

ČESKÁ ZEMĚĎELSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

KATEDRA ZPRACOVÁNÍ DŘEVA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VLIV TECHNICKO – TECHNOLOGICKÝCH FAKTORŮ

ROVINNÉHO FRÉZOVÁNÍ PŘÍRODNÍHO DŘEVA

NA KVALITU OPRACOVANÉHO POVRCHU

Lukáš Kaplan

vedoucí práce: doc. Ing. Štefan Barcík CSc.

ČZU v Praze 2012



ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra zpracování dřeva

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Kaplan Lukáš

Dřevařství

Název práce

Vliv technicko - technologických faktorů rovinného frézování přírodního dřeva na kvalitu opracování povrchu

Anglický název

The influence of technical and technological flat milling factors of native timber quality an the machined surface

Cíle práce

Cílem práce je teoreticky zpracovat problematiku rovinného frézování přírodního dřeva z pohledu nezávislých technicko - technologických a nástrojových faktorů na závislé parametry určující kvalitu opracovaného povrchu.

Metodika

- 1/ Úvod
- 2/ Cíl bakalářské práce
- 3/ Teoretický rozbor procesu rovinného frézování
- 4/ Nástroj - jeho charakteristika, základní požadavky
- 5/ Teoretický rozbor drsnosti obráběného povrchu
- 6/ Principy měření kvality obráběného povrchu dřeva
- 7/ Závěr

Harmonogram zpracování

Datum zadání práce : květen 2011

Datum odevzdání práce : duben 2012



Rozsah textové části

35 - 45 stran

Klíčová slova

frézování, kvalita, řezná rychlost, posuvná rychlost, povrch, nástroj

Doporučené zdroje informací

1. Lisičan, J.: Teória a technika spracovania dreva., Zvolen: Matcentrum, 1996, 625 s. ISBN 80-967315-6-4
2. Prokeš, S.: Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva, 3. vyd., Praha : SNTL, 1982, 584 s.
3. Beňo, J.: Teória rezania kovov, Vienata, Košice, 1999, ISBN 80-70099-429-0
4. Ľubčenko, V.I.: Rezanie drevesiny i drevesnych materiálöv. Lesnaja promyšlennost', Moskva, 1986
5. Odborné články k danej problematike.

Vedoucí práce

Barcík Štefan, doc. Ing., CSc.

Termín odevzdání

duben 2012

doc. Ing. Štefan Barcík, CSc.

Vedoucí katedry



prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan fakulty

V Praze dne 17.1.2012



Čestné prohlášení:

Tímto čestně prohlašuji, že jsem BAKALÁŘSKOU PRÁCI na téma „VLIV TECHNICKO - TECHNOLOGICKÝCH FAKTORŮ ROVINNÉHO FRÉZOVÁNÍ PŘÍRODNÍHO DŘEVA NA KVALITU OPRACOVANÉHO POVRCHU“ zpracovával samostatně, pouze s použitím uvedené literatury, metod a zdrojů.

V Praze 24. dubna 2012:.....



Poděkování:

Tímto bych zde chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce, doc. Ing. Štefanovi Barčíkovi CSc.
za veškeré připomínky a odbornou pomoc při vypracování bakalářské práce.



Abstrakt

Lukáš Kaplan,

VLIV TECHNICKO - TECHNOLOGICKÝCH FAKTORŮ ROVINNÉHO FRÉZOVÁNÍ PŘÍRODNÍHO DŘEVA
NA KVALITU OPRACOVANÉHO POVRCHU – BAKALÁŘSKÁ PRÁCE.

První kapitola se zabývá teoretickým rozbořem procesu frézování a shrnuje obecně užívanou terminologii v oboru frézování a jeho druhy.

Druhá kapitola pojednává o nástroji jako prostředku, který nám umožňuje vlastní odebrání materiálu z obráběné plochy, dále se poté zabývá obráběným materiálem.

Třetí kapitola se zabývá již vlastní kvalitou obrobené plochy, pojmy vyskytujícími se v oblasti měření a zjišťování drsnosti a vlnitosti.

Práce uceleně shrnuje problematiku rovinného frézování v souvislostech s kvalitou opracovaného povrchu.

Klíčová slova: frézování, kvalita, řezná rychlost, povrch nástroj.



Abstract

Lukáš Kaplan,

The influence of technical and technological flat milling factors of timber quality on the machined surface.

The first chapter analyses the milling process and summarizes the related terminology as well as various kinds of milling.

The second chapter describes various tools used when taking away the material from the machined surface.

The third chapter analyses the quality of machined surface and terminology used in measurement and testing of roughness and waviness.

The script summarizes the surface milling process in connection with the quality of the machined surface.

Keywords: milling, quality, cutting speed, tool surface.



Obsah

Úvod	- 1 -
1 Teoretický rozbor procesu rovinného frézování	- 2 -
1.1 Pojem a druhy vlastního frézování	- 2 -
1.1.1 Válcové frézování	- 5 -
1.1.2 Kuželové frézování	- 7 -
1.1.3 Čelní frézování	- 8 -
1.1.4 Čelní kuželové frézování	- 8 -
1.2 Kinematika frézování	- 9 -
1.3. Plochy obráběného předmětu	- 13 -
2 Nástroj	- 14 -
2.1 Klasifikace frézovacích nástrojů	- 14 -
2.2 Prvky bříty	- 16 -
2.3 Nástroje pro rovinné frézování	- 17 -
2.4 Charakteristika obráběného materiálu	- 17 -
2.4.1 Stavba dřeva	- 18 -
2.4.2 Dřevo a jeho vlastnosti	- 21 -
3 Teoretický rozbor drsnosti obráběného povrchu	- 23 -
3.1 Kvalita obrobeného povrchu	- 23 -
3.2 Drsnost povrchu výrobků ze dřeva a materiálů na bázi dřeva (ČSN 490231)	- 24 -
3.3 Definice názvů vztahujících se k drsnosti povrchu (ČSN EN ISO 4287)	- 26 -
3.4 Vlnitost povrchu	- 35 -
3.5 Vliv faktorů na drsnost povrchu	- 38 -
4 Principy měření kvality obráběného povrchu	- 39 -
4.1 Metody měření nerovnosti povrchu	- 39 -
4.2 Metody měření drsnosti povrchu	- 41 -
Závěr	- 42 -



Seznam značek a zkratek

a_p - hloubka řezu.....	[mm]
B – šířka frézované plochy.....	[mm]
C – průměr nástroje.....	[mm]
D – průměr řezné kružnice.....	[mm]
f_o – posuv na otáčku.....	[mm]
f_z – posuv na zub.....	[mm]
h_{ch-max} – maximální tloušťka třísky.....	[mm]
H_{ch-0} – minimální tloušťka třísky.....	[mm]
H_{ch-str} – střední tloušťka třísky.....	[mm]
L – délka oblouku.....	[mm]
L – teoretická délka třísky.....	[mm]
L_m – hloubka vlny.....	[mm]
l_n - vyhodnocovaná délka.....	[mm]
L_t – hloubka profilu.....	[mm]
m – čára výstupků profilu	
n – otáčky.....	[min ⁻¹]
P_c – řezný výkon.....	[W]
P_c – výška největší prohlubně profile.....	[mm]
P_{p0} – příkon nezatíženého elektromotoru.....	[W]
P_{PR} – příkon elektromotru při pracovní operaci.....	[W]
P_V – hloubka největší prohlubně.....	[mm]
P_z – největší výška profilu.....	[mm]
R – poloměr řezné kružnice.....	[mm]
R_c – střední výška prvku profilu.....	[mm]
R_p – výška nejvyššího výstupku profilu.....	[mm]



R_v – hloubka největší prohlubně profilu.....	[mm]
R_z - výška nerovností profilu z deseti bodů.....	[mm]
v_c – řezná rychlost.....	[m.s ⁻¹]
v_f – posuvná rychlost.....	[m.min ⁻¹]
z – počet zubů	
Z_t - výška nerovnosti profilu.....	[mm]
Z_v - výška výstupku profilu.....	[mm]
α – úhel hřbetu.....	[°]
β – úhel břitu.....	[°]
γ – úhel čela.....	[°]
δ – řezný úhel.....	[°]



Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Typologie odřezávaných vrstev při frézování a znázornění záběrné šířky a_e ($a_e = a_p$) (Beňo, 1999).....</i>	<i>-2-</i>
<i>Obr. 2 Válcové frézování (Prokeš, 1982).....</i>	<i>-3-</i>
<i>Obr. 3 Kuželové frézování (Prokeš, 1982).....</i>	<i>-3-</i>
<i>Obr. 4 Čelní frézování (Prokeš, 1982).....</i>	<i>-4-</i>
<i>Obr. 5 Čelní kuželové frézování (Prokeš, 1982).....</i>	<i>-4-</i>
<i>Obr. 6 Válcové frézování (Mátik, 2001).....</i>	<i>-5-</i>
<i>Obr. 7 Čelná frézování (Mátik, 2001).....</i>	<i>-5-</i>
<i>Obr. 8 Protiběžné frézování podle ČSN ISO 3002/1.....</i>	<i>-6-</i>
<i>Obr. 9 Souběžné frézování podle ČSN ISO 3002/1.....</i>	<i>-7-</i>
<i>Obr. 10 Hlavní druhy frézování v dřevařství (Prokeš, 1982).....</i>	<i>-9-</i>
<i>Obr. 11 Prvky teoretického výpočtu tloušťky a délky třísky válcového frézování s přímou řeznou hranou (Prokeš, 1982).....</i>	<i>-10-</i>
<i>Obr. 12/1 Druhy frézovacích nástrojů (Prokeš, 1982).....</i>	<i>-14-</i>
<i>Obr. 12/2 Druhy frézovacích nástrojů (Prokeš, 1982)</i>	<i>-15-</i>
<i>Obr. 13 Frézovací nástroje (Prokeš, 1982)</i>	<i>-16-</i>
<i>Obr. 14 Symbolika hlavních úhlů břitu (Lisičan, 1996)</i>	<i>-17-</i>
<i>Obr. 15 Základní řezy dřevem (Balabán, 1955).....</i>	<i>-18-</i>
<i>Obr. 16 zobrazení jádra a běle na výřezu dubového dřeva.....</i>	<i>-19-</i>
<i>Obr. 17 Prostorové znázornění anatomické stavby jehličnatého dřeva (Požgaj, Chovanec a kol., 1997).....</i>	<i>-20-</i>
<i>Obr. 18 Prostorové znázornění anatomické stavby listnatého dřeva (Požgaj, Chovanec a kol., 1997).....</i>	<i>-21-</i>



<i>Obr. 19 – 28 Zobrazení drsnosti podle ČSN 490231.....</i>	<i>-25-</i>
<i>Obr. 29 Skutečný povrch.....</i>	<i>-26-</i>
<i>Obr. 30 Geometrický povrch.....</i>	<i>-26-</i>
<i>Obr. 31 Kolmý řez.....</i>	<i>-27-</i>
<i>Obr. 32 Skutečný profil.....</i>	<i>-27-</i>
<i>Obr. 33 Geometrický profil.....</i>	<i>-27-</i>
<i>Obr. 34 Příčný profil.....</i>	<i>-28-</i>
<i>Obr. 35 Podélný profil.....</i>	<i>-28-</i>
<i>Obr. 36 Základní a vyhodnocovaná délka.....</i>	<i>-28-</i>
<i>Obr. 37 Odchylka profilu.....</i>	<i>-29-</i>
<i>Obr. 38 Místní prohlubeň profilu.....</i>	<i>-29-</i>
<i>Obr. 39 Místní výstupek profilu.....</i>	<i>-30-</i>
<i>Obr. 40 Výstupek profilu.....</i>	<i>-30-</i>
<i>Obr. 41 Prohlubeň profilu.....</i>	<i>-30-</i>
<i>Obr. 42 Čára výstupků profilu.....</i>	<i>-31-</i>
<i>Obr. 43 Čára prohlubní profilu.....</i>	<i>-31-</i>
<i>Obr. 44 Výška nejvyššího výstupku profilu.....</i>	<i>-32-</i>
<i>Obr. 45 Hloubka největší prohlubně profilu.....</i>	<i>-32-</i>
<i>Obr. 46 Největší výška profilu.....</i>	<i>-33-</i>
<i>Obr. 47 Výška nerovností profilu z deseti bodů.....</i>	<i>-33-</i>
<i>Obr. 48 Střední aritmetická odchylka profilu.....</i>	<i>-33-</i>
<i>Obr. 49 Rozestup nerovností profilu.....</i>	<i>-34-</i>
<i>Obr. 50 Profil ofrézovaného povrchu válcovou frézou (Lisičan, 1984).....</i>	<i>-35-</i>



<i>Obr. 51 Profil povrchu ofrézovaného dvěma noži s rozdílným poloměrem řezání.....</i>	<i>-36-</i>
<i>Obr. 52 Profil povrchu po velké nepřesnosti nastavení vyčnívání nožů (τ).....</i>	<i>-36-</i>
<i>Obr. 53 Šířka vlnek při frézování.....</i>	<i>-38-</i>
<i>Obr. 54 Vliv anatomie dřeva na parametry drsnosti (Gurau, 2006).....</i>	<i>-38-</i>
<i>Obr. 55 Přehled kontrolních metod povrchu (Afjehi, 2006).....</i>	<i>-41-</i>

Úvod

Člověk využívá dřevo od počátku své existence. Nejprve k energetickým účelům následně i jako stavební materiál a konstrukční materiál pro první nábytek. Od prvních pokusů využití dřeva se objevovaly snahy o obrábění. Do dnešních dní se stále dřevní hmota využívá pro energetické účely, v poslední době navíc s velkou oblibou, v neméně míře ovšem nalézá využití při stavbě domů, výrobě nábytku a dalšího vybavení, jak pro komerční, tak i pro soukromé využití. Přírodní dřevo je často zpracováváno na velice kvalitní designové výrobky, jejichž výroba potřebuje nejen špičkový řemeslný přístup, ale i kvalitní obrábění povrchu za pomoci nejmodernějších technologií. V dnešní době se díky stále rostoucím cenám energií, ale i pracovní síly, musí výroba neustále optimalizovat. Abychom mohli efektivně využívat jak potenciál lidské síly a dovedností, tak i možnosti dnešních technologií, musíme využívat základní poznatky ze všech vědních disciplín.

Pro dosažení kvalitního výrobku, který chceme umístit na trh, musíme dodržet veškerá pravidla v rámci celého procesu obrábění dřeva. Jedním z nejdůležitějších okamžiků v průběhu výroby je právě rovinné frézování přírodního dřeva. Správně nastaveným procesem rovinného frézování můžeme jak vylepšit nekvalitně připravený povrch obráběného materiálu z předchozích operací, tak i snížit náročnost následujících operací ve výrobním procesu.

Nekvalitním procesem rovinného frézování přírodního dřeva můžeme naopak značně zvýšit pracnost a energetickou náročnost následujících operací, stejně tak, ale i obráběný předmět úplně znehodnotit. Proto musíme správně volit a nastavovat veškeré prvky, které přichází do styku s obráběnou plochou.

Cílem této práce je teoretické zpracování problematiky rovinného frézování přírodního dřeva, z pohledu nezávislých technicko - technologických a nástrojových faktorů na závislé parametry určující kvalitu opracovaného povrchu.

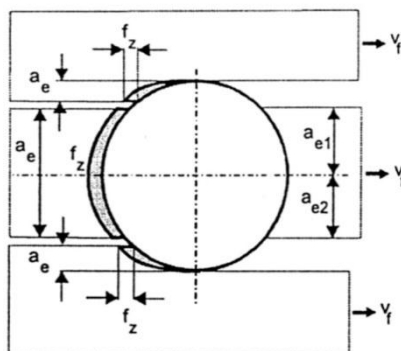
1 Teoretický rozbor procesu rovinného frézování

1.1 Pojem a druhy vlastního frézování

Od prvních pokusů člověka o obrábění dřeva různými způsoby a předměty prošla tato technologie překotným vývojem. Člověk se postupně naučil požívat na obrábění různé předměty a nástroje a tak vznikly první obráběcí stroje, poháněné lidskou silou. Lidé neobráběli jen materiály, které našli v přírodě ale i ty, které si sami vyrobili, dnes označované jako aglomeráty.

K velkému zdokonalení procesu obrábění došlo v souvislosti s nahrazením fyzické síly lidí a zvířat silou mechanickou, kterou člověk získával z vody a větru. Na počátku 17. století se již strojařská technika používala k obrábění ve velice širokém měřítku. Vývoj obrábění, obráběcích strojů a nástrojů pokračuje bez přerušení do dnes. Neustále se vyvíjejí nové konstrukční prvky a materiály.

Frézováním nazýváme proces obrábění otáčejícím se nástrojem (frézou, frézovací hlavou a pod.), při kterém se s měnící hloubkou úběru mění i nominální tloušťka třísky o minimální h_{ch-0} po maximální h_{ch-max} (při protiběžném frézování), popřípadě naopak od h_{ch-max} po h_{ch-0} (při souběžném frézování), nebo se mění rozměr opracovaného materiálu např. dřeva.



Obr. 1 Typologie odřezávaných vrstev při frézování a znázornění záběrné šířky a_e ($a_e = a_p$)

(Beňo, 1999):

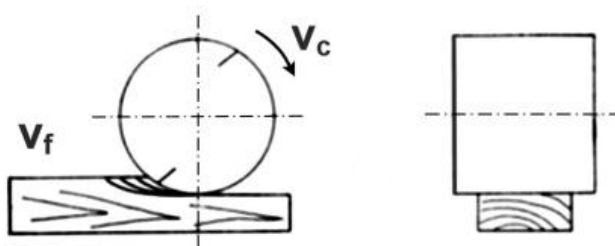
a - souběžné frézování, b - čelní frézování, c - protiběžné frézování

Základní způsoby frézování uvedené na obr. 1 představují souběžné a protiběžné válcové frézování (osa nástroje je rovnoběžná s obrobenou plochou, rozdílná orientace směru v_c a v_f) a čelní frézování (osa nástroje je kolmá na obrobenou plochu).

Tento způsob obrábění volíme k dosažení hladkého povrchu a přesných rozměrů obrobku (srovnávací, tloušťkovací a frézovací stroje). Obrobek se v praxi při různých operacích frézuje ve všech směrech vzhledem k průběhu dřevních vláken, nejčastěji však ve směru podélném až podélně-čelním. Frézovací nástroj se většinou otáčí proti směru posuvu (protiběžné frézování), v některých případech ve směru posuvu (souběžné frézování), (Prokeš, 1982).

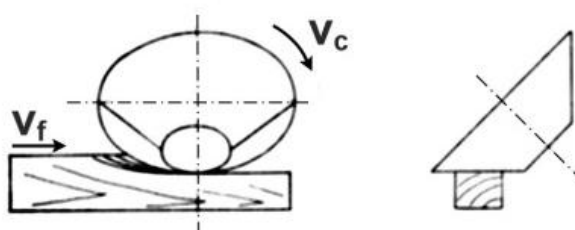
Podle polohy osy otáčení a podle ploch, které při frézování opisují břity nástroje, rozlišujeme frézování:

Válcové frézování (obr. 2), při kterém je osa otáčení nástroje rovnoběžná s obrobenou plochou, břity nástroje opisují válcovou plochu.



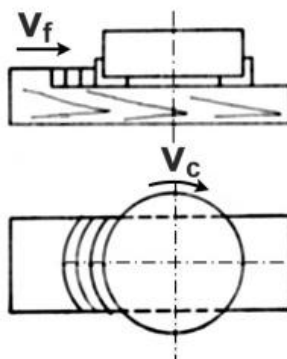
Obr. 2 Válcové frézování (Prokeš, 1982)

Kuželové frézování (obr. 3), při kterém je osa otáčení nástroje skloněná pod určitým úhlem k obrobené ploše a břity nástroje opisují kuželovou plochu.



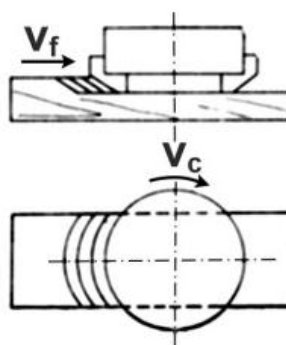
Obr. 3 Kuželové frézování (Prokeš, 1982)

Čelní frézování (obr. 4), při kterém je osa otáčení nástroje kolmá k obrobenému povrchu, břity opisují válcovou plochu. 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.



Obr. 4 Čelní frézování (Prokeš, 1982)

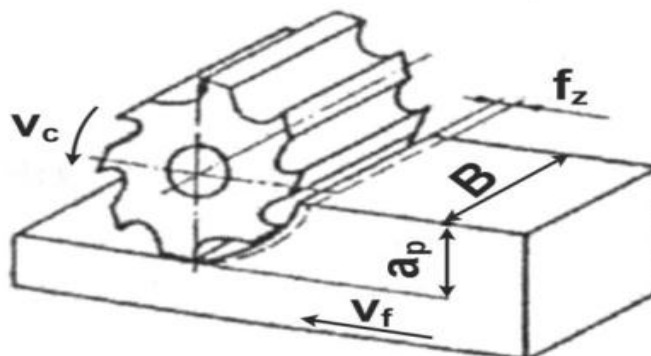
Čelní kuželové frézování (5), při kterém je osa otáčení kolmá k obráběnému povrchu, avšak na rozdíl od čelního frézování jsou břity nástroje skloněné k obráběnému povrchu pod určitým úhlem.



Obr. 5 Čelní kuželové frézování (Prokeš, 1982)

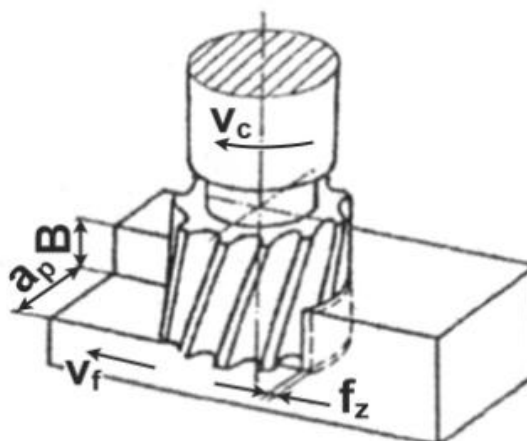
Podle polohy nástroje k obráběné ploše se rozlišuje frézování:

Obvodem nástroje – válcové frézování, osa nástroje je rovnoběžná s obrobenou plochou.



Obr. 6 Válcové frézování (Mátik, 2001)

Čelem nástroje – čelní frézování, osa nástroje je kolmá na obrobenou plochu



Obr. 7 Čelní frézování (Mátik, 2001)

1.1.1 Válcové frézování

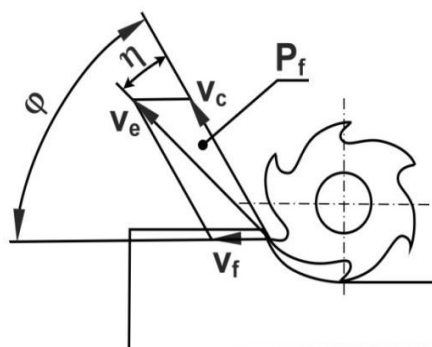
Řezný pohyb, jako relativní pohyb nástroje a obrobku, se určuje vektorem, jehož směr udává tangentu k dané cykloidě. Cykloida je výslednice otáčení frézy a pohybu obrobku. Vzdálenost posuvu bodu cykloidy za jednu otáčku frézy určuje velikost posuvu na otáčku f_0 , a vzdálenost posuvu dvou sousedních zubů je hodnota posuvu na zub f_z (Lipták, 1979).

Při válcovém frézování je tříska odřezávána břity po obvodu frézy. Ve směru posuvu je tloušťka třísky stejná a je rovna posuvu na zub f_z .

Skutečná tloušťka třísky se ale mění:

- Při protiběžném frézování od nuly do maximální tloušťky
- Při souběžném frézování od maximální tloušťky do nuly

Při protiběžném frézování je směr otáčení nástroje proti směru posuvu obrobku obr. 8. Břit každého zubu začíná odřezávat vrstvu minimální tloušťky. Ve skutečnosti je vždy řezná hrana zaoblená a odřezávání materiálu začíná vždy, když má vrstva nějakou tloušťku. Když je vrstva tenká, řezná hrana neřeže, ale pouze deformuje povrch.



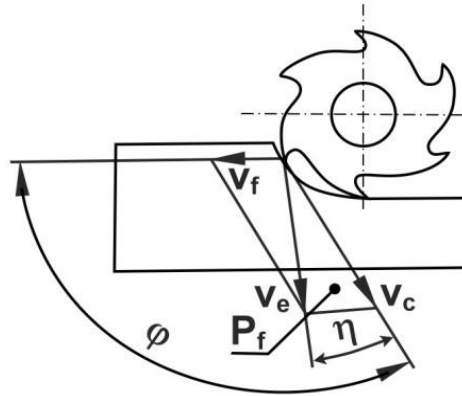
Obr. 8 Protiběžné frézování podle ČSN ISO 3002/1

Při souběžném frézování se nástroj otáčí stejně se směrem posuvu obrobku obr. 9. Tloušťka odřezávané vrstvy je největší na začátku záběru a postupně se zmenšuje až na nulu.

Tento způsob má několik předností:

- Výsledná řezná síla směřuje do materiálu – to umožňuje zmenšovat upínací síly.
- Zmenšuje se náchylnost stroje ke chvění.
- Je možní zvýšit f_z – posuv na zub a tím dosáhnout většího výkonu.

Nevýhodou souběžného frézování je rázové namáhání břitů na začátku jejich záběru, když se odřezává vrstva o největší tloušťce. Rázové namáhání je možné snížit použitím nástrojů s břity umístěnými do šroubovice.



Obr. 9 Souběžné frézování podle ČSN ISO 3002/1

1.1.2 Kuželové frézování

Tento způsob je podle Krjaževa velmi produktivní (rychlost posuvu se oproti válcovému frézování zvyšuje až třikrát) vzhledem k tomu že se vytváří tříska o malé délce. Při kuželovém frézování je trajektorie břitu k rovině K – M kolmé k obrobené ploše hyperbolou o velkém poloměru zakřivení. Poloměr zakřivení hyperbolické trajektorie je tedy v příčném směru obrobku různý. Úhel se doporučuje 10° až 12°, aby R_{kstr} byl dostatečně velký. Výpočet dalších kinematických parametrů je podobný jako v případě válcového frézování.



1.1.3 Čelní frézování

Při tomto frézování jsou břity rozloženy především na čele nástroje tj. na ploše kolmé k ose frézy a částečně i na válcovém obvodě. Osa rotace frézy je kolmá k obrobene ploše. Dráha cykloidy řezného pohybu čelních zubů frézy leží v rovině rovnoběžné s obrobenu plochou. Hloubka řezu se nastavuje ve směru osy frézy. Materiál z obrobku odebírají břity zubů na čele. Když je šířka frézované plochy B rovna průměru frézy D , hovoříme o plném frézování (úhel styku δ se rovná 180°). Podobně jako při válcovém frézování, tak i při čelním frézování se tloušťka řezu během záběru mění v závislosti na polohovém úhlu Ψ (Lipták, 1979).

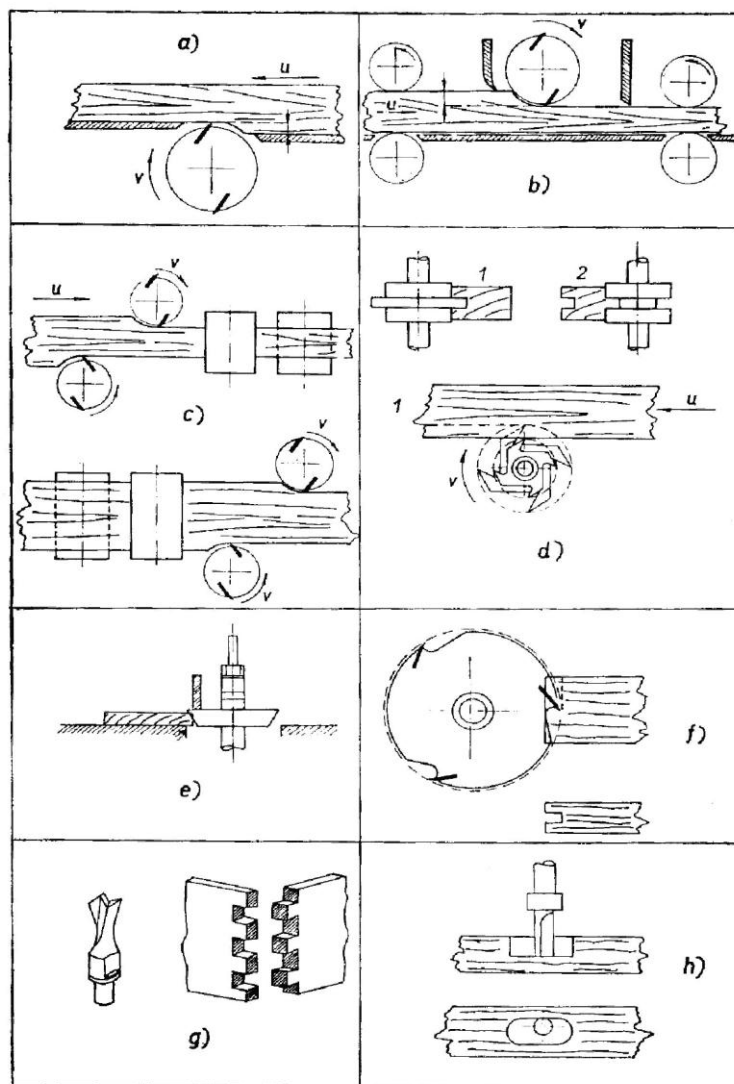
1.1.4 Čelní kuželové frézování

Taktéž při čelním kuželovém frézování dochází k tvorbě třísky o malé délce. Délka třísky s_{\max} nemá být větší než $0,1\text{mm}$. K úběru třísky dochází, během záběru, vzhledem k průběhu vláken pod různými úhly. Frézování může být během otáčky podélné až příčné, což má nepříznivý vliv na drsnost povrchu. Proto je nutné, aby byla šířka oblouku maximálně $D/2$.

Potřebný výkon je o 20 – 30% nižší než u válcového frézování (Prokeš, 1982).

Technologické způsoby při frézování dřeva jsou různé:

- Rovinné (srovnávání a tloušťkování).
- Křivoploché (frézování křivé plochy).
- Profilovací (vytváření různých profilů).
- Speciální (např. tvorba reliéfů apod.).

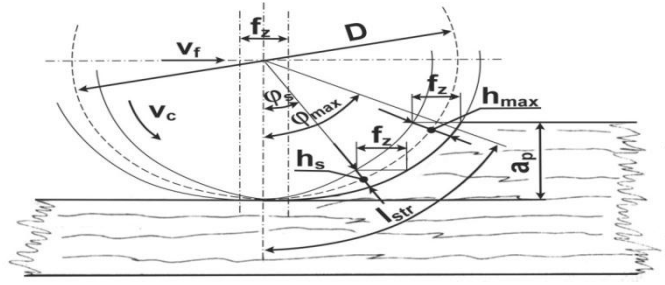


Obr. 10 Hlavní druhy frézování v dřevařství (Prokeš, 1982)

a – srovnávání (nožovým hřídelem), b – tloušťkování, c – dvojstranné frézování,
d – frézování pera (1) a drážky (2), e – frézování úhlovou frézou, f – čepování,
g – frézování spojů rybinovací frézou, h – frézování vrchní frézou.

1.2 Kinematika frézování

Vzhledem k rotačnímu pohybu břitu a přímočarému rovnoměrnému pohybu obrobku, je výsledný pohyb břitu po cykloidě. Jelikož je poměr veličin řezné rychlosti a posuvu obrobku značně velký, je cykloida na tolik prodloužená, že ji můžeme, prakticky bez velké chyby, považovat za kružnici. Břit je po dobu jedné otáčky na délce oblouku l v záběru, který odpovídá střednímu úhlu $\varphi + \varphi'$. Úhel φ' je velmi malý, proto se při výpočtu délky třísky l většinou zanedbává (Prokeš, 1982).



Obr. 11 Prvky teoretického výpočtu tloušťky a délky třísky válcového frézování s přímou řeznou hranou (Prokeš, 1982).

Teoretická délka třísky:

$$L = \frac{D}{2} \cdot \arctg(\varphi + \varphi') = \frac{\pi \cdot D \cdot (\varphi + \varphi')}{360^\circ} \approx 0,0175 \cdot R \cdot \varphi \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

Kde: D – průměr řezné kružnice [mm]

R – poloměr řezné kružnice [mm]

φ – úhel styku dřevních vláken s nástrojem [°]

φ' – posunutý úhel styku dřevních vláken s nástrojem [°]

Příčemž platí:

$$\sin \varphi' = \frac{f_z}{D} \quad [^\circ] \quad (2)$$

Kde: f_z – posuv na zub [mm/zub]

D – průměr řezné kružnice [mm]

$$\cos \varphi = \frac{\frac{D}{2} - a_p}{\frac{D}{2}} = \frac{D - 2a_p}{D} = 1 - \frac{a_p}{R} \quad [^\circ] \quad (3)$$

Kde: D – průměr řezné kružnice [mm]

R – poloměr řezné kružnice [mm]

a_p - hloubka řezu [mm]

Vlivem deformace a nesoudržnosti materiálu obrobku je obvykle skutečná délka třísky menší než délka teoretická (Prokeš 1982).

Při větších průměrech nástroje, malých posuvných rychlostech, malých tloušťkách odebírané vrstvy, můžeme délku třísky vypočítat ze vztahu (Prokeš, 1982):

$$L = R \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{a_p}{R}} = \sqrt{a_p \cdot D} = \frac{f_z \cdot a_p}{h_{ch-str}} \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

Kde: D – průměr řezné kružnice [mm]

R – poloměr řezné kružnice [mm]

φ – úhel styku dřevních vláken s nástrojem [°]

φ' – posunutý úhel styku dřevních vláken s nástrojem [°]

Teoretická střední tloušťka třísky:

$$h_{ch-str} = \frac{f_z \cdot a_p}{L} = \frac{f_z \cdot a_p}{\sqrt{a_p \cdot D}} = f_z \cdot \sqrt{\frac{a_p}{D}} = \frac{f_z \cdot 1000}{n \cdot z} \cdot \sqrt{\frac{a_p}{D}} \quad [\text{mm}] \quad (5)$$

Kde: a_p - hloubka řezu [mm]

D – průměr řezné kružnice [mm]

f_z – posuv na zub [mm/zub]

L – teoretická délka třísky [mm]

n – otáčky frézy [min⁻¹]

z – počet zubů [-]

Teoretická maximální tloušťka třísky:

$$h_{ch-max} = f_z \cdot \sin \varphi = 2 \cdot h_{ch-str} \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

Kde: f_z – posuv na zub [mm/zub]

φ – úhel styku dřevních vláken s nástrojem [°]

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

**Řezná rychlost (Barcík, 2000):**

$$v_c = \frac{\pi \cdot n \cdot Z}{1000} \quad [\text{m/min}] \quad (7)$$

Kde: D – průměr řezné kružnice - nástroje [mm]

n – otáčky frézy [min⁻¹]

Posuvná rychlost (Barcík, 2000):

$$v_f = \frac{f_z \cdot n \cdot z}{1000} \quad [\text{m/min}] \quad (8)$$

Kde: f_z – posuv na zub [mm/zub]

n – otáčky frézy [min⁻¹]

z – počet zubů [-]

Posuv na zub (Barcík, 2000):

$$f_z = \frac{v_f \cdot 1000}{n \cdot z} \quad [\text{mm}] \quad (9)$$

Kde: v_f – posuvná rychlost [m/min]

n – otáčky frézy [min⁻¹]

z – počet zubů [-]

Řezný výkon:

Při hodnocení dřevoobráběcích strojů rozlišujeme příkon a výkon. Příkon motoru P_{pr} je definován jako součin napětí, proudu a účinníku $\cos \varphi$ tj. výkon odebraný ze sítě. Příkon je parametr potřebný pro určení energetických nároků zařízení, nebo například pro správné dimenzování rozvodné sítě ke stroji, ale i k určení celkové efektivity daného strojního zařízení

Řezný výkon P_c je výkon potřebný na vyvolání odpovídající řezné síly potřebné k odebrání třísky z materiálu, při konkrétní technologické operaci. Řezný výkon můžeme také vyjádřit jako množství práce vynaložené za jednu sekundu.

- Při experimentálních měřeních rozlišujeme dva druhy příkonů. Jako první můžeme označit příkon elektromotoru při volnoběhu P_{po} . Tento příkon



můžeme na dřevoobráběcím stroji naměřit při práci bez materiálu – volnoběžném otáčení. Z čehož vyplývá, že se jedná o příkon potřebný k překonání elektromechanických ztrát elektromotoru a ztrát, které vznikají v převodech a vedení strojního zařízení.

- Příkon elektromotoru při technologické operaci P_{PR} . Jedná se tedy o příkon elektromotoru v okamžiku, kdy dřevoobráběcí stroj vykonává práci – obrábí obrobek. V tomto příkonu jsou zahrnuty i ztráty elektromotoru a ztráty, které vznikají v převodech a vedení strojního zařízení.

Pokud známe oba dva zmiňované příkony a akceptujeme-li předpoklad, že absolutní ztráty v elektromotoru stroje pracujícího na volnoběh a elektromotoru při reálné práci jsou stejně velké, můžeme pro výpočet řezného výkonu použít následující vztah:

$$P_C = \frac{P_{PR} - P_{P0}}{\eta_C} \quad [\text{kW}] \quad (10)$$

Kde: η_C – celková účinnost dřevoobráběcího stroje [-]

P_{PR} – příkon motoru při technologické operaci [kW]

P_{P0} – příkon motoru při volnoběhu [kW]

Pokud známe řezný výkon, je možné jednoduše odvodit řeznou sílu, kterou chápeme, jako sílu kterou je nutné vyvodit, k překonání odporu dřeva a vykonání třísko-tvorného procesu.

$$F_C = \frac{P_C}{v_C} \quad [\text{N}] \quad (11)$$

Kde: P_C – řezný výkon [kW]

v_C – řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

1.3. Plochy obráběného předmětu

Na obrobku rozlišujeme tyto tři plochy:

- Obráběná plocha, plocha, která je v rámci procesu obrábění nahrazena novou plochou.
- Řezná plocha, plocha řezu se vytváří bezprostředně za břitem nástroje.
- Obrobená plocha, je výsledkem obrábění a tvoří ji zbytky řezné plochy.

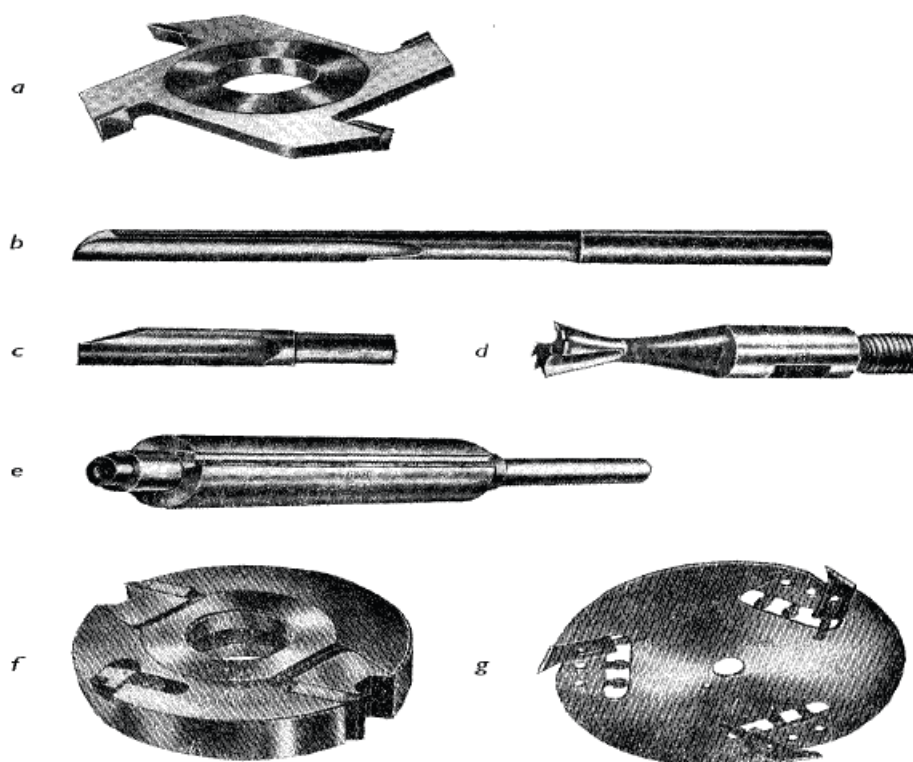
2 Nástroj

Řezným nástrojem je v praxi těleso různých tvarů, na kterém můžeme nalézt jeden nebo i větší počet břitů. (Lisičan, 1996).

Úkolem nástroje je odstranění určitého množství dřevní hmoty z obrobku, za účelem získání požadovaného tvaru nebo hladkosti povrchu.

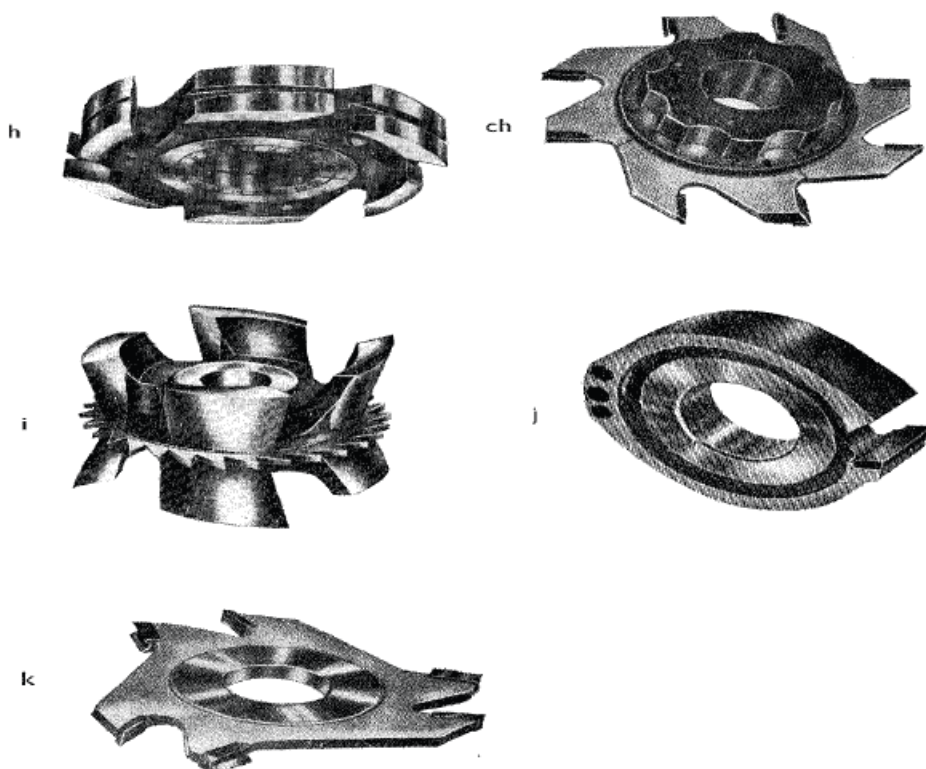
2.1 Klasifikace frézovacích nástrojů

Podle Prokeše můžeme frézovací nástroje rozlišovat i podle jejich výroby, které jsou znázorněné na obrázcích 12/1 a 12/2:



Obr. 12/1 Druhy frézovacích nástrojů (Prokeš, 1982)

*a – kružec, b – dlabací fréza, c – vrchní fréza, d – rybinová frézka,
e – nožová hřídel, f – nožová hlava, g – čepovací kotouč.*



Obr. 12/2 Druhy frézovacích nástrojů (Prokeš, 1982)

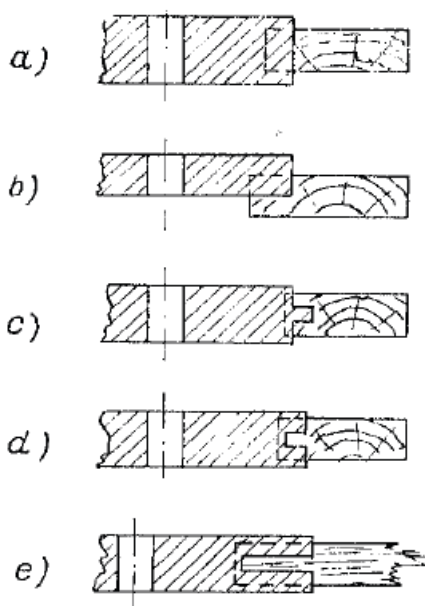
h – souprava pro frézování pera, ch – dělená nastavitelná fréza, i – složený nástroj,

j – drážkovací SK fréza s jednou řeznou hranou a omezovačem třísky,

k - drážkovací kružec s třemi oboustrannými předřezávači a dvěma vytahovacími zuby.

Dále můžeme frézy rozlišovat podle směru otáčení a to pravotočivé, které se otáčejí ve směru hodinových ručiček a levotočivé, které se otáčejí proti směru hodinových ručiček. Smysl otáčení se posuzuje při pohledu směrem od elektromotoru nebo hnací řemenice směrem k nástroji. (Prokeš, 1982)

Podle tvaru obrobené plochy rozlišujeme frézovací nástroje znázorněné na obrázku 13:



Obr. 13 Frézovací nástroje (Prokeš, 1982)

a – srovnávací, b – polodrážkovací, c – drážkovací, d – perovací, e – čepovací.

2.2 Prvky břitu

Třískotvorný proces se uskutečňuje působením právě těch částí břitu, které jsou v bezprostředním kontaktu s obráběným materiálem.

Úhlová geometrie:

Úhel hřbetu α – svírá jej řezný povrch a hřbetovou plochu břitu

Úhel břitu β – svírá jej čelní plocha a plocha hřbetu

Úhel čela γ – svírá jej čelní plochou a rovinou π , kolmou k obrobené ploše.

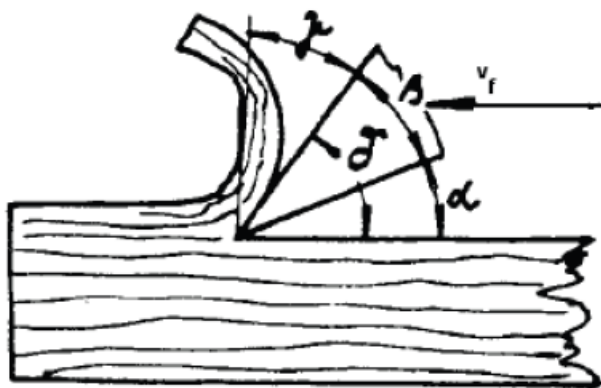
Součet uvedených úhlů (úhlu čela, úhlu břitu a úhlu hřbetu) je 90° a je zobrazený na obr. 14:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ \quad (12)$$

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

$$\alpha + \beta = \delta = 90 - \gamma \quad (13)$$

$$\gamma = 90 - \delta = 90 - (\alpha + \beta) \quad (14)$$



Obr. 14 Symbolika hlavních úhlů břitu (Lisičan, 1996)

2.3 Nástroje pro rovinné frézování

Mezi základní nástroje pro rovinné frézování patří frézovací hřídele a frézovací hlavy.

2.4 Charakteristika obráběného materiálu

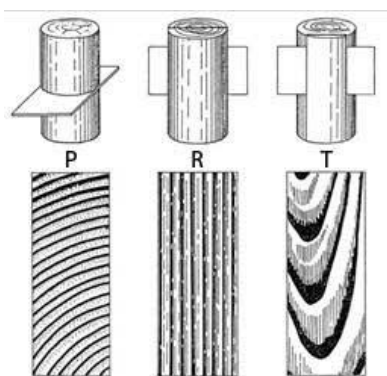
Dřevo je jeden z nejstarších přírodních materiálů využívaných člověkem. Dřevo patří mezi rostliny, u kterých je převážná část pletiv, především v nadzemní části (kmeny a větve), a kořenech lignifikovaná. (Gandelová, 2009). Získává se ze stromů různých rozměrů, druhů i vlastností. Ke zpracování pro výrobu stavebního i truhlářského řeziva, které nejčastěji podléhá procesu obrábění, využíváme, až na výjimky dřevní hmotu z kmene stromu. Využití dřevní hmoty z větví a kořenů je díky malým rozměrům a často značně odlišným vlastnostem problematické. Proto se dřevo větví stromů využívá převážně pro energetické účely. Dřevo kořenů, některý vzácných dřevin, najde uplatnění při výrobě dýh.

Dřevo představuje pružný, pevný a přitom lehký materiál, který svými vlastnostmi velice dobře odolává chemikáliím, dá se relativně lehce zpracovávat, spojovat spojovacími prostředky apod. Jednou ze značných nevýhod dřeva využívaného ve stavebnictví je jeho hořlavost. Hořlavost dřeva můžeme omezit vhodnou povrchovou úpravou - nátěrem. Dalšími nevýhodami, které jsou dány stavbou dřeva, jsou: navlhavost (schopnost dřeva přijímat látku v plynné formě), nasákavost (schopnost dřeva přijímat látku v kapalně formě). S těmito nevýhodami souvisí i další, kterou je nízká odolnost vůči napadení dřevokazným hmyzem, dřevokaznými a dřevo-zbarvujícími houbami. I tyto nevýhody dřeva můžeme eliminovat, vhodnou povrchovou ale i hloubkovou ochranou ochrannými prostředky, či snížením vlhkosti dřeva pod hranici kde již napadení nehrozí.

V dnešním dřevozpracujícím průmyslu se můžeme setkat s velkou škálou materiálů s rozličnými vlastnostmi, mezi zpracovateli i spotřebiteli jsou velice oblíbené různé aglomerované materiály na bázi dřeva. Stejně tak se ale běžně setkáváme s přírodním nebo pouze modifikovaným dřevem, například s tepelně modifikovaným dřevem *Termowood*.

2.4.1 Stavba dřeva

Kmenem stromu můžeme vést tři pomyslné základní řezy, které nazýváme: řez příčný, řez radiální a řez tangenciální. Ve všech těchto řezech má dřevo odlišné vlastnosti, tento jev je nazýván anisotropie.



Obr. 15 Základní řezy dřevem (Balabán, 1955)

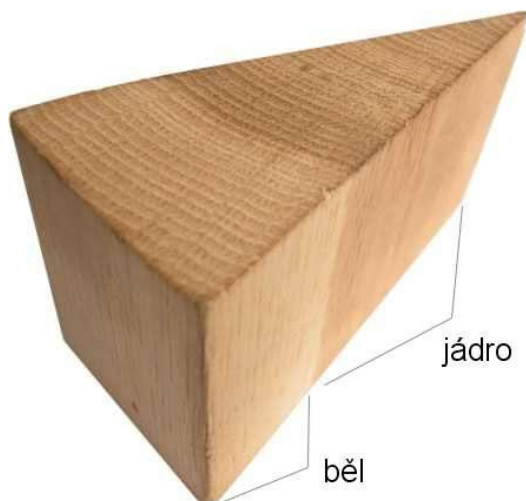
P – příčný řez, R – radiální řez, T – tangenciální.

Makroskopická stavba dřeva:

Při makroskopickém pohledu na přírodní dřevo, můžeme pozorovat následující složky, které se ale nemusí vyskytovat u všech dřevin: jádro, běl, vyzrálé dřevo, letokruhy, dřevěné paprsky, zásmolky apod. Na příčném řezu kmene různých druhů dřevin je možné pozorovat různé barevné zóny – běl, jádro a vyzrálé dřevo

Běl je světlá vnější část kmene. Její šířka je závislá na druhu dřeviny, může být pouze několik letokruhů, ale může zaujímat i celý průřez kmene (bělové dřeviny – např. buk). Běl se od jádra a vyzrálého dřeva odlišuje svými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi.

Jádro je středová tmavěji zbarvená část kmene. Jeho vodivé elementy jsou pro vodu neprůchodné. Tato neprůchodnost je způsobena přítomností tzv. jádrových látek. U jehličnanů se jedná o pryskyřice, u listnáčů o gumy, alkaloidy aj. Neprůchodnost cév listnáčů mohou také způsobovat thyly. Přítomnost jádrových látek je důvodem špatné propustnosti jádrového dřeva pro kapaliny.



Obr. 16 zobrazení jádra a běle na výřezu dubového dřeva

Letokruhy – letokruh je tloušťkový přírůst dřeva vytvořený za vegetační období, v našich zeměpisných šířkách se jedná o období jednoho roku. Z počtu letokruhů kmene stromu tedy můžeme snadno odvodit i stáří hodnoceného jedince. Ve výjimečných případech může být vytvořen pouze jeden letokruh v období dvou let, proto není určení stáří stromu úplně přesné. Některé stále zelené dřeviny tropického a subtropického pásma s nepřetržitou dobou růstu bez vegetačního klidu, tvoří dřevo kontinuálně bez rozlišení přírůstkových zón (letokruhů). Letokruhy na příčném řezu dřevem kmene ale i větve či kořenu, tvoří převážně koncentrické vrstvy navazující na sebe a obklopující dřeň. Skládají se ze dvou barevně často taktéž strukturálně, rozdílných vrstev, jarního a letního dřeva. Letokruhy lze označit za soustavu kuželovitých pláštíků, postupně na sebe nasedajících.

Vyzrálé dřevo – u některých dřevin (např. smrku, jedle, buku, lípy) je na čerstvě vytěžené kulatině na obvodu příčného řezu patrný pás tmavšího dřeva, běle. Bělová část je tmavší protože obsahuje podstatně více vody jako středová část kmene tzv. vyzrálé dřevo. Po vyschnutí kmene se barevný rozdíl mezi zónou běli a vyzrálého dřeva ztratí. Podle charakteru a umístění barevných zón na příčném řezu dřevem kmene se dřeviny rozdělují do následujících skupin:

- Dřeviny bělové – mají na celém průřezu kmene jednobarevnou plochu, mají nejmenší rozdíl ve vlhkosti mezi centrální a obvodovou částí kmene (např.: bříza, olše, habr).
- Dřeviny jádrové – mají ve střední části kmene výrazně zbarvenou tmavší zónu jádra a na obvodu světlejší vrstvu běli. Jádro se vyznačuje nižší vlhkostí (např.: borovice, modřín, bub, akát).

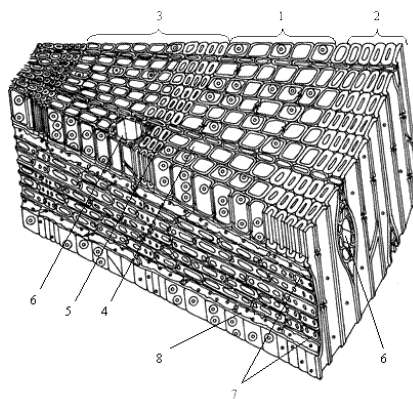
Ne malý vliv, v procesu obrábění, mají i dřevové paprsky, tvoří různě mohutná seskupení parenchymatických buněk, orientovaných kolmo na podélnou osu kmene. V živém stromě zabezpečují horizontální pohyb zejména organických látek a vody. Funkce dřevových paprsků je vodivá, zásobní, u některých dřevin i sekreční.

Dalším problematickým předmětem vyskytujícím se při obrábění přírodního dřeva suky. Suky jsou základem živých, nebo pozůstatky odumřelých, větví. Vyskytují se u všech dřevin. Mohou být jednotlivé nebo vyskytující se ve shlucích. Na příčném řezu mají oválný tvar, na tangenciálním oválný nebo kruhový. Na radiálním řezu mají charakter tmavšího pruhu ve srovnání s okolním dřevem. Suky probíhají víceméně kolmo nebo pod určitým úhlem k ose kmene a jejich letokruhy navazují na letokruhy kmene. Suky mají často vysokou tvrdost, což může způsobit poškození nástroje.

Texturou dřeva rozumíme kresbu dřeva, která se objeví na jeho povrchu po rozřezání. Je tvořena rozmanitým zastoupením makroskopických elementů, charakteristických pro určitou dřevinu. Textura jako taková nemá podstatný vliv během procesu obrábění přírodního dřeva.

Mikroskopická stavba dřeva:

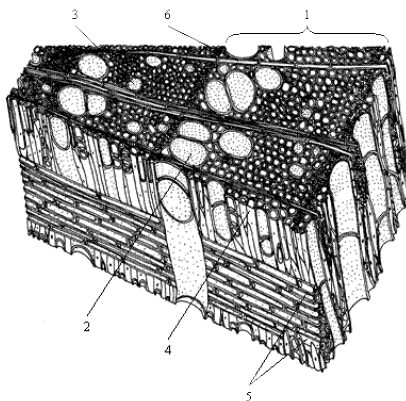
Jehličnaté dřeviny jsou charakterizovány jednodušší anatomickou stavbou dřeva (obr. 17). Převládajícím buněčným elementem jehličnanů jsou tracheidy. Zbývající část dřeva tvoří parenchymatické buňky.



Obr. 17 Prostorové znázornění anatomické stavby jehličnatého dřeva (Požgaj, Chovanec a kol., 1997)

1 – jarní dřevo, 2 – letní dřevo, 3 – letokruh, 4 – jarní tracheida s dvojtečkami, 5 – letní tracheida, 6 – pryskyřičný kanálek, 7 – dřevový paprsek, 8 – příčná tracheida

Dřevo listnatých dřevin je tvořeno větším počtem různých druhů buněk, které jsou více specializovány a přizpůsobeny své funkci při porovnání s buňkami jehličnatých dřevin. Dřevo listnáčů je tvořeno následujícími typy buněk: cévy – vodivá funkce, cévice – vodivá a vyztužovací funkce, libriformní buňky – vyztužovací funkce, parenchymatické buňky – vodivá a zásobní funkce.



Obr. 18 Prostorové znázornění anatomické stavby listnatého dřeva (Požgaj, Chovanec a kol., 1997)

1 – letokruh, 2 – jarní céva, 3 – letní céva, 4 – libriformní vlákno, 5 – dřeňový paprsek, 6 – podélný parenchym

2.4.2 Dřevo a jeho vlastnosti

Dřeviny můžeme dělit do několika skupin, dle různých kritérií.

Za základní rozdělení můžeme považovat rozdělení podle tvrdosti a to:

- Dřeviny měkké
- Dřeviny tvrdé

Pro obrábění dřeva je tvrdost obráběného materiálu jednou z nejdůležitějších vlastností.

Další rozdělení může být na dřeviny:

- Jehličnaté (borovice lesní)
- Listnaté - dále:
 - Roztroušeně pórovité (buk lesní)
 - Polokruhovitě pórovité (ořešák černý)
 - Kruhovitě pórovité (dub letní)



Přírodní dřevo často vyniká svými odlišnými vlastnostmi u různých druhů.

Mezi tyto vlastnosti můžeme zařadit:

- Houževnatost dřeva je mechanickou prací, která je spotřebována na vytvoření plastické deformace
- Tvrdostí, rozumíme schopnost daného materiálu, v tomto případě dřeva odolávat vniknutí do jeho struktury.
- Pevnost
- Štípatelnost
- Ohýbatelnost
- Vůně
- Barva, barvou dřeva rozumíme zrakový vjem, který závisí na spektrálním složení světelných paprsků (Gandelová, 2009)

Pro obrábění přírodního dřeva je jednou z nejdůležitějších vlastností již zmiňovaná tvrdost. Pro různou tvrdost různých dřevin musíme volit různé parametry procesu obrábění a nastavení jak nástroje, tak i strojního zařízení.

Nehomogenita – pro veškeré přírodní dřeviny platí, že nejsou homogenní. Rozumí se tím výskyt různých vlastností v rámci jednoho konkrétního výřezu. Příkladem nehomogenity dřeva může být výskyt běle, jádra – každá z těchto částí dřeva se projevuje během procesu obrábění různými vlastnostmi. Díky nehomogenitě obráběného materiálu není nástroj během procesu obrábění zatěžován rovnoměrně.

Anizotropie – vlastnost způsobena stavbou dřeva. Anizotropie dřeva znamená, že jeden konkrétní výřez má odlišné, vlastnosti v rámci různých směrů. U dřeva můžeme rozeznávat tři směry. Podélný – axiální, radiální a tangenciální. Podle směru ve kterém chceme obrábění realizovat, musíme volit parametry obrábění.

Pozn.:

V současné době je již oblast nauky o dřevě velice dobře zpracovaná ve formě literatury ale i dalších zdrojů, proto není v této práci více zastoupena.



3 Teoretický rozbor drsnosti obráběného povrchu

3.1 Kvalita obrobeneho povrchu

Kvalitu výrobku můžeme všeobecně definovat jako souhrn vlastností nazvaných výrobcem, spotřebitelem a cenovými orgány. (Lisičan, 1984) Z uvedených kritérií se procesu obrábění týká především povrchová kvalita a tvarová přesnost.

Obrobky vykazují po frézování jisté nerovnosti povrchu, které se projevují mikroskopickými změnami (drsnost), nebo makroskopickými změnami (vlnitost, prohlubně, rýhy vyvýšeniny, částečně vytrhaná vlákna). Výskyt všech těchto změn, kromě vlnitosti, na povrchu obrobku je nepravidelný. Vlnitost je vytvořená téměř pravidelnými, opakujícími se vyvýšeninami a prohlubněmi téměř stejného tvaru a rozměrů.

Drsnost a vlnitost jsou ve skutečnosti velmi malými odchylkami od námi požadovaného (ideálního) tvaru či rozměru, ovšem významně ovlivňují další opracování dílce, především jeho povrchovou úpravu.

Na drsnost i vlnitost mají vliv především následující faktory:

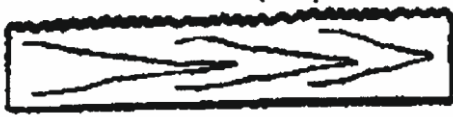
- Způsob oddělování třísky, který závisí nejen na způsobu obrábění ale i na přesnosti chodu nástroje a jeho geometrii.
- Řezné podmínky (řezná rychlost, posuvná rychlost, úběr atp.).
- Mikro-geometrie nástroje (otupení břitu nástroje).
- Fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu (jeho hustota, tvrdost, struktura).

3.2 Drsnost povrchu výrobků ze dřeva a materiálů na bázi dřeva (ČSN 490231)

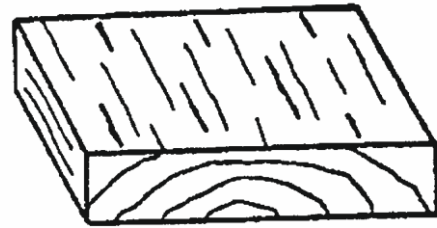
Drsnost povrchu je při obrábění dřeva charakterizována vytrháváním dřevních vláken, chlupatostí a vlnkami způsobenými nástrojem, makro-stavbou dřeva nebo materiálů na bázi dřeva, případně vyštípáním pohledové vrstvy či vrtaných nebo dlabaných otvorů viz tab. 1. Stanovuje se bez nerovností způsobených anatomickou stavbou dřeva – pórů.

1. Chlupatost obrobené plochy	drsnost způsobená vytrhanými a nedokonale oddělenými vlákny dřeva či jejich svazky (obr. 19)
2. Vytrhávání obrobené plochy	drsnost způsobená vytrháváním svazků dřevních vláken pod obrobenou plochou (obr. 20, 21, 22)
3. Anatomické nerovnosti	nerovnosti obrobeného povrchu tvořené intercelulárními prostory (obr. 23)
4. Vlnka	nerovnost obrobené plochy. Podle původu se člení na: a) vlnky kinematické, jsou tvořené částmi ploch řezu při frézování (obr. 24, 25) b) vlnky způsobené poškozením břitu nástroje (obr. 26) c) vlnky způsobené rozdílnými vlastnostmi jarního a letního dřeva (obr. 27) nebo stavbou aglomerovaných materiálů
5. Odštípnutí	nerovnost způsobená vylomením svazku dřevních vláken případně částí dřeva mimo obrobenou plochu (obr. 28)

Tab. 1 Drsnost podle ČSN 490231



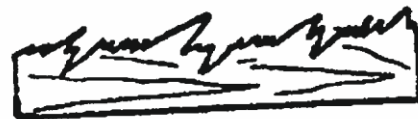
Obr. 19



Obr. 20



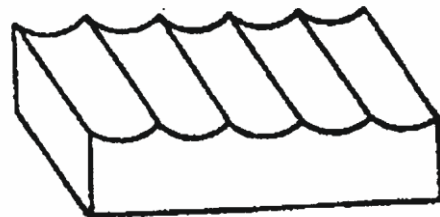
Obr. 21



Obr. 22



Obr. 23



Obr. 24



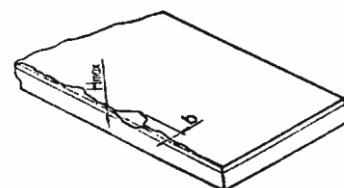
Obr. 25



Obr. 26



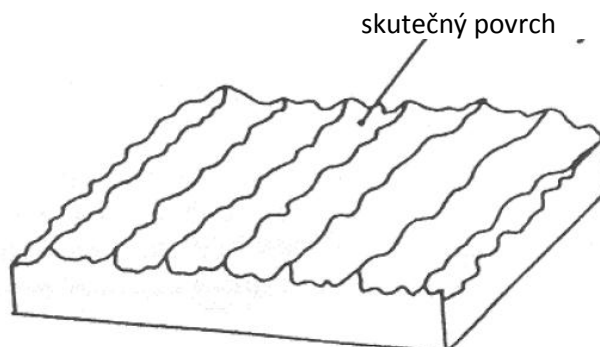
Obr. 27



Obr. 28

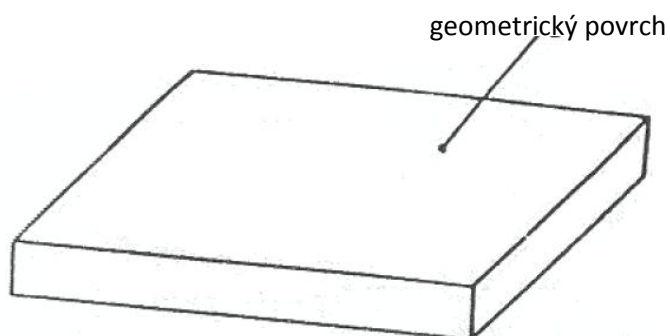
3.3 Definice názvů vztahujících se k drsnosti povrchu (ČSN EN ISO 4287)

Skutečný povrch – povrch ohraničující těleso a oddělující jej od okolního prostředí.



Obr. 29 Skutečný povrch

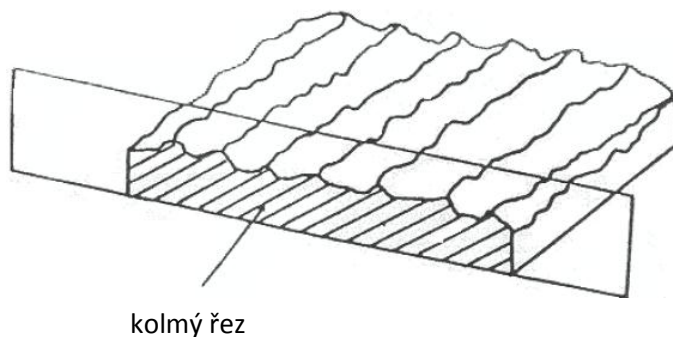
Geometrický povrch – ideální povrch, jehož jmenovitý tvar je dán výkresem či jinou technickou dokumentací.



Obr. 30 Geometrický povrch

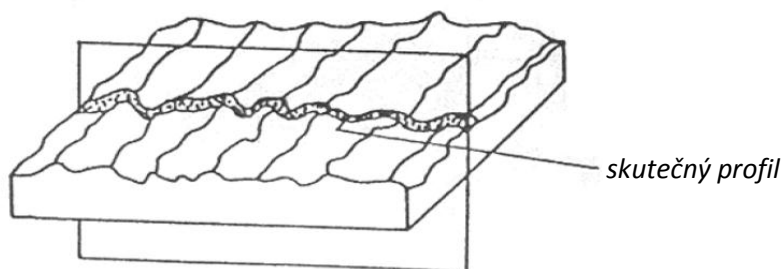
Základní povrch – povrch, od kterého se vyhodnocují parametry drsnosti povrchu.

Kolmý řez – řez kolmý na základní povrch. Pozn. – v praxi je tento řez vytvořen jako průnik roviny dotýkající se na malém prostoru povrchu uvažovaného obrobku, s rovinou kolmou na tento povrch, bez ohledu na drsnost povrchu tohoto malého prostoru.



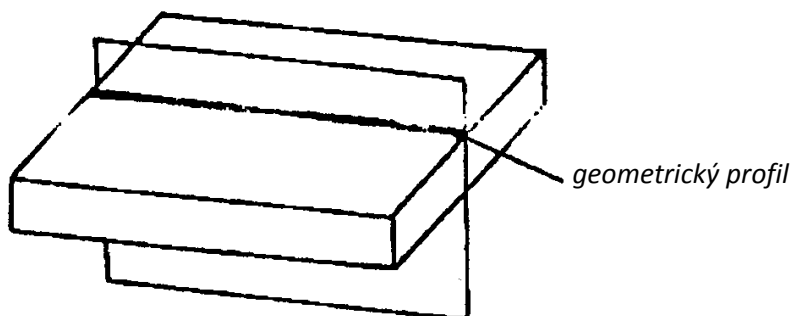
Obr. 31 Kolmý řez

Skutečný profil – průsečnice skutečného povrchu s rovinou.



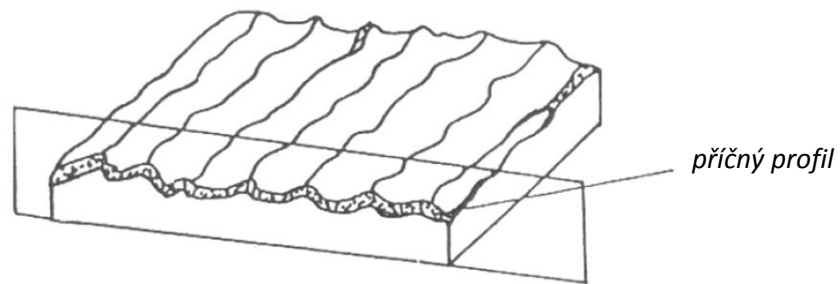
Obr. 32 Skutečný profil

Geometrický profil – profil, který vznikne řezem geometrického povrchu rovinou.



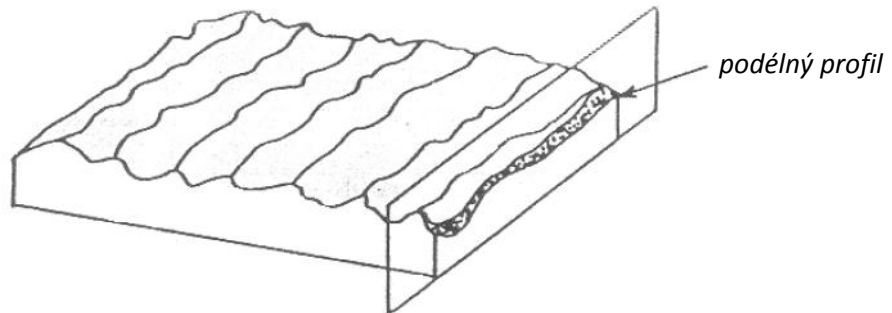
Obr. 33 Geometrický profil

Příčný profil – profil, který vznikne řezem rovinou kolmou na směr nerovností povrchu.



Obr. 34 Příčný profil

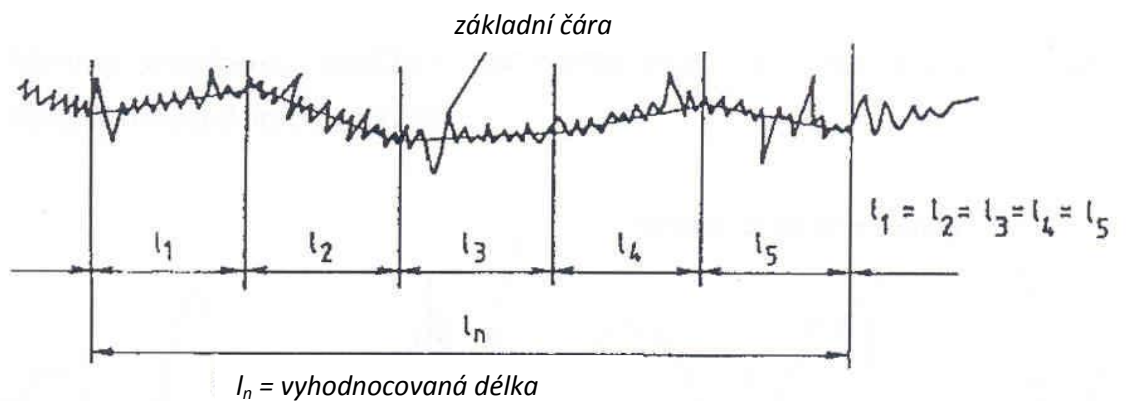
Podélný profil – profil, který vznikne řezem povrchu rovnoběžnou rovinou se směrem nerovnosti



Obr. 35 Podélný profil

Střední čára profilu – čára, od které se vyhodnocují parametry drsnosti povrchu.

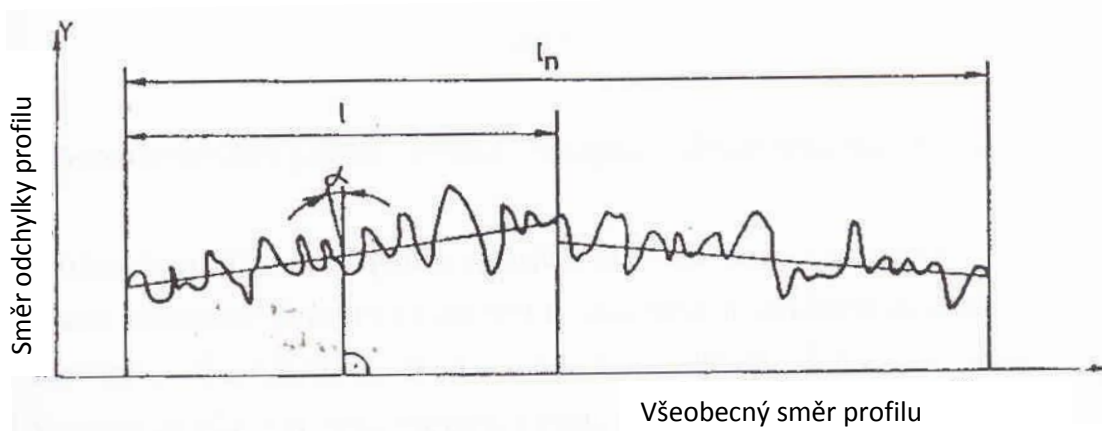
Základní délka, l (l_p , l_w , l_r) – délka základní čáry používaná na oddělení nerovností charakterizujících drsnost povrch.



Obr. 36 Základní a vyhodnocovaná délka

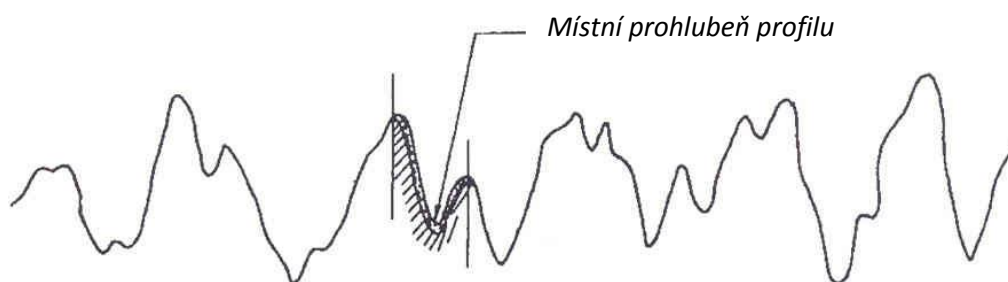
Vyhodnocovaná délka, l_n (l_n) – délka, na které se vyhodnocují hodnoty parametrů drsnosti povrchu, může zahrnovat jednu či více základních délek.

Odchylka profilu, y – vzdálenost mezi bodem profilu a základní čarou ve směru měření. Pozn. – obr. 34 představuje graf profilu, který je zkresleným obrazem profilu. Proto musí být odchylky měřené ve stejném směru, v jakém byl stanovený profil. Na skutečném profilu jsou úhly α mezi střední čarou a všeobecným směrem profilu v rámci vyhodnocované délky velmi malé. Z tohoto důvodu je rozdíl mezi odchylkami profilu měřenými kolmo na všeobecný směr profilu zanedbatelný. Proto se odchylky profilu na skutečném povrchu považují za kolmé na střední čáru.



Obr. 37 Odchylka profilu

Místní prohlubeň profilu – úsek profilu ležící mezi dvěma sousedícími vrcholky profilu.



Obr. 38 Místní prohlubeň profilu

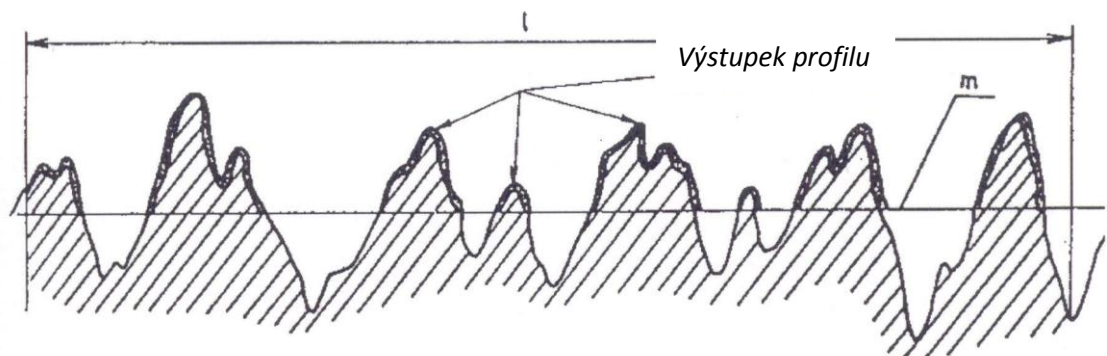
Místní výstupek profilu – nejvyšší bod profilu, ležící mezi dvěma sousedícími nejnižšími body profilu.



Obr. 39 Místní výstupek profilu

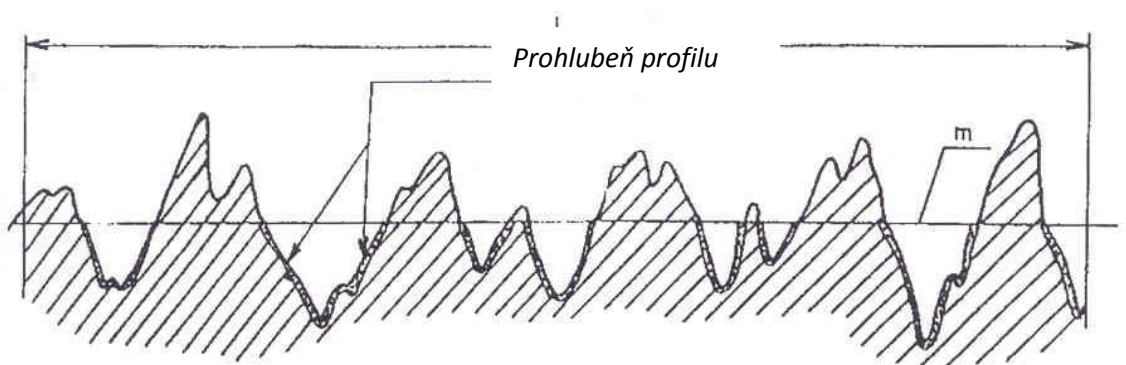
Místní nerovnost profilu – místní prohlubeň spojená s místním výstupkem.

Výstupek profilu – část profilu spojující dva sousední průřečníky se střední čarou /m/, uvažovaná směrem z materiálu do okolního prostředí.



Obr. 40 Výstupek profilu

Prohlubeň profilu - část profilu spojující dva sousední průřečníky se střední čarou /m/, uvažovaná směrem do materiálu z okolního prostředí.



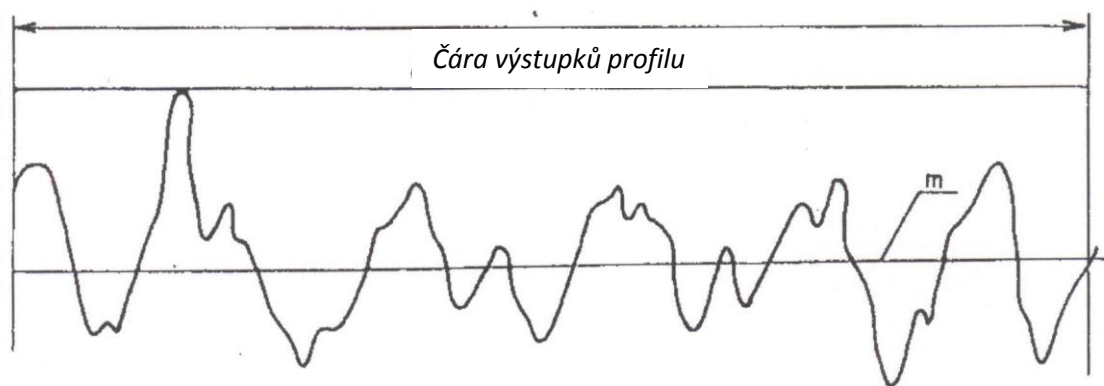
Obr. 41 Prohlubeň profilu

Nerovnost profilu – prohlubeň spojená s výstupkem profilu

Směr nerovností – směr převážné struktury povrchu, způsobený způsobem výroby, či jinými vlivy.

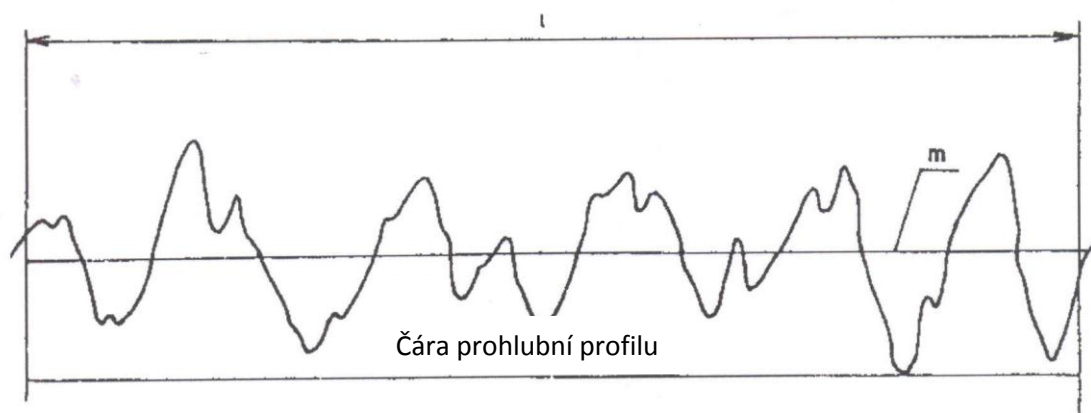
Drsnost povrchu - souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, vznikajících při výrobě nebo jejím vlivem. Do drsnosti se nepočítají vady povrchu, tj. náhodné nepravidelné nerovnosti, které se vyskytují jen ojediněle (rysky, trhlinky, důlky apod.) a které vznikají vadami materiálu, poškozením aj. Podle převládajícího směru nerovností se drsnost posuzuje v příčném nebo podélném směru.

Čára výstupků profilu – rovnoběžná čára se střední čarou profilu a zároveň tečna nejvyššího bodu v úseku základní délky.



Obr. 42 Čára výstupků profilu

Čára prohlubní profilu - rovnoběžná čára se střední čarou profilu a zároveň tečna nejnižšího bodu v úseku základní délky.



Obr. 43 Čára prohlubní profilu

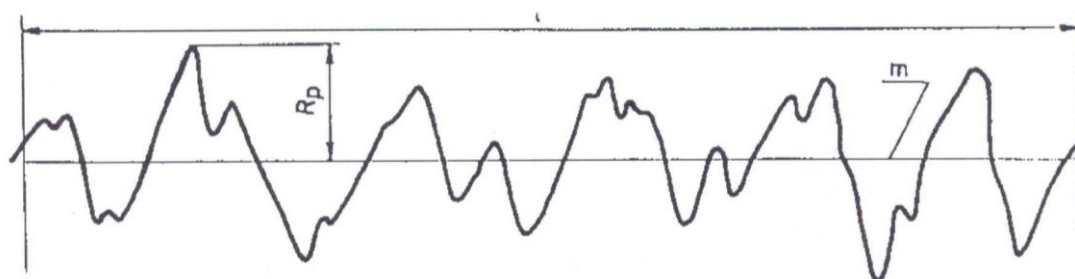
Parametry drsnosti povrchu charakterizující nerovnosti profilu ve směru výšky:

Výška výstupku profilu, y_p (Z_v) – vzdálenost mezi střední čarou profilu a nejvyšším bodem výstupku profilu.

Výška nerovnosti profilu, Z_t – součet výšky výstupku profilu a s ním spojené prohlubně profilu.

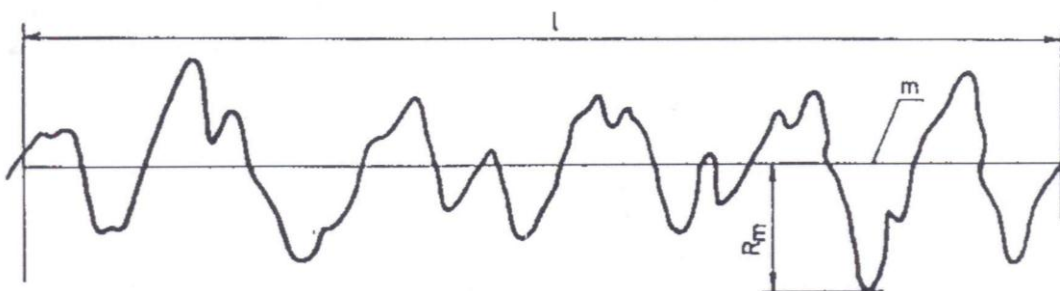
Hloubka prohlubně profilu, y_p (Z_v) - vzdálenost mezi střední čarou profilu a nejnižším bodem prohlubně profilu.

Výška nejvyššího výstupku profilu, R_p – vzdálenost mezi nejvyšším bodem profilu a střední čarou v úseku základní délky.



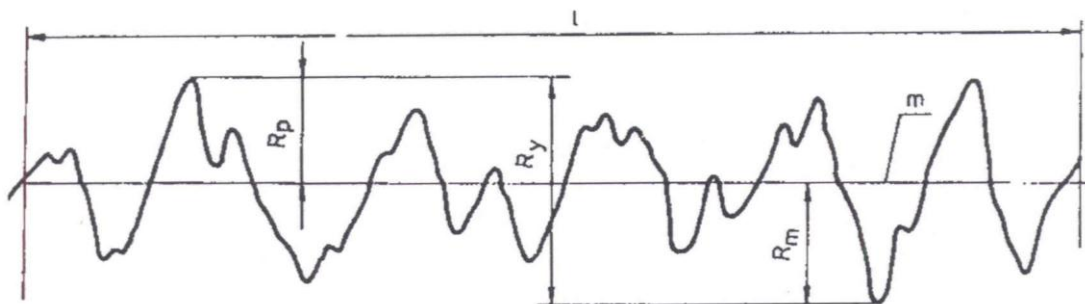
Obr. 44 Výška nejvyššího výstupku profilu

Hloubka největší prohlubně profilu, R_y (R_z) - vzdálenost mezi nejnižším bodem profilu a střední čarou v úseku základní délky.



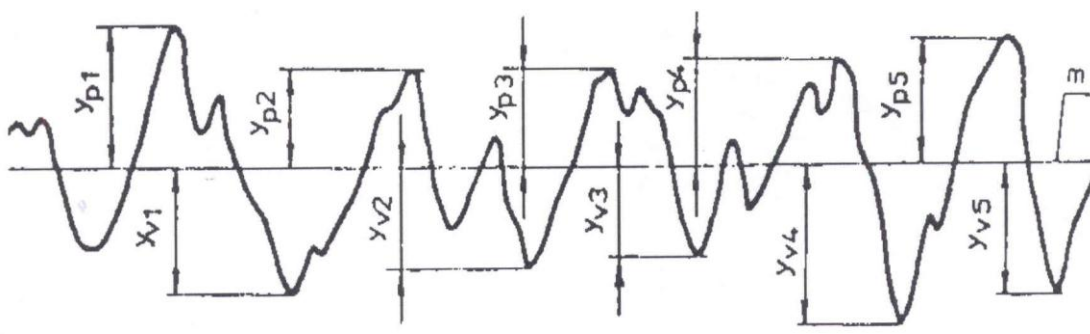
Obr. 45 Hloubka největší prohlubně profilu

Největší výška profilu, R_y (R_z) – vzdálenost mezi čarou výstupků a prohlubní v úseku základní délky.



Obr. 46 Největší výška profilu

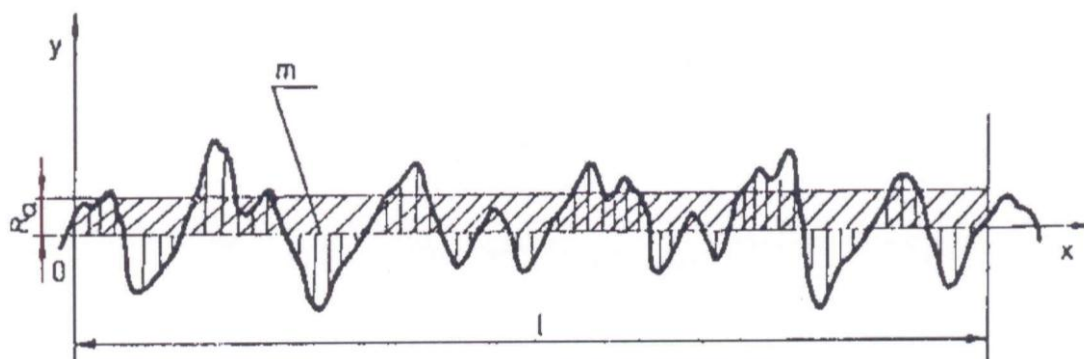
Výška nerovností profilu z deseti bodů, R_z – střední hodnota z absolutních hodnot výšek pěti nejvyšších výstupků profilu a hloubek pěti nejnižších prohlubní profilu v úseku základní délky. Pozn. – R_z je jako ISO parametr již zrušený. Zde jed uveden z důvodu častého výskytu ve starší literatuře.



Obr. 47 Výška nerovností profilu z deseti bodů

Střední aritmetická odchylka profilu, R_a (R_a) – střední aritmetická hodnota absolutních odchylek profilu v úseku základní délky l . Pozn. – Hodnoty R_a se v praxi stanovují v rámci vyhodnocované délky, která obsahuje několika základních délek. Podle ČSN EN ISO 3274 je základní délka číselně rovna hodnotě mezního rozestupu.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (15)$$



Obr. 48 Střední aritmetická odchylka profilu

Střední kvadratická odchylka profilu, R_q (R_q) – střední kvadratická hodnota odchylek profilu v úseku základní délky. Pozn. – Pozn. – Hodnoty R_a se v praxi stanovují v rámci vyhodnocované délky, která obsahuje několika základních délek. Podle ISO 3274 je základní délka číselně rovna hodnotě mezního rozestupu.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx} \quad (16)$$

Parametry drsnosti povrchu charakterizující nerovnosti v podélném směru:

Střední kvadratická vlnová délka profilu, λ_q - 2π násobek poměru střední kvadratické odchylky profilu R_q ke střednímu kvadratickému sklonu profilu Δ_q .

$$\lambda_q = 2\pi \frac{R_q}{\Delta_q} \quad (17)$$

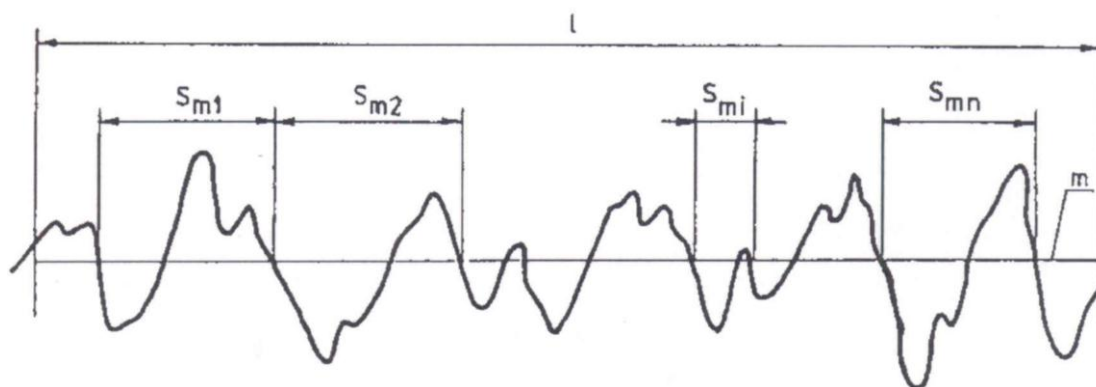
Kde λ_q je mírou rozestupu místních výstupků a místních prohlubní profilu, počítající s relativními amplitudami a jednotlivými frekvencemi.

Střední vlnová délka profilu, λ_a - 2π násobek poměru střední aritmetické odchylky profilu R_a ke střednímu aritmetickému sklonu profilu Δ_a .

$$\lambda_a = 2\pi \frac{R_a}{\Delta_a} \quad (18)$$

Kde λ_a je mírou rozestupu místních výstupků a místních prohlubní profilu, počítající s relativními amplitudami a jednotlivými frekvencemi. Pozn. – průměrná vlnová délka profilu λ_a je blízkou aproximací střední kvadratické vlnové délky λ_q .

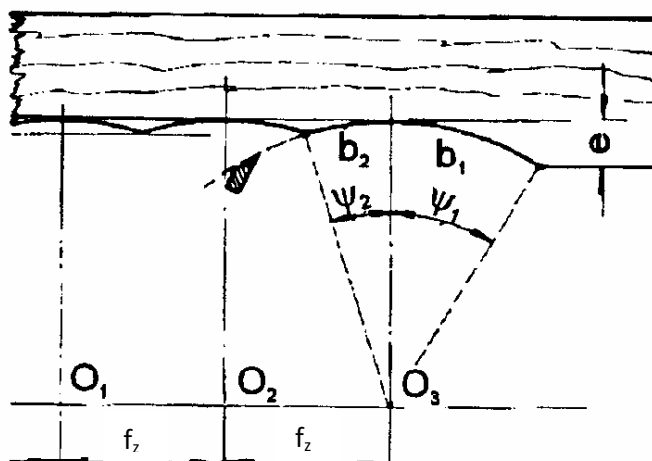
Rozestup nerovností profilu – délka střední čáry profilu, obsahující výstupek profilu a s ním spojenou prohlubeň profilu.



Obr. 49 Rozestup nerovností profilu

3.4 Vlnitost povrchu

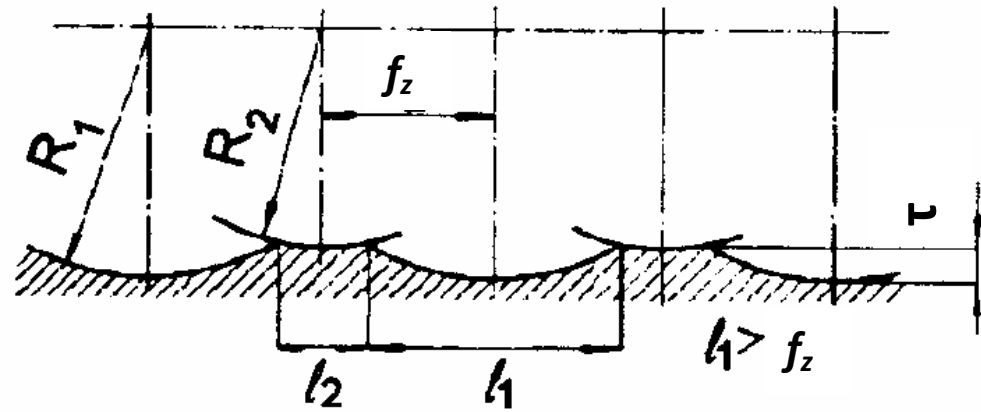
Na během procesu frézování vznikají na obrobku vlivem rotačního pohybu nástroje a současného přímočarého pohybu obrobku nerovnosti vlnitého tvaru. Tvar těchto nerovností je závislý pouze na průměru nástroje a posuvu na zub. Toto tvrzení platí jen za předpokladu, že veškeré břity nástroje opisují tu stejnou kružnici. V případě že nože frézy nejsou nastaveny rovnoměrně, dochází k nadměrnému zatěžování břitů, což má za následek tvorbu nekvalitnějšího – vlnitějšího povrchu. Nezanedbatelný vliv má taktéž otupení nožů.



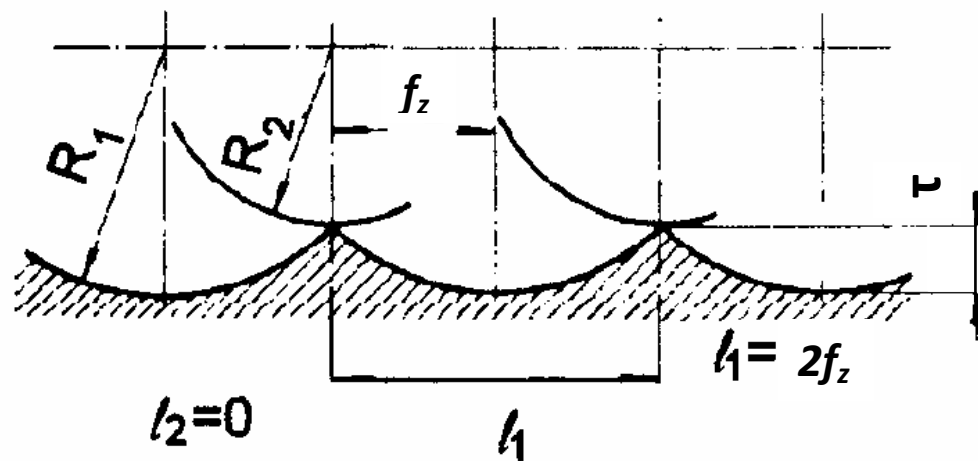
Obr. 50 Profil ofrézovaného povrchu válcovou frézou (Lisičan, 1984)

Kromě délky a hlavně hloubky profilu vlnky, vytvořené břitem, často udávané za kritérium kvality frézovaného povrchu, podmiňují kvalitu i další faktory. Jako např. tvarová a rozměrová přesnost, makroskopická stavba dřeva atd. Tvarová i rozměrová přesnost jsou dané technickým stavem stroje (přesnost mechanismu vedení dílce, přesnost nástroje a jeho upevnění, resp. uložení, podmiňující míru jeho kmitání, a přesností vysunutí nožů hlavy rovinných frézek (na koncích nožů), stejně tak i mírou rovnosti ostří nožů).

V praktických podmínkách můžeme těžko dosáhnout větší přesnosti nastavení nožů τ , v nožových hlavách, než 0,02 mm (Lisičan, 1984), v důsledku čehož je profil drsnosti nerovnoměrný (obr. 51) a při větší nepřesnosti nastavení nožů v nožové hlavě může být nůž vyřazený z činnosti (obr. 42).



Obr. 51 Profil povrchu ofrézovaného dvěma noži s rozdílným poloměrem řezání



Obr. 52 Profil povrchu po velké nepřesnosti nastavení vyčnívání nožů (τ)

Aby ve dvojnožové hlavě pracovaly oba nože, musí být posuvná rychlost minimálně:

$$f_{min} = \frac{n \cdot z}{1000} \cdot \sqrt{\pi D_1} \quad [\text{m/min}] \quad (19)$$

Dvojnožová hlava začne pracovat jen jedním nožem při nepřesnosti nastavení:

$$\tau = \frac{f_{ot}^2 \Psi}{360D} \cdot \left(1 - \frac{\Psi}{360}\right) \quad [\text{mm}] \quad (20)$$

Kde: D – nominální průměr

Ψ – středový úhel mezi dvěma břity

Při $z > 2$ a běžných hodnotách $\tau > 0,02$ mm, budou (podle Buglaje) pracovat všechny nože při $f_{min} > 60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, čemuž odpovídá:



$$\tau = \frac{f_{ot}^2}{D \cdot z} \cdot \left(1 - \frac{1}{z}\right) \quad [\text{mm}] \quad (21)$$

Matematický vztah pro výšku vlnky stanovali Čebyšev roku 1874:

$$e'(y_{max}) = \frac{\omega \cdot f^2}{\omega_1^2 \cdot 8R} \quad [\text{mm}] \quad (22)$$

Kde: ω – rozestup zubů frézy [mm]

ω_1 – úhlová rychlost frézy [s⁻¹]

f – rychlost posuvu obrobku [m.min⁻¹]

R – poloměr frézy [mm]

Pro hloubku cykloidálního profilu vlnky je ale přesnější vztah:

$$e'(y_{max}) = R \cdot \left(1 - \cos \frac{90f_z}{0,5f_z \pm \pi R}\right) \quad [\text{mm}] \quad (23)$$

Podle vztahu 23 je hloubka vlnek cca o 5% menší než podle Čebyševovi rovnice.

V technické praxi se nejčastěji používá vztah:

$$e'(y_{max}) = \frac{f_z^2}{4D} \quad [\text{mm}] \quad (24)$$

Výpočet šířky vlnek:

Za předpokladu jednotného řezného poloměru u všech břitů nástroje a rovnoměrného posuvu obrobku se šířka vlnek určí aplikací rovnice (vztahující se k obr. 53):

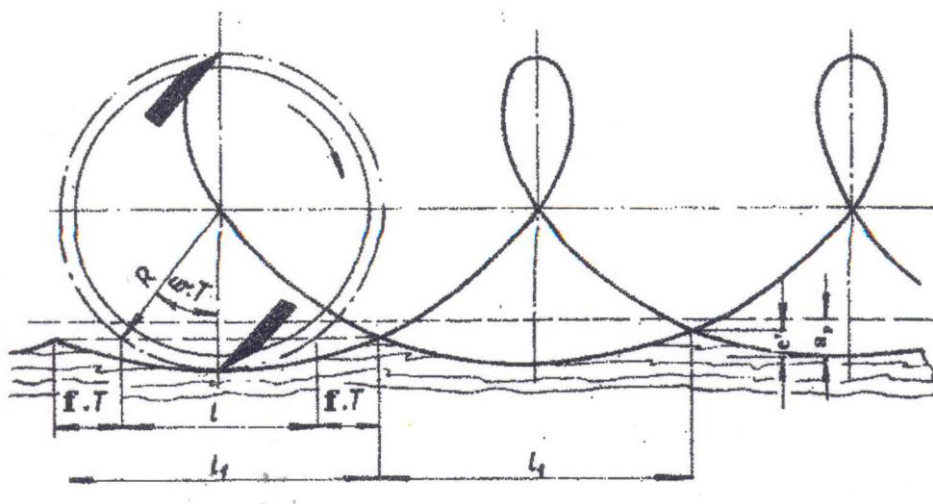
$$\frac{l_1}{2} = \frac{l}{2} + f \cdot T = R \cdot \sin \omega_1 \cdot T + f \cdot T \quad [\text{mm}] \quad (25)$$

z čehož:

$$l_1 = l + 2f \cdot T = 2(R \cdot \sin \omega_1 T + f \cdot T) \quad [\text{mm}] \quad (26)$$

Při rovnoměrné šířce můžeme napsat:

$$l_1 = f_z = \frac{1000 \cdot f}{n \cdot z} \quad [\text{mm}] \quad (27)$$



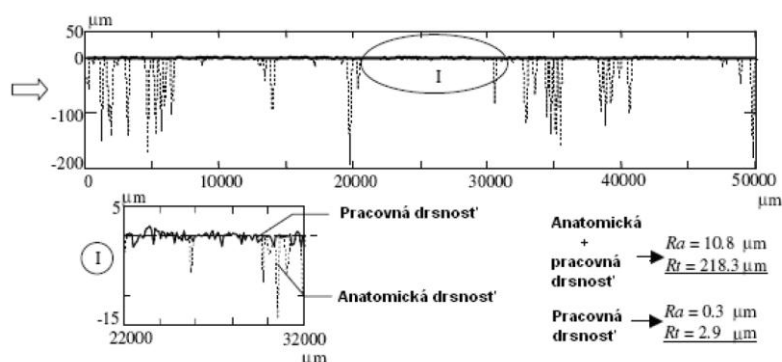
Obr. 53 Šířka vlnek při frézování

3.5 Vliv faktorů na drsnost povrchu

Kdykoliv přijdou do vzájemné interakce dva povrchy, hraje velkou roli v používání a opotřebení kvalita spojených (sdružených částí). Výška, tvar, úprava a směr povrchových nerovností na obrobku závisí na mnoha faktorech:

- Technologické parametry (posuvná rychlost, řezná rychlost, hloubka řezu).
- Geometrie řezného nástroje (úhel břitu, úhel čela, úhel hřbetu).
- Kombinace obrobku a materiálu nástroje a jejich mechanické vlastnosti.
- Kvalita i typ použitého obráběcího stroje a nástroje.
- Použitá přídatná zařízení a maziva.
- Vibrace mezi obrobkem, strojem a nástrojem.

Anatomie dřeva – díky anatomické stavbě dřeva a jeho pórovité struktuře není možné dosáhnout dokonale hladkého povrchu.



Obr. 54 Vliv anatomie dřeva na parametry drsnosti (Gurau, 2006)



Kresba vláken – během obrábění dřeva jsou anatomické elementy přeřezávány řezným nástrojem. Povrch dřeva má specifickou mikro-geometrii díky kresbě vláken.

Vlhkost – i malé změny vlhkosti dřeva mají velký vliv na geometrii povrchu a následně i na drsnost, hladkost i rovinnost. Malá vlákna a třísky (zbytky po obrábění) mají tendenci zvětšovat své rozměry.

Hustota (pórovitost) dřeva – z hlediska hodnocení opracovaného povrchu je pórovitost dřeva rozhodující indikátor, který značně ovlivňuje povrchové vlastnosti. Tvrdost, která je úzce spojena s hustotou, má vliv na odolnost povrchu vůči deformacím působeným tlakem snímače v případě, že se povrch vyhodnocuje kontaktní metodou.

Kinematika řezného procesu – na základě použitých parametrů řezného procesu se vytvoří různé typy reliéfů. Každý povrch má jiný tvar, profil, délku a výšku vlnek. Veškeré tyto charakteristiky závisí na geometrii nástroje, směru řezání a technologických parametrech.

Podmínky stroje – vliv faktorů vztahujících se ke stroji a nástroji: konstrukce stroje, vibrace stroje, opotřebení nástroje, údržba stroje a další faktory.

Jiné faktory – mezi ostatní faktory můžeme zahrnout teplotu, vlhkost vzduchu, konečnou úpravu (nástřík, nátěr), chemický rozklad (oxidace, degradace), biologický rozklad (hniloba), a poškození povrchu jako následek aktivity hmyzu. (Sandak a Negri, 2005).

4 Principy měření kvality obráběného povrchu

4.1 Metody měření nerovnosti povrchu

K měření drsnosti se používají různá zařízení. Metody měření nerovnosti povrchu jsou podle ČSN ISO 1879 charakterizovány takto:

Porovnávací mikroskop – v zorném poli okuláru mikroskopu se pozoruje obraz povrchu a vzorky obrobku.

Pneumatické měření – při změně nerovnosti povrchu se mění tlak, zaznamenávaný manometrem.



Měřící mikroskop – přeměření výstupků a prohlubní, na šikmém řezu povrchem, pod mikroskopem.

Dvojitý mikroskop – úzký pásek světla ze zdroje dopadá na povrch pod úhlem 45° . V okuláru sledujeme obraz profilu povrchu v rovině skloněné pod úhlem 45° .

Interferenční mikroskop – v zorném poli okuláru se sleduje soustava interferenčních pásků, které jsou deformované tvarem zkoumaného povrchu, kde je λ vlnová délka.

Elektromechanické metody – mezi tři nejpoužívanější snímače pro tuto metodu patří: piezoelektrický, elektromagnetický a elektroindukční snímač.

V poslední době se posupně prosazují způsoby měření nerovností povrchu pomocí optických metod. Hlavní nevýhodou těchto metod, při určování mikrogeometrie povrchu, je zabezpečení stability polohy objektu a zaručení konstantní malé vzdálenosti optiky od měřeného objektu (Ondra, 1998).

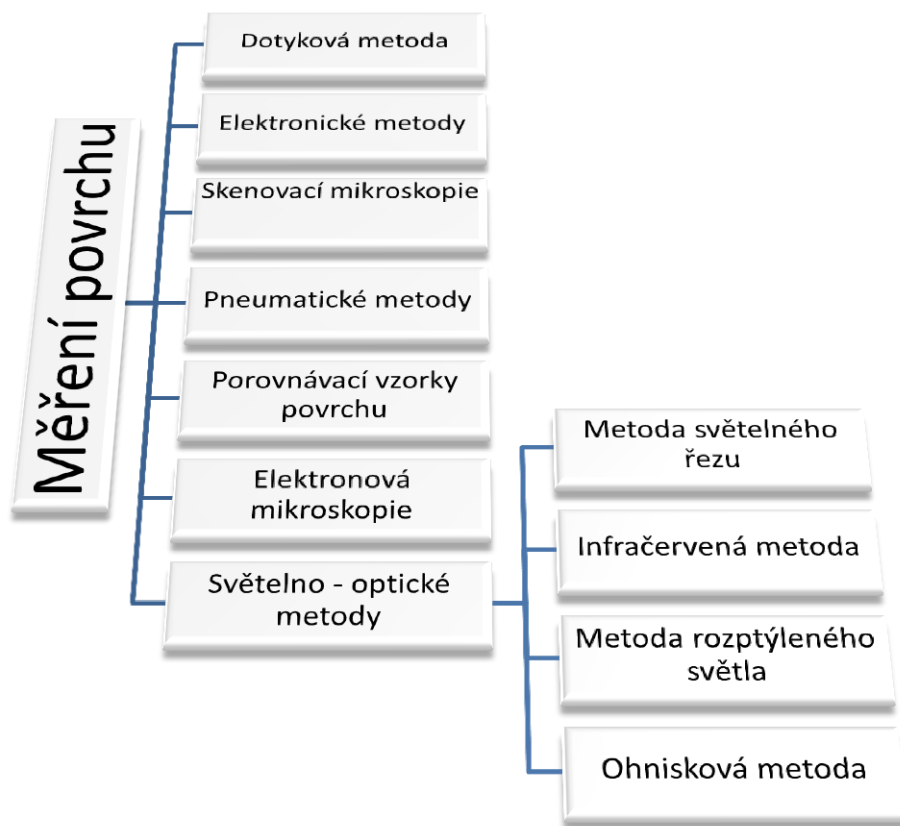
Ke snímání obrobeného povrchu se používají různé typy CCD kamer i laserů. Jsou to nepřesnější metody a jejich velkou výhodou je zobrazení celého snímaného povrchu na zobrazovacím zařízení. Ve většině případů je to monitor připojený k osobnímu počítači. Takto promítnutý povrch je prostřednictvím softwaru, velice lehce vyhodnotitelný, podle charakteristik nerovnosti povrchu.

Pozn: norma ČSN ISO 1879 již není platná.

4.2 Metody měření drsnosti povrchu

Ke kontrole a měření drsnosti povrchu se v současnosti nejčastěji používají dotykové přístroje. V poslední době se však objevily i některé další metody kontroly, nesoucí další výhody.

Přehled měřících metod, které se využívají ke kontrole drsnosti, v závislosti na měřícím principu:



Obr. 55 Přehled kontrolních metod povrchu (Afjehi, 2006)

Závěr

Cílem této práce bylo teoretické zpracování problematiky rovinného frézování přírodního dřeva, z pohledu nezávislých technicko - technologických a nástrojových faktorů na závislé parametry určující kvalitu opracovaného povrchu.

První kapitola se zabývá teoretickým rozbohem procesu frézování a shrnuje veškeré používané pojmy v procesu frézování a druhy frézování. Druhá kapitola pojednává o nástroji jako prostředku, který nám umožňuje vlastní odebrání materiálu z obráběné plochy. Kapitola třetí se zabývá již vlastní kvalitou obrobené plochy, pojmy vyskytujícími se v oblasti měření a zjišťování drsnosti a vlnitosti. Tyto poznatky můžeme často uplatnit nejen při obrábění přírodního dřeva ale taktéž různých nových aglomerovaných materiálů na bázi dřeva.

Ve dřevozpracujícím průmyslu se více a více vyskytují různé druhy přírodních dřevin, ale i různě modifikovaných materiálů. Správnou volbou geometrie nástroje, a podmínek vlastního obrábění (řezná rychlost, posuvná rychlost apod.) můžeme značně ovlivnit jak kvalitu opracované plochy, tak i ekonomickou náročnost a s tím související efektivitu výroby. Proto nám toto odvětví stále umožňuje získávat nové poznatky v procesu rovinného frézování i ostatních procesech obrábění. Na tuto práci by bylo vhodné navázat další vědeckou činností, konkrétně měřením a vyhodnocením reálných hodnot drsnosti a vlnitosti v procesu rovinného frézování, již na konkrétním strojním zařízení. Hledání optimálních parametrů nástroje v souvislosti s požadovanou kvalitou opracované plochy může přinést vědecké úspěchy i ekonomické efekty nejen pro jedince nebo konkrétní firmu ale i pro dřevozpracující průmysl jako celek.

Seznam použité literatury

AFJEHY, S. A., DURAKBASA, N. M., STOUT, K. J., OSANNA, P. H., RUIZ, J., 2006. Meranie drsnosti, vlnitosti a primárneho profilu.

Balabán K., 1955. Nauka o dřevě, 1. část, Anatomie dřeva. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 1955.

BARCÍK, Š., 2000. Nábytkárske stroje a zariadenia časť.1. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2000. ISBN 80-228-0935-7.

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

BUDA, J, SOUČEK, J. and VASILKO, K. 1988. Teória obrábania. Bratislava: ALFA, 1988. 063-564-88.

CYBERMAN EDUCATIONAL PAGE (EDUCATIONAL MATERIALS) 2007.

Department of Mechanical Engineering, Michigan, Technology University. [cit. 2-4-2012]

<http://www.mfg.mtu.edu/cyberman/quality/sfinish/terminology.html>

ČSN ISO 3002/1 Řezné nástroje. Základní veličiny při řezání a broušení.

ČSN ISO 3002-3 (220014) Rezné nástroje. Základné veličiny pri rezaní a brúsení. Časť 3: Geometrické a kinematické veličiny pri rezaní.

ČSN ISO 3002-4 (220036) Rezné nástroje. Základné veličiny pri rezaní a brúsení. Časť 4: Sily, práca a výkon.

ČSN 490231 Přídavky na opracování řeziva a přířezů řeziva, drsnost povrchu výrobků ze dřeva a na bázi dřeva.

ČSN EN ISO 4287 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu.

ČSN ISO 1879 Přístroje na měření drsnosti povrchu profilovou metodou. Terminologie.

ČSN EN ISO 3274 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) Struktura povrchu: Profilová metoda - Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů.

GANDELOVÁ, L., HORÁČEK, P. and ŠLESINGEROVÁ, J. 2009. Nauka o dřevě. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009. ISBN: 978-80-7375-312-2.

HAJNÍK, I. 2007. Zborník referátov z odborného semináre Drevorezné nástroje a obrábene dreva 2007 - Opatrebenie rezného klína drevoobrábacích nástrojov. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2007.

Javorek, L. – Osvald, Ján: Kvalita povrchu verzus technologické podmienky. V: Acta facultatis technicae 1998. Zvolen: Vydavateľstvo TU Zvolen, 1998, ISBN 80-228-0812-1.

KAČÍKOVÁ D., KAČÍK F. 2011. Chemické a mechanické zmeny dreva při termickej úprave. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011, ISBN 978-80-228-2249-7.

LIPTÁK, L. a kol., 1979, Technológia výroby obrábene. Bratislava: Vydavateľstvo Alfa.

LISIČAN, J. a kol. 1996. Teória a technika pre výrobu nábytku. Zvolen: MATCENTRUM, 1996. ISBN: 80-967315-6-4.

MÁDL, J. 1988. Experimentální metody v teorii obrábění. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1988. Č. publikace: 6266.

OČKAJOVÁ, A. 2001. Zborník referátov z odborného semináre Drevorezné nástroje 2001, Opatrebenie rezného klína. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2001.

ONDRA, J. 1998. Optické metody pro monitorování kvality obrobenech povrchu. Ve: Kvalita a spolahlivost strojov. 3. medzinárodné vedecké sympóziium, 20-21.duben 1998, Nitra.

SIKLIENKA M., ŠUSTEK, J. 2007. Drevorezne nástroje a obrabene dreva 2007. Zborník referatov. Technická univerzita vo Zvolene, 2007. Metodika kvalifikacie nerovnosti při obrobenom povrchu rastlého dreva pomocou laserového profilmetra.

POŽGAJ A., CHOVANEC D, KURJATKO S., BABIAK M., 1997. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydání. Bratislava, Príroda, 1997.

PROKEŠ, S. 1970. Jakost obrobeneho povrchu. Dřevařska technická příručka. STNL, 1970.

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



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

REINPRECHT L., VIDHOLDOVÁ Z. 2008. Termodrevo – příprava, vlastnosti a aplikácie. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1920-6.

SANDAK, J. – NEGRI, M. 2005. Wood surface roughness – what is it? In: Proceedings of the 17th international wood machining Seminar, Rosenheim. 29-30 September 2005, Volume 1.