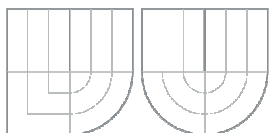


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA PROCESŮ OBRÁBĚNÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ SE ZAMĚŘENÍM NA ENERGETICKÉ ASPEKTY

ANALYSIS OF MACHINING PROCESSES OF METALLIC MATERIALS WITH
A FOCUS ON ENERGY ISSUES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. VÍT SZLAUR

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. JOSEF CHLADIL, CSC.

BRNO 2012

Zadání

ABSTRAKT

Obecný rozbor problematiky obrábění, rozbor řezných sil pro soustružení, frézování, vrtání. Vyhodnocení experimentálně naměřených hodnot struktury povrchu a teoretických hodnot složek řezných sil, při soustružení válcové součásti. Ekonomičnost procesů pro srovnatelné výsledky konečného stavu povrchu.

Klíčová slova

Obrábění, tříska, řezné podmínky, řezné síly, energetické aspekty.

ABSTRACT

A general analysis of machining problems, analysis of cutting forces for turning, milling, drilling. Evaluation of experimentally measured values of surface structure and theoretical values of cutting forces in turning cylindrical parts. Economical processes for the comparable results of the final state of the surface.

Key words

Machining, chip, cutting conditions, cutting forces, energy issues.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SZLAUR, Vít. *Analýza procesů obrábění kovových materiálů se zaměřením na energetické aspekty*. Brno 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 56 s. příloh 4. doc. Ing. Josef Chladil, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Analýza procesů obrábění kovových materiálů se zaměřením na energetické aspekty** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 25.5 2012

.....
Bc. Vít Szlaur

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Chladilovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
1 Fyzikální základy procesu řezání	9
1.1 Plastická deformace při ortogonálním řezání	9
1.2 Oblasti deformace.....	10
1.3 Geometrické charakteristiky	11
1.4 Smyková deformace ve střižné rovině.....	12
1.5 Určení roviny maximálních smykových napětí z hodnoty koeficientu pěchování třísky	14
1.6 Určení roviny maximálních smykových napětí z podmínky minimální vynaložené práce	15
1.7 Rychlost smykové deformace	16
1.8 Tvorba třísky u klasického obrábění	18
1.9 Tvorba třísky u vysokorychlostního obrábění.....	18
1.10 Výkon při obrábění a spotřeba energie	19
1.11 Práce a výkon řezání.....	20
1.12 Teplo a teplota obrábění.....	21
1.13 Zdroje tepla a tepelná bilance.....	21
2 Rozbor jednotlivých metod obrábění z hlediska působících sil.....	23
2.1 soustružení.....	23
2.1.1 Silové působení při soustružení.....	24
2.1.2 Řezný výkon při soustružení	25
2.2 Frézování	25
2.2.1 Průřez třísky	27
2.2.2 Řezné síly	28
2.3 Vrtání.....	29
2.3.1 Základní kinematické veličiny.....	30
2.3.2 Parametry při obrábění.....	31
3 Experimentální část.....	33
3.1 Metodika vyhodnocení parametrů obrobené plochy	33
3.1.1 Specifikace hodnocených parametrů.....	35
3.1.2 Grafické znázornění naměřených a vypočtených hodnot.....	39
3.2 Teoretický výpočet silového působení při soustružení válcové součásti.....	39
4 Ekonomičnost procesů pro srovnatelné výsledky konečného stavu povrchu	43
4.1 Příklad pro obrábění rovinných ploch	43
4.1.1 Obrábění součásti hranolu Hoblováním	43
4.1.2 Obrábění součásti hranolu čelním frézováním.....	45
4.2 Příklad pro soustružení	46
Závěr	51
Seznam použitých zdrojů	52
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	54
Seznam příloh	56

ÚVOD

Předložená práce se zabývá rozbořem procesů obrábění z hlediska energetických aspektů. Na začátku práce jsou popsány fyzikální základy procesu řezání, které jsou zaměřeny na vznik třísky. Při obrábění dochází k plastickým a pružným deformacím v oddělované vrstvě materiálu před břitem nástroje, tření odcházející třísky po čele nástroje, tření hřbetu nástroje o řeznou plochu na obrobku a tření v materiálu třísky. Všechny tyto jevy jsou vyvolány působením vnějších sil, které umožňují vnikání řezného nástroje do materiálu obrobku. Cílem této práce je stanovení energetických aspektů spojených s těmito jevy.

V práci jsou dále rozebrány tři způsoby obrábění (soustružení, frézování, vrtání) z hlediska působících sil, které ovlivňují energetiku procesu.

V experimentální části je práce zaměřena na hodnocení spotřeb energie při sledovaném experimentu provedeném na soustružené válcové součásti. V průběhu experimentu se měnily parametry řezného procesu, což mělo za následek různé stavy povrchů. Dále proběhlo vyhodnocení vypočtených a naměřených hodnot drsnosti povrchu, a také teoretický výpočet působících sil a výkonů obrábění.

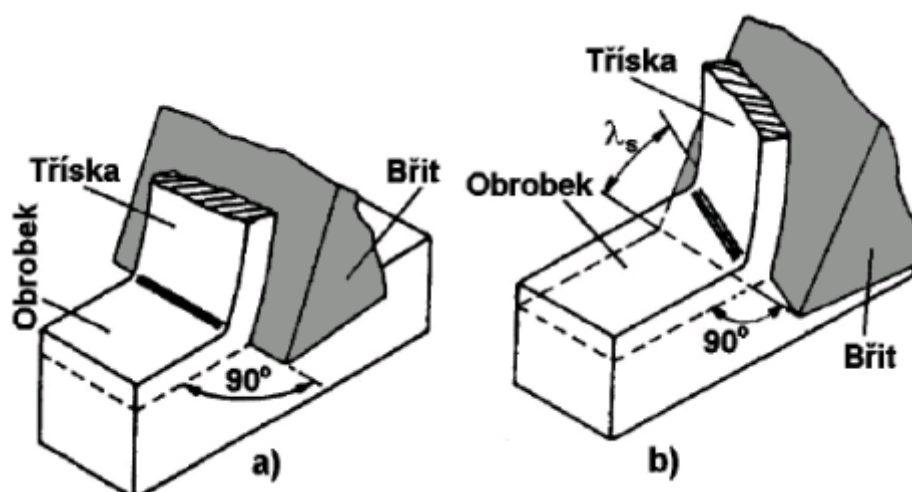
Dále je v práci zahrnuto srovnání výroby stejné součásti pomocí různých typů obrábění pro srovnatelné konečné stavy povrchu. Cílem tohoto srovnání je teoreticky rozbor procesů obrábění při stejných řezných podmínkách. Na základě zjištěných výsledků je pak třeba stanovit nejvhodnější výrobní postup.

1 FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY PROCESU ŘEZÁNÍ

Při řezání působí obráběcí nástroj na obrobek a vyvolává v materiálu napětí, proti kterému klade materiál odpor. V důsledku toho se ustálí pole řezání, které má výrazné charakteristiky stavu napjatosti, teploty a deformace. Proces řezání se může realizovat jako ortogonální nebo obecné řezání.

V případě ortogonálního řezání je ostří nastaveno kolmo na směr řezného pohybu a daná problematika se řeší v rovině. Typickým příkladem ortogonálního řezání je zapichování, frézování nástrojem s přímými zuby, protahování apod. Schéma je znázorněno na obr. 1. 1a.

Při obecném řezání je třeba řešit řezný proces v prostoru (podélné soustružení, vrtání, Frézování nástrojem se zuby ve šroubovici apod. Schéma je uvedeno na obr 1. 1b [6].



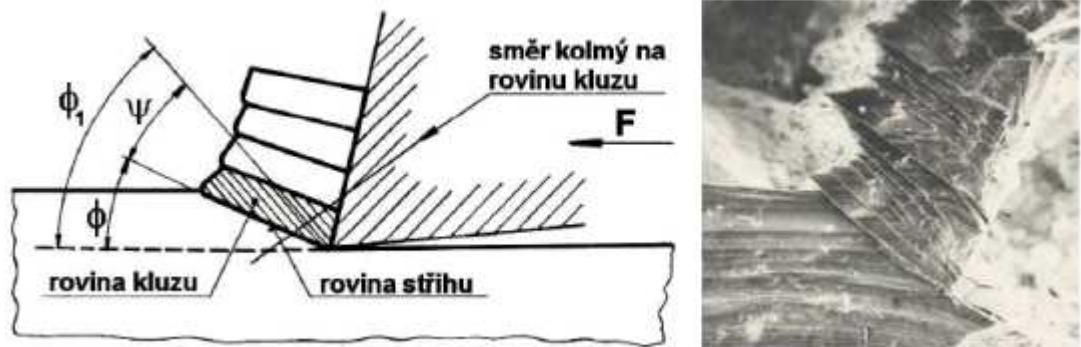
Obr. 1. 1 Realizace řezného procesu, a) ortogonální řezání, b) obecné řezání [6].

1.1 Plastická deformace při ortogonálním řezání

Při řezném procesu dochází v oblasti tvoření třísky k pružným a následně k plastickým deformacím vlivem vnikání nástroje do materiálu obrobku, břit nástroje je tlačěn do obrobku silou F [6].

Smyková napětí rostou do té míry, než dojde k plastické deformaci materiálu obrobku před břitkem nástroje (posuv vrstev v kluzných rovinách pod úhlem Φ_1). Pohyb nástroje pokračuje, roste plastická deformace a dochází k pěchování a posunu vrstev materiálu ve směru kolmém ke kluzným rovinám. Oddělováním třísky se v podstatě ukončuje proces plastické deformace. Plastický lom nastává působením kluzné síly, zatím co křehký lom působením síly normálové.

Při dalším pohybu nástroje roste napětí v materiálu, až dosáhne vyšší hodnoty, než je mez stříhu obráběného materiálu a dojde k oddělení segmentu třísky pod úhlem stříhu Φ [6].



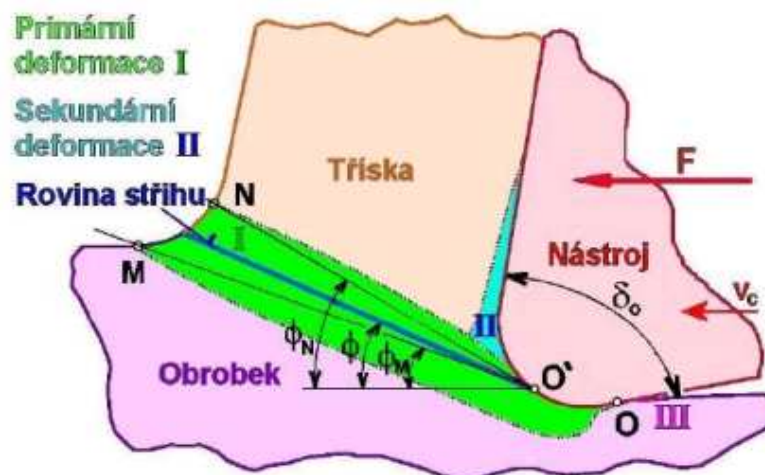
Obr. 1. 2 Vznik třísky [6].

1.2 Oblasti deformace

Při vnikání břitu nástroje do obráběného materiálu vznikají pružné deformace a následně plastické deformace v těchto oblastech:

- Před břitem nástroje, v oblasti primární plastické deformace, která se značí **I** a vymezuje body **OMNO'**,
- V povrchových vrstvách styku třísky a čela nástroje je oblast sekundární plastické deformace, která je označena **II**,
- V povrchové vrstvě obrobené plochy vzniká oblast terciární plastické deformace **III**.

Velikost a tvar oblasti **OMNO'** a stav napjatosti jsou proměnlivé a závisí zejména na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu, především na jeho deformační a zpevňovací schopnosti. S rostoucí řeznou rychlostí v_c , ale zejména posuvovou rychlostí v_f , se tato oblast značně zužuje (ve vysokorychlostním resp. „HSC“ obrábění) a tím obě roviny téměř splývají. Rovněž záleží na řezném prostředí (chlazení), geometrii řezného nástroje a jemu předurčené kinematice (vzhledem k obrobku).



Obr. 1. 3 Oblasti plastických deformací v zóně řezání [6].

Plastická deformace obráběného materiálu v procesu řezání způsobuje:

- oddělení třísky od obrobku (oblast **I**),
- mechanické zatížení nástroje řeznými odpory,
- tepelné zatížení nástroje,
- opotřebení nástroje (na čele v důsledku **II**, na hřbetu v důsledku vlivu **III**),
- změnu textury materiálu v tříске i v povrchové vrstvě obrobené plochy,
- vznik zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobené plochy,
- pěchování třísky (průřez a délka třísky neodpovídají teoretickým hodnotám).

1.3 Geometrické charakteristiky

Při určení sestavení geometrických charakteristik v jedné smykové rovině vycházíme ze zjednodušených předpokladů:

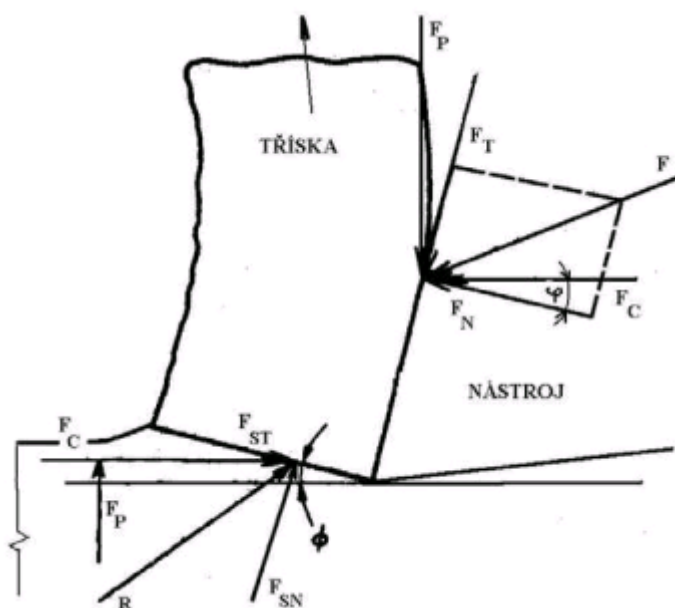
- břit nástroje a jeho řezný klín je ideálně ostrý,
- element třísky se vytváří ve vrstvách rovnoběžných se smykovou rovinou,
- materiál obrobku je izotropní a je bez poruch,
- neuvažujeme účinek tepla díky plastické deformaci a tření.

V nejjednodušším případě můžeme uvažovat pouze dvě síly. Mezi čelem nástroje a třískou působí síla F a síla R působí v rovině maximálních smykových napětí, tj. mezi obrobkem a třískou

$$F = -R \quad (1.1)$$

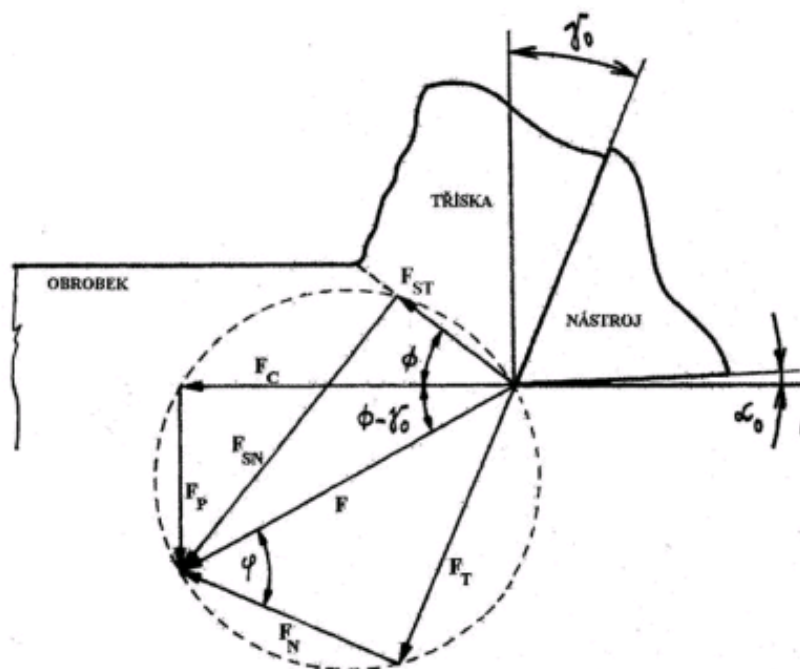
Síly F a R dále rozkládáme na jednotlivé složky (obr. 1. 4):

- řezné složky – vertikální F_P a horizontální F_C ,
- složky na čele nástroje – tečna F_T a normálová F_N ,
- složky v rovině max. smykových napětí – tečná F_{ST} a normálová F_{SN} .



Obr. 1. 4 Síly na tříске [7].

Merchant sestavil v roce 1945 diagram řezných sil pro ortogonální řezání, kde všechny složky jsou vyneseny v místě špičky nástroje (obr. 1. 5).



Obr. 1. 5 Rozložení řezných sil dle Marchanta [7].

Pomocí horizontální složky F_C a vertikální složky F_P , které změříme dynamometrem, jsme schopni vypočítat všechny složky řezné síly pomocí následujících vztahů:

$$F_{ST} = F_C \cdot \cos \phi - F_P \cdot \sin \phi \quad (1.2)$$

$$F_{SN} = F_C \cdot \sin \phi + F_P \cdot \cos \phi = F_{ST} \cdot \operatorname{tg}(\phi + \varphi - \gamma_0) \quad (1.3)$$

$$F_T = F_P \cdot \sin \gamma_0 + F_C \cdot \cos \gamma_0 \quad (1.4)$$

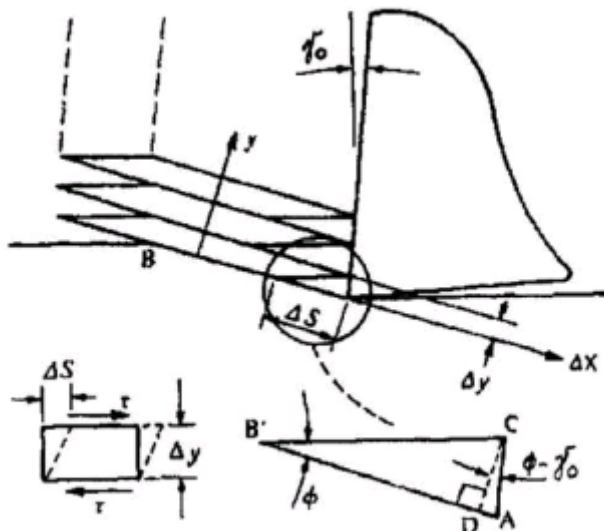
$$F_N = F_P \cdot \cos \gamma_0 - F_C \cdot \sin \gamma_0 \quad (1.5)$$

1.4 Smyková deformace ve střížné rovině

Jednoduchý model průběhů plastické deformace ukazuje obr. 1. 6. V tomto modelu spočívá tvorba třísky v deformaci a posouvání dílčích vrstev materiálu při pohybu nástroje do řezu, přičemž tyto vrstvy se oddělují v rovině skloněné pod úhlem Φ . Deformace obráběného materiálu třísky na čele nástroje se přenáší na volný povrch třísky a tvoří se nové povrchy. Tříska je ve skutečnosti na čele nástroje převážně v plošném kontaktu. Smyková deformace se od čistého smyku liší tím, že předpokládá působení složeného namáhání – smykových složek a normálových složek.

Stanovení smykové deformace vychází z poměrného posunutí, které je definováno vztahem:

$$\gamma = \frac{\Delta s}{\Delta y} = \frac{AB'}{CD} \quad (1.6)$$



Obr. 1. 6 Model řezání pro výpočet smykové deformace [7].

Pokud budeme uvažovat:

$$\Delta s = AD + DB', \quad (1.7)$$

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{CD}{DB'} \Rightarrow DB' = \frac{CD}{\operatorname{tg} \phi}, \quad (1.8)$$

$$\operatorname{tg}(\phi - \gamma_0) = \frac{AD}{CD} \Rightarrow AD = CD \cdot \operatorname{tg}(\phi - \gamma_0), \quad (1.9)$$

a dosadíme

$$\Delta s = \frac{CD}{\operatorname{tg} \phi} + CD \cdot \operatorname{tg}(\phi - \gamma_0) = CD \cdot \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \phi} + \operatorname{tg}(\phi - \gamma_0) \right), \quad (1.10)$$

Dostaneme vztah pro smykovou deformaci:

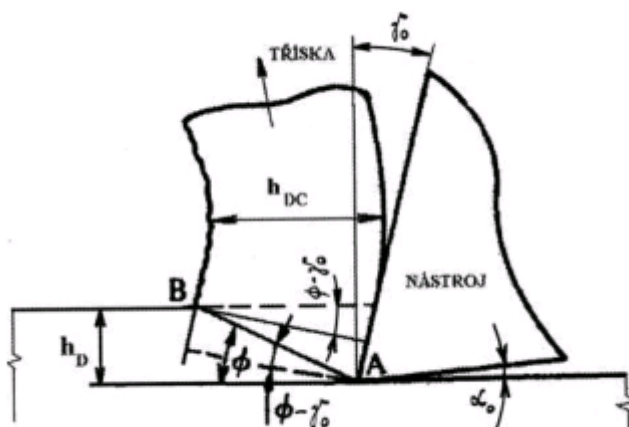
$$\gamma = \frac{\Delta s}{\Delta y} = \frac{1}{\operatorname{tg} \phi} + \operatorname{tg}(\phi - \gamma_0). \quad (1.11)$$

1.5 Určení roviny maximálních smykových napětí z hodnoty koeficientu pěchování třísky

Vycházíme ze zákona stálosti objemu, kdy objem obráběného materiálu V_m je stále stejný jako objem odebraného materiálu V_{ch} , a z těchto podmínek:

$$h_{DC} \geq h_D \quad (1.12)$$

$$b_D = b_{DC} \quad (1.13)$$



Obr. 1.7 Schéma pro odvození vztahu mezi uhlím Φ a součinitelem pěchování třísky [7].

Vztah pro součinitele pěchování třísky:

$$k_h = \frac{h_{DC}}{h_D} \quad (1.14)$$

Pokud platí

$$b_D = b_{DC}, \quad (1.15)$$

pak

$$V_m = h_D \cdot b_D \cdot L, \quad (1.16)$$

$$V_{ch} = h_{DC} \cdot b_{DC} \cdot L_C. \quad (1.17)$$

Dle zákona stálosti objemu

$$h_D \cdot b_D \cdot L = h_{DC} \cdot b_{DC} \cdot L_C \Rightarrow \frac{L}{L_C} = \frac{h_{DC}}{h_D}. \quad (1.18)$$

Po dosazení podle obr. 1.7

$$k_h = \frac{h_{DC}}{h_D} = \frac{AB \cdot \cos(\phi - \gamma_0)}{AB \cdot \sin \phi}, \quad (1.19)$$

dostaneme po upravení konečný vztah

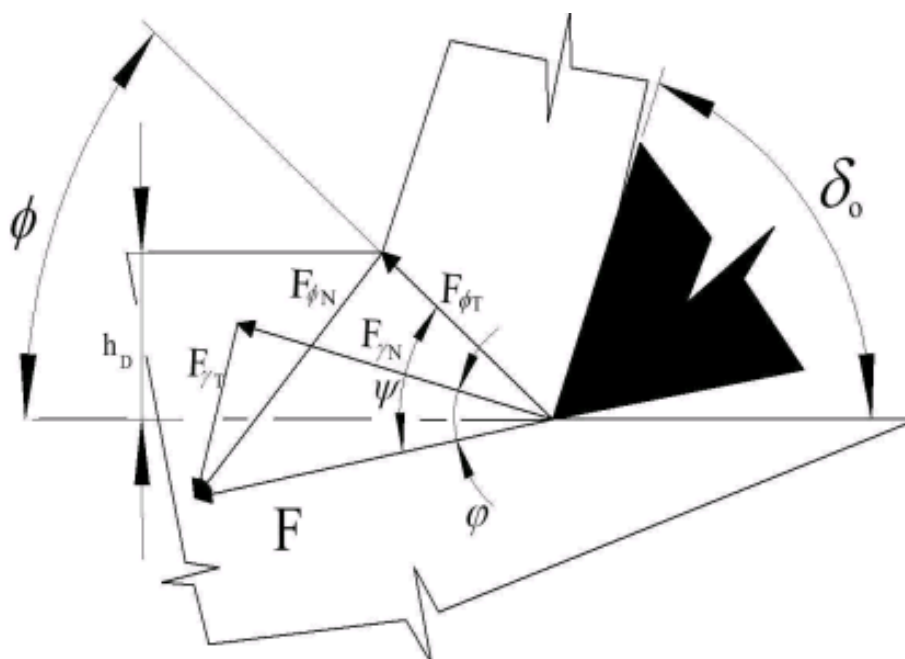
$$\operatorname{tg} \phi = \frac{h_{DC}}{h_D} = \frac{\cos \gamma_0}{1 - \sin \gamma_0}. \quad (1.20)$$

1.6 Určení roviny maximálních smykových napětí z podmínky minimální vynaložené práce

Vycházíme z podmínky z rovnice minimální deformační práce:

$$E_D = F_s \cdot l \quad (1.21)$$

Při hledání minima je dráha l považována za konstantní a proto je posuzován vliv síly.



Obr. 1. 8 Schéma pro odvození vztahu mezi úhlem Φ a podmínky minimální práce [8].

Z obr 1. 8 plyne:

$$\cos \psi = \frac{F_{\phi T}}{F} \quad (1.22)$$

Z podmínky smykového napětí ve střížné rovině

$$\tau_s = \frac{F_{\phi T}}{A_s} = \frac{F_{\phi T} \cdot \sin \phi}{b_D \cdot h_D} \quad (1.23)$$

Odvodíme vztah pro výpočet síly F

$$F = \frac{\tau \cdot h_D \cdot b_D \cdot \frac{1}{\sin \phi}}{\cos \psi} \quad (1.24)$$

Následnou úpravou se

$$F = \tau \cdot h_D \cdot b_D \frac{1}{\sin \phi \cdot \sin(\phi + \delta_0)} \quad (1.25)$$

Dle podmínky minimální práce

$$\frac{\partial F}{\partial \phi} = 0, \quad (1.26)$$

Odvozením a následnou úpravou dostaneme konečný vztah pro výpočet úhlu roviny max. smykových napětí

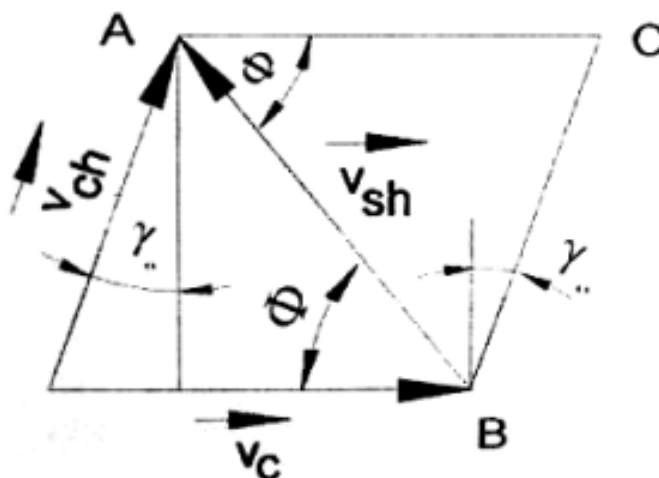
$$\phi = 90^\circ - \frac{\phi + \delta_0}{2} \quad (1.27)$$

1.7 Rychlost smykové deformace

Složky rychlostí ve střižné rovině hrají významnou roli během procesu řezání. Jednotlivé složky jsou následující:

- řezná rychlost v_c ,
- rychlost odcházející třísky v_{ch} ,
- rychlost v rovině maximálních smykových napětí v_{sh} , tj. relativní rychlost třísky vzhledem k obrobku v této rovině.

Řezná rychlost je relativní rychlostí nástroje vzhledem k obrobku a rychlost odcházející třísky je relativní rychlostí třísky vzhledem k čelu nástroje. Velikost jednotlivých složek vypočítáme z geometrických závislostí uvedených na obr. 1.9.



Obr. 1. 9 Složky vektorových rychlostí v kořenu třísky [2].

Rychlost smykové deformace definujeme jako:

$$\dot{\gamma} = \frac{\gamma}{t_{def}}. \quad (1.28)$$

kde t_{def} je čas deformace.

Čas deformace vypočítáme pomocí geometrických závislostí na obr 1.9

$$t_{def} = \frac{BC}{v_{ch}} = \frac{\Delta y}{v_{ch} \cdot \cos(\phi - \gamma_0)}. \quad (1.29)$$

Sinova věta nám udává následující vztahy:

$$\frac{v_{sh}}{\sin(90 - \gamma_0)v_{ch}} = \frac{v_c}{\sin(\gamma_0 + 90 - \gamma_0)}, \quad (1.30)$$

$$\frac{v_{ch}}{\sin \phi} = \frac{v_c}{\sin(\gamma_0 + 90 - \gamma_0)}, \quad (1.31)$$

Po úpravě dostaneme:

$$v_{sh} = \frac{\cos \gamma_0}{\cos(\phi - \gamma_0)} \cdot v_c. \quad (1.32)$$

$$v_{ch} = \frac{\sin \phi}{\sin(90 - \phi + \gamma_0)} \cdot v_c. \quad (1.33)$$

Dosazením do vztahu 1. 29 a 1. 30 a následnou úpravou dostaneme konečný vztah pro výpočet rychlosti smykové deformace:

$$\dot{\gamma} = \frac{\cos \gamma_0}{\cos(\phi - \gamma_0)} \cdot \frac{v_c}{\Delta y}. \quad (1.34)$$

Rychlost smykové deformace můžeme také spočítat pomocí zjednodušeného vztahu

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta s}{\Delta y \cdot \Delta t} = \frac{v_s}{\Delta y}. \quad (1.35)$$

kde: Δt – čas během pohybu materiálu po vzdálenosti Δs ,
 Δy – tloušťka lamel smykového pásma.

1.8 Tvorba třísky u klasického obrábění

Obecně se předpokládá, že se vzrůstající řeznou rychlostí roste celkové množství tepla, a to téměř úměrně s narůstající rychlostí stříhu třísky i intenzitou tření třísky o nástroj. Plastickou deformací třísky v rovině stříhu se „skokově“ mění její teplota, která dále roste třením třísky o čelo nástroje. Při klasickém obrábění dochází ve smykové rovině k mechanickému zpevnění třísky. Díky tomu, že zpevněná tříska klade větší odpor, narůstá úhel roviny stříhu, který zvyšuje tloušťku třísky i její odpor proti ohybu a současně zvětšuje plochu kontaktní zóny.

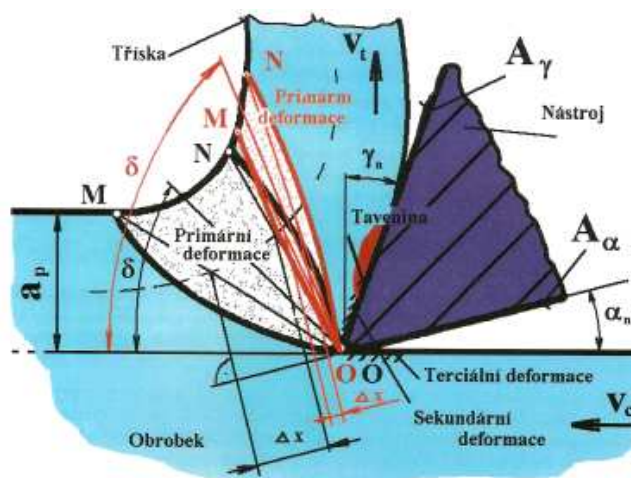
Mezi třískou a čelem nástroje „spolupůsobí“ přitlačné i třecí síly, které tímto nabývají vysokých hodnot. Dochází takto k přechodu velké části tepla vyvolaného třením z třísky do nástroje. Třecí teplo a značná přitlačná síla třísky podporují difuzní procesy, které vedou k vymílání kráterů na čele nástroje.

Primární plastické deformace mají za následek rozdíl mezi průřezem odřezávané vrstvy S a průřezem vzniklé třísky S_1 . Tloušťka vzniklé třísky je vždy větší než tloušťka odřezávané vrstvy (pěchování příčné) a délka vzniklé třísky je vždy menší než odpovídající dráha nástroje (pěchování podélné).

1.9 Tvorba třísky u vysokorychlostního obrábění

Vysokorychlostní obrábění, realizované zvláště výkonnými, mimořádně tvrdými a tepelně odolnými řeznými nástroji. Probíhá při teplotě třísky blízké tavné teplotě obráběného materiálu. Za určité řezné rychlosti dochází k náhlé změně řady metalurgických, chemických i mechanických vlastností třísky.

Tříska snižuje svou přitlačnou sílu na čelo nástroje. Tento děj nastane také v případě kalené ocelové třísky, která rovněž změkne. Třecí síla i celkový řezný odpor se snižuje, zvětší se úhel smyku δ , ztenčí se průřez odcházející třísky a zvýší se rychlost v_t jejího odchodu z kontaktní zóny.



Obr. 1. 10 Tvorba třísky u "klasické,, a "HSC technologie,, [6].

Vysokorychlostní obrábění, realizované zvláště výkonnými, mimořádně tvrdými a tepelně odolnými řeznými nástroji. Probíhá při teplotě třísky blízké tavné teplotě obráběného materiálu. Za určité řezné rychlosti dochází k náhlé změně řady metalurgických, chemických i mechanických vlastností třísky.

Předpokladem významného efektu rychlostního obrábění je hodnota posuvové rychlosti v_f alespoň $15 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, nejlépe však $v_f = 30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a výše. Posuvová rychlost je již srovnatelná s řeznou rychlostí v_c , což způsobuje zvýšenou reakci plasticky se deformujícího materiálu i ve směru posuvové rychlosti v_f .

Také se sníží plocha kontaktní zóny a omezí sekundární nárůst teploty třísky třením v kontaktní zóně. Do nástroje se přenáší minimální množství tepla, protože naprostá většina vygenerovaného tepla odchází s třískou. Na spodní straně třísky může v extrémních případech docházet k vytváření tekuté vrstvy, tedy k dosažení teploty tavení obráběného materiálu. Tím je tření na čelní ploše nože redukováno, proto ubývá pěchování třísky a přirůstá zakřivení třísky. Úbytek pěchování třísky vede k přirůstků úhlů kluzu a tím k redukování přetvárné práce.

1.10 Výkon při obrábění a spotřeba energie

Výkon při obrábění a rovinné plastické deformaci je definován obecným vztahem:

$$P_c = F_c \cdot v_c \quad (1.36)$$

Měrná energie na jednotku objemu se počítá z celkově vynaložené energie E_e na odebrání objemu materiálu V ve formě třísek podle přibližného vztahu.

$$u = \frac{E_e}{V} \cong \frac{P_c \cdot t_{def}}{v_c \cdot t_{def} \cdot h_D \cdot b_D} = \frac{P_c}{v_c \cdot h_D \cdot b_D} = \frac{F_c}{h_D \cdot b_D} \quad (1.37)$$

kde t_{def} je deformační čas, h_D a b_D jsou jmenovité rozměry třísky

Celková měrná energie obrábění se dále dělí na :

- smykovou energii na jednotku objemu v rovině maximálního smykového napětí,
- třecí energii na jednotku objemu na čele nástroje,
- povrchovou energii na jednotku objemu při vytváření nového povrchu,
- hybnostní energii na jednotku objemu v důsledku změny momentu, která je vyvolána průchodem materiálu rovinou maximálních smykových napětí.

Prakticky veškerá energie při obrábění je vynakládána na plastickou deformaci a na tření, které se dále transformují na energii tepelnou (pouze necelých 5% energie se vynaloží na pružné deformace).

Povrchová energie na jednotku objemu a energie vyvolaná změnou hybnosti materiálu v rovině maximálních smykových napětí na jednotku objemu jsou za normálních podmínek obrábění zanedbatelné ve vztahu k ostatním složkám energie.

1.11 Práce a výkon řezání

K oddělení třísky určité délky z materiálu obrobku musíme vynaložit určitou práci E_e , která se skládá z následujících složek:

$$E_e = E_{pl} + E_{el} + E_t + E_d \quad (1.38)$$

kde

$$E_t = E_\gamma + E_\alpha \quad (1.39)$$

Přičemž

E_{pl} - je práce nutná k překonání plastických deformací v odřezávané vrstvě a pod břitem nástroje (tvoří 50÷80% celkové práce E_e),

E_{el} - je práce nutná k překonání pružných (elastických) deformací materiálu odřezávané vrstvy a materiálu pod břitem nástroje (tvoří 5÷10% celkové práce E_e),

E_γ - je práce třecí, nutná k překonání tření třísky po čele nástroje,

E_α - je práce třecí, nutná k překonání tření hřbetu nástroje po řezné ploše (celková třecí práce E_t tvoří 20÷40% celkové práce E_e),

E_d - je disperzní práce (práce potřebná k přetvoření nových povrchů, tvoří přibližně 1% celkové práce E_e).

Z jiného pohledu tato práce řezného procesu E_e [J], vyjadřuje taktéž celkovou práci na odebrání určitého množství materiálu a stanoví se jako součet práce řezání a práce posuvu, realizovaných pohony stroje, tzn.:

$$E_e = E_c + E_f \quad (1.40)$$

Práce řezání E_c je práce potřebná k zajištění hlavního pohybu obrábění pro odebrání určitého množství materiálu obrobku a lze vyjádřit ve tvaru

$$E_c = \int_0^t F_c \cdot v_c \cdot dt \quad (1.41)$$

Například pro soustružení válcové plochy bude po formální úpravě platit:

$$E_c = F_c \cdot v_c \cdot t_p \quad (1.42)$$

Kde F_c je řezná síla, v_c řezná rychlost a t_p čas řezného procesu, po který se fyzicky tvoří třísky.

Práce posuvu E_f je práce potřebná na zajištění posuvového pohybu, pro odebrání určitého množství materiálu:

$$E_f = \int_0^t F_f \cdot v_f \cdot dt \quad (1.43)$$

Pro soustružení válcové plochy bude po formální úpravě platit:

$$E_f = F_f \cdot v_f \cdot t_p \quad (1.44)$$

Kde F_f je posuvová síla, v_f posuvová rychlost a t_p čas soustružení.

1.12 Teplo a teplota obrábění

Teplota řezání je jedním z nejdůležitějších parametrů ovlivňujících proces řezání a má vliv na všechny parametry řezání. Závisí na ní možnost a vhodnost použití různých řezných rychlostí, posuvů, hloubky řezu a také ovlivňuje trvanlivost nástroje.

Prakticky veškerá mechanická energie E_e vynaložená na tvorbu třísky se přeměňuje v energii tepelnou (95÷98%). Pouze malá část energie je uložena jako elastická energie v deformovaných třískách a ve zbytkové napjatosti obrobeneho povrchu [2].

1.13 Zdroje tepla a tepelná bilance

Teplo řezného procesu Q_e vzniklé při odebrání určitého množství materiálu je přibližně rovné práci řezného procesu E_e , tzn. že $Q_e = E_e$.

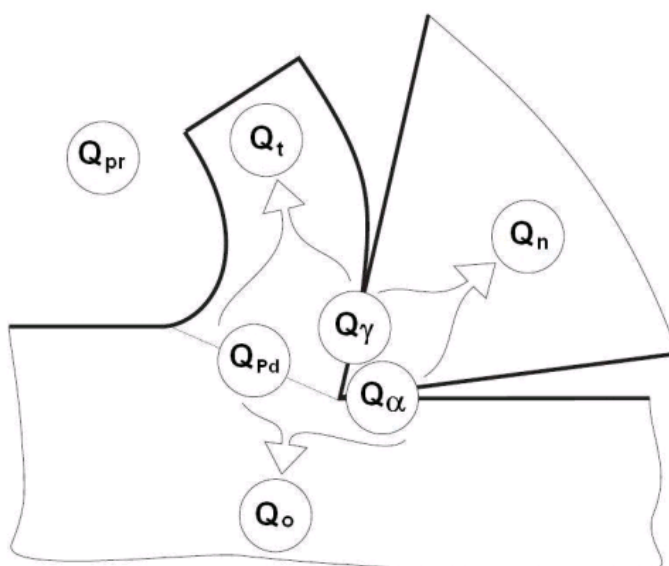
Hlavní zdroje tepla při tvoření třísky jsou v oblastech plastické deformace a platí pro ně vztah:

$$Q_e = Q_{Pd} + Q_\gamma + Q_\alpha \quad (1.45)$$

Q_{Pd} - teplo v oblasti primární plastické deformace I vzniklé při tvorbě třísky

Q_γ - teplo v oblasti sekundární plastické deformace II způsobené třením mezi třískou a čelem nástroje

Q_α - teplo v oblasti terciární plastické deformaci III způsobené třením mezi obrobenu plochou a hřbetem nástroje



Obr. 1. 11 Vznik tepla při tvorbě třísky [6].

Vzniklé teplo řezného procesu je odváděno do jednotlivých prvků obráběcího systému:

$$Q_e = Q_t + Q_o + Q_n + Q_{pr} \quad (1.46)$$

Q_t - teplo odvedené třískou

Q_o - teplo odvedené obrobkem

Q_n - teplo odvedené nástrojem

Q_{pr} - teplo odvedené řezným procesem

Vzniklé a odvedené teplo musí být v rovnováze, proto můžeme vytvořit rovnici tepelné bilance řezného procesu:

$$Q_{Pd} + Q_\gamma + Q_\alpha = Q_t + Q_o + Q_n + Q_{pr} \quad (1.47)$$

Největší množství tepla vzniká v oblasti primární plastické deformace I, následuje oblast sekundární plastické deformace II a oblast terciární plastické deformace III [5].

Množství vzniklého tepla závisí:

- na vlastnostech obráběného materiálu,
- geometrii nástroje,
- řezných podmínkách (především řezné rychlosti) [5].

Jejich vliv lze shrnout následovně:

- se zvyšováním řezné rychlosti v_c roste množství vzniklého tepla, klesá měrný řezný odpor a tím i teplota v oblasti primární plastické deformace, ale výrazně roste práce a tření na čele nástroje,
- se zvyšováním posuvové rychlosti v_f a šířky záběru ostří a_p roste množství vzniklého tepla, ale méně výrazně než u zvyšování řezné rychlosti. Z hlediska tepelného zatížení nástroje je výhodnější štíhlá tříska – malá hodnota f a velká hodnota a_p ,
- při zvětšování pracovního úhlu nastavení hlavního ostří K_{re} se vzniklé teplo soustřeďuje na kratší úsek břitu, a proto tepelné zatížení nástroje narůstá,
- při zmenšování uhlu čela γ_o narůstá úhel řezu δ_o , intenzita plastické deformace se zvyšuje a proto roste i množství vzniklého tepla,
- při zmenšování uhlu hřbetu α_o , narůstá práce tření na hřbetě nástroje a tím i množství vzniklého tepla [5].

Vzniklé teplo výrazně ovlivňuje řezný proces:

- negativně působí na řezné vlastnosti nástroje,
- ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- ovlivňuje petchování a zpevňování obráběného materiálu,
- ovlivňuje podmínky tření na čele i hřbetě nástroje [2].

2 ROZBOR JEDNOTLIVÝCH METOD OBRÁBĚNÍ Z HLEDISKA PŮSOBÍCÍCH SIL

V této kapitole jsou popsány tři metody obrábění (soustružení, frézování, vrtání) z hlediska působících sil.

2.1 soustružení

Hlavní pohyb při soustružení je rotační a vykonává je obrobek. Je definován vztahem:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

Vedlejší pohyb vůči obrobku vykonává soustružnický nůž. Jeho posuvová rychlost v [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$], je definována posuvem na otáčku f a otáčkami n :

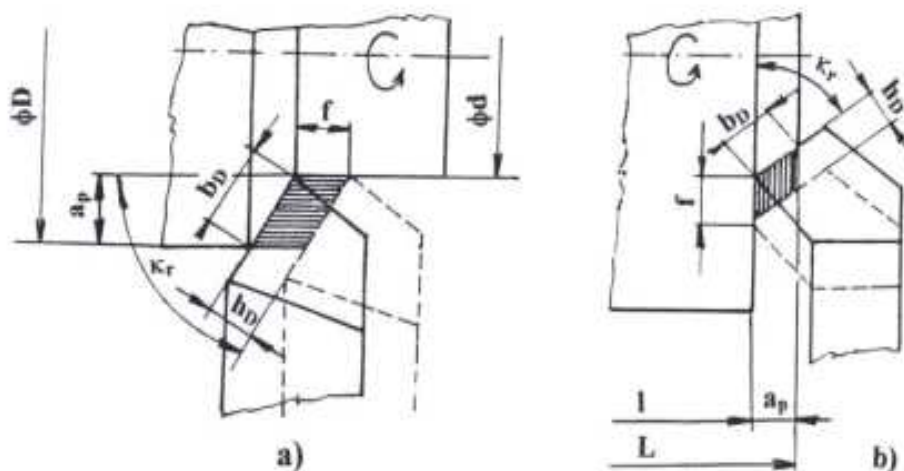
$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} \quad (2.2)$$

Efektivní výsledný pohyb je vektorovým součtem řezného a posuvového pohybu. Je definován vztahem:

$$v_e = v_c + v_f \quad (2.3)$$

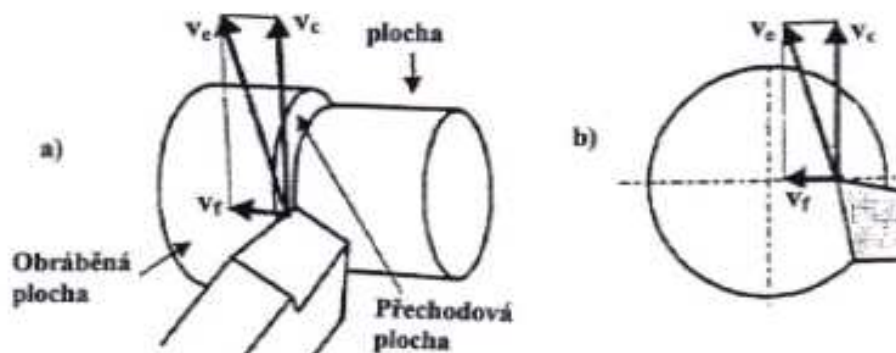
Průřez třísky:

$$A_D = b_D \cdot h_D = a_p \cdot f \quad (2.4)$$



Obr. 2. 1 Průřez třísky při soustružení [6].

Znázornění směrů vektorů při válcovém a čelním soustružení je na obr 2. 2.



Obr. 2. 2 Směry vektorů hlavního a vedlejšího pohybu při válcovém a čelním soustružení [6].

Odřezávaná vrstva materiálu představuje objem materiálu, který musí být odebrán nástrojem. Rozměr této odebrané vrstvy je určen šířkou záběru (dříve značeno jako hloubka řezu) a_p a šířkou b_h . Průřez této vrstvy je označován jako A_D . Významná je i velikost plochy roviny smykové. Tato se určí jako průmět plochy řezu do roviny maximálních smykových napětí podle vztahu:

$$A_{Sh} = \frac{h_D \cdot b_D}{\sin \phi} \quad (2.5)$$

2.1.1 Silové působení při soustružení

Řezná síla při soustružení ve formě empirických vztahů, zahrnujících řezné podmínky:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad (2.6)$$

Posuvová síla je definována vztahem:

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad (2.7)$$

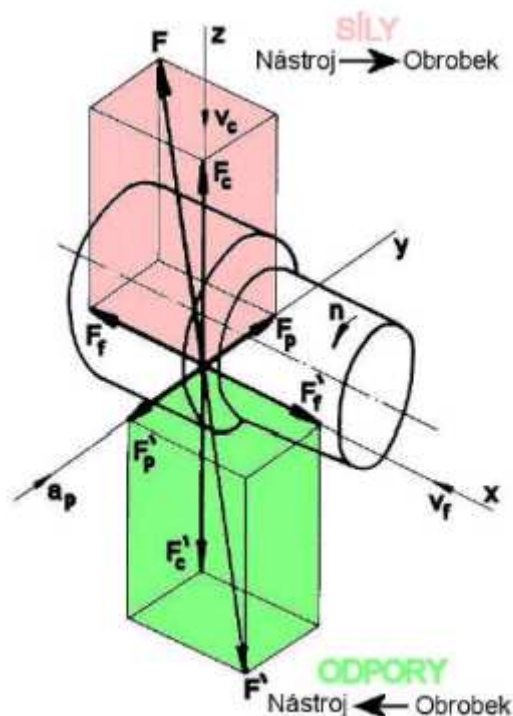
Pasivní síla:

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \quad (2.8)$$

Výsledná síla při soustružení:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (2.9)$$

kde C_{Fc} , C_{Ff} , C_{Fp} jsou materiálové konstanty, x_{Fc} , x_{Ff} , x_{Fp} jsou exponenty vlivu šířky záběru a_p , dále pak y_{Ff} , y_{Fc} , y_{Fp} jsou exponenty vlivu posuvu f .



Obr. 2. 3 Síly a odpory při soustružení [6].

2.1.2 Řezný výkon při soustružení

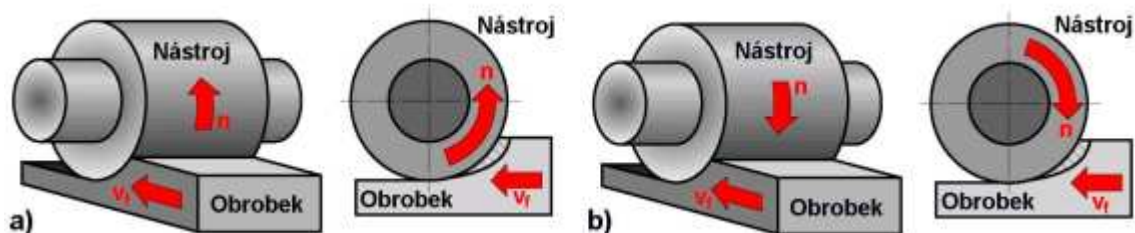
Řezný výkon se uvádí v [kW] a je dán součinem řezné síly a řezné rychlosti:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} \quad (2.10)$$

2.2 Frézování

Frézování je obráběcí metoda, při které se materiál obrobku odebírá břity rotujícího nástroje. Posuv nejčastěji koná součást, převážně ve směru kolmém k ose nástroje. U moderních frézovacích strojů jsou posuvové pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, vícero CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky [4].

V závislosti na aplikovaném nástroji se z technologického hlediska rozlišuje frézování na válcové (frézování obvodem nástroje – obr. 2. 4) a čelní (frézování čelem nástroje – obr. 2. 5). Od těchto základních způsobů se odvozují některé další způsoby, jako je frézování okružní a paletové [4].



Obr. 2. 4 Válcové frézování a) nesousledné, b) sousledné [5].



Obr. 2. 5 Čelní frézování [5].

Válcové frézování se převážně uplatňuje při práci s válcovými a tvarovými frézami. Zuby frézy jsou vytvořeny pouze po obvodu nástroje, hloubka odebírané vrstvy se nastavuje kolmo na osu frézy a směr posuvu. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy. V závislosti na kinematice obráběcího procesu se rozlišuje frézování nesousledné (protisměrné, nesousměrné) a sousledné (sousměrné).

Při nesousledném frézování je smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku. Obrobená plocha vzniká při vnikání nástroje do obrobku. Tloušťka třísky se postupně mění z nulové hodnoty na hodnotu maximální. K oddělování třísky nedochází v okamžiku její nulové tloušťky, ale po určitém skluzu břitu po ploše vytvořené předcházejícím zubem. Přitom vznikají silové účinky a deformace způsobující zvýšené opotřebení břitu. Řezná síla při protisměrném frézování má složku, která působí směrem nahoru a odtahuje obrobek od stolu stroje [4].

Při sousledném frézování je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku. Maximální tloušťka třísky vzniká při vnikání zubů frézy do obrobku. Obrobená plocha se vytváří, když zub vychází ze záběru. Řezné síly působí obvykle směrem dolů, proti stolu stroje.

Čelní frézování se uplatňuje při práci s čelními frézami, které mají břity vytvořeny na obvodě i čele nástroje. Podle polohy osy frézy vzhledem

k frézované ploše se rozlišuje symetrické (osa nástroje prochází středem frézované plochy) a nesymetrické frézování (osa nástroje je mimo střed frézované plochy). U čelního frézování pracuje fréza současně sousledně i nesousledně.

Hlavní rotační pohyb u všech druhů frézování koná nástroj, posuvový pohyb je většinou přímočarý a koná ho obrobek. Hodnota řezné rychlosti se vypočítá podle vztahu:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.11)$$

Základní jednotkou posuvového pohybu je posuv na zub f_z , což je délka dráhy, kterou ujede obrobek po dobu záběru zubu. Z posuvu na zub lze vypočítat posuv na otáčku f_n [5]:

$$f_n = f_z \cdot z \quad (2.12)$$

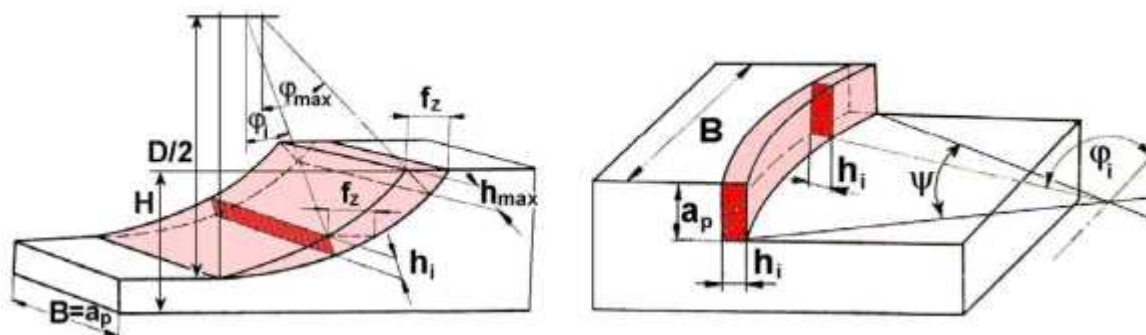
Posuvová rychlost se vypočítá podle vztahu:

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad (2.13)$$

2.2.1 Průřez třísky

Tloušťka odřezávané třísky h_i se při válcovém nesousledném frézování mění od nulové do maximální hodnoty a od maximální hodnoty do nuly při frézování sousledném (obr. 2. 6). Jmenovitá tloušťka třísky h_i v libovolné fázi jejího odřezávání se vyjádří vztahem [4]:

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (2.14)$$



Obr. 2. 6 Průřez třísky při válcovém a čelním frézování [5].

Jmenovitý průřez třísky pro polohu zubu frézy i se vyjádří na základě poměrů naznačených na obr. 2. 6.

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (2.15)$$

Maximální velikost jmenovitého průřezu třísky bude při $\varphi_i = \varphi_{\max}$:

$$A_{D \max} = a_p \cdot h_{\max} = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_{\max} \quad (2.16)$$

$$\sin \varphi_{\max} = \frac{2}{D} \sqrt{D \cdot H - H^2} \quad (2.17)$$

U čelního frézování se tloušťka třísky rovněž mění v závislosti na úhlu posuvového pohybu φ_i a je navíc ovlivněna i úhlem nastavení hlavního ostří κ_r , proto se její okamžitá hodnota vypočítá podle vztahu:

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r \quad (2.18)$$

Jmenovitá šířka třísky b_i je pro libovolné φ_i konstantní a vypočítá se podle vztahu:

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (2.19)$$

Jmenovitý průřez třísky A_{Di} pro $\kappa_r = 90^\circ$:

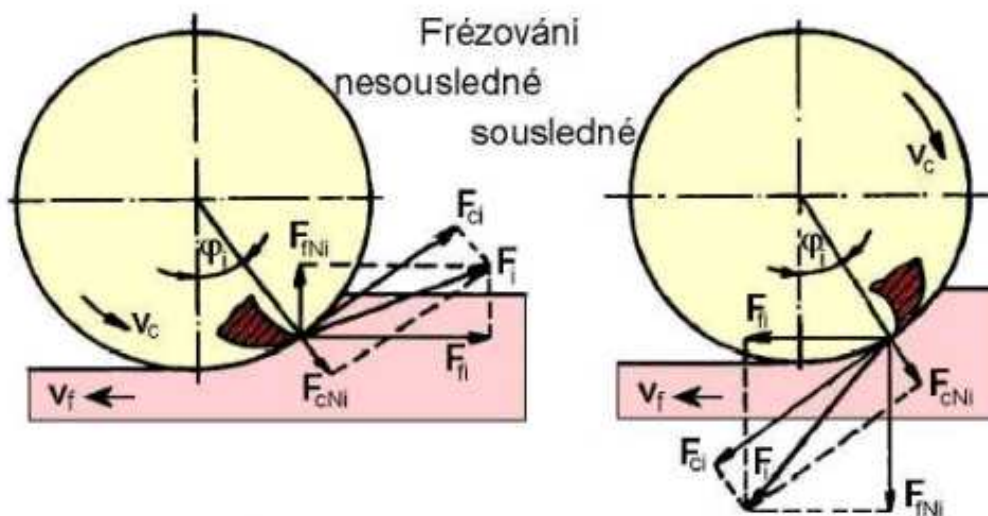
$$A_{Di} = b \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (2.20)$$

Maximální velikost jmenovitého průřezu třísky je při $\varphi_i = 90^\circ$:

$$A_{Di} = a_p \cdot f_z \quad (2.21)$$

2.2.2 Řezné síly

Při specifikaci řezných sil u frézování se vychází ze silových poměrů na jednom břitu, který je v poloze určené úhlem φ_i . Pro válcové frézování nástrojem s přímými zuby se celková řezná síla působící na břit F_i rozkládá na složky F_{ci} a F_{cNi} , resp. na složky F_{fi} a F_{fNi} (obr. 2. 7) [5].



Obr. 2. 7 Řezné síly na zubu válcové frézy v pracovní rovině P_{fe} [5].

Řezná síla F_{ci} se vyjádří na základě měrné řezné síly k_{ci} a průřezu třísky A_{Di} :

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (2.22)$$

Měrná řezná síla k_{ci} se vyjádří pomocí vztahu:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \quad (2.23)$$

Po dosazení a úpravě:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i \quad (2.24)$$

Při čelním frézování se řezná síla F_{ci} vyjádří obdobným postupem:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (2.25)$$

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \quad (2.26)$$

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin \kappa_r^{x-1} \sin^x \varphi_i \quad (2.27)$$

Protože frézy jsou v převážné většině vícebřité nástroje, je při frézování vždy v záběru několik zubů současně. Výsledné síly pak závisí na počtu zubů v záběru a na okamžité poloze zubů frézy vzhledem k obrobku. Z hlediska potřebného krouticího momentu a výkonu na vřetenu frézky je pak důležitá celková řezná síla F_c , která se pro válcové frézování vypočítá podle vztahu [4]:

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad (2.28)$$

Pro čelní frézování:

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{x-1} \kappa \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad (2.29)$$

Počet zubů v záběru se pro válcové frézování vypočítá podle vztahu:

$$n_z = \frac{\varphi_{\max}}{360} \cdot z \quad (2.30)$$

Pro čelní frézování:

$$n_z = \frac{\psi}{360} \cdot z \quad (2.31)$$

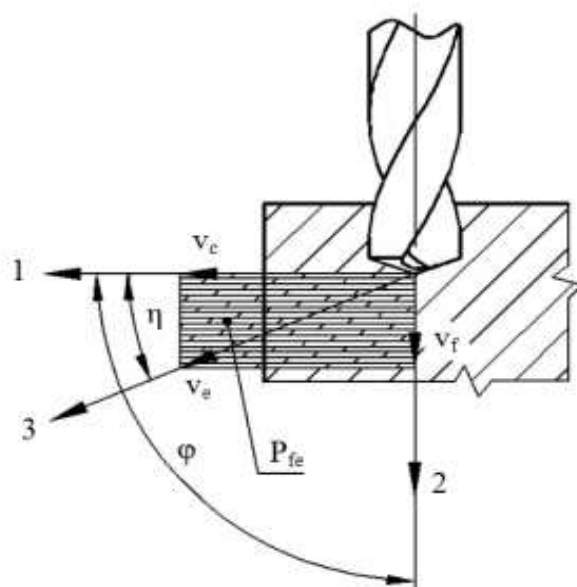
2.3 Vrtání

Vrtání je výrobní technologie, pomocí níž lze zhotovit díry do plného materiálu nebo zvětšit díry již předpracované (předvrtané, předlisované, předlité, atd.). Hlavní pohyb je rotační a vykonává ho ve většině případů nástroj, v některých případech obrobek. Osa vrtáku bývá kolmá k obráběné ploše,

ve které vrták vstupuje do obráběného materiálu. Posuv vrtáku je ve stejném směru jako jeho osa.

Charakteristickou vlastností vrtáků je, že se ve směru od obvodu ke středu nástroje zmenšuje řezná rychlost (v ose je tedy nulová). Díky tomu nastávají technologické problémy. Například to může být příčný břit v ose vrtáku, který vzhledem k nepříznivé geometrii v podstatě třísku neodebírá, ale materiál pouze plasticky deformuje.

Řeznou rychlostí se zpravidla rozumí obvodová rychlost na jmenovitém (největším) průměru nástroje. V případě změny řezné rychlosti podél hlavních břitů vrtáku lze dosáhnout parametrů obrobené plochy (tvar, rozměry, kvalita), které jsou vlastní spíše obráběcím operacím hrubovacího typu. (9)



Obr. 2. 8 Kinematika vrtacího procesu při vrtání šroubovým vrtákem [4].

1-směr hlavního pohybu, 2-směr posuvového pohybu, 3-směr řezného pohybu, v_c -řezná rychlost, v_f - posuvová rychlost, v_e – rychlost řezného pohybu, P_{fe} – pracovní boční rovina, φ – úhel posuvového pohybu, η – úhel řezného pohybu.

2.3.1 Základní kinematické veličiny

Výpočet řezné rychlosti:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.32)$$

Výpočet posuvové rychlosti:

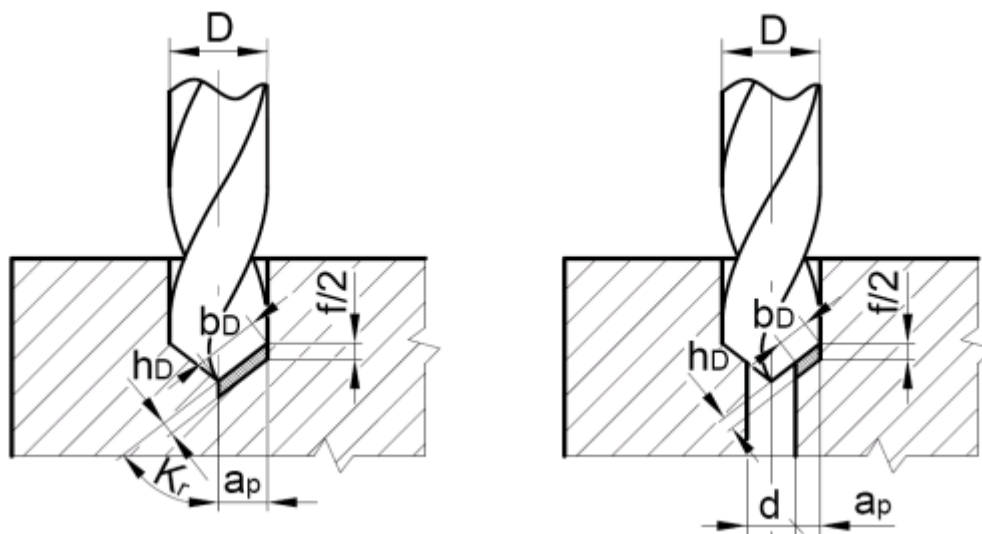
$$v_f = f \cdot n \quad (2.33)$$

Výpočet rychlosti řezného pohybu:

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad (2.34)$$

kde: D [mm] – průměr nástroje,
 n [min^{-1}] – otáčky nástroje,
 f [mm] – posuv na otáčku.

2.3.2 Parametry při obrábění



Obr. 2. 9 Průřez třísky pro vrtání se šroubovým vrtákem [9].

Šířka záběru ostří:

$$a_p = \frac{D}{2} \quad (2.35)$$

Šířka záběru ostří ve směru posuvu $a_f = f/2$

$$a_f = \frac{f}{2} \quad (2.36)$$

Jmenovitá tloušťka třísky:

$$h = \frac{f}{2} \cdot \sin \kappa_r \quad (2.37)$$

Jmenovitá tloušťka třísky do plného materiálu:

$$b = \frac{D}{2 \cdot \sin \kappa_r} \quad (2.38)$$

Jmenovitá šířka třísky při rozšiřování díry:

$$b = \frac{D - d}{2 \cdot \sin \kappa_r} \quad (2.39)$$

Jmenovitý průřez třísky při vrtání do plného materiálu:

$$A_D = b \cdot h = \frac{D \cdot f}{4} \quad (2.40)$$

Jmenovitý průřez třísky při vyvrtávání:

$$A_D = \frac{D-d}{4} \cdot f \quad (2.41)$$

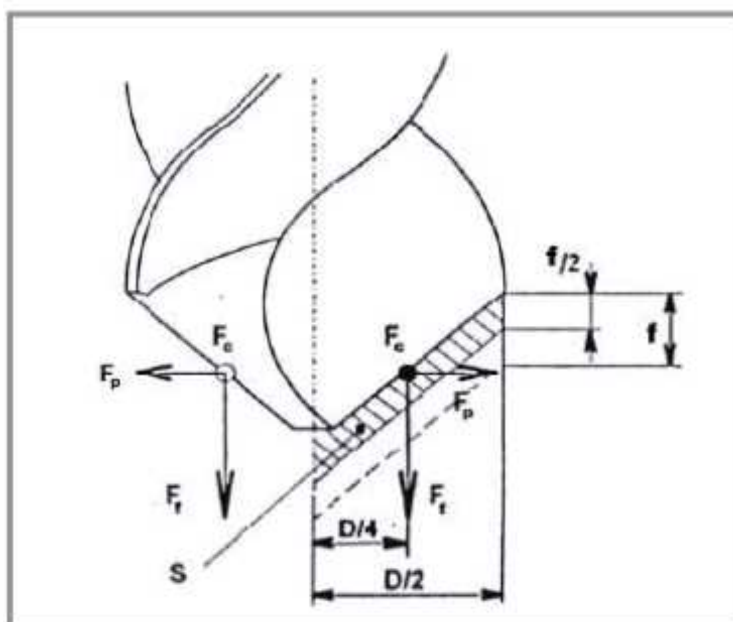
Výpočet řezné síly:

$$F_C = C_{F_C} \cdot D^{x_{F_C}} \cdot f^{y_{F_C}} \quad (2.42)$$

Výpočet posuvové síly:

$$F_f = C_{F_f} \cdot D^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \quad (2.43)$$

kde: D [mm] – průměr vrtáku,
 d [mm] – průměr předvrtané díry,
 f [mm] – posuv za otáčku,
 h [mm] – jmenovitá tloušťka třísky,
 b [mm] – jmenovitá šířka třísky,
 κ_r [°] – pracovní úhel nastavení hlavního ostří,
 C_{F_C}, C_{F_f} [-] – konstanty pro výpočet posuvových sil,
 $x_{F_C}, y_{F_C}, x_{F_f}, y_{F_f}$ [-] – exponenty pro výpočet posuvových sil.



Obr. 2. 10 Rozložení sil při vrtání [12].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato kapitola se zaměřuje na vyhodnocení změn velikostí sil a parametrů kvality povrchu při soustružení válcové součásti, u které se měnil posuv.

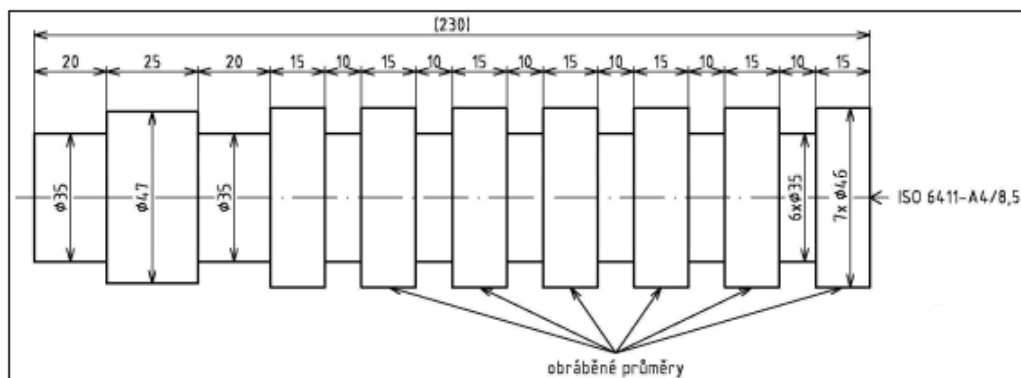
3.1 Metodika vyhodnocení parametrů obrobené plochy

Zkušební součást

Materiál součásti: Kalená ložisková ocel 14 209

Počet kusů: 1 ks

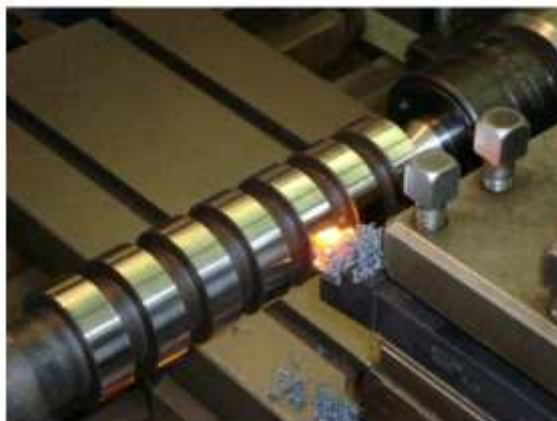
Upnutí: Univerzální sklíčidlo a hrot



Obr. 3. 1 Rozměry zkušební součásti.



Obr. 3. 2 Zkušební součást [10].



Obr. 3. 3 Průběh obrábění [10].

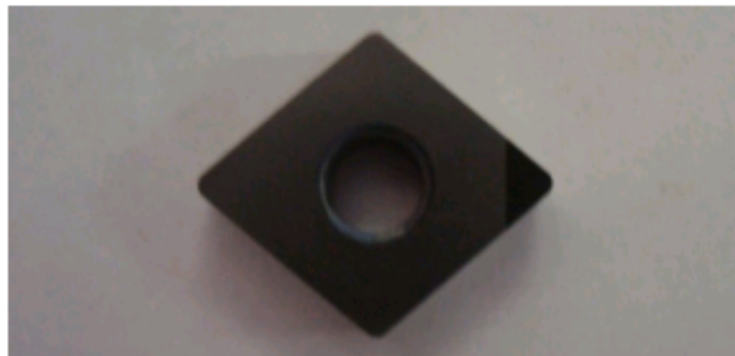
Obráběcí stroj

Parametry univerzálního hrotového soustruhu:

Typ: SV 18 RA
Výrobní číslo: 766
Napětí střídavé: 3 x 380V 50Hz
Napětí stejnosměrné: 220V 35A
Hmotnost: 119 Kg

Nástroj

Soustružnický nůž ubírací stranový – pravý
Vyměnitelná břitová destička z polykrystalického kubického nitridu bóru
nožový držák – CCMNN 2525 M09
VBD – CMIN 090304 FN-PB , $r_e = 0,4\text{mm}$



Obr. 3. 4 Vyměnitelná břitová destička [10].



Obr. 3. 5 Upnutý nástroj [10].

Řezné podmínky

řezná rychlost: $v_c = 161,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

soustružený průměr: $d = 46 \text{ mm}$

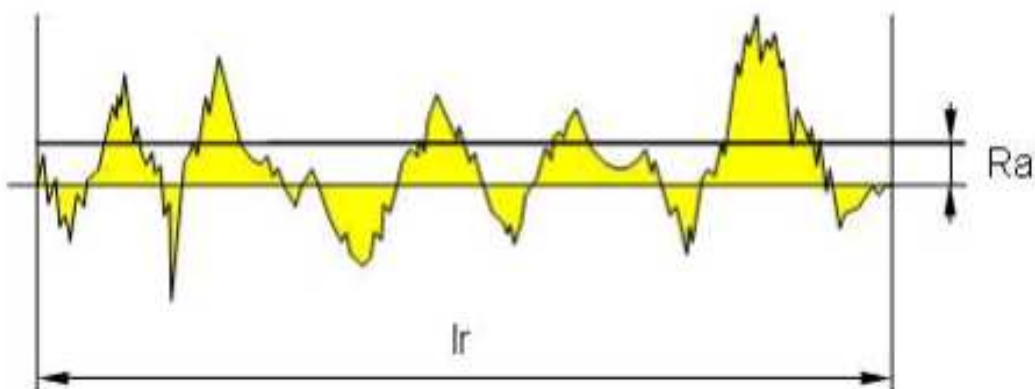
otáčky vřetene: $n = 1120 \text{ min}^{-1}$

posuv na otáčku: $f_1 = 0,054 \text{ mm}$
 $f_2 = 0,061 \text{ mm}$
 $f_3 = 0,067 \text{ mm}$
 $f_4 = 0,074 \text{ mm}$
 $f_5 = 0,088 \text{ mm}$
 $f_6 = 0,100 \text{ mm}$

šířka záběru: $a_p = 0,25 \text{ mm}$

3.1.1 Specifikace hodnocených parametrů**Střední aritmetická úchylka profilu R_a**

Střední aritmetická úchylka profilu se přednostně používá k vyhodnocování struktury povrchu. Jedná se o aritmetický průměr absolutních odchylek profilu od střední čáry v rozsahu základní délky l_r (viz. obr. 3.10).



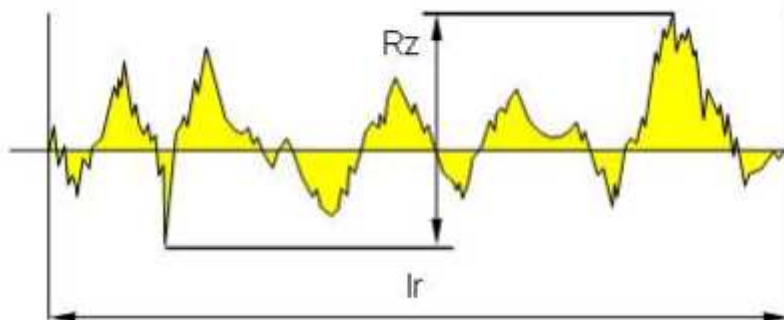
Obr. 3. 6 Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a [10].

Reálné hodnoty parametrů R_a závisí především na konkrétních technologických podmínkách obráběcího procesu. Střední aritmetickou úchylku profilu vyhodnotíme dotykovým měřicím zařízením, u kterého je nutné nastavit správnou citlivost. Pro měření R_a lze však také použít bezdotykové měřicí přístroje.

Teoretické hodnoty se vyjadřují s ohledem na geometrii nástroje a kinematiku procesu obrábění.

Největší výška profilu R_z

Je součet výšky největší špičky profilu a hloubky největší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l_r . Schematické znázornění největší výšky profilu je na obr. 3.7



Obr. 3. 7 Největší výška profilu R_z [10].

Reálné hodnoty parametrů R_z se vztahují na konkrétní technologické podmínky obráběcího procesu, tak jako tomu bylo u parametrů R_a . Největší výšku profilu vyhodnotíme dotykovým měřicím zařízením. Teoretické hodnoty se vyjadřují s ohledem na geometrii nástroje a kinematiku procesu obrábění.

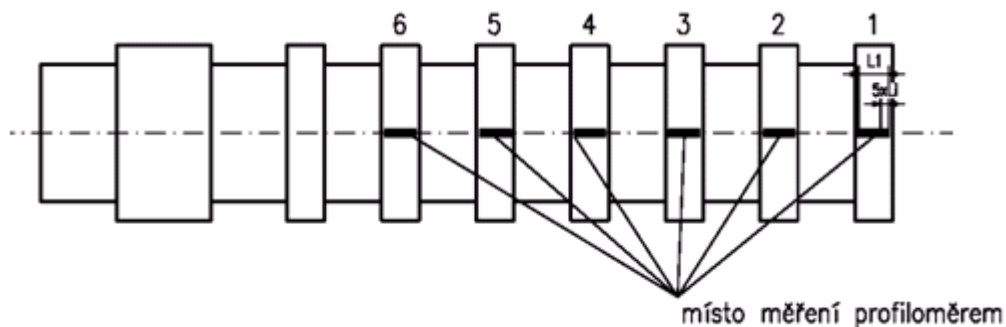
Metodika měření parametrů přesnosti

Měřicí zařízení a pomůcky:

- profiloměr Taylor Hobson Form Talysurf Series 150
- držák profiloměru
- prizmatický držák s aretačním zařízením
- universální svěrák

Metodika měření struktury povrchu

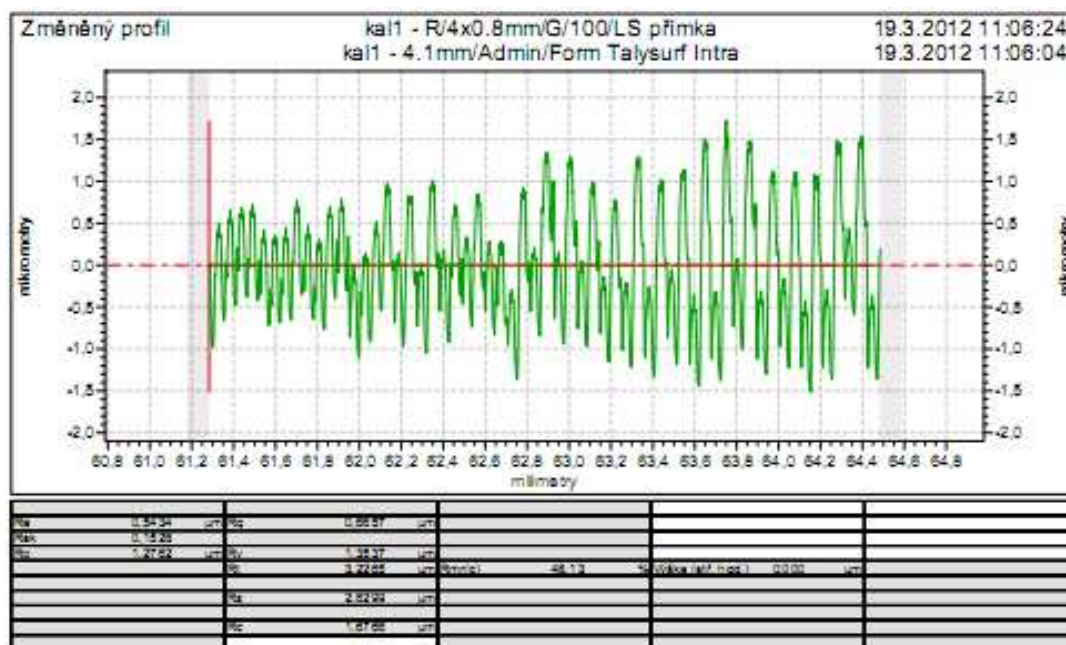
- v celkové délce $L_1 = 4$ mm (v pěti místech tzn. po $5 \times 0,80$ mm)



Obr. 3. 8 Náčrt měření.

Parametry struktury obrobené plochy zkušebních obrobků

Příklad vyhodnocených hodnot z profiloměru Taylor Hobson jsou na obr 3.9, hodnoty jsou zobrazeny pouze pro první řádek tabulky 3.1, kdy byl posuv 0,054 mm na otáčku. Vyhodnocení pro ostatní posuvy jsou v přílohách 1-3.



Obr. 3. 9 Vyhodnocené hodnoty z profiloměru Taylor Hobson.

Tab. 3. 1 Tabulka naměřených hodnot.

Pořadí obrobku s daný posuvem v mm/ot.	Kalená ocel	
	R_a [μm]	R_z [μm]
$f_1 = 0,054$	0,5434	2,6299
$f_2 = 0,061$	0,5755	3,0459
$f_3 = 0,067$	0,5776	3,1952
$f_4 = 0,074$	1,0633	4,7405
$f_5 = 0,088$	1,0306	5,5860
$f_6 = 0,100$	1,3570	6,5534

Výpočet teoretické hodnoty největší výšky profilu R_{zt}

$$R_{z_t} = (r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - 0,25 \cdot f^2}) \cdot 10^3 \text{ } [\mu\text{m}] \quad (3.1)$$

Výpočet teoretické hodnoty průměrné aritmetické úchyly profilu R_{at}

$$\alpha_A = \arccos \left[\frac{r_\epsilon}{f} \cdot \left(\arcsin \frac{f}{2 \cdot r_\epsilon} + \frac{f}{4 \cdot r_\epsilon^2} \cdot \sqrt{4 \cdot r_\epsilon^2 - f^2} \right) \right] [\text{rad}] \quad (3.2)$$

$$Ra_t = \frac{10^3 \cdot r_\epsilon \cdot (2 \cdot \alpha_A - \sin 2 \cdot \alpha_A)}{f} [\mu\text{m}] \quad (3.3)$$

Příklad výpočtu pro první řádek tabulky 3. 2.

$$Rz_t = (0,4 - \sqrt{0,4^2 - 0,25 \cdot 0,054^2}) = 0,9123 [\mu\text{m}]$$

$$\alpha_A = \arccos \left[\frac{0,4}{0,054} \cdot \left(\arcsin \frac{0,054}{2 \cdot 0,4} + \frac{0,054}{4 \cdot 0,4^2} \cdot \sqrt{4 \cdot 0,4^2 - 0,054^2} \right) \right] = 0,039 [\text{rad}]$$

$$Ra_t = \frac{10^3 \cdot 0,4 \cdot (2 \cdot 0,039 - \sin 2 \cdot 0,039)}{0,054} = 0,7468 [\mu\text{m}]$$

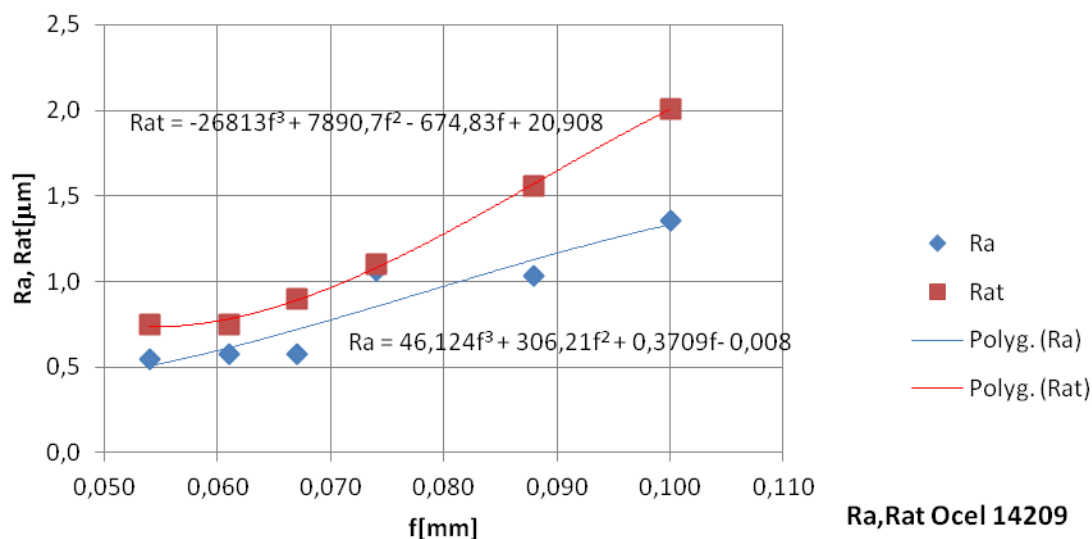
Tab. 3. 2 Tabulka vypočtených hodnot.

Pořadí obrobku s daný posuvem v mm/ot.	Kalená ocel		
	α_A [rad]	R_{at} [μm]	R_{zt} [μm]
$f_1 = 0,054$	0,0390	0,7468	0,9123
$f_2 = 0,061$	0,0440	0,7468	1,1645
$f_3 = 0,067$	0,0484	0,9012	1,4053
$f_4 = 0,074$	0,0534	1,0997	1,7149
$f_5 = 0,088$	0,0636	1,5562	2,4274
$f_6 = 0,100$	0,0723	2,0110	3,1373

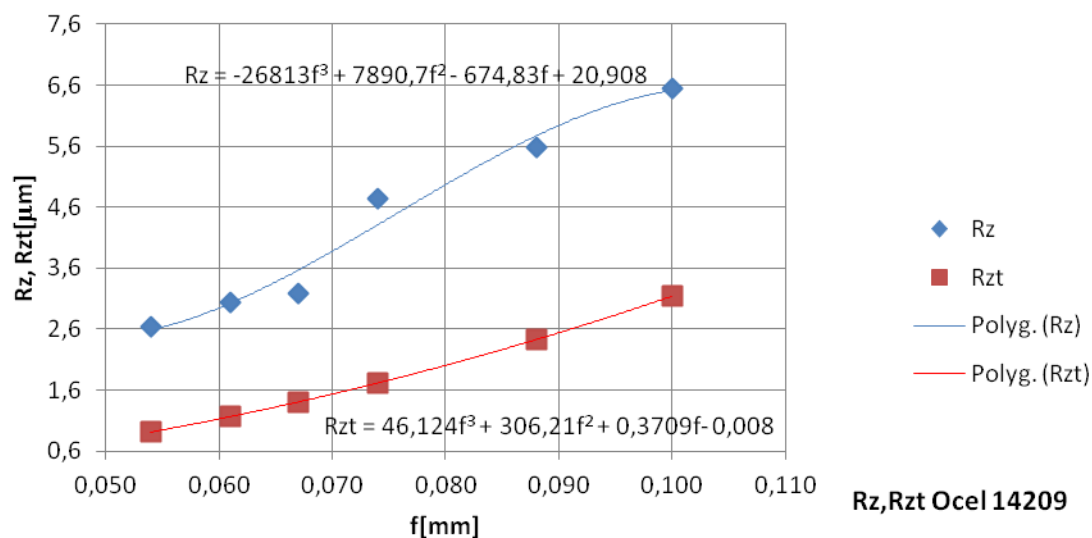
Porovnání teoretických a naměřených hodnot

Při porovnání naměřených hodnot R_a a R_z po soustružení válcové součásti při různých posuvech s hodnotami vypočtenými R_{at} a R_{zt} je zřejmé, že teoretické hodnoty R_{at} jsou vyšší než hodnoty R_a naměřené. Naopak teoretické hodnoty R_{zt} jsou nižší než hodnoty R_z naměřené. Tyto závislosti byly zaneseny do grafů, které jsou znázorněny na obr. 3.9 a obr. 3.10.

3.1.2 Grafické znázornění naměřených a vypočtených hodnot



Obr. 3. 10 Porovnání naměřených hodnot R_a a vypočtených hodnot R_{at} .



Obr. 3. 11 Porovnání naměřených hodnot R_z a vypočtených hodnot R_{zt} .

3.2 Teoretický výpočet silového působení při soustružení válcové součásti

Pro výpočty složek řezných sil byly použity teoretické hodnoty konstant a exponentů. Ostatní hodnoty zůstávají stejné jako pro hodnocení parametrů struktury.

Výpočet složek celkové řezné síly:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} = 1710 \cdot 0,25^1 \cdot 0,054^{0,78} = 43,86 \text{ N}$$

Tab. 3. 3 Tabulka vypočtených hodnot pro řeznou sílu při různých posuvech.

Měření	posuv [mm]	F _c [N]
1	0,054	43,86
2	0,061	48,22
3	0,067	51,89
4	0,074	56,08
5	0,088	64,21
6	0,1	70,92

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} = 910 \cdot 0,25^{0,9} \cdot 0,054^{0,75} = 29,26 \text{ N}$$

Tab. 3. 4 Tabulka vypočtených hodnot pro pasivní sílu při různých posuvech.

Měření	posuv [mm]	F _p [N]
1	0,054	29,26
2	0,061	32,06
3	0,067	34,39
4	0,074	37,05
5	0,088	42,2
6	0,1	46,46

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} = 550 \cdot 0,25^{1,1} \cdot 0,054^{0,55} = 24,03 \text{ N}$$

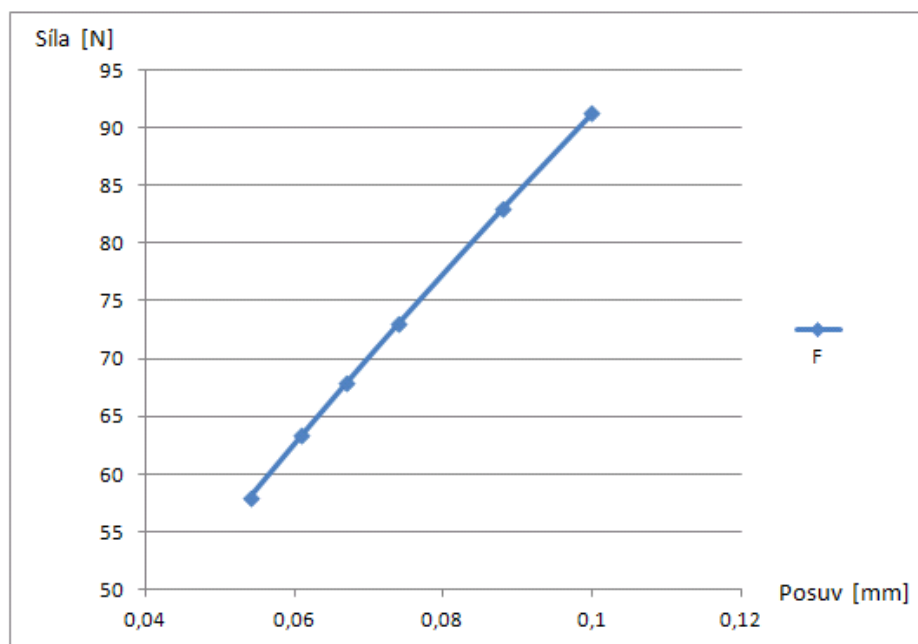
Tab. 3. 5 Tabulka vypočtených hodnot pro posuvovou sílu při různých posuvech.

Měření	posuv [mm]	F _f [N]
1	0,054	24,03
2	0,061	25,69
3	0,067	27,06
4	0,074	28,58
5	0,088	31,44
6	0,1	33,73

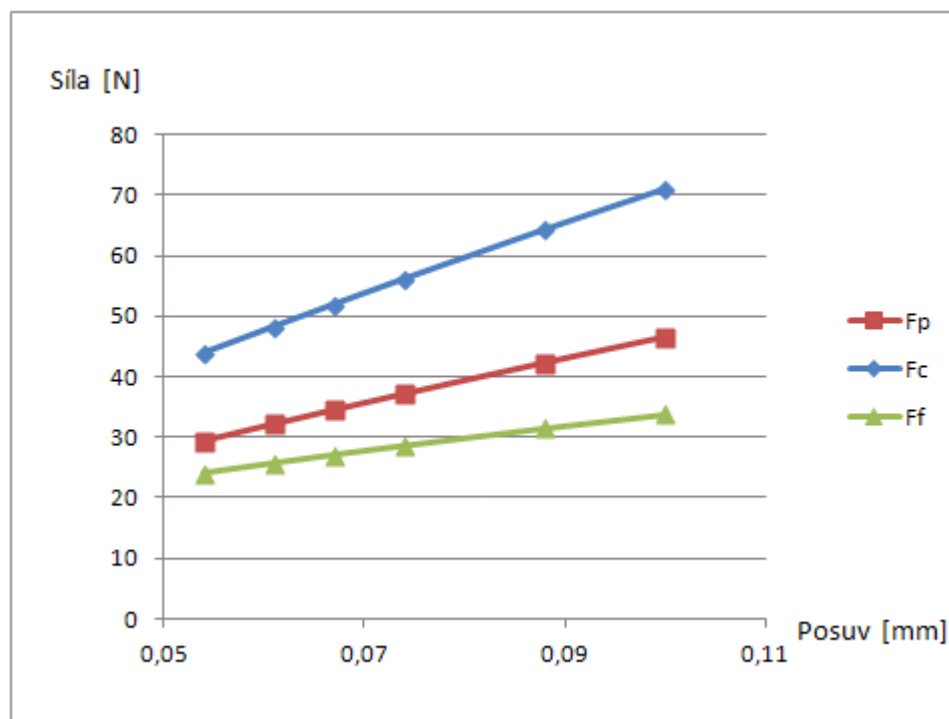
$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} = \sqrt{43,86^2 + 29,26^2 + 24,03^2} = 57,94 \text{ N}$$

Tab. 3. 6 Tabulka vypočtených hodnot pro celkovou sílu při různých posuvech.

Měření	posuv [mm]	F [N]
1	0,054	57,94
2	0,061	63,34
3	0,067	67,87
4	0,074	73,03
5	0,088	83,01
6	0,1	91,24



Obr. 3. 12 Závislost síly na posuvu.



Obr. 3. 13 Závislost jednotlivých složek síly na posuvu.

Informativní hodnoty konstant a exponentů pro výpočet složek řezných sil pro podélné soustružení válcové plochy:

řezná síla	F _c :	C _{F_c} = 1710	x _{F_c} = 1	y _{F_c} = 0,78
pasivní síla	F _p :	C _{F_p} = 910	x _{F_p} = 0,9	y _{F_p} = 0,75
posuvová síla	F _f :	C _{F_f} = 550	x _{F_f} = 1,1	y _{F_f} = 0,55

Výpočet energetické náročnosti

(výpočty jsou uvedeny jako příklad pro první řádek tabulky)

Řezná rychlost:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 46 \cdot 1120}{1000} = 161,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

Posuvová rychlost:

$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} = \frac{0,054 \cdot 1120}{1000} = 0,06 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

Tab. 3. 7 Tabulka vypočtených hodnot pro posuvovou rychlost při různých posuvech.

Měření	posuv [mm]	v _f [m.min ⁻¹]
1	0,054	0,061
2	0,061	0,068
3	0,067	0,075
4	0,074	0,082
5	0,088	0,098
6	0,1	0,112

Řezný výkon:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} = \frac{43,86 \cdot 161,8}{6 \cdot 10^4} = 0,12 \text{ kW}$$

Tab. 3. 8 Tabulka vypočtených hodnot pro řezný výkon při různých posuvech.

Měření	posuv [mm]	F _c [N]	P _c [kW]
1	0,054	43,86	0,12
2	0,061	48,22	0,13
3	0,067	51,89	0,14
4	0,074	56,08	0,15
5	0,088	64,21	0,17
6	0,1	70,92	0,19

Posuvový výkon:

$$P_f = \frac{F_f \cdot v_f}{6 \cdot 10^4} = \frac{24,03 \cdot 0,06}{6 \cdot 10^4} = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ kW}$$

Tab. 3. 9 Tabulka vypočtených hodnot pro posuvový výkon při různých posuvech.

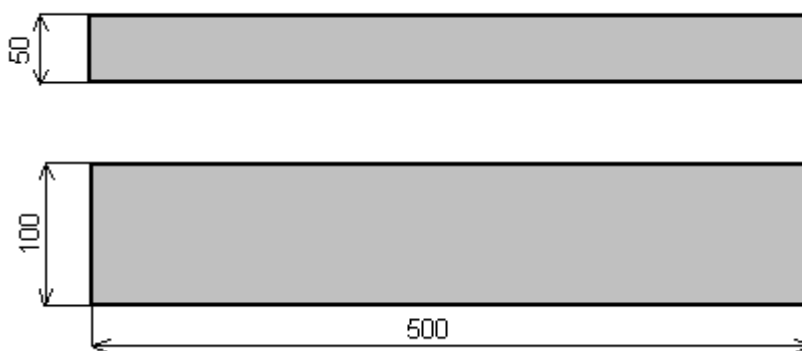
Měření	posuv [mm]	Ff [N]	pf [10^{-5} kW]
1	0,054	24,03	2,4
2	0,061	25,69	2,9
3	0,067	27,06	3,3
4	0,074	28,58	3,9
5	0,088	31,44	5,1
6	0,1	33,73	6,2

4 EKONOMIČNOST PROCESŮ PRO SROVNATELNÉ VÝSLEDKY KONEČNÉHO STAVU POVRCHU

Tato kapitola bude srovnávat z ekonomického hlediska dva druhy výroby stejné součásti. Jako součást bude pro první případ použit hranol a pro druhý případ hřídel. Cílem této kapitoly je zjištění výhodnější varianty na základě teoretického rozboru daných procesů pro srovnatelné konečné stavy povrchu.

4.1 Příklad pro obrábění rovinných ploch

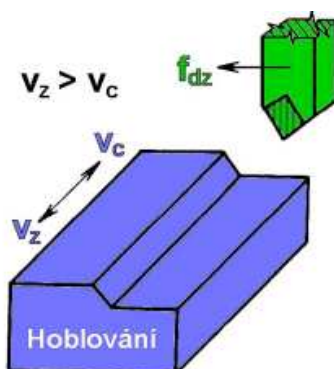
Uvedené rozměry na obr. 4. 1 jsou v mm. Vliv materiálu není ve výpočtech zahrnut a proto není uveden.



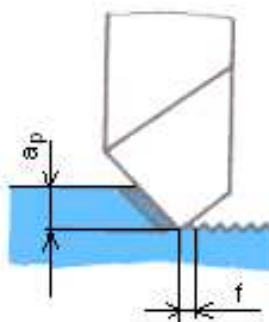
Obr. 4. 1 Rozměry součásti hranolu.

4.1.1 Obrábění součásti hranolu Hoblováním

Jde o metodu obrábění dlouhých rovinných a tvarových ploch jednobřitým nástrojem, při kterém je hlavní pohyb přímočarý vratný a koná ho obrobek. Vedlejší pohyb je přerušovaný posuv a koná ho nástroj (obr 4.2). Při vratném zpětném pohybu nástroj obvykle nepracuje. V krajní poloze se nástroj posune o hodnotu f na zdvih. Obráběné plochy mohou být vodorovné, svislé nebo skloněné pod určitým úhlem.



Obr. 4. 2 Kinematika řezného procesu u hoblování [6].



Obr. 4. 3 Parametry při hoblování.

Řezné podmínky

řezná rychlost: $v_c = 150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
 šířka záběru: $a_p = 0,5 \text{ mm}$
 posuv: $f = 0,05 \text{ mm}$

Teoretický výpočet strojního času

Výpočet času pro jeden záběr hoblovacího nože:

$$t = \frac{s}{v_c} \quad [\text{min}] \quad (4.1)$$

kde: v_cřezná rychlost ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$),
 sdélka hoblované plochy (m),
 tČas (min).

$$t = \frac{s}{v} = \frac{0,5}{150} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ min}$$

Celkový výpočet záběrů potřebných pro obrobení součásti:

$$f_{\text{celkové}} = \frac{b}{f} [-] \quad (4.2)$$

kde: b.....šířka hoblované plochy (mm),
f.....posuv (mm).

$$f_{\text{celkové}} = \frac{100}{0,05} = 2000$$

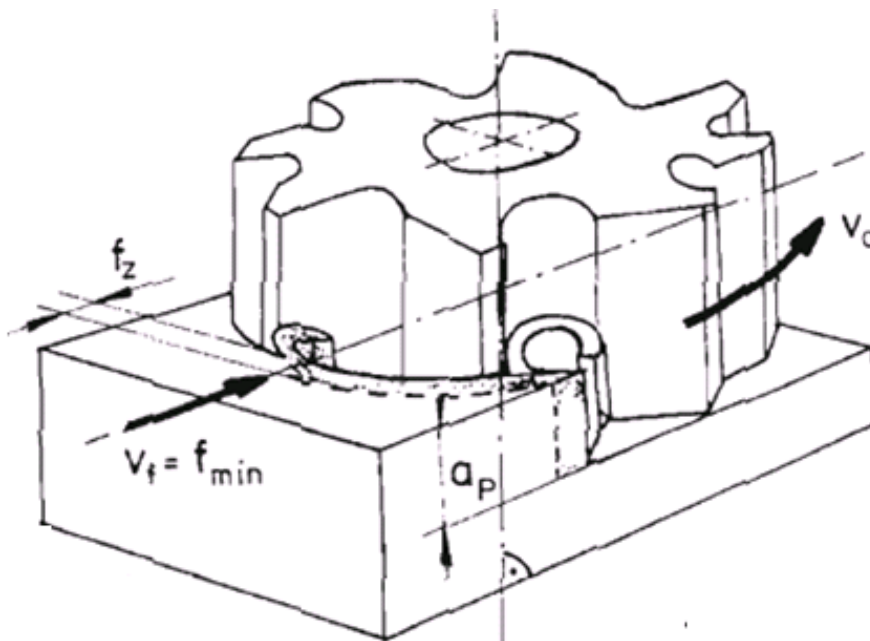
Celkový čas pro obrobení součásti:

$$t_{\text{celkový}} = t \cdot f_{\text{celkový}} [\text{min}] \quad (4.3)$$

$$t_{\text{celkový}} = t \cdot f_{\text{celkový}} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 2000 = 6 \text{ min}$$

Do výpočtu celkového času pro obrobení součásti byl zahrnut pouze čas, kdy je hoblovací nůž v záběru.

4.1.2 Obrábění součásti hranolu čelním frézováním



Obr. 4. 4 Schéma čelního frézování [12].

Pro výrobu součásti bude použita čelní válcová fréza o průměru 200 mm, s 8 břity.

Řezné podmínky

řezná rychlost:	$v_c = 150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
šířka záběru:	$a_p = 0,5 \text{ mm}$
posuv na zub:	$f_z = 0,05 \text{ mm}$

Základní jednotkou posuvového pohybu je posuv na zub f_z , což je délka dráhy, kterou ujede obrobek po dobu záběru zubu. Z posuvu na zub lze vypočítat posuv na otáčku f_n (viz. vzorec 2.12) [5]:

$$f_n = f_z \cdot z = 0,05 \cdot 8 = 0,4 \text{ mm}$$

Posuvová rychlost se vypočítá podle vztahu (viz vzorec 2.13):

$$v_f = f_n \cdot n = 0,4 \cdot 238,73 = 95,49 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

Otáčky vypočítáme ze vzorce pro řeznou rychlost (2.11):

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \text{ [min}^{-1}] \quad (4.4)$$

$$n = \frac{1000 \cdot 150}{\pi \cdot 200} = 238,73 \text{ min}^{-1}$$

Celkový čas pro obrobení součásti:

$$t = \frac{s}{v_f} \text{ [min]} \quad (4.5)$$

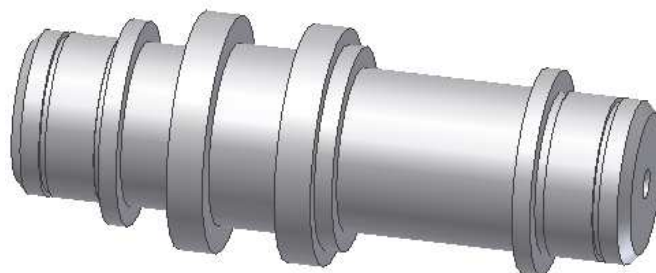
kde: v_fposuvová rychlost ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$),
 sdélka hoblované plochy (m),
 tČas (min).

$$t = \frac{500}{95,49} = 5,23 \text{ min}$$

Z tohoto jednoduchého rozboru jde vidět, že teoretický čas pro výrobu dané součásti pomocí čelního frézování je kratší než pro výrobu stejné součásti pomocí hoblování a to i když se pro hoblování nepočítalo se zpětnými pohyby nástroje. Z toho vyplývá, že pro výrobu této součásti bude ekonomičtější použít čelní frézování.

4.2 Příklad pro soustružení

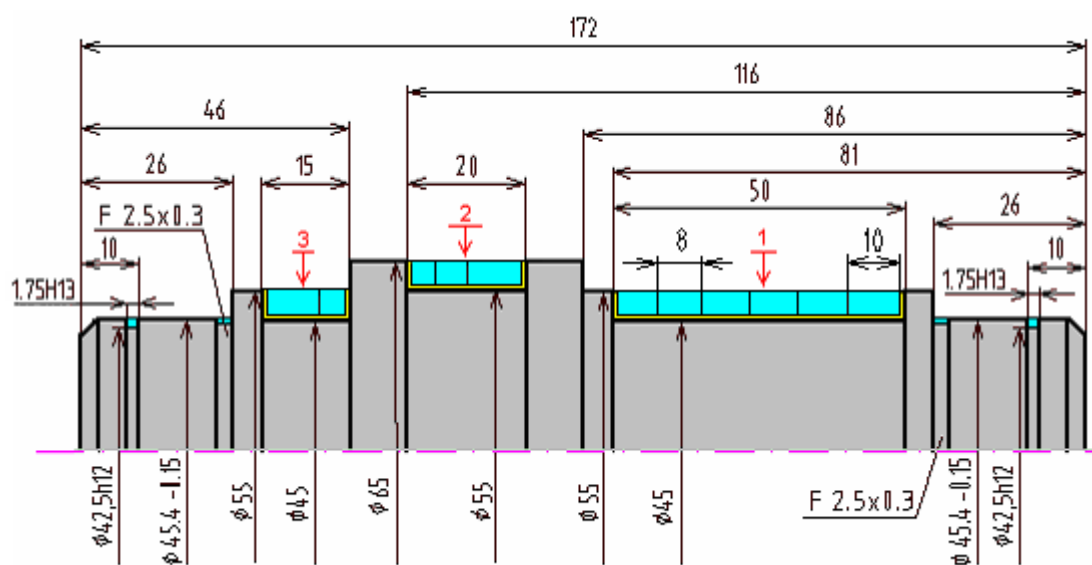
Jako další příklad, bude použita součást jejíž výroba byla předmětem mé bakalářské práce. Jedná se o hřídel, u které je provedeno srovnání výroby pomocí různých technologií výroby. Srovnání je zaměřeno hlavně na výrobu zápichů. Výrobní postupy hřídele jsou provedeny pro CNC soustruh a pro univerzální soustruh.



Obr. 4. 5 Model součásti – hřídel [13].

Řezné podmínky a celková technologie výroby je popsána v již zmíněné bakalářské práci. Proto zde budou zmíněny jen některé faktory vhodné pro teoretické srovnání ekonomičnosti procesu. Pro CNC výrobu byly použity zapichovací cykly, kde pro výrobu zápichu postačí jeden soustružnický nůž a pro univerzální soustruh jsou použity soustružnické nože dva. Jeden pro podélné hrubování a druhý pro dokončování. Pro představu jsou zde uvedeny návodky pro oba způsoby.

Návodka pro zapichování na CNC soustruhu



Obr. 4. 6 Obrábění zápichů na CNC stroji [13].

Tab. 4. 1 Teoretické hodnoty pro obrábění zápichů [13].

	Operace	v_c [m.min ⁻¹]	n [min ⁻¹]	D [mm]	f [mm]	l [mm]	i	t_{As} [min]
1	Zapichování 1	120	694	55	0,2	4,8	6	0,20
2	Zapichování 2	120	587	65	0,2	4,8	3	0,12
3	Zapichování 3	120	694	55	0,2	4,8	2	0,07
4	Dokončování 1	120	694	55	0,2	60	1	0,43
5	Dokončování 2	120	587	65	0,2	30	1	0,25
6	Dokončování 3	120	694	55	0,2	25	1	0,18
7	Zapichování F 2,5x0,3	375	2629	45.4	0,2	2,5	2	0,01
8	Zapichování 1.75	120	841	45.4	0,1	1,45	2	0,03

t_{AS} - Celkový strojní čas pro zapichování na CNC soustruhu je 1.29 min

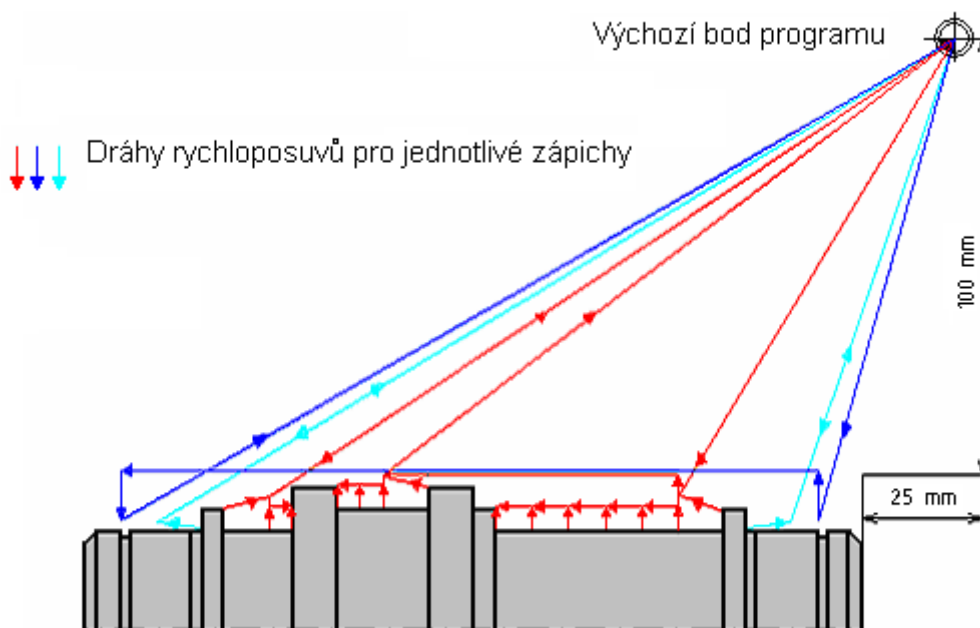
Výpočet výrobních časů

Strojní čas t_{AS} [min]:

$$t_{AS} = \frac{(L \cdot i)}{n \cdot f} \quad [\text{min}] \quad (4.6)$$

kde: n.....otáčky obrobku [min⁻¹],
L.....délka obráběné plochy [mm],
f.....posuv [mm],
i.....počet třísek.

Vedlejší strojní čas pro CNC stroj je určen pomocí drah nástrojů zakreslených v obr. 4. 3, který je proveden v AutoCADu 2002, je také pouze teoretický a jeho přesnou hodnotu je třeba určit simulací nebo přímo v pracovním procesu.



Obr. 4. 7 Dráhy rychloposuvů pro výpočet t_{AV} [13].

Vedlejší strojní čas:

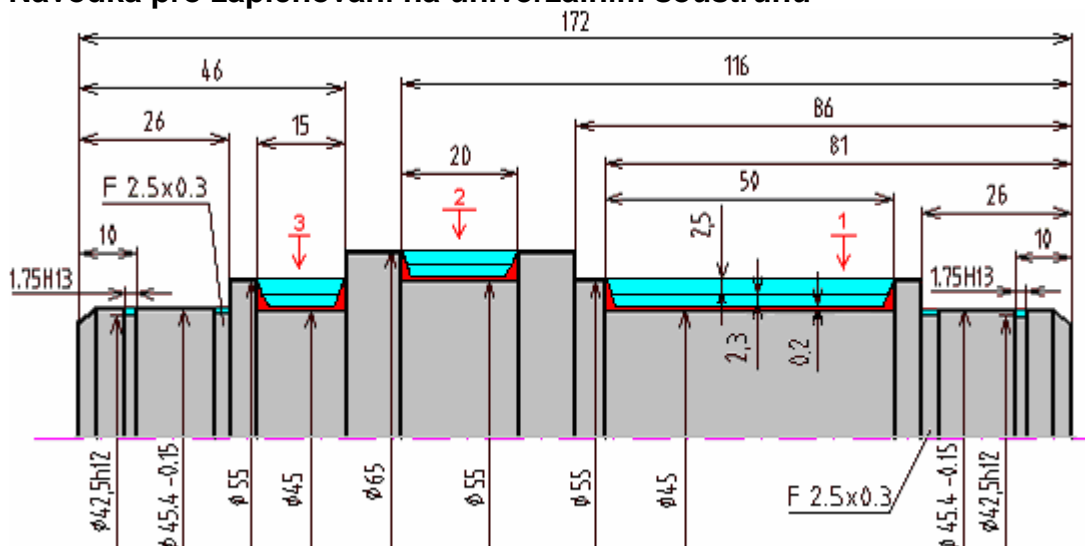
$$v = \frac{s}{t} \Rightarrow t = \frac{s}{v} \quad (4.6)$$

kde: v.....Rychlost rychloposuvu (m.min⁻¹),
s.....Dráha rychloposuvu (m),
t.....Čas (min).

Do výpočtu vedlejšího strojního času byla zahrnuta i výměna nástrojů. Čas výměny nástroje technické údaje stroje neobsahují a proto byla použita teoretická hodnota 3 sekundy. Nástroj se v průběhu zapichování vymění pětkrát. Celková dráha rychloposuvů v obr. 4. 7 vyšla 1,798 m.

$$t_{AV} = \frac{1.798}{15} + \frac{3 \cdot 5}{60} = 0,37 \text{ min}$$

Návodka pro zapichování na univerzálním soustruhu



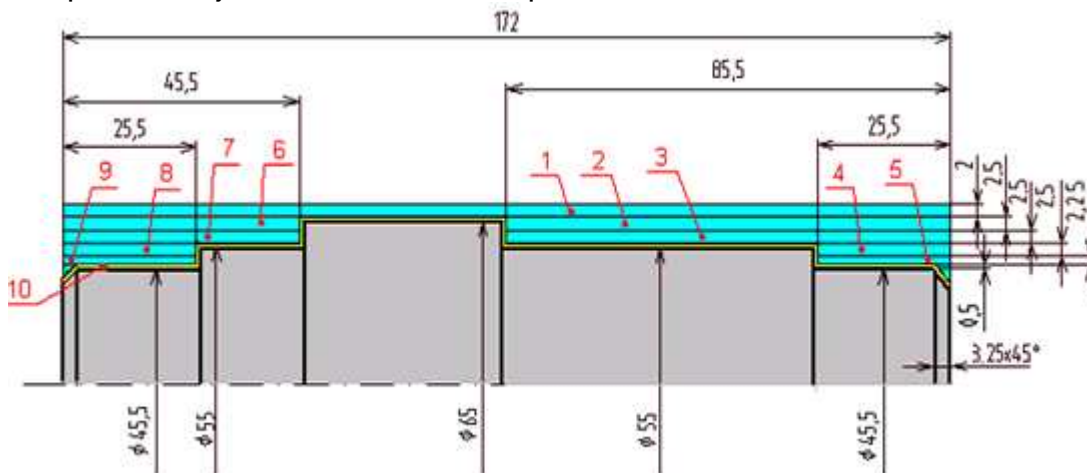
Obr. 4. 8 Obrábění zápichů na univerzálním stroji [13].

Tab. 4. 2 Teoretické režimy pro obrábění zápichů [13].

	Operace	v_c [m.min ⁻¹]	n [min ⁻¹]	D [mm]	f [mm]	l [mm]	i	t_{AS} [min]
1	Hrubování 1	235	1360	55	0,4	50	2	0,18
2	Hrubování 2	235	1150	65	0,4	20	2	0,08
3	Hrubování 3	235	1360	55	0,4	15	2	0,05
4	Dokončování 1	120	694	55	0,2	60	1	0,43
5	Dokončování 2	120	587	65	0,2	30	1	0,25
6	Dokončování 3	120	694	55	0,2	20	1	0,15
7	Zapichování F 2,5x0.3	375	2629	45.4	0,2	2,5	2	0,01
8	Zapichování 1.75	120	841	45.4	0,1	1,45	2	0,03

t_{AS} -Strojní čas pro zapichování na univerzálním soustruhu je 1.18 min.

Pro představu je uvedena i návodka pro hrubování a dokončování hřídele.



Obr. 4. 9 Obrábění zápichů na univerzálním stroji [13].

Tab. 4. 3 Teoretické režimy pro hrubování a dokončování hřídele [13].

	operace	v_c [m.min ⁻¹]	n [min ⁻¹]	D [mm]	f [mm]	l [mm]	t_{AS} [min]
1	Hrubování	235	1068	70	0,4	172	0,4
2	Hrubování	235	1133	66	0,4	85,5	0,19
3	Hrubování	235	1226	61	0,4	85,5	0,17
4	Hrubování	235	1335	56	0,4	25,5	0,05
5	Hrubování	235	1467	51	0,4	25,5	0,04
6	Hrubování	235	1133	66	0,4	45,5	0,1
7	Hrubování	235	1226	61	0,4	45,5	0,09
8	Hrubování	235	1335	56	0,4	25,5	0,05
9	Hrubování	235	1467	51	0,4	25,5	0,04
10	Dokončování	375	2567	46,5	0,2	192	0,37

Zhodnocení obou variant

Při teoretickém srovnání strojních časů u obou variant se zjistilo, že se příliš neliší. Největší rozdíl nastane při srovnání vedlejších strojních časů, které budou u CNC soustruhu mnohem menší díky naprogramování celé posloupnosti výrobního postupu na PC narozdíl od univerzálního soustruhu, kde musí člověk, který tento stroj obsluhuje velice složitě najíždět pomocí ručního kolečka.

V tomto případě bude lepší použít výrobu na CNC soustruhu, ale jen pro velké zakázky, kde se jejich použití vyplatí na rozdíl od univerzálních soustruhů, které se hodí spíše pro kusovou výrobu nebo pro použití v opravárenství.

ZÁVĚR

V předložené práci byl proveden teoretický rozbor procesů obrábění se zaměřením na energetické aspekty. V práci jsou dále rozebrány tři způsoby obrábění (soustružení, frézování, vrtání) z hlediska působících sil, které ovlivňují energetiku procesu.

V experimentální části byla práce zaměřena na hodnocení struktury povrchů a spotřeb energie při sledovaném experimentu provedeném na soustružené válcové součásti. V průběhu experimentu se měnily parametry řezného procesu, což mělo za následek různé stavy povrchů. Při porovnání naměřených hodnot R_a a R_z po soustružení, s hodnotami vypočtenými R_{at} a R_{zt} je zřejmé, že teoretické hodnoty R_{at} jsou vyšší než hodnoty R_a naměřené. Teoretické hodnoty R_{zt} jsou nižší než hodnoty R_z naměřené. Porovnání zjištěných hodnot je zobrazeno na obr. 3.10 a na obr. 3.11. Při teoretickém rozboru působících sil pro uvedenou součást bylo zjištěno, že při zvyšující se hodnotě posuvu na otáčku se zvyšuje řezná síla i její jednotlivé složky. Tyto závislosti byly zobrazeny na obr. 3.12 a také na obr. 3.13.

Dále bylo v práci zahrnuto srovnání výroby stejné součásti pomocí různých typů obrábění. V prvním příkladě je teoretický rozbor rovinného obrábění hranolu pomocí hoblování a čelního frézování, kde se jako hospodárnější řešení ukázalo čelní frézování. Ve druhém příkladě je proveden rozbor výroby hřídele. Srovnání je zaměřeno hlavně na výrobu zápichů. Výrobní postupy hřídele jsou provedeny pro CNC soustruh a pro univerzální soustruh. Hospodárnější je použití výroby na CNC soustruhu, ale jen pro veliké zakázky, kde se jejich použití vyplatí na rozdíl od univerzálních soustruhů, které se hodí spíše pro kusovou výrobu nebo pro použití v opravárenství.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PÍŠKA, M. a kolektiv. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. 1.vyd. 246s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. FOREJT, Milan, PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. 225s. ISBN 80-214-2374-9....
3. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Překl. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
4. KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1. Vyd. BRNO: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
5. HUMÁR, A. *Technologie I*. [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia v oboru "Strojírenská technologie" VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, 138 s. URL: <<http://www.ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory>>.
6. BRYCHTA, J. a kolektiv. *Nové směry v progresivním obrábění*. [online]. [cit. 2012-04-17]. URL: <<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>>.
7. BUMBÁLEK, B. – *Fyzikální podstata řezání* – Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, FSI [online], 2005, dostupné z www: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/Opora05_Fyzikalni_podstata_rezani.pdf
8. FOREJT, M. – Morfologie vad a opotřebení povlakovaných řezných nástrojů (Diplomová práce), VUT v Brně, FSI, 2008
9. ŘASA, J. GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 – 1*. Díl. 1. vyd. PRAHA: Pedagogické nakladatelství Scientia, spol. s.r.o., 2000. ISBN 80-7183-207-3.
10. BUKÁČEK, Z. *Technologie obrábění tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 73 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Prokop, Csc.
11. MÁDL, J. a BARCAL, J. *Základy technologie II*. 1. vyd. Praha: nakladatelství ČVUT, 2005. 55s

12. UHLÍŘ, J. Návrh dvouosé automatické univerzální frézovací hlavy osazené elektrovřetenem s aplikací pohonů Harmonic-Drive. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010, 96 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Holub.
13. SZLAUR, Vít. Návrh technologie výroby hřídele s využitím zapichovacích cyklů CNC soustruhu: Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. s 39., příloh 9. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A_{Di}	[mm ²]	jmenovitý průřez třísky
a_f	[mm]	šířka záběru ostří ve směru posuvu
a_p	[mm]	šířka záběru ostří
b_D, b_D	[mm]	jmenovitá šířka třísky
C_{Fc}, C_{Ff}, C_{Fp}	[-]	materiálové konstanty
D	[mm]	průměr nástroje
E_α	[J]	práce třecí
E_d	[J]	disperzní práce
E_γ	[J]	práce třecí
E_e	[J]	práce řezání
E_{el}	[J]	práce elastických deformací
E_{pl}	[J]	práce plastických deformací
F	[N]	Síla
f	[mm]	posuv na otáčku
F_c	[N]	horizontální složka řezné síly
F_f	[N]	posuvová síla
f_n	[mm]	posuv na otáčku
F_p	[N]	vertikální složka řezné síly
F_{ST}, F_{SN}	[N]	složky v rovině max. smykových napětí
F_T, F_N	[N]	složky síly na čele nástroje
f_z	[mm]	posuv na zub
h_D, h_{DC}	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky
HSC	[-]	vysokorychlostní obrábění
k_{Ci}	[N.mm ⁻²]	měrná řezná síla
n	[min ⁻¹]	otáčky nástroje
P_c	[kW]	výkon obrábění
Q_n	[J]	teplo odvedené nástrojem
Q_e	[J]	teplo řezného procesu
Q_o	[J]	teplo odvedené obrobkem
Q_{Pd}	[J]	teplo primární plastické deformace
Q_{pr}	[J]	teplo odvedené řezným procesem
Q_t	[J]	teplo odvedené třískou
R	[N]	odpor
R_a	[μm]	průměrná aritmetická úchylka profilu
R_z	[μm]	maximální výška profilu
t_{AS}	[min]	strojní čas
t_{AV}	[min]	vedlejší strojní čas
t_{def}	[s]	čas deformace
V_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
V_{ch}	[m.min ⁻¹]	rychlost odcházející třísky

V_f	$[\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$	posuvová rychlost
V_{sh}	$[\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$	rychlost v rovině maximálních smykových napětí
X_{Fc}, X_{Ff}, X_{Fp}	$[-]$	exponenty vlivu šířky záběru
y_{Ff}, y_{Fc}, y_{Fp}	$[-]$	exponenty vlivu posuvu
Φ	$[\text{°}]$	úhel stříhu

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Výstup hodnot z drsnoměru Taylor Hobson
Příloha 2 Výstup hodnot z drsnoměru Taylor Hobson
Příloha 3 Výstup hodnot z drsnoměru Taylor Hobson
Příloha 4 Výkres součásti hřídel (pro 4. kapitolu)

