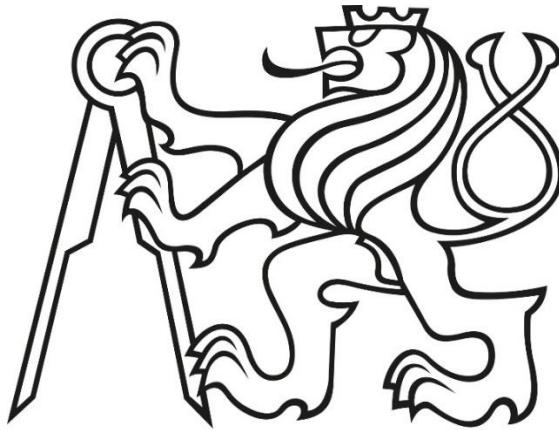


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STROJNÍ**  
**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE**



**Diplomová práce**

**Optimalizace řezných podmínek frézování pilových pásů  
ve společnosti PILANA Metal s.r.o.**

**Optimisation of cutting conditions in milling of band saw blades  
in PILANA Metal ltd.**

Studijní program: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Jan Mádl, CSc.

Jiří Michal

Praha 2015

Vysoká škola: ČVUT v Praze  
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Fakulta: strojní  
Akademický rok: 2014/2015

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro **Bc. Jiřího Michala**

obor **Výrobní a materiálové inženýrství**

Název: **Optimalizace řezných podmínek frézování pilových pásů v Pilana Metal s.r.o.**

Název anglicky: **Optimisation of cutting conditions in milling of saw belts in Pilana Metal Ltd.**

## Zásady pro vypracování:

1. Rozbor současného stavu výroby pilových pásů.
2. Optimalizace řezných podmínek frézování pilových pásů z hlediska minimálních výrobních nákladů.
3. Ekonomické zhodnocení.



Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Jan Mádl, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 10. 4. 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 19. 6. 2015

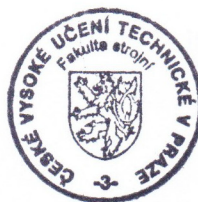
Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

*Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.*

Zadání diplomové práce převzal dne: 14. 4. 2015

Diplomant

Vedoucí ústavu



Děkan

V Praze

dne 27. 3. 2015

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Optimalizace frézování pilových pásů“ vypracoval samostatně pod vedením pana prof. Ing. Jana Mádla, CSc., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze, 16.6.2015

Podpis:

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu prof. Ing. Janu Mádlovi, CSc., za odborné vedení a čas, který mi věnoval během přípravy této práce.

Rovněž bych chtěl poděkovat rodičům a celé své rodině za podporu po dobu mého studia.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá rozbohem konkrétních podmínek výroby bimetalových pilových pásů s cílem navrhnout podmínky optimální. Řeší otázku zubení pásů frézováním se zaměřením na snížení výrobních nákladů. Zvláštní pozornost byla věnována optimální trvanlivosti nástroje a volbě řezných podmínek. Na základě analýzy stávajících nákladů ve firmě PILANA Metal je zhodnocen ekonomický vliv organizačních opatření při řízení, na rentabilitu výroby. V rámci této práce byl hodnocen vliv parametrů velikosti zubu, velikosti výrobní dávky a počtu nástrojů na výrobní náklady operace frézování.

## **Klíčová slova**

Optimalizace, frézování, pilové pásy, kritérium minimálních výrobních nákladů, trvanlivost břitu nástroje, náklady

## **Abstract**

This diploma thesis analyses the production parameters in bi-metal band saw blades manufacturing. The purpose is to find the optimum conditions. The diploma thesis deals with the process of teeth milling, focusing on reducing production costs. Special attention was given to tool life expectancy and choice of cutting conditions. The evaluation of economic impact of changes in production management on profitability was based on analysis of current costs in PILANA Metal. The impact of parameters on the production costs of milling was evaluated, such as size of the tooth, production batch size and number of tools.

## **Keywords**

Optimization, milling, band saw blades, minimum costs criterion, tool life expectancy, costs,

---

**Obsah**

Obsah.....	6
Seznam použitých symbolů.....	8
Seznam tabulek.....	12
Seznam obrázků .....	15
1 Úvod .....	16
1.1 Optimalizace .....	17
1.2 Představení společnosti .....	18
2 Výrobek .....	19
2.1 Základní charakteristiky:.....	19
2.1.1 Geometrie profilu zubu.....	19
2.1.2 Rozteč zubů – počet zubů na palec délky.....	20
2.1.3 Rozvod zubů.....	20
3 Výroba .....	21
3.1 Materiál .....	21
3.2 Stroj - Frézka.....	22
3.3 Řezné nástroje .....	25
3.4 Výrobní postup pilových pásů .....	25
3.5 Výrobní náklady.....	26
4 Návrh pracovních podmínek .....	27
4.1 Kritérium minimálních výrobních nákladů.....	28
4.2 Kritérium maximální produktivity .....	30
4.3 Vícekriteriální optimalizace .....	31
4.4 Volba optimalizačního kritéria.....	31
4.5 Omezující podmínky .....	32
4.5.1 Omezení výkonem obráběcího stroje .....	32
4.5.2 Omezení výkonu krouticím momentem .....	33
4.5.3 Omezení dané vhodným utvářením třísek.....	33
4.5.4 Omezení dané maximálními a minimálními otáčkami dle stroje .....	34
4.5.5 Omezení dané maximálními a minimálními posuvy dle stroje .....	34

---

4.5.6	Omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy .....	34
4.5.7	Omezení dané kmitáním.....	35
4.5.8	Omezení dané komplexním Taylorovým vztahem.....	35
4.6	Výpočet pracovních podmínek .....	36
4.7	Výpočet strojního času .....	37
4.8	Výrobní náklady na operační úsek .....	39
4.8.1	Náklady na strojní práci.....	39
4.9	Optimální trvanlivost břitu z hlediska minimálních výrobních nákladů.	42
4.10	Určení optimální řezné rychlosti.....	42
5	Optimalizace dané operace.....	42
5.1	Definice variant výpočtu .....	42
5.2	Určení režijních nákladů .....	43
5.3	Definice konstant .....	44
5.3.1	Vstupní veličiny – stroj .....	45
5.3.2	Vstupní veličiny – podnikové.....	46
5.4	Definice optimalizovaných produktů.....	47
5.4.1	Fréza 3/4 .....	47
5.4.2	Fréza 4/6 .....	51
5.5	Výpočet řezných podmínek – varianta A.....	53
5.6	Výpočet řezných podmínek – varianta B .....	58
5.7	Výpočet řezných podmínek – varianta C .....	68
6	Ekonomické zhodnocení .....	78
6.1	Varianta A .....	78
6.2	Varianta B .....	80
6.3	Varianta C .....	81
6.4	Přehled úspor.....	82
7	Závěr.....	84
8	Bibliografie.....	85

---



## Seznam použitých symbolů

A	obráběná plocha [mm <sup>2</sup> ]
a <sub>p</sub>	hloubka řezu [mm]
B	šířka obráběné plochy [mm]
b	šířka frézy v záběru [mm]
b <sub>p</sub>	tloušťka pásu [mm]
c <sub>E</sub>	cena elektrické energie [Kč/kWh]
CFS <sub>EFPL</sub>	časový fond stroje [hod/rok · směna]
C <sub>s</sub>	cena stroje [Kč]
C <sub>n</sub>	cena nástroje [Kč]
c <sub>v</sub>	konstanta komplexního Taylorova vztahu
C <sub>zn</sub>	zbytková cena nástroje [Kč]
d <sub>max</sub>	maximální přípustná velikost deformace [mm]
D	průměr nástroje [mm]
f	posuv na otáčku [mm/ot]
F <sub>c</sub>	řezná síla [N]
F <sub>cmax</sub>	maximální přípustná řezná síla [N]
f <sub>m</sub>	minutový posuv [mm/min]
f <sub>Ramax</sub>	maximální posuv, při kterém je splněno kritérium drsnosti obrobené plochy [mm/ot]
f <sub>smax</sub>	maximální posuv dosažitelný na stroji [mm/ot]
f <sub>smin</sub>	minimální posuv dosažitelný na stroji [mm/ot]
f <sub>z</sub>	posuv na zub [mm/zub]
HP <sub>p</sub>	hodinové náklady na strojní práci [Kč/hod]
HRP	hodinový režijní paušál [Kč/hod]
HRP <sub>os</sub>	hodinový režijní paušál ostřírny [Kč/hod]
HRP <sub>SP</sub>	hodinový režijní paušál společných nákladů [Kč/hod]
i	počet úběrů
KAP	kapacita uvažovaného provozu za daný časový úsek [hod, Nh]
k <sub>C</sub>	přirážka směnového času
k <sub>Fc</sub>	empirická konstanta výpočtu řezné síly
k <sub>r</sub>	poměr skutečného času obrábění a strojního času

$k_{vs}$	koeficient časového využití stroje
$k_{us}$	koeficient oprav a údržby stroje
$L$	délka dráhy automatického chodu nástroje [mm]
$L_n$	délka najetí [mm]
$L_p$	délka pásu navinutého v cívce [m]
$L_u$	šířka pásů ve svěráku [mm]
$m$	konstanta řezného materiálu
$M_{kmax}$	maximálně přípustný krouticí moment [Nm]
$M_o$	mzda operátora včetně sociálního a zdravotního pojištění [Kč/hod]
$M_{ovs}$	mzda operátora včetně sociálního a zdravotního pojištění, více strojová obsluha [Kč/hod]
$M_{os}$	mzda ostříče včetně sociálního a zdravotního pojištění [Kč/hod]
$M_s$	mzda seřizovače včetně sociálního a zdravotního pojištění [Kč/hod]
$M_v$	celkové mzdy výrobních pracovníků za dané časové období [Kč]
$n$	otáčky nástroje [min <sup>-1</sup> ]
$n_p$	počet upnutých pásů ve svěráku
$N$	celkové výrobní náklady na operační úsek [Kč]
$N_{hs}$	hodinové náklady na provoz stroje [Kč]
$N_m$	náklady na metr pásu [Kč/m]
$N_n$	náklady na nástroje vztažené na operační úsek [Kč]
$N_{nT}$	náklady na nástroje vztažené na jednu trvanlivost bříty [Kč]
$n_p$	počet pásů
$N_{POS}$	paušální náklady na přestavení [Kč]
$N_{sm}$	minutové náklady na strojní práci [Kč/min]
$n_{smax}$	maximální otáčky dostižitelné na stroji [ot/min]
$n_{smin}$	minimální otáčky dostižitelné na stroji [ot/min]
$N_{vn}$	náklady na výměnu nástroje [Kč]

$N_{\text{vnm}}$	minutové náklady na výměnu nástroje [Kč]
$O_s$	odpis stroje [Kč/hod]
$P_c$	řezný výkon [W]
$P_e$	výkon elektromotoru stroje [W]
$q_v$	konstanta komplexního Taylorova vztahu
$R_a$	aritmetická úchylka obrobené plochy [ $\mu\text{m}$ ]
$R_{a_{\text{max}}}$	maximálně přípustná aritmetická úchylka obrobené plochy [ $\mu\text{m}$ ]
$r_e$	poloměr špičky nástroje [mm]
$RN$	režijní náklady provozu za dané časové období [Kč]
$SM$	směnnost
$t_{As}$	strojný čas pro daný operační úsek [min]
$T_N$	trvanlivost nástroje pro stávající řezné podmínky [min]
$T_{\text{opt}N}$	opt. trvanlivost nástroje dle kritéria minimálních výrobních nákladů [min]
$t_{os}$	čas ostření nástroje [min]
$t_u$	čas operačního úseku [min]
$t_{pu}$	čas přeupínání pásů [s]
$t_{vn}$	čas výměny nástroje [min]
$u_{Fc}$	empirická konstanta výpočtu řezné síly
$u_v$	konstanta komplexního Taylorova vztahu
$v_c$	řezná rychlost [m/min]
$v_{\text{copt}N}$	řezná rychlost pro optimální trvanlivost bříty dle kritéria minimálních výrobních nákladů [m/min]
$VR$	kritériální funkce vícekritériální optimalizace
$w_{Fc}$	empirická konstanta výpočtu řezné síly
$w_v$	konstanta komplexního Taylorova vztahu
$x_{Fc}$	empirická konstanta výpočtu řezné síly

$x_v$	konstanta komplexního Taylorova vztahu
$y_{Fc}$	empirická konstanta výpočtu řezné síly
$y_v$	konstanta komplexního Taylorova vztahu
$z$	počet zubů nástroje
$z_o$	počet možných přestřehů nástroje
$Z_s$	životnost stroje [roky]
$z_v$	počet výměn nástroje vztažené na jeden operační úsek

---

## Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení vrstvy z rychlořezné oceli.....	22
Tab. 2 Chemické složení těla z pružinové oceli.....	22
Tab. 3 Technická specifikace frézky FS 1500 (6).....	24
Tab. 4 Výrobní postup.....	26
Tab. 5 Hodinový režijní paušál .....	44
Tab. 6 Vstupní konstanty.....	44
Tab. 7 Koeficient využití stroje.....	45
Tab. 8 Vstupní veličiny - stroj.....	45
Tab. 9 Vstupní veličiny – podnikové .....	46
Tab. 10 Vstupní veličiny – fréza 3/4 .....	47
Tab. 11 Současné řezné podmínky – fréza 3/4.....	49
Tab. 12 Vstupní veličiny - fréza 3/4.....	49
Tab. 13 Posuvy v jednotlivých úsecích .....	50
Tab. 14 Vstupní veličiny – fréza 4/6 .....	51
Tab. 15 Současné řezné podmínky – fréza 4/6.....	52
Tab. 16 Vstupní veličiny – fréza 4/6 .....	52
Tab. 17 Posuvy v jednotlivých úsecích .....	53
Tab. 18 Souhrn výsledků – Varianta A .....	57
Tab. 19 Náklady na strojní práci .....	58
Tab. 20 Počet výměn nástroje .....	59
Tab. 21 Náklady na výměnu nástroje.....	59
Tab. 22 Náklady na nástroje vztažené na jednu trvanlivost bříty .....	60
Tab. 23 Náklady na nástroje.....	60
Tab. 24 Výrobní náklady.....	61
Tab. 25 Náklady na metr pásu.....	61

---

Tab. 26 Optimální trvanlivost břítu.....	62
Tab. 27 Optimální řezná rychlost.....	62
Tab. 28 Otáčky nástroje.....	63
Tab. 29 Posuv.....	63
Tab. 30 Strojní čas.....	64
Tab. 31 Náklady na strojní práci.....	64
Tab. 32 Počet výměn nástroje.....	65
Tab. 33 Náklady na výměnu nástroje.....	65
Tab. 34 Náklady na nástroje.....	66
Tab. 35 Výrobní náklady.....	66
Tab. 36 Náklady na metr pásu.....	66
Tab. 37 Souhrn výsledků – Varianta B.....	67
Tab. 38 Trvanlivost nástroje.....	68
Tab. 39 Délka dráhy automatického chodu stroje.....	69
Tab. 40 Strojní čas.....	69
Tab. 41 Náklady na strojní práci.....	70
Tab. 42 Náklady na výměnu nástroje.....	70
Tab. 43 Celkové výrobní náklady v závislosti na počtu pásů.....	71
Tab. 44 Náklady na metr pásu.....	71
Tab. 45 Trvanlivost břítu (opt. řezné podmínky).....	72
Tab. 46 Řezná rychlost (opt. řezné podmínky).....	72
Tab. 47 Otáčky nástroje (opt. řezné podmínky).....	73
Tab. 48 Posuv (opt. řezné podmínky).....	73
Tab. 49 Strojní čas (opt. řezné podmínky).....	74
Tab. 50 Náklady na strojní práci (opt. řezné podmínky).....	74
Tab. 51 Počet výměn nástroje (opt. řezné podmínky).....	75

Tab. 52 Náklady na výměnu nástroje (opt. řezné podmínky) .....	75
Tab. 53 Náklady na nástroje (opt. řezné podmínky) .....	76
Tab. 54 Výrobní náklady (opt. řezné podmínky) .....	76
Tab. 55 Náklady na metr pásu (opt. řezné podmínky) .....	77
Tab. 56 Souhrn výsledků – Varianta C (20 pásů) .....	77
Tab. 57 Porovnání výsledků – Varianta A .....	78
Tab. 58 Porovnání výsledků – Varianta B .....	80
Tab. 59 Souhrn výsledků – Varianta C .....	81
Tab. 60 Úspory .....	83

## Seznam obrázků

Obr. 1 Logo PILANA (4) .....	18
Obr. 2 Geometrie profilu zubu (5).....	19
Obr. 3 Konstantní rozteč (5).....	20
Obr. 4 Variabilní rozteč (5) .....	20
Obr. 5 Skupinový rozvod (5).....	21
Obr. 6 Schéma bimetalové pásky (5) .....	21
Obr. 7 Kesel FS 1500 (6).....	22
Obr. 8 Pracovní osy stroje (7) .....	23
Obr. 9 Upínací systém (7) .....	24
Obr. 10 Válcová fréza (8).....	25
Obr. 11 Graf – skladba nákladů.....	27
Obr. 12 Schéma výpočtu délky dráhy (7).....	38
Obr. 13 Fréza $\frac{3}{4}$ (10) .....	48
Obr. 14 Fréza $\frac{4}{6}$ (10) .....	51
Obr. 15 Graf - struktura nákladů .....	78
Obr. 16 Graf - porovnání agregovaných nákladů – Varianta A .....	79
Obr. 17 Graf – porovnání výsledků – Varianta B .....	80
Obr. 18 Graf – porovnání výsledků – Varianta C .....	81



## 1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá rozbořem současného stavu výroby pilových pásů ve firmě PILANA Metal s.r.o. Na základě zjištěných údajů z oblasti nákladů, trvanlivosti nástrojů a současných řezných podmínek se stanovují nové řezné podmínky. Při výpočtu se vychází z kritéria minimálních výrobních nákladů.

V případě frézování pilových pásů představuje cena nástroje významnou nákladovou položku. Proto ze strany podniku vzešla iniciativa ke snížení výrobních nákladů cestou optimalizace řezných podmínek. Cílem je snížení výrobních nákladů na výrobu ozubení pilového pásu. V současné době probíhá frézování v třísměnném provozu, proto i úspora v řádu jednotek procent se významnou měrou promítne do celkového hospodaření firmy.

Nyní se řezné podmínky stanovují na základě předchozích zkušeností, a to zejména s ohledem na výslednou kvalitu povrchu výrobku. Pro nové nástroje, zejména pak nástroje s pájenými břitovými destičkami ze slinutého karbidu, je tento postup nedostatečný a je třeba přístup změnit, aby bylo dosaženo efektivnějšího využití nástrojů.

## 1.1 Optimalizace

Hledání optimálních řezných podmínek (především řezné rychlosti v závislosti na hloubce řezu a posuvu) se provádí společně s optimalizací trvanlivosti řezných nástrojů. Základem optimalizačního procesu je určení požadovaných kritérií společně s příslušnými omezujícími podmínkami. Tato omezení jsou dána předepsanými tolerancemi, vlastnostmi obráběného materiálu, nástrojem a parametry stroje. (1)

Taylor (1907) dokázal, že existuje optimum řezných podmínek. Ponechání volby řezných podmínek na operátorech obráběcích strojů nevede k hospodárnému využívání výrobních kapacit a zdrojů. Pro dosažení nejlepších výsledků je třeba během technologické přípravy výroby stanovit optimální hodnoty řezných podmínek. (2)

V segmentu výroby pilových pásů panuje velká konkurence. V dnešním tržním prostředí je velmi důležité zaměřit se na efektivitu výroby, aby podnik obstál v celosvětové konkurenci firem. Tlak na výkonnost výroby zvyšuje i vysoká cena výrobních zařízení. Nalezení optimální kombinace řezných parametrů tak může ovlivnit konečnou konkurenceschopnost výrobku.

## 1.2 Představení společnosti



*Obr. 1 Logo PILANA (3)*

Společnost PILANA Metal s.r.o. sídlí v průmyslovém areálu v Hulíně. Historie výroby nástrojů v Hulíně sahá až do roku 1934. V počátcích se zde vyráběly ruční a kotoučové pily. Výrobní sortiment se postupně rozšiřoval. Po znárodnění se podnik začlenil do skupiny NAREX.

Po upuštění od centrálně plánovaného hospodářství se podnik NAREX rozdělil a vznikly společnosti dle sortimentního zaměření – PILANA Metal, PILANA Wood, PILANA Saw Bodies a PILANA Knives.

V současnosti se firma PILANA Metal soustředí na výrobu, prodej a servis řezných nástrojů na kov. Je největším výrobcem pilových listů a pásů na kov v České republice. Na trzích střední a východní Evropy je významným hráčem ve výrobě ručních pilových listů. V celosvětovém měřítku však objemem produkce nemůže soupeřit se zavedenými značkami, které na světovém trhu působí desítky let.

Základní výrobní sortiment:

- Ruční pilové listy na kov
- Strojní pilové listy na kov
- Bimetalové pilové pásy na kov a dřevo

Vizí do budoucna je proniknutí na západní trhy v perspektivním segmentu pilových pásů. Tato strategie je podpořena velkými investicemi do nákupu nových výrobních technologií, které jsou na nejvyšší světové úrovni.

## 2 Výrobek

Pilové pásy slouží k efektivnímu a přesnému dělení kovových i nekovových materiálů. V porovnání s ostatními technologiemi nabízí velmi dobrý poměr cena/výkon. Vyznačují se nízkým prořezem (malý objem odpadního materiálu) a dobrou energetickou účinností.

Pásy jsou vyráběny v široké škále variant a díky tomu umožňují dělení velkého rozsahu rozměrů i materiálů. Uplatnění naleznou v hromadných, sériových i kusových výroбах nebo řemeslných dílnách.

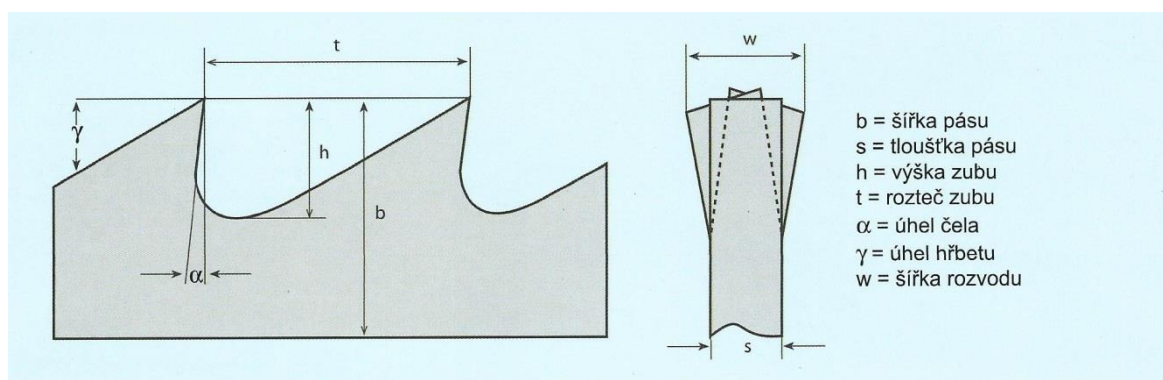
### 2.1 Základní charakteristiky:

K popisu vlastností pilových pásů slouží základní charakteristiky:

- Geometrie profilu zubu
- Rozteč zubů
- Rozvod zubů

#### 2.1.1 Geometrie profilu zubu

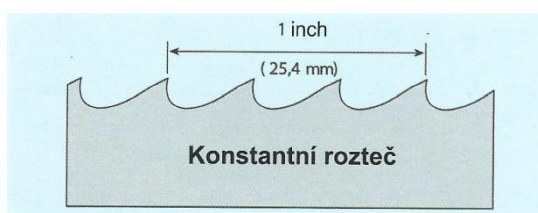
Tvar profilu zubu a jeho geometrie je základním rysem pilového pásu. Na základě zkušeností a vývoje dochází k neustálé inovaci tvaru zubů, s cílem zvýšení řezného výkonu, dělení nových druhů materiálů či ke zlepšení dalších sledovaných aspektů.



Obr. 2 Geometrie profilu zubu (4)

## 2.1.2 Rozteč zubů – počet zubů na palec délky

Volba rozteče zubů, někdy také označovaná jako TPI – teeth per inch, je závislá na charakteristice obrobku. Pro řezání velkých průměrů se používají pilové pásy s hrubou roztečí. Pro obrobky s malým průměrem a profily je nutné použít pás se zuby s malou roztečí, aby byly vždy v záběru alespoň 2 zuby současně. S klesajícím počtem zubů v záběru, roste řezný výkon. To je dáno rozložením tlaku na menší počet zubů, čímž se zvyšuje schopnost jednotlivých zubů vniknout do materiálu. Měkké materiály jako např. hliník nebo bronz, potřebují zvětšený prostor pro vynášení třísek, jinak by docházelo k jejich hromadění, což by se negativně projevilo na kvalitě obrobenej plochy.



Obr. 3 Konstantní rozteč (4)

K dosažení větší univerzálnosti použití pásu se využívá variabilní ozubení, tzn., že ve skupině zpravidla sedmi zubů se TPI mění. Variabilní ozubení se uplatní především v provozech, kde se často střídá dělení obrobků z profilů s dělením plného materiálu. Současně variabilní ozubení potlačuje vznik vibrací vznikajících při dělení.



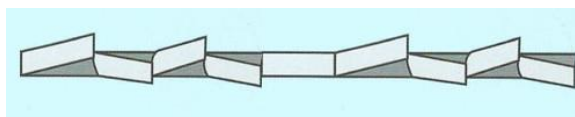
Obr. 4 Variabilní rozteč (4)

## 2.1.3 Rozvod zubů

Rozvod zubů, neboli vychýlení zubů do stran, je nezbytný pro to, aby proříznutá drážka v obrobku byla širší než samotné tělo pásu. Bez něj by docházelo k nadměrnému tření, růstu spotřeby energie a zvyšování teploty řezání. Přesnost rozvodu je kritická pro užitnou hodnotu pásu – zásadně ovlivňuje kvalitu řezu a celkovou životnost pásu. Při

výrobě je přesnost rozvodu 100% kontrolována. V moderních výroбах se ke kontrole používá bezkontaktní měření pomocí CCD kamer.

Existuje mnoho druhů rozvodů jak pro konstantní tak variabilní rozteče. Nejčastěji používaný je skupinový rozvod, který obsahuje jeden shrnovací (nerozvedený) zub, a následně se střídá vychýlení zubu doleva a doprava.



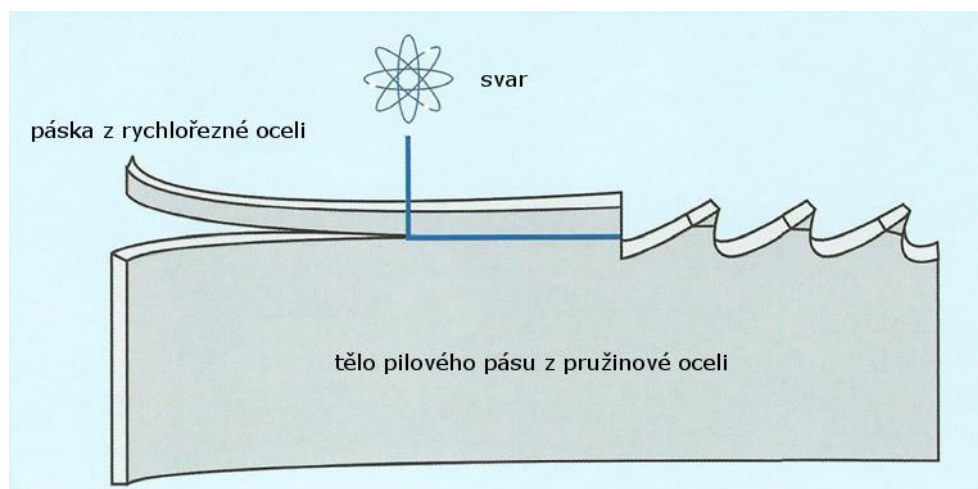
Obr. 5 Skupinový rozvod (4)

### 3 Výroba

Pilové pásy se vyrábějí z pásové oceli dodávané v předepsaných rozměrech. Celý výrobní postup se skládá ze šesti operací: frézování, rozvod zubů, tepelné zpracování, rovnání, povrchová úprava a svařování.

#### 3.1 Materiál

Vzhledem k dobrému poměru cena/výkon se pro výrobu pilových pásů na kov nejčastěji používá bimetalová páska. Ta je tvořena tělem z pružinové oceli, na kterou je navařen drát z rychlořezné oceli (RO). Při výrobě dojde k profrézování rychlořezné vrstvy a tak jen špičky zubů jsou z RO. Po zakalení jsou řezné hrany zubů tvrdé a odolné vůči opotřebení, naopak tělo zůstane pružné a ohebné, a tak je schopné odolávat cyklickému namáhání v průběhu řezání.



Obr. 6 Schéma bimetalové pásky (4)

Speciální variantou je bimetalový pás s vrstvou RO vyrobenou práškovou metalurgií (HSS – PM). Lisováním a spékáním vzniká homogenní struktura s dobrými řeznými vlastnostmi. Tepelné zpracování tohoto materiálu ale vyžaduje vyšší teploty v porovnání s běžnou HSS.

*Tab. 1 Chemické složení vrstvy z rychlořezné oceli*

Böhler S500 (DIN HS2-9-1-8; AISI M42)							
C	Cr	Si	Mn	Mo	V	W	Co
1,09	3,9	0,5	0,2	9,4	1,2	1,5	8,0

*Tab. 2 Chemické složení těla z pružinové oceli*

Böhler B313 (DIN 32CrMoV12)				
C	Cr	Mo	V	Ni
0,34	2,7	1,1	0,28	0,6

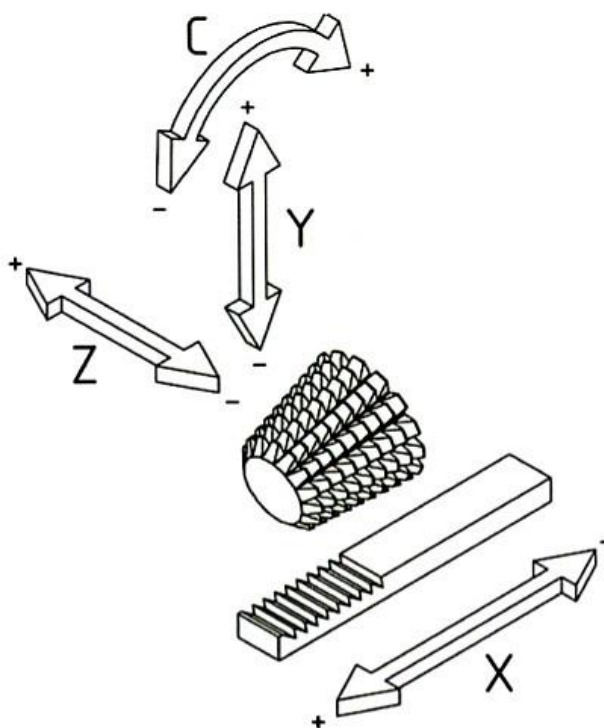
### 3.2 Stroj - Frézka



*Obr. 7 Kesel FS 1500 (5)*

Pro frézování pilových pásů používá firma PILANA Metal automatické frézky německé firmy Georg Kesel GmbH. Tato firma je předním světovým výrobcem speciálních jednoúčelových strojů pro výrobu ozubení. V jejím portfoliu nalezneme frézky, rozváděčky, rovnačky a další příslušenství určené pro produkci pilových pásů.

Frézka FS 1500 je vysokoproduktivní obráběcí stroj založený na dlouholetých zkušenostech v oblasti výroby ozubení. Řídicím systémem je Siemens SINUMERIK 802D sl. Toto CNC řízení umožňuje libovolně řídit až 4 osy a hlavní vřeteno. K přenášení dat slouží rozhraní LAN. Obráběcí stroj je vybaven servopohony Siemens.



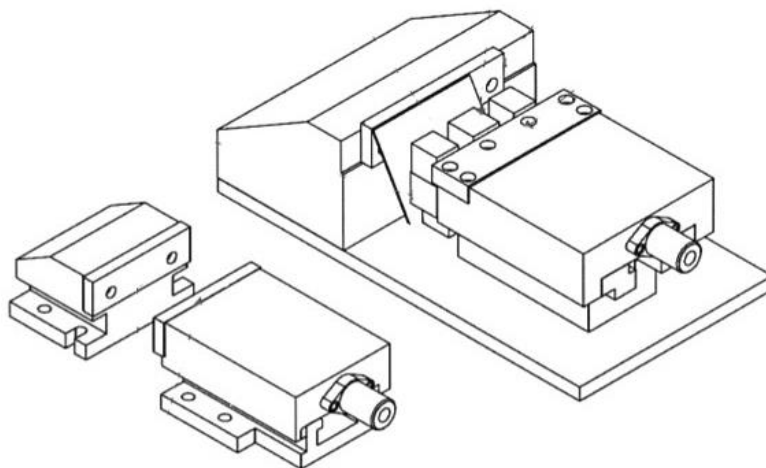
Obr. 8 Pracovní osy stroje (6)

Pracovní kabina je kompletně uzavřená, díky tomu může docházet k intenzivnímu chlazení a mazání řeznou kapalinou, aniž by procesní látky unikaly do okolí.

Automatická frézovací příložka zabraňuje tvorbě otřepů na hranách zubů pilových pásů. Hydraulický přidržovač udržuje stejnou výšku vyfrézovaných zubů.

Ke zvýšení produktivity se pásy frézují ve svazku. Maximální počet pásů ve svazku je určen jejich tloušťkou a rozměrem rozevření čelistí svěráku. Pohyb a přesné polohování svazku zajišťuje hydraulický upínací systém. (5)





Obr. 9 Upínací systém (6)

Tab. 3 Technická specifikace frézky FS 1500 (5)

Frézka Kesel FS 1500	
<b>Výkon</b>	43 kW
<b>Maximální otáčky vřetene</b>	315 ot·min <sup>-1</sup>
<b>Frézovací trn</b>	SK 50 DIN 2079
<b>Maximální rychlost osa X (pohyb pásu)</b>	5 000 mm/min
<b>Maximální rychlost osa Y (přísuv)</b>	5 000 mm/min
<b>Maximální rychlost osa Z (posuv)</b>	10 000 mm/min
<b>Maximální průměr frézy</b>	250 mm
<b>Maximální šířka frézy</b>	200 mm
<b>Úhel naklonění frézy</b>	- 22° až +3°
<b>Upínací systém</b>	vysokotlaký hydraulický
<b>Maximální upínací šířka</b>	60 mm
<b>Řezná kapalina</b>	olej/emulze

### 3.3 Řezné nástroje

Všechny používané nástroje jsou vyráběny na zakázku. Jelikož v oblasti geometrie zubů pilových pásů dochází k neustálému vývoji, je téměř každý nástroj originál. Tato skutečnost se promítá do ceny nástroje, proto se ceny fréz pohybují okolo 100 tis Kč.

Pro výrobu ozubení se používají kuželové nebo válcové tvarové frézy. Pro snížení vibrační a klidnější chod jsou často zuby frézy umístěny ve šroubovici. Kuželové frézy se využívají pro výrobu pilových pásů, jejichž ozubení má kladný úhel čela.

Nejběžnějším výchozím materiálem pro výrobu fréz jsou rychlořezné oceli. Hotové nástroje se povlakuje pro zvýšení jejich trvanlivosti. V současné době se používají i frézy s pájenými břitovými destičkami. Z důvodu složitých tvarů zubů se však zatím nevyžívají výměnné břitové destičky.



*Obr. 10 Válcová fréza (7)*

### 3.4 Výrobní postup pilových pásů

Tato diplomová práce se podrobně zabývá pouze první operací – frézování. Po upnutí svazku pásů do hydraulických držáků frézky se v jedné operaci vyfrézuje ozubení načisto. Pro výrobu jiného typu ozubení je nutné vyměnit nástroj za jiný. Jak již bylo zmíněno, jedná se o hromadnou sériovou výrobu, v třísměnném provozu. Proto je nutné věnovat zvýšenou pozornost optimalizaci řezných podmínek všech druhů fréz, které se liší jednak použitým materiálem, ale také geometrií.

Tab. 4 Výrobní postup

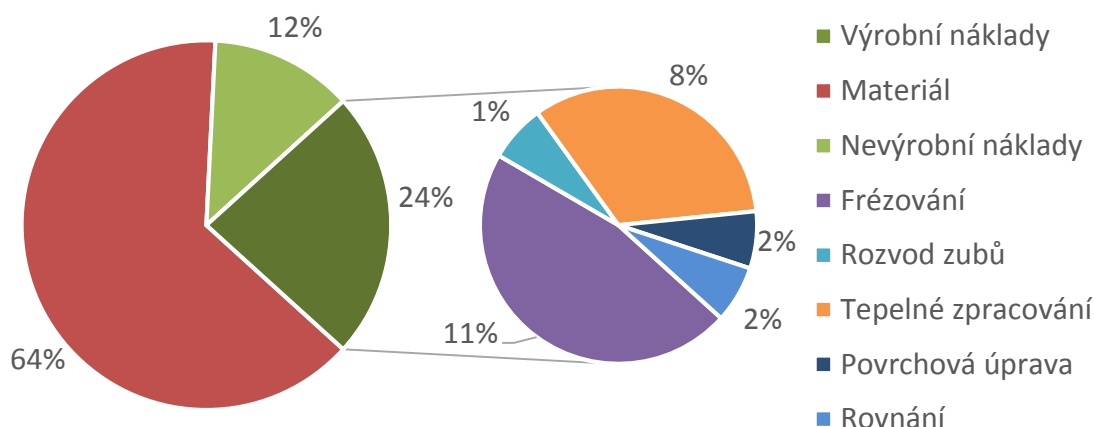
Č. OP	Popis	Nástroj	Řezné podmínky		
			vc [m/min]	f [mm/min]	ap [mm]
05	Upnout obrobek				
10	Frézovat ozubení	Tvarová fréza	82,3	40,5	6
15	Odepnout obrobek				
20	Rozvést ozubení	Rozváděcí čelisti			
25	Kalit				
30	Rovnat				
35	Povrchově upravit	Tryskání			
40*	Svařit				

\*operace se neprovádí při dodávce pásů v metráži

### 3.5 Výrobní náklady

Pilové pásy jsou výrobkem s vysokým podílem ceny materiálu. Výrobní náklady se podílejí na celkových nákladech zhruba z jedné čtvrtiny. Tento poměr se liší v závislosti na šířce pásu, kdy v případě širokých pásů tvoří náklady na materiál až 90%.

Následující graf ukazuje skladbu všech nákladů podílejících se na výrobní ceně pilových pásů.



Obr. 11 Graf – skladba nákladů

Na grafu je názorně zobrazeno, že frézování tvoří nejvýznamnější položku výrobních nákladů. Proto optimalizace řezných podmínek může podstatnou měrou ovlivnit celkovou výši výrobních nákladů. Optimalizace ostatních nákladových položek v této diplomové práci není řešena.

## 4 Návrh pracovních podmínek

Cílem této diplomové práce je navrhnout optimalizaci řezných podmínek pro vybrané nástroje. Podstatou optimalizace je nalezení nejvhodnější kombinace řezných podmínek, která povede k nejúčinnějšímu vyžití zdrojů.

Je však třeba si nejprve odpovědět na otázku, čeho chceme optimalizací dosáhnout. Nejčastěji používaným kritériem je kritérium minimálních výrobních nákladů. Ve většině případů totiž nelze určovat zvlášť optimální řezné podmínky bez ohledu na trvanlivost břitu nástroje. Proto je užitečné používat komplexní optimalizační výpočet, který vede k optimálním řezným podmínkám a optimální trvanlivosti nástroje.

Pro zjednodušení procesu se optimalizace v běžné praxi většinou zaměřuje pouze na trvanlivost nástroje. A to i přesto, že tato metoda nemusí vždy nutně vést k optimálním řezným podmínkám. Příčinou tohoto postupu je obvykle neznalost vzájemných vztahů řezných podmínek, trvanlivosti nástroje a ekonomiky obrábění. (8)

V případech, kdy je cílem vyrobit maximální počet jednotek, bez ohledu na náklady, může být aplikováno kritérium maximální produktivity. Mělo by však být použito, ale pouze ve zvláštních, opodstatněných případech.

#### 4.1 Kritérium minimálních výrobních nákladů

Jedná se o základní optimalizační kritérium používané ve strojírenské praxi. Pokud není nutné použít jiné kritérium (např. maximální produktivity), mělo by být přednostně použito.

Předpokladem je minimalizace výrobních nákladů na operační úsek. Celkové náklady na výrobu obrobku, jsou tvořeny náklady na strojní práci, náklady na nástroje a náklady na výměnu nástroje. Náklady na strojní práci jsou funkcí minutových nákladů na strojní práci. (9)

Kritérium lze vyjádřit ve tvaru

$$N = N_s + N_n + N_{vn} \quad (4.1)$$

- kde
- $N$  - výrobní náklady na uvažovaný operační úsek [Kč]
  - $N_s$  - náklady na strojní práci [Kč]
  - $N_n$  - náklady na nástroje [Kč]
  - $N_{vn}$  - náklady na výměnu nástroje, resp. znovuseřízení nástroje [Kč]

po dosazení do vztahu dostaneme

$$N = t_{As} \cdot N_{sm} + \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r \cdot N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm} \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r = \min \quad (4.2)$$

$$N = t_{As} \cdot N_{sm} + \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r \cdot (N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}) = \min \quad (4.3)$$

- kde
- $N_{sm}$  - náklady na strojní práci minutové [Kč/min]
  - $N_{nT}$  - náklady na nástroje vztažené na jednu trvanlivost břitu [Kč]
  - $N_{vnm}$  - náklady na výměnu nástroje minutové [Kč/min]
  - $T$  - trvanlivost nástroje [min]
  - $t_{As}$  - strojní čas [min]
  - $t_{vn}$  - čas výměny nástroje [min]
  - $k_r$  - poměr skutečného času obrábění a strojního času

Vyjádření strojního času

$$t_{As} = \frac{L}{n \cdot f} \quad (4.4)$$

kde  $L$  - délka dráhy automatického chodu nástroje [mm]

$n$  - otáčky nástroje [ $\text{min}^{-1}$ ]

$f$  - posuv na otáčku [mm/ot]

po dosažení dostaneme kritériální rovnici

$$N = \frac{L}{n \cdot f} \cdot N_{sm} + \frac{L \cdot k_r}{n \cdot f \cdot T} \cdot (N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}) = \min \quad (4.5)$$

po úpravě

$$\frac{K_1}{n \cdot f} + \frac{K_2}{n \cdot f \cdot T} = \min \quad (4.6)$$

kde  $K_1 = L \cdot N_{sm}$

$K_2 = L \cdot k_r (N_{nt} + t_{vn} \cdot N_{vnm})$

Pro výpočet řezných podmínek je nezbytný vztah optimální trvanlivosti z hlediska minimálních výrobních nákladů. Ten se dosadí to jednoduchého případně komplexního Taylorova vztahu.

Odvození vychází z nákladové funkce (4.5) kdy po dosažení za otáčky  $n$  dostaneme funkci závislou na trvanlivosti. Výpočet první derivace dle trvanlivosti se položí roven nule, potom platí:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dT} = \frac{L \cdot \pi \cdot D \cdot a_p^{x_v} \cdot k_r}{10^3 \cdot c_v \cdot f^{1-y_v} \cdot m} T^{\frac{1}{m}-1} \cdot N_{sm} + \frac{L \cdot \pi \cdot D \cdot a_p^{x_v} \cdot k_r}{10^3 \cdot c_v \cdot f^{1-y_v}} \left( \frac{1}{m} - 1 \right) \\ \cdot T^{\frac{1}{m}-2} \cdot (N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}) = 0 \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$T_{optN} = \frac{N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}}{N_{sm}} k_r (m - 1) \quad (4.8)$$

Toto odvození nereflektuje omezující podmínky, tím může dojít k výpočtu nereálných pracovních podmínek, které nebude v praxi možné využít.

## 4.2 Kritérium maximální produktivity

V dnešní době se toto kritérium používá jen výjimečně, a to v případech, kdy je nutné bez ohledu na výrobní náklady vyrobit maximální možný počet produktů. Takovou situaci lze ale vyřešit i výhodnějším způsobem, např. kooperací nebo zařazením mimořádných pracovních směn.

Kritérium maximální produktivity lze formulovat jako minimální čas na obrobění jednoho operačního úseku

$$t_u = t_{As} + t_{vn} \cdot z_v \quad (4.9)$$

kde  $t_u$  - čas operačního úseku [min]

po dosazení za  $z_v$  a  $t_{As}$ , dostaneme vztah pro kritérium maximální produktivity ve tvaru

$$t_u = \frac{L}{n \cdot f} + \frac{L \cdot k_r \cdot t_{vn}}{n \cdot f \cdot T} = \min \quad (4.10)$$

Kritérium maximální produktivity lze po úpravě vyjádřit analogicky jako kritérium minimálních výrobních nákladů

$$t_u = \frac{K_3}{n \cdot f} + \frac{K_4}{n \cdot f \cdot T} = \min \quad (4.11)$$

kde  $K_3 = L$

$$K_4 = L \cdot k_r \cdot t_{vn}$$

Optimální trvanlivost se určí obdobně jako v případě kritéria minimálních výrobních nákladů. Odvození vychází z rovnice ( 4.10 ) kdy po úpravě dostaneme výsledný vztah:

$$T_{optN} = t_{vn} \cdot k_r(m - 1) \quad ( 4.12 )$$

### 4.3 Vícekriteriální optimalizace

Uplatnění nachází v případech kdy je potřeba nalézt kompromis mezi požadavky na minimální výrobní náklady a maximální produktivitu. Jednotlivým kritériím přidělíme váhové ohodnocení, které reflektuje požadavky optimalizace. Kriteriační funkce má pak následující tvar:

$$VR = r \frac{N}{N_0} + (1 - r) \frac{t_u}{t_{u0}} = \min \quad ( 4.13 )$$

kde  $r$  - váhový koeficient  $0 \leq r \leq 1$

$N_0$  - kvalifikovaný odhad hodnoty nákladové funkce  $N$ , resp. hodnota  $N$  určená pomocí kritéria minimálních výrobních nákladů [Kč]

$t_{u0}$  - kvalifikovaný odhad hodnoty  $t_u$ , resp. hodnota  $t_u$  stanovená dle kritéria maximální produktivity [min]

po dosazení za  $N$  a  $t_u$  dostaneme tvar

$$\frac{1}{n \cdot f} \left[ K_1 \frac{r}{N_0} + \frac{K_3(1 - r)}{t_{u0}} \right] + \frac{1}{n \cdot f \cdot T} \left[ K_2 \frac{r}{N_0} + \frac{K_4(1 - r)}{t_{u0}} \right] = \min \quad ( 4.14 )$$

### 4.4 Volba optimalizačního kritéria

Vzhledem k sériovému charakteru výroby pilových pásů je kladen hlavní důraz na ekonomiku provozu. Ročně se nyní vyrobí ve firmě PILANA Metal asi 500 km pásu a v následujících letech by mělo dojít až ke zdvojnásobení produkce. Extrémní případy, kdy je nutné neprodleně vyrobit určitý typ pásů, jsou ojedinělé a většina produkce je plánovaná.

Z tohoto důvodu bylo jako nejvhodnější kritérium optimalizace zvoleno kritérium minimálních výrobních nákladů.



## 4.5 Omezující podmínky

Aplikace optimalizace na skutečný proces je vždy omezena souborem omezujících podmínek (omezení). V matematickém zápisu je možné tato omezení formulovat jako nerovnice. Výjimku tvoří komplexní Taylorův vztah, který má tvar rovnice.

Omezující podmínky určuje stroj (rozsah otáček, výkon, mezní krouticí moment upínacího prostředku apod.), nástroj (materiál, geometrie břitů, drsnost povrchu apod.), materiál obrobku, požadavky na výstupní kvalitu atd.

### 4.5.1 Omezení výkonem obráběcího stroje

Toto rozhodující omezení je závislé především na vlastnostech pohonů obráběcího stroje. Nelze nadefinovat pracovní podmínky, které by vedly ke vzniku řezných sil a výkonů, vymykajících se specifikacím stroje.

Existuje další možné dělení dle výkonové charakteristiky stroje:

#### Omezení konstantním výkonem obráběcího stroje

platí

$$P_c \leq P_e \cdot \eta \quad (4.15)$$

kde  $P_c$  - řezný výkon [W]  
 $P_e$  - výkon elektromotoru stroje [W]  
 $\eta$  - mechanická účinnost stroje

při vyjádření řezného výkonu pomocí řezné síly  $F_c$  platí

$$60 \cdot P_c = F_c \cdot v_c \quad (4.16)$$

kde  $F_c$  - řezná síla [N]  
 $v_c$  - řezná rychlost [m/min]

pro frézování lze vyjádřit řeznou sílu v empirickém tvaru

$$F_c = k_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f_z^{y_{Fc}} \cdot v_c^{z_{Fc}} \cdot B^{u_{Fc}} \cdot z \cdot D_n^{w_{Fc}} \quad (4.17)$$

kde  $f_z$  - posuv na zub [mm]

$B$  - šířka frézované plochy [mm]

$z$  - počet zubů nástroje

$u_{Fc}, w_{Fc}$  - empirické konstanty

při zanedbání vlivu řezné rychlosti platí

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f_z^{y_{Fc}} \leq \frac{10^3 \cdot 60 \cdot P_e \cdot \eta}{k_{Fc} \cdot \pi \cdot B^{u_{Fz}} \cdot z \cdot D^{w_{Fz}+1}} \quad (4.18)$$

## 4.5.2 Omezení výkonu krouticím momentem

V tomto případě závisí na druhu a vlastnostech upnutí obrobku. Principiálně nelze navrhnout proces, při němž by vznikly síly, které by překračovaly možnosti upínacího systému stroje.

Toto omezení má několik podskupin

- Omezení výkonu konstantním krouticím momentem
- Omezení výkonu lineárním průběhem krouticího momentu
- Omezení výkonu nelineárním průběhem krouticího momentu
- Omezení dané maximálně přípustným krouticím momentem

Hlavní uplatnění nacházejí tato omezení u soustružení. Vzhledem k tomu že předmětem této práce je optimalizace frézovacích operací, nebudou tato omezení popisována detailněji.

## 4.5.3 Omezení dané vhodným utvářením třísek

Frézovaným obrobkem je svazek pásů. Tím dochází k přirozenému dělení třísek a není proto nutné s tímto omezením dále uvažovat.

#### 4.5.4 Omezení dané maximálními a minimálními otáčkami dle stroje

Každý stroj má z podstaty limit možných dosažitelných otáček. Tudíž nelze optimalizací určit takové otáčky, které nelze na daném stroji nastavit

$$n_{s \min} \leq n \leq n_{s \max} \quad (4.19)$$

kde  $n_{s \min}$  - minimální dosažitelné otáčky na stroji [ $\text{min}^{-1}$ ]

$n_{s \max}$  - maximální dosažitelné otáčky na stroji [ $\text{min}^{-1}$ ]

#### 4.5.5 Omezení dané maximálními a minimálními posuvy dle stroje

Obdobně jako v případně omezení otáček jsou i rozsahy možných posuvů limitovány technickými vlastnostmi pohonů stroje. Proto analogicky platí

$$f_{s \min} \leq f \leq f_{s \max} \quad (4.20)$$

kde  $f_{s \min}$  - minimální dosažitelný posuv na stroji [ $\text{mm/ot}$ ]

$f_{s \max}$  - maximální dosažitelný posuv na stroji [ $\text{mm/ot}$ ]

#### 4.5.6 Omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy

Jelikož se výroba ozubení pilových pásů realizuje v jedné operaci načisto, je výsledná kvalita povrchu velmi důležitá. V současné době se podle tohoto kritéria určuje moment výměny nástroje. Při zvětšení otřepu na straně pásu nad povolenou toleranci, se operace frézování přerušuje, nástroj je vyměněn a přeostřen.

Drsnost povrchu je funkcí mnoha činitelů, obecně platí

$$R_a = g(f, v_c, r_\varepsilon, \kappa_r, \kappa_r', \dots) \quad (4.21)$$

kde  $r_\varepsilon$  - poloměr špičky nástroje [ $\text{mm}$ ]

$\kappa_r$  - úhel nastavení [ $^\circ$ ]

$\kappa_r'$  - vedlejší úhel nastavení [ $^\circ$ ]

Vzhledem ke komplexnosti tohoto kritéria platí empiricky zjištěné závislosti zejména pro konkrétní způsob obrábění. Pokud je pro daný způsob obrábění danou podmínku obtížné definovat, lze použít zápis:

$$f \leq f_{Ra \max} \quad (4.22)$$

kde  $f_{Ra \max}$  - maximální hodnota posuvu, při které je ještě dosahováno požadované drsnosti obrobené plochy [mm/ot]

#### 4.5.7 Omezení dané kmitáním

Vzhledem k tomu, že obrokem je svazek složený ze svazku pásů (nejčastěji 20 pásů), je problematika kmitání velmi obtížně formulovatelná. Každé soustavě přísluší vlastní frekvence, která vede k samobuzenému kmitání. Matematická formulace tohoto problému je velmi obtížná, proto se případné výskyty kmitání při procesu obrábění eliminují především úpravami řezných podmínek nebo korekcemi geometrie nástroje.

#### 4.5.8 Omezení dané komplexním Taylorovým vztahem

Mezi ostatními podmínkami má toto omezení ojedinělé postavení. Jedná se o rovnici, která zahrnuje trvanlivost břitu nástroje.

Komplexní Taylorův vztah

$$v_c = \frac{C_v}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot T^{\frac{1}{m}}} \quad (4.23)$$

kde  $v_c$  - řezná rychlost [m/min]  
 $a_p$  - hloubka řezu [mm]  
 $f$  - posuv na otáčku [mm/ot]  
 $T$  - trvanlivost nástroje [min]  
 $m$  - materiálová konstanta řezného nástroje  
 $C_v$  - empirická konstanta  
 $x_v; y_v$  - empirické konstanty

po dosazení za řeznou rychlost a následné úpravě bude mít vztah tvar

$$a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot n = \frac{10^3 \cdot c_v}{\pi \cdot D \cdot T^{\frac{1}{m}}} \quad (4.24)$$

pro frézování analogicky platí

$$v_c = \frac{C_v \cdot D^{w_v}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot B^{u_v} \cdot z^{q_v} \cdot T^{\frac{1}{m}}} \quad (4.25)$$

po dosazení vztahu řezné rychlosti

$$n \cdot f_z = \frac{10^3 \cdot c_v \cdot D^{w_v - 1}}{\pi \cdot B^{u_v} \cdot z^{q_v} \cdot T^{\frac{1}{m}}} \quad (4.26)$$

- kde
- $f_z$  - posuv na zub [mm/zub]
  - $D$  - průměr nástroje [mm]
  - $B$  - šířka frézované plochy [mm]
  - $z$  - počet zubů nástroje
  - $u_v$  - empirická konstanta
  - $q_v$  - empirická konstanta
  - $w_v$  - empirická konstanta

Z podstaty výroby ozubení musí zůstat hloubka řezu neměnná, proto bude optimalizace probíhat na základě změny řezné rychlosti.

## 4.6 Výpočet pracovních podmínek

Pro další výpočty je třeba dopočítat hodnoty řezné rychlosti  $v_c$  a posuvu na zub  $f_z$ .

Pro řeznou rychlost platí

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (4.27)$$

kde D - průměr nástroje  
n - otáčky nástroje [ $\text{min}^{-1}$ ]

Posuv na zub

$$f_{min} = f_z \cdot z \cdot n \Rightarrow f_z = \frac{f_{min}}{z \cdot n} \quad (4.28)$$

kde  $f_{min}$  - minutový posuv [ $\text{mm}/\text{min}$ ]  
 $f_z$  - posuv na zub [ $\text{mm}/\text{zub}$ ]  
z - počet zubů nástroje

#### 4.7 Výpočet strojního času

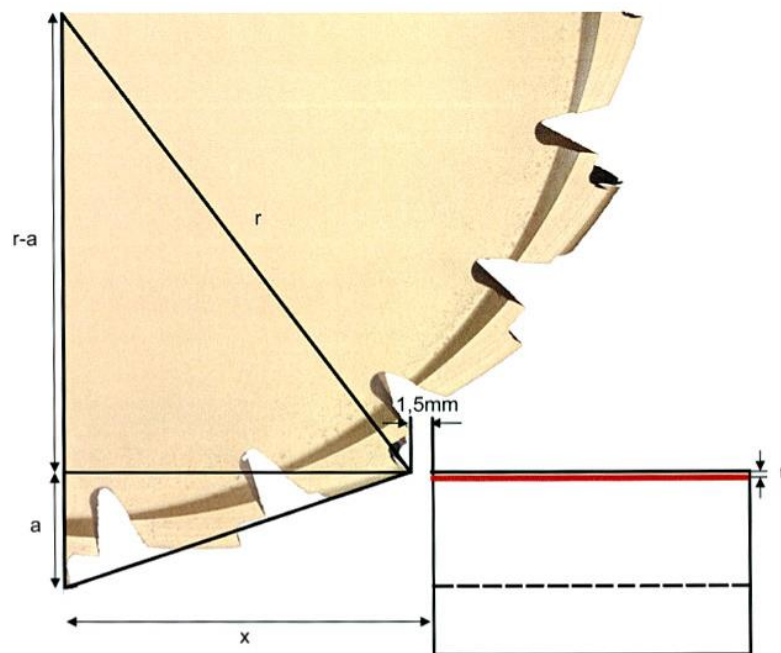
$$t_{As} = \frac{A \cdot i}{b \cdot n \cdot f_z \cdot z} = \frac{L \cdot B \cdot i}{b \cdot n \cdot f_z \cdot z} \quad (4.29)$$

kde A - velikost obráběné plochy [ $\text{mm}^2$ ]  
L - délka dráhy automatického chodu nástroje [mm]  
B - šířka obráběné plochy [mm]  
b - šířka frézy v záběru [mm]  
i - počet odebíraných vrstev

Jeden cyklus frézování se skládá z několika částí. V první fázi nástroj projede stanovenou dráhu pracovní rychlostí. Délka dráhy je ovlivněna počtem frézovaných pásů, průměrem frézy a hloubkou největšího zubu ve skupině. Maximální počet frézovaných pásů je omezen rozevřením čelistí hlavního svěráku. Ten má možnost upnout maximálně svazek pásů široký 60 mm. Běžně se frézuje zároveň 20 pásů. V případě frézování speciálních zubů může počet pásů klesnout na 10 kusů, výjimečně až na 5 kusů. Vliv počtu pásů na náklady bude rozebrán v další části této práce.

V druhé fázi projede nástroj stejnou dráhu opačným směrem se zvýšenou rychlostí posuvu. Toto opatření má za účel především zlepšení kvality povrchu, kdy se odstraní nepřesnosti v oblasti špiček zubů pilového pásu.

Ve třetí a poslední fázi dochází k přeupínání svazku pásů. Pomocný svěrák posune pásy o vzdálenost šířky frézy. Hlavní svěrák poté pásy zafixuje v pracovní pozici pro frézování. Čas přeupínání je nezávislý na počtu pásů. Jeho délku však ovlivňuje šířka frézy. Čím širší je fréza, tím delší je dráha chodu pomocného svěráku.



Obr. 12 Schéma výpočtu délky dráhy (6)

Výpočet délky dráhy automatického chodu stroje

$$L = L_n + L_u = \sqrt{r^2 - (r - a_p)^2} + 1,5 + n_p \cdot b_p \quad (4.30)$$

kde	$L_n$	délka najetí [mm]
	$L_u$	šířka upnutých pásů ve svěráku [mm]
	$r$	poloměr frézy [mm]
	$a_p$	hloubka řezu - největšího zubu [mm]
	$n_p$	počet upnutých pásů
	$b_p$	tloušťka pásu [mm]

$$t_{As} = \left( \frac{L \cdot B}{b \cdot n \cdot f_z \cdot z} + \frac{L \cdot B}{b \cdot n \cdot f_z \cdot z} + t_{pu} \right) \cdot i = \left( \frac{L \cdot B}{b \cdot f_m} + \frac{L \cdot B}{b \cdot f_m} + t_{pu} \right) \cdot i \quad (4.31)$$

kde  $t_{pu}$  čas přepínání pásů [s]

## 4.8 Výrobní náklady na operační úsek

Pokud nebudou uvažovány nákladové položky, které nejsou závislé na řezných podmínkách, má vztah pro vyjádření výrobních nákladů stejný tvar jako rovnice (4.1)

$$N = N_s + N_n + N_{vn} \quad (4.32)$$

### 4.8.1 Náklady na strojní práci

Náklady na strojní práci v sobě zahrnují náklady na provoz stroje, mzdy dělníků a výrobní režijní náklady. Lze je vyjádřit více způsoby v závislosti na výpočtu ekonomických ukazatelů

- Výrobní režijní náklady jako přírážka k přímým mzdám

$$N_s = t_{As} \left[ k_c \cdot \frac{M_o}{60} \left( 1 + \frac{RNS_{PL}}{100} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] = t_{As} \cdot N_{sm} \quad (4.33)$$

kde  $t_{As}$  - strojní čas [min]

$k_c$  - přírážka směnového času [Kč]

$M_o$  - mzda operátora včetně soc. a zdravotního pojištění [Kč/hod]

$RNS_{PL}$  - režijní náklady střediska plánované [%]

$N_{hs}$  - hodinové náklady na provoz stroje [Kč]

- Výrobní režijní náklady pomocí hodinového režijního paušálu

$$N_s = t_{As} \left[ k_c \cdot \left( \frac{M_o}{60} + \frac{RNS_{PL}}{100} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] = t_{As} \cdot N_{sm} \quad (4.34)$$

kde  $HRP_{SP}$  - hodinový režijní paušál společných nákladů [Kč/hod]



### Hodinové náklady na provoz stroje

$$N_{hs} = O_s \cdot k_{us} + c_E \cdot P_p \quad (4.35)$$

- kde  $N_{hs}$  - hodinové náklady na strojní práci [Kč/hod]  
 $O_s$  - odpisy stroje [Kč/hod]  
 $k_{us}$  - koeficient oprav a údržby stroje  
 $c_E$  - cena elektrické energie [Kč/kWh]  
 $P_p$  - příkon stroje [kW]

### Odpis stroje

$$O_s = \frac{C_s}{Z_s \cdot CFS_{EFPL} \cdot SM \cdot k_{vs}} \quad (4.36)$$

- kde  $C_s$  - cena stroje [Kč]  
 $Z_s$  - životnost stroje [roky]  
 $CFS_{EFPL}$  - časový fond stroje [hod/rok·směna]  
 $SM$  - směnnost  
 $k_{vs}$  - koeficient časového využití stroje

### Náklady na nástroje

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} \quad (4.37)$$

- kde  $z_v$  - počet výměn nástroje vztažené na jeden operační úsek  
 $N_{nT}$  - náklady na nástroje vztažené na jednu trvanlivost bříty [Kč]

$$z_v = \frac{t_{As}}{T_{optN}} \cdot k_r \quad (4.38)$$

- kde  $T_{optN}$  - optimální trvanlivost nástroje dle kritéria MVN [min]  
 $k_r$  - poměr skutečného času obrábění a strojního času

Pro celistvé přeastřované nástroje uvažujeme režijní náklady ostřírny, vyjádřené pomocí  $RNO_{PL}$

$$N_{nT} = \frac{C_n - C_{zn}}{z_o + 1} + t_{os} \cdot k_c \frac{M_{os}}{60} \left( 1 + \frac{RNO_{PL}}{100} \right) \cdot \frac{z_o}{z_o + 1} \quad (4.39)$$

- kde
- $C_n$  - cena nástroje [Kč]
  - $C_{zn}$  - zbytková cena nástroje [Kč]
  - $t_{os}$  - čas ostření nástroje [min]
  - $z_o$  - počet možných přeastření nástroje
  - $M_{os}$  - mzda ostříče včetně sociálního a zdravotního pojištění [Kč/hod]
  - $RNO_{PL}$  - režijní náklady ostřírny roční [%]

při vyjádření režijních nákladů ostřírny pomocí hodinového režijního paušálu:

$$N_{nT} = \frac{C_n - C_{zn}}{z_o + 1} + t_{os} \cdot k_c \left( \frac{M_{os}}{60} + \frac{HRP_{os}}{60} \right) \cdot \frac{z_o}{z_o + 1} \quad (4.40)$$

- kde  $HRP_{os}$  - hodinový režijní paušál ostřírny [Kč/hod]

### Náklady na výměnu nástroje

- režijní náklady vyjádřeny pomocí  $RNS_{PL}$

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = t_{vn} \left[ k_c \cdot \frac{M_s}{60} \left( 1 + \frac{RNS_{PL}}{100} \right) + \frac{O_s}{60} \right] \cdot z_v \quad (4.41)$$

- kde
- $t_{vn}$  - čas výměny nástroje [min]
  - $M_s$  - mzda seřizovače včetně soc. a zdravotního pojištění [Kč/hod]
  - $N_{vnm}$  - minutové náklady na výměnu nástroje [Kč/min]

- režijní náklady vyjádřeny pomocí  $HRP_{SP}$

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{sm} \cdot z_v = t_{vn} \left[ k_c \cdot \left( \frac{M_s}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{O_s}{60} \right] \cdot z_v \quad (4.42)$$

## 4.9 Optimální trvanlivost břitu z hlediska minimálních výrobních nákladů

Výpočet optimální trvanlivosti se provede dle vztahu ( 4.8 )

$$T_{optN} = \frac{N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}}{N_{sm}} \cdot k_r \cdot (m - 1) \quad ( 4.43 )$$

## 4.10 Určení optimální řezné rychlosti

Při výpočtu se vychází z jednoduchého Taylorova vztahu, který udává závislost trvanlivosti a řezné rychlosti. S dalšími řeznými podmínkami se počítá jako s konstantami.

$$k_T = T \cdot v_c^m = T_{optN} \cdot v_{c_{optN}}^m \quad ( 4.44 )$$

Ze vztahu vyjádříme optimální řeznou rychlost

$$v_{c_{optN}} = \sqrt[m]{\frac{T \cdot v_c^m}{T_{optN}}} = v_c \cdot \sqrt[m]{\frac{T}{T_{optN}}} \quad ( 4.45 )$$

# 5 Optimalizace dané operace

## 5.1 Definice variant výpočtu

Při výpočtu optimálních řezných podmínek dle kritéria minimálních výrobních nákladů hraje důležitou roli stanovení vstupních nákladů. Velkou váhu mají náklady na strojní práci. Vzhledem k tomu, že podnik disponuje několika stejnými obráběcími stroji, z nichž některé byly pořízeny v rámci dotačních projektů, bude výpočet řešen ve více variantách

### Varianta A

Je počítáno s cenou stroje (včetně veškerého příslušenství – navíjení, odvíjení) v plné výši podle kupních smluv.

### **Varianta B**

Cena strojního zařízení je snížena o poskytnutou dotaci. Ta činí 50% z ceny stroje, údaje převzaty z účetní evidence.

V rámci této varianty budou dále uvažovány různé nástroje, pro posouzení vlivu velikosti zubů na ekonomiku výroby. Výsledky této varianty budou složité jako základ pro stanovení prodejních cen různých typů pásů.

### **Varianta C**

Výpočet výrobních nákladů pro různé množství frézovaných pásů v jedné dávce. Druhou modifikací výpočtu bude výpočet pro situaci, kdy budou k dispozici 2 kusy stejného nástroje – čas výměny nástroje se zkrátí o čas broušení.

Výsledky této varianty naleznou uplatnění v organizačním uspořádání výrobního procesu.

## **5.2 Určení režijních nákladů**

Režijní náklady mají nepřímý charakter a nelze je přiřadit ke konkrétnímu výrobku. Mezi tyto náklady řadíme mzdy nevýrobních pracovníků, náklady na prostory, společné energie střediska a další.

Jako nejvhodnější varianta určení režijních nákladů byla zvolena metoda hodinového režijního paušálu, a to hlavně z důvodu malého počtu výrobních dělníků. V rámci celé výrobní linky pilových pásů pracuje v třísměnném provozu šest dělníků. Vzhledem k vícestrojové obsluze byla operaci frézování byla přiřazena podle zkušeností ze stávající výroby 1/3 pracovníka.

Metoda hodinového režijního paušálu určuje cenu časové jednotky (hodiny) pro dané středisko. Výše paušálu pro konkrétní operaci je závislá na tom, do jaké míry operace využívá společných režijních nákladů střediska.

Po konzultaci s podnikovým ekonomem byl určen hodinový režijní paušál pro operaci frézování:

Tab. 5 Hodinový režijní paušál

Složka	Částka [Kč/hod]
Plocha	5
Nevýrobní pracovníci	14
Společné energie	1
Ostatní	10
<b>Celkem</b>	<b>30</b>

- 1) Náklady na prostory byly stanoveny na základě zabrané plochy pracoviště frézování v poměru k celé výrobní hale. Z odpisů budov byla přiřazena příslušná část.
- 2) Mzdy nevýrobních pracovníků jsou obtížně přiřaditelné ke konkrétní výrobní operaci. Po dohodě s podnikovým ekonomem jsou mzdy nevýrobních pracovníků rovnoměrně rozděleny mezi všechna výrobní pracoviště.
- 3) Mezi společné energie se řadí osvětlení haly, vytápění a stlačený vzduch.
- 4) Položka ostatní zahrnuje další nespecifikované režijní náklady, jako například nářadí, řezné kapaliny a další.

### 5.3 Definice konstant

Následující tabulka shrnuje konstanty vstupující do optimalizačního procesu.

Tab. 6 Vstupní konstanty

Koeficient	Symbol	Hodnota
Přirážka směnového času	$k_c$	1,13
Koeficient oprav a údržby stroje	$k_{us}$	1,2
Koeficient časového využití stroje	$k_{vs}$	0,8

- 1) Přírážka směnového času  $k_c$  – vyjadřuje míru rezervy na činnosti v rámci směny, které přímo nesouvisí s vlastní výrobou. Obvyklá hodnota se pohybuje v rozmezí 1,1-1,15.
- 2) Koeficient údržby stroje  $k_{us}$  - udává předpokládané náklady na údržbu a opravy stroje za dobu jeho životnosti. Podle zkušeností podnikového technologa byla hodnota koeficientu údržby stanovena na 1,2.
- 3) Koeficient časového využití stroje  $k_{vs}$  – vyjadřuje míru využití směnového času. Je dán dlouhodobým průměrem. Jeho velikost je závislá na druhu výroby. Následující tabulka udává hodnoty koeficientu pro jednotlivé druhy výroby. Na základě znalosti způsobu výroby ve společnosti PILANA Metal byla hodnota koeficientu stanovena na 0,8.

Tab. 7 Koeficient využití stroje

Druh výrob	$k_{vs}$
Hromadná a velkosériová výroba	0,8
NC stroje a obráběcí centra	0,65 až 0,8
Konvenční malosériová výroba	0,50 až 0,65

### 5.3.1 Vstupní veličiny – stroj

Tab. 8 Vstupní veličiny - stroj

Veličina	Symbol	Hodnota
Cena stroje – varianta A	$C_s$	12 650 000 Kč
Cena stroje – varianta B	$C_s$	6 325 000 Kč
Příkon stroje	$P_p$	20 kW
Životnost stroje	$Z_s$	10 let

- 1) Cena stroje  $C_s$  – se skládá z vlastní ceny frézky a dále z nezbytného příslušenství stroje, tj. odvíjecí a navíjecí zařízení, vynašeč třísek a další drobné příslušenství sloužící k navádění pásů.
- 2) Příkon stroje  $P_p$  – výrobce udává hodnotou 43 kW, ale protože stroj nikdy nepracuje na plný výkon, je pro výpočty brána hodnota zjištěná operativním měřením 20 kW.

- 3) Životnost stroje  $Z_s$  – účetně se stroj odepíše po 5 letech, ale vzhledem k tomu, že se jedná o speciální jednoúčelové zařízení, které morálně nezastarává tak rychle, jako univerzální obráběcí centra, je pro výpočet uvažována životnost 10 let, která je shodná s dobou účetních odpisů. Reálná životnost stroje může být i delší.

### 5.3.2 Vstupní veličiny – podnikové

Tab. 9 Vstupní veličiny – podnikové

Veličina	Symbol	Hodnota
<b>Časový fond stroje</b>	$CFS_{EFPL}$	1 824 h/rok·směna
<b>Hodinový režijní paušál frézování</b>	$HRP_{SP}$	30 Kč/hod
<b>Hodinový režijní paušál ostřírny</b>	$HRP_{SPOS}$	5 Kč/hod
<b>Paušální náklady ostření</b>	$N_{POS}$	250 Kč
<b>Mzda operátora, seřizovače</b>	$M_o = M_s$	180 Kč/hod
<b>Mzda vícestrojové obsluhy</b>	$M_{ovs}$	60 Kč/hod
<b>Mzda vícestrojového broušení</b>	$M_{os}$	85 Kč/hod
<b>Směnnost</b>	SM	3

- 1) Časový fond stroje  $CFS_{EFPL}$  – udává počet plánovaných hodin výroby za rok a směnu. Výsledná hodnota je dána počtem pracovních dnů v roce, očištěných o státní svátky a plánovanou celozávodní dovolenou.
- 2) Hodinový režijní paušál  $HRP_{SP}$  – výpočet uveden v kapitole 5.1.
- 3) Hodinový režijní paušál  $HRP_{SPOS}$  – střediska ostřírna.
- 4) Paušální náklady ostření  $N_{POS}$  – paušální cena ostření stanovená ve spolupráci s podnikovým ekonomem. Vzhledem k tomu, že bruska určená k ostření fréz pro výrobu pilových pásů není využívána nepřetržitě, hodinové paušály nevystihují dostatečně přesně náklady na ostření. Proto byl stanoven tento paušál daný cenou stroje a počtem provedených přeostření během životnosti stroje.

- 5) Hodinové náklady na strojní práci  $HP_p$ .
- 6) Mzda operátora, seřizovače  $M_o=M_s$  – včetně sociálního a zdravotního pojištění. Vzhledem k tomu, že operátor stroje zároveň provádí seřízení je hodnota mezd shodná. Hodnota byla přejata z podnikového účetnictví.
- 7) Mzda vícestrojové obsluhy  $M_{ovs}$  – pro výpočet nákladů na strojní práci se bere v úvahu třístrojová obsluha. Při výpočtu nákladů na výměnu nástroje se uvažuje plná mzda, protože operátor je plně vytížen jedním strojem.
- 8) Směnnost SM – udává počet pracovních směn za den. Standardně se pracuje v 3 směnném provozu. Víkendová směna se zařazuje jen ve velmi výjimečných situacích.

## 5.4 Definice optimalizovaných produktů

Vzhledem k charakteru výroby pilových pásů bude v této práci popsána optimalizace výroby různých druhů ozubení. Použité nástroje se liší druhem materiálu, geometrií a cenou, z čehož lze usuzovat, že pro každý nástroj budou optimální jiné řezné podmínky.

Výběr optimalizovaných nástrojů byl konzultován s podnikovým technologem v závislosti na požadavcích výrobního oddělení.

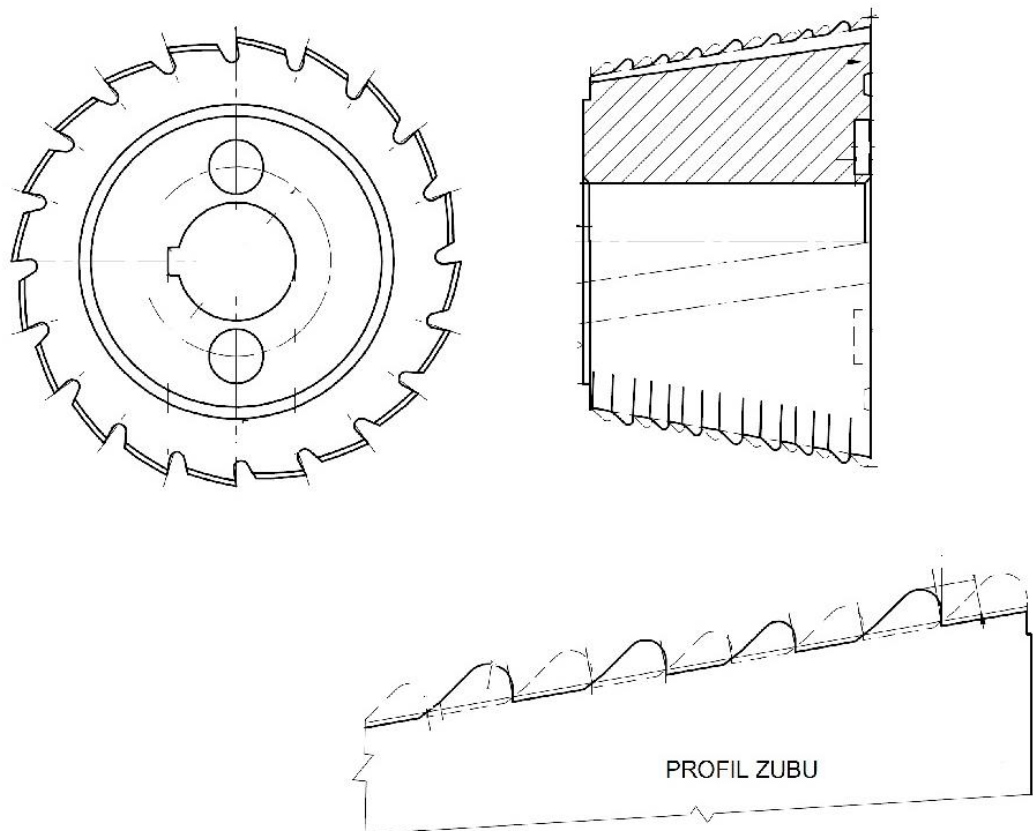
### 5.4.1 Fréza 3/4

Tab. 10 Vstupní veličiny – fréza 3/4

Veličina	Symbol	Hodnota
<b>Cena nástroje</b>	$C_n$	103 000 Kč
<b>Průměr nástroje</b>	$D$	220 mm
<b>Hloubka řezu</b>	$a_p$	4 mm
<b>Materiálová konstanta</b>	$m$	3
<b>Trvanlivost</b>	$T$	812 min
<b>Počet efektivních břitů nástroje</b>	$z$	10
<b>Počet možných přeastření</b>	$z_o$	30



- 1) Cena nástroje – údaj získaný z podnikového účetnictví
- 2) Průměr nástroje – dle výkresové dokumentace nástroje
- 3) Materiálová konstanta – stanovena po dohodě s vedoucím diplomové práce na základě druhu použitého materiálu pro výrobu nástroje - HSS
- 4) Trvanlivost – do současné doby nedocházelo v podniku ke sledování trvanlivosti nástroje. Proto bylo v rámci této práce zahájeno sledování trvanlivosti, včetně zaznamenání šířky odbroušené vrstvy při přestřívání nástroje. Sledovanou hodnotou je počet odfrézovaných taktů, které jsou následně vynásobeny strojním časem na jeden takt. Pro výpočet byl použit průměr ze sledovaných hodnot
- 5) Počet efektivních břitů – dle výkresové dokumentace nástroje
- 6) Počet možných přestření – je dán poměrem šířky vrstvy, kterou lze odstranit při přestřívání nástroje, a odebranou vrstvou při broušení



Obr. 13 Fréza  $\frac{3}{4}$  (10)

**Současné řezné podmínky**

Tab. 11 Současné řezné podmínky – fréza 3/4

Veličina	Symbol	hodnota
Otáčky	n	75 [ot/min]
Minutový posuv	$f_{min}$	36 [mm/min]

**Řezná rychlost**

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 220 \cdot 75}{1000} = 51,8 \text{ m/min} \quad (5.1)$$

**Posuv na zub**

$$f_z = \frac{f_{min}}{z \cdot n} = \frac{36}{10 \cdot 75} = 0,048 \text{ mm/zub} \quad (5.2)$$

Tab. 12 Vstupní veličiny - fréza 3/4

Konstanty pro frézu 3/4		
Šířka obráběné plochy	B	125,4 mm
Šířka frézy v záběru	b	125,4 mm
Otáčky nástroje	n	75 ot/min
Čas přeupínání	$t_{pu}$	11 s
Počet pásů	$n_p$	20 mm
Tloušťka pásu	$b_p$	0,9 mm

**Délka dráhy automatického chodu stroje**

$$L = L_n + L_u = \sqrt{r^2 - (r - a)^2} + 1,5 + n_p \cdot b_p =$$

$$\sqrt{110^2 - (110 - 4)^2} + 1,5 + 20 \cdot 0,9 = 47,4 \text{ mm} \quad (5.3)$$

**Pro jednotlivé úseky dráhy se mění hodnoty posuvů**

Tab. 13 Posuvy v jednotlivých úsecích

Úsek	Posuv [mm/min]	Délka úseku [mm]
1	36	47,4
2	500	47,4

**Počet cyklů**

Počet frézovacích cyklů je dán podílem délky svitku materiálu použitého pro výrobu pilových pásů a šířky frézy.

Délka pásu navinutého do cívky se liší v závislosti na tloušťce pásu. Nejběžnější šířka pásu 34 mm je dodávána v návínu 201 metrů. Šířka frézy viz Tab. 10. Z toho získáme celkový počet cyklů:

$$i = \frac{L_p}{B} = \frac{201\,000}{125,4} = 1\,603 \quad (5.4)$$

**Strojní čas**

$$t_{As} = \left( \frac{L \cdot B}{b \cdot n \cdot f_z \cdot z} + \frac{L \cdot B}{b \cdot n \cdot f_z \cdot z} + t_{pu} \right) \cdot i = \left( \frac{L \cdot B}{b \cdot f_m} + \frac{L \cdot B}{b \cdot f_m} + t_{pu} \right) \cdot i =$$

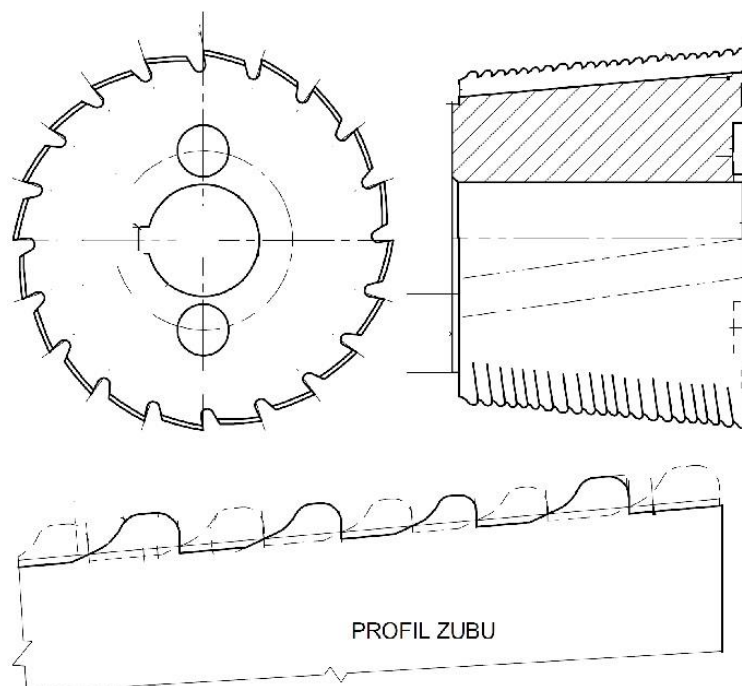
$$= \left( \frac{47,4 \cdot 125,4}{125,4 \cdot 36} + \frac{47,4 \cdot 125,4}{125,4 \cdot 500} + \frac{11}{60} \right) \cdot 1\,603 =$$

$$= 2\,557 \text{ min} = 42,6 \text{ hod} \quad (5.5)$$

## 5.4.2 Fréza 4/6

Tab. 14 Vstupní veličiny – fréza 4/6

Veličina	Symbol	Hodnota
<b>Cena nástroje</b>	$C_n$	130 000 Kč
<b>Průměr nástroje</b>	$D$	170 mm
<b>Hloubka řezu</b>	$a_p$	2,65 mm
<b>Materiálová konstanta</b>	$m$	2,5
<b>Trvanlivost</b>	$T$	756 min
<b>Počet efektivních břitů nástroje</b>	$z$	10
<b>Počet možných přestření</b>	$z_o$	30



Obr. 14 Fréza 4/6 (10)

Tab. 15 Současné řezné podmínky – fréza 4/6

Veličina	Symbol	Hodnota
Otáčky	n	90 [min <sup>-1</sup> ]
Minutový posuv	f <sub>min</sub>	40,5 [mm/min]

### Řezná rychlost

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 170 \cdot 90}{1000} = 48,0 \text{ m/min} \quad (5.6)$$

### Posuv na zub

$$f_z = \frac{f_{min}}{z \cdot n} = \frac{40,5}{10 \cdot 90} = 0,045 \text{ mm/zub} \quad (5.7)$$

Tab. 16 Vstupní veličiny – fréza 4/6

Společné hodnoty pro frézování		
Šířka obráběné plochy	B	132 mm
Šířka frézy v záběru	b	132 mm
Otáčky	n	90 ot/min
Čas přeupínání	t <sub>pu</sub>	11 s
Počet pásů	n <sub>p</sub>	20 mm
Tloušťka pásu	b <sub>p</sub>	0,9 mm

**Výpočet délky dráhy automatického chodu stroje**

$$L = \sqrt{r^2 - (r - a)^2} + 1,5 + n_p \cdot b_p$$

$$= \sqrt{85^2 - (85 - 2,65)^2} + 1,5 + 20 \cdot 0,9 = 39,0 \text{ mm} \quad (5.8)$$

**Pro jednotlivé úseky se mění hodnoty posuvů**

Tab. 17 Posuvy v jednotlivých úsecích

Úsek	Posuv [mm/min]	Délka dráhy [mm]
1	40,5	39
2	500	39

**Počet cyklů**

$$i = \frac{L_p}{B} = \frac{201\,000}{132} = 1\,523 \quad (5.9)$$

**Strojní čas**

$$t_{As} = \left( \frac{39 \cdot 132}{132 \cdot 40,5} + \frac{39 \cdot 132}{132 \cdot 500} + \frac{11}{60} \right) \cdot 1\,523 =$$

$$= 1\,864 \text{ min} = 31,6 \text{ hod} \quad (5.10)$$

**5.5 Výpočet řezných podmínek – varianta A**

Pro výpočet této varianty byl vybrán nejběžnější typ ozubení – 3/4 a výrobní dávka velikosti 20 pásů.

### Hodinové náklady na provoz stroje

$$O_s = \frac{C_s}{Z_s \cdot CFS_{EFPL} \cdot SM \cdot k_{vs}} = \frac{12\,650\,000}{10 \cdot 1824 \cdot 3 \cdot 0,8} = 289,0 \text{ Kč/hod} \quad (5.11)$$

$$N_{hs} = O_s \cdot k_{us} + c_E \cdot P_p \cdot k_r = 289,0 \cdot 1,2 + 20 \cdot 2,8 \cdot 0,85 = 394,4 \text{ Kč/hod} \quad (5.12)$$

### Náklady na strojní práci

$$\begin{aligned} N_{sm} &= k_c \cdot \left( \frac{M_{ovs}}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} = \\ &= 1,13 \cdot \left( \frac{60}{60} + \frac{30}{60} \right) + \frac{394,4}{60} = 8,26 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$N_s = t_{as} \cdot N_{sm} = 2\,566 \cdot 8,26 = 21\,142,2 \text{ Kč} \quad (5.14)$$

### Počet výměn nástroje

$$z_v = \frac{t_{as}}{T} \cdot k_r = \frac{2\,566}{812} \cdot 0,85 = 2,7 \quad (5.15)$$

### Náklady na výměnu nástroje

$$\begin{aligned} N_{vnm} &= k_c \cdot \left( \frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{O_s}{60} = \\ &= 1,13 \cdot \left( \frac{180}{60} + \frac{30}{60} \right) + \frac{288,97}{60} = 8,77 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (5.16)$$

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 60 \cdot 8,77 \cdot 2,7 = 1\,408,3 \text{ Kč} \quad (5.17)$$

**Náklady na nástroj vztažené na jednu trvanlivost břítu**

$$\begin{aligned}
 N_{nT} &= \frac{C_n}{z_o + 1} + t_{os} \cdot k_c \left( \frac{M_{os}}{60} + \frac{HRP_{os}}{60} \right) \cdot \frac{z_o}{z_o + 1} + N_{pos} = \\
 &= \frac{103\,000}{30 + 1} + 45 \cdot 1,13 \left( \frac{85}{60} + \frac{30}{60} \right) \cdot \frac{30}{30 + 1} + 250 \\
 &= 3\,646,4 \text{ Kč} \qquad (5.18)
 \end{aligned}$$

**Náklady na nástroje**

$$N_n = z_{vn} \cdot N_{nT} = 2,7 \cdot 3\,646,4 = 9\,757,4 \text{ Kč} \quad (5.19)$$

**Výrobní náklady**

$$N = N_s + N_{vn} + N_n = 21\,142,2 + 1\,408,3 + 9\,757,4 = 32\,307,9 \text{ Kč} \quad (5.20)$$

**Náklady na metr pásu**

Náklady na vyfrézování 1 metru pásu jsou dány podílem celkových nákladů a délkou vyfrézovaných pásů. Ta závisí na počtu pásů a jejich délce

$$N_m = \frac{N}{i_p \cdot l_c} = \frac{32\,307,9}{20 \cdot 201} = 8,04 \text{ Kč/m} \quad (5.21)$$

**Optimální trvanlivost břítu**

$$\begin{aligned}
 T_{optN} &= \frac{t_{vn} \cdot N_{vnm} + N_{nT}}{N_{sm}} \cdot k_r \cdot (m - 1) \\
 &= \frac{60 \cdot 8,77 + 3\,646,4}{8,26} \cdot 0,85 \cdot (3 - 1) = 858 \text{ min} \quad (5.22)
 \end{aligned}$$



### Optimální řezná rychlost

$$v_{c_{optn}} = v_c \cdot \sqrt[m]{\frac{T}{T_{optN}}} = 51,8 \cdot \sqrt[3]{\frac{812}{858}} = 50,9 \text{ m/min} \quad (5.23)$$

### Otáčky nástroje pro optimální řeznou rychlost

$$n = \frac{1000 \cdot v_{c_{optN}}}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 50,9}{\pi \cdot 220} = 73,6 \text{ ot/min} \quad (5.24)$$

### Posuv pro optimální řezné podmínky

$$f = n \cdot f_z \cdot z = 73,6 \cdot 0,048 \cdot 10 = 35,4 \text{ mm/min} \quad (5.25)$$

### Strojní čas pro optimální řeznou rychlost

$$t_{As} = \left( \frac{l \cdot B}{b \cdot f} + \frac{l \cdot B}{b \cdot f} + t_{pu} \right) \cdot i =$$

$$\left( \frac{47,4 \cdot 125,4}{125,4 \cdot 35,4} + \frac{47,4 \cdot 125,4}{125,4 \cdot 500} + \frac{11}{60} \right) \cdot 1\,603 = 2\,596 \text{ min} = 43,3 \text{ hod} \quad (5.26)$$

### Náklady na strojní práci

$$N_s = t_{as} \left[ k_c \left( \frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] =$$

$$2\,596 \cdot \left[ 1,13 \left( \frac{60}{60} + \frac{30}{60} \right) + \frac{394,4}{60} \right] = 21\,463,5 \text{ Kč} \quad (5.27)$$

### Počet výměn nástroje pro optimální řezné podmínky

$$z_v = \frac{t_{as}}{T} \cdot k_r = \frac{2\,596}{858} \cdot 0,85 = 2,57 \quad (5.28)$$

**Náklady na výměnu nástroje**

$$N_{vn} = t_{vn} \left[ k_c \cdot \left( \frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{O_s}{60} \right] \cdot z_v =$$

$$60 \left[ 1,13 \cdot \left( \frac{180}{60} + \frac{30}{60} \right) + \frac{288,97}{60} \right] \cdot 2,57 = 1\,353,5 \text{ Kč} \quad (5.29)$$

**Náklady na nástroje pro optimální řezné podmínky**

$$N_n = z_{vn} \cdot N_{nT} = 2,57 \cdot 3\,646,4 = 9\,378,2 \text{ Kč} \quad (5.30)$$

**Výrobní náklady pro optimální řezné podmínky**

$$N = N_s + N_{vn} + N_n = 21\,463,5 + 1\,353,5 + 9\,378,2$$

$$= 32\,195,3 \text{ Kč} \quad (5.31)$$

**Náklady na metr pásu**

$$N_m = \frac{N}{i_p \cdot l_c} = \frac{32\,195,3}{20 \cdot 201} = 8,01 \text{ Kč/m} \quad (5.32)$$

**Souhrn výsledků**

Tab. 18 Souhrn výsledků – Varianta A

Veličina	Stávající podmínky	Optimalizované podmínky
<b>z<sub>v</sub></b>	2,68	2,57
<b>T [min]</b>	812	858
<b>v<sub>c</sub> [m/min]</b>	51,8	50,9
<b>n [ot/min]</b>	75	73,6
<b>f [mm/min]</b>	36	35,3

Z výsledků optimalizace lze vidět, že řezné podmínky jsou nastavené téměř optimálně.

## 5.6 Výpočet řezných podmínek – varianta B

V této variantě budou uvažovány nástroje:

- HSS fréza 3/4
- SK fréza 4/6

Velikost výrobní dávky – 20 pásů

### Hodinové náklady na provoz stroje

$$O_s = \frac{C_s}{Z_s \cdot CFS_{EFPL} \cdot SM \cdot k_{vs}} = \frac{6\,325\,000}{10 \cdot 1824 \cdot 3 \cdot 0,8} = 144,5 \text{ kč/hod} \quad (5.33)$$

$$\begin{aligned} N_{hs} &= O_s \cdot k_{us} + c_E \cdot P_p \cdot k_r = 144,5 \cdot 1,2 + 20 \cdot 2,8 \cdot 0,85 \\ &= 221,0 \text{ kč/hod} \end{aligned} \quad (5.34)$$

### Náklady na strojní práci

$$N_{sm} = k_c \left( \frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} = 1,13 \left( \frac{60}{60} + \frac{30}{60} \right) + \frac{221}{60} = 5,38 \text{ kč} \quad (5.35)$$

$$N_s = t_{as} \cdot N_{sm} = 2\,556 \cdot 5,38 = 13\,752,6 \text{ kč} \quad (5.36)$$

Tab. 19 Náklady na strojní práci

Nástroj	Náklady na strojní práci [Kč]
<b>Fréza 3/4</b>	13 752,6
<b>Fréza 4/6</b>	10 183,3

**Počet výměn nástroje**

$$z_v = \frac{t_{as}}{T} \cdot k_r = \frac{2\,556}{812} \cdot 0,85 = 2,7 \quad (5.37)$$

Tab. 20 Počet výměn nástroje

Nástroj	Počet výměn nástroje
<b>Fréza 3/4</b>	2,7
<b>Fréza 4/6</b>	2,1

**Náklady na výměnu nástroje**

$$N_{vnm} = k_c \cdot \left( \frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{O_s}{60} = 1,13 \cdot \left( \frac{180}{60} + \frac{30}{60} \right) + \frac{144,5}{60} = 6,36 \text{ Kč} \quad (5.38)$$

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 60 \cdot 6,36 \cdot 2,7 = 1\,021,6 \text{ Kč} \quad (5.39)$$

Tab. 21 Náklady na výměnu nástroje

Nástroj	Náklady na výměnu nástroje [Kč]
<b>Fréza 3/4</b>	1 021,6
<b>Fréza 4/6</b>	812,4

**Náklady na nástroj vztažené na jednu trvanlivost břítu**

$$\begin{aligned}
 N_{nT} &= \frac{C_n}{z_o + 1} + t_{os} \cdot k_c \left( \frac{M_{os}}{60} + \frac{HRP_{os}}{60} \right) \cdot \frac{z_o}{z_o + 1} + N_{pos} \\
 &= \frac{103\,000}{30 + 1} + 45 \cdot 1,13 \left( \frac{85}{60} + \frac{30}{60} \right) \cdot \frac{30}{30 + 1} + 250 \\
 &= 3\,666,9 \text{ Kč}
 \end{aligned}
 \tag{5.40}$$

Tab. 22 Náklady na nástroje vztažené na jednu trvanlivost břítu

Nástroj	Náklady na nástroje na jednu T [Kč]
<b>Fréza 3/4</b>	3 666,9
<b>Fréza 4/6</b>	4 537,9

**Náklady na nástroje**

$$N_n = z_{vn} \cdot N_{nT} = 2,7 \cdot 3\,666,9 = 9\,812,3 \text{ Kč}
 \tag{5.41}$$

Tab. 23 Náklady na nástroje

Nástroj	Náklady na nástroje [Kč]
<b>Fréza 3/4</b>	9 812,3
<b>Fréza 4/6</b>	9 656,5

### Výrobní náklady

$$N = N_s + N_{vn} + N_n = 13\,752,6 + 1\,021,6 + 9\,812,3 = 24\,586,6 \text{ Kč} \quad (5.42)$$

Tab. 24 Výrobní náklady

Nástroj	Výrobní náklady [Kč]
Fréza 3/4	24 586,6
Fréza 4/6	20 652,2

### Náklady na metr pásu

$$N_m = \frac{N}{n_p \cdot l_c} = \frac{24\,586,6}{20 \cdot 201} = 6,12 \text{ Kč/m} \quad (5.43)$$

Tab. 25 Náklady na metr pásu

Nástroj	Náklady na metr pásu [Kč]
Fréza 3/4	6,12
Fréza 4/6	5,14

**Optimální trvanlivost břítu**

$$T_{optN} = \frac{t_{vn} \cdot N_{vnm} + N_{nT}}{N_{sm}} \cdot k_r \cdot (m - 1)$$

$$= \frac{60 \cdot 6,36 + 3\,666,9}{5,38} \cdot 0,85 \cdot (3 - 1) = 1\,279,8 \text{ min} \quad (5.44)$$

Tab. 26 Optimální trvanlivost břítu

Nástroj	Optimální trvanlivost břítu [min]
<b>Fréza 3/4</b>	1 279,8
<b>Fréza 4/6</b>	1 166,3

**Optimální řezná rychlost**

$$v_{c_{optn}} = v_c \cdot \sqrt[m]{\frac{T}{T_{optN}}} = 51,8 \cdot \sqrt[3]{\frac{812}{1\,279,8}} = 44,5 \text{ m/min} \quad (5.45)$$

Tab. 27 Optimální řezná rychlost

Nástroj	Optimální řezná rychlost [m/min]
<b>Fréza 3/4</b>	44,5
<b>Fréza 4/6</b>	40,4

**Otáčky nástroje pro optimální řeznou rychlost**

$$n = \frac{1000 \cdot v_{c_{optN}}}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 44,5}{\pi \cdot 220} = 64,5 \text{ ot/min} \quad ( 5.46 )$$

Tab. 28 Otáčky nástroje

Nástroj	Otáčky nástroje [ot/min]
<b>Fréza 3/4</b>	64,5
<b>Fréza 4/6</b>	75,7

**Posuv pro optimální řezné podmínky**

$$f = n \cdot f_z \cdot z = 64,5 \cdot 0,048 \cdot 10 = 30,9 \text{ mm/min} \quad ( 5.47 )$$

Tab. 29 Posuv

Nástroj	Posuv [mm/min]
<b>Fréza 3/4</b>	30,9
<b>Fréza 4/6</b>	34,0



**Strojní čas pro optimální řeznou rychlost**

$$t_{As} = \left( \frac{L \cdot B}{b \cdot n \cdot f} + \frac{L \cdot B}{b \cdot n \cdot f} + t_{pu} \right) \cdot i =$$

$$\left( \frac{47,4 \cdot 125,4}{125,4 \cdot 30,9} + \frac{47,4 \cdot 125,4}{125,4 \cdot 500} + \frac{11}{60} \right) \cdot 1\,603 = 2\,902 \text{ min} = 48,4 \text{ hod} \quad (5.48)$$

Tab. 30 Strojní čas

Nástroj	Strojní čas [hod]
<b>Fréza 3/4</b>	48,4
<b>Fréza 4/6</b>	36,2

**Náklady na strojní práci**

$$N_s = t_{as} \left[ k_c \left( \frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] =$$

$$2\,902 \cdot \left[ 1,13 \left( \frac{60}{60} + \frac{30}{60} \right) + \frac{221}{60} \right] = 15\,610,5 \text{ Kč} \quad (5.49)$$

Tab. 31 Náklady na strojní práci

Nástroj	Náklady na strojní práci [Kč]
<b>Fréza 3/4</b>	15 610,5
<b>Fréza 4/6</b>	11 678,7

**Počet výměn nástroje pro optimální řezné podmínky**

$$z_v = \frac{t_{as}}{T} \cdot k_r = \frac{2\,902}{1\,279,8} \cdot 0,85 = 1,93 \quad (5.50)$$

Tab. 32 Počet výměn nástroje

Nástroj	Počet výměn nástroje
<b>Fréza 3/4</b>	1,93
<b>Fréza 4/6</b>	1,58

**Náklady na výměnu nástroje**

$$N_{vn} = t_{vn} \left[ k_c \cdot \left( \frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{O_s}{60} \right] \cdot z_v =$$

$$60 \left[ 1,13 \cdot \left( \frac{180}{60} + \frac{30}{60} \right) + \frac{144,5}{60} \right] \cdot 1,93 = 736,0 \text{ Kč} \quad (5.51)$$

Tab. 33 Náklady na výměnu nástroje

Nástroj	Náklady na výměnu nástroje [Kč]
<b>Fréza 3/4</b>	736,0
<b>Fréza 4/6</b>	604,2

**Náklady na nástroje pro optimální řezné podmínky**

$$N_n = z_{vn} \cdot N_{nT} = 1,93 \cdot 3\,666,9 = 7\,069,2\text{kč} \quad (5.52)$$

Tab. 34 Náklady na nástroje

Nástroj	Náklady na nástroje [Kč]
Fréza 3/4	7 069,2
Fréza 4/6	7 181,6

**Výrobní náklady pro optimální řezné podmínky**

$$N = N_s + N_{vn} + N_n = 15\,610,5 + 736,0 + 7\,069,2 = 23\,415,7\text{ kč} \quad (5.53)$$

Tab. 35 Výrobní náklady

Nástroj	Výrobní náklady [Kč]
Fréza 3/4	23 415,7
Fréza 4/6	19 464,4

**Náklady na metr pásu**

$$N_m = \frac{N}{i_p \cdot l_c} = \frac{23\,415,7}{20 \cdot 201} = 5,82\text{ kč/m} \quad (5.54)$$

Tab. 36 Náklady na metr pásu

Nástroj	Náklady na metr pásu [Kč/m]
Fréza 3/4	6,82
Fréza 4/6	4,84

**Souhrn výsledků**

Tab. 37 Souhrn výsledků – Varianta B

Veličina	Stávající podmínky		Optimalizované podmínky	
	Fréza 3/4	Fréza 4/6	Fréza 3/4	Fréza 4/6
<b><math>z_v</math></b>	2,68	2,13	1,93	1,58
<b>T [min]</b>	812	756,3	1 279,8	1 166,3
<b><math>v_c</math> [m/min]</b>	75	64,5	90	75,7
<b>n [ot/min]</b>	812	756,3	1 279,8	1 166,3
<b>f [mm/min]</b>	36	30,9	40,5	34,0

Lze vidět, že u stroje pořízeného s dotací jsou řezné podmínky nastaveny nevhodně. Vypočtená optimální trvanlivost břitu je vyšší než ta, které je při současných řezných podmínkách dosaženo. Podle Tylorova vztahu je proto nutné snížit řeznou rychlost. Skutečnou trvanlivost při aplikaci optimálních řezných podmínek, je nutné experimentálně ověřit přímo v provozu.

## 5.7 Výpočet řezných podmínek – varianta C

Aby nedocházelo k nárůstu zásob hotových výrobků na skladě, je v opodstatněných případech nutné vyrobit menší výrobní dávku. Díky tomu nejsou vázány finanční prostředky ve skladových zásobách, ale toto rozhodnutí má za následek horší využití kapacit a společně s tím navýšení výrobních nákladů.

V následující části bude uvažováno s výrobní dávkou 20, 15, 10 a 5 pásů. Změna množství pásů se projeví především na hodnotě strojního času.

Zároveň bude vyhodnocen vliv pořízení druhého nástroje. Díky tomu bude čas výměny nástroje zkrácen o čas přestavení nástroje. Tímto opatřením významně klesnou náklady na výměnu nástroje. Předpokládaná doba výměny nástroje je v této variantě 10 minut.

### Trvanlivost nástroje

Z protokolů měření trvanlivosti nástroje bylo zjištěno, že změna počtu pásů nemá významný vliv na počet vyfrézovaných taktů na jednu trvanlivost nástroje. Počet cyklů je přibližně konstantní bez ohledu na počet frézovaných pásů. Z toho vyplývá, že trvanlivost nástroje klesá se zmenšujícím se počtem současně frézovaných pásů. Počet výměn nástroje je tedy přibližně nezávislý na velikosti výrobní dávky a tím jsou náklady na nástroje pro výrobní dávku konstantní, bez ohledu na velikost výrobní dávky.

Tab. 38 Trvanlivost nástroje

Počet pásů	Trvanlivost [min]	
	1 Nástroj	2 Nástroje
20	812	
15	744	
10	676	
5	608	

**Délka dráhy automatického chodu stroje**

$$L = \sqrt{r^2 - (r - a)^2} + 1,5 + n_p \cdot b_p =$$

$$\sqrt{110^2 - (110 - 4)^2} + 1,5 + 20 \cdot 0,9 = 47,4 \text{ mm} \quad (5.55)$$

Tab. 39 Délka dráhy automatického chodu stroje

Délka dráhy automatického chodu stroje [mm]		
Počet pásů	1 Nástroj	2 Nástroje
20		47,4
15		42,9
10		38,4
5		33,9

**Strojní čas**

$$t_{As} = \left( \frac{L \cdot B}{b \cdot f_m} + \frac{L \cdot B}{b \cdot f_m} + t_{pu} \right) \cdot i =$$

$$= \left( \frac{47,4 \cdot 125,4}{125,4 \cdot 36} + \frac{47,4 \cdot 125,4}{125,4 \cdot 500} + \frac{11}{60} \right) 1\,603 = 2\,556 \text{ min} = 42,6 \text{ hod} \quad (5.56)$$

Tab. 40 Strojní čas

Strojní čas [hod]		
Počet pásů	1 Nástroj	2 Nástroje
20		42,6
15		39,0
10		35,5
5		31,9

**Náklady na strojní práci**

$$N_{sm} = k_c \left( \frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} = 1,13 \left( \frac{60}{60} + \frac{30}{60} \right) + \frac{221}{60} = 5,38 \text{ Kč} \quad (5.57)$$

$$N_s = t_{as} \cdot N_{sm} = 2\,556 \cdot 5,38 = 13\,752,6 \text{ Kč} \quad (5.58)$$

Tab. 41 Náklady na strojní práci

Náklady na strojní práci [Kč]		
Počet pásů	1 Nástroj	2 Nástroje
20		13 752,6
15		12 597,5
10		11 442,4
5		10 287,3

**Náklady na výměnu nástroje**

$$N_{vn} = t_{vn} \left[ k_c \cdot \left( \frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{O_s}{60} \right] \cdot z_v =$$

$$10 \left[ 1,13 \cdot \left( \frac{180}{60} + \frac{30}{60} \right) + \frac{144,5}{60} \right] \cdot 2,7 = 170,3 \text{ Kč} \quad (5.59)$$

Tab. 42 Náklady na výměnu nástroje

Náklady na výměnu nástroje [Kč]		
Počet pásů	1 Nástroj	2 Nástroje
20		
15		
10	1 021,6	170,3
5		

### Výrobní náklady

$$N = N_s + N_{vn} + N_n = 13\,752,6 + 170,3 + 9\,812,3 = 23\,735,2 \text{ Kč} \quad (5.60)$$

Tab. 43 Celkové výrobní náklady v závislosti na počtu pásů

Výrobní náklady [Kč]		
Počet pásů	1 Nástroj	2 Nástroje
20	24 586,6	23 735,2
15	23 431,5	22 580,0
10	22 276,3	21 425,0
5	21 121,2	20 269,9

### Náklady na metr pásu

$$N_m = \frac{N}{i_p \cdot l_c} = \frac{23\,735,2}{20 \cdot 201} = 5,90 \text{ Kč/m} \quad (5.61)$$

Tab. 44 Náklady na metr pásu

Náklady na metr pásu [Kč/m]		
Počet pásů	1 Nástroj	2 Nástroje
20	6,12	5,90
15	7,77	7,49
10	11,08	10,66
5	21,02	20,17



**Optimální trvanlivost břítu**

$$T_{optN} = \frac{t_{vn} \cdot N_{vnm} + N_{nT}}{N_{sm}} \cdot k_r \cdot (m - 1)$$

$$= \frac{10 \cdot 6,4 + 3\ 666,9}{5,4} \cdot 0,85 \cdot (3 - 1) = 1\ 179,2 \text{ min} \quad (5.62)$$

Tab. 45 Trvanlivost břítu (opt. řezné podmínky)

Optimální trvanlivost břítu [min]		
Počet pásů	1 Nástroj	2 Nástroje
20	1 279,8	1 179,2
15		
10		
5		

**Řezná rychlost pro optimální řezné podmínky**

$$v_{c_{optn}} = v_c \cdot \sqrt[m]{\frac{T}{T_{optN}}} = 51,8 \cdot \sqrt[3]{\frac{812}{1\ 179,2}} = 45,8 \text{ m/min} \quad (5.63)$$

Tab. 46 Řezná rychlost (opt. řezné podmínky)

Řezná rychlost [m/min]		
Počet pásů	1 Nástroj	2 Nástroje
20	44,5	45,8
15	43,3	44,5
10	41,9	43,1
5	40,4	41,6

**Otáčky nástroje pro optimální řezné podmínky**

$$n = \frac{1000 \cdot v_{c_{optN}}}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 45,8}{\pi \cdot 220} = 66,2 \text{ ot/min} \quad ( 5.64 )$$

Tab. 47 Otáčky nástroje (opt. řezné podmínky)

Otáčky nástroje [ot/min]		
Počet pásů	1 Nástroj	2 Nástroje
<b>20</b>	64,5	66,2
<b>15</b>	62,6	64,3
<b>10</b>	60,6	62,3
<b>5</b>	58,5	60,1

**Posuv pro optimální řezné podmínky**

$$f = n \cdot f_z \cdot z = 66,2 \cdot 0,048 \cdot 10 = 31,8 \text{ mm/min} \quad ( 5.65 )$$

Tab. 48 Posuv (opt. řezné podmínky)

Posuv [mm/min]		
Počet pásů	1 Nástroj	2 Nástroje
<b>20</b>	30,9	31,8
<b>15</b>	30,0	30,9
<b>10</b>	29,0	29,9
<b>5</b>	28,0	28,7

**Strojní čas pro optimální řezné podmínky**

$$t_{As} = \left( \frac{l \cdot B}{b \cdot n \cdot f} + \frac{l \cdot B}{b \cdot n \cdot f} + t_{pu} \right) \cdot i =$$

$$\left( \frac{47,4 \cdot 125,4}{125,4 \cdot 31,8} + \frac{47,4 \cdot 125,4}{125,4 \cdot 500} + \frac{11}{60} \right) \cdot 1\,603 = 2\,836 \text{ min} = 47,3 \text{ hod} \quad (5.66)$$

Tab. 49 Strojní čas (opt. řezné podmínky)

Strojní čas [hod]		
Počet pásů	1 Nástroj	2 Nástroje
20	48,4	47,3
15	45,4	44,3
10	42,2	41,3
5	39,0	38,1

**Náklady na strojní práci pro optimální řezné podmínky**

$$N_s = t_{as} \left[ k_c \left( \frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] =$$

$$2\,836 \cdot \left[ 1,13 \left( \frac{60}{60} + \frac{30}{60} \right) + \frac{221}{60} \right] = 15\,254,9 \text{ Kč} \quad (5.67)$$

Tab. 50 Náklady na strojní práci (opt. řezné podmínky)

Náklady na strojní práci [Kč]		
Počet pásů	1 Nástroj	2 Nástroje
20	15 610,5	15 254,9
15	14 633,9	14 302,5
10	13 624,4	13 318,1
5	12 576,5	12 296,3

**Počet výměn nástroje pro optimální řezné podmínky**

$$z_v = \frac{t_{as}}{T} \cdot k_r = \frac{2\,836}{1\,179,2} \cdot 0,85 = 2,04 \quad (5.68)$$

Tab. 51 Počet výměn nástroje (opt. řezné podmínky)

Počet výměn nástroje		
Počet pásů	1 Nástroj	2 Nástroje
<b>20</b>	1,93	2,04
<b>15</b>	1,81	1,92
<b>10</b>	1,68	1,79
<b>5</b>	1,55	1,65

**Náklady na výměnu nástroje pro optimální řezné podmínky**

$$N_{vn} = t_{vn} \left[ k_c \cdot \left( \frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{O_s}{60} \right] \cdot z_v =$$

$$10 \left[ 1,13 \cdot \left( \frac{180}{60} + \frac{30}{60} \right) + \frac{144,5}{60} \right] \cdot 2,04 = 130,1 \text{ Kč} \quad (5.69)$$

Tab. 52 Náklady na výměnu nástroje (opt. řezné podmínky)

Náklady na výměnu nástroje [Kč]		
Počet pásů	1 Nástroj	2 Nástroje
<b>20</b>	736,0	130,1
<b>15</b>	690,0	122,0
<b>10</b>	642,4	113,6
<b>5</b>	593,0	104,9

**Náklady na nástroje pro optimální řezné podmínky**

$$N_n = z_{vn} \cdot N_{nT} = 2,04 \cdot 3\,666,9 = 7\,497,3 \text{ Kč} \quad (5.70)$$

Tab. 53 Náklady na nástroje (opt. řezné podmínky)

Náklady na nástroje [Kč]		
Počet pásů	1 Nástroj	2 Nástroje
<b>20</b>	7 069,2	7 497,3
<b>15</b>	6 627,0	7 029,3
<b>10</b>	6 169,8	6 545,5
<b>5</b>	5 695,3	6 043,3

**Výrobní náklady pro optimální řezné podmínky**

$$N = N_s + N_{vn} + N_n = 15\,254,9 + 130,1 + 7\,497,3 = 22\,882,3 \text{ Kč} \quad (5.71)$$

Tab. 54 Výrobní náklady (opt. řezné podmínky)

Výrobní náklady [Kč]		
Počet pásů	1 nástroj	2 nástroje
<b>20</b>	23 415,7	22 882,3
<b>15</b>	21 950,9	21 453,8
<b>10</b>	20 436,6	19 977,1
<b>5</b>	18 864,8	18 444,5

**Náklady na metr pásu pro optimální řezné podmínky**

$$N_m = \frac{N}{i_p \cdot l_c} = \frac{22\,882,3}{20 \cdot 201} = 5,69 \text{ Kč/m} \quad (5.72)$$

Tab. 55 Náklady na metr pásu (opt. řezné podmínky)

Náklady na metr pásu [Kč]		
Počet pásů	1 Nástroj	2 Nástroje
<b>20</b>	5,82	5,69
<b>15</b>	7,28	7,12
<b>10</b>	10,17	9,94
<b>5</b>	18,77	18,35

**Souhrn výsledků**

Tab. 56 Souhrn výsledků – Varianta C (20 pásů)

Veličina	Stávající podmínky		Optimalizované podmínky	
	1 nástroj	2 nástroje	1 nástroj	2 nástroje
<b>z<sub>v</sub></b>	2,68	2,68	1,93	2,04
<b>T [min]</b>	812,3	812,3	1 279,8	1 179,2
<b>v<sub>c</sub> [m/min]</b>	51,8	51,8	44,5	45,8
<b>n [ot/min]</b>	75	64,5	75	66,2
<b>f [mm/min]</b>	36	30,9	36	31,8

Vypočtená hodnota trvanlivosti bříty nástroje je opět vyšší, než které se dosahuje při stávajících řezných podmínkách. Reálnou trvanlivost po aplikaci optimálních řezných podmínek je potřeba experimentálně ověřit přímo v provozu.

## 6 Ekonomické zhodnocení

Optimalizace se provádí s cílem snížit výrobní náklady, a tím dosáhnout vyšší konkurenceschopnosti. K posouzení výsledků optimalizace slouží ekonomické zhodnocení.

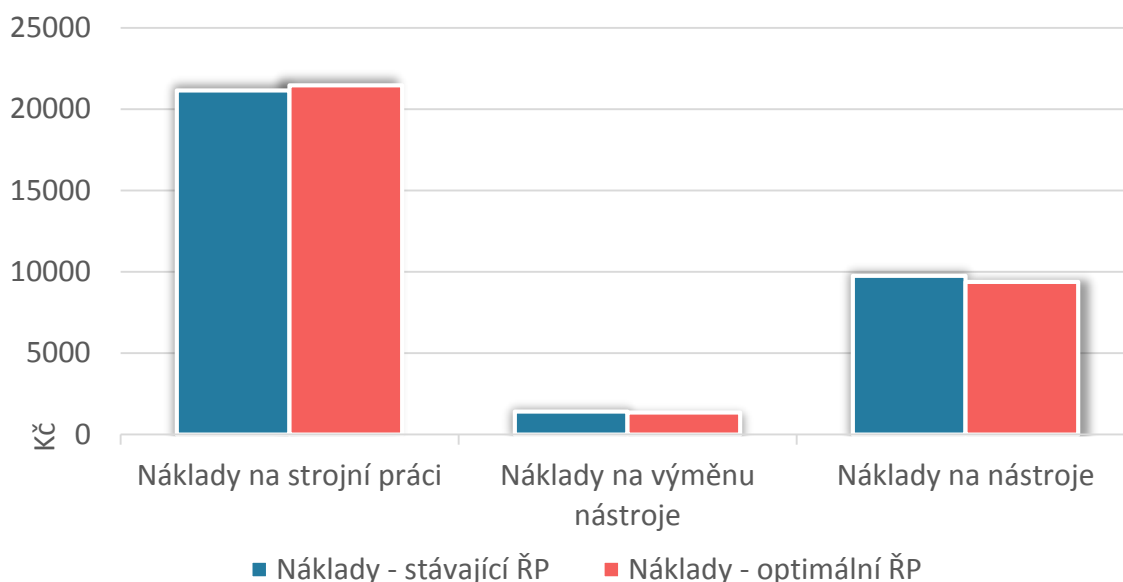
### 6.1 Varianta A

První varianta výpočtu optimálních řezných podmínek porovnává výsledky optimalizace se současnou kalkulací nákladů.

Tab. 57 Porovnání výsledků – Varianta A

Veličina	Podniková kalkulace	Stávající ŘP	Optimalizované ŘP
N [Kč]	30 270,6	32 307,9	32 195,3
N [Kč/m]	7,53	8,04	8,01

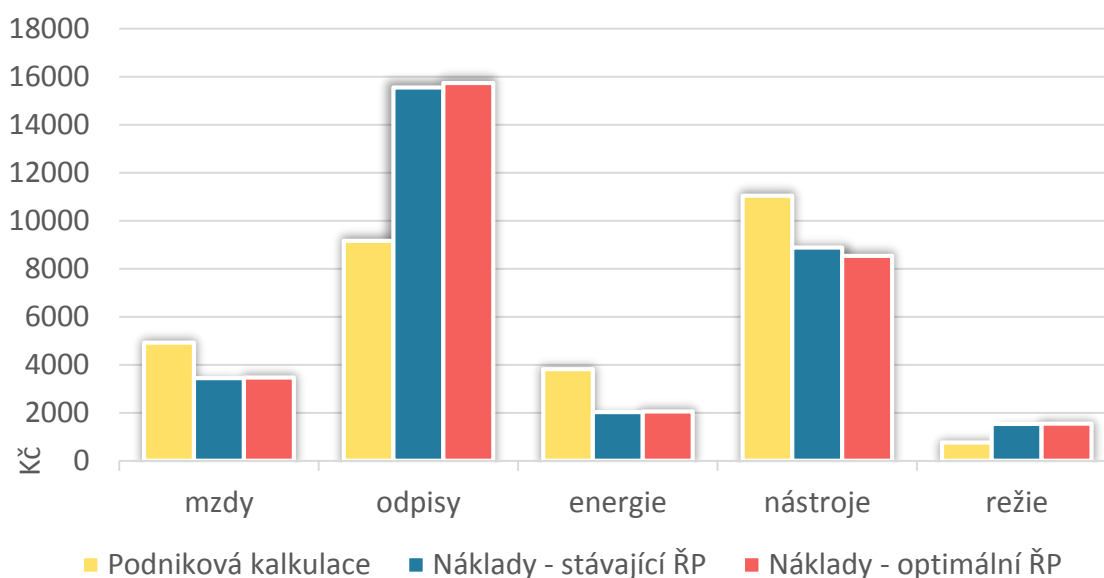
Struktura nákladů



Obr. 15 Graf - struktura nákladů

Hlavní nákladovou položku tvoří náklady na strojní práci, a to hlavně díky vysokým odpisům strojního vybavení. Podniková kalkulace rozděluje náklady podle jejich ekonomického charakteru. Proto je po porovnání potřeba seskupit náklady do skupin.

Porovnání agregovaných nákladů



Obr. 16 Graf - porovnání agregovaných nákladů – Varianta A

Z porovnání vyplývá, že podniková kalkulace počítá s nižšími náklady v položce odpisů, což je způsobeno rozdílnou výchozí cenou stroje. Podniková kalkulace neuvažuje do ceny stroje příslušenství v podobě navíjecího a odvíjecího zařízení, které ve skutečnosti přímo přísluší k frézce. Proto lze konstatovat, že kalkulace provedená v rámci této diplomové práce je přesnější a podává lepší přehled o skutečných nákladech.

Optimalizací se dosáhlo pouze minimálního snížení výrobních nákladů, lze vidět, že změny jednotlivých nákladových skupin jsou téměř zanedbatelné.

Z grafu vyplývá, že největšími nákladovými položkami jsou fixní náklady na odpisy strojního vybavení a variabilní náklady na opotřebení nástroje. Vysoká pořizovací cena těchto tvarových nástrojů souvisí s jejich zakázkovou výrobou podle potřeb zákazníka, která není u žádného výrobce standardizována.

Mzdové výrobní náklady jsou naopak díky vysoké automatizaci a vícestrojové obsluze nízké. Do budoucna proto může rentabilitu výroby spíše ohrozit růst nákladů na nástroje.

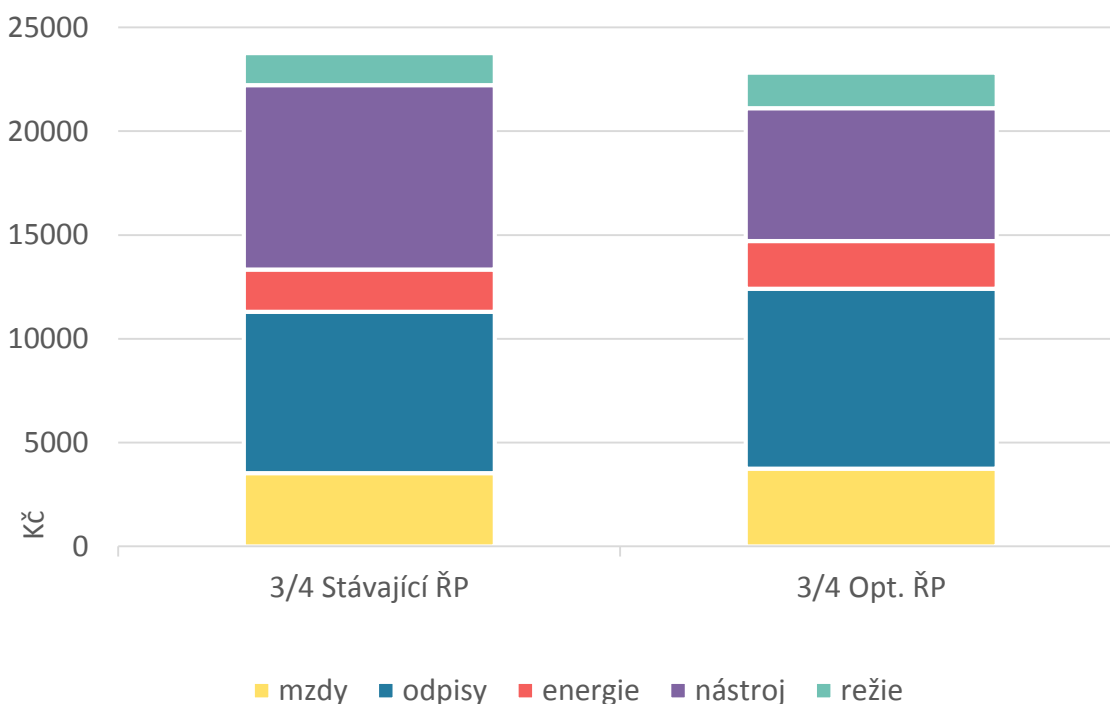


## 6.2 Varianta B

Druhá varianta výpočtu porovnává náklady na výrobu při použití dvou různých druhů nástrojů. Volbu nemůže výroba ovlivnit – nástroje jsou dány požadavky zákazníka na tvar profilu zubu. Rentabilitu výroby však různé typy zubů pásů ovlivňují. Výsledky této kalkulace mohou sloužit jako podklad pro obchodní oddělení při tvorbě cen.

Tab. 58 Porovnání výsledků – Varianta B

Veličina	Stávající ŘP		Optimalizované ŘP	
	Fréza 3/4	Fréza 4/6	Fréza 3/4	Fréza 4/6
<b>N [Kč]</b>	24 586,6	20 652,2	23 415,7	19 464,4
<b>N [Kč/m]</b>	6,12	5,14	5,82	4,84



Obr. 17 Graf – porovnání výsledků – Varianta B

Je vidět, že rozdíl v nákladech mezi dvěma různými nástroji je tvořen z velké části cenou nástroje. Výše i struktura nákladů je současně ovlivněna také tvarem nástroje. Hloubka profilu zubu ovlivňuje délku dráhy najetí nástroje, čímž se mění strojní čas.

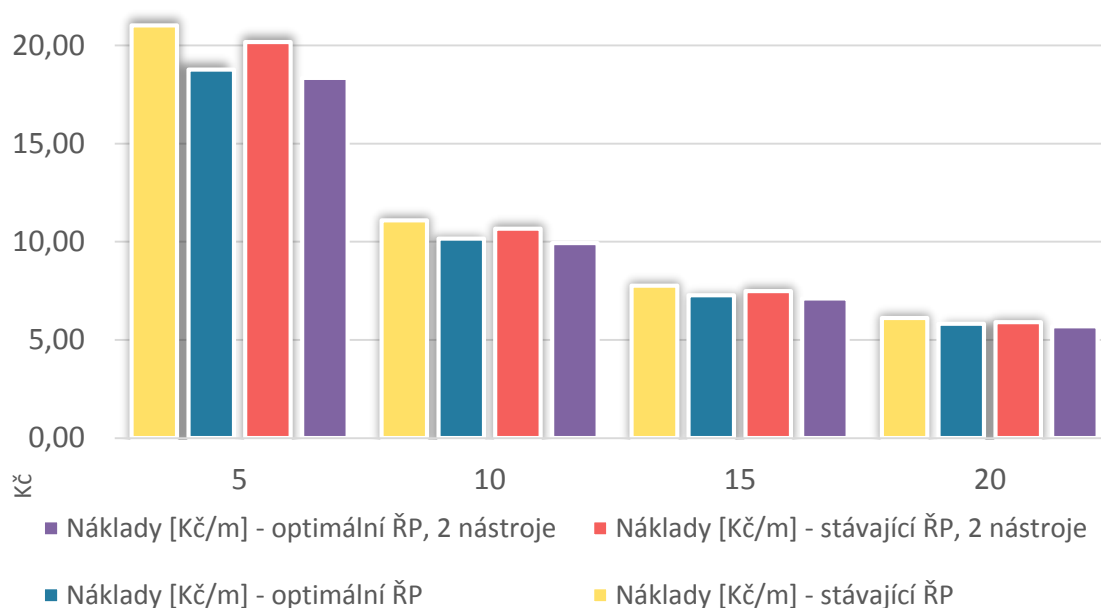
Jestliže jsou na trhu zavedeny stejné prodejní ceny pro všechny druhy zubů, je potřeba provést kalkulaci nákladů pro všechny vyráběné zubové rozteče. Stanovovat obchodní ceny a hodnotit rentabilitu zakázek je pak nutné na základě přesných kalkulací výrobních nákladů.

### 6.3 Varianta C

Třetí varianta výpočtu zkoumá vliv organizačních opatření při plánování výroby – velikost výrobní dávky a zkrácení doby výměny nástroje.

Tab. 59 Souhrn výsledků – Varianta C

Veličina	Stávající ŘP		Optimalizované ŘP	
	1 nástroj	2 nástroje	1 nástroj	2 nástroje
<b>N [Kč/m] – 5 pásů</b>	21,02	20,17	18,77	18,35
<b>N [Kč/m] – 10 pásů</b>	11,08	10,66	10,17	9,94
<b>N [Kč/m] – 15 pásů</b>	7,77	7,49	7,28	7,12
<b>N [Kč/m] – 20 pásů</b>	6,12	5,90	5,82	5,69



Obr. 18 Graf – porovnání výsledků – Varianta C

S rostoucím počtem pásů výrazně klesají výrobní náklady, a to díky vysokému podílu fixních nákladů. Graf výsledků varianty C ukazuje na hlavní potenciál pro zvýšení rentability v podmínkách PILANA Metal. Srovnání poskytuje důležité ekonomické informace a hlavní kritéria pro stanovení minimálních výrobních dávek. Ideálním stavem je plné využití výrobní kapacity. Ale běžně je potřeba splnit speciální objednávky pásů, které mají nízký objem prodeje a neprodané pásy z výrobní dávky 20ti kusů by dlouho ležely na skladě, což se může negativně projevit na finančních tocích podniku a ovlivnit jeho platební schopnost.

Porovnání výsledků varianty C může sloužit jako zdroj informací při rozhodování, zda je výhodnější zadat do výroby menší dávku nebo navýšit sklad hotových výrobků. Rozhodování o velikosti výrobní dávky by měl v těchto případech technický úsek provádět ve spolupráci s obchodním a ekonomickým oddělením.

Rozhodnutí o pořízení dvou shodných nástrojů musí být opět provedeno s ohledem na finanční zdroje. Pokud by se měl pořídit druhý nástroj ke všem typům zubů, vyžadovalo by to investici v řádu milionů korun. Před nákupem je nutné provést posouzení, zda výsledné snížení nákladů na výrobu vykompenzuje náklady na zvýšení skladu nástrojů. Při větším množství nástrojů na skladě také hrozí jejich morální zastarání.

### **6.4 Přehled úspor**

Výsledkem optimalizace dle kritéria minimálních výrobních nákladů je snížení nákladů na výrobu jednoho metru pásu. Následující tabulka shrnuje možné úspory při použití optimálních řezných podmínek:

Tab. 60 Úspory

Varianta (pásy/nástroje)	Náklady [Kč/m]		
	Stávající ŘP	Optimalizované ŘP	Úspora [%]
<b>A – fréza 3/4 (20/1)</b>	8,04	8,01	0,35
<b>B – fréza 3/4 (20/1)</b>	6,12	5,82	4,76
<b>B – fréza 4/6 (20/1)</b>	5,14	4,84	5,75
<b>C – fréza 3/4 (20/1)</b>	6,12	5,82	4,76
<b>C – fréza 3/4 (15/1)</b>	7,77	7,28	6,32
<b>C – fréza 3/4 (10/1)</b>	11,08	10,17	8,26
<b>C – fréza 3/4 (5/1)</b>	21,02	18,77	10,68
<b>C – fréza 3/4 (20/2)</b>	5,90	5,69	3,59
<b>C – fréza 3/4 (15/2)</b>	7,49	7,12	4,99
<b>C – fréza 3/4 (10/2)</b>	10,66	9,94	6,76
<b>C – fréza 3/4 (5/2)</b>	20,17	18,35	9,01

Výše úspor při frézování malého množství pilových pásů je pouze teoretická. Jak již bylo zmíněno, trvanlivost nástroje s množstvím pásů klesá, proto reálné úspory nemusí dosáhnout vypočtených hodnot.

Aplikace optimálních řezných podmínek společně s efektivním plánováním výrobních dávek má největší potenciál úspor nákladů. Rozdíl nákladů na metr u jednoho typu zubů může činit až 15,33 Kč/m (rozdíl mezi variantou C 3/4, výrobní dávka 5 pásů s využitím 1 nástroje a výrobní dávka 20 pásů s využitím 2 nástrojů).

Zkrácení doby výměny nástroje má ještě sekundární efekt v podobě snížení dávkového času. Díky tomu můžeme za stejné časové období vyprodukovat více výrobků a tím se ekonomický přínos tohoto opatření ještě zvýší.

## 7 Závěr

Tuto diplomovou práci jsem vypracoval podle zadání firmy PILANA Metal. V úvodu jsem popsal vlastnosti pilových pásů a způsob jejich výroby. Dále jsem rozebral teoretické podklady problematiky optimalizace řezných podmínek. Podle charakteru výroby a požadavků podniku bylo vybráno optimalizační kritérium minimálních výrobních nákladů.

V průběhu shromažďování podkladů jsem zjistil, že v podniku není zavedeno systematické monitorování trvanlivosti nástrojů a řezné podmínky stanovuje obsluha stroje na základě zkušeností. Proto jsem v rámci této práce navrhnul systém sledování trvanlivosti nástrojů, včetně sledování velikosti odbroušené vrstvy při přestřžení nástroje. Hodnoty získané tímto monitorováním sloužily k výpočtům optimálních řezných podmínek v další části této práce.

Na základě získaných podkladů z oblasti nákladů na výrobu pilových pásů jsem pomocí kritéria minimálních výrobních nákladů vypočetl optimální trvanlivost nástroje. Po jejím dosazení do Taylorova vztahu jsem vypočetl novou řeznou rychlost. Výpočet probíhal v několika variantách a s různými modifikacemi.

Dále jsem provedl ekonomické zhodnocení výrobních nákladů s využitím optimalizovaných řezných podmínek.

Výsledek varianty A potvrdil správné nastavení současných řezných podmínek.

Varianta B ukázala rozdílné náklady na výrobu různého druhu ozubení. Vypočtená optimální trvanlivost břitu, je vyšší než současná trvanlivost nástrojů. Proto doporučuji aplikovat nové řezné podmínky a tím zvýšit trvanlivost nástroje. Tato skutečnost je dána kombinací relativně levného stroje a velmi drahého nástroje.

Do budoucna by mělo obchodní oddělení stanovovat prodejní ceny a hodnotit rentabilitu zakázek na základě porovnání výrobních nákladů všech typů zubů.

Varianta C se zabývala hodnocením vlivů organizačních opatření ve výrobě. Výpočet ukázal, že výrobní náklady jsou nejnižší při kombinaci velké výrobní dávky, využití optimálních řezných podmínek a využití dvou nástrojů pro zkrácení doby výměny nástroje. Největší vliv na snižování výrobních nákladů má organizační opatření, v podobě změny velikosti výrobní dávky. Předpokládané zvýšení objemu výroby dává možnost aplikování těchto organizačních opatření v provozu.

## 8 Bibliografie

1. VASILKO, Karol and MÁDL, Jan, Ústí nad Labem : Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem. ISBN ISBN 978-80-7414-460-8
2. AGGARWAL, Aman and SINGH, Hari, 2005. Vol. vol. 30, no. issue 6. [cit.02.06.2015]. DOI 10.1007/978-3-540-39930-8\_28. dostupné z: <http://www.ias.ac.in/sadhana/Pdf2005Dec/PE1312.pdf>
3. PILANA. Nástroje na dřevo a kov. [Online] [www.pilana.cz](http://www.pilana.cz).
4. PILANA. Řezné nástroje na kov. Hulín, 2004.
5. Kesel GmbH. Precision down to the last tooth: FS 1500 band saw blade milling machine. Kempten, 2012.
6. FS 1500 Manual. Kempten, 2012.
7. Saw blade milling cutters,. Star SU [online], [cit.30.05.2015]. dostupné z: <http://www.star-su.com/cutting-tools/gear-cutting-tools/milling-cutters/saw-blade>
8. MÁDL, Jan a KVASNIČKA, Ivo. Optimalizace obráběcího procesu. Vyd. 1. Praha : ČVUT, 1998. str. 168 s. ISBN 80-010-1864-4.
9. OTHMANI, Romdhane, HBAIEB, Moncef and BOUZID, Wassila, 2011. Vol. vol. 54, no. 9-12p. 1023-1032. [cit.09.06.2015]. DOI 10.1007/s00170-010-3017-4. dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-010-3017-4>
10. PILANA Metal. Vnitropodniková dokumentace. Hulín, 2015.
11. MARINOV, Valery Experimental study on the abrasive wear in metal cutting. 1-2, 1996, Wear, Sv. vol. 197, stránky 242-247. ISSN 00431648.
12. Pilové pásy na kov. Technické předpisy. Praha : Český normalizační institut, 1985.
13. HITOMI, KATSUNDO ,Analysis of optimal machining conditions for flow-type automated manufacturing systems.. issue 12, 1991, International Journal of Production Research, Sv. vol. 29, stránky 2423-2432.