ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VLIV VYBRANÝCH TECHNICKO-TECHNOLOGICKÝCH FAKTORŮ ROVINNÉHO FRÉZOVÁNÍ PŘÍRODNÍHO DŘEVA NA OTUPENÍ ŘEZNÉHO KLÍNU NÁSTROJE

TOMÁŠ PAVELKA

vedoucí: doc. Ing. Štefan Barcík CSc.

©2012 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Tímto čestně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Vliv technicko-technologických faktorů rovinného frézování přírodního dřeva na otupení řezného klínu nástroje“ zpracovával samostatně, pouze s použitím uvedené literatury, metod a zdrojů.

V Praze dne 19. 4. 2012 …….

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Štefanu Barcíkovi CSc., za odborné rady a připomínky vedoucí ke zlepšení úrovně práce a jejímu zdárnému dokončení.

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na problematiku otupování nástroje při rovinném frézování přírodního dřeva. Úvodní část práce se věnuje charakteristice dřeva, kde je popsána jeho základní stavba a vlastnosti významné zejména z pohledu otupování nástroje. V další části práce je rozebrána teorie procesu frézování, kinematické zákonitosti a mechanismus tvorby třísky při rovinném frézování. Následující část popisuje řezný klín nástroje, mechanismus otupování řezného klínu při interakci nástroje a obrobku, trvanlivost a životnost nástroje, intenzitu opotřebení v průběhu času, důsledky opotřebení nástroje, a vliv významných faktorů přírodního dřeva na opotřebení. V závěrečné části práce jsou popsány metody měření opotřebení, jejich rozdělení, a konkrétní způsoby měření opotřebení.

Klíčová slova: frézování, trvanlivost, životnost, otupení, parametry

Abstract

This work is focused on problems of the tool blunting during the flat milling of the native timber. Introductory part of the work is dedicated to the characteristic of wood, where is described its basic structure and significant attributes, especially from the view of the tool blunting. In the next part of the work is analysed the theory of the milling process, kinematic rules and the mechanism of forming the chip while the flat milling. The following part of the work describes cutting wedge of the tool, mechanism of the blunting of the tool during the interaction of the tool and the workpiece, durability and lifespan of the tool, intensity of wear during the time, consequences of the wear, and the influence of important factors of the native timber on blunting. In the final part of the work are described methods of blunt gauging, their sorting and particular ways of blunt gauging.

Keywords: milling, durability, lifespan, binding, parameters

Obsah

Abstrakt 1
Abstract 1
Seznam obrázků 4
Seznam rovnic 4
Seznam zkratek a symbolů 5
1 Úvod 6
2 Cíl práce 7
3 Teorie frézování 8
3.1 Základní charakteristika obráběného materiálu 8
3.1.1 Význam dřeva 8
3.1.2 Základní elementy kmene stromu 8
3.1.3 Jádrové a bělové dřevo 10
3.1.4 Buňky dřeva 10
3.1.5 Chemické složení 11
3.1.6 Anizotropie a nehomogenita 12
3.1.7 Vlhkost dřeva 12
3.2 Definice frézování, základní pojmy 13
3.2.1 Technologické způsoby frézování 13
3.2.2 Druhy frézování 14
3.3 Kinematika frézování 16
3.4 Parametry nástroje a vznik třísky 18
3.4.1 Model řezání rovinného frézování 18
3.4.2 Úhlová geometrie nástroje 19
3.4.3 Tvorba třísky 20
4 Opotřebení řezného klínu 23
4.1 Řezný klín 23
4.2 Charakteristika opotřebení 23
4.2.1 Definice opotřebení 23
4.2.2 Trvanlivost a životnost řezné hrany 24

4.2.3 Intenzita a průběh opotřebení řezného klínu 25
4.2.4 Kritérium otupení 27
4.3 Projevy opotřebení řezného klínu 27
4.3.1 Změna geometrie řezného klínu 27
4.3.2 Snížení kvality obrobené plochy 30
4.3.3 Zvyšování řezného odporu 31
4.4 Příčiny opotřebení řezného klínu 32
4.4.1 Faktory stavby dřeva působící na otupování 32
5 Metody měření opotřebení řezného klínu 35
5.1 Důvody měření opotřebení řezného klínu 35
5.2 Rozdělení metod měření řezného klínu, teorie měření hodnot 35
5.2.1 Nepřímé metody 35
5.2.2 Přímé metody 36
5.3 Způsoby měření otupení 38
5.3.1 Měření lineárních rozměrů 38
5.3.2 Určení hmotnostního úbytku 38
6 Závěr 40
Seznam použité literatury 41

Seznam obrázků

Obrázek 1 *Příčný řez kmenem stromu (Miller, 1999)* *9*

Obrázek 2 *Základní řezy kmenem stromu* *11*

Obrázek 3 *Možné tvary profilových fréz (Lisičan, 1996)* *14*

Obrázek 4 *Způsoby frézování podle polohy osy otáčení nástroje a tvaru ploch, které opisují břity (Prokeš, 1982)* *15*

Obrázek 5 *Kinematický model nesousledného válcového frézování (Barcík, 2009)* *16*

Obrázek 6 *Podélně-čelní model řezáni při válcovém frézování (Lisičan, 1996)* *18*

Obrázek 7 *Geometrie frézovacího nástroje, nástrojové roviny (Prokeš, 1991)* *19*

Obrázek 8 *Typy třísek (Prokeš, 1982)* *21*

Obrázek 9 *Řezný klín* *23*

Obrázek 10 *Průběh opotřebení řezné hrany (Buda et al., 1988)* *26*

Obrázek 11 *Různé projevy opotřebení řezného klínu (Buda et al., 1988)* *28*

Obrázek 12 *Opotřebení nástrojové oceli a SK materiálů (Barcík, 2011)* *29*

Obrázek 13 *Vliv poloměru otupení ostří na deformaci při obrábění (Lisičan, 1996)* *31*

Obrázek 14 *Základní charakteristiky pro měření otupení řezného klínu (Hajník, 2007)* *36*

Obrázek 15 *Způsoby měření ustoupení řezné hrany (Prokeš, 1982)* *37*

Seznam rovnic

Rovnice (**1**) *Nominální délka třísky* *17*

Rovnice (**2**) *Střední nominální tloušťka třísky* *17*

Rovnice (**3**) *Řezná rychlost* *17*

Rovnice (**4**) *Posuvná rychlost* *17*

Rovnice (**5**) *Posuv na zub* *18*

Rovnice (**6**) *Životnost řezné hrany* *25*

Rovnice (**7**) *Hloubka vlnek frézované plochy* *30*

Seznam zkratek a symbolů

B	šířka otěru	[µm]
D	průměr	[mm]
e	výška úběru, vzdálenost kinematických nerovností	[mm]
f_z	posuv na zub	[mm]
l	délka	[mm]
n	otáčky	[min^{-1}]
n_p	množství možných přeostření	[-]
P_r	rovina základní	[-]
P_s	rovina ostří	[-]
R	poloměr	[mm]
r_n	poloměr zaoblení řezné hrany	[µm]
S	plocha otěru	[$µm^2$]
t_p	trvanlivost	[hod]
v_c	řezná rychlost	[$m.s^{-1}$]
v_f	posuvná rychlost	[$m.min^{-1}$]
y	hloubka kinematických nerovností	[mm]
z	počet zubů	[ks]
Ž	životnost	[hod]
α	úhel hřbetu	[°]
β	úhel ostří	[°]
γ	úhel čela	[°]
δ	úhel řezu	[°]
Δ(SV)	ustoupení ostří	[µm]
φ	středový úhel	[°]
$φ_0$	úhel náklonu ostří	[°]
$φ_2$	úhel přeřezání vláken	[°]

1 Úvod

Frézování je dnes v dřevozpracujícím průmyslu při procesu obrábění dřeva prakticky nepostradatelnou operací. Nejvíce nachází uplatnění v nábytkářské a stavebně truhlářské výrobě. Při rovinném frézování je výstupní obrobená plocha rovina, která podle řezných parametrů dosahuje různé kvality od hrubě opracovaného povrchu, až po hladkou plochu s nízkou drsností.

Tak jako při každém procesu obrábění, dochází při kontaktu nástroje a obrobku k opotřebení nástroje - otupování. Tento proces má své zákonitosti, a vzhledem k řezným podmínkám a parametrům nástroje a obrobku, se do určité míry mění jeho průběh. Stav opotřebení nástroje má vliv na výstupní kvalitu obrobku, a tudíž i na jeho budoucí finanční hodnotu. Opotřebení nástroje si vyžaduje jeho údržbu, která hraje významnou roli v ekonomických poměrech podniku. Poznání faktorů, které se podílejí na otupování nástroje, může tedy sloužit ke zlepšení kvality výroby, prevenci před destrukcí nástroje, efektivnějšímu využití nástroje v provozu, a tím i úspoře nákladů za údržbu nástroje, nebo pořízení nástroje nového.

Poznatky získané při zkoumání jevů během otupování nástroje, jsou využívány při navrhování konstrukce a materiálů k výrobě nástrojů, a jejich dalšímu vývoji.

2 Cíl práce

Cílem této práce je zmapování problematiky otupování řezné části nástroje v procesu rovinného frézování dřeva. Práce popisuje charakter obráběného materiálu, tedy přírodního dřeva a teorii frézování z pohledu kinematiky a názvosloví. To dává čtenáři informace o vlastnostech obrobku a technologii jeho zpracování. Část zabývající se otupováním nástroje vykládá jeho definici a názvosloví, a dále popisuje jevy vzniklé při interakci nástroj – obrobek. Tím utváří obraz o problematice opotřebení ve vztahu k rovinnému frézování. Závěrečná část objasňuje metodiku měření opotřebení.

Práce je zaměřena na specifickou oblast obrábění dřeva, a jejím účelem je ucelení informací týkajících se právě tohoto konkrétního tématu.

3 Teorie frézování

3.1 Základní charakteristika obráběného materiálu

Tato kapitola se velice stručně věnuje charakteristice obráběného materiálu, tedy přírodního dřeva. Znalost stavby a vlastností dřeva je klíčová pro způsob jeho uplatnění, kdy vždy před samotným využitím dřeva je nutné jej nějakou konkrétní technologií zpracovat. V dnešní době, kdy je kladen velký důraz na efektivitu a hospodárnost výrobního procesu, je každý poznatek který přispívá ke zkvalitnění výroby velmi cenný. Proto je nutností brát při obrábění dřeva v potaz jeho specifické vlastnosti.

3.1.1 Význam dřeva

Dřevo patří k nejstarším a nejoblíbenějším přírodním materiálům s nejvšestrannějším využitím (GANDELOVÁ, et al., 2009). Dnes je možné přírodní dřevo nahradit mnoha velice kvalitními materiály na bázi dřeva, nebo nedřevěnými materiály. Přesto je dnes velmi důležitou komoditou, a je prakticky nepostradatelnou surovinou v mnoha odvětvích výroby, jako je např. stavebnictví nebo nábytkářský průmysl. Dalším velice důležitým faktem je, že na rozdíl od jiných přírodních zdrojů je dřevo surovinou obnovitelnou, a prokazatelně trvale udržitelnou.

Při procesu obrábění dřeva hrají největší roli jeho fyzikální a mechanické vlastnosti, které vycházejí z jeho stavby a chemického složení. Základním zdrojem dřevní hmoty je kmen stromu. Objemově tvoří kmen z největší části právě dřevo.

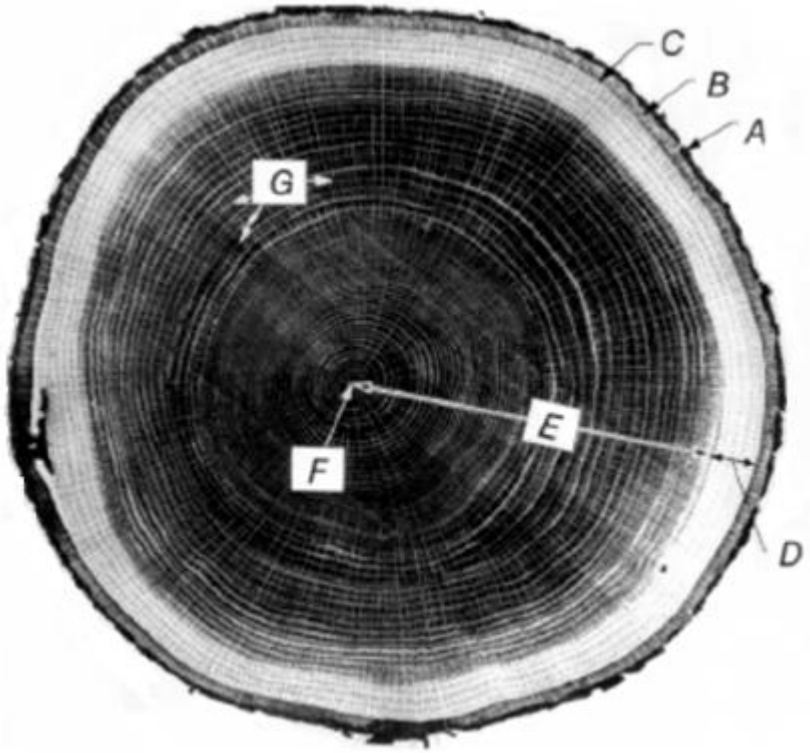
3.1.2 Základní elementy kmene stromu

Kůra se dá rozdělit na vnější korkovitou mrtvou část, a vnitřní tenkou živou vrstvu, která vede živiny z listů do rostoucích částí stromu (MILLER, 1999). Hlavní funkcí vnější vrstvy kůry je mechanická ochrana kmene stromu.

Kambium se nachází mezi kůrou a dřevem, jde o velmi tenkou makroskopicky nerozlišitelnou vrstvu, která je složena z živých buněk schopných dělení během celého

života stromu (GANDELOVÁ, et al., 2009). V této vrstvě tedy dochází k tloušťkovému růstu stromu.

Dřeň je biologickým středem kmene, a jde o měkkou tkáň vzniklou při prvotním výškovém růstu kmene. Přítomnost dřeně je u výrobků ze dřeva s vyšší kvalitou nepřípustná, neboť směrem ke dřeni vznikají při vysychání dřeňové trhliny.



Obrázek 1 Příčný řez kmenem stromu (MILLER, 1999)
a *- vnější kůra,* ***b*** *- vnitřní kůra,* ***c*** *- kambium,* ***d*** *– bělové dřevo,* ***e*** *– jádrové dřevo,* ***f*** *– dřeň,* ***g*** *– dřeňové paprsky*

Dřeňové paprsky jsou horizontálně orientované tkáně, kolmé k podélné ose stromu, sloužící k zásobování živin a jejich vedení v radiálním směru. Dřeňové paprsky ovlivňují fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva v radiálním a tangenciálním směru. Zejména výrazně ovlivňují štípatelnost dřeva (GANDELOVÁ, et al., 2009).

Letokruhy jsou tvořeny tloušťkovým přírůstkem dřeva ve vegetačním období stromu, v podnebí mírného pásma tedy na jaře a v létě. Tvoří tak na příčném řezu kmenem při rovnoměrném tloušťkovém přírůstku soustavu soustředných kružnic kolem dřeně. V pásu mírného podnebí se jeden letokruh skládá ze dvou barevně, případně strukturně

ohraničených částí, a to jarního a letního dřeva. Obě části se vzájemně liší svou hustotou, kdy jarní vrstva dřeva má nižší hustotu, a letní vyšší hustotu. U stálezelených dřevin tropického původu lze na příčném řezu taktéž pozorovat tento jev. Zde se však již nejedná o letokruh, ale o sezónní přírůstek podle klimatických podmínek dané oblasti.

3.1.3 Jádrové a bělové dřevo

Běl je vnější část dřevní části kmene, nachází se mezi kambiem a jádrem (obr. 1d). Běl se u rostoucího stromu od jádra odlišuje fyziologickou funkcí, tedy vedení vody od kořenů směrem k listům. U suchého dřeva, kde je možně běl makroskopicky odlišit od jádra, se oproti jádru jeví jako světlejší část dřeva. Některé dřeviny však nemají světlejší běl, a jeví se v celém průřezu jako jednobarevné. Takovéto dřeviny se nazývají bělové (bezjádrové dřeviny). Běl je obvykle čtyři až šest centimetrů široká, ale u některých dřevin jako je například akát, je běl široká okolo jednoho centimetru, a je tvořena jen několika málo letokruhy. Obecně je běl snáze napadnutelná škodlivými biotickými a abiotickými činiteli, ale oproti jádru je např. snáze proimpregnovatelnou.

Jádro je vnitřní část dřevní části kmene, nachází se mezi bělí a dření, a je obvykle tmavěji zabarvená (obr. 1e). Jádro lze pokládat za fyziologicky mrtvou tkáň, která ztratila vodivou funkci, zvyšuje však stabilitu kmene (GANDELOVÁ, et al., 2009). Do jádra jsou v průběhu růstu ukládány jádrové látky (minerální látky, třísloviny, barviva, atd.) Jádrové látky způsobují vyšší odolnost dřeva oproti biotickým a abiotickým činitelům, zvyšují hustotu dřeva, způsobují zabarvení dřeva, atp.

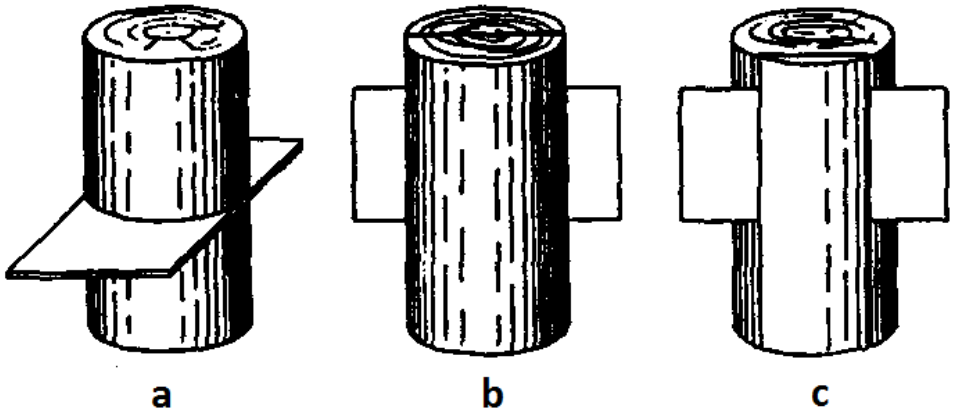
Rozdílná barevnost jádra a běli nacházejí z estetických důvodů uplatnění např. při výrobě dýh. U některých dřevin kde je obsah jádrových látek vysoký, jako např. u dubu, má jádro a běl tak odlišné mechanické a fyzikální vlastnosti, že činí přítomnost běle u některých výrobků jako nežádoucí.

3.1.4 Buňky dřeva

Dřevní buňky jsou základním stavebním prvkem dřevní tkáně. Většina dřevních buněk jsou značně prodloužené, a zašpičatělé na koncích. Tyto buňky se obvykle nazývají vlákna nebo tracheidy. Délka dřevních vláken je variabilní podle druhu dřeviny. Vlákna listnatých

dřevin jsou průměrně asi jeden milimetr dlouhá, a vlákna jehličnatých dřevin se pohybují v rozmezí od tří do osmi milimetrů. U dřeva listnatých dřevin se vyskytují cévy (tracheje), jenž jsou utvořeny nad sebou uloženými mrtvými buňkami. Vznikají tak kapiláry, které utváří hlavní průchod pro vedení mízy v podélném směru kmene. Jehličnany tracheje neobsahují, tuto funkci u nich plní cévice, nazývané také tracheidy (MILLER, 1999).

Orientace dřevních vláken má zásadní vliv na mechanické vlastnosti dřeva, a tím i na obrábění dřeva. Proto je v praxi důležité, ve kterém směru (nebo rovině), je vzhledem k průběhu dřevních vláken veden nástroj, kterým je obrobek opracováván. Tato problematika je podrobněji rozvedena v kapitole 3.4.



Obrázek 2 Základní řezy kmenem stromu
a – příčný řez, **b** – podélný řez radiální, **c** – podélný řez tangenciální
Zdroj: http://wood.mendelu.cz/ml/multimedia/stavba_dreva/vyuka/mikro/zakladni_rezy.htm

3.1.5 Chemické složení

Dřevo je po chemické stránce velice složitým komplexem látek. Látky obsažené ve dřevě se dělí do dvou skupin na hlavní složky dřeva a složky doprovodné.

Hlavní složky dřeva jsou celulóza, hemicelulóza a lignin, přičemž podle druhu dřeviny zastupují nejčastěji 90 – 97% dřevní hmoty. Celulóza je základním stavebním prvkem dřevní hmoty, a zaujímá přibližně 46 – 56% u dřeva jehličnanů, a 41 – 48% u dřeva listnáčů. Jde lineární polysacharid s polymeračním stupněm nejčastěji v rozmezí 1400 - 15000 základních jednotek β-D glukopyranózy. Hemicelulóza ve dřevě zaujímá průměrně 15 – 35%, kdy listnáče obsahují více hemicelulózy, a jde v zásadě rovněž o lineární polysacharid. Od celulózy se odlišují nižším polymeračním stupněm (100 – 200),

přítomností dalších stavebních jednotek v řetězci (např. D-xylóza, D-galaktóza), a přítomností krátkých postraních řetězců. Lignin je ve dřevě zastoupen u jehličnanů v rozmezí 25 – 35%, a u listnáčů 15 – 30% dřevní hmoty. Přítomnost ligninu dodává dřevu pevnost, neboť vyplňuje prostory mezi fibrilami polysacharidů v buněčné stěně (MILLER, 1999).

Doprovodné složky dřeva tvoří nejčastěji 3 -10% dřevní hmoty. Jde o látky extrahovatelné (např. fenolické látky, terpeny, alkoholy), nebo o látky anorganické, (např. vápenaté a draselné soli, krystalický písek) jenž mají zejména u tropických dřevin, kde jejich obsah může dosahovat až 30% dřevní hmoty, velký vliv na opracovatelnost dřeva a otupování nástroje.

3.1.6 Anizotropie a nehomogenita

Z anatomické a chemické stavby dřeva vyplývá, že dřevo vykazuje v každém ze tří základních směrů (podélném – axiálním, radiálním a tangenciálním) různé vlastnosti. Tato vlastnost se nazývá **anizotropie**, a má vliv jak na fyzikální, tak na mechanické vlastnosti dřeva. Při opracovávání obrobku tedy nastávají specifické podmínky podle toho, v jakém vztahu je pohyb nástroje vůči obrobku, a je třeba tomu přizpůsobit parametry při obrábění.

Při průstupu nástroje dřevní hmotou, není nástroj zatěžován rovnoměrně. To je způsobeno **nehomogenitou** dřeva, která vzniká již na submikroskopické a mikroskopické úrovni (stavba buněčné stěny, stavba pletiv), a dále pak na úrovni makroskopické, jako rozdíl u dřeva jádra a běli, jarního a letního dřeva, dřeňových paprsků atd. Dalším faktorem, který umocňuje nehomogenitu dřeva, jsou jeho vady, jako např. suky nebo trhliny (GANDELOVÁ, et al., 2009).

3.1.7 Vlhkost dřeva

Dřevo je hygroskopický materiál, jenž přijímá vodu buď v kapalné, nebo plynné formě (z okolního vzduchu). Se změnou obsahu vody ve dřevě souvisí např. rozměrové změny dřeva (bobtnání a sesychání), odolnost dřeva proti biologickým činitelům, a také změna mechanických vlastností. Obecně lze říci, že se zvyšujícím se obsahem vlhkosti

ve dřevě, se mechanické vlastnosti dřeva zhoršují. To je způsobeno tím, jakým způsobem je v dřevní hmotě voda vázána. Ve dřevě se voda vyskytuje v podobě chemicky vázané vody, jako součást chemických sloučenin, voda vázaná, která se nachází v buněčných stěnách, a voda volná, která se nachází v mezibuněčných prostorách a lumenech dřeva.

Na mechanické vlastnosti má vliv prakticky pouze voda vázaná, jejíž molekuly jsou navázány mezi řetězci celulóz a hemicelulóz vodíkovými můstky, a způsobují tak mimo jiné snížení pevnosti mezi těmito řetězci. Při technologii obrábění dřeva je tedy nutno brát v úvahu aktuální obsah vody ve dřevě. Při procesu rovinného frézování dřeva se vlhkost materiálu pohybuje standardně v rozmezí 8 – 15%.

3.2 Definice frézování, základní pojmy

Vigner et. al. *(1984)* definuje frézování jako výrobní metodu, při níž odebírají materiál obrobku zuby nástroje otáčejícího se kolem pevné osy. Posuv součástí přitom probíhá převážně ve směru kolmém k této ose. Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy přitom odřezává krátké třísky proměnné tloušťky.

Při frézování tedy dochází k vzájemné interakci obrobku a nástroje. Nástroj a obrobek mají vůči sobě rozdílnou rychlost, kde obvodová rychlost nástroje je řádově několikanásobně vyšší, než rychlost posuvu obrobku. Podle vztahu směru posuvné a řezné rychlosti, se frézování dělí na frézování nesousledné a frézování sousledné. Při otáčení se té části pracovního nástroje, která je v interakci s obrobkem proti směru posuvné rychlosti, jde o otáčení nesousledné (protiběžné). V opačném případě, kdy se otáčí nástroj ve směru posuvné rychlosti, jde o frézování sousledné (souběžné), (PROKEŠ, 1982).

3.2.1 Technologické způsoby frézování

V praxi je frézování velmi rozšířenou technologií obrábění dřeva (LISIČAN, 1996), a to hlavně díky mnoha možnostem výstupních výrobků. Frézováním lze vyrábět výrobky s výslednou rovinnou, nebo zakřivenou plochou.

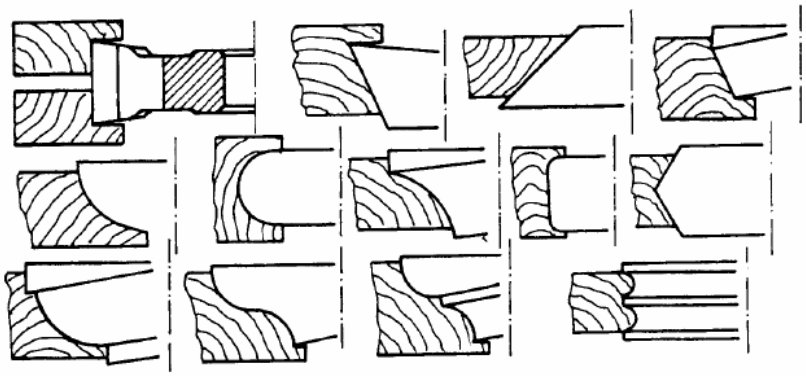
Podle tvaru výsledné obrobené plochy lze dělit technologii frézování na frézování:

- Rovinné
- Křivoploché
- Profilové
- Speciální

Rovinné frézování se v praxi nejčastěji využívá jako srovnávání a tloušťkování. Srovnáváním nazýváme vytvoření jedné základní rovné plochy na křivém dílci, podle které se pak dílec při další operaci frézuje na tloušťku. Tloušťkování je pak ofrézování dílce na přesnou tloušťku (LISIČAN, 1996). Nejčastěji bývá rovinné frézování prováděno pomocí nožových hřídelí, nožových hlav, frézovacích kotoučů nebo stopkových fréz.

Křivoploché frézování se provádí vedením dílce okolo frézy pomocí šablony, nakláněním zadního stolu srovnávací frézky, vedením frézky okolo upevněného obrobku apod.

Profilové frézování se provádí frézovacími hlavami, kotoučovými frézami, nebo stopkovými frézami. Řezná část nástroje má určitý profil (např. šikmý, konkávní, konvexní, složený apod.), čímž při frézování vzniká požadovaný tvar obrobku. Podle způsobu posuvu dílce se získává profil rovný, nebo zakřivený (LISIČAN, 1996).



Obrázek 3 Možné tvary profilových fréz (LISIČAN, 1996)

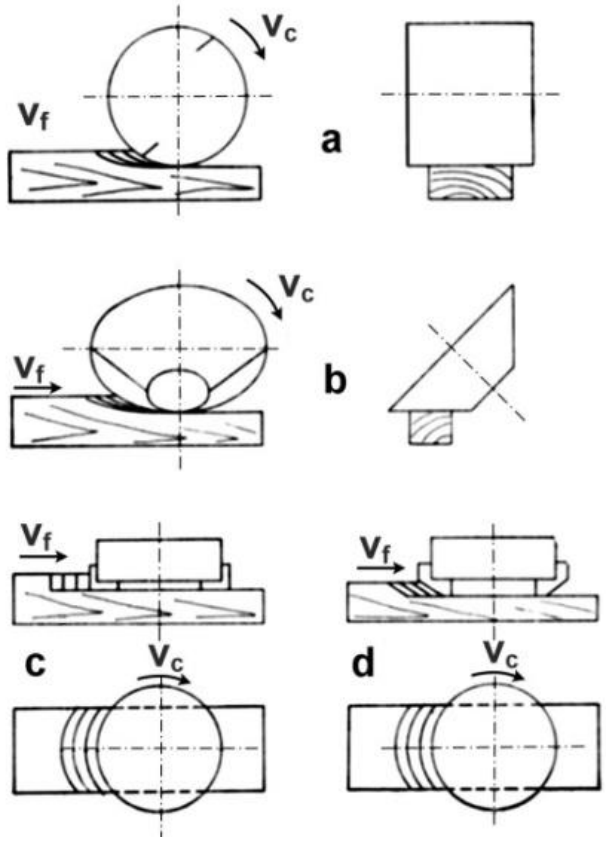
3.2.2 Druhy frézování

Podle polohy osy otáčení a podle ploch, které při frézování opisují břity nástroje, rozlišujeme čtyři druhy frézování (PROKEŠ, 1982)*, obr. 4*:

Válcové – osa otáčení nástroje je rovnoběžná k obrobené ploše, rotačním pohybem břitů je tvořena válcová plocha.

Kuželové – osa otáčení nástroje je k obrobené ploše skloněna pod úhlem, rotačním pohybem břitů vzniká kuželová plocha.

Čelní – osa otáčení nástroje je kolmá k obrobené ploše, rotací břitů vzniká válcová plocha. Boční břity pracují na principu válcového frézování, a to přibližně kolmo ke směru dřevních vláken, čelní břity jsou rovnoběžné s obrobeným povrchem. Tento způsob se používá u některých tvarových a stopkových fréz.

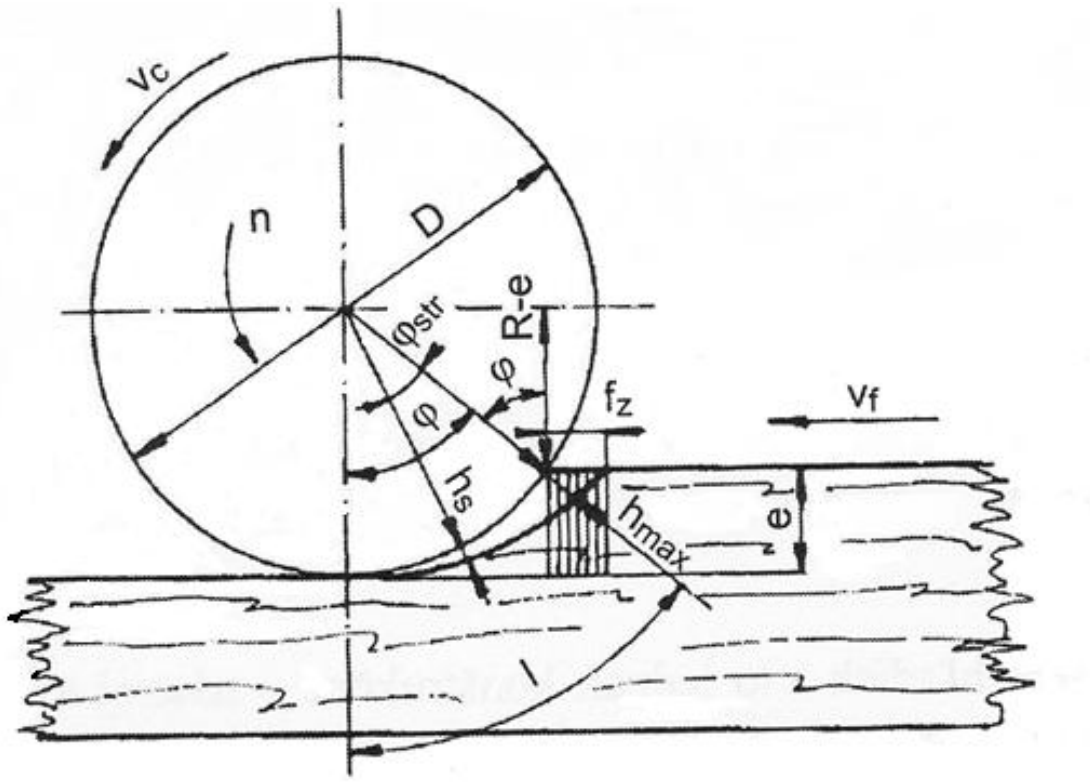


Obrázek 4 Způsoby frézování podle polohy osy otáčení nástroje a tvaru ploch, které opisují břity (PROKEŠ, 1982)
a *– válcové frézování,* ***b*** *– kuželové frézování,* ***c*** *– čelní frézování,* ***d*** *– čelně kuželové frézování,*

Čelně kuželové – osa otáčení nástroje je kolmá k obrobené ploše tak jako v případě čelního frézování. Boční část břitů je však vzhledem k ose otáčení nástroje skloněna pod úhlem. Rotací břitů vzniká tvar komolého kuželu. V praxi může být boční část břitu i zaoblená.

3.3 Kinematika frézování

Dráha řezné hrany tvoří na obrobku cykloidu. Vzhledem k tomu, že řezná rychlost je o mnoho vyšší než posuvná rychlost, můžeme řeznou dráhu považovat za kružnici, přičemž nominální hodnota tloušťky třísky se mění od nuly po maximum, kde směr posuvné rychlosti je ve směru kolmém na osu otáčení nástroje (BARCÍK, 2009). V praxi se však skutečný průřez třísky může odlišovat od nominálního průřezu vlivem otupení břitu, nepřesnosti chodu vřetena, odchylek břitů od řezné kružnice, nepravidelnosti chodu podávacího zařízení a nestejnorodosti hmoty obrobku. Břit je během jedné otáčky v záběru na délce oblouku l, který přísluší středovému úhlu φ‘ + φ. Úhel φ‘ je velmi malý, proto se při výpočtu délky třísky l většinou uvažuje pouze úhel φ (PROKEŠ, 1982).



Obrázek 5 Kinematický model nesousledného válcového frézování (BARCÍK, 2009)

Nominální délka třísky při velkém průměru nástroje a malé výšce úběru (BARCÍK, 2009)*:*

$$l = 2R\sqrt{\frac{e}{R}} = \sqrt{e.D} \qquad \text{[mm]} \qquad (1)$$

Kde: R – poloměr řezné kružnice [mm]

e – výška úběru [mm]

D – průměr řezné kružnice [mm]

Střední nominální tloušťka třísky (BARCÍK, 2009):

$$h_{stř} = \frac{f_z.e}{l} = \frac{v_f.1000}{n.z}\sqrt{\frac{e}{D}} \qquad \text{[mm]} \qquad (2)$$

Kde: f_z – posuv na zub [mm]

e – výška úběru [mm]

l – průměr řezné kružnice [mm]

v_f – posuvná rychlost [mm]

n – otáčky frézy [ot.min^{-1}]

z – počet zubů [ks]

Řezná rychlost (BARCÍK, 2009):

$$v_c = \frac{\pi.D.n}{60.1000} \qquad \text{[m.s}^{-1}\text{]} \qquad (3)$$

Kde: D – průměr řezné kružnice [mm]

n – otáčky frézy [ot.min^{-1}]

Posuvná rychlost (BARCÍK, 2009):

$$v_f = \frac{f_z.n.z}{1000} \qquad \text{[m.min}^{-1}\text{]} \qquad (4)$$

Kde: f_z – posuv na zub [mm]

n – otáčky frézy [ot.min^{-1}]

z – počet zubů [ks]

Posuv na zub (BARCÍK, 2009):

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

Kde: v_f – posuvná rychlost [mm]

n – otáčky frézy [ot.min^{-1}]

z – počet zubů [ks]

3.4 Parametry nástroje a vznik třísky

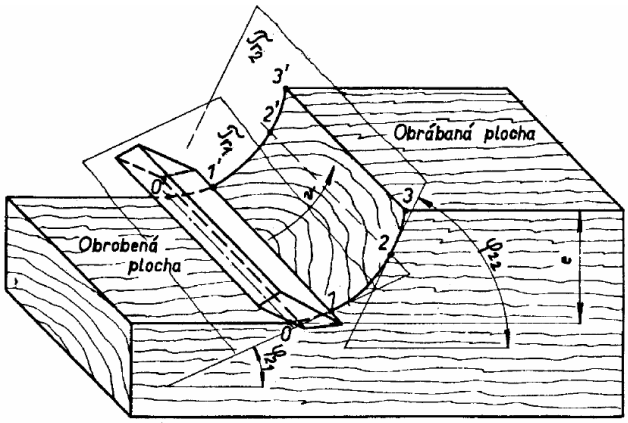
Při interakci nástroje a obrobku dochází u rovinného frézování k narušení vazeb dřevní hmoty, a k rozdělení obráběného materiálu na třísku, a výstupní výrobek nebo polotovar. To jak vzniká tříska, závisí na parametrech nástroje (úhlové geometrii a otupení nástroje), parametrech obrobku (vlhkost, druh dřeviny), a modelu řezání.

3.4.1 Model řezání rovinného frézování

Modely řezání vycházejí z kombinace orientace dřevních vláken obrobku, směru řezné rychlosti, a náklonu ostří nástroje vzhledem k obrobku. Jako základní rozlišujeme tři modely řezání:

- Podélný
- Čelní
- Příčný

Kombinací těchto tří základních modelů řezání vznikají kombinované modely (např. podélně-příčný, čelně-podélně-příčný, atd.).



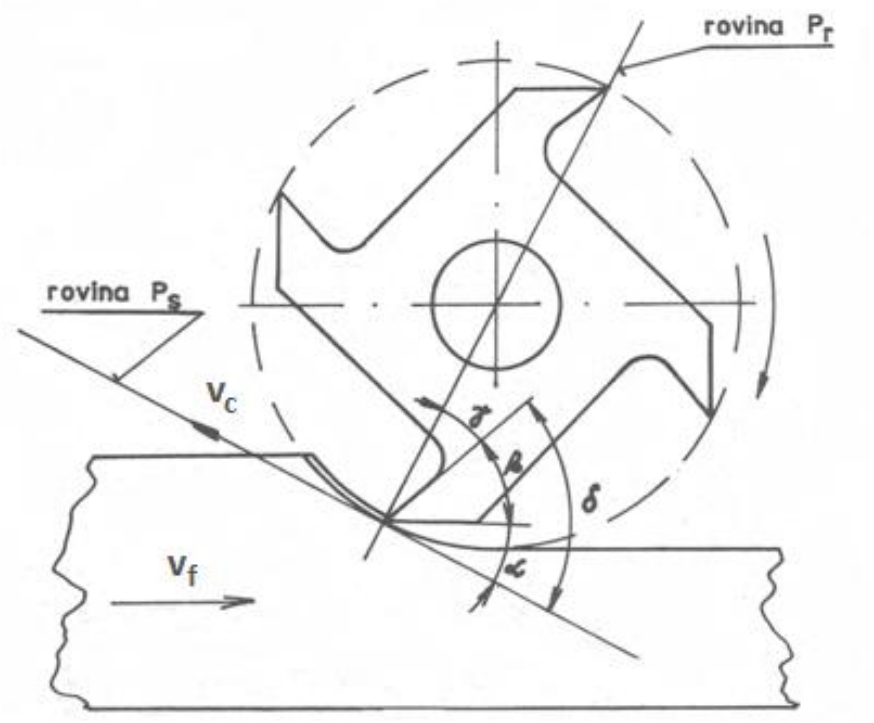
Obrázek 6 Podélně-čelní model řezáni při válcovém frézování (LISIČAN, 1996)

Při rovinném frézování se nejčastěji uplatňuje model podélně-čelní (obr. 6), kdy se v průběhu oddělování třísky postupně mění úhel přeřezání vláken φ_2 od minima po maximum při nesousledném frézování, nebo naopak se zmenšuje při sousledném frézování. Tato situace platí za podmínek, že dřevní vlákna probíhají bez odklonu od podélné osy obrobku.

Frézování může být prováděno s nulovým úhlem φ_0 (úhel mezi kolmicí na vektor řezné rychlosti v_c a polohu ostří), nebo s náklonem ostří, tedy $\varphi_0 \neq 0$. Toto je v praxi docilováno např. provedením nožů do spirály po obvodě nožového hřídele, nebo náklonem osy otáčení nástroje.

3.4.2 Úhlová geometrie nástroje

Jednotlivé úhly nástroje nazýváme souhrnně řeznými úhly (PROKEŠ, 1991). Pro identifikaci jednotlivých úhlů je třeba definovat základní roviny, ke kterým jsou tyto úhly vztaženy, a to rovinu základní (P_r), a rovinu ostří (P_s), (obr. 7).



Obrázek 7 Geometrie frézovacího nástroje, nástrojové roviny (PROKEŠ, 1991)

***P_r** – rovina základní, **P_s** – rovina boční, **α** – úhel hřbetu, **β** – úhel ostří, **γ** – úhel čela, **δ -** úhel řezu, **v_c -** řezná rychlost, **v_f** – posuvná rychlost*

Rovina základní je rovinou kolmou na směr hlavního řezného pohybu, přičemž u rotačních nástrojů je to rovina procházející osou nástroje.

Rovina ostří je rovinou kolmou na rovinu hlavní, a leží v ní ostří. U zakřiveného ostří je to pak rovina k němu tečná.

Pro většinu nástrojů pro rovinné frézování postačuje definování základních řezných úhlů (obr. 7), pro jejichž znázornění v boční rovině postačí dvě výše definované roviny. Každý z těchto základních řezných úhlů má svůj význam a opodstatnění konkrétní hodnoty pro danou technologickou operaci.

Úhel hřbetu (α) je úhel mezi rovinou ostří a hřbetem nástroje. Úhel hřbetu má význam při tření hřbetu o materiál, a tím i na řezný odpor. Se zmenšováním úhlu se tření hřbetu o materiál zvyšuje, a s jeho zvětšováním se naopak snižuje. Z hlediska řezného odporu je tedy vhodné volit úhel hřbetu co největší, avšak to lze jen do jisté míry, neboť s jeho zvětšováním se zrychluje průběh otupení nástroje. Při rovinném válcovém frézování se nejčastěji používá úhel hřbetu 15°.

Úhel ostří (β) je úhel mezi hřbetem a čelem nástroje. Úhel hřbetu má největší vliv na sílu potřebnou pro vniknutí ostří do obráběného materiálu. Platí, že čím menší je úhel ostří, tím snáze nástroj proniká do materiálu. Při jeho malé hodnotě se ale snižuje odolnost řezné hrany, a nástroj se rychleji otupuje. Při rovinném válcovém frézování se nejčastěji používá úhel ostří 45 - 55°.

Úhel čela (γ) je úhel mezi rovinou základní a čelem nástroje. Při konstantní velikosti úhlu ostří a změně velikosti úhlu čela, se mění úhel hřbetu a s tím i velikost tření hřbetu. Úhel čela má největší vliv na způsob vzniku třísky.

Úhel řezu (δ) je součtem úhlů ostří a hřbetu. Platí tedy že $\delta = \alpha + \beta$.

3.4.3 Tvorba třísky

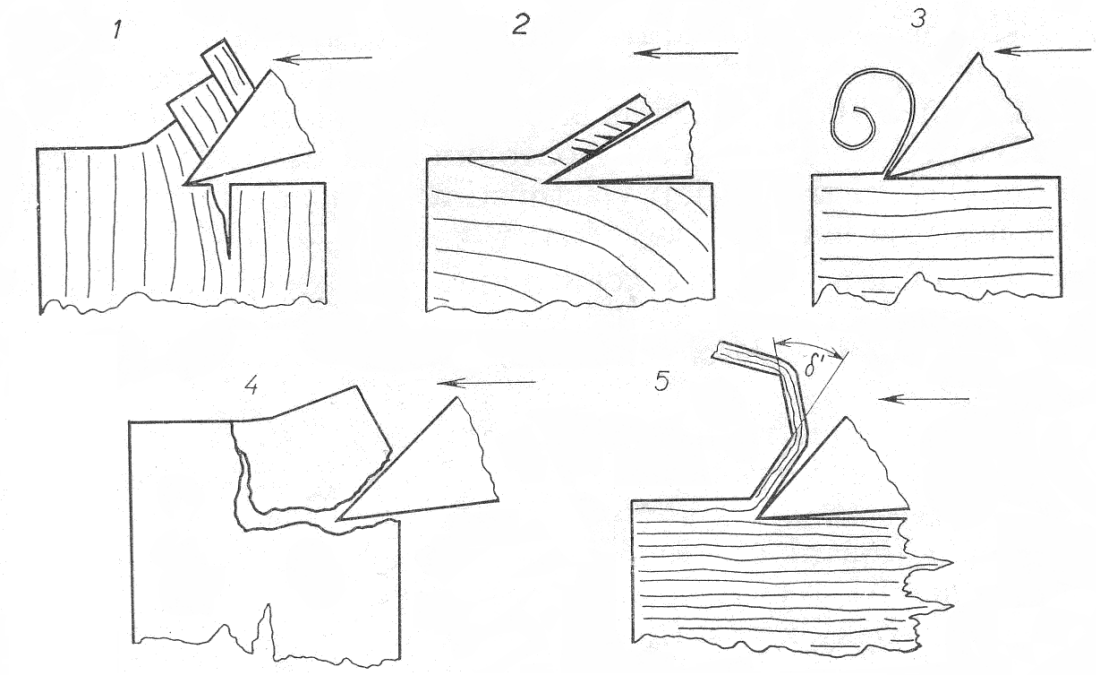
Tu část obráběného materiálu, která je při frézování oddělena od výstupního obrobku, nazýváme třískou. Vzniklá tříska je výsledkem zmenšování obrobku na požadovaný

rozměr a tvar. Tříska je charakterizována průřezem (rozměry a tvarem), a typem (druhem). Velikost a tvar třísky se určuje ještě před jejím oddělením, v boční rovině vzhledem k nástroji. Tyto rozměry se nazývají tzv. nominální rozměry třísky (viz. kapitola 3.3), tedy rozměry třísky ještě před její deformací, způsobené jejím oddělením.

Na způsob oddělování třísky, její tvar a vlastnosti mají vliv zejména (PROKEŠ, 1982):

- druh obrobku a jeho vlastnosti (vlhkost, teplota, atd.)
- směr dřevních vláken a letokruhů vzhledem ke směru pohybu ostří
- geometrie a mikrogeometrie nástroje
- řezné podmínky (řezná rychlost, posuv na zub, velikost úběru, atd.)
- způsob obrábění (řezání otevřené nebo uzavřené, tloušťka třísky je konstantní nebo měnící se)
- způsob odvádění třísky od nástroje

Podle kombinace těchto řezných parametrů dochází k oddělování několika základních typů třísek, obr. 8.



Obrázek 8 Základní typy třísek (PROKEŠ, 1982)

***1** – dělená tříska, **2** – páskovitá tříska, **3** – točená tříska, **4** – trhaná tříska, **5** – mnohoúhelníková tříska*

Na základě zkoušek (KOTĚŠOVEC, 1981) jsou tvary a složení třísek při frézování velmi odlišné, a to u nástroje o stejném průměru, posuvné a řezné rychlosti a geometrii.

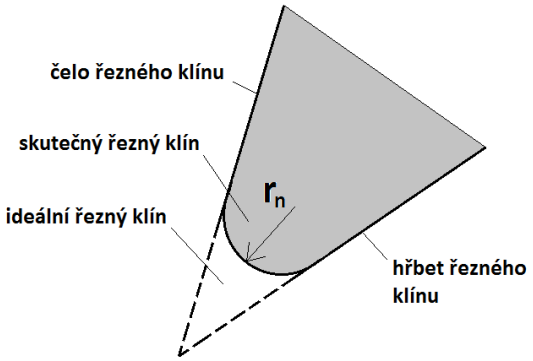
Proměnné parametry byly orientace dřevních vláken k směru posuvné rychlosti, a náklon ostří.

Výsledný tvar, rozměry a druh třísky mají dnes významnou roli pro jejich další zpracování. Proto je třeba při dnešních ekonomických poměrech ve výrobě uvažovat o nejvhodnějším využití daného typu třísky podle jejích parametrů. To by se mělo uvažovat již při návrhu konkrétního dřevoobráběcího stroje.

4 Opotřebení řezného klínu

4.1 Řezný klín

Řezným klínem se nazývá ta část nástroje, která vykonává oddělování třísky od obrobku. Tvar řezného klínu tvoří plocha čela, a plocha hřbetu, kde v místě průniku těchto ploch vzniká ideální řezná hrana – ostří. Ve skutečnosti je řezná hrana tvořená průnikem nerovných ploch čela a hřbetu s určitým poloměrem zaoblení r_n (HAJNÍK, 2007).



Obrázek 9 Řezný klín

4.2 Charakteristika opotřebení

4.2.1 Definice opotřebení

Opotřebení nástroje je výsledkem vzájemné interakce nástroje a obrobku.

ČTN 01 5050 definuje opotřebení řezného klínu jako nežádoucí změnu povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobenou buď vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolává při jejich vzájemném relativním pohybu. Projevuje se jako odstraňování nebo přemísťování částic hmoty funkčního povrchu mechanickými účinky, resp. ho provází i jiné vlivy, např. chemické, elektrochemické nebo elektrické.

***Prokeš** (1982)* definuje otupování nástroje jako postupnou změnu mikrogeometrie břitu během řezání, kdy nástroj ztrácí schopnost řezat. To je způsobeno tím, že se z břitu

oddělují částečky kovu. Nástroj je tedy tupý, když břit dospěl do určitého kritického stavu, který je provázen nepřípustným zhoršením jakosti povrchu obrobku, nežádoucím zvýšením řezné síly, pálením a rozměrovými nepřesnostmi obrobku (zabíháním listů apod.).

4.2.2 Trvanlivost a životnost řezné hrany

Snahou při výrobě a údržbě nástrojů je co nejvíce se přiblížit ideálnímu řeznému klínu, tzn. docílit co největší ostrosti nástroje. Vhodným navržením kinematických parametrů při obrábění, úhlové geometrie nástroje, materiálu z něhož je řezný klín vyroben, vhodnou údržbou a manipulací se docílí pomalejšího opotřebovávání řezného klínu. Každý nastroj se však v průběhu času opotřebovává, a proto je nutné vhodně stanovit moment, kdy bude nástroj potřeba přeostřit, nebo vyřadit.

Trvanlivost řezné hrany je čas, po který je řezný klín používán od naostření až do svého opotřebení, tzn. čas, kdy řezná hrana pracuje při požadovaných technických a technologických parametrech (HAJNÍK, 2007).

Z hlediska hospodárnosti a kvality výroby je trvanlivost řezné hrany velmi důležitým pojmem. Z hlediska kvality obrobené plochy je žádoucí, aby nástroj pracoval při co nejvyšší ostrosti, tzn. že je nástroj třeba co nejčastěji přeostřovat. Z hlediska ekonomiky je však požadavek opačný, a sice používat nástroj co nejdéle, aby se ušetřily náklady na jeho údržbu. Spolu se zvyšujícím se otupováním nástroje stoupá také např. řezná síla, což má za následek vyšší energetickou náročnost na provoz stroje, atd.

Doba trvanlivosti se stanovuje vyhodnocením kombinace těchto faktorů tak, aby byla řezná hrana co nejvíce využita, a kvalita povrchu obrobené plochy nepřesáhla únosnou mez.

Jednotkou trvanlivosti mohou být následující parametry (HAJNÍK, 2007):

- celková délka třísky
- obrobená plocha
- objem odebraného materiálu
- počet obrobených stejných dílců apod.

Trvanlivost řezné hrany ovlivňují (HAJNÍK, 2007):

- řezné podmínky (řezná rychlost, posuv, výška řezu)
- geometrie řezné části, tvar a rozměry nástroje
- druh obráběného materiálu a jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti
- druh řezného materiálu
- plynulost řezného procesu
- způsob namáhání nástroje
- způsob obrábění a druh operace

Životnost řezné hrany je násobkem trvanlivosti řezné hrany a počtu ostření, tedy čas, kdy je nástroj schopen plnit svou funkci až do jeho vyřazení (HAJNÍK, 2007). Životnost řezné hrany je tedy celkový čas, po který nástroj koná svou funkci. Životnost se dá při stejných technologických podmínkách vyjádřit následovně:

$$Ž = t_p.n_p + t_p = t_p.(1 + n_p) \quad [hod] \quad (6)$$

Kde: t_p – čas mezi přeostřováním nástroje, trvanlivost [hod]

n_p – množství možných přeostření [-]

Přičtení jednoho ostření k maximálnímu možnému počtu ostření nástroje zastupuje čas, kdy je nástroj již naostřen z výroby. V praxi je však přesné určení životnosti nástroje velmi obtížné, a to z důvodů různorodých požadavků na výrobu, a také stavu nástroje jako celku (PROKEŠ, 1982).

4.2.3 Intenzita a průběh opotřebení řezného klínu

Intenzita opotřebení je rychlost opotřebení v průběhu času. Během doby trvanlivosti řezné hrany neprobíhá opotřebení nástroje stejnou rychlostí. Při otupování nástroje dochází k postupné změně mikrogeometrie břitu (PROKEŠ, 1982), což má za následek také postupnou změnu sil při interakci nástroje a obrobku. Průběh opotřebení se dělí do tří úseků:

I. úsek (počáteční opotřebení)

Jedná se o velmi krátký časový úsek při prvním kontaktu ostří a obrobku, přičemž v této fázi je míra opotřebení nejvyšší. Průběh opotřebení zprvu prudce roste, poté se postupně ustaluje na jako lineární funkce. Dochází zde k odlomení nebo ohnutí jehly, která může

vznikat při ostření nástroje, nebo jemného ostří, které by se blížilo ostří ideálnímu (PROKEŠ, 1982). V této fázi se utvoří mikrogeometrie řezného klínu, která se v dále v průběhu opotřebení zachovává, nebo mění jen málo.

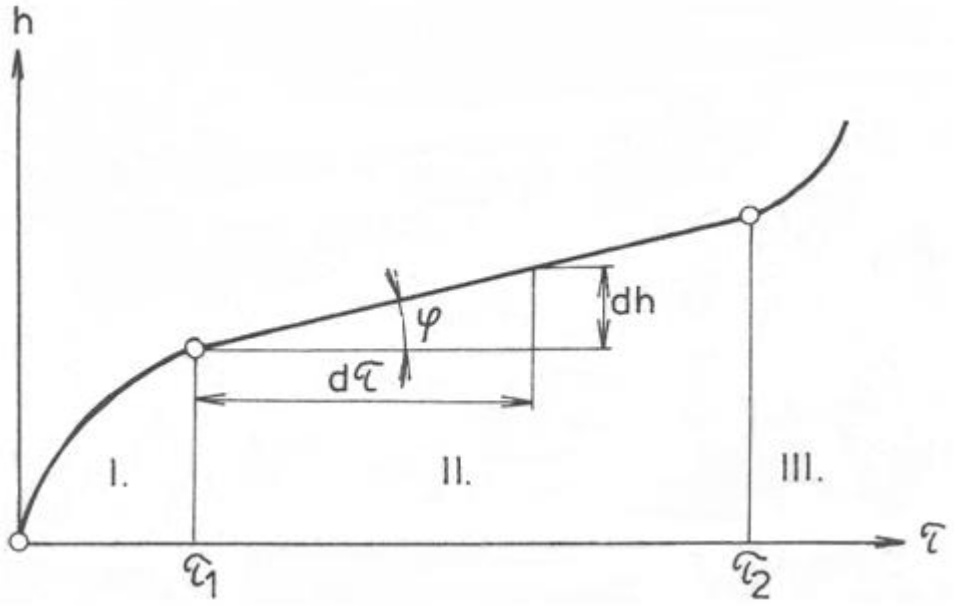
II. úsek (normální opotřebení)

V této fázi probíhá opotřebení přibližně lineárně. Povrchy jsou navzájem přizpůsobené (BUDA, et al., 1988). Vzhledem k tomu že tento úsek otupování trvá ze všech fází nejdéle, a nástroj v tomto období pracuje po dlouhý časový úsek, je žádoucí, aby zde byla míra otupování co nejmenší, a tento úsek trval co nejdéle.

III. úsek (zrychlené opotřebení)

V tomto úseku již neprobíhá otupování lineárně, ale exponenciálně, a rychle se zvyšuje. Důvodem je již značná změna tvaru řezné hrany. V praxi je žádoucí se této fázi zcela vyhnout, tzn. nechat nástroj přeostřit před započetím zrychleného opotřebení. Důvodem jsou např. snižující se kvalita obrobené plochy, rychle narůstající energetická náročnost, nebo možnost destrukce nástroje.

Závislost otupování řezné hrany v průběhu času je znázorněna na obr. 10:



Obrázek 10 Průběh opotřebení řezné hrany (BUDA, et al., 1988)

4.2.4 Kritérium otupení

Hodnota opotřebení, při které je možno nástroj považovat za otupený se nazývá kritérium opotřebení. Při stanovení kritéria otupení je třeba vycházet z těchto požadavků (OČKAJOVÁ, 2001):

- zamezení nadměrnému poškozování nástroje opotřebením
- docílení vyžadované přesnosti při nepřekročení určité hodnoty opotřebení řezného klínu
- vyloučit zhoršení drsnosti povrchu
- docílení maximální životnosti nástroje
- zabezpečení maximální hospodárnosti operace

Při uvažování těchto požadavků lze rozlišit **technologické** a **optimální kritérium** opotřebení.

Optimální kritérium opotřebení vychází z maximální možné životnosti nástroje. Při jeho stanovení se postupuje tak, že při nějakém čase trvanlivosti t_p je doba životnosti nástroje Ž nejdelší. Doba životnosti nástroje podle vzorce pro její výpočet (viz. str. 25) tedy nabývá maxima.

Technologické kritérium otupení vychází z požadavků kladených na drsnost a přesnost obrobku. Hodnota otupení technologického kritéria je zpravidla menší než u optimálního kritéria, neboť při dosažení opotřebení na hodnotu optimálního kritéria již nemusí výstupní kvalita výrobku odpovídat požadované hodnotě.

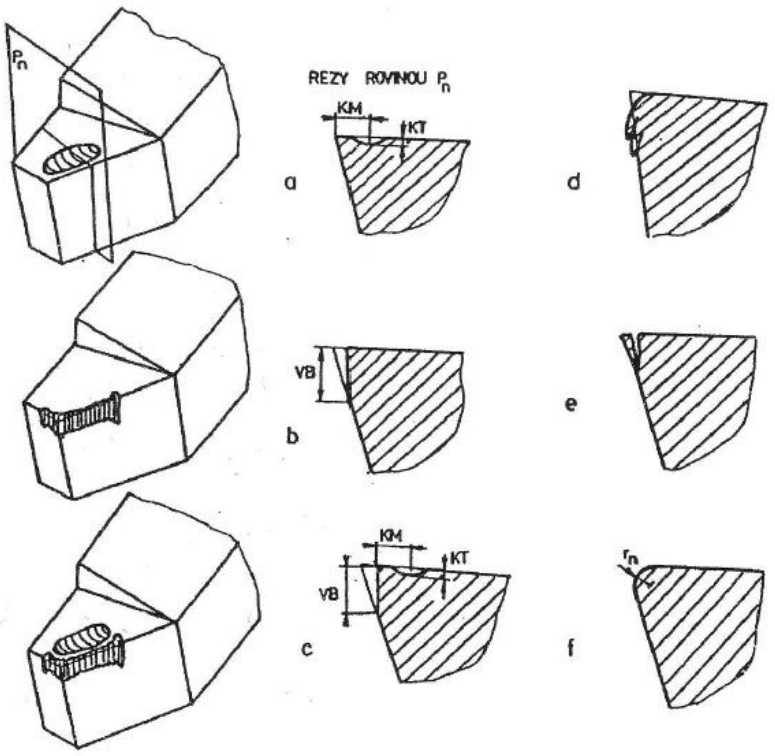
4.3 Projevy opotřebení řezného klínu

Interakce nástroje a obrobku se při procesu obrábění projevuje jak na nástroji, tak na obrobku. Na nástroji je to změnou geometrie řezného klínu, a na obrobku snížením kvality obrobené plochy. Celkově se pak tyto faktory projevují v chodu stroje, a v energetické náročnosti operace.

4.3.1 Změna geometrie řezného klínu

Při obrábění dochází k mechanickému oddělování částeček řezného klínu, a změně geometrie ostří, respektive těch částí řezného klínu, které při obrábění přichází do styku

s obrobkem při oddělování třísky, nebo s již oddělenou třískou. Podle technických a technologických podmínek muže docházet k několika specifickým projevům opotřebení, v podobě změny tvaru řezného klínu, obr. 11.



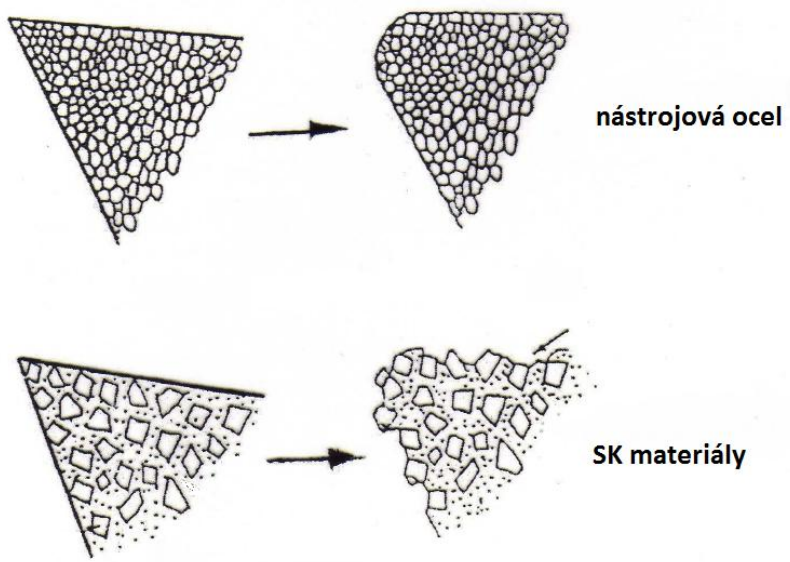
Obrázek 11 Různé projevy opotřebení řezného klínu (BUDA, et al., 1988)

***a** - opotřebení čela – vznik žlábku, **b** - opotřebení hřbetu - vznik otěrové plošky na hřbetu, **c** - současné opotřebení čela a hřbetu, **d** - plastické zdeformování řezného klínu, **e** - odlomení řezné hrany, **f** - zvětšování poloměru zaoblení řezné hrany*

Každý ze znázorněných způsobů vypovídá o jiné kombinaci vlastností obráběného materiálu a materiálu, z něhož je vyroben nástroj.

Při rovinném frézování rostlého dřeva se jako materiál, z něhož jsou vyrobeny nože, používá podle STN 22 5810 nástrojová ocel 19 453 o tvrdosti 60 HRC, nebo spékané karbidy – SK (BARCÍK, 2009). Při válcovém frézování jsou dnes stále dominantní nožové hřídele s noži z nástrojové oceli. Při frézování stopkovými frézami jsou nejvíce používaným materiálem (z něhož je řezná hrana) SK materiály. Dnešní moderní frézovací nástroje mohou mít řeznou část ze syntetického diamantu, jehož výhodou je velmi vysoká trvanlivost. Takovéto nástroje jsou ovšem také velmi drahé, a jejich zařazení do provozu je nutno ekonomicky uvážit.

Každý z těchto materiálu se opotřebovává specifickým způsobem, obecně však platí několik zákonitostí. V první fáze záběru řezné hrany dochází k odlomení jehly, nebo vetší části řezného klínu, obr. 11e. Během druhé fáze (normálního opotřebení), se opotřebovává čelo a hřbet. Míra opotřebení čela a hřbetu nemusí být stejná, a nejvíce závisí na úhlové geometrii nástroje. Při malém úhlu α se více opotřebovává hřbet než čelo řezného klínu. Z hlediska zachování mikrogeometrie nástroje je žádoucí, aby docházelo k rovnoměrnému otupení čela i hřbetu.



Obrázek 12 Opotřebení nástrojové oceli a SK materiálů (OČKAJOVÁ, 2001)

Na obr. 12 je znázorněn rozdílný způsob otupení nástrojové oceli a SK materiálů. Nástrojová ocel je jako slitina homogenním materiálem, a oproti SK materiálům má opotřebený povrch nižší drsnost v důsledku rychlejšího opotřebení pojiva mezi jednotlivými krystalky. Spékané karbidy jsou zpracovávány práškovou metalurgií, a jde o drobné krystalky karbidu stlačené při vysokém tlaku k sobě. Vzniká tak nehomogenní materiál, kde ostří tvoří hrany jednotlivých okrajových krystalků. SK materiály mají oproti nástrojové oceli řádově deset až dvacetkrát delší trvanlivost řezné hrany (podle použití), a to hlavně díky vyšší tvrdosti. To ale zapříčiňuje vyšší křehkost, a tak i náchylnost ke křehkým odlomům řezné hrany při nárazech (např. při styku s kovovým předmětem, zárostem, nebo obrábění abrazivní kůry).

4.3.2 Snížení kvality obrobené plochy

Jakost obrobené plochy lze vyjádřit pomocí kinematických nerovností - vlnek na obrobené ploše (jejich hloubkou a vzdáleností), a podle drsnosti obrobené plochy, tedy míry vytrhání svazků vláken (PROKEŠ, 1982). Teoretické vzdálenosti vrcholů vlnek e, se rovnají posuvu na zub f_z (viz. kapitola 3.3). Pro posouzení jakosti frézovaného povrchu je ale vhodnější posuzovat povrch podle hloubky vlnek y, tedy rozdílem mezi vrcholem vlnky, a jejím nejhlubším místem. Pro výpočet hloubky vlnek udává *Prokeš (1982)* následující vzorec:

$$y = \frac{1}{2}\left(D - \sqrt{D^2 - f_z^2}\right) = R - \sqrt{R^2 - \frac{f_z^2}{4}} \qquad \text{[mm]} \qquad (7)$$

Kde: f_z – posuv na zub [mm]

D – průměr řezné kružnice [mm]

R – poloměr řezné kružnice [mm]

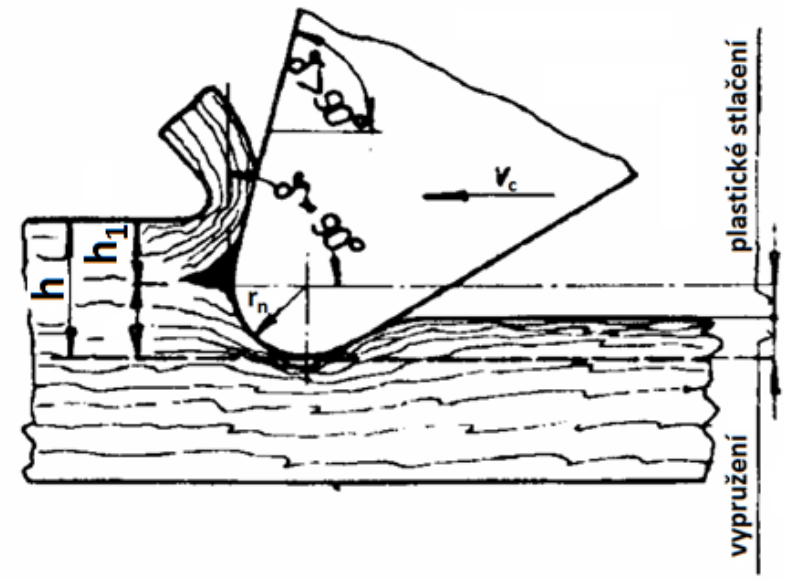
Výpočet rozměrů kinematických nerovností podle výše uvedených vztahů ovšem přesně neodpovídá skutečnosti, a proto se jedná pouze o teoretické hodnoty. To je způsobeno zejména:

- chvěním nástroje a obrobku při obrábění
- nestejnou vzdáleností břitů nožů od osy otáčení nástroje
- ustoupením skutečné řezné hrany od ideální

Při určité kombinaci řezných parametrů dochází k tzv. **pálení povrchu** při frézování. To se projevuje zhnědnutím až zčernáním obrobené plochy. Tento jev vzniká tak, že v důsledku špatné tepelné vodivosti dřeva se teplo (vzniklé třením řezné hrany o obráběnou plochu) koncentruje v povrchové části řezné hrany, kde teplota ostří dosahuje až 850°C. To způsobuje termickou změnu povrchové části obrobené plochy. Tento jev se vyskytuje hlavně při frézování relativně více otupeným nástrojem, kde je vyšší tření ostří o materiál, a u suchého dřeva, neboť s klesající vlhkostí ve dřevě klesá i jeho tepelná vodivost.

Při uvažování frézování skutečným řezným klínem, a nikoliv ideálním, dochází nejen k oddělení třísky od obrobku, ale i k deformaci obrobené plochy. Tento jev je

způsoben zaoblením řezné hrany o poloměru r_n. Na obr. 13 je znázorněno ostří pronikající dřevem, s výškou úběru h.



Obrázek 13 Vliv poloměru otupení ostří na deformaci při obrábění (LISIČAN, 1996)

Ve skutečnosti však dochází k odebrání menší výšky úběru h_1, což je skutečná výška úběru zmenšená o poloměr zaoblení ostří r_n. Dřevo které se nachází pod úrovní středu poloměru zaoblení r_n je pod ostřím stlačeno. Po uvolnění tlaku od ostří, dochází k vypružení dřeva, které je menší než původní výška stlačené vrstvy. Rozdíl mezi těmito hodnotami se nazývá plastické stlačení.

Z tohoto plyne omezení pro výšku úběru, a to že nelze odebrat nižší vrstvu dřeva než je hodnota poloměru zaoblení ostří r_n. V praxi to znamená, že čím ostřejší je nástroj, tím menší lze odebrat vrstvu dřeva od obrobku, a tím přesněji lze obrábět.

4.3.3 Zvyšování řezného odporu

Při oddělování třísky břitem nástroje klade materiál obrobku odpor, který nazýváme řezným odporem. Sílu, kterou musíme působit na nástroj, abychom řezný odpor překonali, nazýváme řeznou silou (PROKEŠ, 1982). Aby docházelo k oddělení materiálu, řezná síla musí být při obrábění vyšší než řezný odpor. Se zvyšujícím se otupením řezné hrany se zvyšuje i síla potřebná k rozdělení materiálu, a tím roste i řezný odpor.

4.4 Příčiny opotřebení řezného klínu

Největší mírou se na otupování řezného klínu podílí mechanické opotřebení. Na opotřebení mají vliv i další faktory, které se na procesu otupení podílejí méně, nikoliv však nevýznamně. Prokeš *(1982)* jmenuje tyto příčiny opotřebení:

- vliv mechanického otěru
- otěr způsobený zahřátím povrchové vrstvičky řezného klínu na vysokou teplotu (až 850°C)
- elektrická koroze
- elektrochemická koroze

Na **mechanické opotřebení** má vliv způsob jakým dochází k interakci nástroje a obrobku, a vlastnosti nástroje a obrobku. Jako vlastnosti nástroje vzhledem k opotřebení jsou nejdůležitější tvrdost a drsnost. Drsnost povrchu nástroje ovlivňuje odebírání částeček otěrem. Čím vyšší je drsnost povrchu, tím lépe je možné otěrem oddělování částeček od povrchu. V důsledku tření vzniká na povrchu řezného klínu vysoká teplota, která dosahuje až 850°C. Vysoké teploty způsobují nižší odolnost materiálu proti otěru, a způsobují tak **mechanicko-tepelné opotřebení**.

Při tření nástroje o dřevo vzniká elektrický náboj, který vytváří elektrický výboj. To zapříčiňuje **elektrickou korozi** řezné hrany. Dřevo jako organický materiál obsahuje množství látek, které chemicky působí na ostří. Jedná se zejména o organické kyseliny a vodu. S obsahem vody ve dřevě klesá tvorba elektrického výboje. Dohromady působí tyto faktory jako **elektrochemická koroze**.

4.4.1 Faktory stavby dřeva působící na otupování

Při obrábění přírodního dřeva má na otupování nástroje má vliv jeho anatomická stavba. V následující části textu jsou jmenovány faktory, které mají na otupování nástroje největší vliv.

Tvrdost dřeva charakterizuje schopnost dřeva klást odpor proti vnikání jiného tělesa do jeho struktury. V praxi to znamená, že čím vyšší je tvrdost obráběného dřeva, tím vyšší je řezný odpor, a tudíž musí být vyvinuta vyšší řezná síla. Rozlišujeme statickou

tvrdost a dynamickou tvrdost. Statická tvrdost se měří postupným otlačováním tělesa do povrchu dřeva, dynamická tvrdost je měřena pádem tělesa na povrch dřeva.

Podle statické tvrdosti měřené na čelní ploše dřeva při 12% vlhkosti, lze dřeva rozdělit do pěti skupin (GANDELOVÁ, et al., 2009):

I.	měkká dřeva	(<40 MPa)	smrk, lípa
II.	středně tvrdá dřeva	(41 – 80 MPa)	buk, dub, modřín
III.	tvrdá dřeva	(81 – 100 MPa)	habr, akát
IV.	velmi tvrdá dřeva	(101 – 150 MPa)	zimostráz, šeřík
V.	super tvrdá dřeva	(>150 MPa)	eben, quajak

S rostoucí tvrdostí dřeva roste i mechanické opotřebení nástroje. Při prvním úseku opotřebení dochází snadněji k odlomení části řezné hrany o tvrdší dřevo. V dalších úsecích opotřebení dochází u tvrdých dřevin k vyššímu mechanickému otěru, než dřevin měkkých. Intenzita opotřebení tedy roste se zvyšující se tvrdostí dřeva. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1.6, dřevo je nehomogenním materiálem, i tvrdost dřeva není v celém jeho průřezu stejná. To se při otupování projevuje nestejnoměrnou intenzitou opotřebení v průběhu délky ostří. Významnou změnou tvrdosti dřeva je přítomnost suků. Podle velikosti suků a druhu dřeviny mají suky zpravidla vyšší tvrdost než okolní dřevo. Průběh vláken suků je v kmeni kolmý nebo pod úhlem vzhledem k podélné ose kmene. To zapříčiňuje změnu modelu řezání při obrábění. Při styku ostří a suku tedy dochází k vyššímu namáhání řezné hrany, a tím i vyššímu opotřebení, kdy změnou tvrdosti a orientace dřevních vláken dochází dojít až k nárazu ostří o suk.

Při frézování dřeva s vyšší tvrdostí není vhodné, aby došlo k prvnímu úseku opotřebení právě o tvrdé dřevo. Dochází zde k vyššímu odlomu řezného klínu než o dřevo měkké, a tím tak k vyššímu počátečnímu opotřebení. Ideální je, aby první úsek opotřebení proběhl při obrábění měkčího dřeva, a nástroj tak byl pro obrábění tvrdého dřeva již zaběhnutý, a tudíž méně náchylný k odlomům řezné hrany.

Obsah anorganických látek ve dřevě působí na nástroj při obrábění abrazivně. Tyto látky (viz. kapitola 3.1.5) jsou přirozenou součástí dřeva, a v našich klimatických podmínkách nedosahují vzhledem k obrábění významných hodnot. U některých druhů

tropických dřevin je ale jejich obsah vysoký, a významně tak zkracují trvanlivost nástroje. Jedná se hlavně o obsah křemičitanů, tedy písku, který je do dřeva vpraven během růstu stromu.

5 Metody měření opotřebení řezného klínu

5.1 Důvody měření opotřebení řezného klínu

Výsledkem měření opotřebení řezného klínu je údaj vypovídající o stavu ostří nástroje. Tyto údaje slouží ke zhodnocení aktuálního stavu ostří, nebo ke zmapování průběhu opotřebování ostří.

5.2 Rozdělení metod měření řezného klínu, teorie měření hodnot

Metody měření opotřebení řezného klínu se dělí do dvou skupin:

- nepřímé metody
- přímé metody

5.2.1 Nepřímé metody

Nepřímé metody určují opotřebení pomocí veličin, které mají nějakou závislost na otupování nástroje. Nesledují tedy přímo stav ostří, ale důsledek při procesu otupování. Takovými veličinami mohou být např.:

- řezná síla
- řezný výkon
- délka obrobené plochy
- množství obrobených dílců
- doba práce stroje

Při měření otupení pomocí řezného výkonu nebo řezné síly je třeba brát v úvahu, že na jejich zvyšování nemá vliv pouze otupování nástroje, ale i opotřebení nebo zanášení jiných součástí stroje, jako jsou např. ložiska nebo převody. Měření otupení pomocí délky obrobené plochy, množstvím obrobených dílců, nebo doby práce stroje je nutné, aby byly obráběny stejné výrobky, a intenzita otupení tak byla v průběhu času stejná. Tyto metody jsou v provozu dobře využitelné. Např. zařízení na sledování výkonu může být součástí konstrukce stroje, a umožňuje tak jeho sledování. V praxi se také hojně využívá údržby nástroje po konkrétní době, kde vzhledem k požadované výstupní kvalitě obrobku je stanovena doba, po které je nástroj přeostřen nebo vyměněn. To může být např. určitý počet pracovních směn.

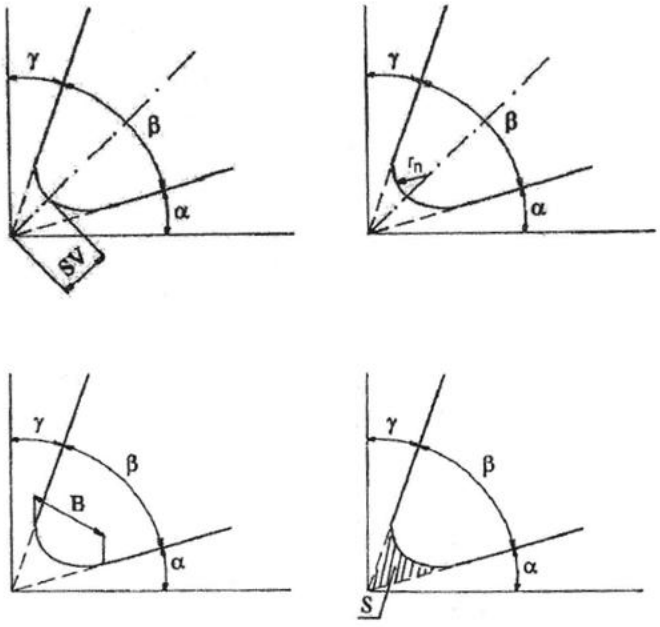
Nepřímé měřící metody však neinformují o konkrétních změnách mikrogeometrie nástroje, a o stavu ostří v průběhu jeho délky. Z tohoto hlediska jsou vhodnější metody přímé. Značnou výhodou nepřímých metod je možnost měření za chodu stroje, tzn. že není nutno přerušovat chod stroje, a demontáž nástroje.

5.2.2 Přímé metody

Přímé metody měří otupení přímo na nástroji. Tato měření jsou pracnější než měření nepřímá, neboť většinou je třeba nástroj ze stroje demontovat. Existují ovšem i speciální přípravky, které u některých typů strojů umožňují měření bez nutnosti demontáže nástroje, ovšem po zastavení chodu stroje. Přímé metody se dělí do dvou skupin:

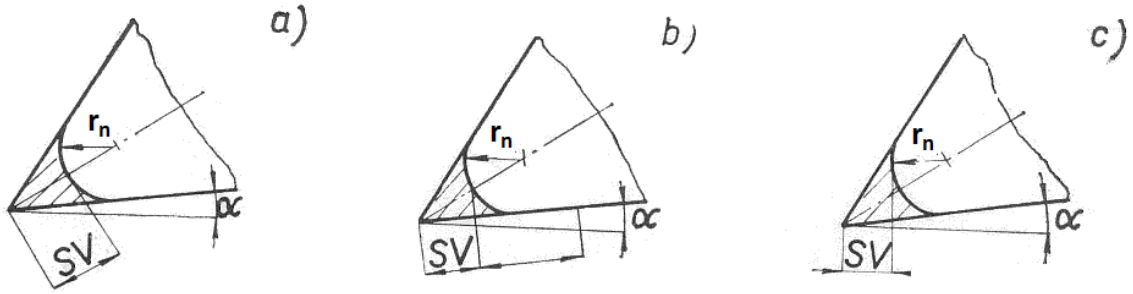
I. skupina přímých metod se zabývá měřením toho, co se z nástroje opotřebením odstranilo pomocí úbytku hmotnosti. Tyto metody však stejně jako metody nepřímé nevyjadřují změnu geometrie ostří.

II. skupina přímých metod jsou metody mikrometrické. Tato skupina je založena na měření rozměrových charakteristik, které ukazují změnu geometrie ostří. Na obr. 14 jsou základní charakteristiky pro měření otupení řezného klínu.



Obrázek 14 Základní charakteristiky pro měření otupení řezného klínu (HAJNÍK, 2007)
Δ(SV) *– ustoupení ostří,* $\boldsymbol{r_n}$ *- poloměr zaoblení ostří,* ***B*** *– šířka otěru,* ***S*** *– plocha otěru*

Každá z těchto hodnot vypovídá o způsobu opotřebení jiným způsobem. Ustoupení ostří Δ(SV) je vzdálenost od průsečíku čela a hřbetu (místo kde by se nacházelo ostří ideální) po skutečné ostří. Prokeš *(1982)* popisuje různé způsoby měření ustoupení stejné řezné hrany, obr. 15:



Obrázek 15 Způsoby měření ustoupení ostří (PROKEŠ, 1982)

Měření poloměru zaoblení r_n se měří podle způsobu zakřivení řezné hrany. V případě že je opotřebení stejné na čele i na hřbetě ostří, je postačující určit pouze jednu hodnotu r_n. Jestliže opotřebení čela a hřbetu rozdílné, je třeba určit poloměr zaoblení zvlášť pro hřbet (r_{n1}) a pro čelo (r_{n2}).

Šířka otěru B je vzdálenost míst, kde se plocha čela a hřbetu začínají odklánět od roviny ideálního řezného klínu. Pro měření této vzdálenosti je třeba určit místo, kde se plocha čela a hřbetu začíná odklánět od ideálního ostří. To může být v praxi nesnadné, nebo i nemožné zejména u pozvolných přechodů k zaoblení.

Plocha otěru S je rozdíl ploch ideálního řezného klínu a skutečného. Je to tedy plocha materiálu řezného klínu, jenž byl při opotřebení vzhledem k boční rovině pohledu na ostří odebrán.

Za předpokladu, že je řezný klín opotřeben rovnoměrně na čele i na hřbetu, a zaoblení ostří tak tvoří úsek kružnice, pro popsání otupení by byla dostačující jen jedna z charakteristik otupení. Takový případ v praxi ale nenastává, a pro lepší popsání je třeba použít více z výše uvedených charakteristik, např. plochou otěru S a vzdáleností ustoupení ostří Δ(SV).

5.3 Způsoby měření otupení

5.3.1 Měření lineárních rozměrů

Mikrometrické měření mikroskopem

Měření různých forem otupení se většinou provádí na univerzálních mikroskopech, nebo ve zvláštních případech elektronovým mikroskopem. Při měření používáme především nitkového kříže a měřidel pro pohyb v jednotlivých osách (MÁDL, 1988). Takto lze měřit rozměry opotřebení (např. odlomů) které leží v rovině kolmé k ose pohledu. Dnes je možnost mikroskop doplnit o specializovaný software, se kterým je možno pořizovat snímky a opatřovat je rozměrovými kótami.

Měření profilometry

Tato metoda je založena na vytvoření záznamu o profilu ostří. Jde o stejný princip jako při měření úchylkoměrem. Měřící hrot s poloměrem řádově jednotek mikrometrů se pohybuje po ostří, a snímá tak jeho profil. Hodnoty jsou elektronicky zpracovány, a výsledkem je např. záznam v podobě grafu jako zvětšeného výškového profilu, nebo trojrozměrná mapa povrchu.

Optická metoda

Pro potřeby měření nástrojů pro rovinné frézování je možné použít tzv. profilprojektor. Toto zařízení pracuje na principu osvětlení řezné hrany, a promítnutí jejího stínu ve zvětšeném měřítku. Tato metoda je vhodná pro sledování opotřebení v průběhu délky ostří, např. pro lokální odlomy ostří, nebo různé hodnoty ustoupení řezné hrany po délce ostří. Tímto způsobem je také možné zkoumat profil otupení v boční rovině ostří.

5.3.2 Určení hmotnostního úbytku

Metoda vážením před a po obrábění

Prostým zvážením nástroje před použitím a po obrábění umožňuje určit míru opotřebení velmi přesně. Tento způsob je ale použitelný pouze v případech, kdy je materiál nástroje

odebraný opotřebením unášen spolu s třískami. V případě že dochází k plastickému zdeformování řezného klínu, není tento způsob použitelný. Měření může být také zkreslené ulpíváním částí dřevní hmoty na nástroji jako např. přilnutí částeček dřeva spolu s obsahem pryskyřice.

Metoda radioizotopová

Nejcitlivější a nejpřesnější metodou určování hmotnostního úbytku, v závislosti na čase, je metoda radioizotopová. Umožňuje určit váhové úbytky řádově 10^{-1} až 10^{-3} mg. Měření se provádí ozářením (aktivací) měřeného nástroje, poté se nástrojem obrobí určité množství materiálu. Využívá se poznatku, že téměř všechen materiál odebraný od ostří je odváděn spolu s třískou. Poté je změřena měrná aktivita třísek, a na základě této měrné aktivity je stanoven hmotnostní úbytek nástroje, jenž ulpěl na třískách (PŘIKRYL, et al., 1982).

6 Závěr

Během procesu rovinného frézování dřeva je prvořadým úkolem stanovení výstupní kvality obrobené plochy, odvíjející se od použití výrobku a jeho dalšího zpracování. Dalším krokem je sestavení ekonomicky co nejefektivnějšího technologického a technického postupu výroby. Zde je třeba užít poznatky získané při studiu otupování nástroje.

Podle parametrů obráběného dřeva je nutné zvolit parametry nástroje, tzn. materiál, ze kterého je vyroben a jeho úhlové geometrii. Pro frézování měkčích dřevin jsou postačující nástroje z nástrojové oceli, neboť intenzita otupování je při jejich obrábění malá, pro frézování tvrdších dřevin je třeba uvážit použití nástrojů s řeznou hranou ze spékaných karbidů, nebo syntetického diamatu. Tato volba se samozřejmě projevuje na ceně nástroje a trvanlivosti ostří. Jestliže se ale např. s dvojnásobnou cenou nástroje zvýší trvanlivost řezné hrany desetkrát, pak je investice do dražšího nástroje ekonomicky efektivnější. S ohledem na trvanlivost řezné hrany, energetickou náročnost a kvalitu obrobené plochy je třeba zvolit vhodnou geometrii nástroje, a to takovou, aby kombinace těchto faktorů byla optimální.

Pro přesné zhodnocení vlivu faktorů dřeva na otupování, a tím i tak na jeho projevy, je třeba tento proces důkladněji zkoumat za konkrétních technických a technologických podmínek. K tomu je nutné použít metody pro měření opotřebení řezného klínu. Tato měření objasňují průběh a intenzitu otupování nástroje, a tím umožňují stanovit nejvýhodnější parametry při obrábění. Tyto údaje lze také odhadnout podle již známých hodnot při obrábění za podobných podmínek. Měření konkrétních hodnot je vhodné provádět např. pro potřeby obrábění nových materiálů, kde se dá očekávat nutnost úpravy technických parametrů, a umožnit tak zlepšit návrh parametrů nových, přímo pro konkrétní podmínky obrábění. V oblasti obrábění přírodního dřeva je zajímavým odvětvím obrábění modifikovaného dřeva, jako např. tepelně modifikovaného dřeva (ThermoWood®), tlakově nebo chemicky upraveného dřeva, kde hlubší výzkum ve vztahu k otupování při frézování chybí.

Seznam použité literatury

BARCÍK, Štefan. 2009. *Technika pre výrobu nábytku.* Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2009. ISBN: 978-80-228-2055-4.

BUDA, Ján, SOUČEK, Ján and VASILKO, Karol. 1988. *Toória obrábania.* Bratislava : ALFA, 1988. 063-564-88.

ČSN 01 5050 *Opotřebení materiálu, názvosloví.* 1968.

GANDELOVÁ, Libuše, HORÁČEK, Petr and ŠLESINGEROVÁ, Jarmila. 2009. *Nauka o dřevě.* Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009. ISBN: 978-80-7375-312-2.

HAJNÍK, Igor. 2007. *Zborník referátov z odborného semináre Drevorezné nástroje a obrábenie dreva 2007 - Opotrebenie rezného klína drevoobrábacích nástrojov.* Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2007. stránky 102-111.

JENOPTIK. 2012. Jenoptik. [Online] 2012. [Citace: 9. duben 2012.] http://www.jenoptik.com/en_lasers_material_processing.

KOTĚŠOVEC, Vladimír. 1981. *Ortogonální řezání - frézování dřeva.* Praha : Výzkumný a vývojový ústav dřevařský, 1981. 06-093-81.

LISIČAN, Josef a kol. 1996. *Teória a technika peo výrobu nábytku .* Zvolen : MATCENTRUM, 1996. ISBN: 80-967315-6-4.

MÁDL, Jan. 1988. *Experinentální metody v teorii obrábění.* Praha : České vysoké učení technické v Praze, 1988. Číslo publikace: 6266.

MILLER, Regis B. 2011. zeus.dci.ubiobio.cl. [Online] 2011. [Citace: 9. duben 2012.] http://zeus.dci.ubiobio.cl/~ananias/structure_wood_wh.pdf.

OČKAJOVÁ, Alena. 2001. *Zborník referátov z odborného semináre Drevorezné nástroje 2001, Opotrebenie rezného klína.* Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2001. stránky 21-25.

PROKEŠ, Stanislav. 1982. *Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva.* Praha : ALFA, 1982. 04-833-82.

PROKEŠ, Stanislav. 1991. *Údržba dřevoobráběcích nástrojů.* Praha : Správa pro výchovu a vzdělávání pracovníků lesního a vodního hospodářství ČR, 1991. ISBN: 80-209-0191-4.

PŘIKRYL, Zdeněk and MUSÍLKOVÁ, Rosa. 1982. *Teorie obrábění.* Praha : ALFA, 1982. Typové číslo: L13-C3-II-41/28818.

VIGNER, Miroslav and PŘIKRYL, Zdeněk a kol. 1984. *Obrábění.* Praha : SNTL, 1984. Typové číslo: L13-E1-V-41/22658.

Wood.mendelu.cz. 2002. [Online] Lesnická a dřevařská fakulta - Ústav nauky o dřevě, 2002. [Citace: 3. duben 2012.] http://wood.mendelu.cz/ml/multimedia/.