

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



**OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK
U VYBRANÉ SOUČÁSTI VE VYBRANÉM
PODNIKU**

OPTIMISATION OF CUTTING CONDITIONS AT A SELECTED PART AT
A SELECTED ENTRPRISE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Jan Veselý

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

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Studijní program: Strojní inženýrství

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Veselý** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **438610**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace řezných podmínek u vybrané součásti ve vybraném podniku

Název diplomové práce anglicky:

Optimisation of cutting conditions at a selected part at a selected enterprise

Pokyny pro vypracování:

Rozbor stávajícího postupu výroby vybrané součásti
Určení optimálních řezných podmínek u vybraného operačního úseku u této součásti
Ekonomické zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Mádl, J. Kvasnička, I. Optimalizace obráběcího procesu. 168 s., 1999, ČVUT, Praha

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


prof. Ing. Jan Mádl, CSc., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **19.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____


prof. Ing. Jan Mádl, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

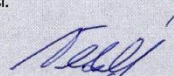

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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.

23.4.2019

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma *Optimalizace řezných podmínek u vybrané součásti ve vybraném podniku* vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne:.....

Podpis:.....

Poděkování

Rád bych poděkoval panu prof. Ing. Janu Mádlovi, CSc. za odborné vedení této práce, za poskytnutí odborných a cenných rad a zejména za ochotný a vstřícný přístup a trpělivost, se kterou jsem se u něho vždy setkal. Dále bych chtěl také poděkovat společnosti TIRAD s. r. o. a konzultantovi své práce Ing. Stanislavu Veselému za poskytnutí podkladů a cenných rad pro vypracování této diplomové práce. V neposlední řadě děkuji také rodině za podporu po celou dobu studia.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na optimalizaci řezných podmínek u vybrané součásti ve vybraném podniku. První část práce je zaměřena na teoretický rozbor optimalizace řezných podmínek, postup optimalizace, jednotlivá kritéria optimalizace, omezující podmínky a oblast přípustných řešení. Druhá část práce je zaměřena na experimentální výpočet a návrh optimalizovaných řezných podmínek ve spolupráci se společností TIRAD s. r. o. Optimalizovaná součást je forma pro vstřikování plastů z materiálu X33CrS16 pro dvě frézovací centra a vybrané řezné nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu.

KLÍČOVÁ SLOVA: Optimalizace, řezné podmínky, optimální trvanlivost nástroje, výkon, otáčky, náklady.

ABSTRACT

This thesis deals with the optimization of cutting conditions in a selected part in a selected company. The first part of the thesis is focused on theoretical analysis of optimization of cutting conditions, optimization process, individual optimization criteria, limiting conditions and area of acceptable solutions. The second part is focused on experimental calculation and design of optimized cutting conditions in cooperation with TIRAD s. r. o. The optimized part will be a mold for plastic injection from X33CrS16, for two milling centers and selected cutting tools with replaceable carbide cutting inserts.

KAYWORDS: Optimization, cutting conditions, optimal tool life, power, costs.

OBSAH

ÚVOD	11
1 OPTIMALIZACE OBRÁBĚCÍHO PROCESU	12
2 KRITÉRIA OPTIMÁLNOSTI	14
2.1 Kritérium minimálních výrobních nákladů.....	14
2.2 Kritérium optimálnosti z hlediska maximální produktivity.....	20
2.3 Kritérium optimálnosti z hlediska maximálního úběru.....	21
2.4 Vícekriteriální optimalizace	22
3 OMEZUJÍCÍ PODMÍNKY	23
3.1 Omezení dané výkonem obráběcího stroje	23
3.2 Omezení dané maximálně přípustným krouticím momentem	24
3.3 Omezení dané maximálně přípustnou silou řezání	25
3.4 Omezení dané vhodným utvářením třísky	26
3.5 Omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy	27
3.6 Omezení dané požadovanou přesností obrobené plochy	28
3.7 Omezení dané rozsahem otáček stroje	28
3.8 Omezení dané rozsahem posuvů stroje	28
3.9 Omezení dané komplexním Taylorovým vztahem	29
3.10 Oblast přípustných řešení.....	30
4 VZTAH OPTIMÁLNÍ TRVANLIVOSTI A OMEZUJÍCÍCH PODMÍNEK	31
4.1 Optimální trvanlivost břitu z hlediska minimálních výrobních nákladů.....	31
4.2 Optimální trvanlivost břitu z hlediska maximální produktivity.....	32
4.3 Optimální trvanlivost z hlediska maximálního zisku.....	32
4.4 Postupný způsob optimalizace rezných podmínek	33
5 SPOLEČNOST TIRAD s. r. o.	34
6 VYBRANÁ SOUČÁST PRO OPTIMALIZACI	36
6.1 Materiál součásti	36
7 STROJNÍ ZAŘÍZENÍ	38
7.1 Stroj MCFV 1680.....	38
7.2 Stroj Mazak HCN 12800.....	39
8 ŘEZNÉ NÁSTROJE	41
8.1 Nástroj T1 - 4805	41
8.2 Nástroj T2 - 4845	42
8.3 Nástroj T3 - 5021	42
8.4 Nástroj T4 - 2316	43

9	VÝPOČET SOUČASNÉHO STAVU	44
9.1	Náklady na strojní práci na operační úsek	44
9.2	Náklady na výměnu nástroje	45
9.3	Náklady na nástroje vztažené na jednu trvanlivost	46
9.4	Rozbor stávajících parametrů	47
9.5	Výpočet celkových nákladů – stávajících	48
10	NÁVRH OPTIMÁLNÍCH PODMÍNEK.....	53
10.1	Stroj MCFV 1680.....	54
10.2	Stroj Mazak HCN 12800.....	58
10.3	Kontrola omezujících podmínek	62
10.4	Shrnutí navržených parametrů	64
11	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	65
11.1	Porovnání pracovních podmínek.....	65
11.2	Porovnání výrobních nákladů	66
11.3	Vyhodnocení celkových úspor výrobních nákladů	68
	ZÁVĚR	69
	Použitá literatura	70

Seznam použitých zkratek a symbolů

<u>Symbol</u>	<u>Jednotka</u>	<u>Význam</u>
a_p	[mm]	Hloubka řezu
B	[mm]	Šířka odebírané vrstvy
C_d	[Kč]	Cena břitové destičky
C_E	[Kč]	Cena elektrické energie
CFS_{EFPL}	[hod./rok a směnu]	Časový fond stroje
CNC		Computer number control
C_n	[Kč]	Cena nástroje
C_S	[Kč]	Cena stroje
C_m	[Kč]	Cena tělesa nástroje
C_v		Empirická konstanta
C_{zn}	[Kč]	Cena zbytku nástroje
D	[mm]	Průměr
D_n	[mm]	Průměr nástroje nebo obrobku
d	[mm]	Deformace rozhodujícího členu
d_{max}	[mm]	Maximálně přípustná velikost deformace
E	[MPa]	Modul pružnosti
F	[N]	Síla
F_c	[N]	Řezná síla
$F_{c\ max}$	[N]	Maximální přípustná řezná síla
F_f	[N]	Síla posuvu
$F_{f\ max}$	[N]	Maximální posuvová síla
f	[mm/ot]	Posuv
f_m	[mm/min]	Minutový posuv
f_u	[mm/ot]	Posuv z hlediska vhodného utváření třísky
$f_{u\ max}$	[mm/ot]	Maximálně přípustná velikost posuvu pro vhodné utváření třísek
$f_{s\ max}$	[mm/ot]	Maximální dosažitelný posuv na stroji
$f_{s\ min}$	[mm/ot]	Minimální posuv dosažitelný na stroji
f_z	[mm]	Posuv na zub
HRP_{SP}	[Kč/hod]	Hodinový režijní paušál společných nákladů
k_C		Přirážka směnového času

k_{Fc}		Empirická konstanta pro výpočet řezné síly
k_r		Poměr skutečného času, resp. délky obrábění a strojního času, resp. délky automatického chodu nástroje
k_{us}		Koeficient oprav a údržby stroje
k_{ut}		Koeficient údržby tělesa nástroje
k_{vs}		Koeficient časového využití stroje
L	[mm]	Délka
L_o	[mm]	Délka obrobku
M_k	[N.m]	Krouticí moment
M_{kmax}	[N.m]	Maximálně přípustný krouticí moment
M_o	[Kč/hod]	Mzda operátora včetně soc. a zdrav. pojištění
M_{os}	[Kč/hod]	Mzda ostříče včetně soc. a zdrav. pojištění
m		Empirická konstanta
N	[Kč]	Výrobní náklady na uvažovaný úsek
N_{hs}	[Kč/hod]	Hodinové náklady na provoz stroje
N_n	[Kč/hod]	Náklady na nástroje vztažené na operační úsek
N_{nT}	[Kč]	Náklady na provoz nástroje na jednu trvanlivost
N_s	[Kč]	Náklady na strojní práci na operační úsek
N_{sm}	[Kč/min]	Náklady na strojní práci minutovou
N_{vn}	[Kč]	Náklady na výměnu nástroje
n	[ot/min]	Otáčky
n_{opt}	[ot/min]	Optimální otáčky
O_s	[Kč/hod]	Odpis stroje
P_c	[W]	Řezný výkon
P_e	[W]	Výkon elektromotoru
R_a	[μ m]	Aritmetická úchylka tvaru
R_{amax}	[μ m]	Maximálně přípustná aritmetická úchylka tvaru
R_m	[Mpa]	Mez pevnosti
RNS_{PL}	[%]	Režijní náklady střediska plánované
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
r_ε	[mm]	Poloměr špičky nástroje
SM		Směnnost

S_b		Součinitel VBD
T	[min]	Trvanlivost ostří
T_{opt}	[min]	Optimální trvanlivost ostří
t_{As}	[min]	Strojní čas
t_{os}	[min]	Čas ostření nástroje
t_{vn}	[min]	Čas výměny nástroje
U	[cm ³ /min]	Úběr materiálu
u_{Fc}		Empirická konstanta
u_v		Empirická konstanta
VBD		Vyměnitelné břitové destičky
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
$v_{c\ optN}$	[m/min]	Optimální řezná rychlost
VR		Kriteriální funkce vícekriteriální optimalizace
x_{Fc}		Empirická konstanta
x_{Ff}		Empirická konstanta
Z_n	[min]	Živostnost nástroje
z		Počet zubů nástroje
z_d		Počet břitových destiček
z_o		Počet možných přeastření
z_u		Předpokládaný počet upnutí destiček za dobu živostnosti tělesa nástroje
Z_S	[roky]	Životnost stroje
z_v		Tzv. počet výměn nástroje, vztažený na jeden operační úsek
η	[%]	Mechanická účinnost stroje
κ_r	[°]	Úhel nastavení řezu
κ_r'	[°]	Úhel vedlejšího nastavení řezu

ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá problematikou optimalizace řezných podmínek u vybrané součásti ve vybraném podniku. Diplomová práce je vytvořena ve spolupráci se společností TIRAD s. r. o., která se specializuje na třískové obrábění dílů forem pro vstřikování plastů. Cílem této diplomové práce je pro zvolenou součást navrhnout optimální řezné podmínky s ohledem na minimální výrobní náklady a ekonomicky zhodnotit dosažené výsledky a případné úspory. Diplomová práce se skládá z části teoretické a z experimentálního návrhu řezných podmínek.

Problematika optimalizace řezného procesu je stále velmi aktuální, neboť je na výrobní společnosti kladen stále větší důraz na výrobu s minimálními výrobními náklady. Z čehož vyplývá nutnost podniku mít správně stanovené řezné podmínky a trvanlivosti břitu řezného nástroje.

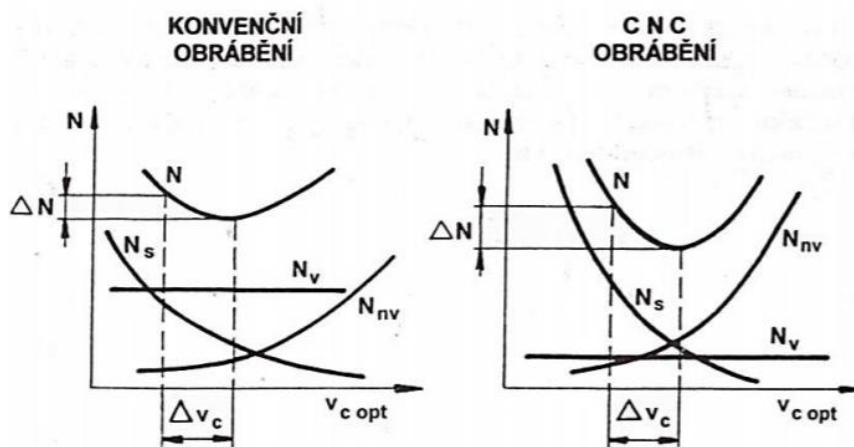
V teoretické části je nejprve rozebrána základní problematika optimalizace řezného procesu. Následující kapitola popisuje jednotlivá kritéria optimálnosti, kterými jsou kritérium minimálních výrobních nákladů, kritérium maximální produktivity, kritérium maximálních úběru a další. Na tuto část navazuje rozbor jednotlivých omezujících podmínek, stěžejní částí této kapitoly je rozbor omezujících podmínek z hlediska výkonnosti stroje. Navazující kapitola řeší problematiku optimální trvanlivosti ve vztahu k omezujícím podmínkám. Hlavním bodem této kapitoly je optimální trvanlivost břitu vzhledem k minimálním výrobním nákladům.

Experimentální část práce se zabývá návrhem optimální trvanlivostí břitu z hlediska minimálních výrobních nákladů. Hlavním cílem a zároveň výsledkem tohoto experimentu je návrh optimálních řezných podmínek zajišťující výrobu součástí s minimálními výrobními náklady. Návrh je řešen pouze jako změna řezných podmínek, nebudou navrhované jiné řezné nástroje, vyměnitelné břitové destičky ani jiné výrobní stroje. Bude popsána strojírenská společnost, se kterou je ve spolupráci řešena tato práce. Rozbor stávajícího procesu výroby vybrané součásti, kde bude zahrnut popis vyráběné součásti, strojů i řezných nástrojů. Po samostatném návrhu řezných podmínek bude ověřena jejich správnost a aplikovatelnost z hlediska omezujících podmínek. Poslední kapitola se zabývá ekonomickým zhodnocením samotného experimentu.

1 OPTIMALIZACE OBRÁBĚCÍHO PROCESU

V současné době představuje strojírenská výroba velmi významnou oblast světové ekonomiky. Jednotlivé obráběcí procesy přinášejí velmi vysokou přidanou hodnotu. Vzniklé výrobní náklady tvoří přibližně 40 % konečné ceny strojírenských výrobků. Přičemž oblast technologie obrábění se podílí svojí pracností v celkovém obsahu této výroby více než 30 %. Na strojírenské podniky je vyvíjen z celosvětové konkurence tlak na výrobu s co možná nejnižšími výrobními náklady a požadovanou kvalitou. Proto je nutné ve výrobních procesech používat optimální pracovní podmínky, těmito podmínkami rozumíme všechny faktory ovlivňující obráběcí proces. Mezi tyto faktory patří například řezný materiál a geometrie nástroje, stav břitu při výměně nástroje, řezné podmínky, řezné prostředí a další. V případě, že nejsou při výrobě dodrženy optimální pracovní podmínky, tedy nedochází-li k využívání technicko-ekonomických rezerv, musí docházet k ekonomické nehospodárnosti v daném podniku [1], [3].

Na požadavky minimálních nákladů má z hlediska optimalizace obráběcího procesu nejdůležitější vliv řezná rychlost. Řezná rychlost nejvíce ovlivňuje trvanlivost řezného nástroje, a tím i samotnou ekonomickou stránku procesu obrábění. Její význam je však odlišný pro konvenční stroje a stroje moderní (CNC), které mají vyšší pořizovací investice. Z porovnání výrobních nákladů na řezné rychlosti (Obr. 1) je patrné, že stejná diference v řezné rychlosti má rozdílný vliv na výsledné výrobní náklady pro dané strojní zařízení. Dále je z tohoto porovnání zřejmé, že význam optimální řezné rychlosti je u CNC strojů naprosto rozhodující na výsledné výrobní náklady [1], [5], [20].



Obrázek 1: Závislost celkových výrobních nákladů N a jejich složek (N_s – náklady na strojní práci, N_{nv} – náklady na nástroje a jejich výměnu, N_v – náklady na vedlejší práci) na řezné rychlosti [1]

Bohužel se ještě v současné době setkáváme v praxi s tím, že podniky dostatečně neřeší problematiku vzájemného vztahu ekonomiky a pracovních podmínek. Výchozím podkladem pro optimalizaci výrobního procesu je řezný nástroj. Podniky volí řezné podmínky podle doporučených hodnot uvedených v katalozích nástrojů. Tyto podmínky pak bývají korigovány přímo při obrábění. Avšak takto zvolené řezné podmínky nejsou optimální a vedou ke zvyšování výrobních nákladů a ztrát [1], [4].

Optimalizaci řezných podmínek lze dělit:

- Práce s jedním nástrojem,
- práce na jednom stroji s více nástroji,
- práce více strojů, vázaných taktem výroby (např. automatické linky),
- práce více strojů, vázaných organizačně [1].

Dosažení nejlepšího výsledku každého výrobního procesu za předpokladu nejnižších výrobních nákladů v co možná nejkratší době výroby lze popsat podle této definice: zajistit maximální bezpečnost a předvídatelnost procesu za současného dosažení nejvyšší produktivity za předpokladu nejnižších nákladů [2].

Hlavní podstatou optimalizace řezných podmínek je určení optimálních hodnot těchto parametrů (hloubky řezu a_p , posuvu f a řezné rychlosti v_c) a také trvanlivosti ostří nástroje. Podle předem určeného kritéria optimálnosti. Na proces obrábění musí být nahlíženo jako na jeden soudržný model [1], [6].

2 KRITÉRIA OPTIMÁLNOSTI

Kritériem optimálnosti uvažujeme vybraný postup výpočtu, podle kterého bude řešena optimalizace řezných podmínek. V této práci jsou popsána a vysvětlena jednotlivá optimalizační kritéria. Základním kritériem v praxi je kritérium minimálních výrobních nákladů, dle tohoto kritéria je stanovena praktická část této práce [1].

Optimalizační kritéria:

- Kritérium optimálnosti z hlediska výrobních nákladů,
- kritérium z hlediska produktivity,
- kritérium z pohledu zisku,
- kritérium optimálnosti z hlediska maximálního úběru materiálu [1].

2.1 Kritérium minimálních výrobních nákladů

Cílem tohoto kritéria minimálních výrobních nákladů je dosažení optimalizovaných řezných podmínek s co nejnižšími výrobními náklady. Jedná se o základní kritérium optimalizace ve strojírenské technologii. Pokud aplikaci nebrání některé závažné důvody, mělo by se přednostně aplikovat toto kritérium. Poté by muselo být aplikované jiné zmíněné optimalizační kritérium např. maximální produktivity. Kritérium minimálních výrobních nákladů vede ke stejným výsledkům jako kritérium z hlediska zisku [1], [16].

Kritérium minimálních výrobních nákladů jsme schopni vyjádřit pomocí vztahu, ve kterém neuvažujeme další nákladové položky, které nemají závislost na řezných podmínkách.

Vztah je definován následovně [1], [7]:

$$N = N_s + N_n + N_{vn} \text{ [Kč/úsek]} \quad (2.1)$$

Kde: N jsou výrobní náklady na operační úsek [Kč],

N_s jsou náklady na strojní práci na operační úsek [Kč],

N_n jsou náklady na nástroje vztažené na operační úsek [Kč],

N_{vn} jsou náklady na výměnu nástroje vztažené na operační úsek [Kč].

Náklady na strojní práci na operační úsek

Jednotlivé nákladové položky je možné dále rozepsat pomocí následujících vztahů. Jsou uvažovány dvě alternativní verze, které jsou rozdílné z hlediska vyjádření režijních nákladů.

V prvním případě jsou režijní náklady vyjádřené jako přírážka přímých mezd a v druhém případě pomocí hodinových režijních paušálů [1].

Poté pro první variantu platí vztah pro strojní práci [1]:

$$N_s = t_{As} \cdot \left[k_c \cdot \frac{M_o}{60} \left(1 + \frac{RNS_{PL}}{100} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] = t_{As} \cdot N_{sm} \text{ [Kč]} \quad (2.2)$$

Kde: N_{sm} jsou náklady na strojní práci [Kč/min],

N_{hs} jsou hodinové náklady na provoz stroje [Kč/hod],

M_o mzda operátora včetně soc. a zdrav. pojištění [Kč/hod],

RNS_{PL} režijní náklady střediska [%],

k_c přírážka směnového času (v rozsahu 1,11 až 1,15),

t_{As} strojní čas [min].

Pokud vyjadřujeme výrobní režie za pomoci hodinového režijního paušálu společných nákladů, můžeme rovnici definovat:

$$N_s = t_{As} \cdot \left[k_c \cdot \left(\frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] = t_{As} \cdot N_{sm} \text{ [Kč]} \quad (2.3)$$

Kde: HRP_{SP} je hodinový režijní paušál společných nákladů [Kč/hod nebo Kč/Nhod], [1].

Vztah (2.2 nebo 2.3) jsme v praxi nuceni upravit v závislosti na skutečných podmínkách obrábění. Dochází k tomu například při více strojové obsluze, kdy jsme schopni uvažovat rozdělení mzdy operátora na jednotlivá strojní zařízení. Dále je nutné tento vztah korigovat při obrábění několika součástí najednou [1].

Hodinové náklady na provoz stroje vyjadřuje vztah [1]:

$$N_{hs} = O_s \cdot k_{us} + C_E \text{ [Kč/hod]} \quad (2.4)$$

Kde: O_s je odpis stroje [Kč/hod],

k_{us} je koeficient oprav a údržby stroje,

C_E je cena elektrické energie [Kč/hod].

Odpis stroje lze vyjádřit vztahem [1]:

$$O_S = \frac{C_S}{Z_S \cdot CFS_{EFPL} \cdot SM \cdot k_{vs}} \text{ [Kč/hod]} \quad (2.5)$$

Kde: C_S cena stroje [Kč],
 Z_S životnost stroje [roky],
 CFS_{EFPL} časový fond stroje [hod/rok a směnu],
 SM počet směn,
 k_{vs} koeficient časového využití stroje.

Koeficient časového využití stroje je dán podílem času, při kterém se na stroji pracuje v daném počtu směn k celkovému času uvažovaných směn. Lze ho stanovit z dlouhodobého průměru nebo z předpokládaného využití stroje. Přibližné hodnoty pro některé druhy výroby jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 1). Koeficient oprav a údržby stroje je vyjádřen jako podíl součtu ceny stroje a předpokládané částky údržby nebo oprav za dobu jeho životnosti a ceny stroje [1].

Tabulka 1: Koeficient časového využití stroje [1]

Druh výroby	k_{vs}
Hromadná a velkosériová	0,8
Programově řízené stroje, obráběcí centra	0,65 až 0,75
Konvenční malosériová výroba	0,50 až 0,65

Náklady na nástroj vztažené na operační úsek

Náklady na nástroje, které jsou vztaženy na určitý operační úsek lze vyjádřit ve tvaru [1]:

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} \text{ [Kč]} \quad (2.6)$$

Kde: N_{nT} jsou náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost bříty [Kč],
 z_v je počet výměn nástroje na vybraný operační úsek.

Počet výměn nástroje z_v lze vyjádřit tímto způsobem [1]:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r \quad (2.7)$$

Kde: T trvanlivost břítu nástroje [min],

k_r koeficient řezání (dán poměrem skutečného času a automatického chodu).

Náklady na nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami, které nejsou přestřovány se stanoví dle vztahu [1]:

$$N_{nT} = \frac{C_d \cdot Z_d}{Z_b \cdot S_b} + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{z_u} \text{ [Kč]} \quad (2.8)$$

Kde: C_d cena břitové destičky [Kč],

C_{tn} cena tělesa nástroje [Kč],

z_d počet destiček na nástroji,

z_b počet břitů na destičce,

z_u předpokládaný počet upnutí destiček za životnost tělesa nástroje,

S_b součinitel využití břitových destiček,

k_{ut} koeficient údržby tělesa nástroje.

Pro nástroje celistvé přebrušované platí tento vztah pro určení nákladů na nástroj vztažené na jednu trvanlivost břítu [1]:

$$N_{nT} = \frac{C_n \cdot c_{zn}}{z_o + 1} + t_{os} \cdot k_C \cdot \left(\frac{M_{os}}{60} + \frac{HRP_{os}}{60} \right) \cdot \frac{z_o}{z_o + 1} \text{ [Kč]} \quad (2.9)$$

Kde: C_n cena nástroje [Kč],

c_{zn} zbytková cena nástroje [Kč],

M_{os} mzda ostříče včetně soc. a zdrav. pojištění [Kč/hod],

HRP_{SP} hodinový režijní paušál ostřírný [Kč/hod nebo v Kč/Nhod],

z_o počet možných přestřevání nástroje,

t_{os} čas ostření nástroje [min].

V tabulce 2 jsou uvedeny přibližné hodnoty jednotlivých empirických konstant, jedná se o získané statistické údaje. Jednotlivé parametry jsou rozděleny do čtyř tříd podmínek obrábění. Součinitel využití břitových destiček je závislý především na: technologické kázni, křehkém lomu destiček, poškození nového břitu, poškození odcházející třískou. Předpokládaný počet upnutí VBD je ovlivněn především náhodným zničením tělesa nástroje. Koeficient údržby tělesa nástroje vyjadřuje především náhradní díly nástroje [1].

Tabulka 2: Hodnoty empirických konstant [1]

Podmínky obrábění	z_u	S_b	k_{ut}
Lehké	400 až 600	0,95	0,05
Střední	200 až 400	0,9	0,025
Těžké	200	0,8	0,4
Velmi těžké	100	0,7	0,6

Náklady na výměnu nástroje

Tato nákladová položka je nejvíce závislá na délce časové výměny nástroje. U nových moderních strojů například CNC je čas výměny nástroje v řádech sekund, zatímco u konvenčních strojů se pohybuje čas výměny nástroje v řádech minut [1].

Pro náklady na výměnu nástroje lze psát vztah [1]:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot \left[k_C \cdot \frac{M_s}{60} \cdot \left(1 + \frac{RNS_{PL}}{100} \right) + \frac{O_s}{60} \right] \cdot z_v \quad (2.10)$$

$$= t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v \text{ [Kč]}$$

Pro využití metody hodinových režijních paušálů platí vztah [1]:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot \left[k_C \cdot \left(\frac{M_s}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{O_s}{60} \right] \cdot z_v \quad (2.11)$$

$$= t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v \text{ [Kč]}$$

Kde: N_{vnm} jsou náklady na výměnu nástroje [Kč/min],

M_s mzda seřizovače včetně sociálního i zdravotního pojištění [Kč/hod],

t_{vn} čas výměny nástroje [min].

Jelikož výrobní náklady na jednotlivé operační úseky mají být minimální, lze vyjádřit kritérium optimálnosti z hlediska minimálních výrobních nákladů s podmínkou [7]:

$$N = N_s + N_n + N_{vn} = \min \quad (2.12)$$

Po následném dosazení do vztahu (2.1) dostaneme tvar [1]:

$$N = t_{As} \cdot N_{sm} + \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r \cdot N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r = \min \quad (2.12)$$

Po úpravě dostáváme vztah [1]:

$$N = t_{As} \cdot N_{sm} + \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r \cdot (N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}) = \min \quad (2.13)$$

Kde: N_{sm} náklady na strojní práci minutové [Kč/min],

N_{nT} náklady na nástroj vztažené na jednu trvanlivost ostří [Kč],

N_{vnm} náklady na výměnu nástroje minutové [Kč/min],

T trvanlivost ostří [min],

t_{As} strojní čas [min],

t_{vn} čas výměny nástroje [min],

k_r poměr skutečné délky obrábění a celkové délky obrábění.

Strojní čas lze vypočítat tímto vztahem [1]:

$$t_{As} = \frac{L}{n \cdot f} \quad (2.14)$$

Kde: L je délka automatického chodu nástroje [mm],

n jsou otáčky [ot/min],

f posuv [mm/ot].

Po následném dosazení rovnice (2.14) do kritéria (2.13) dostáváme tuto kritériální rovnici [1]:

$$N = \frac{L}{n \cdot f} \cdot N_{sm} + \frac{L \cdot k_r}{n \cdot f \cdot T} \cdot (N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}) = \min \quad (2.15)$$

Po následné úpravě získáme vztah:

$$\frac{K_1}{n \cdot f} + \frac{K_2}{n \cdot f \cdot T} = \min \quad (2.16)$$

Kde konstanty K_1 a K_2 :

$$K_1 = L \cdot N_{sm} \quad (2.17)$$

$$K_2 = L \cdot k_r \cdot (N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}) \quad (2.18)$$

Takto stanovené vztahy platí např. pro soustružení. U frézování je parametr posuvu na otáčku f nahrazen posuvem na zub f_z [1].

2.2 Kritérium optimálnosti z hlediska maximální produktivity

Kritérium z hlediska maximální produktivity se dnes používá zcela výjimečně, bylo využíváno především v minulosti. Toto kritérium prakticky znamená vyrábět za daný čas maximální počet kusů bez ohledu na vzniklé výrobní náklady. Kritérium maximální produktivity je vhodné použít pouze v krajním případě, a to například v případě, kdy podnik potřebuje splnit zakázku vázanou určitým termínem, u které hrozí finanční postih při nedodržení termínu. Z dlouhodobého hlediska je toto kritérium pro podnik neudržitelné. Zvyšování produktivity při nenavyšování výrobních nákladů lze dosáhnout zaváděním vhodných systémů pro hospodaření s nástroji [1], [8].

Podnik má několik možností, jak tuto situaci řešit: např. práce v nadstandartní pracovní době, rozšíření strojního portfolia nebo možností kooperace např. možnost outsourcingu [1].

Kritérium lze matematicky vyjádřit tímto vztahem [1]:

$$t_u = t_{As} + t_{vn} \cdot z_v \quad (2.19)$$

Kde: t_u čas operačního úseku [min],

t_{As} strojní čas [min],

t_{vn} čas výměny nástroje v min,

z_v počet výměn nástroje.

Při následném dosazení za z_v a t_{As} do vztahu (2.7) a (2.14) dostáváme kritérium maximální produktivity ve tvaru [1]:

$$t_u = \frac{L}{n \cdot f} + \frac{L \cdot k_r \cdot t_{vn}}{n \cdot f \cdot T} = \min \quad (2.20)$$

Po úpravě lze kritérium maximální produktivity vyjádřit vztahem [1].:

$$t_u = \frac{K_3}{n \cdot f} + \frac{K_4}{n \cdot f \cdot T} = \min \quad (2.21)$$

Kde:

$$K_3 = L \quad (2.22)$$

$$K_4 = L \cdot k_r \cdot t_{vn} \quad (2.23)$$

Kritérium maximální produktivity je totožné s kritériem maximálních výrobních nákladů. Tato skutečnost nám umožňuje řešit obě tyto kritériální úlohy stejným způsobem [1].

2.3 Kritérium optimálnosti z hlediska maximálního úběru

Kritérium maximálního úběru bývá v praxi ztotožňováno s kritériem maximální produktivity, avšak tato skutečnost je mylná. Toto tvrzení potvrzuje rozdíl patrný mezi vztahy (2.19) a (2.24), [1], [9].

Matematicky lze vyjádřit vztah maximálního úběru takto [1]:

$$U = a_p \cdot f \cdot v_c = \max \quad (2.24)$$

Kde: U úběr materiálu [cm^3/min],

a_p hloubka řezu [mm],

f posuv [ot/min],

v_c řezná rychlost [m/min].

Po dosazení za řeznou rychlost platí vztah [1]:

$$U = 10^{-3} \cdot D \cdot \pi \cdot a_p \cdot f \cdot n = \max \quad (2.25)$$

Kde: D poloměr obrobku nebo nástroje podle metody obrábění [mm].

Za předpokladu, že se při optimalizaci řezných podmínek obvykle vychází z dané hloubky řezu, lze definovat rovnici vztahem [1]:

$$n \cdot f = \max [\text{mm/min}] \quad (2.26)$$

2.4 Vícekriteriální optimalizace

Pokud potřebujeme v praxi najít kompromis mezi minimálními výrobními náklady a maximální produktivitou, je možné brát v úvahu vícekriteriální optimalizaci. Vícekriteriální optimalizace přisuzuje každému kritériu svoji váhu, která reflektuje požadavky výsledné optimalizace [1], [9].

Vícekriteriální optimalizaci lze vyjádřit vztahem [1]:

$$VK = r \cdot \frac{N}{N_o} + (1 - r) \cdot \frac{t_u}{t_{uo}} = \min \quad (2.27)$$

Kde: r je váhový koeficient $0 \leq r \leq 1$,

N_o kvalifikovaný odhad hodnoty nákladové funkce N , jedná se o hodnotu N určenou pomocí kritéria minimálních nákladů [Kč],

t_{uo} je odhad t_u , resp. hodnota t_u stanovená dle kritéria maximální produktivity [1].

Dosazením za N a t_u dostáváme vztah [1]:

$$\frac{1}{n \cdot f} \cdot \left[K_1 \cdot \frac{r}{N_o} + \frac{K_3 \cdot (1 - r)}{t_{uo}} \right] + \frac{1}{n \cdot f \cdot T} \cdot \left[K_2 \cdot \frac{r}{N_o} + \frac{K_4 \cdot (1 - r)}{t_{uo}} \right] = \min \quad (2.28)$$

3 OMEZUJÍCÍ PODMÍNKY

U každého obráběcího procesu se vyskytují technická omezení, tato omezení formulujeme nejčastěji jako omezující podmínky. Čím více je vstupujících omezení do procesu obrábění, tím bude složitější celková optimalizace obráběcího procesu. Omezující podmínky vyjadřujeme v praxi jako soubor jednotlivých nerovnic, jedinou výjimkou je omezující podmínka z hlediska Taylorova vztahu, tato podmínka tvoří rovnici [1], [9].

Omezující podmínky jsou dány obráběcí soustavou, kterou tvoří stroj, nástroj, obrobek, řezné prostředí a další. Z hlediska obráběcího stroje kontrolujeme např. výkon stroje, mezní krouticí moment, mezní síly, rozsah otáček, posuvů apod. U nástroje vyhodnocujeme například řezný materiál, geometrii nástroje, drsnost povrchu břitu atd. [1], [10], [22].

Dále jsou v této práci popsány nejdůležitější omezující podmínky obráběcího procesu.

3.1 Omezení dané výkonem obráběcího stroje

Jedná se o nejdůležitější omezující podmínku stroje při hrubovacích operacích. Omezení je především závislé na výkonové charakteristice pohonu obráběcího stroje. Nelze nadefinovat a používat pracovní podmínky, které nejsou v rozsahu stroje. Jedná se o linearizovatelnou omezující podmínku [1], [11].

Omezující podmínku lze definovat [9]:

$$P_c \leq P_e \cdot \eta \quad (3.1)$$

Kde: P_c je řezný výkon [W],

P_e výkon elektromotoru stroje [W],

η mechanická účinnost stroje [%].

Jelikož je řezný výkon funkcí řezné síly lze potom definovat [13]:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60} [W] \quad (3.2)$$

Kde: F_c je řezná síla [N].

Řezná síla je funkcí řezných podmínek a lze ji formulovat pomocí empirického vztahu pro frézování [1]:

$$F_c = k_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f_z^{y_{Fc}} \cdot v_c^{z_{Fc}} \cdot B^{u_{Fc}} \cdot z \cdot D_n^{w_{Fc}} \text{ [N]} \quad (3.3)$$

Kde: B je odřezávaná šířka vrstvy [mm],

f_z posuv na zub [mm],

z je počet zubů nástroje,

$k_{Fc}, x_{Fc}, y_{Fc}, z_{Fc}, u_{Fc}, w_{Fc}$ jsou empirické konstanty.

Pokud budeme uvažovat, že vliv řezné síly na řeznou rychlost je relativně malý, můžeme omezující podmínku vyjádřit vztahem [1]:

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f_z^{y_{Fc}} \cdot n \leq \frac{1000 \cdot 60 \cdot P_e \cdot \eta}{k_{Fc} \cdot \pi \cdot B^{u_{Fc}} \cdot z \cdot D_n^{w_{Fc}+1}} \quad (3.4)$$

V současné době se v praxi u moderních obráběcích strojů vyskytují výkonové charakteristiky v lineárním i nelineárním tvaru. Omezující podmínka z hlediska konstantního výkonu stroje se u dnešních obráběcích zařízení vyskytuje pouze v úzkém rozsahu otáček. Pro popis úplné výkonové charakteristiky je potřeba použít doplňující formulace [1].

3.2 Omezení dané maximálně přípustným krouticím momentem

Tuto podmínku uvažujeme v praxi především z hlediska upínacího zařízení obráběcího zařízení. Z tohoto omezení vyplývá, že vyvolané řezné síly nesmí překonat hranici, kdy dojde k uvolnění obrobku nebo nástroje z upnutí. Tato omezující podmínka musí být kontrolována i z jiných dalších hledisek [9].

Podmínku lze vyjádřit vztahem [9]:

$$M_k \leq M_{k \max} \quad (3.5)$$

Kde: $M_{k \max}$ je maximální přípustný krouticím moment [N.m],

M_k krouticím moment na vřetenu [N.m].

Při uvažování konstantního krouticího momentu například sklíčidla s nízkými otáčkami, kleštiny nebo čelní unášeče, můžeme vyjádřit vztah například pro soustružení [1]:

$$M_k = F_c \cdot \frac{D}{2} \quad (3.6)$$

Po dosazení za F_c a následné úpravě dostáváme vztah [1]:

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f_z^{y_{Fc}} \leq \frac{2 \cdot M_{k \max}}{k_{Fc} \cdot D} \quad (3.7)$$

Pro frézování platí analogicky vztah ve tvaru [1]:

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f_z^{y_{Fc}} \leq \frac{2 \cdot M_{k \max}}{k_{Fc} \cdot B^{u_{Fc}} \cdot Z \cdot D_n^{W_{Fc}+1}} \quad (3.8)$$

3.3 Omezení dané maximálně přípustnou silou řezání

Omezení z hlediska maximální přípustné síly uvažujeme především s ohledem na pevnost nástroje nebo obrobku, a to z hlediska mezních sil v jednotlivých osách obráběcí soustavy. Lze uvažovat působení všech složek řezné síly, ale je dostačující uvažovat pouze namáhání řeznou složkou síly [9], [17].

Poté platí podmínka ve vztahu [1]:

$$F_c \leq F_{c \max} \quad (3.9)$$

Po dosazení za F_c ze vztahu (3.3) dostáváme pro frézování tvar [1]:

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f_z^{y_{Fc}} \leq \frac{F_{c \max}}{k_{Fc} \cdot v_c^{z_{Fc}} \cdot B^{u_{Fc}} \cdot Z \cdot D_n^{W_{Fc}}} \quad (3.10)$$

Pro případ frézování je velmi vhodné při formulaci omezující podmínky uvažovat kombinované namáhání výslednou silou, která je výslednicí řezné a pasivní složky síly [1].

Poté vztah [1]:

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f_z^{y_{Fc}} \leq \frac{F_{pc \max}}{\sqrt{1 + k_{pc}^2} \cdot k_{Fc} \cdot B^{u_{Fc}} \cdot Z \cdot D_n^{W_{Fz}}} \quad (3.11)$$

Kde: $F_{pc \max}$ je maximálně přípustná velikost výslednice řezné a pasivní síly [N],

k_{pc}^2 je konstanta.

Dále je možné tuto omezující podmínku formulovat jako maximálně přípustné velikosti posuvů z hlediska silového působení na daný břit. Jedná se o empirické hodnoty, které odpovídají určitému materiálu a geometrii břitu a obráběnému materiálu. Někteří výrobci tyto hodnoty uvádějí u svých nástrojů [1].

Pro frézování platí vztah [1]:

$$f_z \leq f_{zF} \quad (3.12)$$

Kde: f_{zF} je maximální přípustná velikost posuvu na zub [mm].

3.4 Omezení dané vhodným utvářením třísky

Vhodného utváření jednotlivých třísek lze dosáhnout především vhodnými řeznými podmínkami a správnou geometrií břitu. S problémem nevhodně utvářející se třísky se setkáváme především u strojů bez přímého dohledu obsluhy [9].

Na vhodné utváření třísky jsou kladeny tyto požadavky:

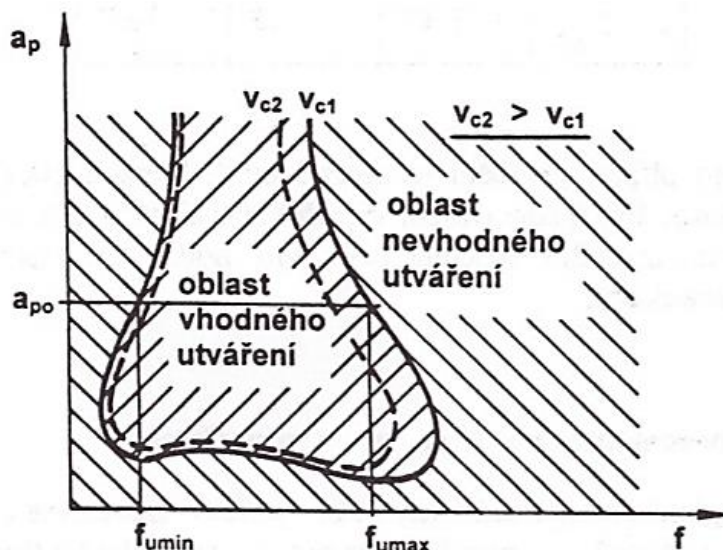
- Třísky se nesmějí dostávat zpět pod břit, tím by mohlo dojít k destrukci břitu a havárii obráběcí soustavy,
- třísky nesmějí zcela zaplnit obráběcí prostor a zamezit automatické výměně nástroje nebo zamezit dalšímu obrábění [1].

Oblasti, ve kterých dochází k vhodnému utváření třísek, jsou experimentálně zjišťované pro daný obráběcí nástroj a obráběný materiál. Optimální oblast utváření je funkcí závislosti hloubky řezu na posuvu. Typickou oblast vhodného utváření můžeme vidět na obrázku 2. Vlivem změny řezné rychlosti dochází ke změně hranice mezi oblastí vhodného a nevhodného utváření třísek. Při zvyšování řezné rychlosti dochází ke zmenšení oblasti vhodného utváření. Pokud je optimalizace řešena pomocí softwarů je nutno tuto hranici popsat matematicky, to lze aplikovat pomocí úseček [1], [12], [13].

Optimalizaci řezných podmínek je vhodné provádět pro předem určenou hloubku řezu, proto uvažujeme podmínku ve tvaru [1]:

$$f_{u \min} \leq f \leq f_{u \max} \quad (3.13)$$

Kde: $f_{u \min}$, $f_{u \max}$ jsou minimální a maximální přípustné velikosti posuvu [mm/ot].



Obrázek 2: Oblast vhodného utváření třísek [1]

Pro stanovení správných řezných podmínek musíme znát oblasti vhodného utváření třísek. Někteří výrobci obráběcích nástrojů uvádějí tyto oblasti v katalogích nabízeného sortimentu. Pokud tyto oblasti neznáme, musíme je stanovit experimentálně [1].

3.5 Omezení dané požadovanou drsností obrobeneé plochy

Tuto omezující podmínku využíváme především při dokončovacích operacích, jedná se o omezení z hlediska výsledné drsnosti obrobeneé plochy [1], [9].

Podmínku lze formulovat vztahem [1]:

$$R_a \leq R_{a \max} \quad (3.14)$$

Kde: R_a je aritmetická úchylka obrobeneé plochy [μm],

$R_{a \max}$ maximálně přípustná aritmetická úchylka obrobeneé plochy [μm].

Obecně pro tuto podmínku platí:

$$R_a = g(f, v_c, r_\varepsilon, K_r, K'_r, \dots) \quad (3.15)$$

Kde: r_ε je poloměr špičky nástroje [mm],

K_r je úhel nastavení řezu [$^\circ$],

K'_r je úhel vedlejšího nastavení [$^\circ$].

Vzhledem ke komplexnosti této omezující podmínky jsou známe empirické závislosti především pro konkrétní způsoby obrábění. Pokud nejsme schopni pro určitý způsob podmínku definovat, lze použít empirický vztah ve tvaru [1]:

$$f \leq f_{Ra\ max} \quad (3.16)$$

Kde: $f_{Ra\ max}$ je maximální vyhovující hodnota posuvu, při které je ještě splněn požadavek drsnosti obrobené plochy [mm/ot].

3.6 Omezení dané požadovanou přesností obrobené plochy

Další omezující podmínka, kterou sledujeme především u dokončovacích operací, pokud neuvažujeme nepřesnost například vlivem radiálního opotřebení nástroje, je nepřesnost zapříčiněna elastickou deformací obráběcí soustavy pod působením řezné síly. Většinou je rozhodující pouze deformace jednoho z členů této soustavy, proto lze ostatní členy zanedbat [1], [9].

Formulace této podmínky vychází z požadavku [1]:

$$d \leq d_{max} \quad (3.17)$$

Kde: d je deformace rozhodujícího členu obráběcí soustavy [mm],

d_{max} maximální přípustná deformace [mm].

3.7 Omezení dané rozsahem otáček stroje

U této omezující podmínky vycházíme z toho, že jsme schopni na každém obráběcím stroji otáčky nastavit v určitém rozsahu minimálních a maximálních hodnot [1], [9].

Omezující podmínka má potom tento tvar [1]:

$$n_{s\ min} \leq n \leq n_{s\ max} \quad (3.18)$$

Kde: $n_{s\ min}$ jsou minimální otáčky stroje [ot/min],

$n_{s\ max}$ maximální otáčky stroje [ot/min].

3.8 Omezení dané rozsahem posuvů stroje

Každý obráběcí stroj má určitý rozsah maximálních a minimálních hodnot posuvů. Stroje mohou mít posuv, který se nastavuje v mm/ot nebo mm/min.

A) Pro stroje s posuvy, které jsou udávány v mm/min platí vztah [1]:

$$f_{sm\ min} \leq f_m \leq f_{sm\ max} \quad (3.19)$$

Kde: f_m je posuv [mm/min],

$f_{sm\ min}$ minimální posuv dosažitelný na stroji [mm/min],

$f_{sm\ max}$ maximální posuv dosažitelný na stroji [mm/min].

Minutový posuv lze vyjádřit [1]:

$$f_m = f \cdot n \quad (3.20)$$

B) Pro stroje s posuvy v mm na otáčku:

$$f_{s\ min} \leq f \leq f_{s\ max} \quad (3.21)$$

3.9 Omezení dané komplexním Taylorovým vztahem

Tato omezující podmínka má výjimečné postavení mezi omezujícími podmínkami. Jedná se o významnou rovnici, která obsahuje trvanlivost břitu nástroje. Tato skutečnost ovlivňuje matematická řešení výsledné optimalizace řezných podmínek. Obrobitelnost materiálu můžeme charakterizovat funkčním vztahem mezi jednotlivými proměnnými hodnotami řezného procesu. Protože doposud nejsme schopni obrobitelnost, řezivost a řezné prostředí vyjádřit pomocí základních veličin, musíme jejich vzájemnou vazbu vyjádřit tzv. komplexním Taylorovým vztahem [1], [9], [14], [15].

Komplexní Taylorův vztah má pro soustružení tvar [1], [16]:

$$v_c = \frac{c_v}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot T^{\frac{1}{m}}} \quad (3.22)$$

Kde: c_v, x_v, y_v jsou empirické konstanty,

m je materiálová konstanta, pro slinuté karbidy 5 až 2,5.

Pro frézování platí [1]:

$$v_c = \frac{c_v \cdot D_n^{w_v}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot B^{u_v} \cdot Z^{q_v} \cdot T^{\frac{1}{m}}} \quad (3.23)$$

Kde: u_v, q_v, w_v jsou empirické konstanty.

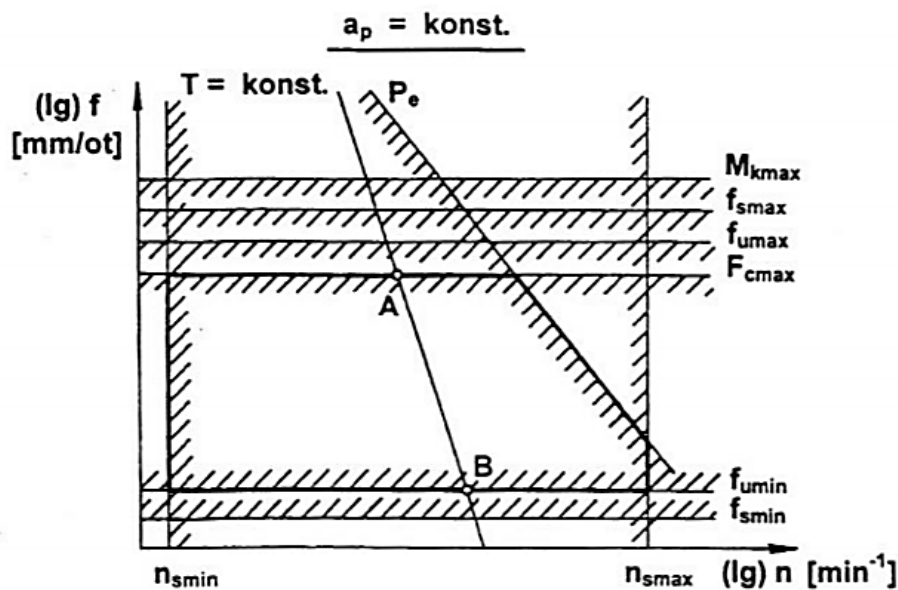
Po úpravě vztahu dostáváme podmínku [1]:

$$n \cdot f_z = \frac{10^3 \cdot c_v \cdot D_n^{w_v - 1}}{\pi \cdot B^{u_v} \cdot z^{q_v} \cdot T^{\frac{1}{m}}} \quad (3.24)$$

3.10 Oblast přípustných řešení

Oblast přípustných řešení je vymežující oblast všech optimalizačních podmínek, které vstupují do řešené optimalizační úlohy. Některé omezující podmínky jsou mocninného charakteru a můžeme je linearizovat logaritmováním. Proto je lze zobrazit v logaritmických souřadnicích, v praxi bývají nejčastěji zaznamenávány v souřadném systému $(\lg)f - (\lg)n$ [1], [9].

Příklad možného zobrazení oblasti přípustných řešení zobrazuje obrázek 3, na kterém můžeme vidět oblast přípustných řešení pro stroje s posuvy v mm na otáčku. Silně orámovaná část diagramu vymezuje možnosti všech kombinací otáček a posuvů, které lze v řešené optimalizační úloze realizovat. Ovšem pouze za předpokladu, že neuvažujeme omezení z hlediska omezení komplexního Taylorova vztahu. Pro zobrazení komplexního Taylorova vztahu v diagramu musíme vycházet z konstantní trvanlivosti břitů rezného nástroje, poté se zobrazí komplexní Taylorův vztah jako přímka, popřípadě úsečka. Tvary výsledných oblastí přípustných řešení se mohou výrazně měnit a lišit v závislosti na konkrétních optimalizačních případech a optimalizačních podmínkách [1].



Obrázek 3: Oblast přípustných řešení [1]

4 VZTAH OPTIMÁLNÍ TRVANLIVOSTI A OMEZUJÍCÍCH PODMÍNEK

Optimální trvanlivost břitu řezného nástroje je úzce spjata s optimálními řeznými podmínkami. V praxi od sebe obecně nemůžeme oddělit určení optimální trvanlivosti břitu daného řezného nástroje od navržených řezných podmínek. Oddělení je možné pouze za ojedinělých okolností. Proto je vhodnější pro stanovení řezných podmínek použít komplexní optimalizační výpočet, který vede vždy k optimálním řezným podmínkám i optimální trvanlivosti nástroje [1], [9].

Pro zjednodušení určování výsledných optimálních řezných podmínek můžeme v praxi určit optimální trvanlivost břitu samostatně před následným výpočtem optimálních řezných podmínek. A to i za předpokladu, že tento postup nemusí vést vždy k určení optimálních řezných podmínek. Zásadním důvodem, kdy volíme tento postup, je neznalost vzájemného vztahu ekonomiky obrábění, trvanlivosti nástroje a řezných podmínek [1].

V minulosti byl často nedostatečně řešen vztah optimálních řezných podmínek a optimální trvanlivosti nástroje, což plynulo ze skutečnosti, že nebyly tak vysoké požadavky na výkon a na maximální otáčky stroje. Dnes je tato skutečnost právě naopak, což je dáno vývojem a rozvojem řezných materiálů. Bohužel se často při návrhu řezných podmínek setkáváme s nedostatečnými parametry strojů pro maximální využití aplikačních možností. Tato skutečnost vytváří silný tlak na výrobce obráběcích strojů [1].

4.1 Optimální trvanlivost břitu z hlediska minimálních výrobních nákladů

Při odvozování optimální trvanlivosti z pohledu minimálních výrobních nákladů vycházíme ze základní nákladové funkce (2.15), a dále z předpokladu, že neuvažujeme omezující podmínky. Funkci trvanlivosti vyjádříme tak, že za otáčky dosadíme ze vztahu (3.22). Dále pro tuto funkci vypočteme první derivaci, kde není trvanlivost funkcí posuvu a hloubky řezu. Dále postupujeme tak, že položíme tuto rovnici nule a vyjádříme trvanlivost řezného nástroje [1], [7], [9].

Poté lze psát vztah [1]:

$$\frac{dN}{dT} = 0 \quad (4.1)$$

Dosazením získáme vztah [1]:

$$\frac{L \cdot \eta \cdot d \cdot a_p^{x_v} \cdot k_r}{1\,000 \cdot c_v \cdot f^{1-y_v} \cdot m} \cdot T^{\frac{1}{m}-1} \cdot N_{sm} + \frac{l \cdot \pi \cdot D \cdot a_p^{x_v} \cdot k_r}{1\,000 \cdot c_v \cdot f^{1-y_v}} \cdot \left(\frac{1}{m} - 1\right) \cdot T^{\frac{1}{m}-2} \cdot (N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}) = 0 \quad (4.2)$$

Po úpravě obdržíme vztah pro optimální trvanlivost z hlediska minimálních nákladů [1]:

$$T_{optN} = \frac{N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}}{N_{sm}} \cdot k_r \cdot (m - 1) [min] \quad (4.3)$$

4.2 Optimální trvanlivost břítu z hlediska maximální produktivity

Výpočtový vztah pro optimální trvanlivost z hlediska maximální produktivity se stanovuje analogicky jako pro případ výpočtu optimální trvanlivosti z hlediska minimálních výrobních nákladů. Vycházíme z rovnice (2.20) po stejných analogických matematických úpravách dostáváme výsledný vztah [1]:

$$T_{optP} = t_{vn} \cdot k_r \cdot (m - 1) \quad (4.4)$$

4.3 Optimální trvanlivost z hlediska maximálního zisku

Pro kritérium optimální trvanlivosti z hlediska maximálního zisku platí totožný výsledný vztah jako pro hledisko minimálních výrobních nákladů [1].

Poté tedy musí platit vztah:

$$T_{optZ} = T_{optN} \quad (4.5)$$

4.4 Postupný způsob optimalizace řezných podmínek

Pro stanovení řezných podmínek je v praxi stále používán postupný způsob optimalizace, a to i přes kritiku této metody. Významnost tohoto postupu je dána především v jednoduchosti a aplikovatelnosti za určitých okolností [1], [18].

Optimalizaci postupným způsobem lze formulovat těmito kroky:

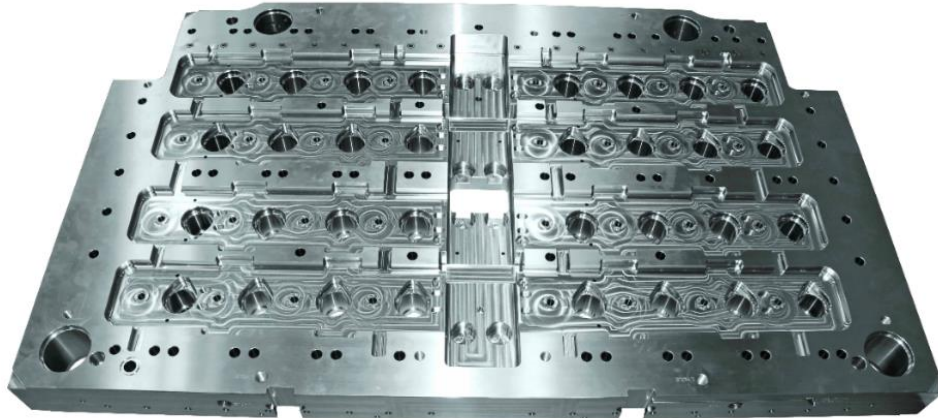
- 1) Určení optimální trvanlivosti břitu nástroje podle zvoleného kritéria optimálnosti (např. kritérium minimálních výrobních nákladů, kritérium maximální produktivity nebo kritérium maximálního zisku), bez uvažování omezujících podmínek. Tato trvanlivost však bývá v praxi určována nesprávně nebo nekvalifikovaně odhadována. To má za následek zvyšování výrobních nákladů na obrábění nebo snižování výsledné produktivity práce [1], [18], [19].
- 2) Určení optimální hloubky řezu. Základní zásadou je obrábět celý přídavek na hrubování najednou. Přídavek na obrábění dalších operací má být co nejmenší, ale takový, aby se odebrala nepřesnost předešlé operace. Pro hrubovací operace tato zásada obecně neplatí. V praxi bývá někdy výhodnější odebrat přídavek na více třísek. To je dáno vlivem řezné síly, respektive měrného řezného odporu [1], [18].
- 3) Určení optimální velikosti posuvu. Maximální přípustný posuv stanovíme z omezujících podmínek, které nejsou funkcí otáček, pro zvolenou hloubku řezu. Optimální posuv bude minimální hodnota z těchto posuvů. Některé normativy řezných podmínek uvádějí některé pomocné hodnoty například velikosti řezných sil nebo dosahované kvalitativní parametry obrobené plochy [1], [18].
- 4) Určení optimální řezné rychlosti z komplexního Taylorova vztahu (3.22). Tuto řeznou rychlost stanovujeme pro optimální hodnoty trvanlivosti, hloubky řezu a posuvu [1], [18], [21].
- 5) Provedeme kontrolu navržených hodnot, zda nedošlo k překročení výkonu stroje nebo překročení maximálních otáček stroje. Pokud dojde k překročení, redukuje se nejprve řeznou rychlost [1], [18].

5 SPOLEČNOST TIRAD s. r. o.

Experimentální část této práce je provedena ve spolupráci se společností TIRAD s. r. o., která se zabývá obráběním velmi přesných dílů. Společnost TIRAD s. r. o. je strojírenská společnost působící na českém trhu již od roku 1993. Společnost se svojí více jak 25letou historií patří mezi významnou kov-obrábějící společnost v České republice. Společnost většinu svých výrobků exportuje do zahraničí. Společnost TIRAD s. r. o. se specializuje na výrobu přesných dílů jako například velmi přesných dílů desek, rámu a dílů forem pro vstřikování plastů (jako vícenásobné formy). Dále se specializuje na hluboké vrtání s otočným stolem a v neposlední řadě se zabývá speciálním obráběním velmi velkých obrobků o hmotnostech nepřesahující 25 tun [23].

Historie této společnosti se píše od roku 1993, kdy byla zapsána do obchodního rejstříku. Prvotním podnikatelským záměrem a činností byla autodoprava. Z této činnosti také vzniklo jméno společnosti TIRAD. TIR jako mezinárodní silniční doprava, dále A jako Austria a D jako zkratka státu Deutschland. Zásadní vývoj této společnosti nastal v roce 1996, kdy společnost zakoupila první výrobní prostory v Šašovicích a také v tomto roce došlo k zakoupení prvního CNC obráběcího stroje a ukončení prvotního podnikatelského záměru automobilové dopravy. V roce 1999 došlo k rozhodnutí zaměřit se na obrábění speciálních rámu forem pro vstřikování plastů. První nákup CNC měřicího stroje byl uskutečněn v roce 2000. V roce 2012 společnost uskutečnila přechod z 2D-výrobní dokumentace na 3D modely (tzv. bezpapírová výroba). Další zásadní rozvoj této společnosti nastal v roce 2014, kdy se stala společnost TIRAD s. r. o. součástí nadnárodního koncernu Milacron. Společnost Milacron je celosvětovým lídrem v oboru technologie a zpracování plastů. Celkový počet zaměstnanců společnosti TIRAD s. r. o. je v současné době téměř 220. Společnost exportuje do Evropy a Ameriky téměř 100 % své produkce [23].

Příklad vyráběných součástí v této společnosti můžeme vidět na obrázku 4. Tyto díly jsou vyráběny na CNC hluboko-vrtacích strojích, frézkách a bruskách. Společnost se specializuje na kusovou až malosériovou výrobu. Velkou výhodou společnosti je i skutečnost, že nemá v České republice přímého konkurenta a svojí veškerou produkci vyváží do zemí západní Evropy [23].



Obrázek 4: Příklad výrobků společnosti [24]

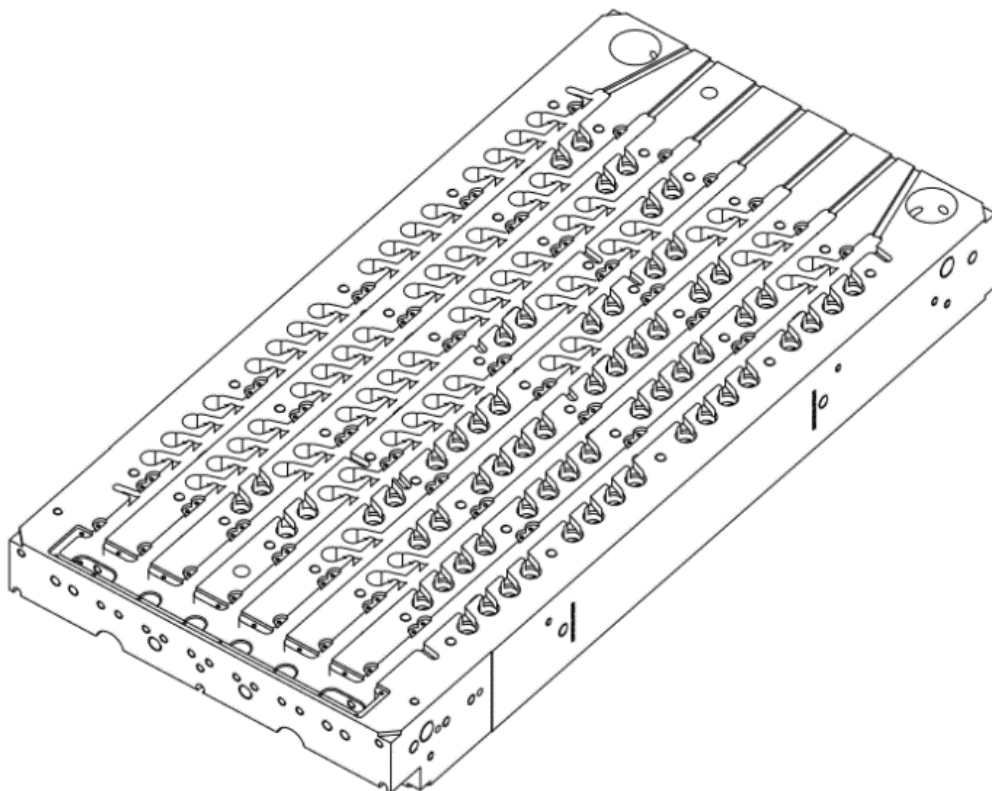
Společnost má své sídlo v kraji Vysočina, konkrétně se nachází v Šašovicích, místní části městyse Želetava. Výrobní prostory této společnosti jsou ve třech velkých halách, z čehož jedna hala je pouze distribučním centrem pro produkty sesterských společností. Celková výrobní plocha zaujímá výměru o rozloze přibližně 4 500 m². Na obrázku 5 jsou vidět výrobní prostory této společnosti [23].



Obrázek 5: Výrobní prostory společnosti [23]

6 VYBRANÁ SOUČÁST PRO OPTIMALIZACI

Po konzultaci se společností TIRAD s. r. o. byla vybrána součást (Obr. 6) pro optimalizaci řezných podmínek. Jedná se o díl formy pro vícenásobné vstřikování plastů – tzv. hot runner plate. Součást má tyto rozměry 1 440 mm x 770 mm x 160 mm. Součást je vyráběná z nenormalizovaného polotovaru, které jsou dodávány jako jednotlivé bloky materiálu. Materiál této součásti je **X33CrS16** (1.2085), jedná se o nástrojovou ocel. Po dohodě se společností jsou jako hlavní operace řešeny operace hrubování rovinných ploch, hrubování vybraných děr a odhrazovací operace.



Obrázek 6: 3D model vybrané součásti [25]

6.1 Materiál součásti

Materiálem vybrané součásti je korozi odolná, martenzitická ocel s velmi vysokým obsahem chromu. Běžné chemické složení tohoto materiálu uvádí tabulka 3. Tento materiál vykazuje velmi vysokou korozní odolnost s velmi dobrou obrobitelností a leštitelností. Materiál je dodáván v zušlechtném stavu na 280 až 325 HB. Dále materiál vykazuje velmi dobrou rovnoměrnou pevnost v celém průřezu a dobrou mechanickou odolnost proti poškození. Materiál je modifikací oceli 1.2316 s přísadou síry, což vede ke zlepšení obrobitelnosti.

Použitím je tento materiál vhodný pro rámy forem všech rozměrů, především pak pro zpracování chemicky agresivních plastů. Mechanické vlastnosti materiálu X33CrS16 (1.2085) uvádí tabulka 4 [26], [27].

Tabulka 3: Běžné chemické složení materiálu [28]

Materiál X33CrS16					
C	Cr	S max	P max	Si	Mn
0,33	16	0,07	0,03	0,3	1

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti materiálu X33CrS16 [28]

Tvrdość	Rp 0,2	Rm	Tažnosť
HB	Mpa	Mpa	%
320	905	1 100	10

Současný postup výroby těchto dílů:

Prvotním krokem výroby je tvorba programu pomocí CAM softwaru. Následuje hluboké vrtání pro rozvod chladicí kapaliny a hrubovací operace frézováním. Dále přesunutí obrobků na broušení, jedná se o metodu broušení na plocho. Následně proběhne dokončovací frézovací operace obrobků. Obrobky se přemístí na pracoviště ruční kontroly, kde se dokončí sražení hran, které není možné srazit strojně, vyčištění desky a základní kontrola závitů. Následuje 100 % kontrola obrobků pomocí 3D CNC měření. Na přání zákazníka je možná i montáž rámu [23].

V současné době se společnost specializuje především na udržení své konkurence schopnosti pomocí masivních investic do výrobních zařízení a prostorů, dále se zaměřuje na kompletní výrobu velmi přesných desek a rámu pro vícenásobné vstřikování. Zlepšování ve firmě se především koncentruje do neustálého snižování režijních časů a zvyšování produktivity řezného procesu. Dosahovaná přesnost výroby je pro desky s vybráním pro kavity pozičně $\pm 0,008$ mm na 1 000 mm, nebo pro kapsy a průměry $\pm 0,005$ mm dle výkresové dokumentace. Měsíční strojová kapacita této společnosti je cca 10 000 hodin měsíčně. Veškeré strojní vybavení je v tomto podniku typu CNC. Maximální velikost obrobků je 2 300 mm x 1 600 mm x 1 000 mm o maximální hmotnosti 4 000 kg [23].

Po dohodě s konzultantem ve společnosti jsou jednotlivé operace uváděny v práci pod označením jednotlivých nástrojů, a to především z důvodu přehlednosti a nezaměnitelnosti při následné aplikovatelnosti v podniku.

7 STROJNÍ ZAŘÍZENÍ

Samotné obrábění je v tomto podniku rozčleněno na hrubovací a dokončovací operace, jednotlivé operace probíhají na odlišných strojích. Po konzultaci byly vybrány hlavní dva představitelé pro hrubovací operace. Prvním strojem je MCFV 1680 od výrobce Tajmac ZPS. Druhým strojem je výkonný japonský stroj Mazak HCN 12800, který pro podnik představuje nejdražší stroj, který společnost vlastní. Pro tyto dva stroje je řešena optimalizace řezných podmínek.

7.1 Stroj MCFV 1680

Jedná se o vertikální obráběcí centrum. Výrobce těchto obráběcích strojů je společnost TAJMAC-ZPS Zlín. Stroj MCFV 1680 (Obr. 7) je popisován jako vysoce produktivní a komplexní stroj pro třískové obrábění. Stroj má velmi vysokou pevnost a tuhost, velmi dobrou dynamickou a tepelnou stabilitu. Stroj vykazuje dlouhodobě vysokou přesnost a spolehlivost obrábění. V podélném směru (osa x) se pohybuje pracovní stůl, který je určený pro upínání obrobků. Křížový suport se pohybuje v příčném směru (osa y) a vřeteník se pohybuje ve vertikálním směru (osa Z) po vedení stojanu. Stroj je vybaven digitálními pohony. Odměřování v jednotlivých osách je realizováno pomocí lineárních optoelektrických absolutních pravítek. Držák nástrojů je automaticky ofukován. O správný a bezpečný odchod třísky se stará systém dopravníků. Jednotlivé vlastnosti tohoto centra jsou uvedeny v tabulce 5 [29].



Obrázek 7: Stroj MCFV 1680 [29]

Tabulka 5: Vlastnosti obráběcího centra MCFV 1680 [29]

Pojezdy stroje		
Osa X	mm	1 650
Osa Y	mm	810
Osa Z	mm	810
Vzdálenost čela vřetena od stolu	mm	110 - 920
Posuvy stroje		
Maximální pracovní posuv	m/min	30
Rychloposuv	m/min	30
Zrychlení	m/s ²	3,5
Pracovní přesnost (VDI/DGQ 3441)		
Přesnost polohování	mm	0,009
Opakovaná přesnost	mm	0,005
Odměřovací systém	Přímý	
Stůl stroje		
Pracovní plocha	mm	1 800 x 780
Maximální zatížení	kg	2 500
Vřeteno		
Upínání nástroje	ISO 50	
Maximální otáčky	min ⁻¹	8 000
Výkon stroje / krátkodobé přetížení	kW	17 / 25
Maximální krouticí moment	N.m	519 / 764
Typ převodu	Planetový	
Zásobník nástrojů		
Počet míst	ks	24
Čas výměny nástroje	s	4,5
Maximální délka nástroje	mm	300
Maximální průměr nástroje	mm	180
Max. hmotnost nástroje / celkem	kg	15 / 200
Přívod energie		
Jmenovité napětí sítě	V/Hz	3x400/50
Provozní příkon	kVA	35
Stlačený vzduch	Mpa	0,6 - 0,8

7.2 Stroj Mazak HCN 12800

Japonský stroj Mazak HCN 12800 dodávaný jako horizontální obráběcí centrum (Obr. 8). Je vybaven vřetenem s kuželem č. 50 – vysokorychlostní a vysoce přesná obráběcí vodorovná centra. Ovládacím prvkem tohoto stroje je typ SmoothG. Velmi tuhá konstrukce stroje zaručuje velmi přesné obrábění, dokonce i pro dokončovací operace. Dotyková obrazovka s intuitivním ovládáním umožňují pohodlné nastavování nástrojů v zásobníku stroje. Tento stroj je možné dodat s velkým množstvím modifikací a příslušenství. Základní vlastnosti tohoto stroje jsou uvedeny v tabulce 6 [30].



Obrázek 8: Stroj Mazak HCN 12800 [30]

Tabulka 6: Vlastnosti stroje Mazak [30]

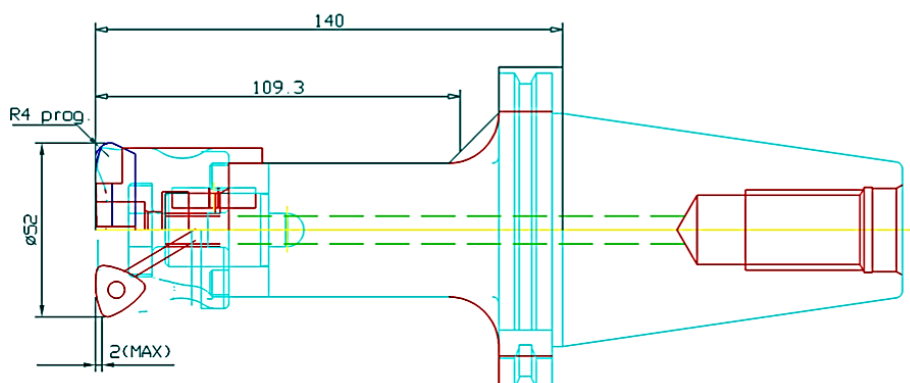
Pojezdy stroje		
Osa X	mm	2 200
Osa Y	mm	1 600
Osa Z	mm	1 850
Maximální průměr obrobku	mm	2 400
Posuvy stroje		
Maximální pracovní posuv	m/min	43
Rychloposuv	m/min	43
Stůl stroje		
Pracovní plocha	mm	1 800 x 780
Maximální zatížení	kg	2 500
Vřeteno		
Upínání nástroje	ISO 50	
Maximální otáčky	min ⁻¹	10 000
Výkon stroje / krátkodobé přetížení	kW	30 / 37
Zásobník nástrojů		
Počet míst	ks	80
Čas výměny nástroje	s	2,6
Maximální délka nástroje	mm	800
Maximální průměr nástroje	mm	360
Max. hmotnost nástroje	kg	30

8 ŘEZNÉ NÁSTROJE

V následující kapitole jsou popsány řezné nástroje používané v současném obráběcím procesu. Tyto nástroje jsou používány pro obrábění výše uvedené součásti. Jedná se konkrétně o čtyři řezné nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu. Jedná se o velmi často používané nástroje, které jsou trvale umístěné v sestaveném stavu v zásobnících strojů.

8.1 Nástroj T1 - 4805


Nástroj T1 – s podnikovým označením 4805 je hrubovací fréza o průměru 52 mm (Obr. 9). Jedná se o nástroj s VBD ze slinutého karbidu. Nástroj je osazen čtyřmi VBD. Každá VBD má 6 ostří, a proto je možné ji 6x otočit. Dodavatelem těchto nástrojů je společnost TaeguTec Cutting Tools. Nástroj využívaný pro tzv. vysokorychlostní obrábění, jedná se o nejvíce produktivní variantu tohoto nástroje.



Obrázek 9: Schématický výkres nástroje T1 [25]

Na tomto nástroji jsou používány VBD pod označením BLMP 1306R-M TT9080 (Obr. 10).

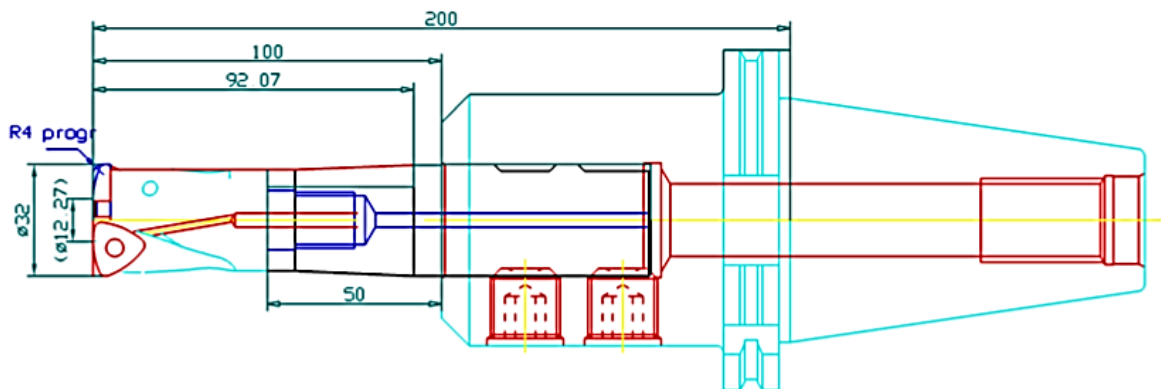
Size	Dimension (mm)			
	d	t	ap	r
13	12.3	7	2	22

Insert	Designation	Recommended machining conditions		CVD coated		PVD coated						
		Fz (mm/tooth)	ap (mm)	TT6800	TT7800	TT9540	TT2510	TT3540	TT6080	TT8020	TT8080	TT9080
	BLMP 1306R-M	0.40-4.50	0.5-2.0	●	●	○	●	○	●	●	●	●
	1306R-MM	0.40-4.50	0.5-2.0			○		○		●	●	●
	1306R-MR	0.40-4.50	0.5-2.0	●		○	●	○	●			●

Obrázek 10: VBD ro nástroj T1 [31]

8.2 Nástroj T2 - 4845

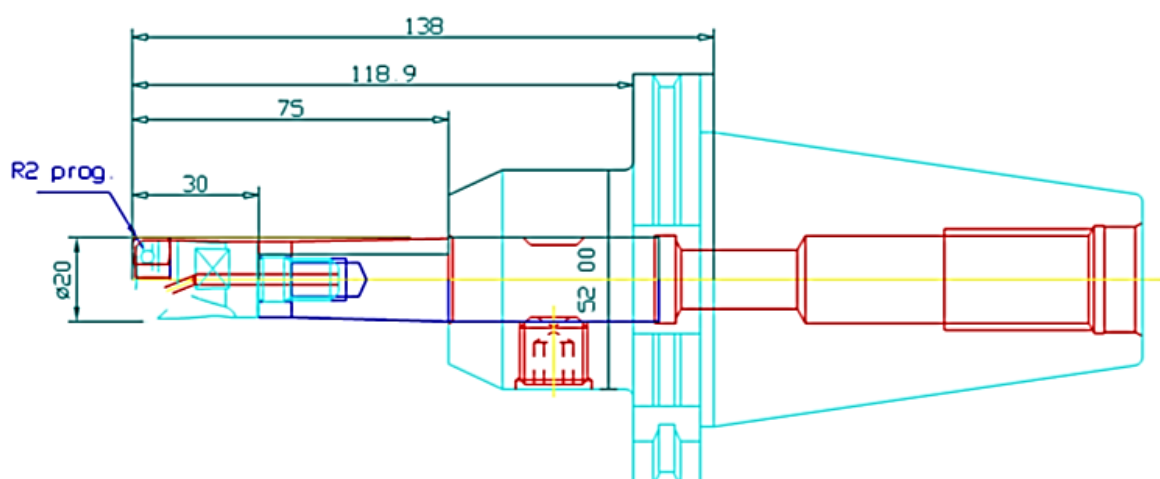
Nástroj T2 – nese podnikové označení 4845, jedná se o hrubovací frézu s VBD ze slinutého karbidu. Tato fréza má průměr 32 mm (Obr. 11). Fréza je osazena dvěma VBD a každou destičku lze 6x otočit, z toho vyplývá 6 řezných hran nástroje. Tento nástroj se používá se stejnými VBD jako nástroj T1, a to konkrétně s BLMP 1306R-M TT9080 (Obr. 10).



Obrázek 11: Schématický výkres nástroje T2 [25]

8.3 Nástroj T3 - 5021

Nástroj T3 – s podnikovým názvem 5021 je fréza s VBD ze slinutého karbidu (Obr. 12). Nástroj T3 má průměr 20 mm, je osazen dvěma VBD, kde každá destička má 4 břity, a tudíž ji lze 4x otočit. U toho to nástroje se používají VBD s označením BLMP 0603R-M (Obr. 13).



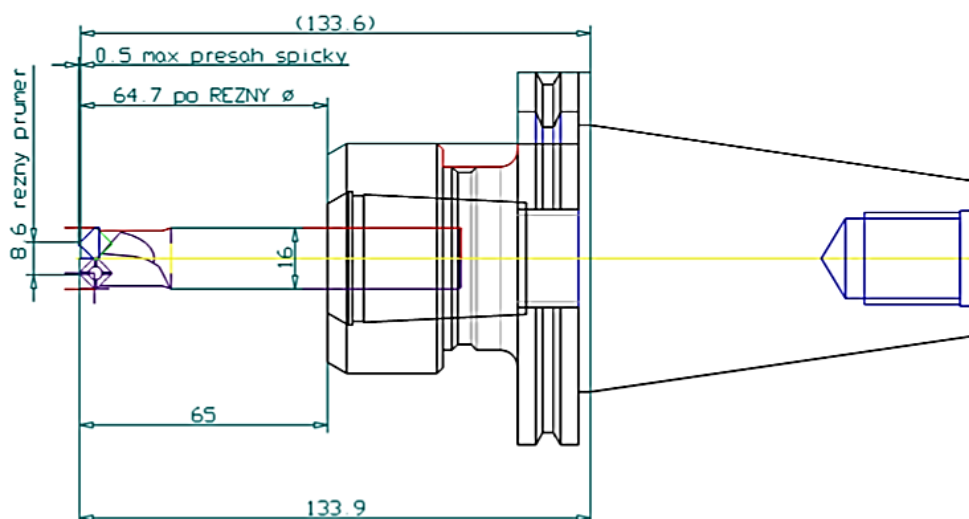
Obrázek 12: Nástroj T3 [25]



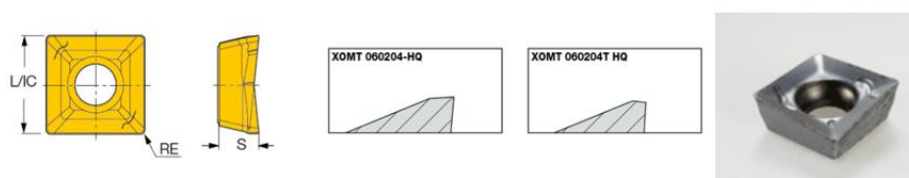
Obrázek 13: VBD pro nástroj T3 [31]

8.4 Nástroj T4 - 2316

Nástroj T4 má podnikové označení 2316, jedná se o odjehlovací frézu s VBD ze slinutého karbidu. Řezný průměr tohoto nástroje je 8,6 mm (Obr. 14). Nástroj je osazen jednou VBD. Destička má 8 řezných hran a lze ji 8x otočit. Výrobce tohoto nástroje je společnost Iscar. Používané VBD na tomto nástroji jsou označovány jako 71265 XOMT 060204-HQ IC 328 (Obr. 15).



Obrázek 14: Schématický výkres nástroje T4 [25]



L	S	RE	fz (min)	fz (max)
6.16	2.56	0.40	0.07	0.10

Obrázek 15: VBD pro nástroj T4 [32]

9 VÝPOČET SOUČASNÉHO STAVU

V této kapitole jsou definovány jednotlivé výpočtové vztahy pro stávající řezné podmínky. Jsou stanoveny náklady na strojní práci, náklady na nástroje, náklady na výměnu nástroje a následně jsou určeny celkové výrobní náklady pro jednotlivé nástroje.

9.1 Náklady na strojní práci na operační úsek

Pro výpočet strojní práce musíme nejdříve stanovit odpis stroje podle vztahu (2.5), následně vypočítat hodinové náklady na provoz stroje pomocí vztahu (2.4). Poté počítáme strojní práci minutovou dle vztahu (2.3). Po konzultaci s prof. Mádlem byly stanoveny koeficienty využití stroje na 0,7 a koeficient na údržbu a opravy stroje na 1,2. HRP_{SP} je pro stroj MCFV 690 korun na hodinu a pro stroj Mazak je 721 korun na hodinu, mzda operátora je 270 korun na hodinu včetně sociálního a zdravotního pojištění.

Stroj MCFV 1680:

Vstupní parametry pro výpočet odpisů pro první stroj uvádí následující tabulka.

Tabulka 7: Vstupní hodnoty pro stroj MCFV 1680 [autor]

C_S [Kč]	Z_S [roky]	CFS_{EFPL} [hod/rok a směnu]	SM	C_E [Kč/hod]
5 678 239	8	3 737,5	2	42

Odpis stroje je poté následující:

$$O_S = \frac{C_S}{Z_S \cdot SM \cdot CFS_{EFPL} \cdot k_{vs}} = \frac{5\,678\,239}{8 \cdot 2 \cdot 3\,737,5 \cdot 0,7} = \mathbf{135,6 \text{ Kč/hod}} \quad (9.1)$$

Hodinové náklady na provoz stroje:

$$N_{hs} = O_S \cdot k_{us} + C_E = 135,6 \cdot 1,2 + 42 = \mathbf{204,7 \text{ Kč/hod}} \quad (9.2)$$

Náklady na strojní práci minutové:

$$N_{sm} = k_c \cdot \left(\frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} = 1,11 \cdot \left(\frac{270}{60} + \frac{690}{60} \right) + \frac{204,7}{60} \quad (9.3)$$
$$= \mathbf{21,17 \text{ Kč/min}}$$

Stroj Mazak HCN 1280:

Následující tabulka uvádí vstupní parametry pro výpočet odpisů pro uvedený stroj.

Tabulka 8: Vstupní hodnoty pro stroj Mazak [autor]

C_s [Kč]	Z_s [roky]	CFS_{EFPL} [hod/rok a směnu]	SM	C_E [Kč/hod]
28 000 000	12	3 737,5	2	61,6

Po dosazení stanovíme odpis stroje:

$$O_s = \frac{C_s}{Z_s \cdot SM \cdot CFS_{EFPL} \cdot k_{vs}} = \frac{28\,000\,000}{12 \cdot 2 \cdot 3\,737,5 \cdot 0,7} = 445,9 \text{ Kč/hod} \quad (9.4)$$

Hodinové náklady na provoz stroje:

$$N_{hs} = O_s \cdot k_{us} + C_E = 445,9 \cdot 1,2 + 61,6 = 596,7 \text{ Kč/hod} \quad (9.5)$$

Náklady na strojní práci minutové:

$$N_{sm} = k_c \cdot \left(\frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} = 1,11 \cdot \left(\frac{270}{60} + \frac{721}{60} \right) + \frac{596,7}{60} \\ = 28,28 \text{ Kč/min} \quad (9.6)$$

9.2 Náklady na výměnu nástroje

Postup výpočtu je podrobně popsán v kapitole 2. Pro vybrané stroje lze stanovit minutové náklady na výměnu nástroje pomocí vztahu (2.11). Tuto nákladovou položku nejvíce ovlivňuje odpis stroje. HRP_{SP} ostřírny je 315 Kč/hod. a M_o je 229,5 Kč/hod.

Stroj MCFV 1680:

$$N_{vnm} = k_c \cdot \left(\frac{M_s}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{O_s}{60} = 1,11 \cdot \left(\frac{229,5}{60} + \frac{315}{60} \right) + \frac{135,6}{60} \\ = 12,33 \text{ Kč/min} \quad (9.7)$$

Stroj Mazak HCN 1280:

$$N_{vnm} = k_c \cdot \left(\frac{M_s}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{O_s}{60} = 1,11 \cdot \left(\frac{229,5}{60} + \frac{315}{60} \right) + \frac{445,9}{60} \\ = 17,5 \text{ Kč/min} \quad (9.8)$$

9.3 Náklady na nástroje vztažené na jednu trvanlivost

Náklady na nástroje vztažené na jednu trvanlivost břitů nástroje stanovíme pomocí vztahu (2.8). V této práci je počítáno pouze s nástroji s VBD bez dalšího přeostření. Po konzultaci s vedoucím práce byl stanoven koeficient údržby tělesa nástroje na 0,2 a součinitel VBD 0,75. Při výpočtu vycházíme z počtu břitových destiček na nástroji, počtu jednotlivých břitů na destičce, ceny tělesa nástroje, možném počtu upnutí jednotlivých destiček a koeficientu na údržbu tělesa a součinitele využití jednotlivých destiček. Vstupní hodnoty definuje následující tabulka.

Tabulka 9: Vstupní parametry pro nástroje [autor]

Nástroj	Nástroj T1	Nástroj T2	Nástroj T3	Nástroj T4
C_d [Kč]	216	216	197	148
C_{ts} [Kč]	8 076	5 515	4 939	3 127

Pro uvedené nástroje jsou náklady na nástroje následující:

Nástroj T1:

$$N_{nT} = \frac{C_d \cdot Z_d}{Z_b \cdot S_b} + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{z_u} = \frac{216 \cdot 4}{6 \cdot 0,75} + (1 + 0,2) \cdot \frac{8\,076}{90} = 299,68 \text{ Kč} \quad (9.9)$$

Nástroj T2:

$$N_{nT} = \frac{C_d \cdot Z_d}{Z_b \cdot S_b} + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{z_u} = \frac{216 \cdot 2}{6 \cdot 0,75} + (1 + 0,2) \cdot \frac{5\,515}{30} = 316,6 \text{ Kč} \quad (9.10)$$

Nástroj T3:

$$N_{nT} = \frac{C_d \cdot Z_d}{Z_b \cdot S_b} + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{z_u} = \frac{197 \cdot 2}{4 \cdot 0,75} + (1 + 0,2) \cdot \frac{4\,939}{31} = 322,5 \text{ Kč} \quad (9.11)$$

Nástroj T4:

$$N_{nT} = \frac{C_d \cdot Z_d}{Z_b \cdot S_b} + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{z_u} = \frac{148 \cdot 1}{8 \cdot 0,75} + (1 + 0,2) \cdot \frac{3\,127}{35} = 131,88 \text{ Kč} \quad (9.12)$$

9.4 Rozbor stávajících parametrů

V této podkapitole jsou stanoveny výpočty pro strojní čas, koeficient řezání a počet výměn nástroje pro jednotlivé řezné nástroje.

Strojní čas:

Jednotlivé strojní časy jsou určeny pomocí upraveného vztahu (2.14), a jsou následující:

Nástroj T1:

$$t_{As} = \frac{L_c}{f_z \cdot z \cdot n} = \frac{1\,556\,843}{1,56 \cdot 4 \cdot 1\,600} = \mathbf{155,93 \text{ min}} \quad (9.13)$$

Nástroj T2:

$$t_{As} = \frac{L_c}{f_z \cdot z \cdot n} = \frac{432\,956,6}{1,73 \cdot 2 \cdot 2\,600} = \mathbf{48,13 \text{ min}} \quad (9.14)$$

Nástroj T3:

$$t_{As} = \frac{L_c}{f_z \cdot z \cdot n} = \frac{1\,319\,112,6}{1,01 \cdot 2 \cdot 3\,980} = \mathbf{164,08 \text{ min}} \quad (9.15)$$

Nástroj T4:

$$t_{As} = \frac{L_c}{f_z \cdot z \cdot n} = \frac{41\,590,3}{0,18 \cdot 1 \cdot 4\,900} = \mathbf{47,15 \text{ min}} \quad (9.16)$$

Koeficient řezání k_r :

Koeficient řezání je dán podílem délky nástroje v řezu ku celkové obráběné délce a pro jednotlivé nástroje jsou následující:

Nástroj T1:

$$k_r = \frac{L}{L_c} = \frac{1\,545\,348,5}{1\,556\,843,5} = \mathbf{0,993} \quad (9.17)$$

Nástroj T2:

$$k_r = \frac{L}{L_c} = \frac{212\,924,4}{432\,956,6} = \mathbf{0,492} \quad (9.18)$$

Nástroj T3:

$$k_r = \frac{L}{L_c} = \frac{1\,232\,449,7}{1\,319\,112,6} = \mathbf{0,934} \quad (9.19)$$

Nástroj T4:

$$k_r = \frac{L}{L_c} = \frac{36\,946}{41\,590,3} = \mathbf{0,888} \quad (9.20)$$

Stanovení počtu výměn z_v :

Při stanovení počtu výměn nástroje vycházíme z trvanlivosti ostří, strojního času a koeficientu řezání. Podrobně je tato část popsána v kapitole 2, konkrétně vycházíme ze vztahu (2.7). Současnou trvanlivost břitů jednotlivých nástrojů uvádí tabulka 10.

Tabulka 10: Trvanlivost jednotlivých břitů [25]

Nástroj	T1	T2	T3	T4
T[min]	40	80	45	45

Nástroj T1:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r = \frac{155,93}{40} \cdot 0,993 = \mathbf{3,87} \quad (9.21)$$

Nástroj T2:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r = \frac{48,13}{80} \cdot 0,492 = \mathbf{0,3} \quad (9.22)$$

Nástroj T3:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r = \frac{164,08}{45} \cdot 0,934 = \mathbf{3,42} \quad (9.23)$$

Nástroj T4:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r = \frac{47,15}{45} \cdot 0,888 = \mathbf{0,93} \quad (9.24)$$

9.5 Výpočet celkových nákladů – stávajících

V této kapitole jsou nejprve stanoveny náklady na strojní práci pomocí vztahu (2.2) pro oba stroje, následně náklady na výměnu nástroje dle výpočtového vztahu (2.11), dále následuje výpočet nákladů na nástroje dle vztahu (2.6). Poté jsou stanoveny celkové výrobní náklady.

Náklady na strojní práci – MCFV 1680:

Náklady na strojní práci se stanoví tak, že strojní čas dané operace násobíme minutovými náklady na strojní práci. Na velikost nákladů na strojní práci má zásadní vliv strojní čas.

Nástroj T1:

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} = 155,93 \cdot 21,17 = \mathbf{3\ 301,1\ Kč} \quad (9.25)$$

Nástroj T2:

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} = 48,13 \cdot 21,17 = \mathbf{1\ 018,9\ Kč} \quad (9.26)$$

Nástroj T3:

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} = 164,08 \cdot 21,17 = \mathbf{3\ 473,6\ Kč} \quad (9.27)$$

Nástroj T4:

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} = 47,15 \cdot 21,17 = \mathbf{998,2\ Kč} \quad (9.28)$$

Náklady na strojní práci – Mazak HCN 12800:

Při násobení strojního času dané operace s minutovými náklady na strojní práci dostáváme náklady na strojní práci. Pro tento stroj jsou náklady na strojní práci následující:

Nástroj T1:

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} = 155,93 \cdot 28,28 = \mathbf{4\ 409,7\ Kč} \quad (9.29)$$

Nástroj T2:

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} = 48,13 \cdot 28,28 = \mathbf{1\ 361,1\ Kč} \quad (9.30)$$

Nástroj T3:

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} = 164,08 \cdot 28,28 = \mathbf{4\ 640,2\ Kč} \quad (9.31)$$

Nástroj T4:

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} = 47,15 \cdot 28,28 = \mathbf{1\ 333,4\ Kč} \quad (9.32)$$

Náklady na výměnu nástroje – MCFV 1680:

Náklady na výměnu nástroje stanovíme tak, že násobíme čas výměny nástroje s minutovými náklady na výměnu nástroje a počtem výměn daného nástroje v dané operaci. Zásadním parametrem pro celkové náklady na výměnu nástroje je čas výměny nástroje (více str. 18) a dále počet výměn nástroje.

Nástroj T1:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 0,075 \cdot 12,33 \cdot 3,87 = \mathbf{3,58\ Kč} \quad (9.33)$$

Nástroj T2:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 0,075 \cdot 12,33 \cdot 0,3 = \mathbf{0,28\ Kč} \quad (9.34)$$

Nástroj T3:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 0,075 \cdot 12,33 \cdot 3,42 = \mathbf{3,16\ Kč} \quad (9.35)$$

Nástroj T4:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 0,075 \cdot 12,33 \cdot 0,93 = \mathbf{0,86\ Kč} \quad (9.36)$$

Náklady na výměnu nástroje – Mazak HCN 12800

Jak již bylo zmíněno výše nákladů na výměnu nástroje je funkcí času výměny nástroje, minutových nákladů na výměnu nástroje a počtu výměn nástroje v dané operaci. Pro stroj Mazak HCN 12800 jsou náklady na výměnu nástroje následující:

Nástroj T1:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 0,05 \cdot 17,5 \cdot 3,87 = \mathbf{3,39 \text{ Kč}} \quad (9.37)$$

Nástroj T2:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 0,05 \cdot 17,5 \cdot 0,3 = \mathbf{0,26 \text{ Kč}} \quad (9.38)$$

Nástroj T3:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 0,05 \cdot 17,5 \cdot 3,42 = \mathbf{2,99 \text{ Kč}} \quad (9.39)$$

Nástroj T4:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 0,05 \cdot 17,5 \cdot 0,93 = \mathbf{0,81 \text{ Kč}} \quad (9.40)$$

Z dosažených výsledků nákladů na výměnu nástroje můžeme konstatovat, že tato položka tvoří v celkových nákladech nepatrnou nákladovou položku v řádech procent. To je dáno především skutečností, že výměna nástroje u moderních CNC strojů trvá několik sekund.

Náklady na nástroje:

Náklady na nástroje stanovíme jako počet výměn nástroje v dané operaci násobené náklady na nástroje vztažené k jedné trvanlivosti břitu řezného nástroje. Pro oba uvedené stroje jsou náklady na nástroje následující:

Nástroj T1:

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} = 3,87 \cdot 299,68 = \mathbf{1\ 159,8 \text{ Kč}} \quad (9.41)$$

Nástroj T2:

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} = 0,3 \cdot 316,6 = \mathbf{94,98 \text{ Kč}} \quad (9.42)$$

Nástroj T3:

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} = 3,42 \cdot 322,5 = \mathbf{1\ 102,95 \text{ Kč}} \quad (9.43)$$

Nástroj T4:

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} = 0,93 \cdot 131,88 = \mathbf{122,65 \text{ Kč}} \quad (9.44)$$

Celkové výrobní náklady – MCFV 1680:

Celkové výrobní náklady se stanoví jako součet jednotlivých nákladových položek. Konkrétně se jedná o součet nákladů na strojní práci, nákladů na nástroje a nákladů na výměnu nástrojů.

Nástroj T1:

$$N = N_s + N_{vn} + N_n = 3\,301,1 + 3,58 + 1\,159,8 = \mathbf{4\,464,5\ K\check{c}} \quad (9.45)$$

Nástroj T2:

$$N = N_s + N_{vn} + N_n = 1\,018,9 + 0,28 + 94,98 = \mathbf{1\,114,2\ K\check{c}} \quad (9.46)$$

Nástroj T3:

$$N = N_s + N_{vn} + N_n = 3\,473,6 + 3,16 + 1\,102,95 = \mathbf{4\,579,7\ K\check{c}} \quad (9.47)$$

Nástroj T4:

$$N = N_s + N_{vn} + N_n = 998,2 + 0,86 + 122,65 = \mathbf{1\,121,7\ K\check{c}} \quad (9.48)$$

Celkové výrobní náklady – Mazak HCN 12800

Celkové výrobní náklady jsou stanoveny jako součet nákladů na strojní práci, nákladů na nástroje a nákladů na výměnu nástrojů.

Nástroj T1:

$$N = N_s + N_{vn} + N_n = 4\,409,7 + 3,39 + 1\,159,8 = \mathbf{5\,572,9\ K\check{c}} \quad (9.49)$$

Nástroj T2:

$$N = N_s + N_{vn} + N_n = 1\,361,4 + 0,26 + 94,98 = \mathbf{1\,456,6\ K\check{c}} \quad (9.50)$$

Nástroj T3:

$$N = N_s + N_{vn} + N_n = 4\,640,2 + 2,99 + 1\,102,95 = \mathbf{5\,746,14\ K\check{c}} \quad (9.51)$$

Nástroj T4:

$$N = N_s + N_{vn} + N_n = 1\,333,4 + 0,81 + 122,65 = \mathbf{1\,456,9\ K\check{c}} \quad (9.52)$$

Z výpočtů celkových nákladů je patrné, že největší položku tvoří náklady na strojní práci (přibližně 81 %), náklady na nástroje tvoří druhou nejnákladnější položku (přibližně 18 %) a nejmenší položkou jsou náklady na výměnu nástroje (přibližně 1 %).

Vyhodnocení současného stavu výroby v podniku:

Současný stav výroby shrnují tabulky 11 a 12, kde tabulka 11 shrnuje dosavadní používané řezné podmínky u vybrané součásti. Tabulka 12 shrnuje současné trvanlivosti ostří jednotlivých nástrojů, strojní časy, počty výměn nástrojů a výrobní náklady jedné součástky pro oba stroje.

Tabulka 11: Současné řezné podmínky [25]

Řezné podmínky	a_p [mm]	f_m [mm/min]	n [ot/min]	v_c [m/min]
Nástroj T1	1,2	5 760	1 600	261,38
Nástroj T2	0,7	3 640	2 600	261,38
Nástroj T3	0,4	3 184	3 980	250,07
Nástroj T4	0,2	980	4 900	132,39

Tabulka 12: Současný stav nákladů [autor]

Stroj MCFV	T [min]	t_{As} [min]	z_v [-]	N_s [Kč]	N_n [Kč]	N_{vn} [Kč]	N [Kč]
Nástroj T1	40	155,93	3,87	3 301,1	1 159,80	3,58	4 464,5
Nástroj T2	80	48,13	0,30	1 018,9	94,98	0,28	1 114,2
Nástroj T3	45	164,08	3,42	3 473,6	1 102,95	3,16	4 579,7
Nástroj T4	45	47,15	0,93	998,2	122,65	0,86	1 121,7
Celkem							11 280,1
Stroj Mazak	T [min]	t_{As} [min]	z_v [-]	N_s [Kč]	N_n [Kč]	N_{vn} [Kč]	N [Kč]
Nástroj T1	40	155,93	3,87	4 409,7	1 159,80	3,39	5 572,90
Nástroj T2	80	48,13	0,30	1 361,1	94,98	0,26	1 456,60
Nástroj T3	45	164,08	3,42	4 640,2	1 102,95	2,99	5 746,14
Nástroj T4	45	47,15	0,93	1 333,4	122,65	0,81	1 456,90
Celkem							14 232,5

Z uvedených dat vyplývá skladba jednotlivých nákladů, ze kterých vyplývá, že největší položku tvoří náklady na strojní práci, druhou největší položkou jsou náklady na nástroje a nejmenší položku tvoří náklady na výměnu nástroje.

10 NÁVRH OPTIMÁLNÍCH PODMÍNEK

V této kapitole je popsán postup a výpočet optimálních řezných podmínek a optimální trvanlivosti jednotlivých řezných nástrojů. Výpočtový model je realizován pro výše specifikované vstupy. Po dohodě se společností jsou zachovány hodnoty posuvů na zub a hloubky řezu.

Postup výpočtu je následující:

Vypočteme optimální trvanlivost podle kritéria minimálních výrobních nákladů (vztah 4.3). Následným dosazením získané optimální trvanlivosti do zjednodušeného Taylorova vztahu je vyjádřena optimální řezná rychlost (10.2), [16].

$$T_0 \cdot v_{c0}^m = T_{optN} \cdot v_{c\,optN}^m \quad (10.1)$$

Po úpravě dostáváme vztah pro řeznou rychlost [16]:

$$v_{c\,optN} = v_{c0} \cdot \left(\frac{T_0}{T_{optN}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad [m/min] \quad (10.2)$$

Kde: T_0 je původní trvanlivost ostří [min],

T_{optN} je optimální trvanlivost ostří [min],

v_{c0} je původní řezná rychlost [m/min],

$v_{c\,optN}$ je optimální řezná rychlost [m/min], [16].

Následně stanovíme optimální otáčky a minutový posuv pomocí vztahu (10.3) a (10.4).

$$n = \frac{v_{c\,optN} \cdot 1\,000}{\pi \cdot D} \quad [ot/min] \quad (10.3)$$

$$f_{min} = f_z \cdot z \cdot n \quad [mm/min] \quad (10.4)$$

Dále se stanoví strojní čas, počet výměn nástroje, jednotlivé nákladové položky a na závěr se stanoví celkové výrobní náklady. Jednotlivé výpočty jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

10.1 Stroj MCFV 1680

Nástroj T1:

Optimální trvanlivost ostří:

$$\begin{aligned} T_{optN} &= \frac{N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}}{N_{sm}} \cdot k_r \cdot (m - 1) \\ &= \frac{299,68 + 0,075 \cdot 12,33}{21,17} \cdot 0,993 \cdot (3 - 1) \\ &= \mathbf{28,2 \text{ min}} \end{aligned} \quad (10.5)$$

Optimální řezná rychlost:

$$v_{c \text{ opt}N} = v_{c0} \cdot \left(\frac{T_0}{T_{optN}} \right)^{\frac{1}{m}} = 261,38 \cdot \left(\frac{40}{28,2} \right)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{293,68 \text{ m/min}} \quad (10.6)$$

Optimální otáčky nástroje:

$$n = \frac{v_{c \text{ opt}N} \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{293,68 \cdot 1000}{\pi \cdot 52} = \mathbf{1\ 797,7 \text{ ot/min}} \quad (10.7)$$

Minutový posuv:

$$f_{min} = f_z \cdot z \cdot n = 1,56 \cdot 4 \cdot 1\ 797,7 = \mathbf{11\ 217,6 \text{ mm/min}} \quad (10.8)$$

Strojní čas:

$$t_{As} = \frac{L_c}{f_z \cdot z \cdot n} = \frac{1\ 556\ 843}{1,56 \cdot 4 \cdot 1\ 797,7} = \mathbf{138,79 \text{ min}} \quad (10.9)$$

Počet výměn nástroje:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r = \frac{138,79}{28,2} \cdot 0,993 = \mathbf{4,89} \quad (10.10)$$

Náklady na strojní práci:

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} = 138,79 \cdot 21,17 = \mathbf{2\ 938,2 \text{ Kč}} \quad (10.11)$$

Náklady na nástroje:

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} = 4,89 \cdot 299,68 = \mathbf{1\ 465,4 \text{ Kč}} \quad (10.12)$$

Náklady na výměnu nástroje:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 0,075 \cdot 12,33 \cdot 4,89 = \mathbf{4,5 \text{ Kč}} \quad (10.13)$$

Celkové výrobní náklady:

$$N = N_s + N_n + N_{vn} = 2\ 938,2 + 1\ 465,4 + 4,5 = \mathbf{4\ 408,1 \text{ Kč}} \quad (10.14)$$

Nástroj T2:

Optimální trvanlivost ostří:

$$\begin{aligned} T_{optN} &= \frac{N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}}{N_{sm}} \cdot k_r \cdot (m - 1) \\ &= \frac{316,6 + 0,075 \cdot 12,33}{21,17} \cdot 0,492 \cdot (3 - 1) \\ &= \mathbf{14,76 \text{ min}} \end{aligned} \quad (10.15)$$

Optimální řezná rychlost:

$$v_{c \text{ optN}} = v_{c0} \cdot \left(\frac{T_0}{T_{optN}} \right)^{\frac{1}{m}} = 261,38 \cdot \left(\frac{80}{14,76} \right)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{459,1 \text{ m/min}} \quad (10.16)$$

Otáčky nástroje:

$$n = \frac{v_{c \text{ optN}} \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{459,1 \cdot 1000}{\pi \cdot 32} = \mathbf{4\ 566,8 \text{ ot/min}} \quad (10.17)$$

Minutový posuv:

$$f_{min} = f_z \cdot z \cdot n = 1,73 \cdot 2 \cdot 4\ 566,7 = \mathbf{15\ 801,1 \text{ mm/min}} \quad (10.18)$$

Strojní čas:

$$t_{As} = \frac{L_c}{f_z \cdot z \cdot n} = \frac{432\ 956,6}{1,73 \cdot 2 \cdot 4\ 566,8} = \mathbf{27,4 \text{ min}} \quad (10.19)$$

Počet výměn nástroje:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r = \frac{27,4}{14,76} \cdot 0,492 = \mathbf{0,91} \quad (10.20)$$

Náklady na strojní práci:

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} = 27,4 \cdot 21,17 = \mathbf{580,1 \text{ Kč}} \quad (10.21)$$

Náklady na nástroje:

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} = 0,91 \cdot 316,6 = \mathbf{288,1 \text{ Kč}} \quad (10.22)$$

Náklady na výměnu nástroje:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 0,075 \cdot 12,33 \cdot 0,91 = \mathbf{0,84 \text{ Kč}} \quad (10.23)$$

Celkové výrobní náklady:

$$N = N_s + N_n + N_{vn} = 580,1 + 288,1 + 0,84 = \mathbf{869,04 \text{ Kč}} \quad (10.24)$$

Nástroj T3:

Optimální trvanlivost:

$$\begin{aligned} T_{optN} &= \frac{N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}}{N_{sm}} \cdot k_r \cdot (m - 1) \\ &= \frac{322,5 + 0,075 \cdot 12,33}{21,17} \cdot 0,934 \cdot (3 - 1) \\ &= \mathbf{28,54 \text{ min}} \end{aligned} \quad (10.25)$$

Optimální řezná rychlost:

$$v_{c \text{ opt}N} = v_{c0} \cdot \left(\frac{T_0}{T_{optN}} \right)^{\frac{1}{m}} = 250,07 \cdot \left(\frac{45}{28,54} \right)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{291,1 \text{ m/min}} \quad (10.26)$$

Otáčky nástroje:

$$n = \frac{v_{c \text{ opt}N} \cdot 1\,000}{\pi \cdot D} = \frac{291,1 \cdot 1000}{\pi \cdot 20} = \mathbf{4\,633 \text{ ot/min}} \quad (10.27)$$

Minutový posuv:

$$f_{min} = f_z \cdot z \cdot n = 1,01 \cdot 2 \cdot 4\,633 = \mathbf{9\,358,7 \text{ mm/min}} \quad (10.28)$$

Strojní čas:

$$t_{As} = \frac{L_c}{f_z \cdot z \cdot n} = \frac{1\,319\,112,3}{1,01 \cdot 2 \cdot 4\,633} = \mathbf{140,95 \text{ min}} \quad (10.29)$$

Počet výměn nástroje:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r = \frac{140,95}{28,54} \cdot 0,934 = \mathbf{4,61} \quad (10.30)$$

Náklady na strojní práci:

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} = 140,95 \cdot 21,17 = \mathbf{2\,983,9 \text{ Kč}} \quad (10.31)$$

Náklady na nástroje:

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} = 4,61 \cdot 322,5 = \mathbf{1\,486,7 \text{ Kč}} \quad (10.32)$$

Náklady na výměnu nástroje:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 0,075 \cdot 12,33 \cdot 4,61 = \mathbf{4,26 \text{ Kč}} \quad (10.33)$$

Náklady celkové:

$$N = N_s + N_n + N_{vn} = 2\,983,9 + 1\,486,7 + 4,26 = \mathbf{4\,474,86 \text{ Kč}} \quad (10.34)$$

Nástroj T4:

Optimální trvanlivost břitu:

$$\begin{aligned} T_{optN} &= \frac{N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}}{N_{sm}} \cdot k_r \cdot (m - 1) \\ &= \frac{133,88 + 0,075 \cdot 12,33}{21,17} \cdot 0,888 \cdot (3 - 1) \\ &= \mathbf{11,3 \text{ min}} \end{aligned} \quad (10.35)$$

Optimální řezná rychlost:

$$v_{c \text{ optN}} = v_{c0} \cdot \left(\frac{T_0}{T_{optN}} \right)^{\frac{1}{m}} = 132,39 \cdot \left(\frac{45}{11,3} \right)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{209,9 \text{ m/min}} \quad (10.36)$$

Optimální otáčky nástroje:

$$n = \frac{v_{c \text{ optN}} \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{209,9 \cdot 1000}{\pi \cdot 8,6} = \mathbf{7\,769 \text{ ot/min}} \quad (10.37)$$

Minutový posuv nástroje:

$$f_{min} = f_z \cdot z \cdot n = 0,18 \cdot 1 \cdot 7\,769 = \mathbf{1\,382,2 \text{ mm/min}} \quad (10.38)$$

Strojní čas:

$$t_{As} = \frac{L_c}{f_z \cdot z \cdot n} = \frac{41\,590,3}{0,18 \cdot 1 \cdot 7\,769} = \mathbf{30,09 \text{ min}} \quad (10.39)$$

Počet výměn nástroje:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r = \frac{30,9}{11,3} \cdot 0,888 = \mathbf{2,43} \quad (10.40)$$

Náklady na strojní práci:

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} = 30,9 \cdot 21,17 = \mathbf{654,2 \text{ Kč}} \quad (10.41)$$

Náklady na nástroje:

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} = 2,43 \cdot 133,88 = \mathbf{325,3 \text{ Kč}} \quad (10.42)$$

Náklady na výměnu nástroje:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 0,075 \cdot 12,33 \cdot 2,43 = \mathbf{2,25 \text{ Kč}} \quad (10.43)$$

Celkové výrobní náklady:

$$N = N_s + N_n + N_{vn} = 654,2 + 325,3 + 2,43 = \mathbf{981,93 \text{ Kč}} \quad (10.44)$$

10.2 Stroj Mazak HCN 12800

Nástroj T1:

Optimální trvanlivost ostří:

$$\begin{aligned} T_{optN} &= \frac{N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}}{N_{sm}} \cdot k_r \cdot (m - 1) \\ &= \frac{299,68 + 0,05 \cdot 17,5}{28,28} \cdot 0,993 \cdot (3 - 1) \\ &= \mathbf{21,1 \text{ min}} \end{aligned} \quad (10.45)$$

Optimální řezná rychlost:

$$v_{c \text{ opt}N} = v_{c0} \cdot \left(\frac{T_0}{T_{optN}} \right)^{\frac{1}{m}} = 261,38 \cdot \left(\frac{40}{21,1} \right)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{323,5 \text{ m/min}} \quad (10.46)$$

Otáčky nástroje:

$$n = \frac{v_{c \text{ opt}N} \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{323,5 \cdot 1000}{\pi \cdot 52} = \mathbf{1\ 980,3 \text{ ot/min}} \quad (10.47)$$

Minutový posuv:

$$f_{min} = f_z \cdot z \cdot n = 1,56 \cdot 4 \cdot 1\ 980,3 = \mathbf{12\ 357,1 \text{ mm/min}} \quad (10.48)$$

Strojní čas:

$$t_{As} = \frac{L_c}{f_z \cdot z \cdot n} = \frac{1\ 556\ 843}{1,56 \cdot 4 \cdot 1\ 980,3} = \mathbf{126 \text{ min}} \quad (10.49)$$

Počet výměn nástroje:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r = \frac{126}{21,1} \cdot 0,993 = \mathbf{5,93} \quad (10.50)$$

Náklady na strojní práci:

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} = 126 \cdot 28,28 = \mathbf{3\ 563,3 \text{ Kč}} \quad (10.51)$$

Náklady na nástroje:

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} = 5,93 \cdot 299,68 = \mathbf{1\ 777,1 \text{ Kč}} \quad (10.52)$$

Náklady na výměnu nástroje:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 0,05 \cdot 17,5 \cdot 5,93 = \mathbf{5,2 \text{ Kč}} \quad (10.53)$$

Celkové výrobní náklady:

$$N = N_s + N_n + N_{vn} = 3\ 563,3 + 1\ 777,1 + 5,2 = \mathbf{5\ 345,6 \text{ Kč}} \quad (10.54)$$

Nástroj T2:

Optimální trvanlivost ostří:

$$\begin{aligned} T_{optN} &= \frac{N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}}{N_{sm}} \cdot k_r \cdot (m - 1) \\ &= \frac{316,6 + 0,05 \cdot 17,5}{28,28} \cdot 0,492 \cdot (3 - 1) \\ &= \mathbf{11,05 \text{ min}} \end{aligned} \quad (10.55)$$

Optimální řezná rychlost:

$$v_{c \text{ optN}} = v_{c0} \cdot \left(\frac{T_0}{T_{optN}} \right)^{\frac{1}{m}} = 261,38 \cdot \left(\frac{80}{11,05} \right)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{505,65 \text{ m/min}} \quad (10.56)$$

Otáčky nástroje:

$$n = \frac{v_{c \text{ optN}} \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{505,65 \cdot 1000}{\pi \cdot 32} = \mathbf{5\,029,8 \text{ ot/min}} \quad (10.57)$$

Minutový posuv:

$$f_{min} = f_z \cdot z \cdot n = 1,73 \cdot 2 \cdot 5\,029,8 = \mathbf{17\,403,1 \text{ mm/min}} \quad (10.58)$$

Strojní čas:

$$t_{As} = \frac{L_c}{f_z \cdot z \cdot n} = \frac{432\,956,6}{1,73 \cdot 2 \cdot 5\,029,8} = \mathbf{24,88 \text{ min}} \quad (10.59)$$

Počet výměn nástroje:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r = \frac{24,88}{11,05} \cdot 0,492 = \mathbf{1,1} \quad (10.60)$$

Náklady na strojní práci:

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} = 24,88 \cdot 28,28 = \mathbf{703,6 \text{ Kč}} \quad (10.61)$$

Náklady na nástroje:

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} = 1,1 \cdot 316,6 = \mathbf{348,3 \text{ Kč}} \quad (10.62)$$

Náklady na výměnu nástroje:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 0,05 \cdot 17,5 \cdot 1,1 = \mathbf{0,96 \text{ Kč}} \quad (10.63)$$

Celkové výrobní náklady:

$$N = N_s + N_n + N_{vn} = 703,6 + 348,3 + 0,96 = \mathbf{1\,052,86 \text{ Kč}} \quad (10.64)$$

Nástroj T3:

Optimální trvanlivost břítu:

$$\begin{aligned} T_{optN} &= \frac{N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}}{N_{sm}} \cdot k_r \cdot (m - 1) \\ &= \frac{322,5 + 0,05 \cdot 17,5}{28,28} \cdot 0,934 \cdot (3 - 1) \\ &= \mathbf{21,36 \text{ min}} \end{aligned} \quad (10.65)$$

Optimální řezná rychlost:

$$v_{c \text{ optN}} = v_{c0} \cdot \left(\frac{T_0}{T_{optN}} \right)^{\frac{1}{m}} = 250,07 \cdot \left(\frac{45}{21,36} \right)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{320,58 \text{ m/min}} \quad (10.66)$$

Otáčky nástroje:

$$n = \frac{v_{c \text{ optN}} \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{320,58 \cdot 1000}{\pi \cdot 20} = \mathbf{5\ 102,2 \text{ ot/min}} \quad (10.67)$$

Minutový posuv nástroje:

$$f_{min} = f_z \cdot z \cdot n = 1,01 \cdot 2 \cdot 5\ 102,2 = \mathbf{10\ 306,4 \text{ mm/min}} \quad (10.68)$$

Strojní čas:

$$t_{As} = \frac{L_c}{f_z \cdot z \cdot n} = \frac{1\ 319\ 112,6}{1,01 \cdot 2 \cdot 5\ 102,2} = \mathbf{127,99 \text{ min}} \quad (10.69)$$

Počet výměn nástroje:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r = \frac{127,99}{21,36} \cdot 0,934 = \mathbf{5,6} \quad (10.70)$$

Náklady na strojní práci:

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} = 127,99 \cdot 28,28 = \mathbf{3\ 619,6 \text{ Kč}} \quad (10.71)$$

Náklady na nástroje:

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} = 5,6 \cdot 322,5 = \mathbf{1\ 806 \text{ Kč}} \quad (10.72)$$

Náklady na výměnu nástroje:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 0,05 \cdot 17,5 \cdot 5,6 = \mathbf{4,9 \text{ Kč}} \quad (10.73)$$

Celkové výrobní náklady:

$$N = N_s + N_n + N_{vn} = 3\ 619,6 + 1\ 806 + 4,9 = \mathbf{5\ 430,5 \text{ Kč}} \quad (10.74)$$

Nástroj T4:

Optimální trvanlivost břitu:

$$\begin{aligned} T_{optN} &= \frac{N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}}{N_{sm}} \cdot k_r \cdot (m - 1) \\ &= \frac{133,88 + 0,05 \cdot 17,5}{28,28} \cdot 0,888 \cdot (3 - 1) \\ &= \mathbf{8,46 \text{ min}} \end{aligned} \quad (10.75)$$

Optimální řezná rychlost:

$$v_{c \text{ optN}} = v_{c0} \cdot \left(\frac{T_0}{T_{optN}} \right)^{\frac{1}{m}} = 132,39 \cdot \left(\frac{45}{8,46} \right)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{231,1 \text{ m/min}} \quad (10.76)$$

Otáčky nástroje:

$$n = \frac{v_{c \text{ optN}} \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{231,1 \cdot 1000}{\pi \cdot 8,6} = \mathbf{8\,553,7 \text{ ot/min}} \quad (10.77)$$

Minutový posuv nástroje:

$$f_{min} = f_z \cdot z \cdot n = 0,18 \cdot 1 \cdot 8\,553,7 = \mathbf{1\,539,7 \text{ mm/min}} \quad (10.78)$$

Strojní čas:

$$t_{As} = \frac{L_c}{f_z \cdot z \cdot n} = \frac{41\,590,3}{0,18 \cdot 1 \cdot 8\,553,7} = \mathbf{27,01 \text{ min}} \quad (10.79)$$

Počet výměn nástroje:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r = \frac{27,01}{8,46} \cdot 0,888 = \mathbf{2,84} \quad (10.80)$$

Náklady na strojní práci:

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} = 27,01 \cdot 28,28 = \mathbf{763,8 \text{ Kč}} \quad (10.81)$$

Náklady na nástroje:

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} = 2,84 \cdot 133,88 = \mathbf{380,2 \text{ Kč}} \quad (10.82)$$

Náklady na výměnu nástroje:

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v = 0,05 \cdot 17,5 \cdot 2,84 = \mathbf{2,5 \text{ Kč}} \quad (10.83)$$

Celkové výrobní náklady:

$$N = N_s + N_n + N_{vn} = 763,8 + 380,2 + 2,5 = \mathbf{1\,146,5 \text{ Kč}} \quad (10.84)$$

10.3 Kontrola omezujících podmínek

V této podkapitole jsou nově navržené optimální řezné podmínky kontrolovány z hlediska omezujících podmínek. Kontrolovány jsou maximální otáčky stroje, maximální minutový posuv a omezující podmínka z hlediska překročení maximálního výkonu stroje. Kontrola oblasti přípustných řešení z hlediska maximálních otáček zaznamenává tabulka 13, kontrolu z hlediska maximálního minutového posuvu tabulka 14 a kontrolu maximálního výkonu zobrazuje tabulka 15.

Tabulka 13: Kontrola otáček [autor]

Stroj MCFV 1680				
Nástroj	n [ot/min]	≤	$n_{s \max}$ [ot/min]	
T1	1 797,7	≤	8 000	Vyhovuje
T2	4 566,8	≤	8 000	Vyhovuje
T3	4 633,0	≤	8 000	Vyhovuje
T4	7 679,0	≤	8 000	Vyhovuje
Stroj Mazak HCN 12800				
Nástroj	n [ot/min]	≤	$n_{s \max}$ [ot/min]	
T1	1 980,3	≤	10 000	Vyhovuje
T2	5 029,8	≤	10 000	Vyhovuje
T3	5 102,2	≤	10 000	Vyhovuje
T4	8 553,7	≤	10 000	Vyhovuje

Tabulka 14: Kontrola minutového posuvu [autor]

Stroj MCFV 1680				
Nástroj	f_m [mm/min]	≤	$f_{m \max}$ [mm/min]	
T1	11 217,6	≤	30 000	Vyhovuje
T2	15 801,1	≤	30 000	Vyhovuje
T3	9 358,7	≤	30 000	Vyhovuje
T4	1 382,2	≤	30 000	Vyhovuje
Stroj Mazak HCN 12800				
Nástroj	f_m [mm/min]	≤	$f_{m \max}$ [mm/min]	
T1	12 357,1	≤	43 000	Vyhovuje
T2	17 403,1	≤	43 000	Vyhovuje
T3	10 306,4	≤	43 000	Vyhovuje
T4	1 539,7	≤	43 000	Vyhovuje

Z výsledků je patrné, že navržené podmínky leží v oblasti přípustných řešení, a proto mohou být aplikovány.

Omezení z hlediska výkonu stroje bylo řešeno pomocí výpočtového softwaru výrobce VBD Taegutec, kde se zadají parametry obrábění a program vyhodnotí tento proces. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 15, příklad výpočtu zobrazuje obrázek 16.

Tabulka 15: Kontrola z hlediska výkonu stroje [autor]

Stroj MCFV 1680				
Nástroj	P_c [kW]	\leq	$P_{c \text{ max}}$ [kW]	
T1	24,85	\leq	17 / 25	Vyhovuje
T2	11,02	\leq	17 / 25	Vyhovuje
T3	6,61	\leq	17 / 25	Vyhovuje
T4	1,00	\leq	17 / 25	Vyhovuje
Stroj Mazak HCN 12800				
Nástroj	P_c [kW]	\leq	$P_{c \text{ max}}$ [kW]	
T1	27,37	\leq	30 / 37	Vyhovuje
T2	12,14	\leq	30 / 37	Vyhovuje
T3	5,09	\leq	30 / 37	Vyhovuje
T4	1,00	\leq	30 / 37	Vyhovuje

Z výsledků uvedených v tabulce je patrné, že navržené řezné podmínky jsme schopni aplikovat. A to i pro nástroj T1 u stroje MCFV, kdy pro naprogramované dráhy nástroje není přetížení dlouhodobé, navýšení oproti původním hodnotám je přibližně o 2,5 kW.

Jednotky
Technická podpora
Pomoc

Frézování

aplikace: Čelní frézování

Typ destičky Chase2Feed BLMP 13

Údaje pro Čelní frézování

Průměr nástroje (D): mm

Šířka záběru (ae): mm

Počet zubů (z):

Posuv na zub (fz): mm

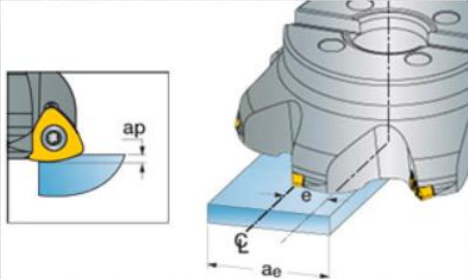
Hloubka záběru (ap): mm

Otáčky vřetena (n): rpm

Řezná rychlost (Vc): m/min

Materiál obrobku DIN X3

Excentricita (e):



Výsledek

Kc (efektivní)	2886 N/mm ²	412 KPsi
Skutečný požadovaný výkon:	27.37 KW	37.19 HP
Odběr materiál:	616.87 cm ³ /min	37.64 in ³ /min
Max. ohybové síly vřetena:	5422.51 N	1219.03 lb
Běžná tloušťka třísky	0.2069 mm	0.0081 inch
Krouticí moment:	132 Nm	1168.3 inch*lb

Obrázek 16: Příklad výpočtu potřebného výkonu stroje [33]

10.4 Shrnutí navržených parametrů

Tato podkapitola shrnuje výsledky experimentálního výpočtu optimálních řezných podmínek a výrobních nákladů. Tabulka 16 zobrazuje navržené optimální řezné podmínky. Parametry hloubky řezu i posuvu na zub nebyly měněny, po dohodě se společností i vedoucím práce byly zachovány původní hodnoty. Celkové výrobní náklady pro navržené řezné podmínky shrnuje tabulka 17. Z tabulek jsou patrné tyto výsledky: došlo ke snížení trvanlivosti břitu nástroje, poklesu strojního času, navýšení hodnot řezných podmínek.

Tabulka 16: Nově navržené řezné podmínky [autor]

Stroj MCFV	a_p [mm]	f_m [mm/min]	n [ot/min]	v_c [m/min]
Nástroj T1	1,2	11 217,6	1 797,7	293,68
Nástroj T2	0,7	15 801,1	4 566,8	459,10
Nástroj T3	0,4	9 358,7	4 633,0	291,10
Nástroj T4	0,2	1 382,2	7 679,0	209,90
Stroj Mazak	a_p [mm]	f_m [mm/min]	n [ot/min]	v_c [m/min]
Nástroj T1	1,2	12 357,1	1 980,3	323,50
Nástroj T2	0,7	17 403,1	5 029,8	505,65
Nástroj T3	0,4	10 306,4	5 102,2	320,58
Nástroj T4	0,2	1 539,7	8 553,7	231,10

Tabulka 17: Skladba nákladů pro optimální řezné podmínky [autor]

Stroj MCFV	T [min]	t_{As} [min]	z_v [-]	N_s [Kč]	N_n [Kč]	N_{vn} [Kč]	N [Kč]
Nástroj T1	28,20	138,79	4,89	2 938,2	1 465,4	4,50	4 408,1
Nástroj T2	14,76	27,40	0,91	580,1	288,1	0,84	869,04
Nástroj T3	28,54	140,95	4,61	2 983,9	1 486,7	4,26	4 474,86
Nástroj T4	11,30	30,90	2,43	654,2	325,3	2,25	981,93
Celkem							10 733,93
Stroj Mazak	T [min]	t_{As} [min]	z_v [-]	N_s [Kč]	N_n [Kč]	N_{vn} [Kč]	N [Kč]
Nástroj T1	21,10	126,00	5,93	3 563,3	1 777,1	5,20	5 345,60
Nástroj T2	11,05	24,88	1,10	703,6	348,3	0,96	1 052,86
Nástroj T3	21,36	127,99	5,60	3 619,6	1 806,0	4,90	5 430,50
Nástroj T4	8,46	27,01	2,84	763,8	380,2	2,50	1 146,50
Celkem							12 975,46

11 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této kapitole jsou porovnány dosažené výsledky s původními parametry řezného procesu používaných ve společnosti TIRAD s. r. o. Hlavní důraz je kladen na vyhodnocení úspor výrobního procesu, jak z technického hlediska, tak i ekonomického.

11.1 Porovnání pracovních podmínek

Porovnání původních a navržených pracovních podmínek pro jednotlivé stroje je uvedeno v následující tabulce (Tab. 18). V tabulce jsou zaznamenány hodnoty trvanlivostí řezných nástrojů, strojních časů jednotlivých nástrojů, otáčky nástrojů, minutové posuvy a řezné rychlosti. Hloubka řezu a posuv na zub v tabulce uvedeny nejsou, jelikož v optimalizaci neodešlo ke změně těchto parametrů.

Tabulka 18: Porovnání původních a nově navržených pracovních parametrů [autor]

Nástroj T1	T [min]	t_{As} [min]	n [ot/min]	f_m [mm/min]	v_c [m/min]
Původní	40,0	155,93	1 600,0	5 760,0	261,38
MCFV	28,2	138,79	1 797,7	11 217,6	293,68
Mazak	21,1	126,00	1 980,3	12 357,1	323,50
Nástroj T2	T [min]	t_{As} [min]	n [ot/min]	f_m [mm/min]	v_c [m/min]
Původní	80,00	48,13	2 600,0	3 640,0	261,38
MCFV	14,76	27,40	4 566,8	15 801,1	459,10
Mazak	11,05	24,88	5 029,8	17 403,1	505,65
Nástroj T3	T [min]	t_{As} [min]	n [ot/min]	f_m [mm/min]	v_c [m/min]
Původní	45,00	164,80	3 980,0	3 184,0	250,07
MCFV	28,54	140,95	4 633,0	9 358,7	291,10
Mazak	21,36	127,99	5 102,2	10 306,4	320,58
Nástroj T4	T [min]	t_{As} [min]	n [ot/min]	f_m [mm/min]	v_c [m/min]
Původní	45,00	47,15	4 900,0	980,0	132,39
MCFV	11,30	30,90	7 679,0	1 382,2	209,90
Mazak	8,46	27,01	8 553,7	1 539,7	231,10

Z tabulky jsou patrné především tyto změny. Návrhem optimálních parametrů sice došlo ke snížení trvanlivostí břitů jednotlivých nástrojů, ale díky tomu došlo k navýšení hodnot řezných parametrů, konkrétně k navýšení otáček, minutových posuvů i řezných rychlostí. Důsledkem těchto skutečností došlo ke snížení strojních časů jednotlivých operací.

11.2 Porovnání výrobních nákladů

V následujících tabulkách (Tab. 19 a 20) jsou srovnány hodnoty původních a vypočtených optimálních hodnot řezných podmínek. V tabulkách jsou uvedeny náklady na strojní práci, náklady na nástroje, náklady na výměnu nástrojů a celkové výrobní náklady pro jednotlivé nástroje. Pro každý stroj jsou parametry vyhodnoceny samostatně.

Tabulka 19: Porovnání výrobních nákladů pro stroj MCFV [autor]

MCFV 1680				
Nástroj T1	N_s [Kč]	N_n [Kč]	N_{vn} [Kč]	N [Kč]
Původní	3 301,1	1 159,8	3,58	4 464,48
Optimální	2 938,2	1 465,4	4,50	4 408,10
Rozdíl	362,9	305,6	0,92	56,38
Nástroj T2	N_s [Kč]	N_n [Kč]	N_{vn} [Kč]	N [Kč]
Původní	1 018,9	94,98	0,28	1 114,16
Optimální	580,1	288,10	0,84	869,04
Rozdíl	438,3	193,12	0,56	245,12
Nástroj T3	N_s [Kč]	N_n [Kč]	N_{vn} [Kč]	N [Kč]
Původní	3 473,6	1 102,95	3,16	4 579,71
Optimální	2 983,9	1 486,70	4,26	4 474,86
Rozdíl	489,7	383,75	1,10	104,85
Nástroj T4	N_s [Kč]	N_n [Kč]	N_{vn} [Kč]	N [Kč]
Původní	998,2	122,65	0,86	1 121,70
Optimální	654,2	325,30	2,25	981,93
Rozdíl	344,0	202,65	1,39	139,77
Celkem	N_s [Kč]	N_n [Kč]	N_{vn} [Kč]	N [Kč]
Původní	8 791,8	2 480,38	7,88	11 280,10
Optimální	7 156,4	3 565,50	11,85	10 733,93
Rozdíl	1 635,4	1 085,12	3,97	546,17

Zásadním poznatkem vyplývajícím z této tabulky je, že výpočtem optimálních řezných podmínek došlo ke změně skladby celkových výrobních nákladů. Důsledkem snížení strojního času se snížila položka nákladů na strojní práci (přibližně 66 % z celkových nákladů) a došlo k navýšení položek nákladů na nástroje (přibližně 33 % z N) a na výměnu nástroje (přibližně 1 %), tato skutečnost vyplývá ze snížení trvanlivosti břitu nástroje.

Tabulka 20: Porovnání nákladů pro stroj Mazak [autor]

Mazak HCN 12800				
Nástroj T1	N_s [Kč]	N_n [Kč]	N_{vn} [Kč]	N [Kč]
Původní	4 409,7	1 159,8	3,39	5 572,89
Optimální	3 563,3	1 777,1	5,20	5 345,60
Rozdíl	846,4	617,3	1,81	227,29
Nástroj T2	N_s [Kč]	N_n [Kč]	N_{vn} [Kč]	N [Kč]
Původní	1 361,1	94,98	0,26	1 456,34
Optimální	703,6	348,30	0,96	1 052,86
Rozdíl	657,5	253,32	0,70	403,48
Nástroj T3	N_s [Kč]	N_n [Kč]	N_{vn} [Kč]	N [Kč]
Původní	4 640,2	1 102,95	2,99	5 746,14
Optimální	3 619,6	1 806,00	4,90	5 430,50
Rozdíl	1 050,0	696,65	1,89	315,64
Nástroj T4	N_s [Kč]	N_n [Kč]	N_{vn} [Kč]	N [Kč]
Původní	1 333,4	122,65	0,81	1 456,90
Optimální	763,8	380,20	2,50	1 146,50
Rozdíl	440,6	247,91	0,99	310,36
Celkem	N_s [Kč]	N_n [Kč]	N_{vn} [Kč]	N [Kč]
Původní	11 744,4	2 480,38	7,45	14 232,23
Optimální	8 650,3	4 311,60	13,56	12 975,46
Rozdíl	3 094,1	1 831,22	6,11	1 256,77

Skutečnost, že došlo ke změně skladby jednotlivých položek celkových výrobních nákladů zaznamenává i tabulka 20. Rovněž dochází ke snížení nákladů na strojní práci (přibližně 66 % z celkových nákladů) z důvodů snížení výrobního času došlo k nárůstu nákladů na nástroje (přibližně 33 % z N) i na výměnu nástroje (přibližně 1 %), to je důsledek snížení trvanlivosti břitu nástroje. Výsledná rozdílnost hodnot je dána skutečností, že stroje mají rozdílné hodnoty N_{sm} , N_{vn} .

Obě uvedené tabulky zaznamenávají rozdíl mezi původními a vypočtenými optimálními řeznými podmínkami v absolutních hodnotách. Uvedený celkový rozdíl je i výsledná úspora nákladů na jeden kus.

11.3 Vyhodnocení celkových úspor výrobních nákladů

Tabulka 21 shrnuje potenciální celkové úspory výrobních nákladů u jednotlivých nástrojů pro oba výrobní stroje. Jak pro jeden výrobek, tak i pro celkový počet kusů za rok.

Tabulka 21: Shrnutí úspor výrobních nákladů [autor]

	MCFV 1680			
	N [Kč]		Úspora	
	Původní	Optimální	[Kč]	[%]
Nástroj T1	4 464,48	4 408,10	56,38	1,3
Nástroj T2	1 114,16	869,04	245,12	22,0
Nástroj T3	4 579,71	4 474,86	104,85	2,3
Nástroj T4	1 121,70	981,93	139,77	12,5
Celkem [1 ks]	11 280,10	10 733,93	546,17	4,8
Celkem [400 ks]	4 512 020	4 293 572	218 468	4,8
	Mazak HCN 12800			
	N [Kč]		Úspora	
	Původní	Optimální	[Kč]	[%]
Nástroj T1	5 572,89	5 345,60	227,29	4,1
Nástroj T2	1 456,34	1 052,86	403,48	27,7
Nástroj T3	5 746,10	5 430,50	315,60	5,5
Nástroj T4	1 456,90	1 146,50	310,36	21,3
Celkem [1 ks]	14 232,23	12 975,46	1 256,77	8,8
Celkem [400 ks]	5 692 892	5 190 184	502 708	8,8

Potenciální úspora výrobních nákladů je pro stroj MCFV 1680 **4,8 %** a pro stroj Mazak HCN 12800 **8,8 %**. Tato skutečnost je dána především rozdílnou cenou strojů. Úspora výrobních nákladů pro stroj MCFV 1680 na jednom kuse činí 546,17 Kč a pro roční dávku 400 kusů je potenciální úspora 218 468 Kč. Maximální potenciální úspora je u nástroje T2, kde by úspora činila 245,12 korun na kus, což odpovídá přibližně 22 %. Naopak nejmenší úspora nákladů byla dosažena u nástroje T1, kde úspora činí 56,38 korun na jeden kus, to odpovídá 1,3 %. U druhého stroje je taktéž největší dosažená potenciální úspora pro nástroj T2, kde úspora činí 403,48 korun na jeden kus, což odpovídá 27,7 %. Dále pro nástroj T4 byla zjištěna úspora 310,36 korun na kus, což představuje úsporu 21,3 %. Nejmenší úspora byla dosažena u nástroje T1, kde byla dosažena úspora 4,1 %, a to odpovídá 227,29 korunám na jeden kus. Celková navržená úspora pro tento stroj je 1 256,77 korun na jeden kus a na celou dávku o 400 kusech by byla dosažena úspora 502 708 korun.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo pro zvolenou součást navrhnout optimální řezné podmínky s ohledem na minimální výrobní náklady a ekonomicky zhodnotit dosažené výsledky a případné úspory.

Tato diplomová práce byla vytvořena ve spolupráci se společností TIRAD s. r. o., která se specializuje na obrábění přesných dílů forem a ráků pro vstřikování plastů. Po určení všech vstupních a vnitropodnikových údajů byl definován současný proces výroby.

Vypočtené optimální řezné podmínky z hlediska minimálních výrobních nákladů vyšly rozdílné než nastavené řezné podmínky u současného procesu výroby. Optimální trvanlivost břitu řezného nástroje se markantně snížila, zvýšil se minutový posuv i otáčky nástroje, dále došlo ke snížení strojního času. Důsledkem optimálních řezných podmínek došlo ke snížení nákladů na strojní práci přibližně o 15 % celkových výrobních nákladů, avšak o tuto hodnotu se zvýšily náklady na nástroje, náklady na výměnu nástrojů zůstaly téměř stejné. Navržené optimální řezné podmínky byly kontrolovány podle vybraných omezujících podmínek, kde se potvrdila možnost realizace na vybraných strojích. Pro navržené optimální řezné podmínky pro stroj MCFV 1680 byla zjištěna celková úspora 4,8 % což odpovídá úspoře 546,17 korun na jeden kus a 218 468 korun na roční dávku 400 kusů. U stroje Mazak HCN 12800 bylo dosaženo vyšších úspor výrobních nákladů, a to konkrétně úspory 8,8 % výrobních nákladů. To odpovídá úspoře 1 256,77 korun na jednom kuse, na celkové roční dávce o 400 kusech je úspora 502 708 korun.

Z těchto poznatků a skutečností lze konstatovat a doporučit společnosti, že má smysl se nadále zabývat optimalizací obráběcího procesu. Jelikož pro tuto diplomovou práci byly vybrány pouze 4 řezné nástroje. Pokud by byla provedena optimalizace u všech obráběcích nástrojů v této společnosti, při dosažení úspor okolo 5 % mohlo by být dosaženo úspor v mnohonásobně větším měřítku. Avšak je potřeba brát na zřetel, že tyto výsledky jsou dané k přiřazenému stroji, nástroji a vybrané součásti. V případě určitých změn, by bylo nutné za pomoci postupu stejného výpočtu stanovit nové optimální podmínky. Není možné tyto navržené podmínky přenést na ostatní stroje, nástroje, obrobky bez procesu výpočtu.

Použitá literatura

- [1] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01864-6.
- [2] Příručka pro technology: Ekonomika výroby a celková optimalizace (1. část). *MM, Průmyslové spektrum* [online]. 2013, 1.10.2013 [cit. 2019-06-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-ekonomika-vyroby-a-celkova-optimalizace-1-cast.html>
- [3] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology: Profesionální obrábění kovů ... mýtus nebo realita? *MM, Průmyslové spektrum*. 2013, , 52.
- [4] STANĚK, Vlastimil. Proč a kdy optimalizovat NC programy při obrábění forem. *MM, Průmyslové spektrum* [online]. 2014, 12.04.2017, , 125 [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/proc-a-kdy-optimalizovat-nc-programy-pri-obrabeni-forem.html>
- [5] KELLER, Petr. Stanovení řezných podmínek, volba nástrojů: Systémy CAD/CAM. *EduCom* [online]. 2011, 6. 12. 2011 [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: http://educom.tul.cz/educom/inovace/CAD-CAM/VY_03_039-stanoveni%20řezných%20podmínek,%20volba%20nástrojů_př_MZ_5.pdf
- [6] *Soudobé obráběcí procesy určují produktivita a ekonomie výroby* [online]. Praha: Business Media CZ, 2014 [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/soudobe-obrabeci-procesy-urcuji-produktivita-a-ekonomie-vyroby_27698.html
- [7] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 9788001037522.
- [8] BRYCHTA, Josef. *Progresivní metody v obrábění: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2513-7.
- [9] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, [2008] [cit. 2019-06-12]. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [10] DRIENSKY, Dušan, Pavel FÚRIK, Terézia LEHMANOVÁ a Josef TOMAIDES. *Strojní obrábění I*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1986. s. 424. ISBN 042-38-86.

- [11] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [12] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 2. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004. 94 s. Dostupné na World Wide Web: http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI_TO-2cast.pdf
- [13] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ - 1. část*, Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie". [online]. Brno: VUT Brně, 2003 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [14] Modern metal cutting: Practical Handbook. Sandviken: Sandvik Coromant, 1994. ISBN 91-972299-0-3.
- [15] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *ÚVOD DO TEORIE OBRÁBĚNÍ: Opatřebeni řezných nástrojů*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3013-1.
- [16] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *TECHNOLOGIE VÝROBY II: Řešené příklady* [online]. Brno: VUT v Brně, 2002 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby_II.pdf
- [17] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text*. [online]. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012 [cit. 2019-06-13]. ISBN 978–80–248–2533–5. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_komplet_finish.pdf
- [18] KAFKA, Jindřich a Martin VRABEC. *Technologie obrábění: návody ke cvičení*. Vyd. 3. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 1995. ISBN 80-01-03434-8.
- [19] BILÍK, Oldřich a Jan MÁDL. *Trvanlivost břitu a provozní spolehlivost obráběcího nástroje*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2001. Strojírenská technologie. ISBN 80-7044-389-8.

- [20] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [21] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972299-4-6.
- [22] STEPHENSON, David A. a John S. AGAPIOU. *Metal cutting theory and practice*. New York: Marcel Dekker, c1997. ISBN 0-8247-9579-2.
- [23] TIRAD s. r. o. *Volná místa Třebíčska* [online]. Třebíč [cit. 2019-06-22]. Dostupné z: <https://www.volnamistatrebic.cz/profily-firem/tirad-milacron/>
- [24] TIRAD OBROBKY. *MILACRON* [online]. [cit. 2019-06-22]. Dostupné z: <https://www.milacron.com/cs/produkt/tirad-obrobky/>
- [25] Interní zdroj společnosti TIRAD s. r. o.
- [26] Jakosti dle chemické analýzy: 1.2085. *PRECIZ* [online]. 2016 [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <https://www.preciz.cz/sluzby/prevodnik-materialu/details/1/10-10>
- [27] NÁSTROJOVÉ OCELI: W.NR. 1.2085. *JKZ BUČOVICE, a. s.* [online]. Bučovice [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <http://www.jkz.cz/cs/produkty/nastrojove-oceli/na-vyrobuforem/w-nr-12085/>
- [28] W 1.2085. *AcelorMittal: Steels for moulds, tools and dies* [online]. 2017, 03/2017 [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <https://industeel.arcelormittal.com/products/steels-for-molds-tools-and-die/corrosion-resistant-moulds/w-1-2085/>
- [29] Vertikální obráběcí centrum MCFV 1680. *TAJMAC-ZPS* [online]. [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <https://www.tajmac-zps.cz/mcfv-1680>
- [30] HCN - 12800. *Mazak* [online]. Yamazaki Mazak, 2015 [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <https://www.mazakeu.cz/cs/machines/hcn-12800/>
- [31] *NEW PRODUCT NEWS: CHASE 2 FEED* [online]. June 2014 [cit. 2019-06-25]. Dostupné z: http://www.taegutec.com/Media/NPNFiles/BLMP13_en.pdf

- [32] HELIQUAD: XOMT-HQ. *ISCAR Cutting tools: Metal Working Tools* [online]. ISCAR ČR s.r.o, 2019 [cit. 2019-06-25]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=5601257&fnum=507&mapp=ML&GFSTY P=M&srch=1>
- [33] TaeguTec's Machining power: Frézování. *TaeguTec* [online]. [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: <http://mpwr.imc-companies.com/machiningpwr/machiningpower.wgx?vwginstance=ebb52f6e8d09408fb478c96a10765e75&Home=togo>

Seznam použitých obrázků:

Obrázek 1: Závislost celkových výrobních nákladů N a jejich složek (Ns – náklady na strojní práci, Nnv – náklady na nástroje a jejich výměnu, Nv – náklady na vedlejší práci) na řezné rychlosti [1].....	12
Obrázek 2: Oblast vhodného utváření třísek [1].....	27
Obrázek 3: Oblast přípustných řešení [1]	30
Obrázek 4: Příklad výrobků společnosti [24]	35
Obrázek 5: Výrobní prostory společnosti [23]	35
Obrázek 6: 3D model vybrané součásti [25]	36
Obrázek 7: Stroj MCFV 1680 [29].....	38
Obrázek 8: Stroj Mazak HCN 12800 [30].....	40
Obrázek 9: Schématický výkres nástroje T1 [25].....	41
Obrázek 10: VBD ro nástroj T1 [31].....	41
Obrázek 11: Schématický výkres nástroje T2 [25].....	42
Obrázek 12: Nástroj T3 [25].....	42
Obrázek 13: VBD pro nástroj T3 [31].....	43
Obrázek 14: Schématický výkres nástroje T4 [25].....	43
Obrázek 15: VBD pro nástroj T4 [32].....	43
Obrázek 16: Příklad výpočtu potřebného výkonu stroje [33].....	63

Seznam použitých tabulek:

Tabulka 1: Koeficient časového využití stroje [1].....	16
Tabulka 2: Hodnoty empirických konstant [1].....	18
Tabulka 3: Běžné chemické složení materiálu [28].....	37
Tabulka 4: Mechanické vlastnosti materiálu X33CrS16 [28]	37
Tabulka 5: Vlastnosti obráběcího centra MCFV 1680 [29]	39
Tabulka 6: Vlastnosti stroje Mazak [30].....	40
Tabulka 7: Vstupní hodnoty pro stroj MCFV 1680 [autor].....	44
Tabulka 8: Vstupní hodnoty pro stroj Mazak [autor]	45
Tabulka 9: Vstupní parametry pro nástroje [autor]	46
Tabulka 10: Trvanlivost jednotlivých břitů [25].....	48
Tabulka 11: Současné řezné podmínky [25].....	52
Tabulka 12: Současný stav nákladů [autor].....	52
Tabulka 13: Kontrola otáček [autor].....	62
Tabulka 14: Kontrola minutového posuvu [autor]	62
Tabulka 15: Kontrola z hlediska výkonu stroje [autor]	63
Tabulka 16: Nově navržené řezné podmínky [autor]	64
Tabulka 17: Skladba nákladů pro optimální řezné podmínky [autor]	64
Tabulka 18: Porovnání původních a nově navržených pracovních parametrů [autor]	65
Tabulka 19: Porovnání výrobních nákladů pro stroj MCFV [autor]	66
Tabulka 20: Porovnání nákladů pro stroj Mazak [autor].....	67
Tabulka 21: Shrnutí úspor výrobních nákladů [autor].....	68