parametrům ŕezání. Vzhledem k tomu, že obrobiteľnosť závisí na mnoho veličinách, je vyjádĕení absolútnej obrobiteľnosti velice komplikované. (Āep, 2007)

Při hodnocení relativní obrobiteľnosti, resp. ŕezivosti, jsou porovnávané vlastnosti mezi zkoušeným referenĕním materiálem při dodržení shodné geometrie nástroje, jejichž vzájemná závislost je vyjádĕena indexem (souĕinitelem) kinetické obrobiteľnosti K_V . Obecně je tedy relativní obrobiteľnosť, resp. ŕezivosť, vyjádĕena bezrozmĕrnými čísly, které udávají pomĕr urĕité veličiny odpovídající danému obrábĕnému materiálu, resp. nástroji, a veličiny vztahující se k referenĕnímu materiálu obrobku, resp. nástroji. Hodnocení relativní obrobiteľnosti je používáno v praxi zejména kvůli menší časové a materiálové náročnosti experimentů. (Kocman, 2011; Āep, 2011)

7.1 Souĕinitel obrobiteľnosti

Urĕování souĕinitele kinetické obrobiteľnosti, tj. při urĕování obrobiteľnosti z hlediska ŕezné rychlosti, vychází z intenzity opotĕbování bĕritu. Je zkoumána trvanlivost bĕritu nástroje při dané ŕezné rychlosti, kdy výsledné hodnoty jsou ŕezné rychlosti při odpovídající trvanlivosti nástroje. (Chladil, 1989)

Materiály jsou následně zařazeny do tříd obrobiteľnosti na základĕ indexu (souĕinitele) kinetické obrobiteľnosti K_V , který urĕuje pomĕr ŕezných rychlostí při zvolené trvanlivosti bĕritu mezi zkoušeným $v_{T\text{ zk.mat.}}$ a referenĕním $v_{T\text{ ref.mat.}}$ materiálem. (Āep, 2011)

$$K_V = \frac{v_{c(T)}^{\text{zk.mat.}}}{v_{c(T)}^{\text{ref.mat.}}} \quad (7.1)$$

kde $v_{T\text{ zk.mat.}}$ – ŕezná rychlost zkoušeného materiálu při trvanlivosti T [$m \cdot \text{min}^{-1}$]
 $v_{T\text{ ref.mat.}}$ – ŕezná rychlost referenĕního materiálu při trvanlivosti T [$m \cdot \text{min}^{-1}$]
 T – trvanlivost nástroje [min]

Při použití odvození závislosti T - v_c , je K_V vyjádĕen následovně (Kocman, 2011):

$$K_V = \frac{C_{V \text{ zk.mat.}}}{C_{V \text{ ref.mat.}}} \cdot T^{\left(\frac{1}{m_{\text{ref.mat.}}} - \frac{1}{m_{\text{zk.mat.}}}\right)} \quad (7.2)$$

kde $C_{V \text{ zk.mat.}}$ – konstanta C_V zkoušeného materiálu [-]
 $C_{V \text{ ref.mat.}}$ – konstanta C_V referenčního materiálu [-]
 T – trvanlivost nástroje [min]
 m – exponent [-]

7.2 Činitelé ovlivňující obrobiteľnosť

Při určování obrobiteľnosti materiálu vstupují do hodnocení 2 základní činitelé – vliv řezného materiálu a vliv obráběného materiálu. (Chladil, 1989)

7.2.1 Vliv řezného materiálu

Obrobiteľnosť nejvýrazněji ovlivňuje odolnost řezného materiálu proti opotřebení. Čím jakostnější materiál je použit, tím větší je rozsah řezných rychlostí při určité trvanlivosti a tím lepší je výsledná obrobiteľnosť. Je však třeba dbát i na chemické složení řezného a obráběného materiálu.

7.2.2 Vliv obráběného materiálu

Obráběný materiál je posuzován na základě znalostí o jeho vlastnostech, kdy se jedná zejména o fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti, strukturu materiálu nebo způsob výroby. U materiálů na bázi dřeva mají pak největší vliv vlastnosti fyzikálně-mechanické, jako objemová hmotnost, pevnost, tvrdost a tepelná vodivost, dále pak struktura materiálu.

7.3 Skupiny a třídy obrobiteľnosti

Jednotlivé materiály jsou rozděleny do devíti základních skupin obrobiteľnosti podle CNN 10-0-1-I/II (Celostátní normy a normativy). Skupiny materiálů jsou označeny písmeny male abecedy. V každé skupině materiálů je vybrán jeden referenční materiál, který slouží jako výchozí hodnota pro stanovování relativní obrobiteľnosti ostatních materiálů dané skupiny. (Kocman, 2011)

- a – litiny,
- b – oceli,

- c – těžké neželezné kovy (měď a slitiny mědi),
- d – lehké neželezné kovy (hliník a slitiny hliníku),
- e – plastické hmoty,
- f – přírodní nerostné hmoty,
- g – vrstvené hmoty,
- v – tvrzené litiny pro výrobu válců.

V každé skupině jsou pak materiály rozděleny do 20 tříd obrobiteľnosti, které jsou označeny číslicemi 1 – 20 před písmenem skupiny (např. 14b). (Kocman, 2011) Nejnižší číslo (1) zařazuje materiál jako nejhůře obrobiteľný, nejvyšší číslo (20) jako nejlépe obrobiteľný. Mezi nejpoužívanější třídy obrobiteľnosti patří třídy 6 – 16, které zahrnují běžně obrobiteľné materiály.

Do jednotlivých tříd se materiály zařazují na základě střední hodnoty součinitele obrobiteľnosti, kdy rozdíl sousedních tříd je určen geometrickou řadou R10, tj. kvocientem $q = \sqrt{10} \doteq 1,26$. Na základě vypočítaného indexu kinetické obrobiteľnosti se pak provádí zařazení do třídy obrobiteľnosti podle následující tabulky uvádějící rozsahy indexů K_v , kdy referenční vzorek má vždy hodnotu $K_v = 1$. Obecně platí, že materiály v nižších třídách obrobiteľnosti než referenční materiál jsou hůře obrobiteľné, materiály ve vyšších třídách jsou lépe obrobiteľné. (Čep, 2011)

Tab. 1 Hodnoty indexu obrobiteľnosti pro zatřídění materiálů (ref. vzorek-třída 11)³¹

Střední hodnota K_v	Rozsah K_v	Třída obrobiteľnosti	Kvocient
0,32	0,29 – 0,35	6	$1,26^{-5}$
0,40	0,36 – 0,44	7	$1,26^{-4}$
0,50	0,45 – 0,56	8	$1,26^{-3}$
0,63	0,57 - 0,71	9	$1,26^{-2}$
0,80	0,72 – 0,89	10	$1,26^{-1}$
1,00	0,90 – 1,12	11	$1,26^0$
1,26	1,13 – 1,41	12	$1,26^1$
1,59	1,42 – 1,78	13	$1,26^2$
2,00	1,79 – 2,24	14	$1,26^3$
2,50	2,25 – 2,82	15	$1,26^4$
3,15	2,83 – 3,55	16	$1,26^5$

³¹ KOCMAN, K., 2011. Technologické procesy obrábění. Vyd. 1. Brno, Akademické nakladatelství CERM, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.

8 OPTIMALIZACE PROCESU OBRÁBĚNÍ

Optimalizace procesu obrábění slouží ke stanovení určitých podmínek obrábění pro dosažení kvalitativního, kvantitativního a ekonomického hlediska výroby.

Optimalizace těchto podmínek je však velmi obtížná vzhledem k působení a vlivu celé řady činitelů. (Chladil, 1989) Optimalizační metody se dělí následovně:

- a) optimalizace obráběcích metod
- b) optimalizace řezných podmínek
- c) optimalizace řezného nástroje a jeho trvanlivosti
- d) optimalizace obráběného materiálu

Následující text je zaměřen na optimalizaci řezných podmínek, která je charakterizovaná požadovanou trvanlivostí nástroje vycházející ze zvoleného kritéria optimálnosti. Trvanlivost nástroje je definována časem, po který je nástroj v provozuschopném stavu (doba od naostření po dosažení zvolené míry opotřebení). Stanovení optimální trvanlivosti nástroje tedy vychází ze zvoleného kritéria opotřebení břitů a je závislá na řezných podmínkách. (Kocman, 2011)

Řezné podmínky jsou stanovovány ze dvou základních hledisek. V prvním případě jsou řezné podmínky voleny z hlediska minimálních výrobních nákladů. Jedná se o ekonomické hledisko, kdy je sledováno minimum celkových nákladů na výrobu daného počtu kusů součástí. V druhém případě jsou řezné podmínky voleny tak, aby byla dosažena maximální produktivita práce bez ohledu na výrobní náklady. V tomto případě se jedná o technologické hledisko a je sledován minimální čas na výrobu daného počtu kusů součástí n (dále pouze n). (Kocman, 2011; Shaw 2005)

Hledané optimální hodnoty procesu obrábění jsou lokální extrémy (maxima, resp. minima) sledovaných funkcí. (Chladil, 1989) Těmito funkcemi jsou:

- a) celkové výrobní náklady v případě hodnocení z hlediska minimálních výrobních nákladů. Jedná se o součet nákladů na strojní práci, vedlejší práci a náklady na nástroje při výrobě součástí.
- b) minimální výrobní čas při výrobě součásti v případě hodnocení z hlediska maximální produktivity práce. Jedná se o strojní čas, vedlejší čas a nástrojový čas definovaný časem výměny nástroje a počtem výměn nástroje při výrobě daného počtu součástí.

8.1 Hodnocení procesu obrábění z hlediska minimálních nákladů

Hodnocení z hlediska minimálních nákladů je základem hospodárného obrábění. Tento způsob optimalizace procesu obrábění je častější, zejména z ekonomických důvodů. Jsou sledovány celkové náklady na výrobu daného počtu kusů součástí. (Mádl a Kvasnička, 1999; Chladil, 1989; Shaw, 2005)

Celkové náklady na výrobu n součástí:

$$N_C = N_S + N_V + N_N \quad (8.1)$$

kde N_S – náklady na strojní práci [Kč]

N_V – náklady na vedlejší práci [Kč]

N_N – náklady na nástroje [Kč]

Náklady na strojní práci jsou definovány strojním časem a náklady na jednu hodinu práce na pracovišti.

$$N_S = t_S \cdot \frac{D_S}{60} \quad (8.2)$$

$$D_S = M_S \left(1 + \frac{R_S}{100} \right) \quad (8.3)$$

kde t_S – strojní čas (čas, po který je vyrobeno n součástí) [min]

D_S – náklady na 1 hod práce na pracovišti (práce stroje, dělníka, režijní náklady) [Kč]

M_S – mzda dělníka [Kč/hod]

R_S – režijní náklady (údržba, energie, odpisy) [%]

Strojní čas je určený dráhou nástroje při obrábění a řeznou rychlostí, která je definována závislostí $T = f(v_c)$. Po dosažení vyjádření řezné rychlosti v_c z Taylorova vztahu vznikne následující výraz:

$$t_s = \frac{L}{v_c} \quad (8.4)$$

$$v_c = \frac{C_v}{T^m} \quad (8.5)$$

$$t_s = \frac{L}{\frac{C_v}{T^{\frac{1}{m}}}} = \frac{L}{C_v} \cdot T^{\frac{1}{m}} \quad (8.6)$$

kde t_s – strojní čas (čas, po který je vyrobeno n součástí) [min]

L – délka dráhy pohybu břitu nástroje při záběru [mm]

v_c – řezná rychlost [$m \cdot \text{min}^{-1}$]

C_v – konstanta[-]

T – trvanlivost nástroje z Taylorova vztahu [min]

m – exponent [-]

Výsledná rovnice pro náklady na strojní práci:

$$N_s = \frac{L}{C_v} \cdot T^{\frac{1}{m}} \cdot \frac{M_s}{60} \left(1 + \frac{R_s}{100} \right) \quad (8.7)$$

Po zjednodušení:

$$N_s = \frac{L}{C_v} \cdot T^{\frac{1}{m}} \cdot \frac{D_s}{60} \quad (8.8)$$

Náklady na vedlejší práci jsou určeny vedlejším časem a náklady na jednu hodinu práce na pracovišti.

$$N_v = t_v \cdot \frac{D_s}{60} \quad (8.9)$$

kde t_v – vedlejší čas (doba na upínání a měření obrobku, přestávky) [min]

D_s – náklady na 1 hod práce na pracovišti (práce stroje, dělníka, režijní náklady) [Kč]

Náklady na nástroje zahrnují náklady na jeden ostrý nástroj a počet výměn nástroje při výrobě n součástí. Hodnota $z_{\text{vým}}$ je vyjádřena podílem strojního času a trvanlivosti nástroje.

$$N_N = N_{1N} \cdot z_{\text{vým}} \quad (8.10)$$

$$z_{\text{vým}} = \frac{t_s}{T} \quad (8.11)$$

kde N_{1N} – náklady na 1 ostrý nástroj [Kč]

$z_{\text{vým}}$ – počet výměn nástroje při výrobě n součástí [-]

Po dosazení vyjádření strojního času podle rovnice (8.6) vznikne rovnice:

$$z_{\text{vým}} = \frac{t_S}{T} = \frac{L}{C_v} \cdot T^{\frac{1}{m}} \cdot \frac{1}{T} = \frac{L}{C_v} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \quad (8.12)$$

Výpočet nákladů na jeden ostrý nástroj zahrnuje cenu pořízení nástroje, zbytkovou hodnotu nástroje, počet možných použití nástroje a náklady na břitové destičky na jeden ostrý nástroj včetně jejich výměny. Je vyjádřen následovně:

$$N_{1N} = \frac{C_N - C_O}{x+1} + N_{VBD} \quad (8.13)$$

$$N_{VBD} = \frac{p \cdot C_{VBD}}{b} \quad (8.14)$$

kde N_{1N} – náklady na 1 ostrý nástroj [Kč]

C_N – pořizovací cena nástroje [Kč]

C_O – zbytková hodnota nástroje [Kč]

x – počet možných použití nástroje [-]

N_{VBD} – náklady na břitové destičky na 1 ostrý nástroj zahrnující i výměnu [Kč]

C_{VBD} – cena 1 vyměnitelné břitové destičky [Kč]

p – počet břitových destiček na 1 nástroji [-]

b – počet ostří na 1 břitové destičce [-]

Kompletní dosazení všech proměnných do rovnice nákladů na nástroje:

$$N_N = \left(\frac{C_N - C_O}{x+1} + N_{VBD} \right) \cdot \frac{t_S}{T} \quad (8.15)$$

$$N_N = \left(\frac{C_N - C_O}{x+1} + \frac{p \cdot C_{VBD}}{b} \right) \cdot \frac{L}{C_v} \cdot T^{\frac{1}{m}} \cdot \frac{1}{T} \quad (8.16)$$

$$N_N = \left(\frac{C_N - C_O}{x+1} + \frac{p \cdot C_{VBD}}{b} \right) \cdot \frac{L}{C_v} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \quad (8.17)$$

Po zjednodušení je výsledná rovnice vyjadřující náklady na nástroje následující:

$$N_N = N_{1N} \cdot \frac{L}{C_v} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \quad (8.18)$$

Po dosazení všech hodnot do vztahu (8.1) odpovídají celkové náklady na výrobu n součástí následující rovnici:

$$N_c = \frac{L}{C_v} \cdot T^{\frac{1}{m}} \cdot \frac{D_s}{60} + t_v \cdot \frac{D_s}{60} + N_{IN} \cdot \frac{L}{C_v} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \quad (8.19)$$

Vzhledem k tomu, že hledané optimální hodnoty procesu obrábění jsou lokální extrémy (maxima, resp. minima) sledovaných funkcí, je nutné provést derivaci výsledné rovnice celkových nákladů; kde rovnice je derivována podle T , kdy $\frac{d}{dT}(N_c) = 0$. Výsledkem bude hodnota optimální trvanlivosti T_{opt} nástrojů pro minimální celkové náklady. ((Mádl a Kvasnička, 1999; Chladil, 1989; Shaw, 2005)

$$\frac{d}{dT}(N_c) = 0 \quad (8.20)$$

$$\frac{L}{C_v} \cdot \frac{1}{m} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \cdot \frac{D_s}{60} + 0 + N_{IN} \cdot \frac{L}{C_v} \left(\frac{1}{m}-1\right) \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-2\right)} = 0 \quad (8.21)$$

$$1 \cdot \frac{1}{m} \cdot T \cdot \frac{D_s}{60} + N_{IN} \cdot \left(\frac{1}{m}-1\right) = 0 \quad (8.22)$$

$$\frac{D_s}{60} \cdot T = -N_{IN} \left(\frac{1}{m}-1\right) \cdot m \quad (8.23)$$

$$\frac{D_s}{60} \cdot T = N_{IN} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \cdot m \quad (8.24)$$

$$T_{opt} = \frac{60 \cdot N_{IN} \cdot (m-1)}{D_s} \quad (8.25)$$

8.2 Hodnocení procesu obrábění z hlediska maximální výrobnosti

Hodnocení produktivity je možné sledovat i z hlediska maximální výrobnosti bez ohledu na náklady na výrobu. V tomto případě je sledován výrobní čas potřebný na výrobu daného počtu kusů součástí n . Je tedy nutné, aby celkový čas t_C , tzn součet času strojního t_S , vedlejšího času t_V a času na nástroje t_N , byl minimální. (Mádl a Kvasnička, 1999; Chladil, 1989; Shaw, 2005)

Celkový čas na výrobu \underline{n} součástí:

$$t_C = t_S + t_V + t_N \quad (8.26)$$

kde t_S – strojní čas [min]
 t_V – vedlejší čas [min]
 t_N – čas na nástroje [min]

Strojní čas je určený závislostí na řezné rychlosti v_c . Jeho odvození je vyjádřeno v kapitole 8.1 vztahy (8.4 a 8.5). Výsledná rovnice je tedy:

$$t_s = \frac{L}{C_v} \cdot T^{\frac{1}{m}} \quad (8.27)$$

kde t_S – strojní čas (čas, po který je vyrobeno \underline{n} součástí) [min]
 L – délka dráhy pohybu břitu nástroje při záběru [mm]
 C_v – konstanta [-]
 T – trvanlivost nástroje z Taylorova vztahu [min]
 m – exponent [-]

Nástrojový čas je definován časem potřebným pro výměnu nástroje a počtem výměn nástroje při výrobě \underline{n} součástí. Počet výměn nástroje je vyjádřen vztahem (8.12).

$$t_N = t_{\text{vým}} \cdot z_{\text{vým}} \quad (8.28)$$

$$t_N = t_{\text{vým}} \cdot \frac{L}{C_v} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \quad (8.29)$$

kde $t_{\text{vým}}$ – čas potřebný k výměně nástroje [min]

Rovnice celkového času na výrobu \underline{n} součástí:

$$t_C = \frac{L}{C_v} \cdot T^{\frac{1}{m}} + t_V + t_{\text{vým}} \cdot \frac{L}{C_v} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \quad (8.30)$$

Při hodnocení produktivity z hlediska maximální produktivity se postupuje stejným způsobem jako u hlediska minimálních nákladů. Hledaná optimální hodnota trvanlivosti je minimum sledované funkce. Výsledná rovnice maximální produktivity je

tedy derivována podle T , kdy $\frac{d}{dT}(t_c)=0$. Výsledkem bude hodnota optimální trvanlivosti T_{opt} nástrojů pro výrobu n součástí v minimálním čase. (Mádl a Kvasnička, 1999; Chladil, 1989; Shaw, 2005)

$$\frac{d}{dT}(t_c)=0 \quad (8.31)$$

$$\frac{L}{C_v} \cdot \frac{1}{m} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} + 0 + t_{vým} \cdot \frac{L}{C_v} \left(\frac{1}{m}-1\right) \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-2\right)} = 0 \quad (8.32)$$

$$\frac{1}{m} \cdot T + t_{vým} \cdot \left(\frac{1}{m}-1\right) = 0 \quad (8.33)$$

$$T = -t_{vým} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \cdot m \quad (8.34)$$

$$\boxed{T_{opt.} = t_{vým} (m - 1)} \quad (8.35)$$

9 METODIKA

Postup pro návrh metodiky stanovení optimálních řezných podmínek obrábění materiálů na bázi dřeva vycházel z měření obrobitelnosti těchto materiálů. Vzhledem k tomu, že se jedná o zcela nový přístup k procesu obrábění, bylo nutné provést komplexní experimentální měření založené na následujícím postupu:

- stanovení cílů disertační práce
- výběr obráběcího centra
- výběr nástroje
- stanovení způsobu obrábění a volba řezných podmínek
- výběr materiálů
- měřicí zařízení
- provedení experimentů pro stanovení obrobitelnosti materiálů
- zpracování a vyhodnocení výsledků
- optimalizace řezných procesů

Stroj

Sledované materiály byly obráběny na univerzitním tříosém obráběcím centru - *SCM Tech 99*.

Nástroj

Stopková pravotočivá fréza se dvěma zuby o průměru $D = 19 \text{ mm}$ s označením *FRSTHW 19x30x12z2 žil*. Do frézy byly upnuty vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu s označením *HW 29,5x12x1,5 4s T04F*.

Pracovní podmínky

V první řadě bylo nutné stanovit způsob obrábění a řezné podmínky. Typ obrábění byl zvolen na sousledné frézování. Byla stanovena minimální ($n = 4000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$) a maximální hodnota otáček ($n = 18000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$), byl stanoven konstantní posuv na zub ($f_z = 0,05 \text{ mm}$) a konstantní hodnota šířky záběru ostří ($a_p = 18 \text{ mm}$). Hodnoty řezných a posuvových rychlostí vychází ze vztahů mezi hodnotou posuvu na zub, otáčkami nástroje a průměrem frézy. Řezná rychlost je dána vztahem (4.4), posuvová

rychlost je dána vztahem (4.5). Pro měření radiálního opotřebení nástroje KR , které je definováno závislostí $KR = f(T)$, bylo nutné vypočítat čas podle vztahu:

$$T = \frac{L}{v_f} \quad [min] \quad (9.1)$$

kde T – čas [min]

L – délka obráběného dílce [mm]

v_f – posuvová rychlost [$mm \cdot min^{-1}$]

Materiál

Dále byli vybráni zástupci materiálů na bázi dřeva – dřevotřísková deska laminovaná (DTD-L), středně hustá dřevovláknitá deska (MDF) a překližovaná deska (PDP). Dále bylo nutné mezi vybranými materiály určit tzv. referenční vzorek, který pak sloužil jako výchozí reprezentant pro porovnávání dalších materiálů. Jednotlivé druhy materiálů na bázi dřeva byly testovány při různých technologických podmínkách ve vztahu k použitému nástroji.

Měřicí zařízení

Při měření opotřebení nástroje bylo měřeno jeho radiální opotřebení. K tomuto měření byl zapotřebí přístroj, který dokáže změřit hodnoty v tisícinách (μm). V prvních měřeních bylo zvoleno komparační měřidlo *Passamet Somet* s rozsahem $\langle -25; 25 \rangle$ μm . V dalším postupu řešení práce byl navržen měřicí přípravek s digitálním číselníkovým úchylkoměrem.

10 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Stěžejní část experimentální části je založena na projektu IGA (Interní grantové agentury) Lesnické a dřevařské fakulty Mendelovy univerzity v Brně. Jednalo se o projekt IGA 33/2012.

Charakteristika projektu:

Název projektu: Metodika stanovení obrobiteľnosti vybraných materiálů na bázi dřeva

Garant projektu: doc. Ing. Josef Chladil, CSc., Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav nábytku, designu a bydlení, akademický pracovník - docent, +420 545 134 516, chladil@mendelu.cz

Řešitel: Ing. Eva Šebelová, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav nábytku, designu a bydlení, +420 545 134 516, eva.sebelova@mendelu.cz

Anotace projektu: Práce byla zaměřena na stanovení obrobiteľnosti materiálů na bázi dřeva. V projektu byly zkoušeny 2 zástupci těchto materiálů – dřevotřísková deska laminovaná (DTD-L) a dřevovláknitá deska se střední hustotou (MDF). Experimentální měření bylo založeno na stanovení radiálního opotřebení břitů nástroje. Materiálům byla přiřazena skupina materiálů označená písmenem „w“ a na základě dosažených výsledků byly tyto materiály následně zařazeny do tříd obrobiteľnosti. DTD-L byla určena jako referenční vzorek s kvocientem $K_V = 1$.

Na projekt IGA 33/2012 navazuje další experiment, který byl proveden s překližovanou deskou. Měření bylo provedeno za stejných technologických podmínek, stejným nástrojem i na stejném obráběcím centru jako v projektu IGA 33/2012 (viz kap. 10.1.1 a 10.1.2). Pro měření opotřebení nástroje byl však navržen měřicí přípravek s digitálním číselníkovým úchylkoměrem.

Další experimenty byly pak provedeny ve spolupráci s UTB Zlín, VUT Brno a v neposlední řadě na základě meziústavní spolupráce v rámci Mendelovy univerzity v Brně.

10.1 Projekt IGA 33/2012

Následující text popisuje projekt IGA – použité strojní a měřicí zařízení, metodiku postupu řešení práce, materiál a metody měření, výsledky a vyhodnocení celého experimentu.

10.1.1 Strojní zařízení a nástroj

V experimentu bylo použito univerzitní tříosé CNC obráběcí centrum – „SCM Tech 99“. Technologické parametry stroje:

- max otáčky stroje: $n = 18\,000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- max. posuvová rychlost: $v_{fmax} = 5000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 30 Používaný CNC stroj

Do stroje byla následně upnuta stopková dvouzubá pravotočivá fréza o průměru 19 mm . Do frézy pak byly upnuty univerzální břitové destičky ze slinutého karbidu a zajištěny pomocí šroubu. Žiletky byly označeny písmenem s příslušným číslem/písmenem pro rozlišení použití při obrábění jednotlivých materiálů a pro jednoznačnost měření jednotlivých opotřebení. Číslo označovalo konkrétní břit, malé písmeno a/b rozlišovalo stranu nože. Žiletky označené U1a/b – U4a/b byly použity pro řezání materiálu DTD-L, M1a/b – M2a/b pro MDF a pro obrábění PDP P1a/b – P4a/b.

Označení: fréza *FRSTHW 19x30x12z2 žil.*

Katalogové číslo: *FRSTHWD 193*

Dodavatel: *Aparatea, s.r.o.*

Označení: *nůž HW 29,5x12x1,5 4s T04F*

Katalogové číslo: *HW2912TO41*

Dodavatel: *Aparatea, s.r.o.*



Obr. 31 Stopková fréza



Obr. 32 Použité břitové destičky

10.1.2 Pracovní podmínky

Typ frézování:	<i>sousledné</i>
Počet zubů:	$z = 2$
Posuv na zub:	$f_z = 0,05 \text{ mm}$
Hloubka záběru:	$H = 9,5 \text{ mm}$
Šířka záběru ostří:	$a_p = 18 \text{ mm}$
Použitá řada otáček:	$8000, 12000, 15000, 18000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
Odpovídající posuvové rychlosti:	$800, 1200, 1500, 1800 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Odpovídající řezné rychlosti:	$477, 716, 895, 1074 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Hodnoty posuvových a řezných rychlostí vychází ze vztahů mezi hodnotou posuvu na zub, otáčkami nástroje a průměrem frézy. Posuvová rychlost je dána vztahem (4.5), řezná rychlost je dána vztahem (4.4).

10.1.3 Měřicí zařízení

Pro měření opotřebení břitu nástroje byl použit přístroj *Passometr Somet*. Jedná se o komparační měřidlo, které měří odchylky od nastaveného rozměru. V první řadě bylo nutné přístroj zkalibrovat podle přiložené vzorové měřky. Použitý přístroj měl rozsah $\langle -25; 25 \rangle \mu\text{m}$ s jednou plochou pevnou, zafixovanou pomocí šroubu, a druhou plochou pohyblivou, spojenou s vestavěným číselníkovým úchylkoměrem. Tento měřicí přístroj byl zapůjčen z podniku ZKL Brno, a. s.



Obr. 33 Přístroj Passometr Somet, vlevo: se vzorovou měrkou, vpravo s měřeným břitem

10.1.4 Metodika

Pro návrh metodiky stanovení obrobiteľnosti materiálů na bázi dřeva byli vybráni dva zástupci materiálů – dřevotřísková deska laminovaná (DTD-L) a dřevovláknitá deska se střední hustotou (MDF). Pro určení jejich obrobiteľnosti byly zvolené materiály zařazeny do neobsazené skupiny označené např. písmenem „w“. Oba materiály byly zkoušeny na stejném obráběcím centru - *SCM Tech 99* (obr. 30) při stejných pracovních podmínkách (kap. 10.1.2).

V procesu obrábění jednotlivých materiálů bylo měřeno radiální opotřebení nástroje. K měření byl použit přístroj *Passometr Somet*, kterým byly měřeny odchylky od základního rozměru břitu.

V experimentu bylo měřeno i opotřebení hmotnostní pomocí laboratorních analytických vah *Scaltec SBC 41* (váživost: 410 g; dílek: 0,001g). Bohužel toto měření nevykazovalo prokazatelné výsledky, protože rozdíl v hmotnosti břitu v původním a opotřebovaném stavu byl zanedbatelný a toto měření bylo velmi těžce zaznamenatelné. Z toho důvodu byly použity výsledky pouze radiálního opotřebení nástroje.



Obr. 34 Měření opotřebení břitu na základě hmotnosti břitu

Materiály byly obráběny pravotočivou dvoubřitou frézou při otáčkách $n = 8000, 12000, 15000$ a $18000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ($\Rightarrow v_f = 800, 1200, 1500, 1800 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) s konstantním posuvem na zub $f_z = 0,05 \text{ mm}$ a hloubkou záběru $H = 9,5 \text{ mm}$. Z naměřených hodnot byly zpracovány tabulky hodnot (Tab. 3, 5, 7, 9, 12, 14) a z nich dále křivky opotřebení nástroje v závislosti na čase obrábění (obr. 35, 36, 37, 38, 40, 41).

Pro stanovení trvanlivosti břitu bylo nutné určit míru opotřebení, jako výchozí hodnotu, která byla stanovena na odchytku $10 \mu\text{m}$ od původní hodnoty rozměru břitu. Tato míra se zanesla do grafu křivek opotřebení a na osu x byly vyneseny trvanlivosti T_1, T_2, T_3, T_4 odpovídající jednotlivým řezným rychlostem (obr. 39 a 42), kdy platí vztah (6.1).

Dále byla stanovena závislost trvanlivosti břitu na míře opotřebení, v závislosti trvanlivost – řezná rychlost ($T - v_c$), která je charakterizována Taylorovým vztahem (6.2).

Jednotlivé trvanlivosti T_1, T_2, T_3, T_4 byly zaneseny do grafu $T = f(v_c)$ v logaritmických souřadnicích (Tab. 16 a 18). Následně byla použita aplikace statistické metody lineární regrese (6.7), kdy body T_1, T_2, T_3, T_4 byly proloženy přímkou se směrnicí a podle vztahu (6.5) a (6.6) - obr. 43 a 44. Z rovnice byl vypočítán exponent m , jehož velikost vyjadřuje vlastnosti řezného materiálu a způsob obrábění, a konstanta C_T (Tab. 17 a 19).

Trvanlivost břitu T je závislá na řezném nástroji, obráběném materiálu a řezných podmínkách. Velikost úhlu α (exponentu m) graficky znázorňuje průběh závislosti trvanlivost – řezná rychlost.

Pro zařazení materiálů do třídy obrobitelnosti bylo nutné určit referenční vzorek (etalon), který sloužil jako výchozí hodnota pro porovnávání s ostatními materiály.

V tomto případě byl zvolen materiál DTD-L jako nejrozšířenější materiál v dřevozpracujícím průmyslu. V grafu závislosti $\log T = f(\log v_c)$ s oběma materiály byla vynesena přímka definující zvolenou trvanlivost T a byly určeny odpovídající řezné rychlosti (obr. 45). Následně byl vypočítán index kinetické obrobiteľnosti K_V (Tab. 20) podle vztahu (7.1).

Z literatury vyplývá následující³²:

$K_V > 1$ materiál je lépe obrobiteľný vzhledem k referenčnímu vzorku

$K_V = 1$ materiál je stejně obrobiteľný vzhledem k referenčnímu vzorku

$K_V < 1$ materiál je hůře obrobiteľný vzhledem k referenčnímu vzorku

Hodnota indexu kinetické obrobiteľnosti K_V zařazuje jednotlivé materiály do třídy obrobiteľnosti podle výše uvedených pravidel. Tato hodnota je určena intervalem se střední hodnotou K_V , ve vztahu k referenčnímu vzorku. Pokud referenčnímu vzorku odpovídá například třída 11, potom zařazení zkoumaného vzorku do třídy obrobiteľnosti je provedeno podle tabulky 1 (Tab. 1, kap. 7.3).

³² ČEP, R., PETRŮ, J., 2011. Experimentální metody v obrábění [online] citováno 12. července 2014. Dostupné na World Wide Web: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_komplet_finish.pdf

10.1.5 Výsledky měření

10.1.5.1 Měření opotřebení nástroje - dřevotřísková deska laminovaná

Označení materiálu: DTD-L 18 mm 045 - BS buk Westfalen

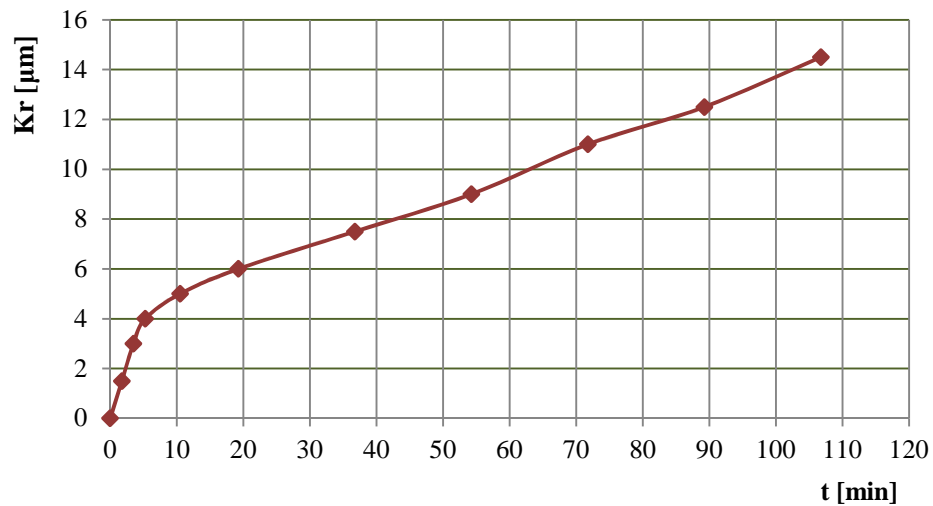
Dodavatel: Interexpo Brno, spol. s.r.o.

Tab. 2 Řezné podmínky – DTD-L, řezná rychlost 477 m · min⁻¹

Řezné podmínky	Hodnota	Jednotky
f _z	0,05	-
z	2	-
n	8000	ot · min ⁻¹
v _f	800	mm · min ⁻¹
v _c	477	m · min ⁻¹

Tab. 3 Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – průměrné opotřebení břitů U1a a U2a

Počet měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Čas (min)	0	1,75	3,5	5,25	10,5	19,25	36,75	54,25	71,75	89,25	106,75
Délka (mm)	0	1400	1400	1400	4200	7000	14000	14000	14000	14000	14000
Opotřebení (μm)	0	2	3	4	5	6	8	9	11	13	15
Opotřebení (μm)	0	1	3	4	5	6	7	9	11	12	14
Prům. opotřebení (μm)	0	1,5	3	4	5	6	7,5	9	11	12,5	14,5



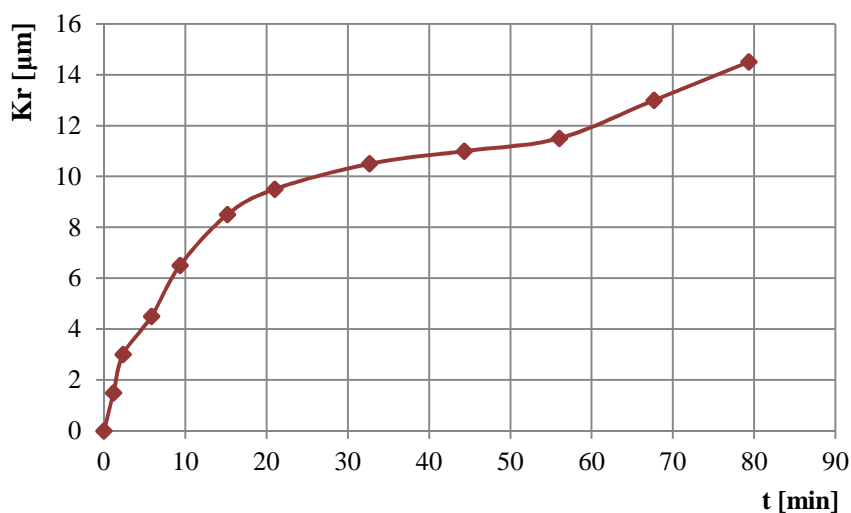
Obr. 35 Průběh závislosti KR = f (t) – průměrné opotřebení břitů U1a a U2a

Tab. 4 Řezné podmínky – DTD-L, řezná rychlost 716 m · min⁻¹

Řezné podmínky	Hodnota	Jednotky
f _z	0,05	-
z	2	-
n	12000	ot · min ⁻¹
v _f	1200	mm · min ⁻¹
v _c	716	m · min ⁻¹

Tab. 5 Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – průměrné opotřebení břitů U1b a U2b

Počet měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Čas (min)	0	1,17	2,34	5,84	9,34	15,17	21	32,67	44,34	56,01	67,68	79,35
Délka (mm)	0	1400	1400	4200	4200	7000	7000	14000	14000	14000	14000	14000
Opotřebení (μm)	0	2	3	5	7	9	10	11	11	12	13	15
Opotřebení (μm)	0	1	3	4	6	8	9	10	11	11	13	14
Prům. opotř. (μm)	0	1,5	3	4,5	6,5	8,5	9,5	10,5	11	11,5	13	14,5



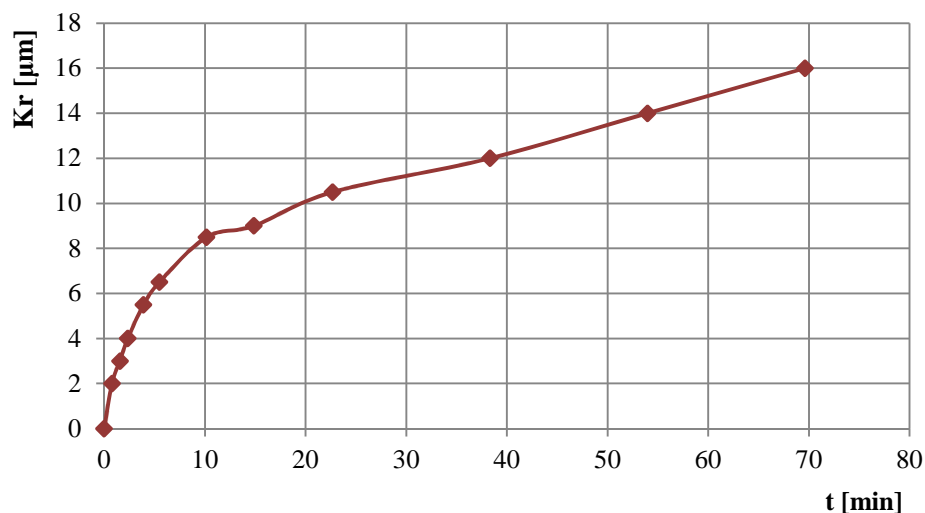
Obr. 36 Průběh závislosti KR = f (t) – průměrné opotřebení břitů U1b a U2b

Tab. 6 Řezné podmínky – DTD-L, řezná rychlost 895 m · min⁻¹

Řezné podmínky	Hodnota	Jednotky
f _z	0,05	-
z	2	-
n	15000	ot · min ⁻¹
v _f	1500	mm · min ⁻¹
v _c	895	m · min ⁻¹

Tab. 7 Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – průměrné opotřebení břitů U3a a U4a

Počet měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Čas (min)	0	0,78	1,56	2,35	3,91	5,48	10,17	14,86	22,68	38,32	53,97	69,61
Délka (mm)	0	700	700	700	1400	1400	4200	4200	7000	14000	14000	14000
Opotřebení (μm)	0	2	3	4	6	7	9	9	11	12	14	16
Opotřebení (μm)	0	2	3	4	5	6	8	9	10	12	14	16
Prům. opotř. (μm)	0	2	3	4	5,5	6,5	8,5	9	10,5	12	14	16



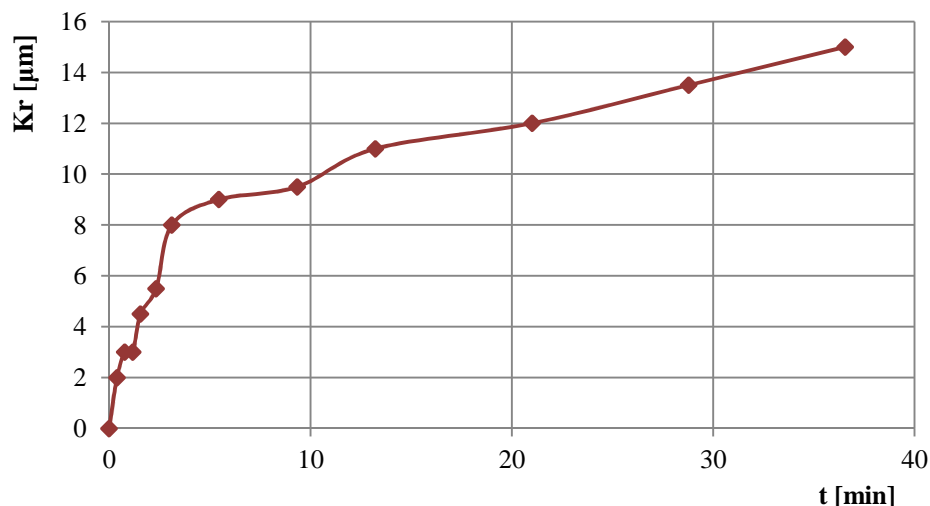
Obr. 37 Průběh závislosti KR = f (t) – průměrné opotřebení břitů U3a a U4a

Tab. 8 Řezné podmínky – DTD-L, řezná rychlost 1074 m · min⁻¹

Řezné podmínky	Hodnota	Jednotky
f_z	0,05	-
z	2	-
n	18000	ot · min ⁻¹
v_f	1800	mm · min ⁻¹
v_c	1074	m · min ⁻¹

Tab. 9 Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – průměrné opotřebení břitů U3b a U4b

Počet měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Čas (min)	0	0,39	0,78	1,17	1,56	2,33	3,11	5,45	9,33	13,22	21,00	28,78	36,56
Délka (mm)	0	700	700	700	700	1400	1400	4200	7000	7000	14000	14000	14000
Opotřebení (μm)	0	2	3	3	5	6	8	9	10	11	12	14	15
Opotřebení (μm)	0	2	3	3	4	5	8	9	9	11	12	13	15
Prům. opotř. (μm)	0	2	3	3	4,5	5,5	8	9	9,5	11	12	13,5	15

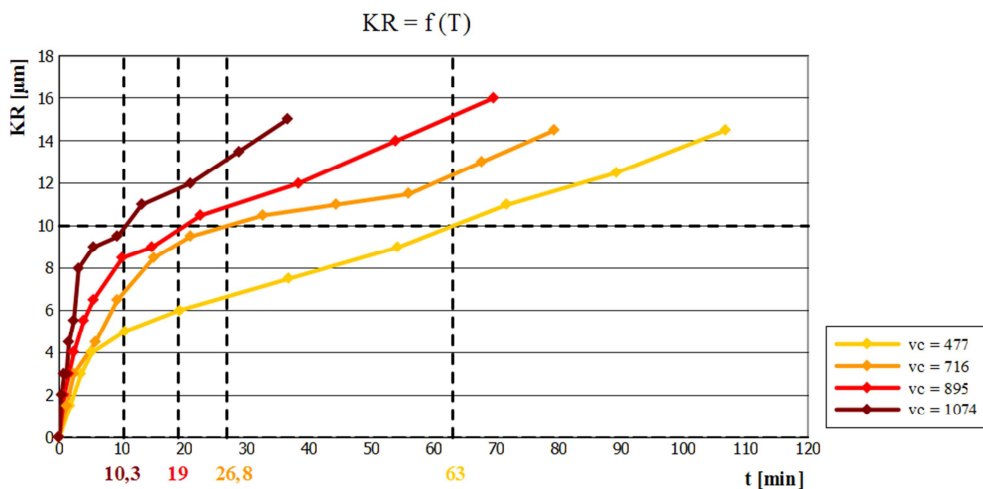


Obr. 38 Průběh závislosti $KR = f(t)$ – průměrné opotřebení břitů U3b a U4b

Z naměřených hodnot byl zpracován graf zobrazující jednotlivé řezné rychlosti při obrábění DTD-L. V grafu byla dále vynesena příčka definující zvolenou míru opotřebení – $10 \mu m$ od původního rozměru břitu. Na osu x pak byly vyneseny jednotlivé trvanlivosti $T_1 - T_4$ odpovídající zvolenému kritériu opotřebení.

Tab. 10 Přehled technologických parametrů a odpovídajících trvanlivostí $T_1 - T_4$

$n = 8000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$n = 12000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$n = 15000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$n = 18000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
$f_z = 0,05 \text{ mm}$	$f_z = 0,05 \text{ mm}$	$f_z = 0,05 \text{ mm}$	$f_z = 0,05 \text{ mm}$
$z = 2$	$z = 2$	$z = 2$	$z = 2$
$v_f = 800 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_f = 1200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_f = 1500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_f = 1800 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
$v_c = 477 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_c = 716 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_c = 895 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_c = 1074 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
$T_1 \sim 63,0 \text{ min}$	$T_2 \sim 26,8 \text{ min}$	$T_3 \sim 19,0 \text{ min}$	$T_4 \sim 10,3 \text{ min}$



Obr. 39 Průběh závislosti $KR = f(t)$ pro jednotlivé rychlosti $v_{c1}, v_{c2}, v_{c3}, v_{c4}$

10.1.5.2 Měření opotřebení nástroje - dřevovláknitá deska se střední hustotou

Označení materiálu: *MDF – surová – 18 mm*

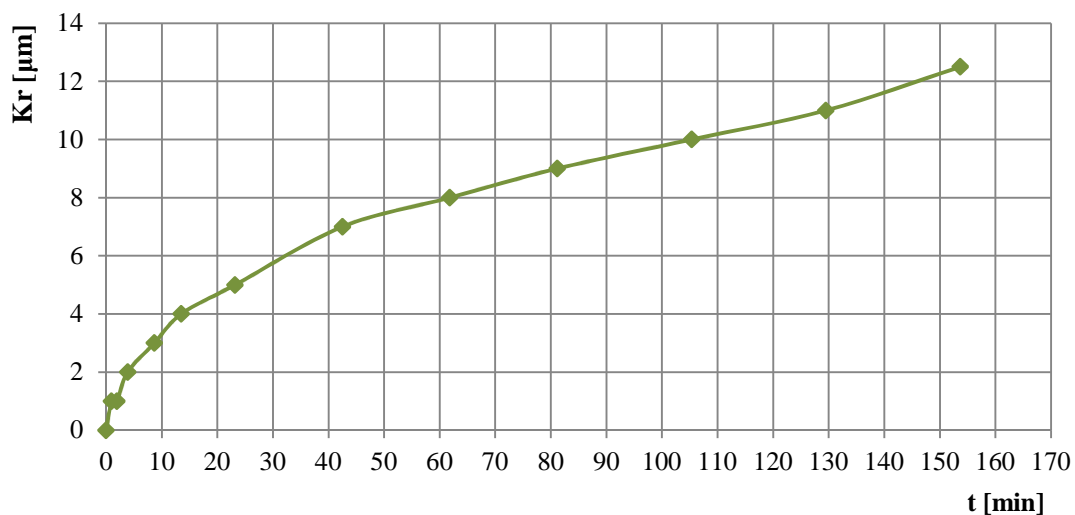
Dodavatel: *Interexpo Brno, spol. s.r.o.*

Tab. 11 Řezné podmínky – MDF, řezná rychlost $716 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Řezné podmínky	Hodnota	Jednotky
f_z	0,05	-
z	2	-
n	12000	$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$
v_f	1200	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
v_c	716	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab. 12 Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – průměrné opotřebení břitů M1a a M2a

Počet měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Čas (min)	0	0,97	1,93	3,86	8,69	13,52	23,19	42,52	61,85	81,18	105,35	129,52	153,69
Délka (mm)	0	1160	1160	2320	5800	5800	11600	23200	23200	23200	29000	29000	29000
Opotřebení (μm)	0	1	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	13
Opotřebení (μm)	0	1	1	2	3	4	5	8	8	9	10	11	12
Prům. opotř. (μm)	0	1	1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12,5



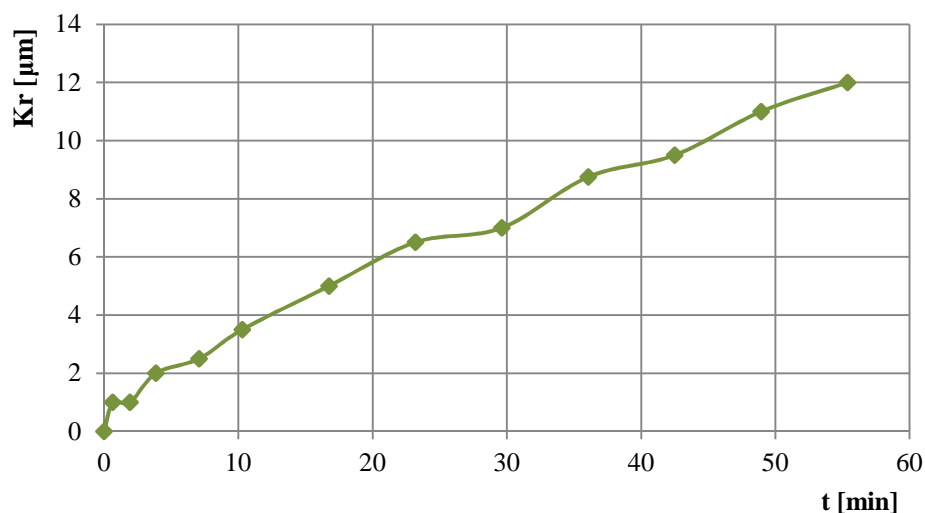
Obr. 40 Průběh závislosti $KR = f(t)$ – průměrné opotřebení břitů M1a a M2a

Tab. 13 Řezné podmínky – MDF, řezná rychlost 1074 m · min⁻¹

Řezné podmínky	Hodnota	Jednotky
f_z	0,05	-
z	2	-
n	18000	ot · min ⁻¹
v_f	1800	mm · min ⁻¹
v_c	1074	m · min ⁻¹

Tab. 14 Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – průměrné opotřebení břitů M1b a M2b

Počet měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Čas (min)	0	0,64	1,93	3,86	7,08	10,3	16,74	23,18	29,62	36,06	42,5	48,94	55,38
Délka (mm)	0	1160	2320	3480	5800	5800	11600	11600	11600	11600	11600	11600	11600
Opotřebení (μm)	0	1	1	2	3	4	5	7	7	9	10	11	12
Opotřebení (μm)	0	1	1	2	2	3	5	6	7	8,5	9	11	12
Prům. opotřeb.(μm)	0	1	1	2	2,5	3,5	5	6,5	7	8,75	9,5	11	12

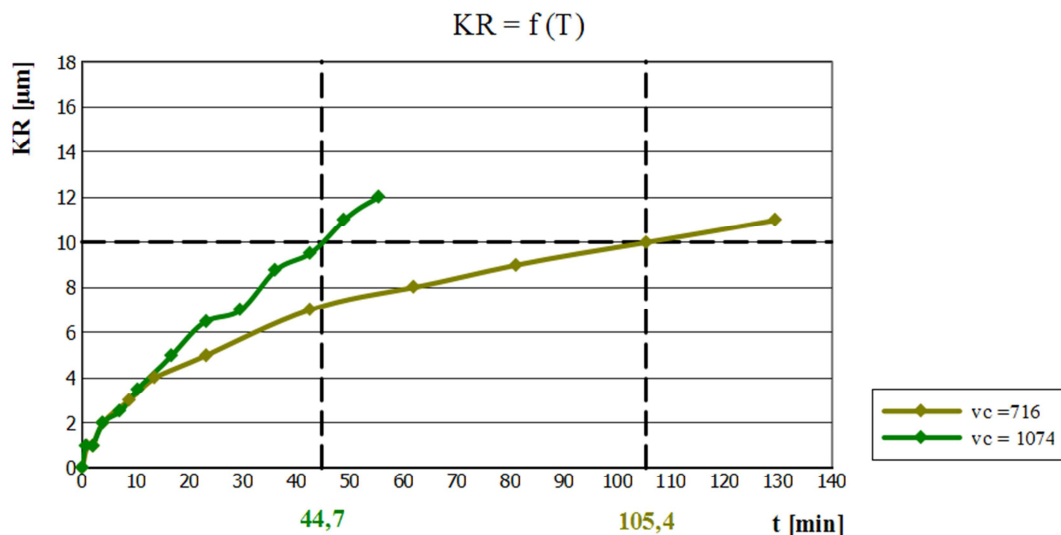


Obr. 41 Průběh závislosti KR = f (t) – průměrné opotřebení břitů M1b a M2b

Stejným způsobem jako u DTD-L byl z naměřených hodnot zpracován graf zobrazující jednotlivé řezné rychlosti při obrábění MDF. V grafu byla vynesena přímka definující zvolenou míru opotřebení – 10 μm od původního rozměru břitu. Na osu x pak byly vyneseny jednotlivé trvanlivosti T_1 a T_2 odpovídající zvolenému kritériu opotřebení. Výsledky materiálu MDF jsou založeny na menším množství naměřených dat z důvodu vysoké časové, materiálové i finanční náročnosti celého experimentu.

Tab. 15 Přehled technologických parametrů a odpovídajících trvanlivostí T_1 a T_2

$n = 12000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$n = 18000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
$f_z = 0,05 \text{ mm}$	$f_z = 0,05 \text{ mm}$
$z = 2$	$z = 2$
$v_f = 1200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_f = 1800 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
$v_c = 716 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_c = 1074 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
$T_1 \sim 105,4 \text{ min}$	$T_2 \sim 44,7 \text{ min}$



Obr. 42 Průběh závislosti $KR = f(t)$ pro jednotlivé rychlosti v_{c1} a v_{c2}

10.1.5.3 Stanovení závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti

Pro stanovení závislosti trvanlivosti nástroje na řezné rychlosti bylo nutné hodnoty T a v_c zlogaritmovat a zanést do grafu $\log T = f(\log v_c)$. Poté byla aplikována statistická metoda lineární regrese (6.7), kdy jednotlivé body $\log T_1 \div \log T_4$ (DTD-L), resp. $\log T_1$ a $\log T_2$ (MDF) odpovídající hodnotám $\log v_{c1} \div \log v_{c4}$ (DTD-L), resp. $\log v_{c1}$ a $\log v_{c2}$ (MDF) byly proloženy přímkou se směrnici a (6.5) a (6.6).

10.1.5.3.1 DTD-L

Dle uvedených vzorců (6.7), resp. (6.4) byl vypočítán exponent m a konstanta C_T , resp. C_V , kde n je počet měření. Výpočet:

$$m = \frac{4 \sum \log v_c \log T - \sum \log v_c \sum \log T}{4 \sum \log v_c^2 - (\sum \log v_c)^2} \quad (10.1)$$

$$m = 2,14527 \quad (10.2)$$

$$\log C_T = \frac{\sum \log v_c^2 \sum \log T - \sum \log v_c \sum \log v_c \log T}{4 \sum \log v_c^2 - (\sum \log v_c)^2} \quad (10.3)$$

$$\log C_T = 7,55613 \quad (10.4)$$

$$C_T = 35985410 \quad (10.5)$$

$$C_V = C_T^{\frac{1}{m}} \quad (10.6)$$

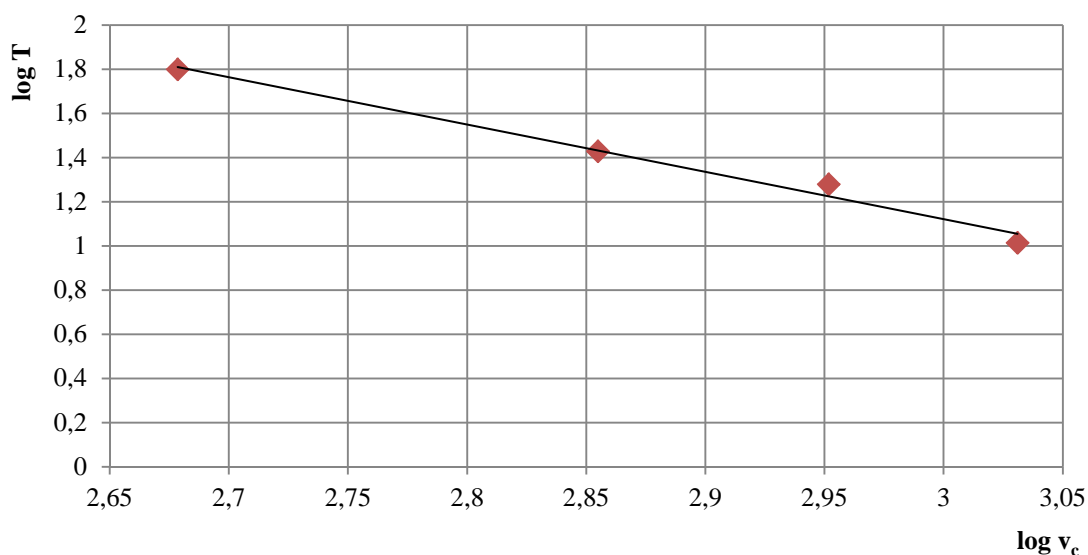
$$C_V = 3328,38 \quad (10.7)$$

Tab. 16 Tabulka hodnot trvanlivosti T a rychlosti v_c

Měření	v_c	$\log v_c$	T	$\log T$	$\log v_c \cdot \log T$	$\log v_c^2$
1	477	2,67852	63	1,79934	4,81957	7,17446
2	716	2,85491	26,8	1,42813	4,07720	8,15053
3	895	2,95182	19	1,27875	3,77465	8,71326
4	1074	3,03100	10,3	1,01284	3,06991	9,18699
Σ		11,51626		5,51907	15,74134	33,22524

Tab. 17 Tabulka výpočtu exponentu m a konstant C_T a C_V

m	2,14527
C_T	35985410
C_V	3328,38



Obr. 43 Průběh závislosti $T = f(v_c)$ (DTD-L)

10.1.5.3.2 MDF

Výpočet exponentu m a konstanty C_T , resp. C_V , kde n je počet měření.

$$m = \frac{2 \sum \log v_c \log T - \sum \log v_c \sum \log T}{2 \sum \log v_c^2 - (\sum \log v_c)^2} \quad (10.8)$$

$$m = 2,11557 \quad (10.9)$$

$$\log C_T = \frac{\sum \log v_c^2 \sum \log T - \sum \log v_c \sum \log v_c \log T}{2 \sum \log v_c^2 - (\sum \log v_c)^2} \quad (10.10)$$

$$\log C_T = 8,06260 \quad (10.11)$$

$$C_T = 115505891 \quad (10.12)$$

$$C_V = C_T^{\frac{1}{m}} \quad (10.13)$$

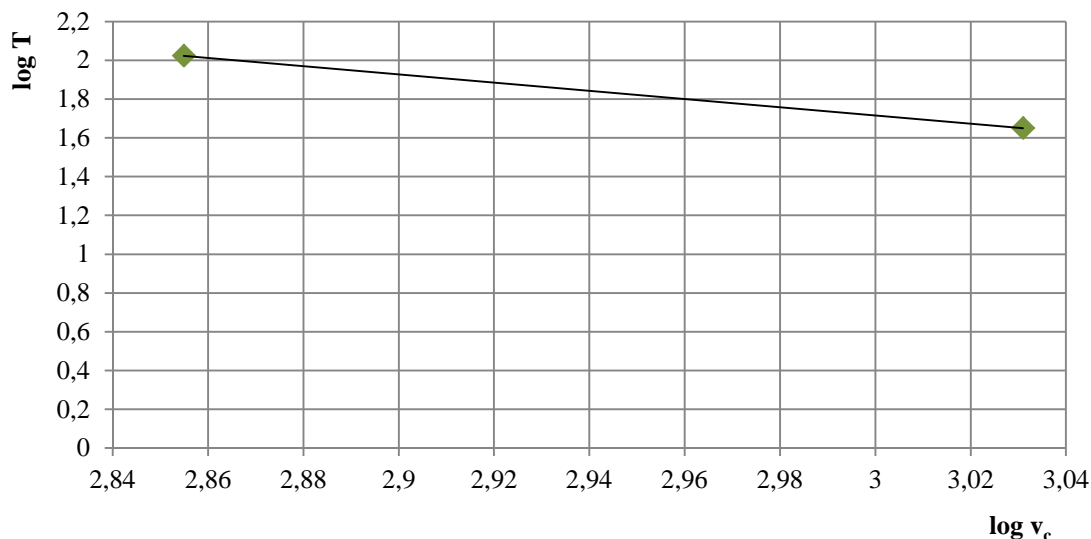
$$C_V = 6472,65 \quad (10.14)$$

Tab. 18 Tabulka hodnot trvanlivosti T a rychlosti v_c

Měření	v_c	$\log v_c$	T	$\log T$	$\log v_c \cdot \log T$	$\log v_c^2$
1	716	2,85491	105,4	2,02284	5,77503	8,15053
2	1074	3,03100	44,7	1,65031	5,00209	9,18699
Σ		5,88592		3,67315	10,77712	17,33752

Tab. 19 Tabulka výpočtu exponentu m a konstant C_T a C_V

m	2,11557
C_T	115505891
C_V	6472,65



Obr. 44 Průběh závislosti $T = f(v_c)$ (MDF)

10.1.5.4 Index kinetické obrobitelnosti

Průběh závislosti $T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m}$ byl zpracován pro oba materiály – DTD-L a MDF (obr. 45). Stanovení odpovídajících řezných rychlostí při zvolené trvanlivosti $\log T = 1,65$ bylo vypočteno podle rovnice (6.6).

10.1.5.4.1 DTD-L

$$1,65 = -2,14527 \log v_c + \log 35985410 \quad (10.15)$$

$$\log v_c = 2,75310 \quad (10.16)$$

$$v_c = 566 \quad [m \cdot min^{-1}] \quad (10.17)$$

10.1.5.4.2 MDF

$$1,65 = -2,11557 \log v_c + \log 115505891 \quad (10.18)$$

$$\log v_c = 3,03115 \quad (10.19)$$

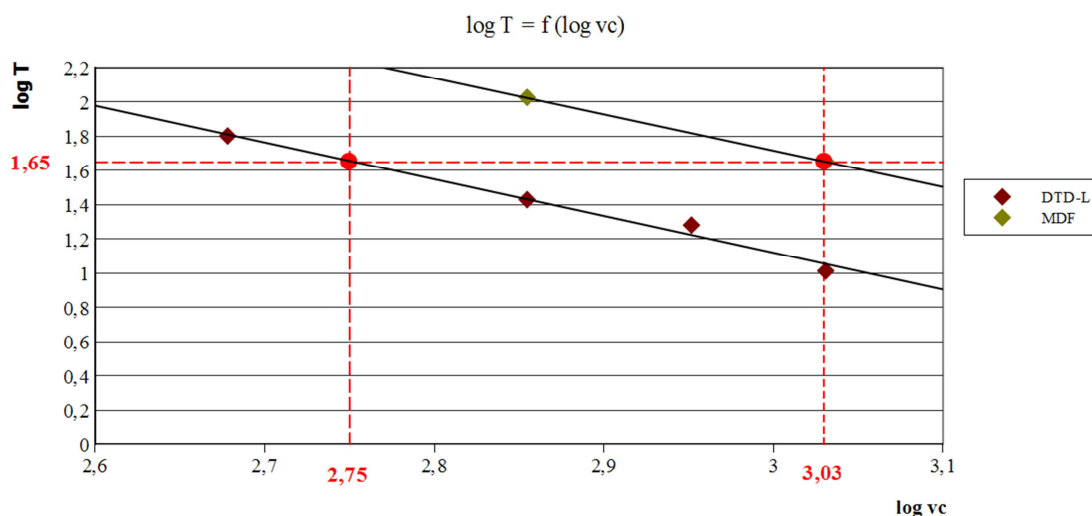
$$v_c = 1074 \quad [m \cdot min^{-1}] \quad (10.20)$$

Dále bylo nutné zvolit jeden z materiálů jako referenční vzorek, podle něhož byly poté posuzovány ostatní materiály. Jako referenční vzorek byl vybrán materiál DTD-L a byl zařazen do třídy obrobitelnosti 11. Vzhledem k tomu, že měření obrobitelnosti materiálů na bázi dřeva nebylo nikdy dříve provedeno, byla tato třída pro referenční vzorek zvolena jako „zkušební třída“, jejíž zařazení bude možné upravit po naměření většího množství výsledků.

Třídy obrobitelnosti se vztahují k příslušným indexům kinetické obrobitelnosti, jejichž střední hodnota je definována geometrickou řadou $R10 = \sqrt[10]{10} \approx 1,26$. Tzn., že referenční vzorek (DTD-L) nabývá vždy hodnoty $K_V = 1$ a odpovídá přiřazené („zkušební“) třídě 11.

Index kinetické obrobitelnosti, resp. jeho střední hodnota a odpovídající intervaly, tedy zařazuje jednotlivé zkušební materiály do tříd obrobitelnosti ve vztahu k referenčnímu vzorku.

Trvanlivost nástroje byla zvolena na $T = 44,7 \text{ min}$ ($\log T \approx 1,65$) a byla zanesena do grafu $T = f(v_c)$, a následně byly určeny odpovídající řezné rychlosti.



Obr. 45 Průběh závislosti $T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m}$ pro oba materiály

Poté byl vypočítán index kinetické obrobitelnosti $K_V = 1,899$ podle vztahu (7.1).

$$K_V = \frac{1074}{566} \quad (10.21)$$

$$K_V = 1,899 \quad (10.22)$$

Tab. 20 Hodnoty řezných rychlostí při zvolené trvanlivosti a index kinetické obrobitelnosti

	log	10 ^x
T	1,65	44,7
v _c ref. vzorek (DTD)	2,75310	566
v _c zk. mat (MDF)	3,03115	1074
K _V	1,899	

Výsledná hodnota indexu kinetické obrobitelnosti $K_V = 1,899$ odpovídá intervalu 1,79 – 2,82 se střední hodnotou 2,00. Z tabulky hodnot indexu obrobitelnosti pro zařazení materiálů (Tab. 1, kap. 7.3) tedy vyplývá, že výpočet kinetické obrobitelnosti MDF odpovídající kvocientu $K_V = 1,899$ zařazuje tento materiál do třídy 14 ($\Rightarrow 1,26^3$). Jedná se tedy o materiál s lepší obrobitelností o 3 třídy než referenční vzorek.

10.2 Stanovení obrobitelnosti překližované desky

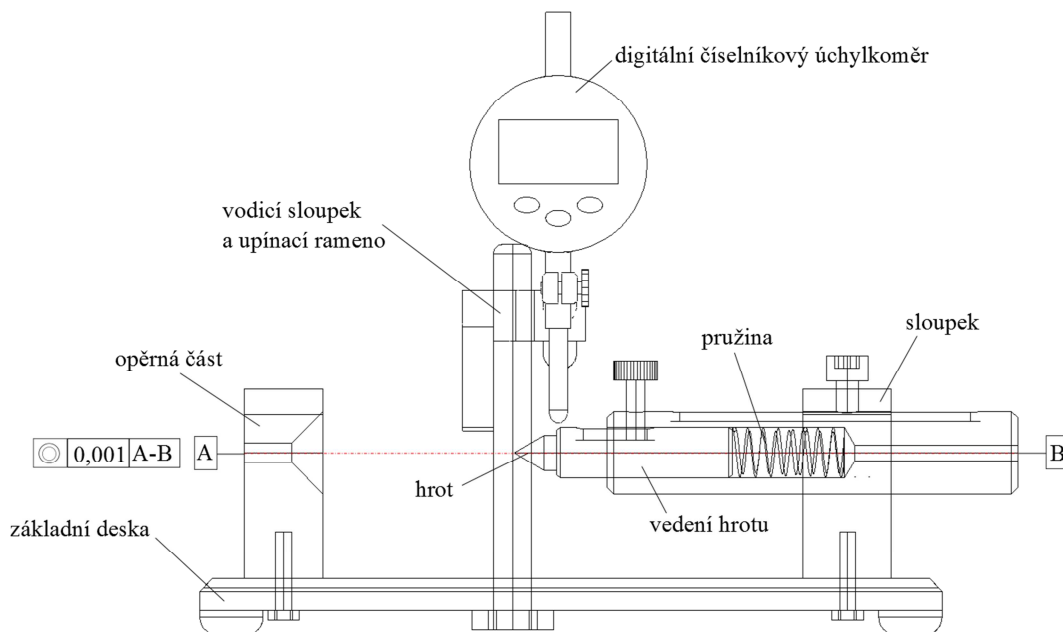
Měření opotřebení překližované desky bylo prováděno při stejných pracovních podmínkách jako v projektu IGA s tím rozdílem, že pro měření opotřebení nástroje byl navržen měřicí přípravek, který zajišťoval snížení časové náročnosti experimentu a zvýšení přesnosti měření. Při použití přístroje *Passametř Somet* v projektu IGA bylo vždy nutné demontovat oba břity z frézy, změřit opotřebení a následně oba břity upevnit zpět na frézu. Navržený přípravek zajišťoval upevnění celé frézy do přípravku a odečtení opotřebení na digitálním číselníkovém úchylkoměru bez nutnosti demontáže břitů.

10.2.1 Měřicí přípravek

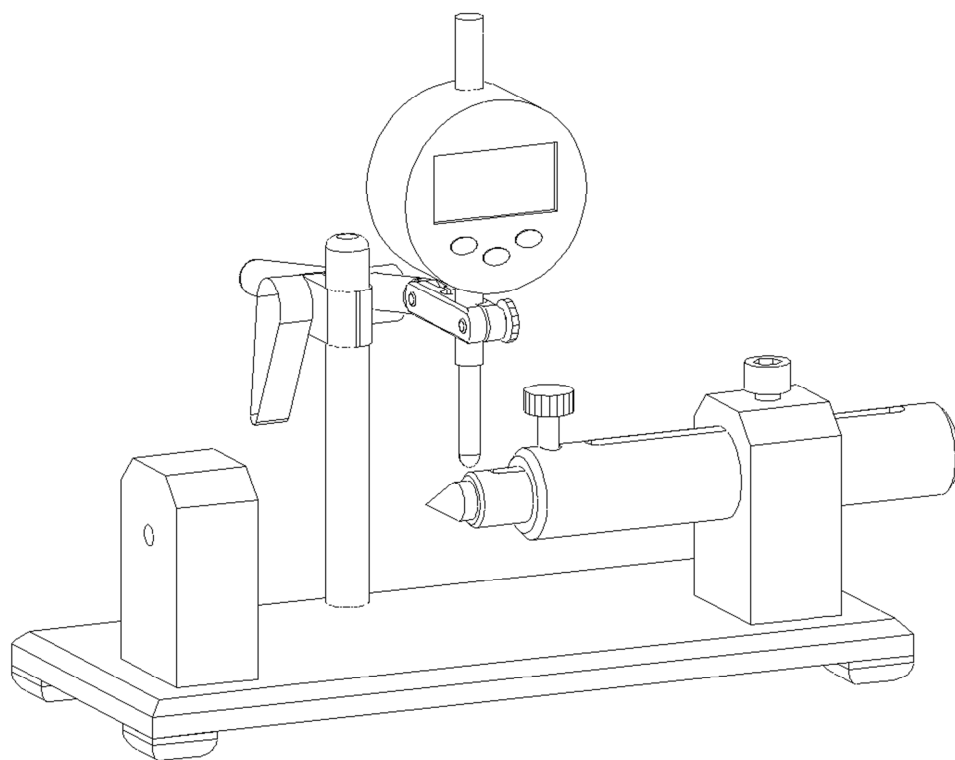
Měřicí přípravek byl navržen z důvodu potřeby zpřesnit měření a snížit velmi vysokou časovou náročnost experimentu. Je navržen tak, aby do něj mohla být upnuta celá fréza (různé velikosti – délky i průměru) bez nutnosti demontáže břitů, což výrazně zvýšilo přesnost měření. Digitální číselníkový úchylkoměr pak umožňuje odečítání opotřebení břitu od nastavené nulové hodnoty.

Přípravek byl vyroben z konstrukční uhlíkové oceli, třídy 11, přesné označení materiálu dle ČSN 42 0074 je 11600.

Schéma a popis přípravku:



Obr. 46 Schéma a popis měřicího přípravku



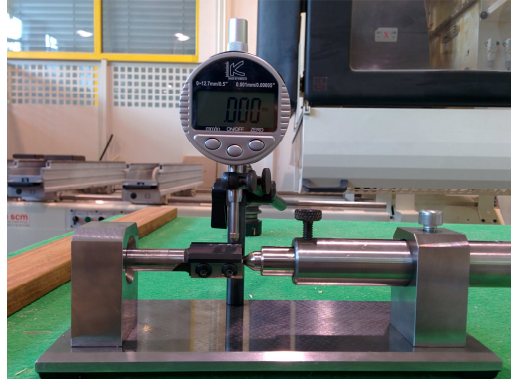
Obr. 47 Měřicí přípravek – 3D model



Obr. 48 Měřicí přípravek – výrobek

Postup měření:

1. po upnutí frézy byla na číselníkovém úchylkoměru nastavena nulová hodnota – pomalým otáčením frézy byla nalezena mezní hodnota hodnota na obou břitech a úchylkoměr byl vynulován – funkcí „zero“;



Obr. 49 Nastavení nulové hodnoty na číselníkovém úchylkoměru

2. po obrobení byla vyjmuta fréza ze zásobníku CNC stroje;
3. fréza byla upnuta do měřicího přípravku;
4. pomalým otáčením byla nalezena mezní úchylka na číselníkovém úchylkoměru určující opotřebení KR na břitech nástroje;
5. následně byla fréza použita pro pokračování experimentu.

10.2.2 Metodika

Metodika stanovení obrobiteľnosti překližované desky vychází ze stejného postupu jako určení obrobiteľnosti dřevotřískové desky laminované a dřevovláknité desky se střední hustotou v rámci projektu IGA 33/2012.

V pokusu bylo použito stejné strojní zařízení (CNC obráběcí centrum *SCM Tech 99*), stejný nástroj (fréza *FRSTHW 19x30x12z2 žil.*), břity (nůž *HW 29,5x12x1,5 4s T04F*) i pracovní podmínky jako u projektu IGA 33/2012 (viz kap. 10.1.1. a 10.1.2). Cílem bylo zajistit stejné podmínky řezání pro porovnání jednotlivých materiálů, zejména vlastností určujících jejich vhodnost k obrábění.

Metodický postup byl tedy založen na měření opotřebení nástroje. Z naměřených výsledků byly vytvořeny křivky opotřebení nástroje (Tab. 22, 24, 26, obr. 50, 51, 52), byla stanovena míra opotřebení na $10 \mu\text{m}$ od původní hodnoty rozměru břitu, která byla zanesena do grafu křivek opotřebení. Na osu x byly vyneseny trvanlivosti T_1 , T_2 , T_3 odpovídající jednotlivým řezným rychlostem (Tab. 27, obr. 53). Dále byla stanovena závislost trvanlivosti břitu na míře opotřebení, v závislosti trvanlivost – řezná rychlost

$(T - v_c)$, která je charakterizována Taylorovým vztahem (6.2). Jednotlivé trvanlivosti T_1 , T_2 , T_3 byly převedeny do logaritmických souřadnic (Tab. 28) a zaneseny do grafu $\log T = f(\log v_c)$. Následně byla použita aplikace statistické metody lineární regrese, kdy body T_1 , T_2 , T_3 byly proloženy přímkou se směrnici a (6.5) a (6.6) - obr. 54. Z rovnice byl vypočítán exponent m a konstanta C_T (Tab. 29). Do grafu závislosti $\log T = f(\log v_c)$ byly zaneseny oba porovnávané materiály – překližovaná deska (testovaný materiál) a dřevotřísková deska (referenční materiál). V grafu byla vynesena přímka definující zvolenou trvanlivost T a byly určeny odpovídající řezné rychlosti (obr. 55). Následně byl vypočítán index kinetické obrobitelnosti podle vztahu (7.1), který zařazuje materiál do příslušné třídy obrobitelnosti (Tab. 30).

První experimentální měření bylo provedeno s použitím řezné rychlosti $v_c = 477 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Po tomto měření se ukázalo, že materiál je výrazně hůře obrobitelný než předchozí dva vzorky (DTD-L, MDF). Z důvodu, aby byly zachovány stejné pracovní podmínky a tím byla zachována porovnatelnost výsledků, byla u dalších pokusů snížena pouze řezná rychlost. Vzhledem k tomu, že hodnoty posuvových a řezných rychlostí vychází ze vztahů mezi hodnotou posuvu na zub, otáčkami nástroje a průměrem frézy, byly proto upraveny i otáčky nástroje a posuvové rychlosti. Ostatní řezné podmínky zůstaly stejné.

Použitá řada otáček:	8000, 5000, 4000 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$
Odpovídající posuvové rychlosti:	800, 500, 400 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Odpovídající řezné rychlosti:	477, 299, 239 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$

10.2.3 Výsledky měření

10.2.3.1 Měření opotřebení nástroje - překližovaná deska

Označení materiálu: PDP, buk, tl. 18 mm, devítivrstvá

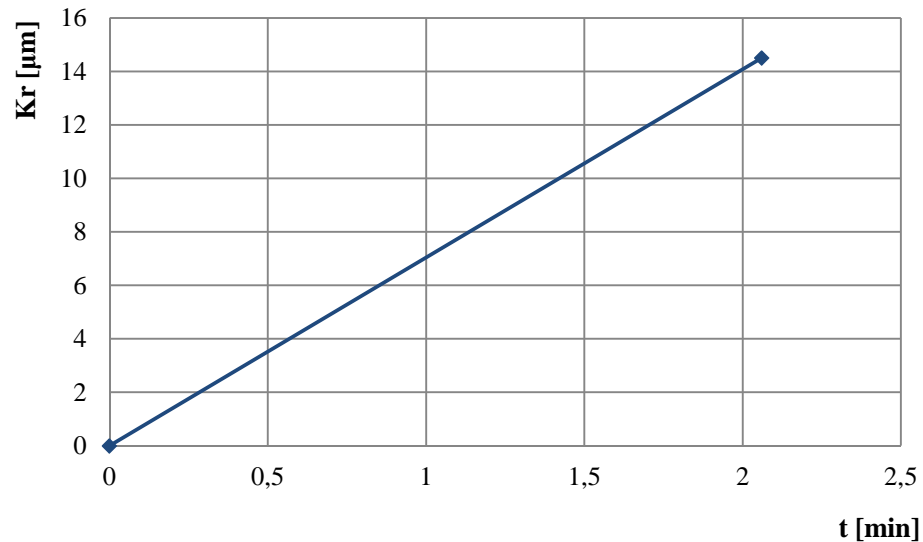
Dodavatel: AZ WOOD a.s.

Tab. 21 Řezné podmínky – PDP, řezná rychlost 477 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$

Řezné podmínky	Hodnota	Jednotky
f_z	0,05	-
z	2	-
n	8000	$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$
v_f	800	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
v_c	477	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab. 22 Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – průměrné opotřebení břitů P1a a P2a

Počet měření	1	2
Čas (min)	0	2,06
Délka (mm)	0	1650
Opotřebení (μm)	0	16
Opotřebení (μm)	0	13
Prům. opotřebení (μm)	0	14,5



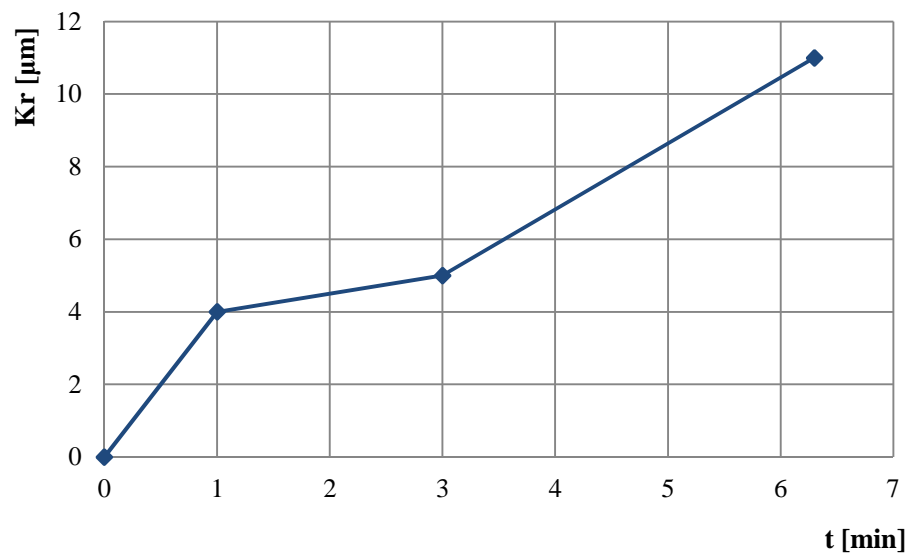
Obr. 50 Průběh závislosti $KR = f(t)$ – průměrné opotřebení břitů P1a a P2a

Tab. 23 Řezné podmínky – PDP, řezná rychlost $299 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Řezné podmínky	Hodnota	Jednotky
f_z	0,05	-
z	2	-
n	5000	$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$
v_f	500	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
v_c	299	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab. 24 Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – průměrné opotřebení břitů P1b a P2b

Počet měření	1	2	3	4
Čas (min)	0	1	3	6,3
Délka (mm)	0	500	1000	1650
Opotřebení (μm)	0	3	6	10
Opotřebení (μm)	0	5	4	12
Prům. opotř. (μm)	0	4	5	11



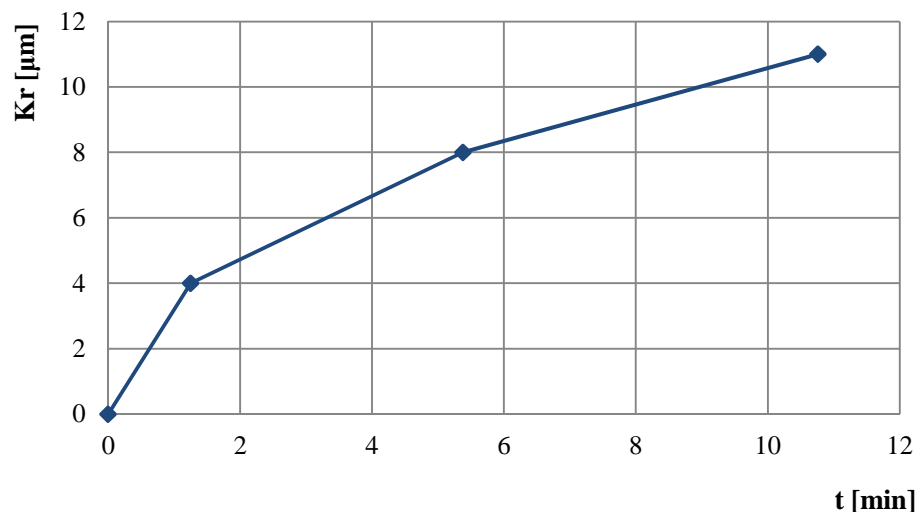
Obr. 51 Průběh závislosti $KR = f(t)$ – průměrné opotřebení břitů P1b a P2b

Tab. 25 Řezné podmínky – PDP, řezná rychlost $239 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Řezné podmínky	Hodnota	Jednotky
f_z	0,05	-
z	2	-
n	4000	$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$
v_f	400	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
v_c	239	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab. 26 Měření opotřebení nástroje v závislosti na čase – průměrné opotřebení břitů P3a a P4a

Počet měření	1	2	3	4
Čas (min)	0	1,25	5,38	10,76
Délka (mm)	0	500	1650	500
Opotřebení (μm)	0	5	7	12
Opotřebení (μm)	0	3	9	10
Prům. opotř. (μm)	0	4	8	11

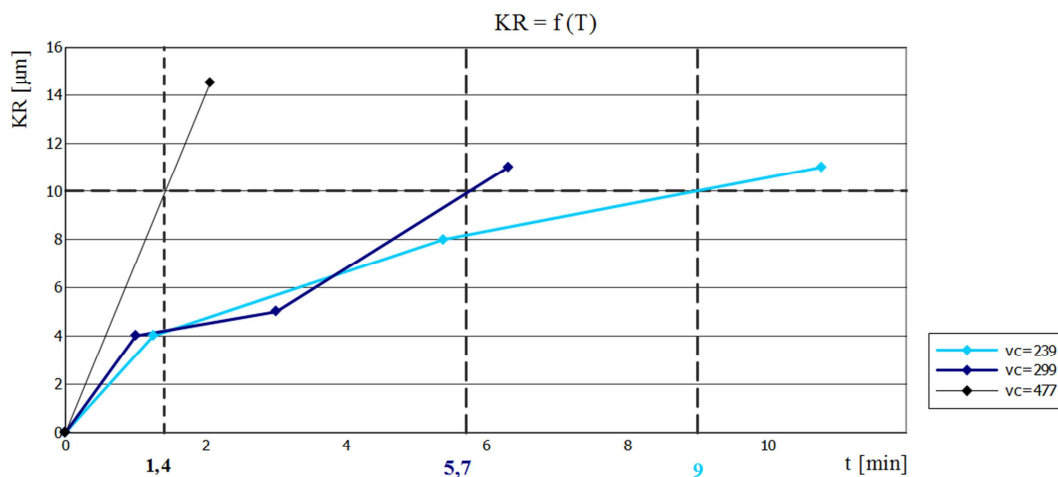


Obr. 52 Průběh závislosti $KR = f(t)$ – průměrné opotřebení břitů P3a a P4a

Z naměřených hodnot byl zpracován graf zobrazující jednotlivé řezné rychlosti při obrábění PDP. V grafu byla vynesena přímka definující zvolenou míru opotřebení – $10 \mu m$ od původního rozměru břitu. Na osu x pak byly vyneseny jednotlivé trvanlivosti T_1, T_2, T_3 odpovídající zvolenému kritériu opotřebení.

Tab. 27 Přehled technologických parametrů a odpovídajících trvanlivostí T_1 - T_3

$n = 8000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$n = 5000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$n = 4000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
$f_z = 0,05 \text{ mm}$	$f_z = 0,05 \text{ mm}$	$f_z = 0,05 \text{ mm}$
$z = 2$	$z = 2$	$z = 2$
$v_f = 800 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_f = 500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_f = 400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
$v_c = 477 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_c = 299 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	$v_c = 239 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
$T_1 \sim 1,4 \text{ min}$	$T_2 \sim 5,9 \text{ min}$	$T_3 \sim 9 \text{ min}$



Obr. 53 Průběh závislosti $KR = f(t)$ pro jednotlivé rychlosti v_{c1}, v_{c2}, v_{c3}

10.2.3.2 Stanovení závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti

Stanovení závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti bylo provedeno stejným způsobem jako v případě DTD-L nebo MDF. Hodnoty T a v_c byly převedeny na logaritmy a byly zaneseny do grafu $\log T = f(\log v_c)$. Poté byla aplikována statistická metoda lineární regrese (6.7), kdy jednotlivé body $\log T_1 \div \log T_3$ odpovídající hodnotám $\log v_{c1} \div \log v_{c3}$ byly proloženy přímkou se směrnicí a (6.5) a (6.6).

Dle uvedených vzorců (6.7), resp. (6.4) byl vypočítán exponent m a konstanta C_T , resp. C_V , kde n je počet měření:

$$m = \frac{3 \sum \log v_c \log T - \sum \log v_c \sum \log T}{3 \sum \log v_c^2 - (\sum \log v_c)^2} \quad (10.23)$$

$$m = 2,74033 \quad (10.24)$$

$$\log C_T = \frac{\sum \log v_c^2 \sum \log T - \sum \log v_c \sum \log v_c \log T}{3 \sum \log v_c^2 - (\sum \log v_c)^2} \quad (10.25)$$

$$\log C_T = 7,49933 \quad (10.26)$$

$$C_T = 31574268 \quad (10.27)$$

$$C_V = C_T^{\frac{1}{m}} \quad (10.28)$$

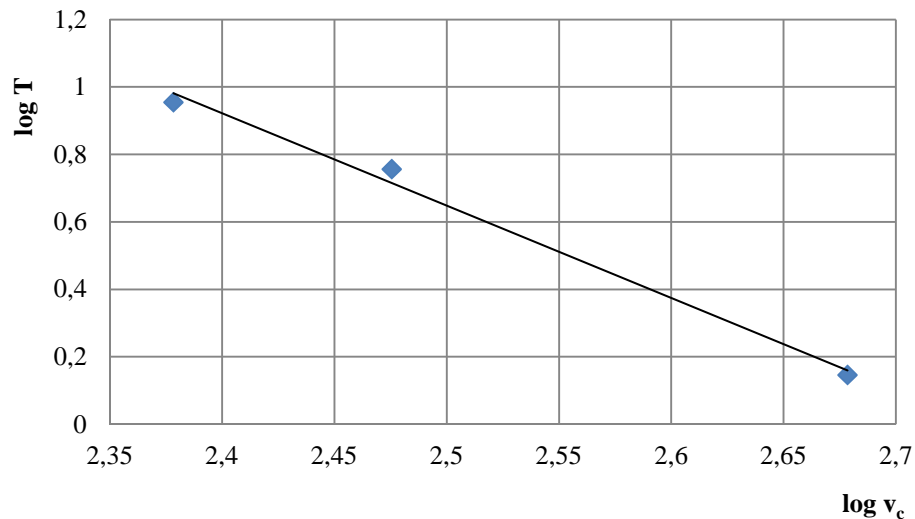
$$C_V = 545,33 \quad (10.29)$$

Tab. 28 Tabulka hodnot trvanlivosti T a rychlosti v_c

Měření	v_c	$\log v_c$	T	$\log T$	$\log v_c \cdot \log T$	$\log v_c^2$
1	477	2,67852	1,4	0,14613	0,39141	7,17446
2	299	2,47567	5,7	0,75587	1,87130	6,12895;
3	239	2,37840	9	0,95424	2,26957	5,65678
Σ		7,53259		1,85625	4,53227	18,96019

Tab. 29 Tabulka výpočtu exponentu m a konstant C_T a C_V

m	2,74033
C_T	31574268
C_V	545,33



Obr. 54 Průběh závislosti $T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m}$

10.2.3.3 Index kinetické obrobitelnosti

Pro porovnávání materiálů a stanovení tříd obrobitelnosti byl zvolen materiál DTD-L jako referenční vzorek a na základě výsledků projektu IGA 33/2012 byl zařazen do třídy obrobitelnosti 11.

Následně byl zpracován průběh závislosti $\log T = f(\log v_c)$ pro oba materiály – DTD-L (referenční materiál) a PDP (zkoušený materiál) - obr. 55. V grafu byla zvolena trvanlivost $\log T = 1$ ($T = 10 \text{ min}$) a podle rovnice (6.6) byly vypočítány odpovídající řezné rychlosti pro tuto trvanlivost.

10.2.3.3.1 DTD-L

$$1 = -2,14527 \log v_c + \log 35985410 \quad (10.30)$$

$$\log v_c = 3,05609 \quad (10.31)$$

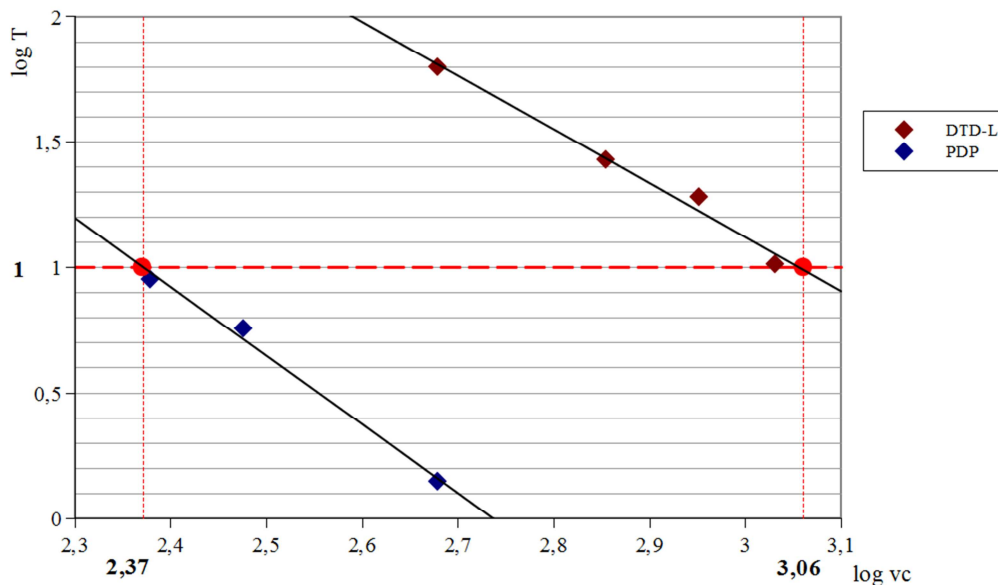
$$v_c = 1138 \quad [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (10.32)$$

10.2.3.3.2 PDP

$$1 = -2,74033 \log v_c + \log 31574268 \quad (10.33)$$

$$\log v_c = 3,03173 \quad (10.34)$$

$$v_c = 235 \quad [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (10.35)$$



Obr. 55 Průběh závislosti $T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m}$ pro oba materiály

Následně byl vypočítán index kinetické obrobitelnosti K_V podle vztahu (7.1).

$$K_V = \frac{235}{1138} \quad (10.36)$$

$$K_V = 0,207 \quad (10.37)$$

Tab. 30 Hodnoty řezných rychlostí při zvolené trvanlivosti a index kinetické obrobitelnosti

	log	10^x
T	1	10
v_c ref. vzorek (DTD)	3,05609	1138
v_c zk. mat (PDP)	2,37173	235
K_V	0,207	

Hodnota indexu kinetické obrobitelnosti pro překližovanou desku byla na základě naměřených výsledků vypočtena s výsledkem $K_V = 0,207$. Zařazení materiálu PDP do třídy obrobitelnosti na základě zvolené třídy 11 pro referenční vzorek (DTD-L) by tedy odpovídalo třídě 4 (kvocient $1,26^{-7}$). Tato třída je však běžně považována jako třída zařazující velmi těžce obrobitelné materiály, protože pro materiály používané v praxi jsou nejpoužívanější třídy 6 – 16. A vzhledem k tomu, že existují další materiály, u kterých se předpokládá horší obrobitelnost (např. materiály obsahující skelná vlákna nebo jiné abrazivní látky), byla **změněna třída obrobitelnosti pro referenční vzorek na třídu 14**. Materiál PDP pak v novém zařazení odpovídal třídě 7. Tato změna byla provedena zejména z důvodu zachování středu pásma tříd 6 – 16.

Tabulka změněných hodnot indexu kinetické obrábivosti pro zařazení materiálů do tříd obrábivosti se zařazením referenčního vzorku $K_V = 1$ do třídy 14 je následující (Tab. 31).

Tab. 31 Hodnoty indexu obrábivosti pro zařazení materiálů (ref. vzorek-třída 14)

Střední hodnota K_V	Rozsah K_V	Třída obrábivosti	Kvocient
0,16	0,15 – 0,18	6	$1,26^{-8}$
0,20	0,19 – 0,22	7	$1,26^{-7}$
0,25	0,23 – 0,28	8	$1,26^{-6}$
0,32	0,29 – 0,35	9	$1,26^{-5}$
0,40	0,36 – 0,44	10	$1,26^{-4}$
0,50	0,45 – 0,56	11	$1,26^{-3}$
0,63	0,57 – 0,71	12	$1,26^{-2}$
0,80	0,72 – 0,89	13	$1,26^{-1}$
1,00	0,90 – 1,12	14	$1,26^0$
1,26	1,13 – 1,41	15	$1,26^1$
1,59	1,42 – 1,78	16	$1,26^2$
2,00	1,79 – 2,24	17	$1,26^3$
2,50	2,25 – 2,82	18	$1,26^4$
3,15	2,83 – 3,55	19	$1,26^5$
4,0	3,56 – 4,47	20	$1,26^6$

10.3 Statistické zpracování závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti

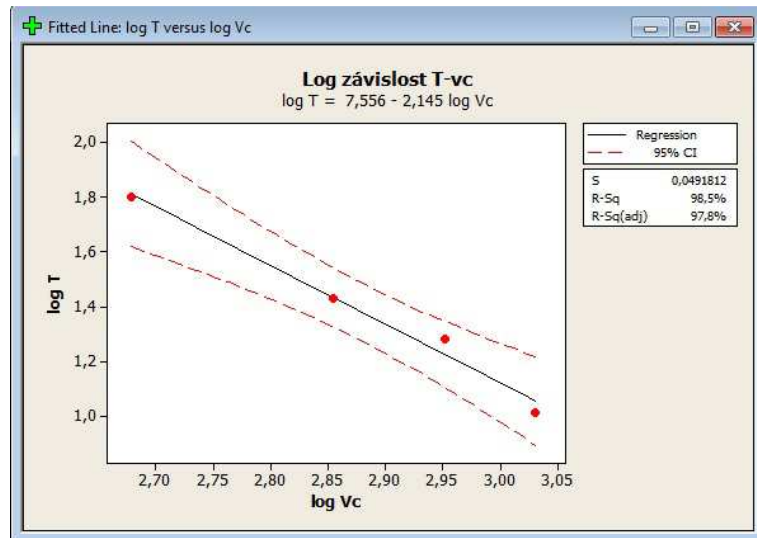
Pro zjištění prokazatelnosti naměřených dat byly grafy závislosti $T = f(v_c)$ pro materiály DTD-L a PDP zpracovány ve statistickém programu Minitab® 15. Cílem bylo zjistit šířku pásma výskytu měřených hodnot.

V grafech 56 a 57 je červeně čárkovaně zobrazena oblast intervalu spolehlivosti pro míru pravděpodobnosti 95%. Střední přímkou vychází z výpočtu regresní analýzy.

10.3.1 DTD-L

Tab. 32 Tabulka hodnot pro program Minitab (DTD-L)

	C_1	C_2	C_3	C_4
	v_c	$\log v_c$	T	$\log T$
1	477	2,67852	63	1,79934
2	716	2,85491	26,8	1,42813
3	895	2,95182	19,0	1,27875
4	1074	3,03100	10,3	1,01284

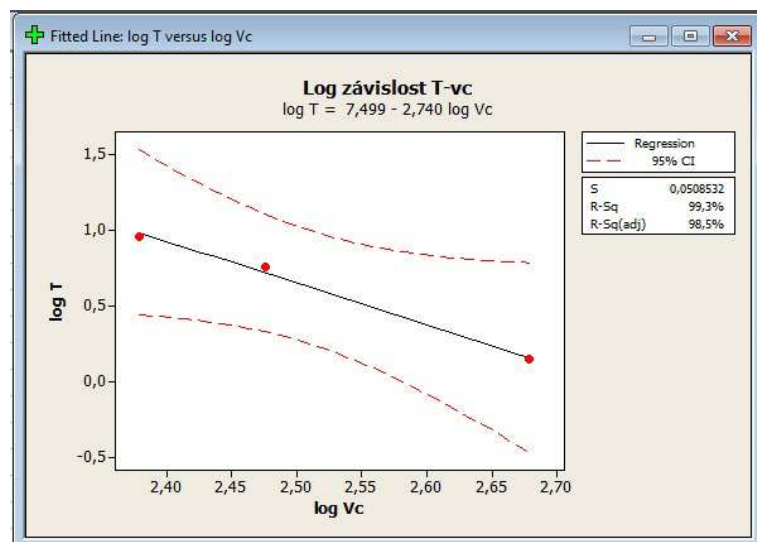


Obr. 56 Grafické znázornění závislosti $T = f(v_c)$ s intervalem spolehlivosti (DTD-L)

10.3.2 PDP

Tab. 33 Tabulka hodnot pro program Minitab (PDP)

	C_1	C_2	C_3	C_4
	v_c	$\log v_c$	T	$\log T$
1	239	2,37840	9,0	0,95424
2	299	2,47567	5,7	0,75588
3	477	2,67852	1,4	0,14613



Obr. 57 Grafické znázornění závislosti $T = f(v_c)$ s intervalem spolehlivosti (PDP)

10.4 Další experimenty

V rámci projektu IGA (33/2012) a projektu „InWood“ (Vytvoření mezinárodního vědecko-výzkumného týmu pro vývoj nových materiálů na bázi dřeva, CZ.1.07/2.3.00/20.0269) bylo provedeno několik dalších experimentů ve spolupráci s Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně, Fakultou technologickou (UTB Zlín, FT) a s Vysokým učeníem technickým v Brně, Fakultou strojní (VUT Brno, FSI).

10.4.1 FT UTB Zlín – Ústav výrobního inženýrství

Na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně, Fakultě technologické, Ústavu výrobního inženýrství byly provedeny následující experimenty:

- proces utváření třísky
- snímky utvořených třísek pomocí digitálního mikroskopu
- tepelná bilance v procesu obrábění

Použité materiály

- masivní dřevo buku lesního (*Fagus sylvatica L.*) o rozměrech 250 x 100 x 30 mm, objemová hmotnost $\rho = 680 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Při výběru masivního dřeva byl kladen důraz na rozšířenost vybraného druhu v rámci České republiky.
- plastická hmota - tzv. „umělé dřevo“ - (*Ebaboard PW 920 neu*) o rozměrech 200 x 150 x 50 mm, objemová hmotnost $\rho = 1220 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Ebaboard je tvrzený syntetický materiál na polyuretanové bázi, jehož vzorek byl poskytnut firmou KTK Blansko, spol. s.r.o. Technický list produktu je vložen v příloze disertační práce.
- kovový materiál - dural (*G.AL® C210R*) o rozměrech 160 x 100 x 25 mm, objemová hmotnost $\rho = 2660 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Jedná se o přirozeně tvrdou, nevytvrditelnou slitinu EN AW 5083 [AlMg4,5Mn0,7]. Označení obráběného materiálu odpovídá normě ČSN 42 4201 – Slitina hliníku tvářená AlCu4Mg (dural). Technický list slitiny je vložen v příloze disertační práce.

Strojní zařízení, nástroj a pracovní podmínky obrábění

Při těchto experimentech byl použit stejný nástroj jako v projektu IGA 33/2012, tj. pravotočivá fréza *FRSTHW 19x30x12z2 žil.* o průměru $D = 19 \text{ mm}$ se dvěma výměnnými břity ze slitnutého karbidu – typ *HW 29,5 x 12,0 x 1,5 4s T04F* - viz kapitola

10.1.1. Nástroj byl upnut do univerzální frézky *FHV – 50PD*. Na frézce byly nastaveny otáčky nástroje a posuvová rychlost. Specifikace strojního zařízení a pracovních podmínek je uvedena v Tab. 33.

Tab. 34 Strojní zařízení a pracovní podmínky

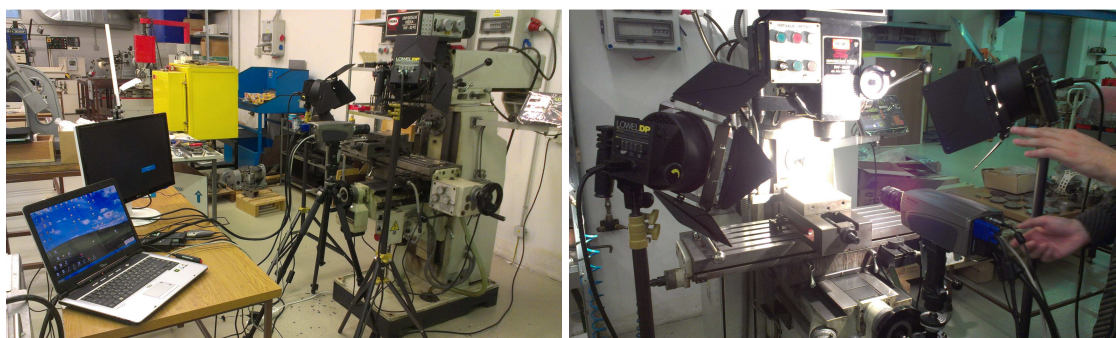
Strojní zařízení		Pracovní podmínky	
Název	FHV-50PD	Typ frézování	sousledné
Typ	univerzální frézka	Hloubka záběru	6 mm
Výrobce	PROMA	Otáčky	$n = 1090 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
Otáčky horizont. včetně	$115\text{--}1750 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$	Řezná rychlost	$v_c = 65 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Prac. zdvih v ose Z	380 mm	Posuv na zub	$f_z = 0,03; 0,216; 0,33; \text{ mm}$
Rozsah rychlosti posuvu	$18\text{--}300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Posuvová rychlost	$v_f = 65; 470; 720; \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Účelem těchto experimentů bylo získání představy o procesu průběhu plastické deformace a utváření třísky při obrábění vybraných materiálů a rozdělení teplotního pole v procesu řezání.

10.4.1.1 Proces utváření třísky

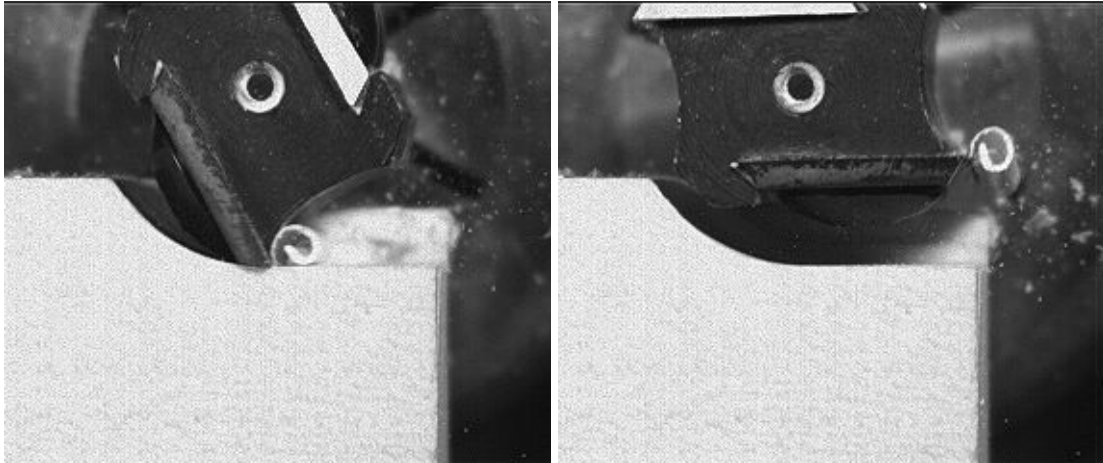
Pro tento experiment bylo použito masivní dřevo buku lesního (*Fagus sylvatica* L.) a plastická hmota - tzv. „umělé dřevo“ (*Ebaboard PW 920 neu*).

Cílem experimentu bylo zaznamenat rozdíl mezi samotným procesem vzniku třísek a průřezem utvořených třísek dřeva a plastické hmoty s použitím nižší a vyšší posuvové rychlosti.

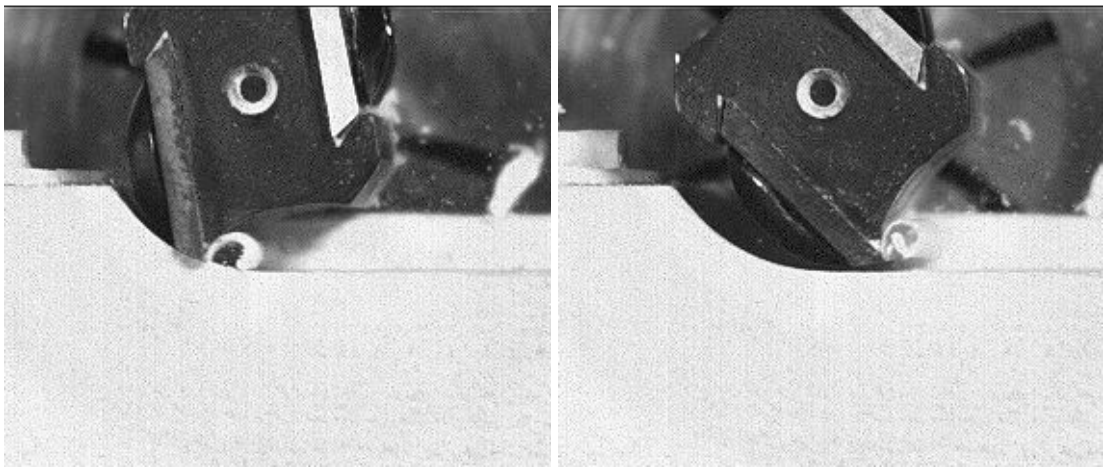


Obr. 58 Strojní a přístrojové vybavení

Pro snímání procesu utváření třísky byl použit vysokorychlostní kamerový systém *Olympus i-Speed 2* vybavený softwarem *Basic*. Maximální rychlost snímání 33000 snímků/s. Použitá frekvence snímků - 25 snímků/s. Záznam tvorby třísky byl pořízen jako video soubor ve formátu *.avi*, z něhož byly vytvořeny následující snímky.

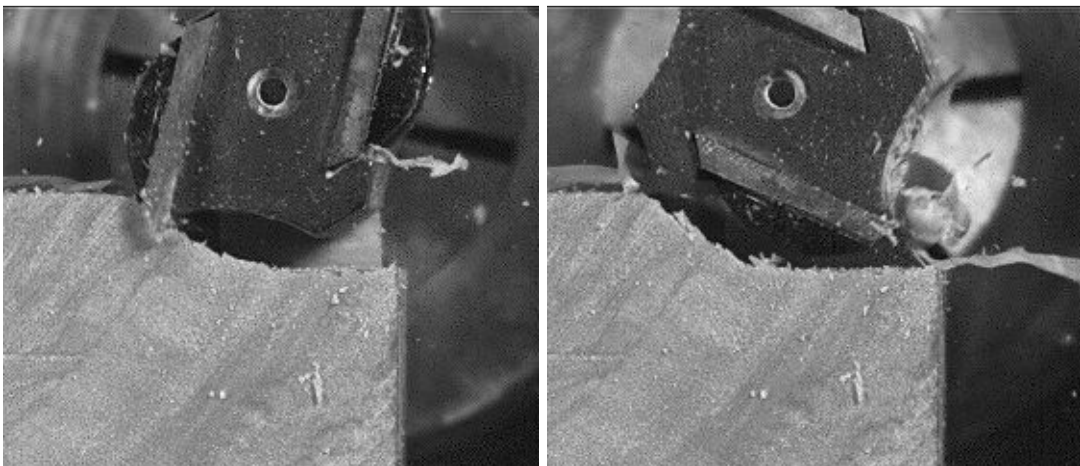


Obr. 59 Proces utváření třísky při obrábění buku, posuvová rychlost $v_f = 470 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

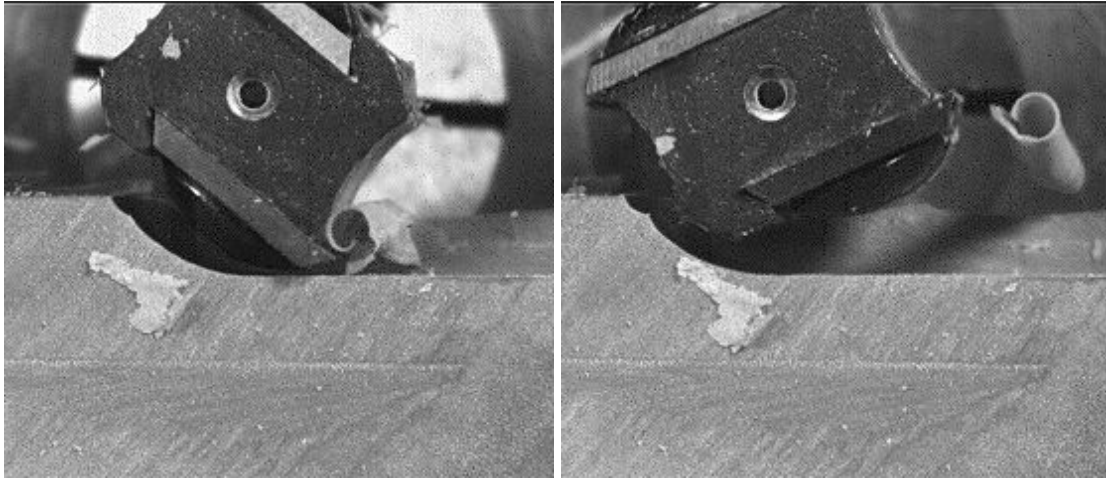


Obr. 60 Proces utváření třísky při obrábění buku, posuvová rychlost $v_f = 720 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Při obrábění bukového dřeva nedocházelo během opracování k zásadním změnám v průřezu třísky při použití nižší a vyšší posuvové rychlosti. Charakter obou třísek byl stejný, rozdíl nebyl viditelný ani na obrobené ploše.



Obr. 61 Proces utváření třísky při obrábění materiálu Ebaboard, posuvová rychlost $v_f = 470 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

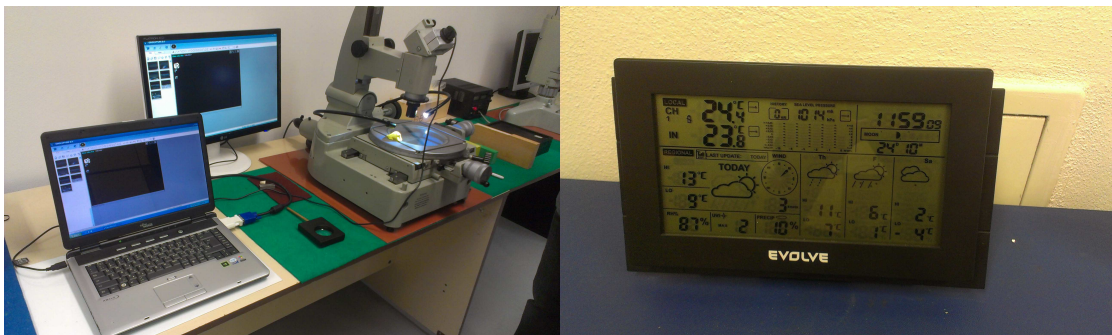


Obr. 62 Proces utváření třísky při obrábění materiálu Ebaboard, posuvová rychlost $v_f = 720 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Na snímcích 61 a 62 je však patrný rozdíl v utváření třísky při nižší a vyšší posuvové rychlosti plastické hmoty. Při obrábění materiálu Ebaboard při posuvové rychlosti $v_f = 470 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ převládala elastická deformace oddělovaného materiálu, která po překročení meze kluzu přešla v oddělení materiálu lomovým mechanismem. Důsledkem byl hrubý („potrhaný“) povrch obrobené plochy. Při zvýšení posuvové rychlosti na $v_f = 720 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ došlo ke změně charakteru třísky, na obráběném povrchu probíhaly plastické deformační procesy a obrobená plocha byla hladká.

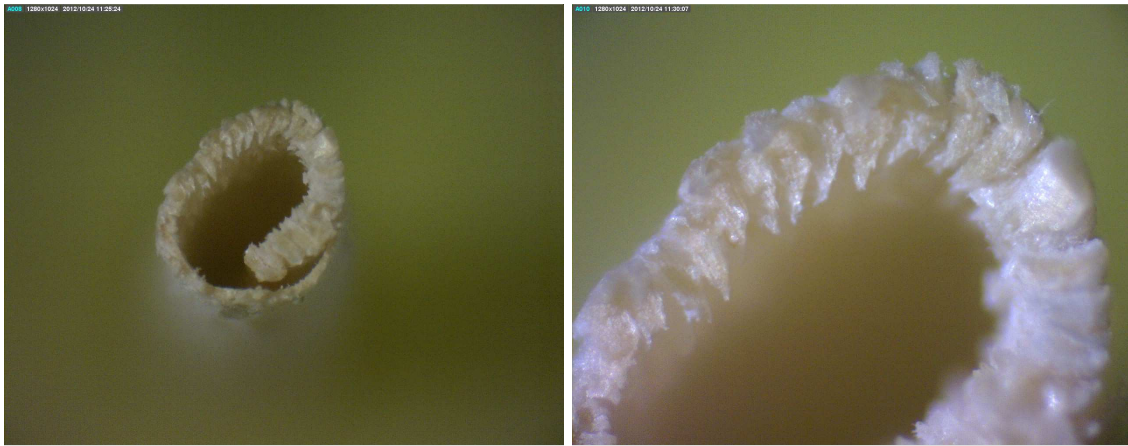
10.4.1.2 Snímky utvořených třísek pomocí digitálního mikroskopu

Vytvořené třísky a opotřeбенé břity byly následně nasnímány mikroskopem *Carl Zeiss* s digitálním objektivem a vyhodnocovacím systémem *Dino-Lite Pro* a zvětšeny desetkrát a třicetkrát. Snímání bylo prováděno v metrologické laboratoři s konstantní vlhkostí a teplotou.

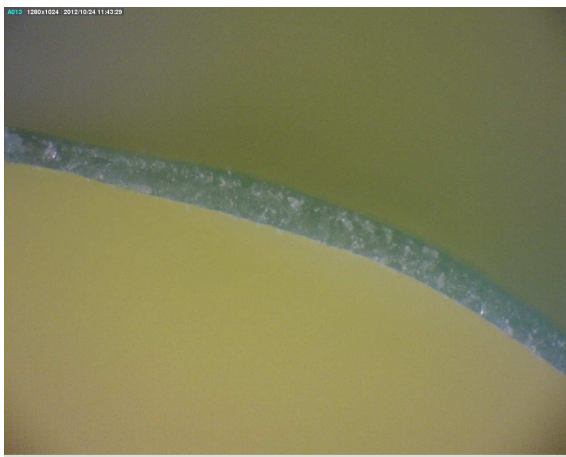


Obr. 63 Digitální mikroskop a podmínky laboratoře

Jednotlivé snímky byly pořízeny v rozlišení 1280 x 1024 pixelů.



Obr. 64 Snímky třísky buku lesního: vlevo zvětšení 10x, vpravo zvětšení 30x



Obr. 65 Snímek třísky materiálu Ebaboard, zvětšení 30x

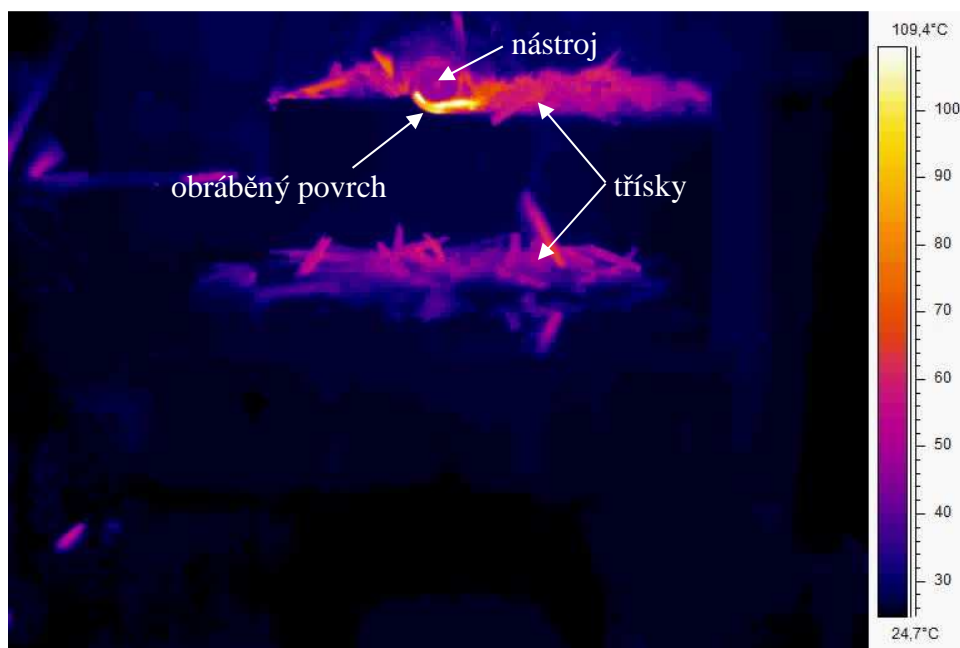
Tříska buku lesního vykazuje článkovitý charakter, je stočená a má proměnlivou tloušťku. Stočení třísky bylo způsobeno plastickou deformací materiálu na kontaktním povrchu s čelem nástroje. Podobné výsledky vykazují i třísky kovových houževnatých materiálů. Tříska plastické hmoty Ebaboard je naopak hladká a z větší části rovná.

10.4.1.3 Tepelná bilance v procesu obrábění

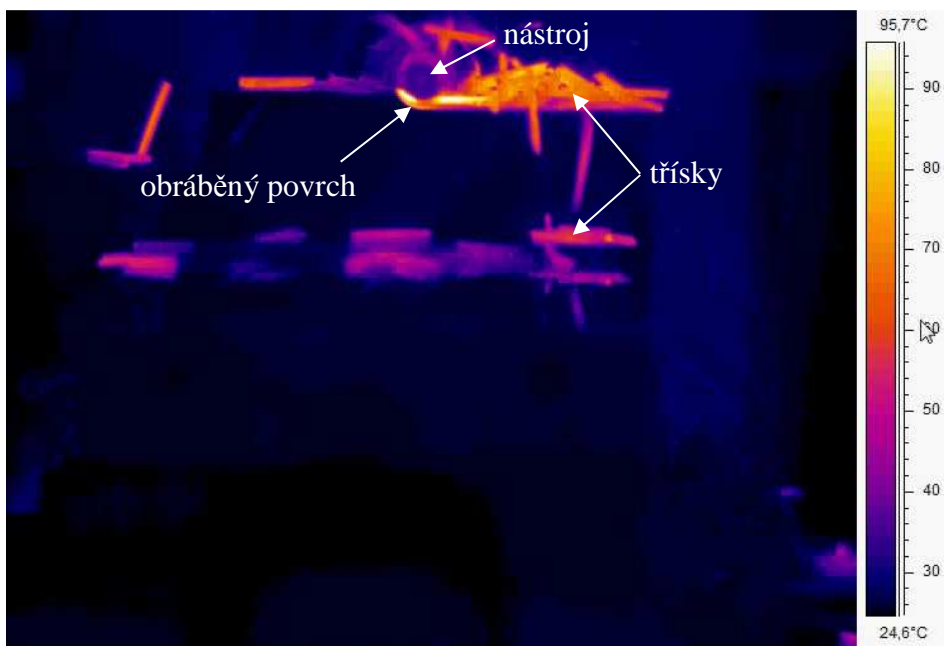
Další experiment byl zaměřen na tepelnou bilanci v procesu obrábění materiálů na bázi dřeva. Jednotlivé obráběné materiály byly snímány pomocí termokamery *FLIR 660*. Důraz byl kladen na problematiku rozložení teplotního pole při obrábění materiálů na bázi dřeva a pro srovnání byl rovněž snímán zástupce plastické hmoty a zástupce kovových materiálů. Cílem experimentu bylo porovnání jednotlivých druhů materiálů – masivní dřevo buku (*Fagus sylvatica* L.), plastická hmota - tzv. „umělé dřevo“ (*Ebaboard PW 920 neu*) a kov (*G.AL® C210R* – dural).

Určování tepelné bilance je důležité z energetického hlediska, ale také z hlediska opotřebení nástrojů. Přítomnost tepla může negativně ovlivňovat řezné vlastnosti nástroje, mechanické vlastnosti materiálu a proces utváření třísky. Současně má také vliv na deformační procesy oddělovaného materiálu na čele a hřbetě nástroje. Z toho důvodu bylo sledováno množství vzniklého a odvedeného tepla v daném místě a čase – tepelná bilance. (Šebelová a Chladil, 2013)

Stanovení teplotního pole pomocí termokamery bylo zvoleno z důvodu vizuálního potvrzení predikce rozložení tepla v procesu obrábění materiálů na bázi dřeva ve srovnání s kovovými materiály. Hodnoty teplot ve stupních Celsia jsou však pouze orientační. Pro přesné určení teplot by bylo nutné kameru zkalibrovat, zohlednit vzdálenost kamery od frézky a další faktory. Experiment byl uskutečněn pro představu rozložení vstupující a odváděné energie - tepla během obráběcího procesu a může sloužit jako podklad pro další přesné kalorimetrické měření.

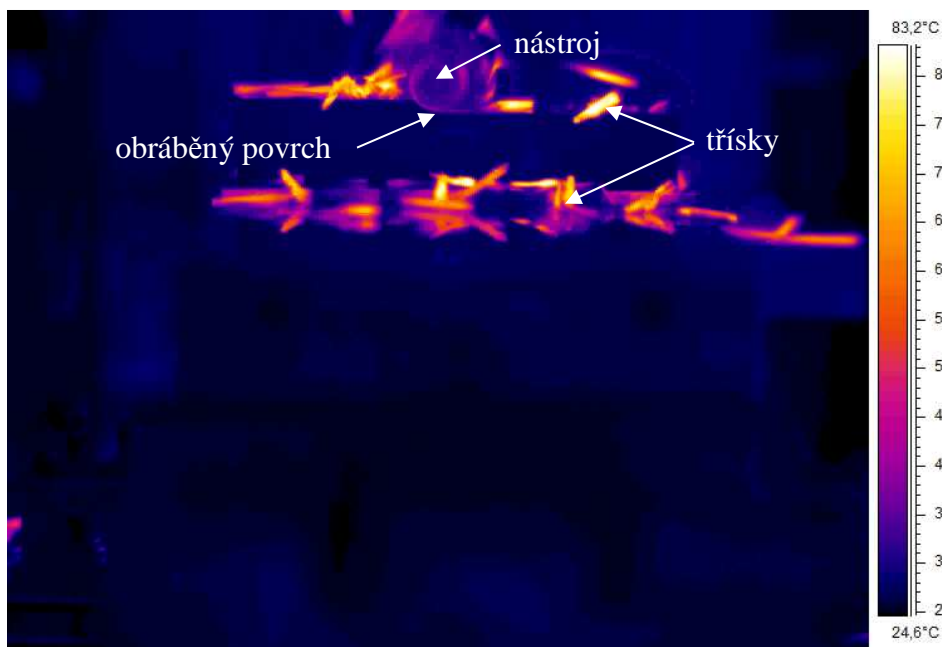


Obr. 66 Tepelná bilance při obrábění bukového dřeva, posuvová rychlost $v_f = 420 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



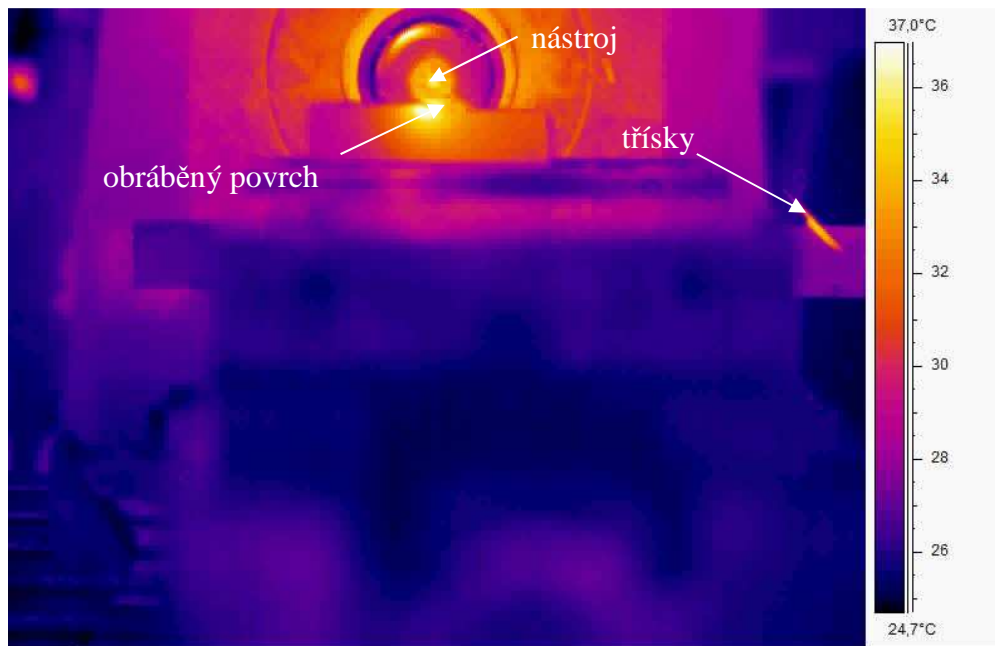
Obr. 67 Tepelná bilance při obrábění bukového dřeva, posuvová rychlost $v_f = 720 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Ze snímků 66 a 67 je patrné rozložení teplotního pole v obráběcím procesu dřeva, kdy teplo odchází především do povrchových vrstev obráběného materiálu a do třísek.



Obr. 68 Tepelná bilance při obrábění materiálu Ebaboard, posuvová rychlost $v_f = 720 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Při obrábění materiálu Ebaboard odcházelo teplo pouze do vytvořených třísek.



Obr. 69 Tepelná bilance při obrábění duralu, posuvová rychlost $v_f = 65 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Při obrábění duralu byla snížena posuvová rychlost $v_f = 65 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ i posuv na zub $f_z = 0,03 \text{ mm}$ z důvodu odlišných doporučených řezných podmínek pro obrábění kovů. Na snímku 69 je viditelné rozložení tepla, kdy teplo je odváděno do třísek a do obrobku v celém jeho průřezu, a následně i do nástroje. Dural byl použit pouze z důvodu možnosti srovnání jednotlivých materiálů.

10.4.2 FSI VUT Brno – Ústav strojírenské technologie

Ve spolupráci s FSI VUT Brno, Ústavem strojírenské technologie, odborem technologie obrábění byla změřena geometrie břitu řezného nástroje pomocí univerzálního dílenského mikroskopu *MWD*.

Naměřené hodnoty:

$$\alpha = 15^\circ$$

$$\beta = 55^\circ$$

$$\gamma = 20^\circ$$

S touto geometrií nástroje byla prováděna veškerá experimentální část této práce.



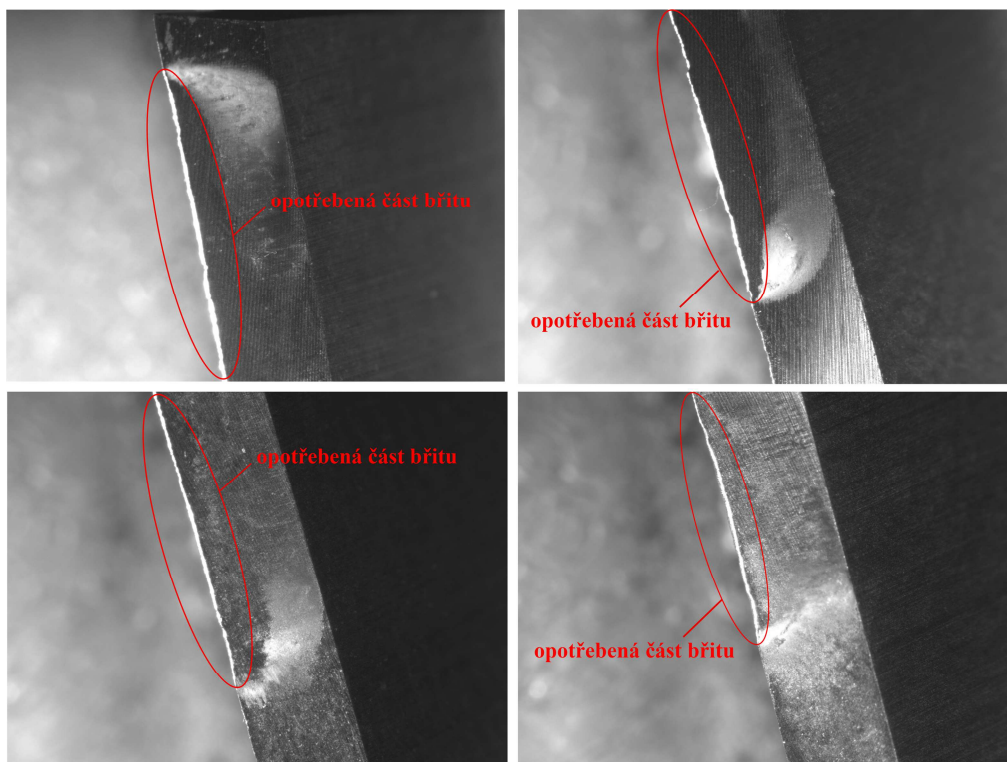
Obr. 70 Měření geometrie břitu řezného nástroje

Jestliže je správně zvolena geometrie řezného nástroje, je ovlivněna trvanlivost nástroje, pevnost břitu, přesnost a kvalita obrobené plochy a rozložení tepelného a silového zatížení nástroje. (Brychta a kol., 2007)

10.4.3 LDF Mendelu – Ústav nauky o dřevě

Na Mendelově univerzitě byly pořízeny fotografie opotřebení břitu pomocí stereomikroskopu *Leica S6D* s kamerou *Leica DFC 295*. Použitý software: *InfranView*. Na fotografiích níže jsou velmi zřetelná místa přechodu mezi ostrým a opotřebeným břitem, kdy opotřebená část je zobrazena jako lesklá plocha.

Dále bylo provedeno akustické měření procesu obrábění. Z naměřených hodnot však nebylo možné odfiltrovat frekvenci intenzity akustického signálu způsobenou opotřebením břitu nástroje. Tento experiment byl proveden za účelem zkoušky bezkontaktní metody určování opotřebení nástroje



Obr. 71 Fotografie opotřebeného břitu

11 OPTIMALIZACE PROCESU OBRÁBĚNÍ

11.1 Hodnota optimální trvanlivosti nástrojů pro minimální celkové náklady

Hodnota optimální trvanlivosti T_{opt} nástrojů pro minimální celkové náklady je stanovena rovnicí (8.25). Je určena náklady na 1 ostrý nástroj N_{IN} – rovnice (8.13 a 8.14), náklady na 1 hod práce na pracovišti D_S – rovnice (8.3) a exponentem m pro daný materiál.

Náklady na 1 ostrý nástroj N_{IN} jsou určeny pořizovací cenou nástroje a jeho zbytkovou hodnotou, počtem možných použití nástroje a náklady na břitové destičky na 1 ostrý nástroj včetně výměny.

Uvedené hodnoty v následujících výpočtech byly vztaženy ke konkrétnímu případu, kdy cena nástroje odpovídá ceně pořízení frézy *FRSTHW 19x30x12z2 žil.* pro projekt IGA 33/2012 (1430 Kč), jehož zbytková hodnota nebyla uvažována. Počet možných použití nástroje byl určen na 200 na základě expertního posouzení dodavatele tohoto řezného nástroje. Náklady na břitové destičky na 1 ostrý nástroj byly vyjádřeny počtem břitových destiček na nástroji (2), počtem ostří na 1 břitové destičce (2) a cenou 1 vyměnitelné destičky *HW 29,5x12x1,5 4s T04F* zakoupené pro projekt IGA 33/2012 (87,36 Kč).

$$N_{IN} = \frac{1430 - 0}{200} + \frac{2 \cdot 87,36}{2} \quad (11.1)$$

$$N_{IN} = 94,51 \quad [\text{Kč}] \quad (11.2)$$

Náklady na 1 hod práce na pracovišti D_S jsou definovány mzdou dělníka a režijními náklady pracoviště. Mzda dělníka byla stanovena na 200 Kč/hod a režijní náklady pracoviště byly zvoleny na 500%.

$$D_S = 200 \cdot \left(1 + \frac{500}{100} \right) \quad (11.3)$$

$$D_S = 1200 \quad [\text{Kč}] \quad (11.4)$$

Po dosažení vypočítaných hodnot do rovnice (8.25) byla vypočítána hodnota optimální trvanlivosti nástroje T_{opt} pro minimální celkové náklady. Exponent

$m = 2,14527$ je hodnota $tg \alpha$ závislosti $T = f(v_c)$ pro materiál DTD-L. Byl vybrán z důvodu nejvyššího počtu naměřených dat u materiálů na bázi dřeva.

$$T_{opt} = \frac{60 \cdot 94,51}{1200} (2,14527 - 1) \quad (11.5)$$

$$\boxed{T_{opt} = 5,41 \text{ [min]}} \quad (11.6)$$

11.2 Hodnota optimální trvanlivosti nástrojů pro maximální výrobnost

Hodnota optimální trvanlivosti T_{opt} nástrojů pro maximální produktivitu je stanovena rovnicí (8.35). Je určena časem výměny nástroje $t_{vým}$ a exponentem m pro daný materiál.

Čas výměny nástroje byl určen na 1,2 min a byl zvolen exponent m materiálu DTD-L. Po dosazení hodnot do rovnice (8.35) byla vypočítána hodnota optimální trvanlivosti nástroje T_{opt} pro maximální výrobnost.

$$T_{opt.} = 1,2 \cdot (2,14527 - 1) \quad (11.7)$$

$$\boxed{T_{opt.} = 1,37 \text{ [min]}} \quad (11.8)$$

Uvedené hodnoty jsou pouze orientační a veškeré hodnoty uvedené ve výpočtech by bylo nutné aplikovat na konkrétní pracoviště. Jedná se zejména o hodnotu nákladů na 1 ostrý nástroj zahrnující cenu nástrojů a břitových destiček, mzdu pracovníka a režijní náklady pracoviště i např. čas výměny nástroje, který je závislý na konkrétním obráběcím stroji. Výpočty tak slouží jako příklad postupu stanovení optimálních řezných podmínek obrábění, resp. řezné rychlosti.

11.3 Stanovení optimálních řezných podmínek z hlediska minimálních nákladů

Optimální řezná rychlost při obrábění materiálů na bázi dřeva z hlediska minimálních nákladů je vypočítána dosazením do Taylorova vztahu (6.3). Je určen konstantou C_V vybraného materiálu, optimální trvanlivostí nástrojů $T_{opt.}$ (11.6) a exponentem m pro daný materiál.

11.3.1 Materiál DTD-L

Hodnoty C_V a m jsou uvedeny v tabulce 17.

$$v_c = 3328,38 \cdot 5,41^{\frac{1}{2,14527}} \quad (11.9)$$

$$v_c \approx 1515 \quad [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (11.10)$$

11.3.2 Materiál MDF

Hodnoty C_V a m jsou uvedeny v tabulce 19.

$$v_c = 6472,65 \cdot 5,41^{\frac{1}{2,11557}} \quad (11.11)$$

$$v_c \approx 2914 \quad [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (11.12)$$

11.3.3 Materiál PDP

Hodnoty C_V a m jsou uvedeny v tabulce 29.

$$v_c = 545,33 \cdot 5,41^{\frac{1}{2,74033}} \quad (11.13)$$

$$v_c \approx 295 \quad [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (11.14)$$

11.4 Stanovení optimálních řezných podmínek z hlediska maximální výrobnosti

Optimální řezná rychlost při obrábění materiálů na bázi dřeva z hlediska minimálních nákladů je vypočítána dosazením do Taylorova vztahu (6.3). Je určen konstantou C_V vybraného materiálu, optimální trvanlivostí nástrojů $T_{opt.}$ (11.8) a exponentem m pro daný materiál.

11.4.1 Materiál DTD-L

Hodnoty C_V a m jsou uvedeny v tabulce 17.

$$v_c = 3328,38 \cdot 1,37^{\frac{1}{2,14527}} \quad (11.15)$$

$$v_c \approx 2874 \quad [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (11.16)$$

11.4.2 Materiál MDF

Hodnoty C_V a m jsou uvedeny v tabulce 19.

$$v_c = 6472,65 \cdot 1,37^{\frac{1}{2,11557}} \quad (11.17)$$

$$v_c \approx 5578 \quad [m \cdot min^{-1}] \quad (11.18)$$

11.4.3 Materiál PDP

Hodnoty C_V a m jsou uvedeny v tabulce 29.

$$v_c = 545,33 \cdot 1,37^{\frac{1}{2,74033}} \quad (11.19)$$

$$v_c \approx 486 \quad [m \cdot min^{-1}] \quad (11.20)$$

Výpočet optimálních řezných rychlostí pro jednotlivé materiály na bázi dřeva jak z hlediska minimálních nákladů, tak z hlediska maximální produktivity odpovídá použitým řezným podmínkám s posuvem na zub ($f_z = 0,05 \text{ mm}$), počtem zubů ($z = 2$) a průměrem frézy ($D = 19 \text{ mm}$).

12 DISKUZE

Tato disertační práce zahrnuje pilotní experimentální měření obrobiteľnosti třech zástupců materiálů na bázi dřeva – dřevotřískové desky laminované, dřevovláknité desky se střední hustotou a překližované desky. Následně je řešena optimalizace obráběcího procesu na základě dvou hledisek, kdy je optimalizována řezná rychlost jednak z hlediska minimálních nákladů na výrobu daného počtu součástí a jednak z hlediska maximální výrobnosti daného počtu součástí.

Tato problematika však dosud nebyla nikdy zkoumána u materiálů na bázi dřeva, proto sestavení metodiky práce a jednotlivé postupy měření vycházely z teorie obrábění kovů. Z toho důvodu je teoretická část práce zaměřena na celkový přehled o problematice, od poznatků o materiálech přes teorii obrábění materiálů, vzájemné interakci mezi nástrojem a obrobkem až po proces opotřebování nástrojů, trvanlivost břitů a stanovení obrobiteľnosti jednotlivých zkoušených materiálů. Následuje teorie o optimalizaci řezných podmínek při obrábění materiálů na bázi dřeva.

Materiály na bázi dřeva byly v této práci zařazeny do skupiny materiálů pod označením „w“. Označení tímto písmenem bylo vybráno kvůli asociaci s anglickým termínem „wood“ a „wood-based materials“. Materiál DTD-L jako referenční vzorek byl zvolen po konzultaci na základě doporučení odborníka doc. Dr. Ing. Pavla Krále. Tento materiál je nejrozšířenější v dřevařském průmyslu a vyrábí se v největších objemech.

Vzhledem k tomu, že měření obrobiteľnosti materiálů na bázi dřeva nebylo nikdy dříve provedeno, byla pro referenční vzorek zvolena nejdříve třída 11 w jako „zkušební třída“. Po naměření většího množství výsledků bylo jeho zařazení upraveno do třídy 14 w proto, aby byl zachován střed pásma nejvyužívanějších tříd materiálů – tzn. 6 – 16.

Dalším krokem pro stanovení obrobiteľnosti materiálů na bázi dřeva byla změna postupu samotného měření bez nutnosti demontáže břitů z nástroje. Byl navržen měřicí přípravek pro upevnění celého nástroje, který zajišťoval zvýšení přesnosti měření a snížení velmi vysoké časové náročnosti experimentu. V projektu IGA 33/2012 byl použit přístroj *Passametr Somet*, který měřil úchyly od původního rozměru břitu. Z toho důvodu bylo nutné po každém měření břity demontovat z nástroje a po odečtení opotřebení oba břity upevnit zpět na frézu.

Vlastní konstrukční návrh přípravku umožnil upevnění celé frézy do přípravku a odečtení opotřebení na digitálním číselníkovém úchylkoměru bez nutnosti demontáže břitů. Také zajistil vždy přesnou polohu nástroje vůči měřicímu dotyku. Tím se výrazně zpřesnilo měření a snížil se čas manipulace s nástrojem. Navíc je tento přípravek univerzální a je navržen pro frézy běžných rozměrů.

Ideální by však bylo měřicí zařízení, které by bylo nainstalováno přímo na CNC stroji, a odchylky opotřebení břitu by byly odečitatelné přímo ze stroje. Tím by došlo ještě k výraznějšímu snížení časové náročnosti experimentu. Ovšem takové zařízení vyžaduje bezkontaktní měření na principu laseru a mimo to je nezbytná přesnost měření v mikrometrech. Tyto požadavky jsou značně náročné na konstrukci a z toho důvodu bylo dostačující řešení měření opotřebení pomocí měřícího přípravku s tisícínovým úchylkoměrem.

Vzhledem k tomu, že veškerá měření bylo možné provádět pouze s odbornou obsluhou obráběcího stroje, byly veškeré experimenty podřízeny časovým možnostem odborného pracovníka. Dále je nutné zdůraznit, že samotné měření opotřebení břitů při obrábění všech vybraných materiálů bylo velmi náročné jak časově, tak finančně a také materiálově. Jako příklad lze uvést měření opotřebení nástroje u materiálu MDF, kdy z grafu průběhu závislosti $KR = f(T)$ (obr. 42) vyplývá, že stanovená míra opotřebení $10 \mu\text{m}$ od původní hodnoty rozměru břitu vychází při řezné rychlosti $v_c = 716 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ až v čase 105 min . K tomuto času je nutné připočítat pohyb stroje bez zátěže a měření opotřebení nástroje po každé sérii zátěží. Výsledný čas celého měření je potom prakticky mnohonásobně vyšší. Z toho důvodu je tato práce založena na statisticky méně významném množství měření, avšak vyhovujícím z hlediska ověření metodiky.

V budoucnu by bylo třeba se zaměřit na zvýšení počtu statistických dat, zvýšení počtu měření a porovnání většího množství materiálů. Dále by bylo třeba provést další měření s použitím jiných řezných materiálů a pracovních podmínek. Při provedení dalších experimentů s proměnnými řeznými podmínkami (a_p , f_z , z , D apod.) by byla rozšířena optimalizace řezných podmínek o vztahy mezi těmito technologickými podmínkami.

13 ZÁVĚR

V disertační práci byly zkoušeny 3 zástupci materiálů na bázi dřeva – dřevotřísková deska laminovaná (DTD-L), dřevovláknitá deska se střední hustotou (MDF) a překližovaná deska (PDP). Tyto materiály byly zařazeny do skupiny materiálů označené písmenem „w“.

U všech materiálů bylo v procesu obrábění měřeno radiální opotřebení, z naměřených výsledků byly zpracovány tabulky hodnot a z nich grafy křivek opotřebení zobrazující jednotlivé řezné rychlosti při obrábění. Dále byla zvolena míra opotřebení stanovená na $KR = 10\mu m$. Na osu x byly vyneseny jednotlivé trvanlivosti $T_1 \div T_n$ odpovídající průsečíku zvoleného kritéria s křivkou opotřebení dané řezné rychlosti.

Poté byla stanovena závislost trvanlivosti břitu na míře opotřebení v závislosti trvanlivost – řezná rychlost. Hodnoty T a v_c byly převedeny na logaritmy a zaneseny do grafu $T = f(v_c)$ a následně byla použita aplikace statistické metody lineární regrese, kdy jednotlivé trvanlivosti v logaritmických souřadnicích byly proloženy přímkou se směrnicí a . Poté byl vypočítán exponent m a konstanty C_T a C_V .

Tab. 35 Tabulka hodnot exponentu m a konstant C_T a C_V pro jednotlivé materiály

DTD-L		MDF		PDP	
m	2,14527	m	2,11557	m	2,74033
C_T	35985410	C_T	115505891	C_T	31574268
C_V	3328,38	C_V	6472,65	C_V	545,33

Pro zařazení materiálů do třídy obrobitelnosti byl určen referenční vzorek – materiál DTD – L pro porovnávání s ostatními vzorky a na základě měření všech materiálů byl zařazen do třídy obrobitelnosti 14.

Následně byl zpracován průběh závislosti $T = f(v_c)$ pro materiály – DTD-L a MDF se zvolenou trvanlivostí $\log T = 1,65$, tj. $T = 44,7 \text{ min}$ a DTD-L a PDP se zvolenou trvanlivostí $\log T = 1$, tj. $T = 10 \text{ min}$. Dále byly vypočítány odpovídající řezné rychlosti při zvolených trvanlivostech a byl vypočítán index kinetické obrobitelnosti K_V .

Hodnota indexu kinetické obrobitelnosti pro dřevotřískovou desku (referenční vzorek) odpovídá hodnotě $K_V = 1$, pro dřevovláknitou desku se střední hustotou odpovídá hodnotě $K_V = 1,899$ a pro překližovanou desku hodnotě $K_V = 0,207$.

Tab. 36 Tabulka hodnot výpočtu indexů kinetické obrábivosti pro jednotlivé materiály

DTD-L vs. MDF			DTD-L vs. PDP		
	log	10 ^x		log	10 ^x
T	1,65	44,7	T	1	10
v _c ref. vzorek (DTD)	2,75310	566	v _c ref. vzorek (DTD)	3,05609	1138
v _c zk. mat (MDF)	3,03115	1074	v _c zk. mat (PDP)	2,37173	235
K_v	1,899		K_v	0,207	

Zařazení materiálů do třídy obrábivosti na základě zvolené třídy 14 pro referenční vzorek (DTD-L) tedy odpovídá třídě 17 (kvocient 1,26³) pro MDF a třídě 7 (kvocient 1,26⁻⁷) pro PDP.

Tab. 37 Tabulka zatřídění materiálů se zařazením ref. vzorku do třídy 14

Materiál	Třída obrábivosti	Střední hodnota K _v	Rozsah K _v	Kvocient
PDP	7	0,20	0,19 – 0,22	1,26 ⁻⁷
	8	0,25	0,23 – 0,28	1,26 ⁻⁶
	9	0,32	0,29 – 0,35	1,26 ⁻⁵
	10	0,40	0,36 – 0,44	1,26 ⁻⁴
	11	0,50	0,45 – 0,56	1,26 ⁻³
	12	0,63	0,57 – 0,71	1,26 ⁻²
	13	0,80	0,72 – 0,89	1,26 ⁻¹
DTD-L	14	1,00	0,90 – 1,12	1,26⁰
	15	1,26	1,13 – 1,41	1,26 ¹
	16	1,59	1,42 – 1,78	1,26 ²
MDF	17	2,00	1,79 – 2,24	1,26 ³

Na základě rozdělení materiálů z hlediska jejich obrábivosti byla pak provedena optimalizace řezných podmínek, resp. řezné rychlosti, pro obrábění materiálů na bázi dřeva, která byla posuzována ze dvou hledisek. První hledisko bylo zaměřeno na ekonomičnost procesu řezání, kdy byly sledovány náklady na řezný proces. Druhé hledisko se zabývalo produktivitou obrábění, kdy byl sledován minimální čas na výrobu daného počtu součástí.

Optimální řezné rychlosti při obrábění materiálů na bázi dřeva z hlediska minimálních nákladů byly vypočítány podle Taylorova vztahu (6.3). Jednotlivé členy rovnice (C_v , m) byly vztaženy vždy ke konkrétnímu materiálu (DTD-L, MDF, PDP) a za T byla dosazena optimální trvanlivost nástrojů T_{opt} (11.6) pro minimální náklady.

Tab. 38 Tabulka hodnot optimálních řezných rychlostí z hlediska minimálních nákladů

	DTD-L	MDF	PDP
v _c [m · min ⁻¹]	1515	2914	295

Stejným způsobem byly vypočítány optimální řezné rychlosti při obrábění těchto materiálů z hlediska maximální výrobnosti, avšak za T byla dosazena optimální trvanlivost nástrojů T_{opt} (11.8) pro minimální výrobní čas.

Tab. 39 Tabulka hodnot optimálních řezných rychlostí z hlediska maximální výrobnosti

	DTD-L	MDF	PDP
v_c [$m \cdot min^{-1}$]	2874	5578	486

Výpočet všech optimálních řezných rychlostí pro jednotlivé materiály – DTD-L, MDF a PDP jak z hlediska minimálních nákladů, tak z hlediska maximální výrobnosti odpovídá použitým řezným podmínkám: posuv na zub ($f_z = 0,05$ mm), počet zubů ($z = 2$) a průměr frézy ($D = 19$ mm).

Optimalizace procesu obrábění souvisí se stanovením optimálních řezných podmínek. V této disertační práci se tento proces omezil na určení optimální řezné rychlosti v souvislosti s definovanou trvanlivostí řezného nástroje. Tato práce slouží jako metodický postup pro stanovení obrobiteľnosti materiálů na bázi dřeva a optimalizaci řezného procesu.

14 SUMMARY

In the doctoral thesis three representatives of wood-based materials - laminated chipboard (DTD-L), medium density fibreboard (MDF) and plywood (PDP) were tested. These materials were placed in the group of materials marked with the letter "w".

During machining process the radial tool wear was measured. From the measured results tables of values and tool wear curves diagrams were processed showing the individual cutting speeds. In addition, the tool wear rate became a default value for tool life-time determination. This value was defined as divergence of $10 \mu m$ from original dimension value of the blade. On the x axis the individual tool-lives corresponding to the intersection with tool wear rate and the curve of the selected cutting speed were plotted.

Then the dependence of tool life-time using tool wear rate vs. cutting speed was determined. Individual tool-life values T and cutting speeds v_c were transferred into logarithmic coordinates and plotted into diagram $\log T = f(\log v_c)$. Subsequently statistical method of linear regression was applied when individual tool-lives in logarithmic coordinates were interpolated by a line with the slope a . Exponent m and constant C_T and C_V were then calculated.

For material classification the reference sample which would be default value for comparison with other materials was defined. There was selected laminated chipboard and based on all material measurement were classified to the class of machinability – No.14.

Subsequently, the course of dependence $\log T = f(\log v_c)$ was processed for DTD-L and MDF materials with selected life-time $\log T = 1.65$, i.e. $T = 44,7 \text{ min}$ and DTD-L a PDP with selected life-time $\log T = 1$, i.e. $T = 10 \text{ min}$. Determination of the corresponding cutting speeds at selected tool-lives was calculated. Then index of kinetic machinability K_V was calculated.

Index of kinetic machinability for laminated chipboard corresponds to the value of $K_V = 1$, for medium density fibreboard corresponds to $K_V = 1,899$ and for plywood corresponds to $K_V = 0,207$.

Material classification of machinability based on selected class for reference sample (DTD-L) as class No. 14 then corresponds to the class No. 17 for MDF and class No. 7 for PDP.

Based on the material selection in terms of their machinability the optimization of cutting conditions, respectively cutting speed, was processed for wood based material machining which have been assessed from two aspects. The first aspect has been focused on economy of the cutting process which was monitored costs of cutting process. The second aspect dealt with machining productivity which was based on minimal time to manufacture prescribed number of workpieces.

Optimal cutting speeds during wood-based materials machining in terms of minimum costs were calculated by Taylor's equation. Individual members of the equations (C_V , m) were related to the particular material (DTD-L, MDF, PDP) and optimal tool-life T_{opt} for minimum costs. Optimal cutting speeds during wood-based materials machining in terms of maximum productivity were calculated in the same way but with optimal tool-life T_{opt} for minimum cutting time.

Calculation of optimal cutting speeds for all materials - DTD-L, MDF and PDP both in terms of minimum cost and in terms of maximum productivity corresponds to used cutting conditions: feed per tooth ($f_z = 0.05 \text{ mm}$), the number of teeth ($z = 2$) and diameter of flat-end-mill ($D = 19 \text{ mm}$).

Machining process optimization related to the determination of optimal cutting conditions. In the thesis, the process was limited to determination of optimal cutting speed in relation to defined tool-life. This work serves as a methodological procedure for machinability determining of wood-based materials and the optimization of the cutting process.

15 PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY

APRO, K., 2009. Secrets of 5-axis machining. New York, Industrial Press, 172 p. ISBN 08-311-3375-9.

ASTAKHOV, V. P., 2004. The assessment of cutting tool wear. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44 (6). 637-647. DOI:

10.1016/j.ijmachtools.2003.11.006. Dostupné na World Wide Web:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695503003122>

BAKER, W. A., 2002. Wood Structural Panels in Wood Handbook, APA – The Engineered Wood Association. McGraw-Hill Companies, Inc. ISBN 0-07-136029-8.

BERGMAN, R. et al., 2010. Wood handbook—Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p.

BÍLEK, O., LUKOVICS, I., ROKYTA, L. 2011. Manufacturing of Thermoplastics and Chip Formation. Chemické listy, 105 (15). 317-319. ISSN 0009-2770.

BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J., 2012. Materiály na bázi dřeva. Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2251-6.

BRYCHTA, J. a kol., 2007. Nové směry v progresivním obrábění [online] citováno 20. července 2014. Dostupné na World Wide Web:

<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>

BRYCHTA, J., DUPALA, O., ČEP, R., 2010. Nové metody stanovování obrobiteľnosti (New Methods for Determining the Machinability). Technologické inžinierstvo, Vědeckotechnická společnost při Žilinské univerzitě, 3-5.

BRYCHTA, J., SADÍLEK, M., ČEP, R., PETRŮ, J., 2011. Progresivní metody obrábění [online] citováno 20. července 2014. Dostupné na World Wide Web: http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/Progresivni_metody_v_obrabeni_FINAL.pdf

BUMBÁLEK, L., 2009. Kontrola a měření pro SPŠ strojní. Vyd. 1. Praha, Informatorium, 206 s. ISBN 978-80-7333-072-9.

CSANÁDY, E., MAGOSS, E., 2012. Mechanics of wood machining. New York, Springer, 199 p. ISBN 978-3-642-29954-4.

ČEP, R., 2005. Zkoušky nástrojů z řezné keramiky při přerušovaném řezu, doktorská disertační práce. Ostrava, Fakulta strojní VŠB-TU Ostrava.

ČEP, R., 2007. Technologie II [online] citováno 24. července 2014. Dostupné na World Wide Web: < http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf >

ČEP, R., PETRŮ, J., 2011. Experimentální metody v obrábění [online] citováno 12. července 2014. Dostupné na World Wide Web: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_komplet_finish.pdf

DAVIM, J. P., 2008. Machining: fundamentals and recent advances. London, Springer, XIII, 375 p. ISBN 978-1-84800-212-8.

DOWDY, S., WEARDEN S.; CHILKO D., 2004. Statistics for research. 3rd ed. Hoboken, N.J., Wiley-Interscience, xvi, 627 p. ISBN 04-712-6735-X.

FOREJT, M., 2006. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno, Akademické nakladatelství CERM, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HAHN, G. J.; SHAPIRO S. S., 1994. Statistical models in engineering. Wiley classics library ed. New York, Wiley, (16). 355 p. ISBN 04-710-4065-7.

HARNIČÁROVÁ, M., 2013. Comparison of non-traditional technologies for material cutting from the point of view of surface roughness. The international journal of advanced manufacturing technology, Springer, 81-91.

HRÁZSKÝ, J., KRÁL, P., 2007. Kompozitní materiály na bázi dřeva. Část I. Aglomerované materiály. 1. vyd. Brno, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 253 s. ISBN 978-80-7375-034-3.

HUMÁR, A., 2003. Technologie I: Technologie obrábění – 1. část. Studijní opory pro magisterskou formu studia [online] citováno 11. března 2014. Dostupné na World Wide Web: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf

HUMÁR, A., 2003. Technologie I: Technologie obrábění – 2. část. Studijní opory pro magisterskou formu studia [online] citováno 11. března 2014. Dostupné na World Wide Web: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf

HUMÁR, A., 2006. Materiály pro řezné nástroje. Interaktivní multimediální text pro všechny studijní programy FSI [online] citováno 11. dubna 2014. Dostupné na World Wide Web: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf

HUMÁR, A., 2008. Materiály pro řezné nástroje. Vyd. 1. Praha, MM Publishing, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

CHLADIL, J., 2006. Otupení nástrojů při obrábění materiálů na bázi dřeva. In Nástroje 2006 – „V. International Tool Conference“. 1. vyd. Zlín, UTB Zlín, p. 5. ISBN 80-7318-448-6

CHLADIL, J., 2010. Rychlostní poměry při CNC obrábění rovinných křivek. Strojářská technologie, 15 (3). 48-51. ISSN 1211-4162.

JOSTEN, E., REICHE, T., WITTCHEM, B., 2010. Dřevo a jeho obrábění. 1. vyd. Praha, Grada, 333s. ISBN 978-80-247-2961-9.

- KLOCKE, F., KUCHLE, A., 2011. Manufacturing processes 1: turning, milling, drilling. New York, Springer, 524 p. ISBN 978-364-2119-781.
- KOCMAN, K., 2011. Technologické procesy obrábění. Vyd. 1. Brno, Akademické nakladatelství CERM, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- KRÁL, P., HRÁZSKÝ, J., 2008. Není dřevo jako dřevo. In: VODIČKOVÁ, E. Vše o dřevě v interiéru a exteriéru. Renovujeme, stavíme, zařizujeme. Bratislava, Jaga group. 22-29.
- MÁDL, J., HOLEŠOVSKÝ, F., 2008. Integrita obrobených povrchů z hlediska funkčních vlastností. Vyd. 1. Ústí nad Labem, Universita J. E. Pukryně, FVTM, 230 s. ISBN 978-80-7414-095-2.
- MÁDL, J., KVASNIČKA, I., 1999. Optimalizace obráběcího procesu, Praha: ČVUT.
- MASUDA, M., KUROSHIMA, Y., CHUJO, Y., 1996. The machinability of sintered carbons based on the correlation between tool wear rate and physical and mechanical properties. Wear, vol. 195, 1-2, p. 178-185. DOI: 10.1016/0043-1648(95)06832-5.
Dostupné na World Wide Web:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0043164895068325>
- MELOUN, M., MILITKÝ J., 1994. Statistické zpracování experimentálních dat. Praha, Plus.
- OTIPKA, P., ŠMAJSTRLA, V., 2008. Pravděpodobnost a statistika [online] citováno 21. července 2014. Dostupné na World Wide Web: <http://homen.vsb.cz/~oti73/cdpast1/>
- PÍŠKA, M., FOREJT, M., HUMÁR, A., JANÍČEK, D., 2003. Experimentální metody – syllabus. Brno, VUT Brno, 83 s.
- PROKEŠ, S., 1978. Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva. 2., přeprac. vyd. Praha, Státní nakladatelství technické literatury, 583 s.

RŮŽIČKA, L., LATTNER, M., MÁDL, J., 2011. Obrobitelnost hliníkových slitin a krátkodobé zkoušky obrobitelnosti. *Strojírenská technologie*. 16 (4). 76-81.

SHAW, M. C., 2005. *Metal cutting principles*. 2nd ed. New York, Oxford University Press. ISBN 01-951-4206-3.

SZLAUR, V., 2012. Analýza procesů obrábění kovových materiálů se zaměřením na energetické aspekty [online] citováno 22. července 2014. Dostupné na World Wide Web: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55049

ŠEBELOVÁ, E., CHLADIL, J. 2013. Optimalizace obrábění materiálů na bázi dřeva. In Sborník z konference „Trendy v nábytkářství a bydlení 2013“. Brno, Mendelova univerzita v Brně. ISBN 978-80-7375-756-4. 188-193.

ŠEBELOVÁ, E., CHLADIL, J. 2013. Tepelná bilance v procesu obrábění materiálů na bázi dřeva. *Stavební partner*, 1 (4). 12-14. ISSN 1805-5958. Dostupné na World Wide Web: <http://partnerstvi-stavebnictvi.msdk.cz/emagazin/2013-04/>

ŠEBELOVÁ, E., CHLADIL, J., 2013. Řezný proces a obrobitelnost materiálů na bázi dřeva. *Strojírenská technologie*. 18 (3). 193-198. ISSN 1211-4162.

ŠEBELOVÁ, E., CHLADIL, J., 2013. Tool Wear and Machinability of Wood-based Materials during Machining Process. *Manufacturing Technology*. 13 (2). 231-236. ISSN 1213-2489.

ŠEBELOVÁ, E., CHLADIL, J., 2014. Study of the Tool Wear Process in the Machining of Non-Metallic Materials. In *ERIN 2014*. 1. vyd. Brno, Litera Brno. ISBN 978-80-214-4931-2.

ŠEBELOVÁ, E., KOPECKÝ, Z., 2013. Problems of tool wear while cutting wood-based materials. In *FORTECHENVI 2013*. 1. vyd. Novotného lávka 5, Praha 1, Orit, s.r.o., 220-221. ISBN 978-80-02-02467-5.

ŠLEZINGEROVÁ, J., GANDELOVÁ, L., 2005. Stavba dřeva. Dotisk. Brno, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 187 s. ISBN 978-80-7157-636-5.

THOEMEN, H., IRLE, M., SERNEK, M., 2010. Wood-based Panels - An Introduction for Specialists. Uxbridge, Brunel University Press, 283 p. ISBN 978-190-2316-826.

VARKOČEK, J., HOLOPÍREK, J., ROUSEK, M., 2004. Dělení, obrábění a tváření materiálů. 2. vyd. Brno, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 117 s. ISBN 80-7157-759-6.

VASILKO, K., HRUBÝ, J., LIPTÁK, J., 1991. Technológia obrábania a montáže. Bratislava, Alfa Bratislava, 496 s. ISBN 80-05-00807-4.

VASILKO, K., 2010. The Wood requires Orthogonal Cutting. Manufacturing Technology, 10 (12). 39-45. ISSN 1213-2489.

ŽIŽKA, J., 2011. Cutting Tool Wear Determination by Measuring Tool Shank Deformation. Strojírenská technologie, 16.(6). 59-64. ISSN 1211-4162.

Přehled použitých norem

ČSN EN 312: Třískové desky – Požadavky, 2004. Český normalizační institut.

ČSN EN 316: Vláknité desky. Definice, klasifikace a značky, 2009.

ČSN 42 0074: Oceli konstrukční třídy 10 až 17. Přehledová norma

ČSN ISO 2768 – 2: Všeobecné tolerance. Část 2: Nepředepsané geometrické tolerance

ČSN ISO 3002/1 (220011): 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.

ČSN EN ISO 4288 (014449): Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu.

Přílohy

Technický list materiálu *Ebboard PW 920 neu*

Technical
Datasheet

ebaboard PW 920



Basis ebaboard PW 920

Colour green

Applications	Properties
<ul style="list-style-type: none">• Foundry pattern• Core boxes• Pattern plates• fixtures• Bath models for galvanic tools• Construction- and maintenance gauges	<ul style="list-style-type: none">• very well workable (contains no abrasive fillers)• good edge strength• high quality surface• dense surface• high impact strength• very low generation of dust during machining• low coefficient of linear expansion

Processing data	
Product	ebaboard PW 920
Colour	green
Density at 20°C	g / cm ³ 1,22 ± 0,03

Physical data			
Properties	Inspect. requirem.	Unit	Value
Flexural strength	EN ISO 178	MPa	110 ± 5
Flexural elongation at break	EN ISO 178	%	6,4 ± 0,2
Flexural modulus	EN ISO 178	MPa	3100 ± 200
Impact resistance (Charpy)	EN ISO 179	kJ/m ²	50 ± 10
Compressive strength	EN ISO 604	MPa	95 ± 5
Heat resistance (HDT)	DIN EN ISO 75 B	°C	80 ± 3
Shore hardness	DIN ISO 7619-1	Shore D	85 ± 3
Coefficient of linear expansion 20 - 50 °C	DIN 53752	10 ⁻⁶ K ⁻¹	ca. 87
Wear jet test	internal tests	W(V/t) [mm ³ /min]	ca. 91
Abrasion Taber Abraser H 18 Application weight 500g / 500 Rotations	internal	mg	ca. 72

Sales units (packages)	
ebaboard PW 920	1000 x 500 x 30 mm 1000 x 500 x 50 mm 1000 x 500 x 75 mm 1000 x 500 x 100 mm

tooling resins	-	blocks	-	auxillaries	-	sillicones
----------------	---	--------	---	-------------	---	------------

as of: 03.05.2012 Revision: 1

Technický list materiálu dural (G.AL® C210R)



G.AL Litě řezané desky

G.AL® C210R

TECHNICKÝ LIST

G.AL® C210R

Znaky slitiny	
Slitina	EN AW 5083 [AlMg4,5Mn0,7]
Typ slitiny	přirozeně tvrdá, nevytvrditelná
Povrch	homogenizovaný, uvolněný
Stav materiálu	frézovaný ze 6ti stran, hloubka drsnosti R _a 15 µm

Mechanické vlastnosti ¹⁾		typické hodnoty
Mez kluzu R _{e0,2}	[MPa]	110 - 130
Pevnost v tahu R _m	[MPa]	230 - 290
Težnost A ₄	[%]	10 - 15
Tvrdość HBW	[2,5/62,5]	68 - 75

Fyzikální vlastnosti ²⁾		typické hodnoty
Objemová hmotnost	[g/cm ³]	2,66
Modul pružnosti	[GPa]	70
Elektrická vodivost	[m/Ω · mm ²]	16 - 18
Koeficient tepelné roztažnosti	[K ⁻¹ · 10 ⁻⁶]	23,3
Tepelná vodivost	[W/m · K]	110 - 130
Specifická tepelná kapacita	[J/kg · K]	900

Technologické vlastnosti ³⁾	
Tverová stálost/Vnitřní pnutí	1
Obrobitelnost	2
Vhodnost k erozivnímu obrábění	1
Svařitelnost (plyn / WIG / MIG / Odporové / EB)	4 / 2 / 2 / 2 / 1
Odolnost proti korozi (mořská voda / povětří / SpRK)	1 / 1 / 3
Použití při vysokých teplotách (max. °C při dlouhodobém/krátkodobém zatížení) ⁴⁾	180 / 280
Eloxování (technické / dekorativní / tvrdé-) ⁴⁾	2 / 4 / 2
Leštitelnost	2 - 3
Vhodnost k leptání struktur	4 - 5
Kontakt s potravinami (podle EN 602)	ano

Tolerance			
Při tloušťce [mm]	Rovinnost [mm] ⁵⁾	Tloušťka [mm]	Delka & Šírka [mm]
≤ 150		-0/+2,5	-0/+20 & -0/+10
> 150		-0/+5	-0/+20 & -0/+10
Zuschnitte < 150 mm			DIN ISO 2768-1m
Zuschnitte > 150 mm			-0/ +5

Dodávané formáty	
Formáty [mm]	1.540 × 3.048 1.570 × 3.670 2.160 × 4.000 max. Länge: 6.000 max. Dicke: 1.060
Tloušťky na skladě	20 - 150 in 5 mm Schritten 160 - 220 in 10 mm Schritten 220 - 1.060 auf Anfrage

Datum: 05.09.2013

- 1) Typické hodnoty při pokojové teplotě.
- 2) Relativní hodnoty hliníkových materiálů od 1 (velmi dobrý) do 6 (nevhodný).
- 3) Bez ztráty pevnosti po ochlazení.
- 4) Využití technické anodizace, neposkytujeme žádnou strukturu na barevný vzhled/relief.
- 5) Tolerance rovinnosti ze měří vylučně na měřících stolech a s použitím ocelového pravítka.

G.AL® je registrovaná obchodní značka firmy GLEICH GmbH Metal-Platin-Service