



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta Strojní

Ústav technologie obrábění a metrologie

Optimalizace obráběcího procesu

Optimisation of cutting conditions for given part

Diplomová práce

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

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

Bc. Petr Malec

Praha 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma „Optimalizace řezných podmínek pro danou součást“ vypracoval samostatně a použil jsem pouze zdroje uvedené v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne

.....

Bc. Petr Malec

Poděkování

Touto cestou bych chtěl vyjádřit poděkování všem lidem, kteří se přímo či nepřímo podíleli na mé diplomové práci. Konkrétně bych rád zmínil firmu UnionOcel která mi umožnila tuto diplomovou práci realizovat. Také bych rád poděkoval vedoucímu technologovi obrábění ve firmě UnionOcel panu Romanu Gregorkovi za pomoc se získáváním dat potřebných pro realizaci této diplomové práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval svému vedoucímu práce prof. Ing. Janu Mádlovi, CSc. za věcné připomínky a pomoc při vypracovávání mé diplomové práce.

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

Fakulta: strojní
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro **Bc. Petra Malce**
obor **Výrobní a materiálové inženýrství**

Název: **Optimalizace řezných podmínek pro danou součást**

Název anglicky: **Optimisation of cutting conditions for the given part**

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor současného stavu výroby.
2. Optimalizace řezných rychlostí z hlediska minimálních výrobních nákladů pro danou součást.
3. Ekonomické zhodnocení.



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

Datum zadání diplomové práce: 10. 4. 2015

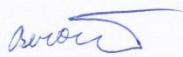
Termín odevzdání diplomové práce: 19. 6. 2015

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

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

Zadání diplomové práce převzal dne: 10. 4. 2015


Diplomant


Vedoucí ústavu




Děkan

V Praze

dne 27. 3. 2015

Abstrakt

Tato práce se zabývá optimalizací řezných podmínek pro vybranou součást v konkrétním výrobním podniku. První část práce se věnuje analýze současného stavu obrábění v podniku. V další části jsou pak popsány teoretické předpoklady pro aplikování optimalizačního postupu. Výsledkem této práce je aplikování optimalizačního procesu na výrobu dané součásti. Závěr se věnuje popisu a zhodnocení získaných výsledků a navrhovaným změnám v současném výrobním procesu.

Klíčová slova

Optimalizace obráběcího procesu, optimalizace řezné rychlosti, optimalizace výrobních nákladů při obrábění, Taylorův vztah pro trvanlivost nástroje

Abstract

The main topic of the thesis is the optimization of machining processes for a given component in a real manufacturing company. The first part of the thesis presents the analysis of a current state of machining process of the component. The following part introduces theoretical background for application of the optimizing method. The thesis offers a proposal of implementation of the calculated optimizing method into the production process of the given component. The conclusion of the thesis describes and evaluates calculated results and discusses proposed changes in the production process.

Keywords

Optimization of machining processes, optimization of cutting speed, optimization production costs during machining, Taylor's Equation for Tool Life

Obsah

Seznam použitých symbolů	1
Seznam tabulek	4
Seznam obrázků.....	6
1 Úvod.....	7
2 Problematika optimalizace obráběcího procesu	8
3 Firma UnionOcel s.r.o.	10
3.1 Obrábění ve firmě UnionOcel s.r.o.	11
4 Vybraná součást pro optimalizaci.....	12
5 Rozbor stávajícího stavu výroby desky	14
5.1 Součást.....	14
5.1.1 Materiál součásti	15
5.1.2 Výrobní náklady součásti.....	16
5.2 Stroj.....	17
5.2.1 Vybavení stroje.....	20
5.3 Stávající výrobní postup	20
5.4 Řezné nástroje	23
5.4.1 Nástroj T1	23
5.4.2 Nástroj T2	25
5.4.3 Nástroj T3	26
5.4.4 Nástroj T4	27
5.4.5 Nástroj T5	29
5.4.6 Nástroj T6	30
5.6 Stávající trvanlivosti nástrojů.....	32
6 Proces optimalizace obráběcího procesu	33
6.1 Kritéria optimálnosti	33
6.1.1 Kritérium minimálních výrobních nákladů	33
6.1.2 Kritérium optimálnosti z hlediska produktivity	35
6.1.3 Kritérium optimálnosti z hlediska úběru materiálu	36
6.2 Omezující podmínky.....	37
6.2.1 Omezení dané výkonem obráběcího stroje	38

6.2.2 Omezení dané maximálně přípustným kroutícím momentem	39
6.2.3 Omezení dané maximálně přípustným ohybovým momentem	40
6.2.4 Omezení dané maximálně přípustnými silami	41
6.2.5 Omezení dané vhodným utvářením třísek	42
6.2.6 Omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy	44
6.2.7 Omezení dané požadovanou přesností obrobené plochy	44
6.2.8 Omezení dané maximálními a minimálními otáčkami vřetena	45
6.2.9 Omezení dané maximálním a minimálním posuvem stroje	45
6.2.10 Omezení dané komplexním Taylorovým vztahem	46
6.3 Definice oblasti přípustných řešení	46
7 Výpočtový model pro optimalizaci stávajícího stavu	49
7.1 Určení pracovních podmínek	50
7.2 Určení strojního času	53
7.3 Výpočet nákladů na operační úsek	53
7.3.1 Náklady na strojní práci na operační úsek	54
7.3.2 Náklady na nástroj vztažené na operační úsek	57
7.3.3 Náklady na výměnu nástroje	62
7.3.4 Výpočet výrobních nákladů pro stávající řezné podmínky	63
7.4 Optimální trvanlivost břitu	64
7.5 Optimální řezná rychlost	65
7.6 Kontrola OPŘ	71
7.6.1 Přepočet pracovních podmínek dle OPŘ	74
7.7 Optimální pracovní podmínky	75
7.8 Výpočet výrobních nákladů pro optimalizované řezné podmínky	75
8 Porovnání stávajících pracovních podmínek a optimalizovaných	81
9 Závěr	87
10 Použité zdroje	89

Seznam použitých symbolů

a_p	hloubka řezu [mm]
B	šířka odebírané plochy [mm]
C_d	cena vyměnitelné břitové destičky [Kč]
C_e	cena elektrické energie [Kč/hod]
C_{tn}	cena tělesa nástroje [Kč]
C_s	cena stroje [Kč]
C_v	empirická konstanta [-]
$\check{C}FS$	časový fond stroje [hod]
D	průměr nástroje [mm]
D_u	průměr obrobku [mm]
f	posuv [mm/min]
F_c	řezná síla [N]
f_F	maximálně přípustný minutový posuv [mm/min]
f_{mopt}	optimální minutový posuv [mm/min]
F_p	pasivní síla [N]
F_{pcmax}	maximálně přípustná výslednice řezné a pasivní síly [N]
f_{smmax}	maximálně možný posuv stroje [mm/min]
f_{smmin}	minimální posuv stroje [mm/min]
F_{uo}	upínací síla [N]
f_z	posuv na zub [mm/zub]
f_{zF}	maximálně přípustný posuv na zub [mm/zub]
K_c	přirážka směnového času [-]
k_{Fc}	empirická konstanta řezné síly [-]
k_{pc}	empirická konstanta [-]
k_r	koeficient řezání [-]
K_{us}	koeficient údržby stroje [-]
k_{ut}	koeficient údržby tělesa nástroje [-]
K_{vs}	koeficient využití stroje [-]
L	délka dráhy nástroje [mm]

L_o	délka obrobku [mm]
L_f	délka dráhy nástroje v řezu [mm]
$L_{mř}$	délka dráhy nástroje mimo řez [mm]
m	konstanta řezného materiálu [–]
M_k	kroucí moment [Nm]
M_{kmax}	maximálně přípustný kroucí moment [Nm]
M_o	mzda operátora (obsluhy stroje) [Kč/hod]
M_o	ohybový moment [Nm]
M_{omax}	maximálně přípustný ohybový moment [Nm]
N	výrobní náklady na operační úsek [Kč]
n	otáčky [ot/min]
N_{hs}	hodinové náklady na provoz stroje [Kč/hod]
N_n	náklady na nástroje vztažené na operační úsek [Kč]
N_{nT}	náklady na nástroj vztažené na jednu trvanlivost břitu [Kč]
n_{opt}	optimální otáčky [ot/min]
N_s	náklady na strojní práci na operační úsek [Kč]
N_{sm}	náklady na strojní práci na operační úsek na jednotku času [Kč/min]
n_{smax}	maximálně dosažitelné otáčky stroje [ot/min]
n_{smin}	minimální otáčky stroje [ot/min]
N_{vn}	náklady na výměnu nástroje nebo VBD vztažené na operační úsek [Kč]
N_{vnm}	náklady na výměnu nástroje na jednotku času [Kč/min]
O_s	odpis stroje [Kč/hod]
P_c	řezný výkon [W]
P_e	výkon elektromotoru [W]
R_a	drsnot obrobene plochy [–]
R_{amax}	maximálně přípustná drsnost obrobene plochy [–]
RNS	režijní náklady střediskové plánované za rok [%]
r_ε	poloměr špičky nástroje [–]
s_b	součinitel využití břitové destičky [–]
SM	směnnost [–]
T	trvanlivost nástroje [min]
T_{max}	maximální trvanlivost nástroje stávající [min]
T_{min}	minimální trvanlivost nástroje stávající [min]

T_{opt}	optimální životnost nástroje [min]
T_{optn}	optimální trvanlivost nástroje z hlediska výrobních nákladů [min]
T_{prum}	průměrná trvanlivost nástroje stávající [min]
t_{As}	strojní čas na daný operační úsek [min]
t_{Asopt}	optimální strojní čas [min]
t_{mz}	čas nástroje mimo řez [sec]
t_u	celkový čas pro obrobení jednoho operačního úseku [min]
t_{vn}	čas výměny nástroje [min]
U	úběr materiálu [cm ³ /min]
u_{Fc}	empirická konstanta [–]
v_c	řezná rychlost [m/min]
v_{copt}	optimální řezná rychlost [m/min]
w_{Fc}	empirická konstanta [–]
x_{Fc}	empirická konstanta [–]
x_v	empirická konstanta [–]
y_{Fc}	empirická konstanta [–]
y_v	empirická konstanta [–]
z	počet zubů [–]
z_{Fc}	empirická konstanta [–]
z_b	počet funkčních břitů na nástroji [–]
z_d	počet břitových destiček na těle nástroje [–]
z_u	předpokládaný počet upnutí destiček za dobu životnosti tělesa nástroje [–]
z_v	počet výměn nástroje [–]
z_v	počet výměn nástroje na daný operační úsek [–]
$\check{Z}S$	životnost stroje [rok]
κ_r	úhel nastavení [°]
κ_r'	vedlejší úhel nastavení [°]
η	mechanická účinnost stroje [–]
μ	koeficient tření [–]
π	ludolfovo číslo [–]

Seznam tabulek

Tab. 1 Vlastnosti součásti.....	14
Tab. 2 Chemické složení oceli S355J2+N ^[2]	15
Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli S355J2+N ^[2]	15
Tab. 4 Vlastnosti obráběcího centra Tajmac-ZPS ^[4]	19
Tab. 5 Stávající výrobní postup.....	21
Tab. 6 Pořizovací cena nástroje T1.....	24
Tab. 7 Pořizovací cena nástroje T2.....	26
Tab. 8 Pořizovací cena nástroje T3.....	27
Tab. 9 Pořizovací cena nástroje T4.....	29
Tab. 10 Pořizovací cena nástroje T5.....	30
Tab. 11 Pořizovací cena nástroje T6.....	31
Tab. 12 Stávající životnosti nástrojů.....	32
Tab. 13 Omezující hodnoty pro OPŘ.....	47
Tab. 14 Výpočet řezné rychlosti.....	51
Tab. 15 Výpočet posuvu na zub.....	52
Tab. 16 Strojní časy jednotlivých operací.....	53
Tab. 17 Konstanty pro výpočet nákladů na hodinu strojní práce.....	56
Tab. 18 Hodnoty pro výpočet odpisu stroje.....	57
Tab. 19 Výpočet koeficientu řezání.....	59
Tab. 20 Výpočet počtu výměn nástroje.....	60
Tab. 21 Konstanty pro výpočet nákladu na nástroje.....	61
Tab. 22 Ceny nástrojů.....	61
Tab. 23 Náklady na nástroj na jednu trvanlivost.....	62
Tab. 24 Výpočet nákladů.....	63
Tab. 25 Výpočet celkových výrobních nákladů.....	64
Tab. 26 Optimální trvanlivosti nástrojů.....	65
Tab. 27 Výpočet koeficientu C_v	67
Tab. 28 Výpočet optimální řezné rychlosti.....	68
Tab. 29 Přepočtení optimálních otáček.....	69
Tab. 30 Přepočtení optimálního minutového posuvu.....	70
Tab. 31 Kontrola otáček.....	72
Tab. 32 Volba vyhovujících otáček.....	73

<i>Tab. 33</i> Kontrola z hlediska výkonu stroje.....	73
<i>Tab. 34</i> Přepočet řezné rychlosti a trvanlivosti pro zvolené otáčky	74
<i>Tab. 35</i> Optimální pracovní podmínky z hlediska minimálních nákladů	75
<i>Tab. 36</i> Konstantní položky výrobních nákladů.....	76
<i>Tab. 37</i> Výpočet optimalizovaného strojního času	77
<i>Tab. 38</i> Výpočet počtu výměn nástroje pro optimalizované podmínky	78
<i>Tab. 39</i> Výpočet optimalizovaných výrobních nákladů.....	79
<i>Tab. 40</i> Optimalizované výrobní náklady.....	80
<i>Tab. 41</i> Porovnání stávajících a optimalizovaných pracovních podmínek.....	82
<i>Tab. 42</i> Porovnání stávajících a optimalizovaných strojních časů	83
<i>Tab. 43</i> Porovnání stávajících a optimálních životností nástrojů.....	84
<i>Tab. 44</i> Zhodnocení výrobních nákladů.....	86

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Porovnání závislosti výrobních nákladů na řezné rychlosti pro konvenční a CNC obrábění</i> ^[1]	8
<i>Obr. 2 Horní strana desky</i>	13
<i>Obr. 3 Spodní strana desky</i>	13
<i>Obr. 4 Výpalek desky</i>	14
<i>Obr. 5 Obráběcí centrum Tajmac-ZPS MCFV 2080</i> ^[4]	17
<i>Obr. 6 Pracovní prostor obráběcího centra Tajmac-ZPS MCFV 2080</i> ^[4]	18
<i>Obr. 7 Nástroj T1</i> ^[8]	23
<i>Obr. 8 Nástroj T2</i> ^[8]	25
<i>Obr. 9 Rozměry nástroje T2</i> ^[8]	25
<i>Obr. 10 VBD nástroje T2</i> ^[8]	26
<i>Obr. 11 Nástroj T3</i> ^[7]	26
<i>Obr. 12 Rozměry nástroje T3</i> ^[7]	27
<i>Obr. 13 Nástroj T4</i> ^[6]	27
<i>Obr. 14 Rozměry nástroje T4</i> ^[6]	28
<i>Obr. 15 Břitová destička nástroje T4</i> ^[6]	28
<i>Obr. 16 Nástroj T5</i> ^[6]	29
<i>Obr. 17 Rozměry nástroje T5</i> ^[6]	30
<i>Obr. 18 Nástroj T6</i> ^[8]	30
<i>Obr. 19 Rozměry nástroje T6</i> ^[8]	31
<i>Obr. 20 Břitová destička nástroje T6</i> ^[8]	31
<i>Obr. 21 Zobrazení nákladové funkce</i> ^[1]	34
<i>Obr. 22 Upnutí obrobku ve sklíčidle</i> ^[1]	40
<i>Obr. 23 Oblast vhodného utváření třísky</i> ^[1]	43
<i>Obr. 24 Příklad oblasti přípustných řešení</i> ^[1]	47
<i>Obr. 25 Nástroj T2</i>	72

1 Úvod

Tato diplomová práce se bude zabývat problematikou třískového obráběcího procesu v reálném výrobním podniku a za reálných provozních podmínek daného provozu. Cílem této práce je provést optimalizaci stávajícího procesu obrábění vybrané součásti, která svým charakterem reprezentuje obráběcí proces v daném podniku.

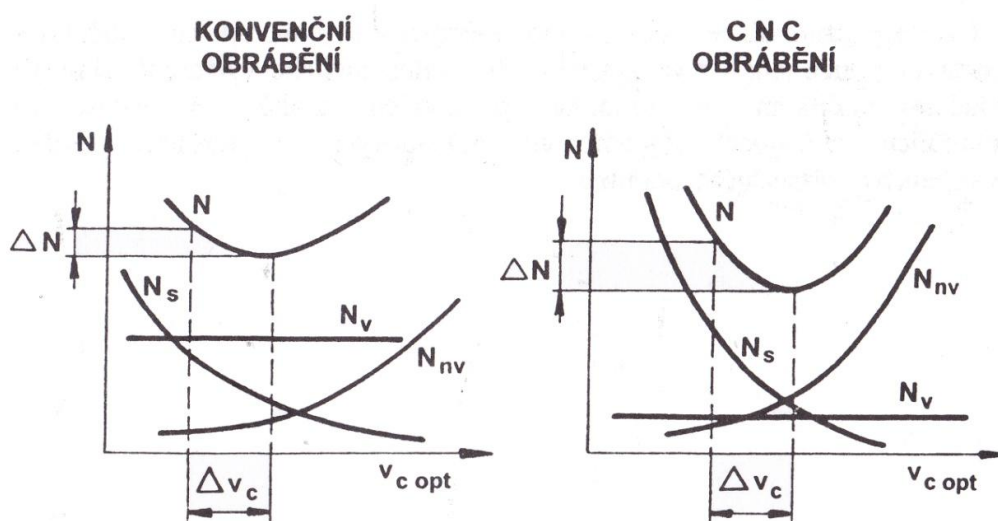
V této práci bude komplexně probrána problematika obrábění ke vztahu k optimalizaci obráběcího procesu. Stěžejním bodem práce bude rozbor současného stavu výroby, kde se práce bude věnovat popisu stávajícího stavu z pohledu používaného stroje, nástrojů, samotné součásti apod. Na základě těchto získaných podkladů pak bude provedena a popsána optimalizace stávajícího procesu obrábění. Optimalizace současného obráběcího procesu vybrané součásti bude realizována z pohledu minimálních výrobních nákladů.

Výsledkem této diplomové práce by měl být návrh změn ve výrobním postupu součásti a změn v technologických podmínkách, primárně změn řezné rychlosti, a to tak aby tyto změny přinesly pokud možno úsporu nákladů na výrobu vybrané součásti. Dále by práce měla sloužit jako návod pro možnou budoucí realizaci optimalizace v daném podniku.

2 Problematika optimalizace obráběcího procesu

V dnešní době se dá obráběcí proces v mnoha aplikacích považovat za dokončovací operaci. Proto jsou na obráběcí proces kladeny značné požadavky technického charakteru z hlediska přesnosti, drsnosti obrobeného povrchu atd. Vedle těchto požadavků pak můžeme nalézt další požadavky charakteru spíše ekonomického. V mnoha případech totiž podíl nákladů na obrábění činí značnou část z celkových výrobních nákladů. Jestliže chce být podnik v dnešní době konkurenceschopný v oblasti obrábění, je nezbytné, aby značnou část své pozornosti věnoval mimo jiné i ekonomické stránce procesu obrábění.

Z hlediska optimalizace s požadavkem na minimální výrobní náklady má významný vliv především řezná rychlost. Ta totiž nejvíce ovlivňuje životnost nástroje a tím i celou ekonomickou stránku procesu obrábění. Její význam je však různý u konvenčních strojů a moderních obráběcích strojů (CNC), které jsou investičně velmi náročné. Tento jev je zaznamenán na obrázku č.1. Z tohoto porovnání závislosti výrobních nákladů na konvenčních obráběcích strojích a CNC strojích je patrné, že stejná diference v řezné rychlosti má různý vliv na výslednou hodnotu výrobních nákladů. Také je z tohoto porovnání patrné, že význam optimální řezné rychlosti je u CNC obráběcích strojů naprosto stěžejním faktorem pro velikost výrobních nákladů. ^[1]



Obr. 1 Porovnání závislosti výrobních nákladů na řezné rychlosti pro konvenční a CNC obrábění ^[1]

V dnešní praxi se ale často setkáváme s tím, že podniky náklady spojené s obráběcím procesem často vůbec neřeší nebo hledají úsporu v nástrojovém vybavení. Řezné podmínky jsou ve většině podniků voleny dle doporučení výrobce nástroje a často pak jsou mírně korigovány dle skutečného stavu při obrábění. Takto volené pracovní podmínky však vedou k nemalým rezervám z hlediska výrobních nákladů. Tyto rezervy a nevyužívání potenciálu stroje ani nástroje a často mohou vést k velkým finančním ztrátám, které si často podniky ani nedokážou uvědomit.

Výrobci nástrojů dnes spolu s nástroji poskytují doporučené řezné podmínky. Právě z těchto orientačních doporučení značná část podniků určuje řezné podmínky, kterými pak realizují proces obrábění. Tyto řezné podmínky ale nejsou v žádném případě optimální. Jak bude dále v této práci popsáno, pro každý daný podnik či provoz a pro každý daný stroj spolu s nástroji existují pouze jedny optimální řezné podmínky, ať už z hlediska minimálních výrobních nákladů či maximální produktivity. Tento fakt je často v reálných provozech přehlížen nebo vůbec není znám.^[1]

3 Firma UnionOcel s.r.o.

Firma UnionOcel s.r.o. byla založena v roce 2001. Firma je sesterskou společností německé společnosti UnionStahl se sídlem v Duisburgu. Předmětem podnikání firmy je velkoobchod s hutním materiálem se zaměřením na plechy a zpracování plechu.

V září roku 2005 bylo v Kopřivnici uvedeno do provozu skladovací a servisní centrum. Zde firma disponuje rozsáhlými sklady, kde se kromě skladování plechů provádí i dělení materiálu. Dělení je zde prováděno na pálících centrech (autogen, plazma) a na hydraulických nůžkách.

V průběhu svého fungování firma investovala do starších konvenčních obráběcích strojů (frézka, vrtačka). Další investicí bylo pořízení obráběcího CNC centra Tajmac-ZPS MCFV 2080. Tyto menší investice firmě rozšířily možnosti nabízených služeb.

Dalším krokem ve vývoji firmy bylo zrealizování nových investic. Tyto investice spočívaly v postavení nové výrobní haly. Tato hala byla uvedena do provozu v roce 2015. Do této nové haly firma pořídila nové pálící laserové centrum. Ohraňovací lis od výrobce LVD typ PPEB-efl-400/4080-3150. Tento ohraňovací lis má přitlačný tlak 400 kN, a dokáže ohraňovat dílce v délce 4 m. Druhým pořízeným ohraňovacím lisem od firmy LVD je lis PPEB-H-1250-6100/5050. Tento ohraňovací lis má přitlačný tlak 1250 kN, a dokáže ohraňovat dílce v délce až 6 m. Dále pak byl pořízen průběžný tryskač od firmy Whellebrator. Posledním strojem v této investici je pak obráběcí portálové CNC centrum TYC FVC160/4 CNC.

V současnosti se tak firma kromě prodeje plechů a výpalků soustřeďuje na výrobu hotových dílů, a to především na obrobky, ohraňované díly.

Díky výši investice, která byla značná, je ve firmě kladen velký důraz na správné kalkulace výrobních nákladů, k čemuž by tato diplomová práce měla přispět.

3.1 Obrábění ve firmě UnionOcel s.r.o.

V současnosti se obrábění ve firmě UnionOcel s.r.o. provádí na dvou CNC centrech a dalších konvenčních strojích. Firma se soustřeďuje především na větší a méně přesné obrobky.

Prvním CNC centrem, které firma pořídila je Tajmac-ZPS MCFV 2080. Jedná se o tříosé obráběcí centrum. Na tomto stroji se dají obrábět obrobky do váhy 3 tun. Tento stroj bude detailněji popsán v následujících kapitolách.

Dalším obráběcím strojem je portálové CNC centrum TYC FVC160/4 CNC. Na tomto obráběcím stroji se dají obrábět obrobky až do váhy 11 tun, na pracovním stole o rozměrech 4000x1600 mm. Toto obráběcí centrum má dvouosou indexovanou hlavu. Což značně zvyšuje možnosti stroje.

Technologie obrábění je ve firmě UnionOcel s.r.o. specifická díky širokému sortimentu obráběných materiálů. Obrábí se zde materiály od základní konstrukčních ocelí např. S235JR+N, až po speciální ořezavodorné materiály, které mají tvrdost i 600 HB. Sortiment obráběných materiálů se značně liší mechanickými vlastnostmi a třídami obrobitelnosti. Tato skutečnost do značné míry ovlivňuje např. výběr a nákup nástrojů, popř. vyměnitelných břitových destiček.

4 Vybraná součást pro optimalizaci

Pro účely této diplomové práce byla vybrána součást, která svým výrobním charakterem nejvíce reprezentuje charakter výroby na obráběcích centrech ve firmě UnionOcel s.r.o. Zároveň byl při výběru součásti kladen požadavek na opakovatelnost výroby.

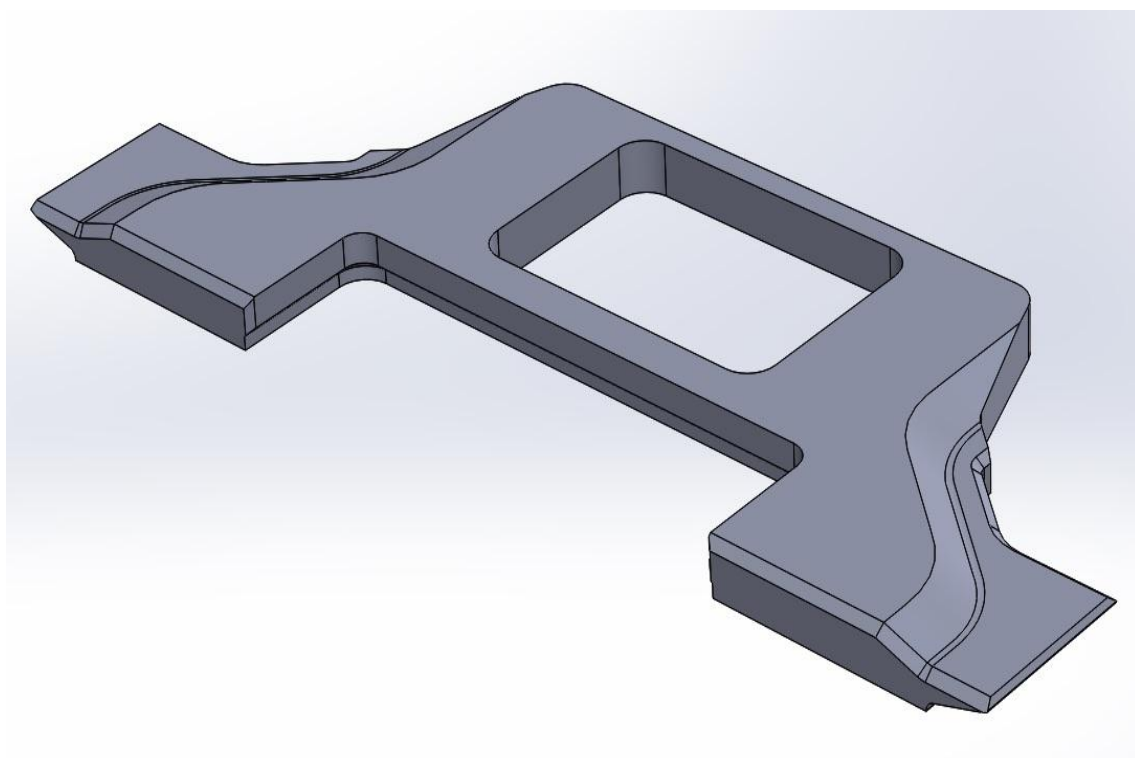
V diplomové práci budou informace o charakteru výrobku uváděny pouze v omezeném rozsahu především kvůli zachování obchodního tajemství.

Vybranou součástí je součást „deska“, která je už zhruba po dva roky vyráběna pro významného partnera firmy. Jedná se o obrobek, který je při dalším zpracování osazován do sestavy svařence. Na tuto součást nejsou kladeny výrazné požadavky z hlediska přesnosti výroby.

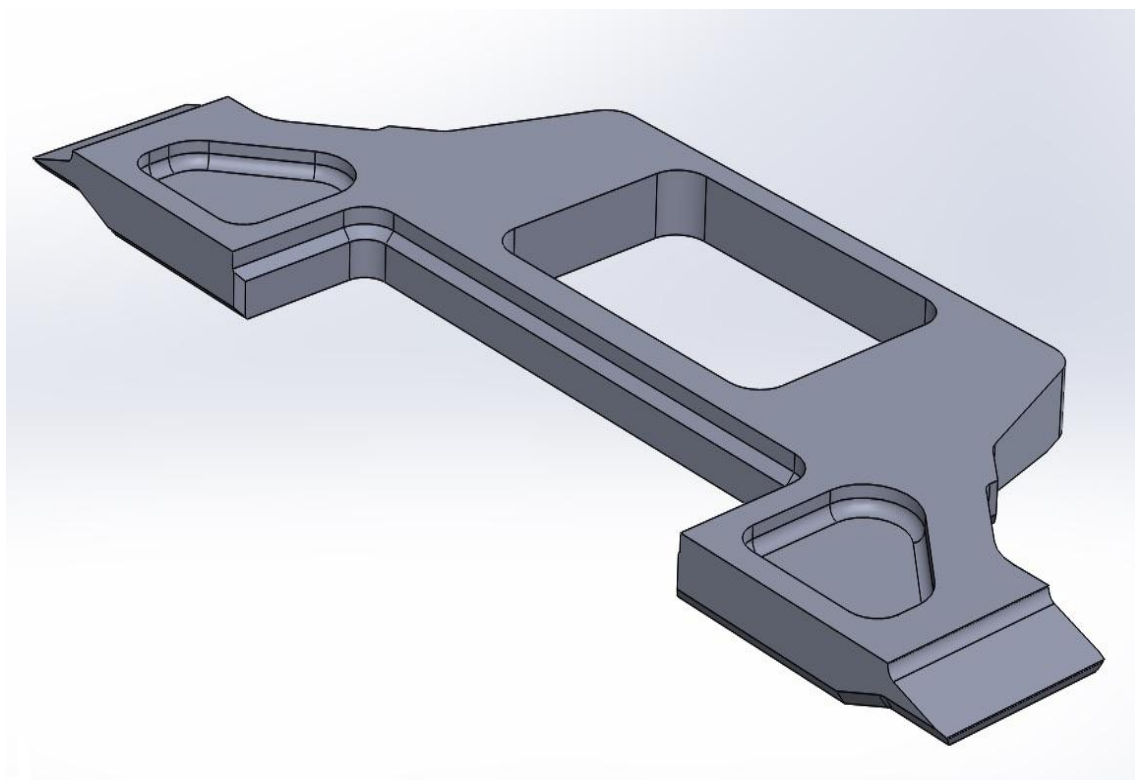
Součást obsahuje technologické prvky, které se ve výrobním spektru společnosti z hlediska obráběcích operací objevují ve velké míře. Jsou to především:

- Obrábění rovinné plochy
- Obrábění kontury
- Obrábění vnitřní kapsy
- Obrábění úkosu
- Vrtání
- Vyvrtávání

Na následujících obrázcích je znázorněn vybraný obrobek. Z těchto obrázků je patrný charakter obráběcích operací, které se na tomto obrobku provádějí. Jak již bylo předesláno, součást zde bude uvedena pouze v této schematické formě z důvodu zachování obchodního tajemství firmy.



Obr. 2 Horní strana desky



Obr. 3 Spodní strana desky

5 Rozbor stávajícího stavu výroby desky

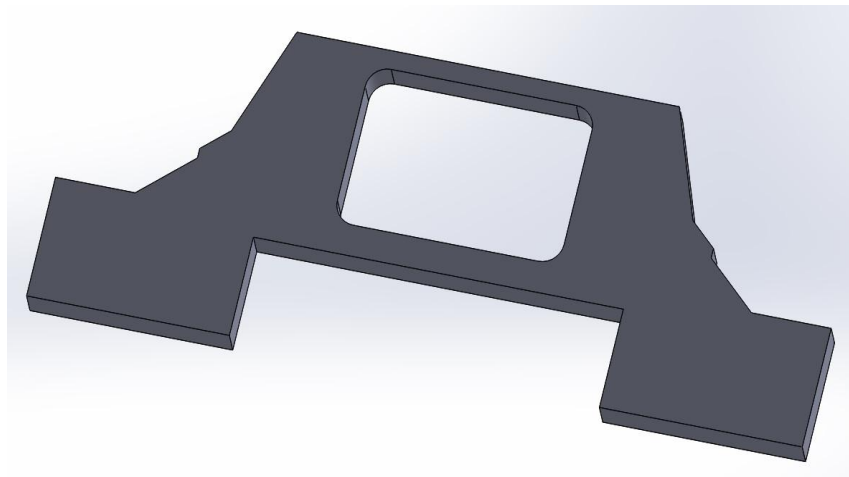
Pro optimalizaci je nezbytně nutnou podmínkou rozbor stávajícího stavu výroby. Tento stávající stav výroby pak bude optimalizován.

V současné době je výroba této vybrané součásti považována jako bezproblémová. K této skutečnosti přispívají především faktory nízké náročnosti na přesnost, výslednou drsnost obrobku a v neposlední řadě materiál součásti.

5.1 Součást

Výroba této součásti probíhá kompletně ve firmě UnionOcel s.r.o. Polotovarem pro výrobek je výpalek. Tento výpalek je zhotoven na pálícím plazmovém centru. Po vypálení je výpalek dopraven na pracoviště obrábění, kde dojde k jeho obrobení.

Pro obrábění je výpalek navržen s přídavkem 2mm na obvodu součásti a je zhotoven z plechu tloušťky 60mm. Schematický tvar tohoto výpalku je znázorněn na obrázku č.4.



Obr. 4 Výpalek desky

Tab. 1 Vlastnosti součásti

Váha	140 kg
Materiál	S355J2+N
Počet kusů/rok	140 ks/rok

5.1.1 Materiál součásti

Materiálem součásti je S355J2+N. Dle normy EN 10025-2 se jedná o nelegovanou konstrukční ocel. Materiál je zpracováván ve formě plechu válcovaného za tepla ve stavu normalizačně žíhaném. ^[2]

Materiál se nachází ve třídě obrobitelnosti 14b pro soustružení, frézování a vrtání.

Tab. 2 Chemické složení oceli S355J2+N ^[2]

Chemické složení									
Označení	Obsah C [%max.] pro jmen. tl. [mm]			Obsah prvků - hmotnostní [%max.]					
	≤ 16	< 16 ≥ 40	> 40	Si	Mn	P	S	N	Cu
S355J2+N	0,27	0,27	0,27	0,6	1,7	0,045	0,045	0,014	0,6

Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli S355J2+N ^[2]

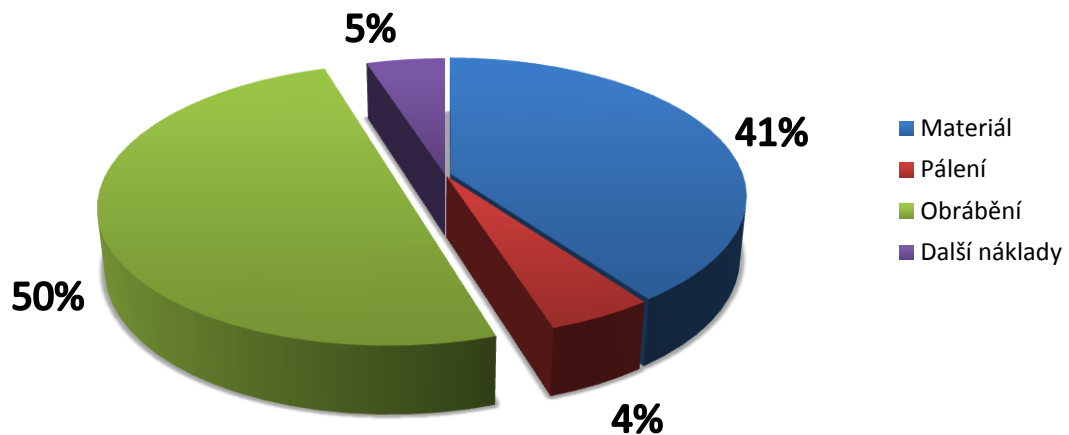
Mechanické vlastnosti		
S355J2+N	Min. mez kluzu R [MPa] pro jmen. tl. [mm]	Pevnost v tahu Rm [MPa] pro jmen. tl. [mm]
	> 40 ≤ 63	≤ 3 ≤ 100
	335	470-630
	Min. tažnost [%] L0=5,65√S0 pro jmen. tl. [mm]	Min. nárazová práce KV [J] při tep. 20°C
	> 40 ≤ 63	≤ 150
	21	27

Z hlediska obráběcího procesu se jedná o dobře obrobitelný materiál. Jediný problém z hlediska obrábění tohoto materiálu je možná tvorba nárůstku na břitu nástroje. Tento materiál je obrobitelný jak rychlořeznou ocelí, tak nástrojem s VBD ze slinutého karbidu.

5.1.2 Výrobní náklady součásti

Náklady na výrobu jedné součásti se skládají z několika složek. Mezi nejvýznamnější patří složka nákladů za samotný materiál. Další významnou složkou ceny je náklad na obrábění. Do výsledného nákladu pak vstupují ještě složky nákladů na pálení a na další manipulaci (doprava, zkoušky materiálu, balné apod.)

Graf 1 Podíl složek nákladů na výrobu součásti



Z výše uvedeného grafu jasně vyplývá, jak významný podíl na výslednou cenu součásti má právě obrábění. Připusťme úvahu, že cena materiálu je vstup, který nemůžeme nijak ovlivnit. Cenu materiálu nemůžeme ovlivnit především kvůli skutečnosti, že závisí na aktuálním stavu trhu a dodavateli. Složka nákladů na obrábění je však závislá na kvalitě technologického oddělení a vzhledem ke skutečnosti, že se tato složka dá do určité míry optimalizovat, je důležité takto činit. V momentě, že se podnik nesnaží optimalizovat své náklady na technologii obrábění, prodělává peníze.

Tato práce se dále bude věnovat pouze složce nákladů spojené s obráběcím procesem. Tyto náklady na obrábění budou dále podrobeny rozboru tak aby bylo patrné, jaké faktory do nich vstupují a jak je ovlivňují.

5.2 Stroj

Výroba desky probíhá na CNC obráběcím centru Tajmac-ZPS MCFV 2080.



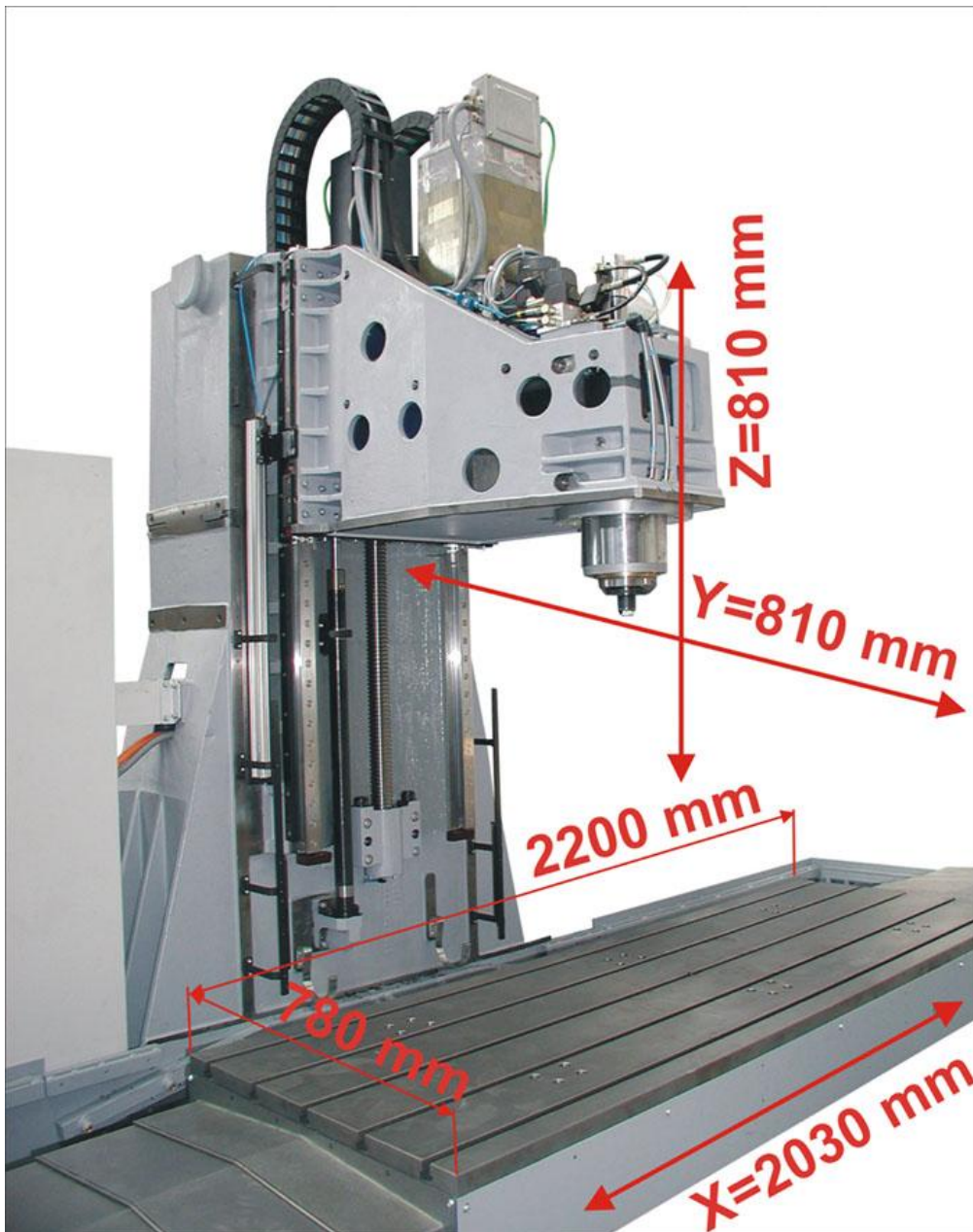
Obr. 5 Obráběcí centrum Tajmac-ZPS MCFV 2080 ^[4]

Jedná se o tříosé CNC řízené vertikální obráběcí centrum. Stůl obráběcího centra slouží k upnutí obrobků a pohybuje se v podélném směru a příčném směru. Vřeteník stroje se pohybuje ve svislém směru. Všechny pohyby stroje jsou realizovány lineárním vedením s valivými elementy.^{[3][4]} Pracovní prostor stroje je znázorněn na obrázku č.6. Parametry tohoto obráběcího centra jsou zaznamenány v tabulce č.4.

Stroj je vybaven řídicím systémem Heidenhain iTNC 530. Jedná se o všestranný řídicí systém orientovaný pro frézovací, vrtací a vyvrtávací stroje a obráběcí centra. Tento řídicí systém podporuje adaptivní řízení. Při použití této funkce řídicí systém reguluje pracovní posuv v závislosti na zatížení vřetene a popř. jiných datech (drsnot obrobeneho povrchu, vibrace apod.) Díky tomu lze snížit opotřebení stroje, optimalizovat obráběcí časy a dále pak sledovat opotřebení nástrojů.^[5]

Na stroji je používána jako pracovní kapalina emulze na bázi oleje Total Spirit MS 500. Díky vytížení obráběcího stroje a prakticky nepřetržitému oběhu chladicí emulze není nutné časté vyměňování. Výměna chladicí emulze probíhá jednou za rok.

Pořizovací cena stroje s veškerým příslušenstvím byla 6 597 300,- Kč při uvažované době životnosti 8 let.



Obr. 6 Pracovní prostor obráběcího centra Tajmac-ZPS MCFV 2080 ^[4]

Tab. 4 Vlastnosti obráběcího centra Tajmac-ZPS^[4]

Pojezdy		
Osa X	mm	2030
Osa Y	mm	810
Osa Z	mm	810
Posuvy		
Rychloposuv X,Y/Z	m/min	30
Max. pracovní posuv X, Y, Z	mm/min	15000
Zrychlení	m/s ²	3,5
Pracovní přesnost (Dle VDI/DGQ 3441)		
Přesnost polohování (P) X,Y,Z	mm	0,016
Opakovaná přesnost Ps max X,Y,Z	mm	0,006
Odměrovací systém	přímé odměřování	
Stůl		
Šířka x délka	mm	2200 x 780
Maximální zatížení stolu	kg	3000
T-drážky (počet x šířka x rozteč)	mm	5 x 18 x 160
Rozměr střední drážky	mm	18 H6
Rozměr střední díry	mm	30 H6
Vřeteno		
Nástrojový upínací kužel	ISO 50	
Maximální otáčky	1/min	8000
Výkon motoru S6-40%	kW	28/43
Max. kroutící moment na vřeteno S6-40%	Nm	428/657
Vzdálenost čela vřetena od stolu	mm	110-920
Polohování vřetena	elektrické	
Typ převodu	planetová převodovka	
Zásobník nástrojů		
Počet míst v bubnovém zásobníku	ks	24
Max. průměr nástroje	mm	110
Max. průměr nástroje s vynecháním místa	mm	180
Max. délka nástroje	mm	300
Max. hmotnost nástroje / celkem	kg	15/200
Čas výměny nástroje z jednoho zásobníku	s	4,5
Přívod energie		
Jmenovité napětí	V/Hz	3 x 400/50
Provozní příkon	kVA	35
Proud při plném zatížení stroje	A	86
Tlak vzduchu	Mpa	0,3 - 0,8
Základní údaje		
Maximální pracovní výška stroje	mm	3460
Šířka x hloubka	mm	4820 x 2440
Hmotnost stroje (bez příslušenství)	kg	13400
Objem nádrže chlazení s dopravníkem třísek	l	670

5.2.1 Vybavení stroje

Významným doplňkovým vybavením stroje ve vztahu k vybrané součásti jsou upínací elektromagnetické desky. Tyto elektromagnetické desky byly zakoupeny pro účel zkrácení obráběcího času. V začátcích výroby desky byla deska uchycena k obráběcímu stroji pomocí upínek. Tyto upínky se pak během obrábění musely dle potřeby odebírat a přemísťovat do míst, kde nebylo riziko vzniku kolize s nástrojem. Zavedení elektromagnetických desek byl velmi pozitivní krok z hlediska produktivity práce, kdy při jejich použití nemusí obsluha demontovat jednotlivé upínky a obrobek je tak obroben na jedno upnutí. To vedlo k významnému zkrácení výrobního času jedné součásti.

5.3 Stávající výrobní postup

Výpalek je obráběn ve dvou oddělených programech, kdy jsou postupně obrobena obě strany obrobku. Pro účely této diplomové práce bude optimalizován pouze jeden program pro jednu stranu. Pro tento vybraný program byl vytvořen výrobní postup. Tento výrobní postup je zaznamenán v tabulce č.5.

Obrobek je v obráběcím centru upnut pomocí dvou elektromagnetických desek. Díky tomuto způsobu upnutí součásti, které je velmi stabilní, nedochází při obrábění k problémům s vibracemi. Dalším důležitým aspektem tohoto upnutí je absence oblastí, kterým se nástroj musí v průběhu obrábění vyhnout. Nástroje pak mají v celém pracovním prostoru možnost volného pohybu což má velmi příznivý vliv na produktivitu a také možnost vzniku kolize.

Tab. 5 Stávající výrobní postup

Č.OP.	STROJ	NÁZEV OPERACE				NÁSTROJ
		ŘEZNÉ PODMÍNKY				
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
OP1	PÁLÍCÍ CENTRUM	VYPÁLENÍ POLOTOVARU				
OP2	TAJMAC - FCM	UPNUTÍ POLOTOVARU				DVĚ ELMAG. DESKY
OP3	TAJMAC - FCM	HRUBOVÁNÍ VRCHNÍ PLOCHY				T1
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		NE	1,7	550	300	161,2
OP4	TAJMAC - FCM	DOKONČENÍ VRCHNÍ PLOCHY				T1
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		NE	0,3	600	450	241,7
OP5	TAJMAC - FCM	HRUBOVÁNÍ OBVODOVÉ KONTURY				T2
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		NE	1	5000	2300	180,6
OP6	TAJMAC - FCM	DOKONČENÍ OBVODOVÉ KONTURY				T3
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		ANO	52,8	280	670	42,1
OP7	TAJMAC - FCM	FRÉZOVÁNÍ VYBRÁNÍ LEVÉ STRANY				T4
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		ANO	3,3	600	580	182,2
OP8	TAJMAC - FCM	FRÉZOVÁNÍ LEVÉHO ÚKOSU 17,5°				T4
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		ANO	0,2	5300	585	183,8
OP9	TAJMAC - FCM	DOKONČENÍ DNA VYBRÁNÍ LEVÉ STRANY				T4
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		ANO	1	900	650	204,2
OP10	TAJMAC - FCM	FRÉZOVÁNÍ VYBRÁNÍ PRAVÉ STRANY				T4
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		ANO	3,3	600	580	182,2
OP11	TAJMAC - FCM	FRÉZOVÁNÍ PRAVÉHO ÚKOSU 17,5°				T4
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		ANO	0,2	5300	585	183,8
OP12	TAJMAC - FCM	DOKONČENÍ DNA VYBRÁNÍ PRAVÉ STRANY				T4
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		ANO	1	900	650	204,2

Č.OP.	STROJ	NÁZEV OPERACE				NÁSTROJ
		ŘEZNÉ PODMÍNKY				
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
OP13	TAJMAC - FCM	FRÉZOVÁNÍ BOČNÍHO ÚKOSU 7x25° LEVÝ				T4
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		NE	0,6	5100	580	182,2
OP14	TAJMAC - FCM	FRÉZOVÁNÍ BOČNÍHO ÚKOSU 7x25° PRAVÝ				T4
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		NE	0,6	5100	585	183,8
OP15	TAJMAC - FCM	FRÉZOVÁNÍ HORNÍ ČÁSTI ÚKOSU 9x50° PRAVÝ				T4
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		NE	0,6	5100	580	182,2
OP16	TAJMAC - FCM	FRÉZOVÁNÍ HORNÍ ČÁSTI ÚKOSU 9x50° LEVÝ				T4
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		NE	0,6	5100	585	183,8
OP17	TAJMAC - FCM	FRÉZOVÁNÍ SPODNÍ ČÁSTI ÚKOSU 9x50° PRAVÝ				T5
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		NE	0,6	4100	1300	163,4
OP18	TAJMAC - FCM	FRÉZOVÁNÍ SPODNÍ ČÁSTI ÚKOSU 9x50° LEVÝ				T5
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		NE	0,6	4100	1305	164
OP19	TAJMAC - FCM	DOKONČENÍ ÚKOSU 9x50° PRAVÝ				T5
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		NE	0,5	4100	1300	163,4
OP20	TAJMAC - FCM	DOKONČENÍ ÚKOSU 9x50° LEVÝ				T5
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		NE	0,5	4100	1305	164
OP21	TAJMAC - FCM	FRÉZOVÁNÍ BOČNÍHO ÚKOSU 7x55° LEVÝ				T6
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		NE	0,3	3200	2950	148,3
OP22	TAJMAC - FCM	FRÉZOVÁNÍ BOČNÍHO ÚKOSU 7x55° PRAVÝ				T6
		CHLAZENÍ	ap [mm]	f [mm/min]	n [ot/min]	vc [m/min]
		NE	0,3	3200	2945	148

5.4 Řezné nástroje

V této kapitole budou popsány nástroje používané v současném obráběcím procesu pro vybraný program (vybranou stranu desky).

Nástroje používané pro obrábění tohoto obrobku jsou z převážné části nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutých karbidů. Tyto nástroje jsou používány kvůli rozsáhlému sortimentu obráběných materiálů. Kdy má obsluha stroje možnost volit vhodné břitové destičky dle aktuálně obráběného materiálu.

V zásobníku nástrojů, do kterého je možné připravit až 24 nástrojů, je stabilně umístěna kombinace nástrojů pro obrábění různých materiálů. Tyto nástroje jsou většinou frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami, monolitní frézy a vrtáky.

5.4.1 Nástroj T1

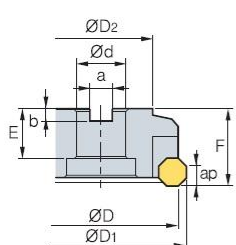
Tento nástroj s označením T1 je rovinná fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu. Tuto frézu vyrábí firma Korloy dle firemního značení se jedná o nástroj: AFOM5160R



Obr. 7 Nástroj T1^[8]

Fréza má vnější průměr D 171mm. Tento nástroj je používán pro rovinné frézování, a to hrubování i dokončování rovin.


Fréza má na těle deset břitových destiček ze slinutého karbidu skupiny ISO - P45 s TiN PVD povlakem. Chemické složení břitové destičky je na bázi WC-TiC-TaC-Co. [8]

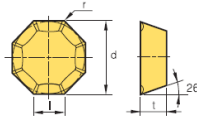


Designation		ØD	ØD ₁	ØD ₂	Ød	a	b	E	F	ap		Fig.
AFO(M) 5160R/L		160	171	120	50.8(40)	19.0(16.4)	11(9)	38(30)	63	9.5	5.2	2

Obr. 8 Rozměry nástroje T1 [8]

Geometrie břitové destičky umožňuje destičku během její životnosti osmkrát otočit. Destička díky své geometrii umožňuje uskutečnit hloubku řezu a_p až 9,5 mm. Úhel hřbetu nástroje je 25°. Břitová destička má firemní označení: OFKR0704SN-MM PC3545 [8]

Inserts	Designation	Coated										Cermet			Uncoated			Dimensions (mm)						Geometries
		NCM3325	NCM3335	NC5330	PC3500	PC5300	PC5400	PC3545	PC3930	PC6510	PD2000	CN2000	CN30	CN20	H01	G10	ST30A	ST20	l	d	t	r	d ₁	
OFKR-MM 	0704SN-MM	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	7.4	18	4.76	0.5	-	-	
	070408SN-MM	●																7.4	18	4.76	0.8	-	-	



Obr. 9 VBD nástroje T1 [8]

U tohoto nástroje je poměrně značná pořizovací cena těla nástroje i břitových destiček.

Tab. 6 Pořizovací cena nástroje T1

Cena těla nástroje	10.700,- Kč
Cena břitové destičky	202,- Kč

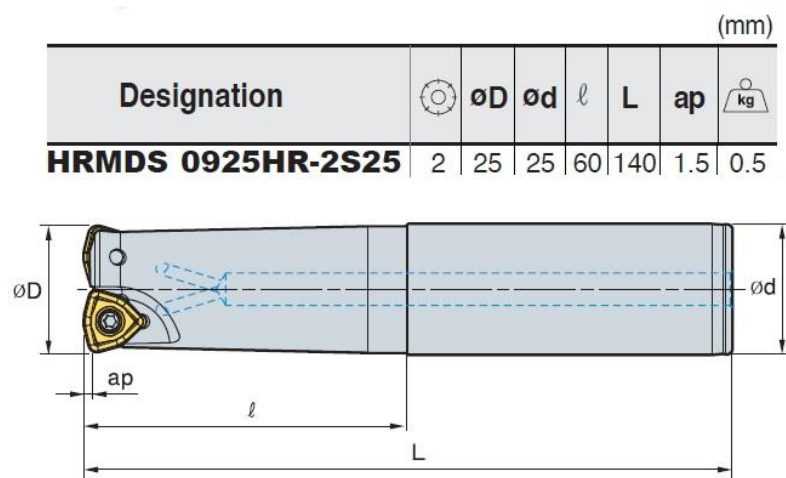
5.4.2 Nástroj T2

Nástroj označený T2 je fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu od výrobce Korloy. Tato fréza je dle výrobce označována: HRMDS0925HR-2S25




Obr. 8 Nástroj T2 ^[8]

Fréza má vnější průměr D 25mm. Do těla nástroje se dají upnout dvě břitové destičky. Tento nástroj je používán pro frézování kontur, vnitřních kapes a úkosů. Nástrojem se provádějí převážně hrubovací, ale i dokončovací operace.



Obr. 9 Rozměry nástroje T2 ^[8]

Díky geometrii břitové destičky lze destičku za dobu její životnosti šestkrát přestavit. Břitová destička je dle značení ISO-P45. Jedná se tedy o slinutý karbid na bázi WC-TiC-TaC-Co. Destička je ošetřena PVD povlakem na bázi TiN. Tato třída složení slinutého karbidu kombinuje dobrou houževnatost a zároveň dostačující tvrdost. Rozměry břitové destičky jsou znázorněny na obrázku č.10. Výrobce tuto destičku označuje jako: WNMX09T316ZNN-MM PC3545 ^[8]

Inserts	Designation	Coated												Cermet				Uncoated				Dimensions (mm)							Geometries
		NCM325	NCM335	NC5330	PC3500	PC5300	PC5400	PC3545	PC9530	PD2000	CN2000	CN20	CN80	HO1	G10	ST30A	ST20	l	l ₂	l ₁	d	t	r	d ₁	a	f			
	060312ZNN-MM	New	●	●													-	-	-	6.35	3.18	1.2	2.86	-	1.2				
	09T316ZNN-MM		●	●	●	●	●										-	-	-	9.525	3.97	1.6	3.6	-	1.7				
	130520ZNN-MM		●	●	●	●	●										-	-	-	12.7	5.56	2.0	4.7	-	2.5				
	160720ZNN-MM	New	●	●													-	-	-	16.0	7.0	2.0	5.8	-	3.0				

Obr. 10 VBD nástroje T2 ^[8]

Tab. 7 Pořizovací cena nástroje T2

Cena těla nástroje	3.043,- Kč
Cena břitové destičky	116,- Kč

5.4.3 Nástroj T3

Nástroj T3 je monolitní fréza ze slinutého karbidu s PVD povlakem. Jako jediný z použitých nástrojů je tato fréza monolitní, ostatní použité nástroje jsou nástroje s VBD. ^[7]

Tento nástroj je používán především pro dokončovací operace.

Výrobce nástroje je americká firma YU14. Podnikové označení frézy řady X POWER: EM834. ^[7]

Obr. 11 Nástroj T3 ^[7]

Fréza má průměr 20 mm, 6 břitů a řeznou délku 76 mm. Další rozměry tohoto nástroje jsou uvedeny na obrázku č.12.



EDP No.	Mill Diameter	Shank Diameter	Length of Cut	Overall Length	No. of Flute
	Metric				
EM834200	20.0	20	76	140	6

Unit : mm

Obr. 12 Rozměry nástroje T3 ^[7]

Materiál, ze kterého je tato monolitní fréza vyrobena, je speciální jemnozrný slinutý karbid. Tato fréza je vyrobena slinováním karbidu v ochranné atmosféře argonu s talkem 50 barů a za vysoké teploty. Fréza je následně opatřena PVD povlakem řady X-POWER. ^[7]

Tab. 8 Pořizovací cena nástroje T3

Cena nástroje	5.538,- Kč
---------------	------------

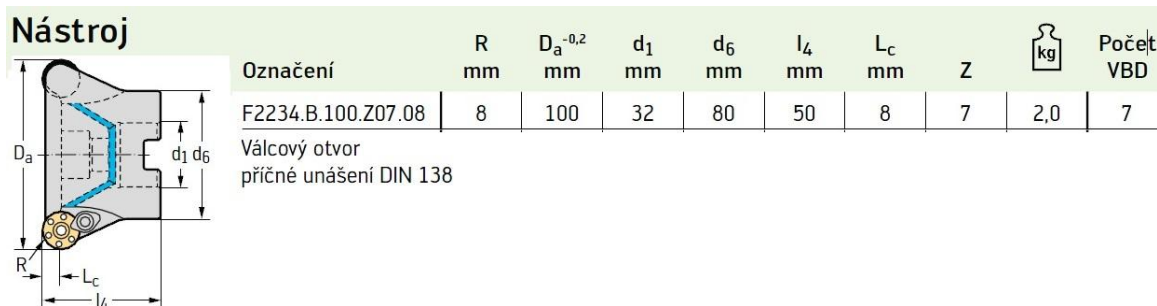
5.4.4 Nástroj T4

Nástroj číslo T4 je čelní nástrčná fréza od výrobce Walter. Používaná konfigurace dle katalogového značení výrobce: F2234.B.100.Z07.08,VBD-RDMT1204MO-D57 WSP45



Obr. 13 Nástroj T4 ^[6]

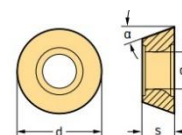
Jedná se o kopírovací frézu s kruhovými vyměnitelnými destičkami. Vyměnitelné destičky mají pozitivní geometrii břitu. Materiál destičky je sliutý karbid. Nástroj má průměr 171 mm. Celý nástroj i s destičkami váží 2 kg. Ostatní rozměry nástroje jsou uvedeny na obrázku 14. [6]



Obr. 14 Rozměry nástroje T4 [6]

Vyměnitelné břitové destičky jsou kruhového tvaru. Používaná fréza má 7 vyměnitelných destiček. Destička má rádius 6mm. Úhel čela destičky je 10° a úhel hřbetu je 10°. Díky kruhovému tvaru lze destičku za dobu její životnosti šestkrát otočit a tím jí naplno využít. Ostatní parametry této břitové destičky jsou uvedeny na obrázku č.15. [6]

**Kruhové pozitivní
Tiger-tec®**



Vyměnitelné břitové destičky

Označení	Toleranční třída	d mm	s mm	a	d_1 mm	P		M		K		N		S		H		
						HC	HC	HC	HC	HC	HW	HC	HC	HC	HF			
RDMT0803M0-D57	M	8	3,18	15°	3,4	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
RDMT10T3M0-D57	M	10	3,97	15°	4,4	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
RDMT1204M0-D57	M	12	4,76	15°	4,4	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
RDMT1505M0-D57	M	15	5,56	15°	5,5	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
RDMT1605M0-D57	M	16	5,56	15°	5,5	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
RDMT2006M0-D57	M	20	6,35	15°	6,5	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕

Obr. 15 Břitová destička nástroje T4 [6]

Vyměnitelná břitová destička RDMT1204MO-D57 WSP45 řady Tiger-tec je ze slinutého karbidu ISO – P a je opatřena CVD povlakem. Vzhledem k tomu, že se jedná o destičku ze slinutého karbidu skupiny ISO – P, je předpoklad, že její hlavní použití bude pro frézování oceli. Dle údajů výrobce lze destičku s tímto typem povlaku používat bez chlazení i s použitím chlazení. ^[6]

Tab. 9 Pořizovací cena nástroje T4

Cena těla nástroje	8.500,- Kč
Cena břitové destičky	203,- Kč

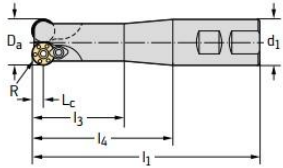
5.4.5 Nástroj T5

Nástroj s označením T5 je čelní fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu od výrobce Walter. Nástroj je výrobcem označován jako: F2231.W.040.Z02.10.L



Obr. 16 Nástroj T5 ^[6]

Fréza má vnější průměr 10mm a je osazena dvěma vyměnitelnými břitovými destičkami. Ostatní rozměry frézy jsou uvedeny na obrázku č.17.

Nástroj	Označení	R	$D_a^{-0,2}$	d_1	l_3	l_4	l_1	L_c	Z	kg	Počet VBD
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm			
	F2231.W.040.Z02.10.L	10	40	40	79	119	190	10	2	1,5	2
	Stopka DIN 1835-B										

Obr. 17 Rozměry nástroje T5^[6]

Vyměnitelné břitové destičky tohoto nástroje jsou totožné, jako má nástroj s označením T4. Jedná se o destičky od výrobce Walter s označením: RDMT1204MO-D57 WSP45^[6]

Tab. 10 Pořizovací cena nástroje T5

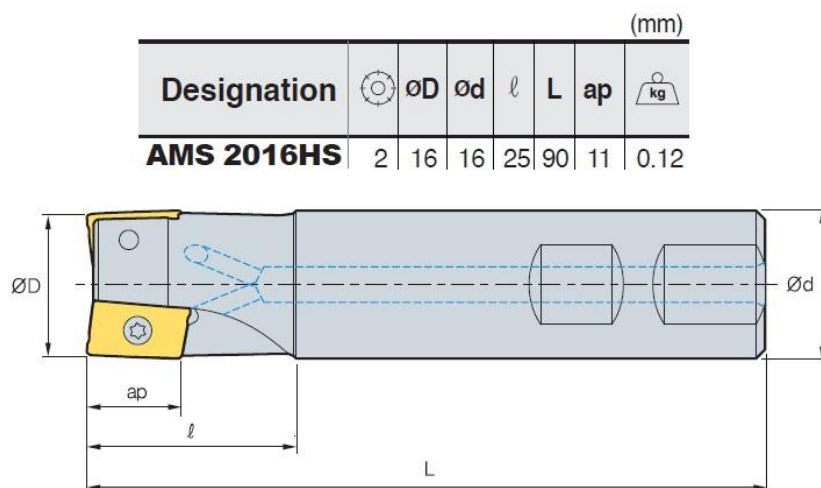
Cena těla nástroje	7.005,- Kč
Cena břitové destičky	203,- Kč

5.4.6 Nástroj T6

Dalším nástrojem použitým pro výrobu vybrané součásti je fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami s označením T6. Tato fréza je vyráběna výrobcem Korloy. Výrobce je tato fréza označována jako: AMS2016HS


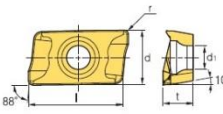
Obr. 18 Nástroj T6^[8]

Tato fréza má vnější průměr D 16mm. A je používána v provedení s dvěma břitovými destičkami. Další rozměry nástroje jsou zobrazeny na obrázku č.19.



Obr. 19 Rozměry nástroje T6 ^[8]

Břítová destička používaná na této fréze je ze slinutého karbidu třídy ISO – S20. Na břitové destičce je nanesen PVD povlak na bázi TiAlN. Břítová destička má dvě řezné hrany, úhel hřbetu 10° . Výrobce je tato destička označována jako: APMT11T308PDSR-MM PC5300. Další údaje o destičce jsou uvedeny na obrázku č.20. ^[8]

Inserts	Designation	Coated										Cermet		Uncoated		Dimensions (mm)					Geometries		
		NCM325	NCM335	NC5330	PC3500	PC5300	PC3545	PC9530	PC6510	PC215K	PD2000	CN2000	CN20	CN30	H01	G10	ST30A	ST20	l	d		t	r
	11T3PDSR-MM	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	11.2	6.467	3.6	0.5	2.85	
	11T308PDSR-MM	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	11.2	6.467	3.6	0.8	2.85	
	11T312PDSR-MM	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	11.2	6.467	3.6	1.2	2.85	
	11T316R-MM	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	11	6.467	3.6	1.6	2.85	
	11T318R-MM	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	11	6.467	3.6	1.8	2.85	
	11T324R-MM	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	11	6.467	3.6	2.4	2.85	

Obr. 20 Břítová destička nástroje T6 ^[8]

V následující tabulce č.11 je uvedena pořizovací cena těla nástroje i vyměnitelné břitové destičky.

Tab. 11 Pořizovací cena nástroje T6

Cena těla nástroje	2.000,- Kč
Cena břitové destičky	104,- Kč

5.6 Stávající trvanlivosti nástrojů

Pro provedení optimalizace obráběcího procesu je nezbytné pro určení optimálních pracovních podmínek získat stávající trvanlivosti nástrojů. To znamená čas, kdy je nástroj v řezu a dochází k jeho opotřebení až do okamžiku, kdy dojde k nepřijatelnému opotřebení.

Stávající trvanlivost nástroje je rozhodující pro určení konstanty C_v v komplexním Taylorově polynomu.

Stávající trvanlivost byla zjištěna dlouhodobým sledováním pro dané nástroje a byla pozorována na vybrané součásti. Trvanlivost byla zaznamenávána a byla zjištěna ve třech hodnotách. Zjištěna byla minimální trvanlivost, maximální trvanlivost a průměrná trvanlivost. Zjištěná trvanlivost je trvanlivostí pro jednu řeznou hranu destičky.

Tab. 12 Stávající životnosti nástrojů

Nástroj	Počet zubů	T_{min} [min]	T_{max} [min]	T_{prum} [min]	Počet otočení destičky
T1	10	68	102	85	8
T2	2	45,5	70	58	6
T3	6	280	350	315	-
T4	8	121,5	162	142	6
T5	4	49,5	55	52	6
T6	2	102	126	114	2

6 Proces optimalizace obráběcího procesu

V této kapitole budou popsány principy optimalizace obráběcího procesu.

6.1 Kritéria optimálnosti

Kritériem optimálnosti rozumíme prvek, kterým budeme na celý proces optimalizace nahlížet. V této diplomové práci bude optimalizace provedena z pohledu kritéria minimálních výrobních nákladů. Pro úplnost zde však budou popsány i další kritéria, která při optimalizaci můžeme uvažovat.

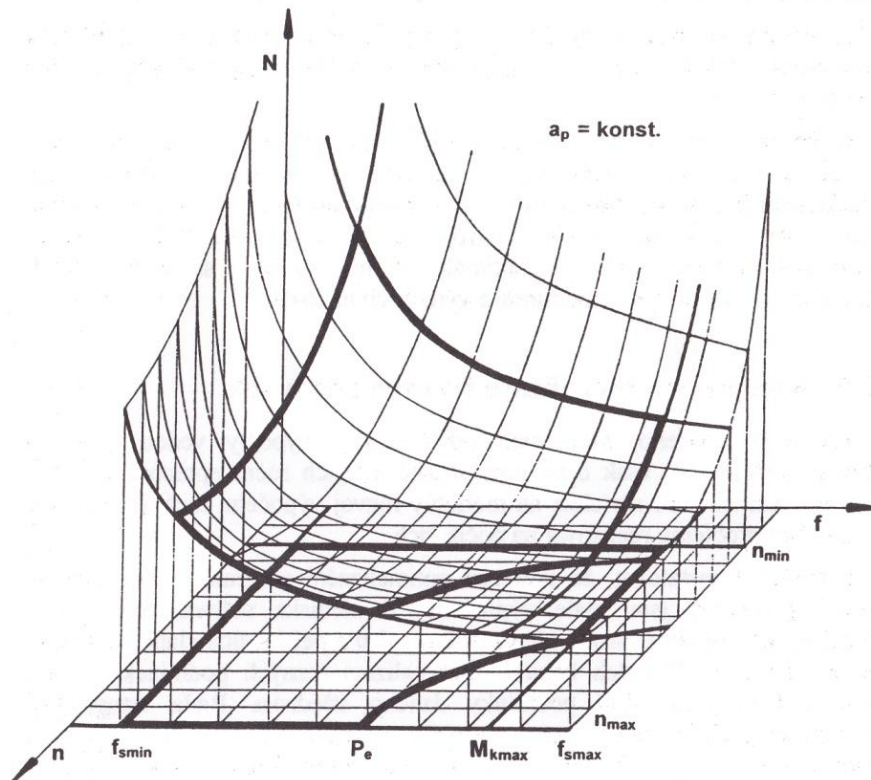
Optimalizace obráběcího procesu pak může být provedena z hledisek následujících kritérií optimálnosti:

- Kritérium minimálních výrobních nákladů
- Kritérium optimálnosti z hlediska produktivity
- Kritérium optimálnosti z hlediska úběru materiálu
- Kritérium optimálnosti z hlediska zisku
- Vícekriteriální optimalizace

6.1.1 Kritérium minimálních výrobních nákladů

Toto kritérium minimálních výrobních nákladů a jeho matematická formulace nám udává způsob optimalizace, jejímž cílem je dosažení minimálních výrobních nákladů. Toto kritérium je základním kritériem optimalizace. V případě, že se nevyskytne závažný důvod pro uvažování jiného kritéria, je toto kritérium v dnešní době nejpodstatnější. Toto kritérium je vede ke stejným výsledkům jako kritérium z hlediska zisku. ^[1]

Kritérium minimálních výrobních nákladů lze vyjádřit následujícím způsobem. Kdy vycházíme z nákladové funkce, která leží nad oblastí přípustných řešení. Příklad vyjádření této nákladové funkce je znázorněn na obrázku č.21. Minimálních výrobních nákladů dosáhneme, když nalezneme matematické minimum této nákladové funkce. A použijeme pracovní podmínky, které se nacházejí v minimu této nákladové funkce. ^[1]

Obr. 21 Zobrazení nákladové funkce ^[1]

Nákladová funkce a tím i kritérium optimálnosti z hlediska minimálních výrobních nákladů má tuto matematickou formulaci.

$$N = N_s + N_n + N_{vn} = \min \quad (6.1)$$

Kde:

- N - výrobní náklady na operační úsek [Kč]
- N_s - náklady na strojní práci na operační úsek [Kč]
- N_n - náklady na nástroje vztažené na operační úsek [Kč]
- N_{vn} - náklady na výměnu nástroje nebo VBD vztažené na operační úsek [Kč]

6.1.2 Kritérium optimálnosti z hlediska produktivity

V určitých situacích se mimo výše zmíněného kritéria minimálních nákladů dá uvažovat kritérium maximální produktivity. Toto kritérium optimálnosti nahlíží na proces optimalizace tak, aby bylo dosaženo maximálně možného vyrobeného množství. Bohužel, již však neuvažuje aspekt nákladů. Toto kritérium je pro podnik z ekonomického hlediska dlouhodobě neudržitelné.^[1]

V případě, kdy podnik potřebuje zvýšit svou produkci, má k dispozici i jiné možnosti, jak tuto špičku v poptávce vykrýt. Jedním z uvažovaných kroků může být zvýšení výrobní kapacity podniku, např. nákupem dalších výrobních strojů. Další možností, která je v dnešní době velmi rozšířená a používaná, je tzv. outsourcing neboli využití kapacit kooperanta.

Matematická formulace tohoto kritéria je zaznamenána rovnicí č. 6.2

$$t_u = t_{As} + t_{vn} \cdot z_v = \text{minimální [min]} \quad (6.2)$$

Takto vyjádřené kritérium nám říká, že čas potřebný na obrobení operačního úseku t_u by měl být co nejkratší.

Kde: t_{vn} je čas výměny nástroje [min]
 t_{As} je strojní čas na daný operační úsek [min]
 z_v je počet výměn nástroje

Po dosazení za t_{As} a z_v do již zformulovaného kritéria maximální produktivity se získá rovnice č. 6.3

$$t_u = \frac{L}{n \cdot f} + \frac{L \cdot k_r \cdot t_{vn}}{n \cdot f \cdot T} = \text{minimální [min]} \quad (6.3)$$

Proto, aby ze vzorce byl patrný význam proměnných veličin, se zbytek označí jako konstanty, a to následovně:

$$K_3 = L \text{ [mm]}$$

$$K_4 = L \cdot k_r \cdot t_{vn} \text{ [mm} \cdot \text{min]}$$

Formální zápis kritéria maximální produktivity pak bude vypadat takto:

$$t_u = \frac{K_3}{n \cdot f} + \frac{K_4}{n \cdot f \cdot T} = \text{minimální [min]} \quad (6.4)$$

Vydeme-li z tohoto kritéria, je možné určit optimální trvanlivost nástroje z hlediska maximální produktivity. Vztah, který se pak pro výpočet této trvanlivosti použije, je tento:

$$T_{opt} = t_{vn} \cdot k_r \cdot (m - 1) \text{ [min]} \quad (6.5)$$

6.1.3 Kritérium optimálnosti z hlediska úběru materiálu

Při první úvaze o tomto kritériu se může zdát, že je shodné s výše zmíněným kritériem optimálnosti z hlediska produktivity. Ve své podstatě jsou ale tato kritéria odlišná.

Matematicky lze kritérium maximálního úběru materiálu vyjádřit rovnicí (6.6). Při porovnání rovnice (6.6), která vyjadřuje kritérium maximálního úběru materiálu s rovnicí (6.2), která vyjadřuje kritérium z hlediska maximální produktivity, je patrné, že tato dvě kritéria jsou odlišná. ^[1]

Proti praktickému použití tohoto kritéria stojí fakt, že při jeho použití by docházelo k takřka okamžité destrukci nástroje, což je pro reálné použití neakceptovatelné.

$$U = a_p \cdot f \cdot v_c = \max [\text{cm}^3/\text{min}] \quad (6.6)$$

Kde: U [cm^3/min] je úběr materiálu
 a_p [mm] je hloubka řezu
 f [mm/ot] je posuv na otáčku
 $v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$ [m/min] je řezná rychlost

$$U = a_p \cdot f \cdot \pi \cdot D \cdot n \cdot 10^{-3} = \max [\text{cm}^3/\text{min}] \quad (6.7)$$

Při úvaze, že optimalizaci budeme provádět s již předem určenou hloubkou řezu a_p , můžeme toto kritérium zapsat následujícím způsobem:

$$U = f \cdot n = \max [\text{mm}/\text{min}] \quad (6.8)$$

6.2 Omezující podmínky

Každý obráběcí proces má svá specifická omezení, která charakterizují daný systém. Tato omezení jsou vždy specifická pro jednotlivé stroje v jednotlivých podnicích. Omezení se mohou dokonce lišit i pro jednotlivé vyráběné součásti.

Nejvýznamnějšími omezeními, která se musí při optimalizaci uvažovat, jsou omezení z hlediska stroje. Tím jsou myšleny např. rozsahy pracovních posuvů, rozsahy otáček vřetene, silová zatížení stroje apod. S omezením z hlediska stroje úzce souvisí i omezení z hlediska nástrojů. Zde musí být brán zřetel na řezné rychlosti, přípustné posuvy, vhodné oblasti utváření třísek atd.

Významná omezení, která zasahují do obráběcího procesu, budou popsána v navazujících kapitolách.

6.2.1 Omezení dané výkonem obráběcího stroje

Toto omezení má významný vliv především v operačním cyklu hrubování. Toto omezení závisí především na výkonové charakteristice pohonu obráběcího centra. Toto omezení nám říká, že nelze stroj vystavit takovému zatížení, jenž by nebyl stroj schopen svým výkonem pokrýt.^[1]

Matematicky pak lze toto omezení formulovat následujícím způsobem:

$$P_c \leq P_e \cdot \eta \quad (6.9)$$

Kde: P_c je řezný výkon [W]
 P_e je výkon elektromotoru [W]
 η je mechanická účinnost stroje [–]

Řezný výkon lze uvažovat jako funkci řezné síly:

$$60 \cdot P_c = F_c \cdot v_c \quad (6.10)$$

Kde: F_c je řezná síla [N]

Pro frézování, na které je tato diplomová práce zaměřena, lze řeznou sílu vyjádřit následujícím vztahem 6.11.

$$F_c = k_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f_z^{y_{Fc}} \cdot v_c^{z_{Fc}} \cdot B^{u_{Fc}} \cdot z \cdot D_n^{w_{Fc}} \quad [N] \quad (6.11)$$

Kde: k_{Fc} je empirická konstanta řezné síly [-]
 B je šířka odebírané plochy [mm]
 z je počet zubů v záběru [-]
 w_{Fc} a u_{Fc} jsou empirické konstanty [-]

Nebudeme-li pro účely optimalizace uvažovat vliv řezné rychlosti na řeznou sílu, ten je totiž všeobecně velmi malý, můžeme formálně omezující podmínku danou výkonem obráběcího stroje zformulovat pomocí rovnice č. 6.12.

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f_z^{y_{Fc}} \cdot n = \frac{10^3 \cdot 60 \cdot P_e \cdot \eta}{k_{Fc} \cdot \pi \cdot B^{u_{Fc}} \cdot z \cdot D^{w_{Fc}+1}} \quad (6.12)$$

Spolu s vývojem obráběcích strojů se na trhu objevují stroje s různými výkonovými charakteristikami. Tyto nerovnoměrné průběhy výkonu jsou všeobecně velmi složité na matematickou formulaci. Ve většině případů se však nedosáhne v reálném provozu takového zatížení, které by vyžadovalo větší výkon, než jaký je k dispozici.

6.2.2 Omezení dané maximálně přípustným kroutícím momentem

Toto omezení je významné především u soustružení. Tímto omezením rozumíme to, že vyvolané řezné síly nesmí překročit hranici, kdy by došlo k uvolnění obrobku z upnutí. To znamená, že řezná síla F_c , která vyvolá kroutící moment M_k , nesmí být větší než kroutící moment M_{kmax} , který je vyvolán silou upínací. Matematicky se pak toto omezení dá formulovat následovně.^[1]

$$M_k \leq M_{kmax} \quad (6.13)$$

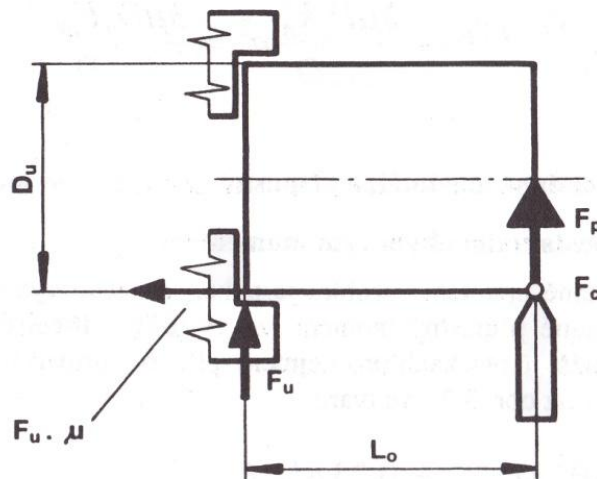
Kde: M_k je kroutící moment na vřetenu [Nm]

M_{kmax} je maximálně přípustný kroutící moment [Nm]

Vzhledem k tomu, že předmětem této diplomové práce je obráběcí proces frézování, kde se tato omezující podmínka neprojeví, už zde dále nebude rozváděna.

6.2.3 Omezení dané maximálně přípustným ohybovým momentem

Toto omezení se naplno projeví např. při jednostranném upnutí obrobku při soustružení. V takovém případě, když vyvolaný ohybový moment překročí přípustnou hranici, hrozí až vytržení obrobku ze sklíčidla. Tuto situaci demonstruje následující obrázek č.22. ^[1]



Obr. 22 Upnutí obrobku ve sklíčidle ^[1]

Matematická formulace tohoto omezení pak může být chápána pomocí rovnice 6.14.

$$M_o \leq M_{o\max} \quad (6.14)$$

Kde: $M_{o\max}$ je maximálně přípustný ohybový moment [Nm]

M_o je ohybový moment [Nm]

Maximálně přípustný ohybový moment je závislý na upínací síle F_u a koeficientu tření μ , dále pak na průměru upínaného obrobku.

$$M_{o\max} = \frac{0,75 \cdot \mu \cdot D_u \cdot F_{uo}}{10^3} \quad [\text{Nm}] \quad (6.15)$$

Ohybový moment M_o pak lze vyjádřit pomocí řezné síly F_c a síly pasivní F_p

$$M_o = \frac{L_o \cdot \sqrt{(F_c^2 + F_p^2)}}{10^3} \quad [\text{Nm}] \quad (6.16)$$

Takto formulovaná omezující podmínka má uplatnění především při soustružení. V této diplomové práci, která se věnuje frézování, uplatnění nenajde.

6.2.4 Omezení dané maximálně přípustnými silami

Tato omezující podmínka nalezne své opodstatnění i v případě frézování, a to tam, kde vzhledem ke složitosti obráběných součástí je problém s jejich upnutím. S tím souvisí tuhost upnutí, případně velké vyložení nástroje. Z tohoto je patrné, že je nezbytně nutné brát na zřetel tuhost obrobku, tuhost nástroje, tuhost upnutí a v neposlední řadě tuhost vedení obráběcího stroje v jednotlivých osách.^[1]

Pro případ frézování je dobré při formulaci omezující podmínky uvažovat kombinované namáhání výslednou silou, která je kombinací řezné síly a pasivní síly.^[1]

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f_z^{y_{Fc}} \leq \frac{F_{pcmax}}{\sqrt{1 + k_{pc}^2 \cdot k_{Fc} \cdot B^{u_{Fc}} \cdot z \cdot D^{w_{Fz}}}} \quad (6.17)$$

Dalším způsobem, jakým lze omezující podmínku z hlediska přípustných sil formulovat, jsou přípustné velikosti posuvů. Jedná se o maximální přípustný posuv pro daný břit (geometrii a materiál) při obrábění daného materiálu. Tyto hodnoty někteří výrobci nástrojů udávají v katalogích nástrojů. Omezení a jeho formulace pak je následující.^[1]

$$f \leq f_F \text{ resp. } f_z \leq f_{zF} \quad (6.18)$$

Kde: f_F ; f_{zF} jsou maximálně přípustné velikosti posuvu na otáčku resp. na zub

Toto omezení má významný vliv především při operačním cyklu hrubování, kdy je cílem odebírat pokud možno co největší objem materiálu na jednu třísku. S tím souvisí velké silové zatížení celého obráběcího systému.

6.2.5 Omezení dané vhodným utvářením třísek

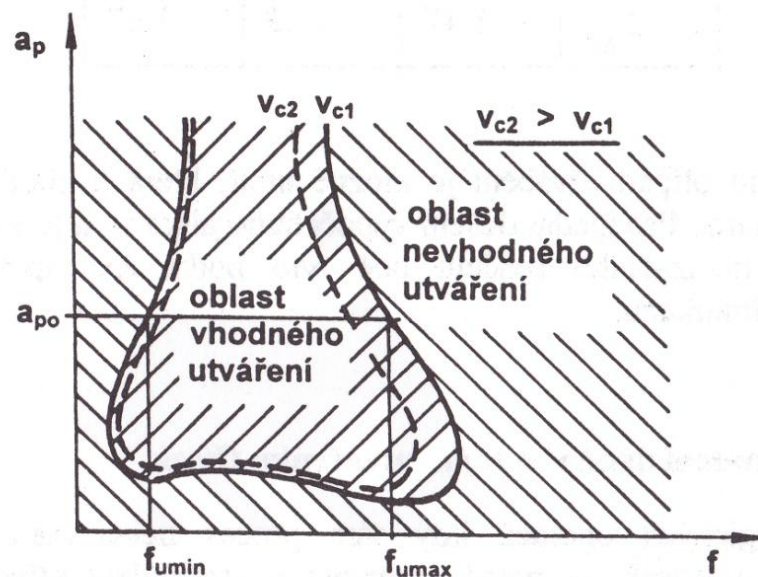
U moderních CNC obráběcích strojů je jedním z významných požadavků dobrá tvorba třísky. Dlouhá spojitá tříska je na dnešních moderních strojích velmi nežádoucím jevem. Nejvýznamnějšími požadavky na vhodnou tvorbu třísky jsou:

- Tříska se díky nevhodnému utváření nesmí dostat pod břit. Tento jev může vést až k destrukci břitu, což znamená havárii v obráběcím systému.^[1]
- Třísky nesmí zahltnout obráběcí prostor a znemožnit tak další volnou práci, např. výměnu nástroje apod.^[1]

S tímto požadavkem se ztotožnili i výrobci nástrojů. Především tento požadavek přijali a ve velké míře se na tuto problematiku zaměřují. To se projevuje např. v neustálém vývoji utvařečů třísek, kdy v dnešní době můžeme registrovat nepřeberné množství z hlediska tvarů, velikostí apod.

I přes tuto snahu výrobců jsou stále materiály, které tuto nežádoucí třísku při kombinaci nevhodných technologických parametrů mohou tvořit. Proto sami výrobci mapují oblasti pro jednotlivé nástroje potažmo vyměnitelné břitové destičky, ve kterých se tříska vhodně utváří. Tyto oblasti jsou kombinací řezných podmínek pro daný materiál a daný nástroj. Oblasti vhodného utváření třísek pak můžeme najít prakticky v každém katalogu nástrojů každého výrobce.

Tyto oblasti jsou zjišťovány experimentálně a uvádějí se v systému f/a_p pro danou řeznou rychlost v_c . Se zvětšující se řeznou rychlostí se oblast vhodného utváření třísky zmenšuje. Tento jev je však zanedbatelný vzhledem k rozpětí řezných rychlostí používaných pro daný materiál. Příklad typické oblasti vhodného utváření třísky a jev se zmenšením této oblasti v závislosti na řezné rychlosti je znázorněn na následujícím obrázku. ^[1]



Obr. 23 Oblast vhodného utváření třísky ^[1]

Při frézování se tento jev neprojevuje tak významně jako u soustružení. Je tomu tak proto, že při soustružení je břit kontinuálně v záběru. Oproti tomu při frézování je břit v záběru pouze v určité oblasti a tím je už z principu operace dána vhodná tvorba třísky.

6.2.6 Omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy

Vzhledem k tomu, že v dnešní době se dá obrábění považovat za dokončovací operaci, je jedním z požadavků drsnost obrobené plochy. Proto při dokončovacích cyklech tuto omezující podmínku musíme také uvažovat. Formálně lze tuto omezující podmínku zapsat rovnicí 6.19. ^[1]

$$R_a \leq R_{amax} \quad (6.19)$$

Kde: R_a je drsnost obrobené plochy
 R_{amax} je maximálně přípustná drsnost obrobené plochy

Víme, že drsnost obrobené plochy je funkcí několika proměnných a závisí na mnoha faktorech. Obecně jí ale můžeme uvažovat jako:

$$R_a = fce(f, v_c, r_\varepsilon, \kappa_r, \kappa_r', \dots) \quad (6.20)$$

Kde: r_ε je poloměr špičky nástroje
 κ_r je úhel nastavení
 κ_r' je vedlejší úhel nastavení

6.2.7 Omezení dané požadovanou přesností obrobené plochy

Tato omezující podmínka se uplatňuje u dokončovacích operací obrábění, což je dáno požadavkem na určitou přesnost obrobené plochy. Na výslednou přesnost obrobené plochy má vliv mnoho faktorů, např. opotřebení nástroje, řezné podmínky, deformace jednotlivých členů obráběcí soustavy apod. ^[1]

Ve vztahu k obrábění vybrané součásti pro účely této diplomové práce se toto kritérium vzhledem k nárokům na obrobenou součást neuplatní. Z tohoto důvodu zde nebude toto kritérium formálně dále rozváděno.

6.2.8 Omezení dané maximálními a minimálními otáčkami vřetena

Každý stroj, na kterém se řezná síla vyvolává otáčením nástroje nebo obrobku, má svá omezení z hlediska minimálních a maximálních otáček. Toto omezení pak formálně vyjadřují rovnice 6.21 a 6.22. ^[1]

$$n \leq n_{smax} \quad (6.21)$$

$$n \leq n_{smin} \quad (6.22)$$

Kde: n_{smax} jsou maximálně dosažitelné otáčky stroje [ot/min]
 n_{smin} jsou minimální otáčky stroje [ot/min]

V dnešní době nám pohony obráběcích strojů poskytují dostatečný výkon. Situace je však jiná z hlediska řezných rychlostí, resp. otáček. Ve většině případů nemáme totiž k dispozici dostatečně velké otáčky a nedokážeme tak naplno využít potenciálu moderních řezných materiálů, které jsou v dnešní době k dostání.

6.2.9 Omezení dané maximálním a minimálním posuvem stroje

Podobná situace jako u předešlého omezení je z hlediska posuvů. Každý stroj může pracovat v určitém rozsahu minimálních a maximálních hodnot posuvu. Formálně se tato omezující podmínka liší, zda se na stroji nastavuje posuv na otáčku nebo posuv za minutu. Z pohledu této diplomové práce je důležitý posuv za minutu f_m [mm/min]. Pro tento posuv je omezující podmínka formulována pomocí rovnic 6.23 a 6.24. ^[1]

$$f_m \leq f_{smmax} \quad (6.23)$$

$$f_m \geq f_{smmin} \quad (6.24)$$

Kde: f_{smmax} je maximálně možný posuv stroje [mm/min]

f_{smmin} je minimální posuv stroje [mm/min]

6.2.10 Omezení dané komplexním Taylorovým vztahem

Omezující podmínka daná komplexním Taylorovým vztahem je významná díky tomu, že je v Taylorově komplexním vztahu zahrnuta trvanlivost bříty. Tato skutečnost pak ovlivňuje celý postup matematického řešení optimalizace, kdy při řešení problémů optimalizace vycházíme především z komplexního Taylorova vztahu. Pro účely optimalizace v této diplomové práci budu vycházet právě z jeho základní podoby. ^[1]

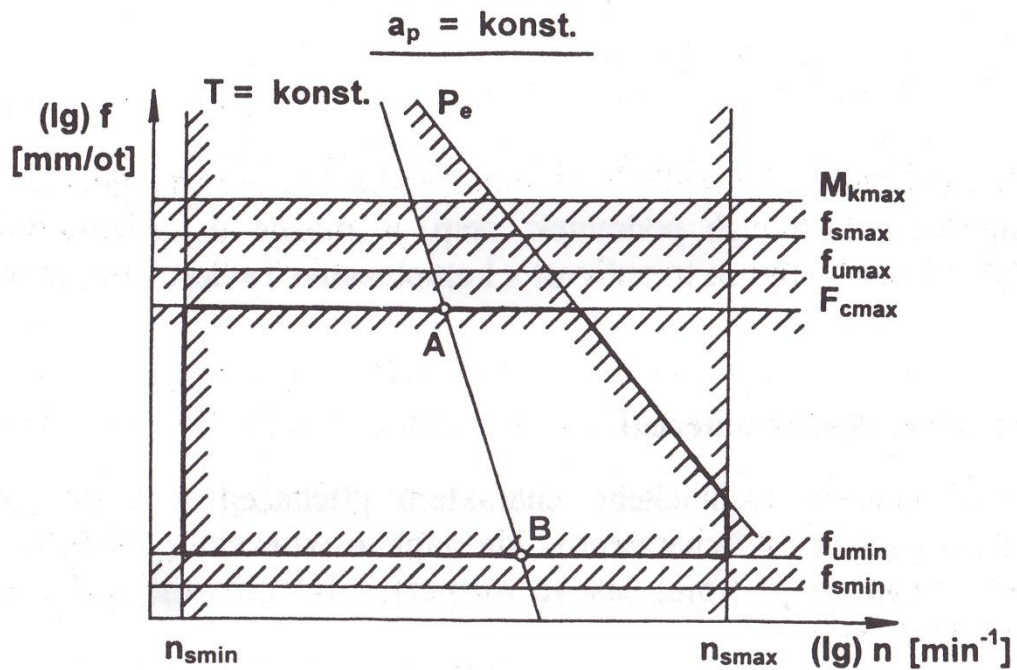
$$v_c = \frac{C_v}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot T^{\frac{1}{m}}} \text{ [m/min]} \quad (6.25)$$

Kde: c_v ; x_v ; y_v ; m jsou experimentálně zjištěné empirické konstanty

6.3 Definice oblasti přípustných řešení

Oblast přípustných řešení je souhrn všech omezujících podmínek, které se v daném případě vyskytují. Tím, že celý optimalizační výpočet provádíme pro předem určenou a konstantní hloubku řezu, je i tato oblast vždy tvořena pro tuto uvažovanou hloubku řezu. ^[1]

Oblast přípustných řezných podmínek může mít pro jednotlivé součásti různé tvary. Do této oblasti může být zahrnuto např. výkonová charakteristika daného stroje, jeho maximální pracovní podmínky (f_{max} , n_{max}), pracovní podmínky pro dosažení určité drsnosti obrobené plochy apod. Pro různé případy mohou mít tyto oblasti přípustných řešení různé a především složité provedení.

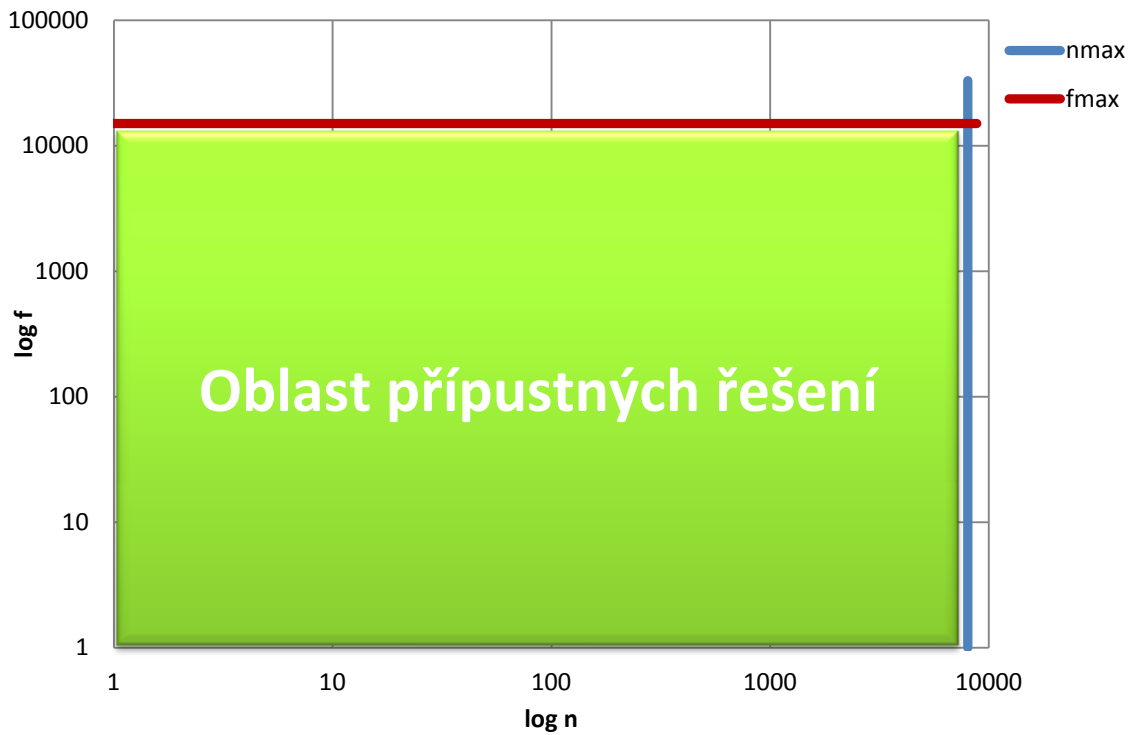
Obr. 24 Příklad oblasti přípustných řešení^[1]

Oblast přípustných řešení pro obráběcí centrum Tajmac FCM, na kterém se optimalizace řezných podmínek v rámci této diplomové práce provádí, může být formulována např. grafem č. 2. Tato oblast neuvažuje minimální posuvy a otáčky. To vychází z předpokladu, že optimální řešení se bude nacházet někde v oblasti maximálních posuvů a maximálních otáček.

Tab. 13 Omezující hodnoty pro OPŘ

f_{\max} [mm/min]	n_{\max} [ot/min]
15000	8000

Graf 2 Oblast přípustných řešení



Vzhledem k tomu, že nebyla od výrobce obráběcího stroje Tajmac-ZPS MCFV 2080 poskytnuta jeho výkonová charakteristika, má oblast přípustných řešení tento jednoduchý tvar. Kontrola operací, zda nepřekračují výkon daného obráběcího stroje, pak bude provedena pomocí porovnávacího výpočtu.

7 Výpočtový model pro optimalizaci stávajícího stavu

V této části diplomové práce bude proveden návrh výpočtového modelu. Zvolený výpočtový model byl navržen s ohledem na charakter výroby ve společnosti UnionOcel.

Navržený výpočtový model bude strukturován v následujících bodech:

- Určení všech nezbytných pracovních podmínek
- Určení strojního času na dané operační úseky
- Výpočet nákladů na strojní práci, výměnu nástroje a nákladů na trvanlivost nástroje
- Výpočet optimální trvanlivosti břitu z hlediska minimálních nákladů
- Výpočet optimální řezné rychlosti
- Provedení kontroly omezujících podmínek
- Výpočet optimálních pracovních podmínek dle optimální řezné rychlosti
- Výpočet výrobních nákladů na daný obrobek

7.1 Určení pracovních podmínek

V tomto výpočtovém modelu se bude vycházet z předem určených parametrů posuvu f_z a hloubky řezu a_p . Optimalizace pak bude soustředěna na řeznou rychlost v_c .

Pro výpočet bude potřeba vyjádřit stávající řeznou rychlost v_c z nastavených otáček n .

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_n \cdot n}{10^3} \text{ [m/min]} \quad (7.1)$$

Kde: D_n je průměr nástroje [mm]
 n jsou otáčky nástroje [ot/min]

Po dosažení hodnot průměrů nástroje a otáček se vypočítá řezná rychlost v_c pro jednotlivé operační úseky.

$$v_{cop1} = \frac{\pi \cdot D_{nT1} \cdot n_{op1}}{10^3} = \frac{\pi \cdot 171 \cdot 300}{10^3} = 161,2 \text{ [m/min]}$$

Pro zbylé operační úseky byla vytvořena tabulka v programu Microsoft Excel. Pomocí této tabulky pak byl proveden výpočet pro ostatní operační úseky.

Tab. 14 Výpočet řezné rychlosti

Č. OP.	NÁZEV OPERACE	NÁSTROJ	D_n [mm]	n [ot/min]	v_c [m/min]
OP3	HRUBOVÁNÍ VRCHNÍ PLOCHY	T1	171	300	161,16
OP4	DOKONČENÍ VRCHNÍ PLOCHY	T1	171	450	241,75
OP5	HRUBOVÁNÍ OBVODOVÉ KONTURY	T2	25	2300	180,64
OP6	DOKONČENÍ OBVODOVÉ KONTURY	T3	20	670	42,10
OP7	FRÉZOVÁNÍ VYBRÁNÍ LEVÉ STRANY	T4	100	580	182,21
OP8	FRÉZOVÁNÍ LEVÉHO ÚKOSU 17,5°	T4	100	585	183,78
OP9	DOKONČENÍ DNA VYBRÁNÍ LEVÉ STRANY	T4	100	650	204,20
OP10	FRÉZOVÁNÍ VYBRÁNÍ PRAVÉ STRANY	T4	100	580	182,21
OP11	FRÉZOVÁNÍ PRAVÉHO ÚKOSU 17,5°	T4	100	585	183,78
OP12	DOKONČENÍ DNA VYBRÁNÍ PRAVÉ STRANY	T4	100	650	204,20
OP13	FRÉZOVÁNÍ BOČNÍHO ÚKOSU 7x25° LEVÝ	T4	100	580	182,21
OP14	FRÉZOVÁNÍ BOČNÍHO ÚKOSU 7x25° PRAVÝ	T4	100	585	183,78
OP15	FRÉZOVÁNÍ HORNÍ ČÁSTI ÚKOSU 9x50° PRAVÝ	T4	100	580	182,21
OP16	FRÉZOVÁNÍ HORNÍ ČÁSTI ÚKOSU 9x50° LEVÝ	T4	100	585	183,78
OP17	FRÉZOVÁNÍ SPODNÍ ČÁSTI ÚKOSU 9x50° PRAVÝ	T5	40	1300	163,36
OP18	FRÉZOVÁNÍ SPODNÍ ČÁSTI ÚKOSU 9x50° LEVÝ	T5	40	1305	163,99
OP19	DOKONČENÍ ÚKOSU 9x50° PRAVÝ	T5	40	1300	163,36
OP20	DOKONČENÍ ÚKOSU 9x50° LEVÝ	T5	40	1305	163,99
OP21	FRÉZOVÁNÍ BOČNÍHO ÚKOSU 7x55° LEVÝ	T6	16	2950	148,28
OP22	FRÉZOVÁNÍ BOČNÍHO ÚKOSU 7x55° PRAVÝ	T6	16	2945	148,03

Obdobným způsobem je nutné přepočítat minutový posuv f_m na posuv na zub f_z a to pomocí rovnice 7.2.

$$f_z = \frac{f_m}{z \cdot n} \text{ [mm/zub]} \quad (7.2)$$

Kde: z je počet břitů nástroje

Po dosažení vypočítám posuv na zub. Použitím stejného postupu jako u řezné rychlosti vypočítám posuv na zub i pro ostatní operační úseky.

$$f_z = \frac{f_{op1}}{z_{T1} \cdot n_{op1}} = \frac{550}{10 \cdot 300} = 0,18 \text{ [mm/zub]}$$

Tab. 15 Výpočet posuvu na zub

Č. OP.	NÁZEV OPERACE	NÁSTROJ	z	n [ot/min]	f_m [mm/min]	f_z [mm/zub]
OP3	HRUBOVÁNÍ VRCHNÍ PLOCHY	T1	10	300	550	0,18
OP4	DOKONČENÍ VRCHNÍ PLOCHY	T1	10	450	600	0,13
OP5	HRUBOVÁNÍ OBVODOVÉ KONTURY	T2	2	2300	5000	1,09
OP6	DOKONČENÍ OBVODOVÉ KONTURY	T3	6	670	280	0,07
OP7	FRÉZOVÁNÍ VYBRÁNÍ LEVÉ STRANY	T4	7	580	600	0,15
OP8	FRÉZOVÁNÍ LEVÉHO ÚKOSU 17,5°	T4	7	585	5300	1,29
OP9	DOKONČENÍ DNA VYBRÁNÍ LEVÉ STRANY	T4	7	650	900	0,20
OP10	FRÉZOVÁNÍ VYBRÁNÍ PRAVÉ STRANY	T4	7	580	600	0,15
OP11	FRÉZOVÁNÍ PRAVÉHO ÚKOSU 17,5°	T4	7	585	5300	1,29
OP12	DOKONČENÍ DNA VYBRÁNÍ PRAVÉ STRANY	T4	7	650	900	0,20
OP13	FRÉZOVÁNÍ BOČNÍHO ÚKOSU 7x25° LEVÝ	T4	7	580	5100	1,26
OP14	FRÉZOVÁNÍ BOČNÍHO ÚKOSU 7x25° PRAVÝ	T4	7	585	5100	1,25
OP15	FRÉZOVÁNÍ HORNÍ ČÁSTI ÚKOSU 9x50° PRAVÝ	T4	7	580	5100	1,26
OP16	FRÉZOVÁNÍ HORNÍ ČÁSTI ÚKOSU 9x50° LEVÝ	T4	7	585	5100	1,25
OP17	FRÉZOVÁNÍ SPODNÍ ČÁSTI ÚKOSU 9x50° PRAVÝ	T5	2	1300	4100	1,58
OP18	FRÉZOVÁNÍ SPODNÍ ČÁSTI ÚKOSU 9x50° LEVÝ	T5	2	1305	4100	1,57
OP19	DOKONČENÍ ÚKOSU 9x50° PRAVÝ	T5	2	1300	4100	1,58
OP20	DOKONČENÍ ÚKOSU 9x50° LEVÝ	T5	2	1305	4100	1,57
OP21	FRÉZOVÁNÍ BOČNÍHO ÚKOSU 7x55° LEVÝ	T6	2	2950	3200	0,54
OP22	FRÉZOVÁNÍ BOČNÍHO ÚKOSU 7x55° PRAVÝ	T6	2	2945	3200	0,54

7.2 Určení strojního času

Díky softwarovým možnostem používaného CAM systému Gibbs CAM je možné strojní čas odečíst z výpisu simulace.

Tab. 16 Strojní časy jednotlivých operací

Č. OP.	NÁZEV OPERACE	NÁSTROJ	t_{As} [hod: min: sec]
OP3	HRUBOVÁNÍ VRCHNÍ PLOCHY	T1	0:08:43
OP4	DOKONČENÍ VRCHNÍ PLOCHY	T1	0:08:01
OP5	HRUBOVÁNÍ OBVODOVÉ KONTURY	T2	0:45:19
OP6	DOKONČENÍ OBVODOVÉ KONTURY	T3	0:13:58
OP7	FRÉZOVÁNÍ VYBRÁNÍ LEVÉ STRANY	T4	0:03:11
OP8	FRÉZOVÁNÍ LEVÉHO ÚKOSU 17,5°	T4	0:13:00
OP9	DOKONČENÍ DNA VYBRÁNÍ LEVÉ STRANY	T4	0:00:25
OP10	FRÉZOVÁNÍ VYBRÁNÍ PRAVÉ STRANY	T4	0:03:14
OP11	FRÉZOVÁNÍ PRAVÉHO ÚKOSU 17,5°	T4	0:12:59
OP12	DOKONČENÍ DNA VYBRÁNÍ PRAVÉ STRANY	T4	0:00:28
OP13	FRÉZOVÁNÍ BOČNÍHO ÚKOSU 7x25° LEVÝ	T4	0:01:31
OP14	FRÉZOVÁNÍ BOČNÍHO ÚKOSU 7x25° PRAVÝ	T4	0:01:35
OP15	FRÉZOVÁNÍ HORNÍ ČÁSTI ÚKOSU 9x50° PRAVÝ	T4	0:01:57
OP16	FRÉZOVÁNÍ HORNÍ ČÁSTI ÚKOSU 9x50° LEVÝ	T4	0:01:59
OP17	FRÉZOVÁNÍ SPODNÍ ČÁSTI ÚKOSU 9x50° PRAVÝ	T5	0:01:10
OP18	FRÉZOVÁNÍ SPODNÍ ČÁSTI ÚKOSU 9x50° LEVÝ	T5	0:01:15
OP19	DOKONČENÍ ÚKOSU 9x50° PRAVÝ	T5	0:01:08
OP20	DOKONČENÍ ÚKOSU 9x50° LEVÝ	T5	0:01:08
OP21	FRÉZOVÁNÍ BOČNÍHO ÚKOSU 7x55° LEVÝ	T6	0:03:03
OP22	FRÉZOVÁNÍ BOČNÍHO ÚKOSU 7x55° PRAVÝ	T6	0:03:03
CELKOVÝ STROJNÍ ČAS PRO SOUČÁST			2:07:07

7.3 Výpočet nákladů na operační úsek

Aby mohla být provedena optimalizace obráběcího procesu z hlediska minimálních výrobních nákladů, je nezbytné určit a matematicky formulovat nákladovou funkci. Tato nákladová funkce ve své formulaci vyjadřuje veškeré náklady, které se dají spojit s různými podmínkami. V této práci budu optimalizaci provádět pomocí nákladové funkce, která je popsána rovnicí 7.3. Nalezením minima této funkce získám pracovní podmínky, které generují minimální výrobní náklady.

$$N = N_s + N_n + N_{vn} \text{ [Kč]} \quad (7.3)$$

Kde: N jsou výrobní náklady pro daný operační úsek [Kč]
 N_s jsou náklady na strojní práci na operační úsek [Kč]
 N_n jsou náklady na nástroj vztažené na operační úsek [Kč]
 N_{vn} jsou náklady na výměnu a seřízení nástroje nebo vyměnitelné břitové destičky [Kč]

7.3.1 Náklady na strojní práci na operační úsek

Složka nákladů na strojní práci je součinem strojního času a nákladů na strojní práci na jednotku času. Matematicky ji lze vyjádřit rovnicí (7.4).

Tato složka nákladů je v dnešní době CNC obráběcích center ve většině případů v porovnání se složkami nákladů na nástroje a na výměnu nástroje nejvýznamnější z hlediska její velikosti. Je to způsobeno především náklady, které souvisí s pořízením a provozováním stroje. Při práci na konvenčním stroji tato složka nákladů nebude natolik významná. ^[1]

$$N_s = t_{As} \cdot N_{sm} \text{ [Kč]} \quad (7.4)$$

Kde: t_{As} je strojní čas [min]
 N_{sm} jsou náklady na strojní práci na operační úsek na jednotku času [Kč/min]

Náklady na strojní práci na operační úsek vztažený na jednotku času se dají vyjádřit rovnicí (7.5).

$$N_{sm} = \left[\frac{M_o}{60} \cdot K_c \cdot \left(1 + \frac{RNS}{100} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] \text{ [Kč/min]} \quad (7.5)$$

Kde: M_o je mzda operátora (obsluhy stroje) [Kč/hod]
 K_c je přírážka směnového času
 RNS jsou režijní náklady střediskové plánované za rok [%]
 N_{hs} jsou hodinové náklady na provoz stroje [Kč/hod]

Mzdu operátora M_o jsem určil z vnitropodnikových účetních podkladů.

$$M_o = 120 \text{ [Kč/hod]}$$

Přirážka směnového času K_c je konstanta, která udává časovou rezervu na úkony, které probíhají během celé směny. Po konzultaci s vedoucím diplomové práce a s vedoucím pracovníkem střediska obrábění jsem konstantu volil takto. ^[1]

$$K_c = 1,2$$

Plánované režijní náklady střediska RNS vyjádřím pomocí následující rovnice (7.6). Tyto režijní náklady jsou určeny přímo ke středisku obrábění, resp. k danému stroji, a jsou vztaženy pro časový úsek jednoho roku. ^[1]

$$RNS = \frac{\sum \text{nákladů na středisko za urč. čas}}{\sum \text{mezd výrobních dělníků za urč. čas}} \cdot 100\% \quad (7.6)$$

Po dosazení do rovnice číslo 7.6 vypočtu plánované režijní náklady střediska.

$$RNS = \frac{\sum \text{nákladů na středisko za urč. čas}}{\sum \text{mezd výrobních dělníků za urč. čas}} \cdot 100\% = \frac{720}{120} \cdot 100\% = 602,5\%$$

Hodinové náklady stroje N_{hs} se vyjádří pro časový úsek jedné hodiny ve tvaru rovnice (7.7). Tyto náklady jsou složeny z odpisů stroje, které jsou násobeny koeficientem údržby stroje. Další složkou těchto hodinových nákladů na práci stroje je cena elektrické energie. ^[1]

$$N_{hs} = O_s \cdot K_{us} + C_e \text{ [Kč/hod]} \quad (7.7)$$

Kde: O_s je odpis stroje [Kč/hod]
 K_{us} je koeficient údržby stroje
 C_e je cena elektrické energie [Kč/hod]

Potřebné hodnoty pro výpočet hodinového nákladu pro provoz stroje jsou uvedeny v tabulce.

Tab. 17 Konstanty pro výpočet nákladů na hodinu strojní práce

K_{us}	C_e [Kč/hod]
1,4	5

Odpis stroje O_s je významnou položkou, která velmi významně ovlivní celkový náklad na strojní práci a vypočte se následovně. V současné době při používání CNC obráběcích strojů je důležité řádně určit životnost stroje, která značně ovlivňuje velikost odpisu. U moderních strojů nelze uvažovat stejné životnosti jako u konvenčních strojů. Životnost moderních CNC strojů ovlivňuje fakt jejich technického stárnutí, což je důsledkem rychlého vývoje těchto strojů. Tento fakt je ovšem složité zahrnout do vyjádření životnosti stroje, nicméně by měl být při určování životnosti CNC stroje uvažován. ^[1]

$$O_s = \frac{C_s}{\check{Z}_s \times SM \times \check{C}FS \times Kvs} \text{ [Kč/hod]} \quad (7.8)$$

Kde: C_s je cena stroje [Kč]
 \check{Z}_s je životnost stroje [rok]
 SM je směnnost
 $\check{C}FS$ je časový fond stroje [hod]
 Kvs je koeficient využití stroje

Všechny potřebné hodnoty pro výpočet odpisu stroje byly zjištěny a určeny po konzultaci s vedoucím střediska obrábění a s vedoucím diplomové práce. Jejich hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 18 Hodnoty pro výpočet odpisu stroje

C_s [Kč]	\check{z}_s [rok]	SM	$\check{C}FS$ [hod]	Kvs
6.597.300,-	8	3	1512	0,75

Po dosazení do výpočtového vzorce pak vypočtu odpis stroje.

$$O_s = \frac{C_s}{\check{z}_s \times SM \times \check{C}FS \times Kvs} = \frac{6597300}{8 \cdot 3 \cdot 1512 \cdot 0,75} = 242,41 \text{ [Kč/hod]}$$

Nyní mohu vypočítat hodinový náklad na provoz stroje.

$$N_{hs} = O_s \cdot K_{us} + C_e = 242,41 \cdot 1,4 + 5 = 344,37 \text{ [Kč/hod]}$$

Po dosazení všech potřebných hodnot vypočtu minutový náklad na strojní práci na operační úsek. Tento náklad vztažený na jednotku času je stejný pro všechny operace.

$$N_{sm} = \left[\frac{M_o}{60} \cdot K_c \cdot \left(1 + \frac{RNS}{100} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] = \left[\frac{120}{60} \cdot 1,2 \cdot \left(1 + \frac{602,5}{100} \right) + \frac{344,37}{60} \right] = 22,6 \text{ [Kč/min]}$$

7.3.2 Náklady na nástroj vztažené na operační úsek

Náklady na nástroje, které se vztahují k určitému operačnímu úseku se vypočítají pomocí rovnice 7.9.

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} \text{ [Kč]} \quad (7.9)$$

Kde: N_{nT} jsou náklady na nástroj vztažené na jednu trvanlivost břitu [Kč]

z_v je počet výměn nástroje na daný operační úsek

Počet výměn nástroje na daný operační úsek lze vyjádřit následovně:

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r \quad (7.10)$$

Kde: t_{As} je strojní čas pro danou operaci [*min*]

T je trvanlivost nástroje [*min*]

k_r je koeficient řezání

Koeficient řezání k_r je poměr dráhy, kdy je nástroj v řezu, tzn. dochází k opotřebení, k dráze celkové (řez+pracovní posuvy). Na následujícím obrázku je vidět způsob výpočtu tohoto koeficientu.^[1]

$$k_r = \frac{L_{\check{r}} + L_{m\check{r}}}{L_{\check{r}}} \quad (7.11)$$

Pro určení koeficientu řezání budu vycházet z dat, která jsou k získání z používaného CAM programu GibbsCAM. V simulaci toho systému je k dispozici statistika s časem nástroje v záběru a celkový čas operace. Díky tomu jsem schopný zjistit velikost drah, které nástroj urazí. Tato skutečnost je klíčová pro určení koeficientu řezání.

Tab. 19 Výpočet koeficientu řezání

Č.OP.	t_{As} [sec]	t_{mz} [sec]	L_f [mm]	$L_{mř}$ [mm]	Kr	Nástroj	k_r
OP1	530	56	4858	28000	0,15	T1	0,15
OP2	486	56	4859	28000	0,15		
OP3	2512	124	209344	62000	0,77	T2	0,77
OP4	812	8	3787	4000	0,49	T3	0,49
OP5	189	24	1893	12000	0,14	T4	0,18
OP6	461	260	40717	130000	0,24		
OP7	25	4	369	2000	0,16		
OP8	193	27	1926	13500	0,12		
OP9	576	259	50898	129500	0,28		
OP10	27	7	409	3500	0,10		
OP11	59	50	5038	25000	0,17		
OP12	61	54	5198	27000	0,16		
OP13	80	47	6759	23500	0,22		
OP14	81	49	6897	24500	0,22		
OP15	41	50	2781	25000	0,10	T5	0,12
OP16	45	55	3089	27500	0,10		
OP17	55	48	3749	24000	0,14		
OP18	55	48	3763	24000	0,14		
OP19	145	63	7738	31500	0,20	T6	0,20
OP20	145	63	7754	31500	0,20		

Po zjištění koeficientu řezání je možné určit počet výměn nástroje vztahené k jednotlivým operačním úsekům.

$$z_v = \frac{t_{As}}{T} \cdot k_r = \frac{8,83}{68} \cdot 0,15 = 0,019$$

Tab. 20 Výpočet počtu výměn nástroje

Č.OP.	Nástroj	T [min]	t _{As} [min]	k _r	z _v
OP3	T1	68,0	8,83	0,15	0,01920
OP4	T1	68,0	8,10	0,15	0,01761
OP5	T2	45,5	41,87	0,77	0,70994
OP6	T3	280,0	13,53	0,49	0,02350
OP7	T4	121,5	3,16	0,14	0,00354
OP8	T4	121,5	7,68	0,24	0,01508
OP9	T4	121,5	0,41	0,16	0,00053
OP10	T4	121,5	3,21	0,12	0,00330
OP11	T4	121,5	9,60	0,28	0,02230
OP12	T4	121,5	0,45	0,10	0,00039
OP13	T4	121,5	0,99	0,17	0,00136
OP14	T4	121,5	1,02	0,16	0,00135
OP15	T4	121,5	1,33	0,22	0,00244
OP16	T4	121,5	1,35	0,22	0,00245
OP17	T5	49,5	0,68	0,10	0,00137
OP18	T5	49,5	0,75	0,10	0,00154
OP19	T5	49,5	0,91	0,14	0,00250
OP20	T5	49,5	0,92	0,14	0,00251
OP21	T6	102,0	2,42	0,20	0,00468
OP22	T6	102,0	2,42	0,20	0,00469

Každý použitý nástroj pak má rozdílný náklad vztažený na jednu trvanlivost. Proto musí být proveden výpočet pro každý nástroj zvlášť. Náklad na nástroj vztažený na jednu trvanlivost pak vypočtu následujícím způsobem:

$$N_{nT} = \frac{C_d \cdot z_d}{z_b \cdot s_b} + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{z_u} [Kč] \quad (7.12)$$

- Kde:
- C_d je cena vyměnitelné břitové destičky [Kč]
 - C_{tn} je cena tělesa nástroje [Kč]
 - z_d je počet břitových destiček na těle nástroje
 - z_b je počet funkčních břitů na nástroji
 - s_b je součinitel využití břitové destičky
 - k_{ut} je koeficient údržby tělesa nástroje
 - z_u je předpokládaný počet upnutí destiček za dobu životnosti tělesa nástroje

Konstanty potřebné pro výpočet nákladů na nástroje na jednu trvanlivost jsou uvedeny v tabulce č.21. Tyto konstanty byly určeny po konzultaci s vedoucím diplomové práce.

Tab. 21 Konstanty pro výpočet nákladu na nástroje

z_u	s_b	k_{ut}
400	0,9	0,025

Tab. 22 Ceny nástrojů

Nástroj	C_{tn} [Kč]	C_d [Kč]	z_d	z_b
T1	10.700,-	202,-	10	8
T2	3.043,-	116,-	2	6
T4	8.500,-	203,-	8	6
T5	7.005,-	203,-	4	6
T6	2.000,-	104,-	2	2

Výpočet nákladů na nástroj na operační úsek N_{nT} pro nástroj T3, kterým je monolitní fréza, bude odlišný oproti ostatním nástrojům. Tato fréza se nepřeostřuje. Když zanedbáme hodnotu nástroje po otupení, kdy by hodnota nástroje jako šrotu byla minimální, náklad na nástroj pak může být uvažován jako pořizovací cena nástroje.

$$N_{ntT1} = \frac{C_d \cdot z_d}{z_b \cdot s_b} + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{z_u} = \frac{202 \cdot 10}{8 \cdot 0,9} + (1 + 0,025) \cdot \frac{10700}{400} = 308 \text{ [Kč]}$$

Tab. 23 Náklady na nástroj na jednu trvanlivost

N_{ntT1}	308,0,- Kč
N_{ntT2}	50,8,- Kč
N_{ntT3}	5538,0,- Kč
N_{ntT4}	322,5,- Kč
N_{ntT5}	168,3,- Kč
N_{ntT6}	120,7,- Kč

7.3.3 Náklady na výměnu nástroje

Tato složka nákladů je významná především u konvenčních obráběcích strojů, kde výměna nástroje může trvat i několik desítek minut. U moderních CNC obráběcích center, kdy výměna nástroje probíhá ze zásobníku nástrojů a trvá v řádech sekund, už tato nákladová položka není tak významná. Pro korektnost výpočtu nákladů a určení optimální řezné rychlosti je zapotřebí ji uvažovat. ^[1]

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot z_v \cdot N_{vnm} \text{ [Kč]} \quad (7.13)$$

Kde: t_{vn} je čas na výměnu nástroje [*min*]

N_{vnm} jsou náklady na výměnu nástroje na jednotku času [*Kč/min*]

Čas výměny nástroje zjistím z parametrů stroje.

$$t_{vn} = 4,5 \text{ sec}$$

$$N_{vnm} = \left[\frac{MO}{60} \cdot K_c \cdot \left(1 + \frac{RNS}{100} \right) + \frac{O_s}{60} \right] = \left[\frac{120}{60} \cdot 1,2 \cdot \left(1 + \frac{602,5}{100} \right) + \frac{242,41}{60} \right] = 20,9 \text{ [Kč/min]}$$

7.3.4 Výpočet výrobních nákladů pro stávající řezné podmínky

Jak již zde bylo uvedeno v předchozí kapitole, výrobní náklady se vypočtou následujícím způsobem:

$$N = N_s + N_n + N_{vn} = t_{As} \cdot N_{sm} + z_v \cdot N_{nT} + t_{vn} \cdot z_v \cdot N_{vnm} \quad (7.14)$$

[Kč]

Tímto způsobem budou vypočteny náklady na jednotlivé operační úseky. Sumou těchto nákladů na jednotlivé operační úseky pak bude výsledný výrobní náklad na jeden kus dané součásti.

$$N = \sum N_i \text{ [Kč]} \quad (7.15)$$

Tab. 24 Výpočet nákladů

Č.OP.	z_v	t_{As} [min]	t_{vn} [min]	N_{nT} [Kč]	N_{sm} [Kč]	N_{vnm} [Kč]
OP3	0,01920	8,83	0,075	308	22,6	20,9
OP4	0,01761	8,10	0,075	308	22,6	20,9
OP5	0,70994	41,87	0,075	51	22,6	20,9
OP6	0,02350	13,53	0,075	5538	22,6	20,9
OP7	0,00354	3,16	0,075	323	22,6	20,9
OP8	0,01508	7,68	0,075	323	22,6	20,9
OP9	0,00053	0,41	0,075	323	22,6	20,9
OP10	0,00330	3,21	0,075	323	22,6	20,9
OP11	0,02230	9,60	0,075	323	22,6	20,9
OP12	0,00039	0,45	0,075	323	22,6	20,9
OP13	0,00136	0,99	0,075	323	22,6	20,9
OP14	0,00135	1,02	0,075	323	22,6	20,9
OP15	0,00244	1,33	0,075	323	22,6	20,9
OP16	0,00245	1,35	0,075	323	22,6	20,9
OP17	0,00137	0,68	0,075	168	22,6	20,9
OP18	0,00154	0,75	0,075	168	22,6	20,9
OP19	0,00250	0,91	0,075	168	22,6	20,9
OP20	0,00251	0,92	0,075	168	22,6	20,9
OP21	0,00468	2,42	0,075	121	22,6	20,9
OP22	0,00469	2,42	0,075	121	22,6	20,9

Celkové výrobní náklady na obrobek se vypočítají jako součet všech jednotlivých nákladů na jednotlivé operace.

Tab. 25 Výpočet celkových výrobních nákladů

Č.OP.	N_s [Kč]	N_n [Kč]	N_{vm} [Kč]	N [Kč]
OP3	199,6	5,9	0,44	206,0
OP4	183,0	5,4	0,41	188,8
OP5	946,2	36,1	2,70	985,0
OP6	305,7	130,1	9,76	445,6
OP7	71,3	1,1	0,09	72,5
OP8	173,6	4,9	0,36	178,9
OP9	9,3	0,2	0,01	9,5
OP10	72,5	1,1	0,08	73,7
OP11	217,0	7,2	0,54	224,8
OP12	10,3	0,1	0,01	10,4
OP13	22,3	0,4	0,03	22,8
OP14	23,0	0,4	0,03	23,5
OP15	30,0	0,8	0,06	30,8
OP16	30,6	0,8	0,06	31,4
OP17	15,3	0,2	0,02	15,6
OP18	17,0	0,3	0,02	17,3
OP19	20,7	0,4	0,03	21,1
OP20	20,7	0,4	0,03	21,2
OP21	54,6	0,6	0,04	55,3
OP22	54,8	0,6	0,04	55,4
Celkové výrobní náklady na jeden obrobek				2689,4

Stávající výrobní náklady na výrobu jednoho obrobku dle výše uvedeného výpočtu jsou 2 689,- Kč/ks.

7.4 Optimální trvanlivost břitu

Optimální trvanlivost nástroje z hlediska minimálních výrobních nákladů je vyjádřena trvanlivost z minima nákladové funkce. Toto nákladové minimum se získá derivací nákladové funkce ve tvaru 7.3 podle trvanlivosti, která je rovna nule viz. rovnice 7.16. Po dosazení a úpravách se získá rovnice pro optimální trvanlivost nástroje ve tvaru 7.17. ^[1]

$$\frac{dN}{dT} = 0 \quad (7.16)$$

$$T_{optn} = \frac{N_{nt} + t_{vn} \cdot N_{vnm}}{N_{sm}} \cdot K_r \cdot (m - 1) [min] \quad (7.17)$$

Po dosažení všech hodnot do rovnice 7.16 se vypočtou optimální trvanlivosti pro jednotlivé nástroje, které jsou používány pro výrobu vybrané součásti.

$$T_{optn} = \frac{N_{nt} + t_{vn} \cdot N_{vnm}}{N_{sm}} \cdot K_r \cdot (m - 1) = \frac{308 + 0,075 \cdot 20,9}{22,6} \cdot 0,15 \cdot (3 - 1) = 5,26 [min]$$

Tab. 26 Optimální trvanlivosti nástrojů

T_{optnT1}	5,26 [min]
T_{optnT2}	9,89 [min]
T_{optnT3}	242,41 [min]
T_{optnT4}	6,69 [min]
T_{optnT5}	2,74 [min]
T_{optnT6}	3,75 [min]

7.5 Optimální řezná rychlost

Výpočet optimální řezné rychlosti vychází z komplexního Taylorova vztahu. V dosavadním výpočtu jsem určil optimální trvanlivost nástroje z hlediska minimálních výrobních nákladů. Při dosažení takto vypočtené trvanlivosti do zmíněného Taylorova komplexního vztahu jsem schopen určit optimální řeznou rychlost, která povede k dosažení optimální trvanlivosti. ^[1]

$$v_c = \frac{C_v}{a_p^{xv} \cdot f^{yv} \cdot T^{\frac{1}{m}}} \quad (7.18)$$

Tento fakt je možný především díky významu řezné rychlosti na životnost. Ze všech veličin, které jsme schopni v rámci celého systému měnit, má právě řezná rychlost nejvýznamnější vliv na životnost nástroje.

Aby tento výpočet bylo možné provést, je nutné určit konstantu C_v . Tato konstanta se získá dosazením stávajících řezných podmínek a zjištěné skutečné aktuální životnosti nástroje. Díky tomu, že konstanta C_v je závislá i na hloubce řezu a_p a velikosti posuvu f_m , je nutné tuto konstantu určit zvlášť pro každou operaci.

Životnost nástroje byla vypořádkována z reálného procesu obrábění. Z takto získaných hodnot životností byly určeny dvě hodnoty životnosti, a to sice maximální dosahovaná životnost a minimální dosahovaná životnost. Z těchto dvou hodnot byla pro výpočet použita minimální dosahovaná životnost, což vnáší do výpočtu značnou rezervu ve vztahu k budoucí reálné životnosti.

$$C_v = v_c \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot T^{\frac{1}{m}} = 161 \cdot 1,7^{0,15} \cdot 550^{0,35} \cdot 68^{\frac{1}{3}} = 6483,3$$

Tab. 27 Výpočet koeficientu C_v

Č.OP.	NÁSTROJ	T [min]	a_p [mm]	f_m [mm/min]	v_c [m/min]	C_v
OP3	T1	68	1,70	550	161	6483,3
OP4	T1	68	0,30	600	242	7728,9
OP5	T2	45,5	1,00	5000	181	12709,5
OP6	T3	280	52,80	280	42	3588,2
OP7	T4	121,5	3,34	600	182	10147,3
OP8	T4	121,5	0,20	5300	184	14371,1
OP9	T4	121,5	1,00	900	204	10937,2
OP10	T4	121,5	3,34	600	182	10147,3
OP11	T4	121,5	0,20	5300	184	14371,1
OP12	T4	121,5	1,00	900	204	10937,2
OP13	T4	121,5	0,59	5100	182	16538,4
OP14	T4	121,5	0,59	5100	184	16680,9
OP15	T4	121,5	0,58	5100	182	16483,0
OP16	T4	121,5	0,58	5100	184	16625,1
OP17	T5	49,5	0,58	4100	163	10160,1
OP18	T5	49,5	0,58	4100	164	10199,2
OP19	T5	49,5	0,50	4100	163	9939,0
OP20	T5	49,5	0,50	4100	164	9977,2
OP21	T6	102	0,29	3200	148	9710,4
OP22	T6	102	0,29	3200	148	9693,9

$$v_{copt} = \frac{C_v}{a_p^{xv} \cdot f^{yv} \cdot T_{optn}^{\frac{1}{m}}} = \frac{6483,3}{1,7^{0,15} \cdot 550^{0,35} \cdot 5,26^{\frac{1}{3}}} = 378,25 \text{ [m/min]}$$

Tab. 28 Výpočet optimální řezné rychlosti

Č.OP.	v_{copt} [m/min]
OP3	378,25
OP4	567,37
OP5	300,47
OP6	44,17
OP7	478,98
OP8	483,11
OP9	536,79
OP10	478,98
OP11	483,11
OP12	536,79
OP13	478,98
OP14	483,11
OP15	478,98
OP16	483,11
OP17	428,74
OP18	430,39
OP19	428,74
OP20	430,39
OP21	445,92
OP22	445,17

Tím, že se provedl výpočet optimální řezné rychlosti, je nutné přepočítat otáčky, které odpovídají optimalizované řezné rychlosti.

$$n_{opt} = \frac{10^3 \cdot v_{copt}}{\pi \cdot D} \text{ [ot/min]} \quad (7.19)$$

$$n_{opt} = \frac{10^3 \cdot v_{copt}}{\pi \cdot D} = \frac{10^3 \cdot 378,25}{\pi \cdot 171} = 704 \text{ [ot/min]}$$

Tab. 29 Přepočet optimálních otáček

Č.OP.	Nástroj	Průměr nástroje [mm]	v_{copt} [m/min]	n_{opt} [ot/min]
OP3	T1	171	378,25	704
OP4	T1	171	567,37	1056
OP5	T2	25	300,47	3826
OP6	T3	20	44,17	703
OP7	T4	100	478,98	1525
OP8	T4	100	483,11	1538
OP9	T4	100	536,79	1709
OP10	T4	100	478,98	1525
OP11	T4	100	483,11	1538
OP12	T4	100	536,79	1709
OP13	T4	100	478,98	1525
OP14	T4	100	483,11	1538
OP15	T4	100	478,98	1525
OP16	T4	100	483,11	1538
OP17	T5	40	428,74	3412
OP18	T5	40	430,39	3425
OP19	T5	40	428,74	3412
OP20	T5	40	430,39	3425
OP21	T6	16	445,92	8871
OP22	T6	16	148,03	8856

Změna stávajících otáček na optimalizované otáčky n_{opt} a požadavek na zachování posuvu na zub f_z vede k nutnosti přepočítat stávající minutový posuv f_m na minutový posuv optimalizovaný f_{mopt} .

$$f_{mopt} = f_z \cdot z \cdot n_{opt} \text{ [mm/min]} \quad (7.20)$$

$$f_{mopt} = f_z \cdot z \cdot n_{opt} = 0,18 \cdot 10 \cdot 704 = 1291 \text{ [mm/min]}$$

Tab. 30 Přepočet optimálního minutového posuvu

Č. OP.	Nástroj	Počet zubů	n_{opt} [ot/min]	f_z [mm/zub]	f_{mopt} [mm/min]
OP3	T1	10	704	0,18	1291
OP4	T1	10	1056	0,13	1408
OP5	T2	2	3826	1,09	8317
OP6	T3	6	703	0,07	294
OP7	T4	7	1525	0,15	1577
OP8	T4	7	1538	1,29	13932
OP9	T4	7	1709	0,20	2366
OP10	T4	7	1525	0,15	1577
OP11	T4	7	1538	1,29	13932
OP12	T4	7	1709	0,20	2366
OP13	T4	7	1525	1,26	13406
OP14	T4	7	1538	1,25	13406
OP15	T4	7	1525	1,26	13406
OP16	T4	7	1538	1,25	13406
OP17	T5	2	3412	1,58	10760
OP18	T5	2	3425	1,57	10760
OP19	T5	2	3412	1,58	10760
OP20	T5	2	3425	1,57	10760
OP21	T6	2	8871	0,54	8678
OP22	T6	2	8856	0,54	8693

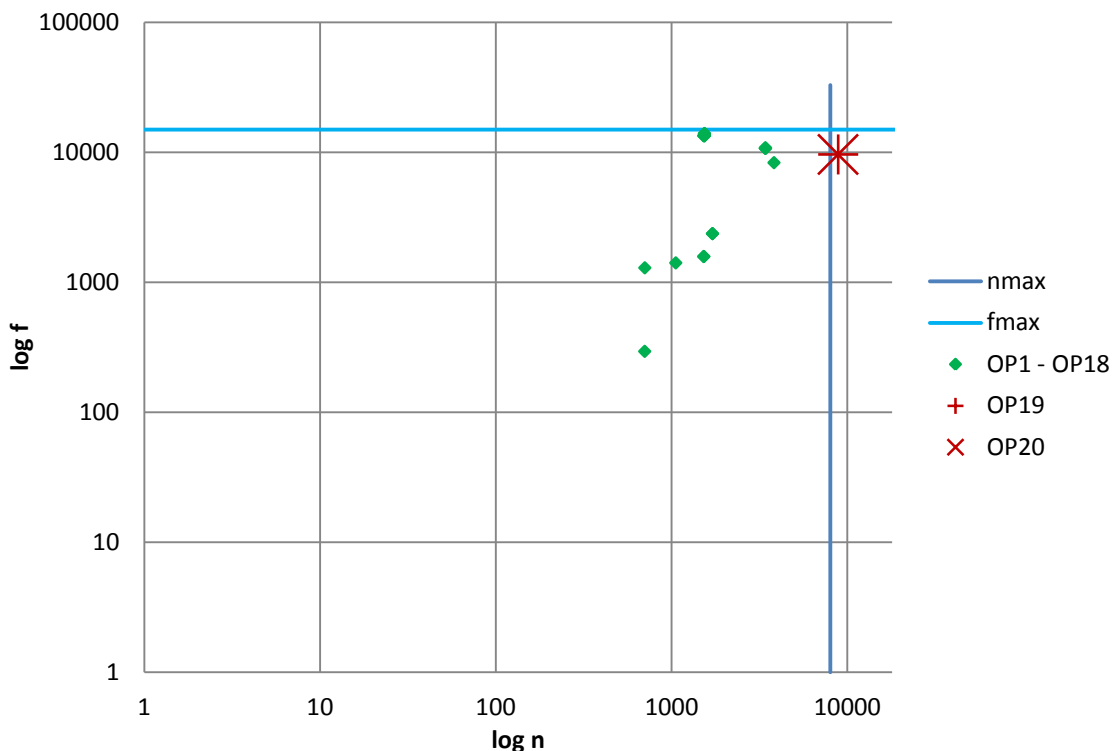
7.6 Kontrola OPŘ

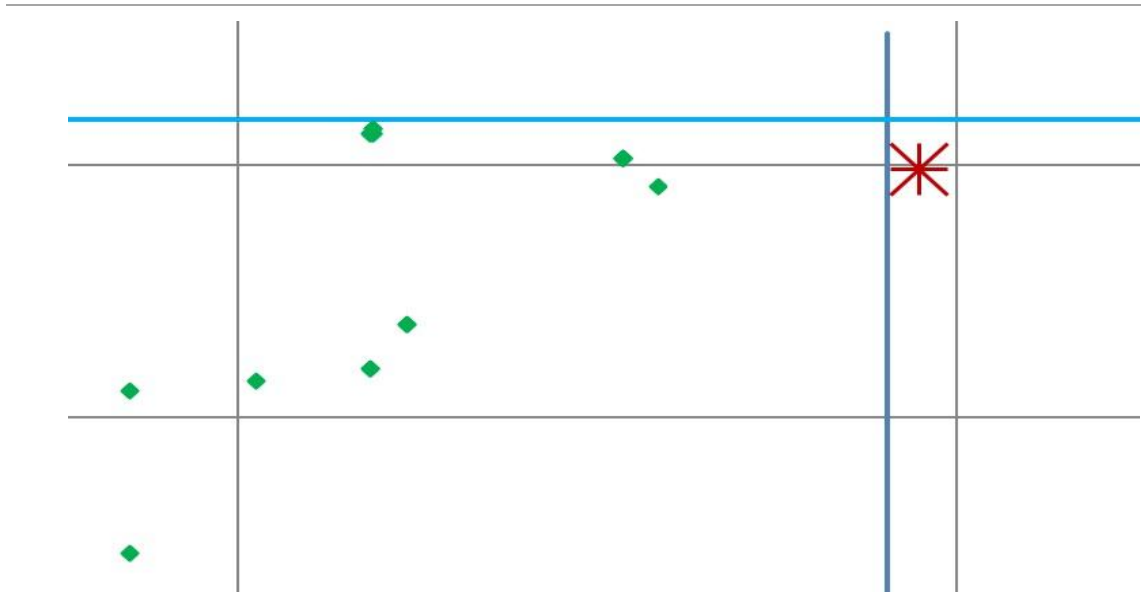
Předchozími výpočty byly zjištěny ideální optimalizované pracovní podmínky. Tyto optimalizované pracovní podmínky je nutné porovnat s oblastí přípustných řešení. Tento krok je nezbytný především kvůli existenci omezení, která charakterizují obráběcí proces.

Pro tuto danou součást, kde není kladen požadavek např. na drsnost obrobené plochy, přesnost apod., jsou rozhodující omezení z hlediska stroje.

Kontrolu je možné provést např. grafickým vyhodnocením pomocí grafu. Do grafu v logaritmických souřadnicích vynesu hodnotu maximálního minutového posuvu f_{max} a maximální otáčky n_{max} . Poté do stejného grafu vynesu hodnoty posuvů a otáček pro jednotlivé operační úseky. Výsledkem je, že jsme schopni určit, zda některý operační úsek svými pracovními podmínkami leží mimo oblast přípustných řešení.

Graf 3 Kontrola optimálních pracovních podmínek v OPŘ





Obr. 25 Nástroj T2

Po provedení výše popsané kontroly je patrné, že dva operační úseky jsou mimo příslušnou oblast přípustných řešení. V grafu jsou tyto dva úseky označeny červenou barvou. V této situaci, kdy jsme za hranicí pracovních podmínek stroje, je nutné optimální vypočtené pracovní podmínky upravit tak, abychom je byli schopni na daném stroji realizovat.

V tomto konkrétním případě je patrné, že nebyla splněna podmínka omezení z hlediska maximálních otáček stroje.

Tab. 31 Kontrola otáček

Č.OP.	n [ot/min]	\leq	n_{smax} [ot/min]	
OP21	8871	\leq	8000	NEVYHOVUJE
OP22	8856	\leq	8000	NEVYHOVUJE

Volba otáček, tak aby splnily omezující podmínku, bude provedena i s ohledem na charakter operace. U těchto dvou operačních úseků nedochází k odebrání velkého objemu materiálu, tudíž nevzniká výrazné zatížení stroje a je možné zde volit otáčky na maximální přípustné hranici.

Tab. 32 Volba vyhovujících otáček

Č.OP.	n [ot/min]		n [ot/min]
OP21	8871	=>	8000
OP22	8856	=>	8000

Dalším omezením, které je u této dané součásti vhodné zkontrolovat, je omezení dané výkonem obráběcího stroje. Dá se předpokládat, že vzhledem k charakteru jednotlivých operací bude toto omezení významné především u první hrubovací operace.

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f_z^{y_{Fc}} \cdot n \leq \frac{10^3 \cdot 60 \cdot P_e \cdot \eta}{k_{Fc} \cdot \pi \cdot B^{u_{Fc}} \cdot Z \cdot D^{w_{Fc}+1}}$$

Tab. 33 Kontrola z hlediska výkonu stroje

Č.OP.	$a_p^{x_{Fc}} \cdot f_z^{y_{Fc}} \cdot n$	\leq	$\frac{10^3 \cdot 60 \cdot P_e \cdot \eta}{k_{Fc} \cdot \pi \cdot B^{u_{Fc}} \cdot Z \cdot D^{w_{Fc}+1}}$	
OP3	177	\leq	2519	VYHOVUJE
OP4	48	\leq	2519	VYHOVUJE
OP5	2816	\leq	2225795	VYHOVUJE
OP6	3022	\leq	1530951	VYHOVUJE
OP7	541	\leq	8729	VYHOVUJE
OP8	230	\leq	6547	VYHOVUJE
OP9	265	\leq	5820	VYHOVUJE
OP10	541	\leq	8729	VYHOVUJE
OP11	230	\leq	6547	VYHOVUJE
OP12	265	\leq	5820	VYHOVUJE
OP13	567	\leq	261878	VYHOVUJE
OP14	569	\leq	261878	VYHOVUJE
OP15	557	\leq	104751	VYHOVUJE
OP16	558	\leq	104751	VYHOVUJE
OP17	1478	\leq	416810	VYHOVUJE
OP18	1479	\leq	416810	VYHOVUJE
OP19	1303	\leq	694684	VYHOVUJE
OP20	1304	\leq	694684	VYHOVUJE
OP21	871	\leq	2369299	VYHOVUJE
OP22	871	\leq	2369299	VYHOVUJE

Díky provedení této kontroly je patrný významný rozdíl mezi teoretickým přípustným zatížením stroje oproti vyvolanému zatížení stroje. Z toho je patrné, že řezné podmínky jsou s velkou rezervou v bezpečné oblasti.

V opačném případě, že by řezné podmínky vyvolaly zatížení blízké teoreticky přípustnému, by bylo vhodné provést kontrolu pomocí výkonové charakteristiky stroje.

7.6.1 Přepočít pracovních podmínek dle OPŘ

Po provedení kontroly oblasti přípustných řešení bylo zjištěno, že operace č. OP19, OP20 překračují omezení dané maximálními otáčkami stroje. Z tohoto důvodu je nutné provést návrh nejbližších přípustných pracovních podmínek tak, aby byly splněny omezující podmínky. Po určení vyhovujících pracovních podmínek je nutné provést přepočít vyhovující řezné rychlosti a s tím související trvanlivosti nástroje.

$$v_c = \frac{n \cdot \pi \cdot D}{10^3} = \frac{8000 \cdot \pi \cdot 16}{10^3} = 402,12 \text{ [m/min]}$$

$$T = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{v_c \cdot a_p^{xv} \cdot f^{yv}}{C_v}} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{402,12 \cdot 0,292^{0,15} \cdot 3200^{0,35}}{9710,36}} = 5,1 \text{ [min]}$$

Tab. 34 Přepočít řezné rychlosti a trvanlivosti pro zvolené otáčky

Č.OP.	v_c [m/min]	T [min]
OP21	402,12	5,1
OP22	402,12	5,1

7.7 Optimální pracovní podmínky

Výše uvedenými výpočty byly získány optimální pracovní podmínky z hlediska minimálních výrobních nákladů. Tyto optimální podmínky jsou uvedeny pro všechny operace v tabulce č.35.

Tab. 35 Optimální pracovní podmínky z hlediska minimálních nákladů

Č.OP.	a_p [mm]	f_{mopt} [mm/min]	n_{opt} [ot/min]	v_{copt} [m/min]
OP3	1,70	1291	704	378
OP4	0,30	1408	1056	567
OP5	1,00	8317	3826	300
OP6	52,80	294	703	44
OP7	3,34	1577	1525	479
OP8	0,20	13932	1538	483
OP9	1,00	2366	1709	537
OP10	3,34	1577	1525	479
OP11	0,20	13932	1538	483
OP12	1,00	2366	1709	537
OP13	0,59	13406	1525	479
OP14	0,59	13406	1538	483
OP15	0,58	13406	1525	479
OP16	0,58	13406	1538	483
OP17	0,58	10760	3412	429
OP18	0,58	10760	3425	430
OP19	0,50	10760	3412	429
OP20	0,50	10760	3425	430
OP21	0,29	8678	8000	446
OP22	0,29	8693	8000	445

7.8 Výpočet výrobních nákladů pro optimalizované řezné podmínky

Při výpočtu výrobních nákladů z optimalizovaných řezných podmínek je důležité si uvědomit, že položky, jakými jsou např. minutové náklady na stroj, jsou neměnné. Mezi tyto položky patří tyto náklady - Náklady na nástroj na životnost N_{nT} , Náklady na strojní práci na operační úsek minutové N_{sm} , Náklady na výměnu nástroje N_{vnm} .

Tab. 36 Konstantní položky výrobních nákladů

Č.OP.	N_{nT} [Kč]	N_{sm} [Kč]	N_{vnm} [Kč]
OP3	308	22,6	20,9
OP4	308	22,6	20,9
OP5	51	22,6	20,9
OP6	5538	22,6	20,9
OP7	323	22,6	20,9
OP8	323	22,6	20,9
OP9	323	22,6	20,9
OP10	323	22,6	20,9
OP11	323	22,6	20,9
OP12	323	22,6	20,9
OP13	323	22,6	20,9
OP14	323	22,6	20,9
OP15	323	22,6	20,9
OP16	323	22,6	20,9
OP17	168	22,6	20,9
OP18	168	22,6	20,9
OP19	168	22,6	20,9
OP20	168	22,6	20,9
OP21	121	22,6	20,9
OP22	121	22,6	20,9

Úspora výrobních nákladů pak spočívá především v optimalizované životnosti nástroje. Ta úzce souvisí s optimalizovanou řeznou rychlostí, která při zachování posuvu na zub vyvolá změnu minutového posuvu. Tím můžeme dosáhnout např. kratšího času obrábění, což vede k menším nákladům na obrobení jedné součásti. Tato situace nastane především v případě, kdy cena nástrojů není významná.

Jiná situace je např. při obrábění speciálními nástroji (tvarové nástroje, protahovací a protlačovací nástroje), které jsou náročné z hlediska pořizovací ceny. V tomto případě naopak úspora spočívá v prodloužení životnosti nástroje.

Se změnou minutového posuvu se nutně změní i strojní čas. Ten se u všech operací zkrátí, což v konečném důsledku bude mít příznivý vliv na výsledné výrobní náklady.

Tab. 37 Výpočet optimalizovaného strojního času

Č.OP.	NÁSTROJ	t_{As} [min]
OP3	T1	3,76
OP4	T1	3,45
OP5	T2	25,17
OP6	T3	12,89
OP7	T4	1,20
OP8	T4	2,92
OP9	T4	0,16
OP10	T4	1,22
OP11	T4	3,65
OP12	T4	0,17
OP13	T4	0,38
OP14	T4	0,39
OP15	T4	0,50
OP16	T4	0,51
OP17	T5	0,26
OP18	T5	0,29
OP19	T5	0,35
OP20	T5	0,35
OP21	T6	0,89
OP22	T6	0,89
Celkem		59,41

Tím, že se upravila trvanlivost nástroje, změnil se zároveň počet výměn jednotlivých nástrojů u jednotlivých operačních úseků. Počet výměn nástroje vypočtu stejným způsobem jako u stávajících pracovních podmínek. Koeficient řezání k_r je v tomto případě neměnný. Měnil by se v případě, že by se optimalizace vztáhla i na tvorbu programu, např. optimalizovat vedlejší pohyby nástroje.

$$z_v = \frac{t_{As}}{T_{opt}} \cdot k_r = \frac{3,76}{5,26} \cdot 0,15 = 0,106$$

Tab. 38 Výpočet počtu výměn nástroje pro optimalizované podmínky

Č.OP.	NÁSTROJ	k_r	z_v
OP3	T1	0,15	0,106
OP4	T1	0,15	0,097
OP5	T2	0,77	1,964
OP6	T3	0,49	0,026
OP7	T4	0,14	0,024
OP8	T4	0,24	0,104
OP9	T4	0,16	0,004
OP10	T4	0,12	0,023
OP11	T4	0,28	0,154
OP12	T4	0,10	0,003
OP13	T4	0,17	0,009
OP14	T4	0,16	0,009
OP15	T4	0,22	0,017
OP16	T4	0,22	0,017
OP17	T5	0,10	0,009
OP18	T5	0,10	0,011
OP19	T5	0,14	0,017
OP20	T5	0,14	0,017
OP21	T6	0,20	0,034
OP22	T6	0,20	0,035

V následující tabulce č.39 jsou uvedeny veškeré, již dříve spočítané, hodnoty pro výpočet výrobních nákladů.

Tab. 39 Výpočet optimalizovaných výrobních nákladů

Č.OP.	z_p	$t_{As} [min]$	$t_{vn} [min]$	$N_{nT} [Kč]$	$N_{sm} [Kč]$	$N_{vnm} [Kč]$
OP3	0,106	3,76	0,075	308	22,6	20,9
OP4	0,097	3,45	0,075	308	22,6	20,9
OP5	1,964	25,17	0,075	51	22,6	20,9
OP6	0,026	12,89	0,075	5538	22,6	20,9
OP7	0,024	1,20	0,075	323	22,6	20,9
OP8	0,104	2,92	0,075	323	22,6	20,9
OP9	0,004	0,16	0,075	323	22,6	20,9
OP10	0,023	1,22	0,075	323	22,6	20,9
OP11	0,154	3,65	0,075	323	22,6	20,9
OP12	0,003	0,17	0,075	323	22,6	20,9
OP13	0,009	0,38	0,075	323	22,6	20,9
OP14	0,009	0,39	0,075	323	22,6	20,9
OP15	0,017	0,50	0,075	323	22,6	20,9
OP16	0,017	0,51	0,075	323	22,6	20,9
OP17	0,009	0,26	0,075	168	22,6	20,9
OP18	0,011	0,29	0,075	168	22,6	20,9
OP19	0,017	0,35	0,075	168	22,6	20,9
OP20	0,017	0,35	0,075	168	22,6	20,9
OP21	0,034	0,89	0,075	121	22,6	20,9
OP22	0,035	0,89	0,075	121	22,6	20,9

Dosazením a rozepsáním rovnice 7.3. se získá následující rovnice č.7.21 pro výpočet výrobních nákladů na operační úsek.

$$N = t_{As} \cdot N_{sm} + z_v \cdot N_{nT} + t_{vm} \cdot z_v \cdot N_{vnm} \text{ [Kč]} \quad (7.21)$$

Součtem jednotlivých výrobních nákladů na jednotlivé operační úseky získáme celkový výrobní náklad pro celou součást. Tento součet se provede pomocí následující rovnice č.7.22.

$$N = \sum N_i \text{ [Kč]} \quad (7.22)$$

Tab. 40 Optimalizované výrobní náklady

Č.OP.	N_s [Kč]	N_n [Kč]	N_{vm} [Kč]	N [Kč]
OP3	85,0	32,6	0,166	117,8
OP4	78,0	29,9	0,152	108,0
OP5	568,9	99,7	3,079	671,6
OP6	291,4	143,2	0,041	434,6
OP7	27,1	7,9	0,038	35,1
OP8	66,0	33,6	0,163	99,8
OP9	3,5	1,2	0,006	4,7
OP10	27,6	7,4	0,036	35,0
OP11	82,6	49,7	0,242	132,5
OP12	3,9	0,9	0,004	4,8
OP13	8,5	3,0	0,015	11,5
OP14	8,8	3,0	0,015	11,8
OP15	11,4	5,4	0,026	16,9
OP16	11,6	5,4	0,026	17,1
OP17	5,8	1,6	0,015	7,4
OP18	6,5	1,8	0,017	8,3
OP19	7,9	2,9	0,027	10,8
OP20	7,9	2,9	0,027	10,8
OP21	20,2	4,1	0,054	24,4
OP22	20,2	4,2	0,054	24,4
Celkové výrobní náklady na jeden obrobek				1787,33

Celkové výrobní na obrobek jedné součásti při použití vypočtených optimálních pracovních podmínek jsou 1 787,- Kč.

8 Porovnání stávajících a optimalizovaných pracovních podmínek

Provedením optimalizace stávajících pracovních podmínek byly určeny optimální řezné podmínky. Tyto řezné podmínky jsou optimální z hlediska minimálních výrobních nákladů.

Z následující tabulky č. 41, kde jsou porovnány stávající a navrhované řezné podmínky, je patrné, že se především hodnoty řezné rychlosti v_c zvýšily. Se zvýšenou řeznou rychlostí pak souvisí zvýšený minutový posuv f_m . Je zde také patrné, jak se optimální hodnoty posuvů a otáček přibližují maximálně možným hodnotám z hlediska stroje, z čehož jasně vyplývá, že dnes není naplno využíváno ožnutí tohoto stroje.

V operaci číslo OP21 a OP22 se optimální otáčky nalézají za maximálně možnými otáčkami stroje. Tento fakt by mohl vstoupit do úvah při dalším rozšiřování strojního zázemí firmy.

Tab. 41 Porovnání stávajících a optimalizovaných pracovních podmínek

Č.Op.	a_p [mm]	Stávající			Optimální		
		f [mm/min]	n [ot/min]	v_c [m/min]	f_{opt} [mm/min]	n_{opt} [ot/min]	v_{copt} [m/min]
OP3	1,70	550	300	161	1291	704	378
OP4	0,30	600	450	242	1408	1056	567
OP5	1,00	5000	2300	181	8317	3826	300
OP6	52,80	280	670	42	294	703	44
OP7	3,34	600	580	182	1577	1525	479
OP8	0,20	5300	585	184	13932	1538	483
OP9	1,00	900	650	204	2366	1709	537
OP10	3,34	600	580	182	1577	1525	479
OP11	0,20	5300	585	184	13932	1538	483
OP12	1,00	900	650	204	2366	1709	537
OP13	0,59	5100	580	182	13406	1525	479
OP14	0,59	5100	585	184	13406	1538	483
OP15	0,58	5100	580	182	13406	1525	479
OP16	0,58	5100	585	184	13406	1538	483
OP17	0,58	4100	1300	163	10760	3412	429
OP18	0,58	4100	1305	164	10760	3425	430
OP19	0,50	4100	1300	163	10760	3412	429
OP20	0,50	4100	1305	164	10760	3425	430
OP21	0,29	3200	2950	148	8678	8000	446
OP22	0,29	3200	2945	148	8693	8000	445

Především díky zvýšenému pracovnímu minutovému posuvu f_m má provedená optimalizace velmi příznivý vliv na strojní čas, který se snížil o více než polovinu. Konkrétní časový rozdíl mezi stávajícími pracovními podmínkami a optimalizovanými je uveden v tabulce č.42. Při úvaze, že podobné rezervy by mohly být i u ostatních obrobků, které firma produkuje, by tato časová úspora mohla mít velmi pozitivní vliv na vytížení výrobních strojů a především na dodací termíny.

Tab. 42 Porovnání stávajících a optimalizovaných strojních časů

Č. OP.	NÁZEV OPERACE	NÁSTROJ	t_{As} [hod:min:sec]	t_{Asopt} [hod:min:sec]
OP3	HRUBOVANI PLOCHY	T1	0:08:43	0:03:56
OP4	DOKONCENI PLOCHY	T1	0:08:01	0:03:27
OP5	OBVODOVA KONTURA	T2	0:45:19	0:25:10
OP6	DOKONCENI OBVODOVE KONTURY	T3	0:13:58	0:12:54
OP7	FREZOVANI VYBRANI LEVA	T4	0:03:11	0:01:12
OP8	FREZOVANI UKOSU 17,5° LEVA	T4	0:13:00	0:02:55
OP9	DOKONCENI DNA VYBRANI LEVA	T4	0:00:25	0:00:09
OP10	FREZOVANI VYBRANI PRAVA	T4	0:03:14	0:01:13
OP11	FREZOVANI UKOSU 17,5° PRAVA	T4	0:12:59	0:03:39
OP12	DOKONCENI DNA VYBRANI PRAVA	T4	0:00:28	0:00:10
OP13	BOCNI UKOS 7x25° LEVY	T4	0:01:31	0:00:23
OP14	BOCNI UKOS 7x25° PRAVY	T4	0:01:35	0:00:23
OP15	HORNI ČÁST UKOSU 9x50° PRAVY	T4	0:01:57	0:00:31
OP16	HORNI ČÁST UKOSU 9x50° LEVY	T4	0:01:59	0:00:31
OP17	SPODNI ČÁST UKOSU 9x50° PRAVY	T5	0:01:10	0:00:16
OP18	SPODNI ČÁST UKOSU 9x50° LEVY	T5	0:01:15	0:00:17
OP19	DOKONCENI UKOSU 9x50° PRAVY	T5	0:01:08	0:00:21
OP20	DOKONCENI UKOSU 9x50° LEVY	T5	0:01:08	0:00:21
OP21	BOCNI UKOS 7x55° LEVY	T6	0:03:03	0:00:54
OP22	BOCNI UKOS 7x55° PRAVY	T6	0:03:03	0:00:54
CELKOVÝ STROJNÍ ČAS PRO SOUČÁST			2:07:07	0:59:36

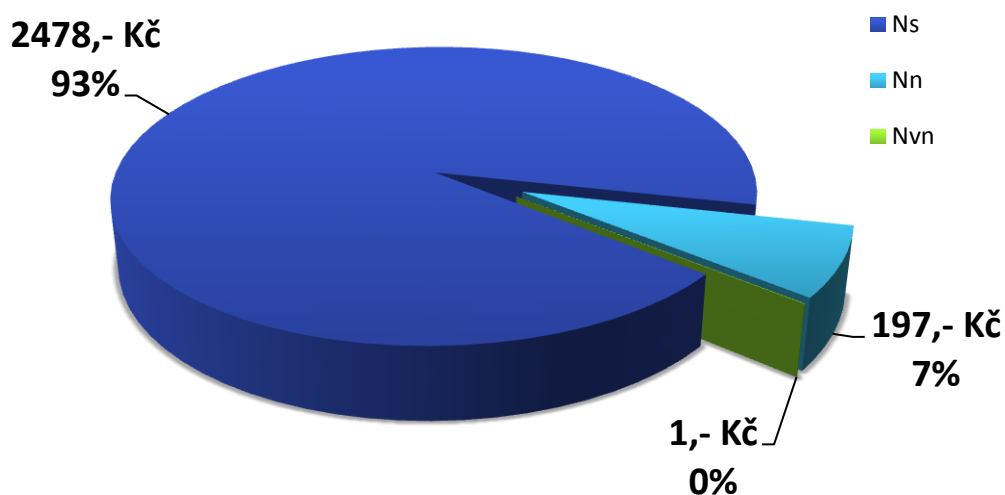
V další tabulce jsou porovnány stávající životnosti nástrojů a optimální životnosti. Je zde patrné, že stávající životnosti nástrojů jsou výrazně vyšší než optimální, což opět dokumentuje nevyužívání limitů, a to především stroje a nástrojů.

Tab. 43 Porovnání stávajících a optimálních životností nástrojů

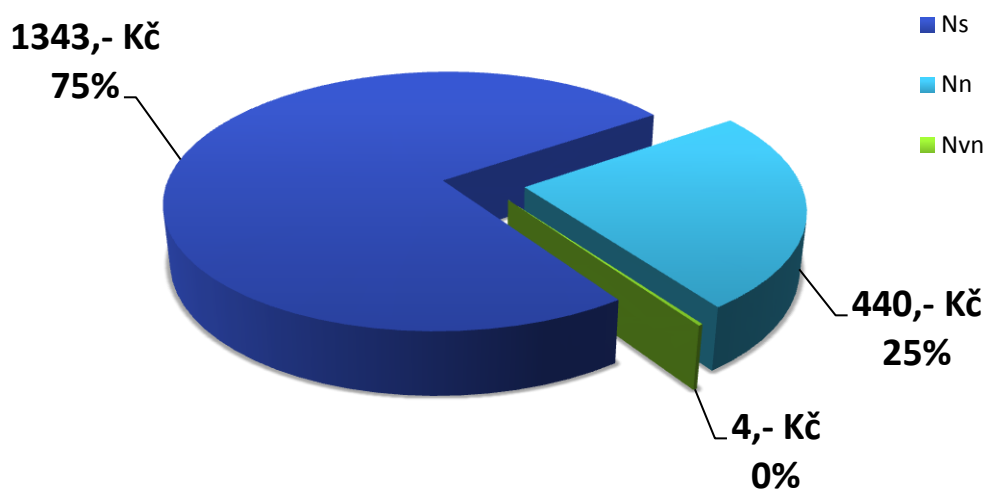
Nástroj	Stávající trvanlivost			Optimální trvanlivost
	T_{min} [min]	T_{max} [min]	T_{prum} [min]	T_{opt} [min]
T1	68	102	85	5,26
T2	45,5	70	58	9,89
T3	280	350	315	242,41
T4	121,5	162	142	6,69
T5	49,5	55	52	2,74
T6	102	126	114	3,75

Pro celkový přehled o struktuře nákladů, které zasahují do výrobních nákladů spojených s obráběním, poslouží následující dva grafy. V grafu číslo 4 jsou znázorněny stávající výrobní náklady. Je patrné, že nejvýznamnější složkou nákladů jsou náklady na strojní práci, které mají nejvyšší hodnotu i procentuelní podíl. V této položce pak spočívá navrhovaná úspora, což je znázorněno na grafu číslo 5. Zde je znázorněno rozložení nákladů vypočítaných z optimalizovaných řezných podmínek. Za cenu toho, že se zvýšil podíl nákladů na nástroje, se významným způsobem snížil strojní čas, což vedlo ke snížení nákladů na strojní práci.

Graf 4 Rozložení výrobních nákladů stávajících



Graf 5 Rozložení výrobních nákladů optimalizovaných



Všechny výše zmíněné změny s sebou přinesly následující finanční úsporu. Uvážíme-li, že se optimalizace v rozsahu této diplomové práce soustředila pouze na jednu polovinu součásti, potom v případě, že optimalizace by byla provedena i pro druhou polovinu součásti, by celková finanční úspora pro celou součást potažmo celou roční produkci, byla ještě výraznější.

Tab. 44 Zhodnocení výrobních nákladů

Stávající	2.675,89,-	Kč/ks
Optimalizované	1.787,33,-	Kč/ks
Úspora	33	%
	888,55,-	Kč/ks
	124.397,18,-	Kč/rok (140ks)

Úspora výrobních nákladů na jednu obrobenou součást činí 888,55,- Kč/ks, což znamená 33% úsporu oproti stávajícímu stavu výroby. Tato úspora při vztažení na roční produkci této součásti činí 124.397,- Kč.

Z těchto výše uvedených výsledků je patrný velký potenciál z hlediska finanční úspory související s optimalizací obráběcího procesu v tomto konkrétním provozu. Je podstatné zde zmínit, že vybraná součást, pro kterou byla optimalizace prováděna, je pouze zlomkem z celkové produkce společnosti. V případě, že by se i pro ostatní produkci povedlo docílit podobných úspor, jakých bylo dosaženo u vybrané součásti, může být konečná finanční úspora v řádech stovek tisíc korun.

9 Závěr

Tato práce měla za úkol zmapovat stávající stav obrábění ve firmě Unionocel s.r.o. a pro vybranou součást, která reprezentuje charakter obráběných součástí v této firmě provést optimalizaci řezných podmínek z hlediska minimálních výrobních nákladů.

V úvodu této diplomové práce bylo provedeno seznámení s firmou Unionocel s.r.o. a také popis výrobních možností této firmy.

Následující část pak byla věnována vybrané součásti, pro kterou byla provedena optimalizace řezné rychlosti z hlediska minimálních výrobních nákladů. Spolu s vybranou součástí zde byl také popsán stroj a nástroje, které jsou používány pro výrobu vybrané součásti. Pro potřeby optimalizace zde byl také vytvořen výrobní postup, do kterého byly zaneseny všechny potřebné údaje pro provedení optimalizace.

Hlavní částí práce pak bylo provedení samotného postupu optimalizace, kdy pomocí výpočtových vzorců byla optimalizována řezná rychlost. Po zjištění optimálních řezných podmínek pak byla provedena jejich kontrola, zda splňují kritéria oblasti přípustných řešení.

V samotném závěru se pak práce věnuje zhodnocení získaných výsledků. Práce zde porovnává stávající pracovní podmínky a optimální pracovní podmínky získané provedeným výpočtem. Důležitou částí je pak ekonomické zhodnocení optimalizovaných pracovních podmínek.

Z výše publikovaných výsledků provedené optimalizace jasně vyplývá, že stávající stav procesu obrábění vybrané součásti má značné finanční rezervy. Optimalizace byla provedena pouze pro zvolenou část součásti. Konkrétně jednu stranu, která se obrábí v jednom programu a na jedno upnutí. Z provedených výpočtů vyplývá, že aplikováním navrhovaných známých řezných podmínek je možné na obrábění zvolené strany součásti ušetřit u roční produkce částku 124 397,- Kč. Při aplikování postupu optimalizace i na zbytek součásti by tato úspora mohla dosahovat ještě větší peněžní částky.

Dalším důležitým faktorem, který by při aplikování navrhovaných řezných podmínek nastal, je vysoká časová úspora celkového času obrábění součásti. Z této časové úspory pak vyplývá úspora finanční. Dalším důležitým důsledkem časové úspory je příznivý vliv na využití kapacity obráběcích strojů a dodací termíny firmy.

Pro firmu Unionocel s.r.o. je podstatné si z výsledků této diplomové práce uvědomit, že nejvýznamnější položkou nákladů na obrábění je složka nákladů na strojní práci což je znázorněno v grafech č.4 a 5. To znamená, že největší vliv na výrobní náklad obrobku bude mít čas, po který se obrobek bude na stroji obrábět. Oproti tomu náklady na nástroje jsou méně významnou složkou nákladů. Je proto nezbytné, aby potenciál strojů i nástrojů byl naplno využíván. Také bych doporučoval, kromě změn týkajících se řezných podmínek, i změny v nástrojovém vybavení firmy. Tyto změny by se týkaly především pořízení tvarových nástrojů, např. na obrábění úkosů. Tyto nástroje by prvotně měly vyšší pořizovací cenu oproti stávajícím. Nicméně vliv zkrácení času obrábění jednotlivých úkosů by vyvážil jejich vyšší pořizovací cenu.

Výsledky této diplomové práce je důležité chápat ve vztahu k danému stroji, vybrané součásti a aktuální situaci z hlediska vytížení, cen nástrojů apod. V případě jakýchkoli změn, např. vytížení výrobní kapacity, by se měnily i optimální pracovní podmínky a celý výpočet by musel být proveden znovu s aktualizovanými vstupními daty. Rozhodně nelze získané výsledky přenést např. na nově pořízené obráběcí CNC centrum. Pro tento stroj opět budou optimální řezné podmínky z hlediska minimálních výrobních nákladů odlišné.

10 Použité zdroje

- [1] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 1998, 168 s. ISBN 80-010-1864-4.
- [2] *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí: Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*. Český normalizační institut, 2005.
- [3] Vertikální obráběcí centrum MCFV 2080. *TAJMAC-ZPS, a.s.* [online]. [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://www.tajmac-zps.cz/cs/MCFV-2080>
- [4] *TAJMAC-ZPS, A.S. Vertikální obráběcí centrum MCFV 2080* [online]. 2012 [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: http://www.tajmac-zps.cz/sites/tajmac-zps-2.os.zps/files/mcfv2080_cz.pdf
- [5] HEIDENHAIN. *TNC 530 - Víceúčelové CNC řízení pro obráběcí centra, frézky a vyvrtávačky* [online]. 2015 [cit. 2015-06-09]. Dostupné z: http://www.heidenhain.cz/cs_CZ/produkty-a-pouziti/cnc-řízení/itnc530/prehled-prospektu/
- [6] WALTER AG. *Souhrnný katalog: _PŘEHLED KOMPETENCÍ V OBRÁBĚNÍ* [online]. Německo, 2012 [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://www.waltertools.blaetterkatalog.de/gc2012/cz/blaetterkatalog/pdf/complete.pdf>
- [7] YG-1 CO.,LTD. *X-POWER END MILLS: X-POWER FRÄSER* [online]. [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://www.yg-1.pl/resources/FrezyXpower.pdf>
- [8] KORLOY. *KORLOY: KORLOY CUT TING TOOLS* [online]. 2014 [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: [http://www.korloy.com/newkorloy/eng/file/2014/KORLOY%20CUTTING%20TOOLS%202014\(English\).pdf](http://www.korloy.com/newkorloy/eng/file/2014/KORLOY%20CUTTING%20TOOLS%202014(English).pdf)