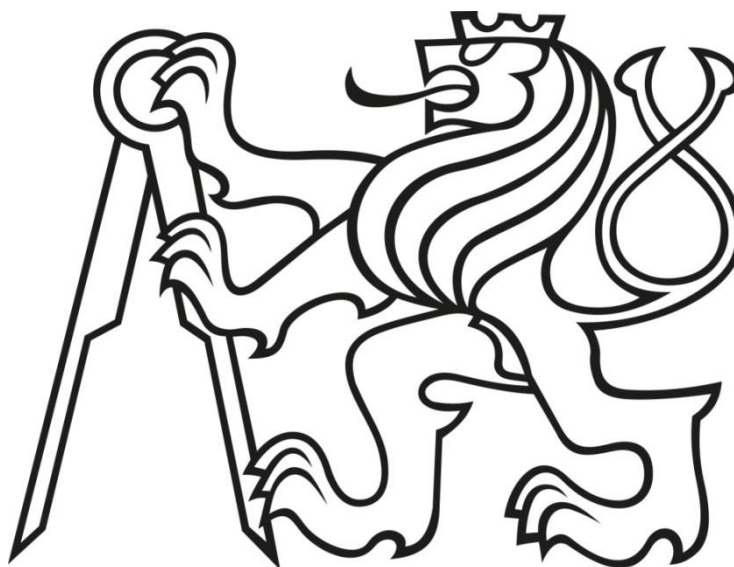


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE**



Diplomová práce

**Metodika optimalizace bez kapalinového
obrábění materiálů**

Optimization methodology non-liquid material machining

Studijní program: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí diplomové práce: Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D.

Bc. Filip Erdinger

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Erdinger** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **395195**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Metodika optimalizace bez kapalinového obrábění materiálů

Název diplomové práce anglicky:

Optimization methodology non-liquid material machining

Pokyny pro vypracování:

1. Bezkapalinové obrábění a obrábění konstrukčních ocelí
2. Volba technologie a strojů vhodných pro obrábění
3. Obrábění trubky pláště tlumiče
4. Návrh optimalizace výrobního procesu z pohledu dodržení času výroby
5. Ověření a zhodnocení návrhu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

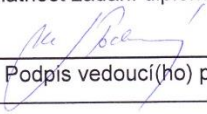
Ing. BcA. Jan Podaný Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

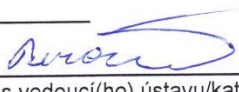
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

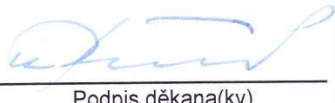
Datum zadání diplomové práce: **20.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.07.2017**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce


Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

24.4.2017

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci na téma Metodika optimalizace bez kapalinového obrábění materiálu vypracoval samostatně s použitím odborné literatury uvedené na konci této práce v seznamu literatury.

V Praze dne

Podpis.....

Filip Erdinger

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. BcA. Janu Podanému, Ph.D. a odbornému konzultantovi, technologovi úseku výroby vnějších a vnitřních trubek, panu Ing. Martinu Matouškovi za cenné rady, vstřícnost, čas, který mi věnovali a spolupráci při vypracování této práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na metodiku optimalizace bez kapalinového obrábění pláště tlumiče. Cílem práce je optimalizovat obráběcí proces dané součásti s požadavky na dodržení či zkrácení výrobního taktu s ohledem na dodržení předepsané drsnosti obrobeného povrchu při respektování výrobních nákladů. První část je věnována bez kapalinovému obrábění, obrobitelnosti konstrukčních ocelí a technologii soustružení se zaměřením na tvorbu třísky. Hlavní část je věnována výpočtu optimálních rezných podmínek a následné optimalizaci těchto podmínek dle možností výrobního zařízení. Dále je vybírána optimální břitová destička s ohledem na vhodný tvar třísky a dosahovanou drsnost obrobeného povrchu. Závěr práce je věnován ověření a vyhodnocení navržených optimalizačních opatření a jejich technicko-ekonomickému zhodnocení.

Klíčová slova

Metodika optimalizace obráběcího procesu, bez kapalinové obrábění, soustružení, plášť tlumiče, optimální trvanlivost břitu nástroje

Abstract

This diploma thesis is focused on optimization methodology non-liquid machining of shock absorber housing. The aim of the thesis is to optimize the machining process of the component with the requirements for maintaining or shortening the production cycle with respect to the adherence to the specified roughness of the machined surface while respecting the production costs. The first part is devoted to non-liquid machining, machining of structural steels and turning technology with a focus on chip formation. The main part is devoted to the calculation of optimal cutting conditions and subsequent optimization of these conditions according to the possibilities of the production equipment. Furthermore, an optimum cutting insert is chosen with respect to the appropriate chip shape and the roughness of the machined surface. The conclusion of the thesis is devoted to the verification and evaluation of proposed optimization measures and their technical and economic evaluation.

Keywords

Optimization of machining process methodology, non-liquid machining, turning, shock absorber housing, optimum tool blade durability

Obsah

Obsah.....	7
Seznam použitých zkratk.....	11
Seznam obrázků	15
Seznam tabulek.....	17
Seznam grafů.....	17
1 Úvod.....	18
2 Bez kapalinové obrábění.....	19
2.1 Výhody bez kapalinového obrábění	19
2.2 Negativa a náklady na aplikaci spojené s použitím procesních kapalin.....	21
2.3 Podmínky pro aplikaci bez kapalinového obrábění	23
2.4 Minimalizace množství vznikajícího tepla.....	23
2.5 Problematika odvodu a ochlazování třísek.....	26
2.6 Metoda kvazi-suchého obrábění (MQL)	27
3 Obrobitelnost konstrukčních ocelí	28
3.1 Obrobitelnost	28
3.2 Faktory ovlivňující obrobitelnost ocelí	29
3.3 Vliv jednotlivých prvků na obrobitelnost ocelí.....	29
3.4 Další faktory ovlivňující obrobitelnost.....	35
3.5 Obrobitelnost konstrukčních ocelí.....	36
3.5.1 Obrobitelnost nelegovaných konstrukčních ocelí	36
3.5.2 Obrobitelnost legovaných konstrukčních ocelí	37
3.5.3 Obrobitelnost automatových ocelí.....	38
3.5.4 Obrobitelnost automatových ocelí legovaných bismutem	40
4 Technologie výroby pláště tlumiče	41
4.1 Soustružení	41
4.2 Volba řezných podmínek při soustružení	42

4.3 Řezné síly	43
4.4 Nástroje – soustružnické nože	45
4.4.1 Soustružnické nože s VBD	45
4.4.2 Vyměnitelné břitové destičky	46
4.4.3 Povlaky vhodné pro bez kapalinové obrábění.....	47
4.4.4 VBD vhodné pro zlepšení drsnosti povrchu.....	48
4.5 Soustruhy	50
5 Mechanismus tvorby třísky při obrábění	52
5.1 Tvorba třísky při obrábění	52
5.2 Druhy třísek	54
5.3 Tvary třísek.....	55
5.3.1 Lamače a utvařeče	56
6 Metodika optimalizace obrábění konstrukčních ocelí	58
6.1 Optimalizace obráběcího nástroje	58
6.1.1 Nástrojové materiály	59
6.1.2 Geometrie břitu nástroje	61
6.1.3 Optimální velikost opotřebení	66
6.2 Optimalizace řezných podmínek	69
6.2.1 Kritérium optimálnosti z hlediska minimálních výrobních nákladů	71
6.2.2 Kritérium optimálnosti z hlediska produktivity	77
6.2.3 Kritérium optimálnosti z hlediska úběru materiálu	77
6.3 Omezující podmínky	78
6.3.1 Omezení dané výkonem obráběcího stroje	79
6.3.2 Omezení dané maximálně přípustným krouticím momentem	80
6.3.3 Omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy	81
6.3.4 Omezení dané vhodným utvářením třísek	82

6.3.5 Omezení dané maximálními a minimálními otáčkami z hlediska stroje	84
6.3.6 Omezení dané maximálním a minimálním posuvem z hlediska stroje	85
6.3.7 Omezení dané komplexním Taylorovým vztahem	85
6.4 Oblast přípustných řešení	85
6.5 Postupný způsob optimalizace řezných podmínek.....	87
7 Představení společnosti KYB Manufacturing Czech s.r.o.	88
8 Součást vybraná pro optimalizaci - plášť tlumiče.....	89
8.1 Materiál pláště tlumiče č. 0304-560-4006.....	90
8.2 Stroj – dvojitý CNC soustruh	91
8.3 Nástroj – soustružnický nůž	96
9 Optimalizace řezných podmínek.....	98
9.1 Výpočet nákladů na jeden operační úsek	98
9.1.1 Náklady na strojní práci na operační úsek.....	98
9.1.2 Náklady na nástroj vztažené na operační úsek.....	100
9.1.3 Náklady na výměnu nástroje	101
9.1.4 Výpočet výrobních nákladů pro stávající řezné podmínky	102
9.2 Výpočet optimálních hodnot	102
9.2.1 Optimální trvanlivost.....	102
9.2.2 Optimální řezná rychlost	103
9.2.3 Určení posuvu pro optimální řezné podmínky	104
9.3 Porovnání stávajícího a optimálního stavu obrábění.....	104
9.3.1 Porovnání stávajících a optimálních pracovních podmínek.....	104
9.3.2 Porovnání stávajících a optimálních výrobních nákladů.....	105
9.4 Definice oblasti přípustných řešení	105
9.5 Kontrola oblasti přípustných řešení.....	107
9.5.1 Optimalizování pracovních hodnot dle oblasti přípustných řešení	108

9.6	Ověření dodržení času výroby.....	109
9.7	Návrh optimální vyměnitelné břitové destičky	109
9.7.1	Popis VBD určených k testování.....	110
10	Ověření volby vyměnitelných břitových destiček	111
10.1	Popis experimentu	111
10.2	Vyhodnocení tvaru třísky – vizuální zkouška	112
10.3	Vyhodnocení drsnosti obrobeného povrchu.....	114
10.4	Ověření vybraných VBD v běžném provozu	115
10.4.1	Dosahované parametry vybraných VBD v běžném provozu	116
10.4.2	Volba vhodné VBD pro sériovou výrobu.....	117
11	Technicko-ekonomické zhodnocení	118
11.1	Porovnání pracovních podmínek.....	118
11.2	Porovnání výrobních časů	118
11.3	Porovnání výrobních nákladů.....	119
11.4	Porovnání výrobního množství	119
12	Závěr.....	120
	Seznam použité literatury	123
	Seznam příloh.....	130

Seznam použitých zkratek

AD	mm ²	jmenovitý průřez třísky
ap	mm	hloubka řezu (šířka záběru)
CNB	-	kubický nitrid boru
C_d	Kč	cena břitové destičky
C_E	Kč/hod	náklady na elektrickou energii spotřebovanou strojem
C_{Fc}, C_{Ff}, C_{Fp}	-	materiálové konstanty [-]
CNC	-	(Computer Numerical Control) počítačem řízený NC stroj
C_s	Kč	cena stroje
CSF_{EFPL}	hod/rok a SM	časový fond stroje
CT	s	(Cycle Time) takt výrobní linky
C_{tn}	Kč	cena tělesa nástroje
c_v	-	konstanta komplexního Taylorova vztahu
D	mm	průměr obráběné plochy
d	mm	průměr obrobené plochy
DM	-	(Dry machining) bez kapalinové obrábění
f	mm/ot	posuv na otáčku
F	N	celková řezná síla
F_C	N	řezná síla
F_f	N	posuvová síla
F_p	N	pasivní síla
f_{Ra max}	mm/ot	maximální posuv, při kterém je splněno kritérium drsnosti
f_{s max}	mm/ot	maximální posuv dosažitelný na stroji
f_{s min}	mm/ot	minimální posuv dosažitelný na stroji
F_u	N	upínací síla působící na jednu čelist

$f_{u \max}$	mm/ot	maximálně přípustná hodnota posuvu
$f_{u \min}$	mm/ot	minimální přípustná hodnota posuvu
F_{uo}	N	upínací síla působící na čelist
HB	-	tvrdost dle Brinella
HM	-	(Hard Machining) obrábění těžkoobrobitelných materiálů
HRC	-	tvrdost dle Rockwella
HRP_{PL}	Kč/hod	hodinový režijní paušál společných nákladů
HSC	-	(High Speed Cutting) obrábění vyššími reznými rychlostmi
HV	-	tvrdost dle Vickerse
k_c	N/mm ²	měrná rezná síla
k_c	-	přirážka směnového času
k_{Fc}	-	empirická konstanta výpočtu rezné síly
k_n	-	konstanta udávaná výrobcem
k_r	-	koeficient řezání
KT	mm	hloubka žlábků
k_{us}	-	koeficient oprav a údržby stroje
k_{ut}	-	koeficient údržby tělesa nástroje
k_{vs}	-	koeficient časového využití stroje
L	mm	délka dráhy automatického chodu nástroje
LN	mm	maximálně přípustná nepřesnost obrobenej plochy
m	-	empirická konstanta
M_k	Nm	kroučící moment ve vřetenu
M_{ke}	Nm	maximální přípustná velikost kroučícího momentu
M_o	Kč/hod	mzda operátora včetně sociálního a zdravotního pojištění
MQL	-	(Minimum Quantity Lubrication) kvazi-suché obrábění

n	ot/min	otáčky obrobku
N	Kč	výrobní náklady na operační úsek
NC	-	(Numerical Control) číslicově řízený stroj
N_{hs}	Kč/hod	hodinové náklady na provoz stroje
N_n	Kč	náklady na nástroje vztažené na operační úsek
N_{nT}	Kč	náklady na nástroj vztažené na jednu trvanlivost břítu
NO	-	nástrojová ocel
N_s	Kč	náklady na strojní práci na operační úsek
n_{s max}	ot/min	maximální otáčky dosažitelné na stroji
n_{s min}	ot/min	minimální otáčky dosažitelné na stroji
N_{sm}	Kč/min	náklady na strojní práci
N_{vn}	Kč	náklady na výměnu nástroje či VBD vztažené na operační úsek
N_{vnm}	Kč/min	náklady na výměnu nástroje, minutové
O_s	Kč/hod	odpis stroje
P_c	W	řezný výkon
PD	-	polykrystalický diamant
P_e	W	výkon elektromotoru stroje
PKNB	-	polykrystalický kubický nitrid boru
P_m	W	celkový výkon obráběcího stroje
Ra	μm	střední aritmetická úchylka profilu
Ra_{max}	μm	maximálně přípustná střední aritmetická úchylka profilu
RNS_{PL}	%	režijní náklady střediska plánované
r_ε	mm	poloměr špičky nástroje
ŘK	-	řezná keramika
s_b	-	součinitel využití břitových destiček
SK	-	slinutý karbid

SM	-	směnnost
T	min	trvanlivost nástroje
t_{AS}	min	strojní čas
t_{AS celk}	min	celkový strojní čas
t_{AS řez}	min	strojní čas v řezu kdy je břit opotřebováván
t_{AV}	s	vedlejší jednotkový strojní čas
t_{CT}	s	takt linky (CT - Cycle Time)
T_{optN}	min	optimální trvanlivost z hlediska minimálních výrobních nákladů
T_{optP}	min	optimální trvanlivost břitu z hlediska maximální produktivity
T_{pův}	min	původní (stávající) trvanlivost břitu nástroje
t_u	min	čas operačního úseku
t_{vn}	min	čas na výměnu nástroje
U	Kč	předpokládaná částka na opravy a údržbu stroje
U	cm/min ³	úběr materiálu
VB	-	opotřebení na hřbetě
VBD	-	vyměnitelná břitová destička
v_c	m/min	řezná rychlost
v_{c opt}	m/min	optimální řezná rychlost
v_{c pův}	m/min	původní (stávající) řezná rychlost
v_f	m/min	posuvová rychlost
VR	mm	radiální opotřebení nástroje
VR_{max}	mm	maximální přípustné radiální opotřebení břitu nástroje
VR_{opt}	mm	optimální velikost radiální opotřebení nástroje
X_{Fc}, X_{Ff}, X_{Fp}	-	exponenty vlivu a _p
X_v	-	konstanta komplexního Taylorova vztahu
Y_{Fc}, Y_{Ff}, Y_{Fp}	-	exponenty vlivu f

y_v	-	konstanta komplexního Taylorova vztahu
z_b	-	počet břitů na destičce
z_d	-	počet břitových destiček na nástroji
Z_s	rok	životnost stroje
z_u	-	předpokládaná upnutí destiček za dobu životnosti tělesa nástroje
z_v	-	počet výměn nástroje na daný operační úsek
η	-	mechanická účinnost stroje
κ_r	°	úhel nastavení
κ_r'	°	vedlejší úhel nastavení

Seznam obrázků

Obr. 1: Podélné bez kapalinové soustružení	20
Obr. 2: Přehled nákladů ve strojní výrobě	22
Obr. 3: T-v závislost při soustružení normální a dezoxidované oceli	25
Obr. 4: Vliv olova na trvanlivost při soustružení automatové oceli	39
Obr. 5: Kinematika soustružení	41
Obr. 6: Řezné síly při podélném soustružení	43
Obr. 7: Ukázka soustružnických nožů s VBD	45
Obr. 8: 1 - SK, tvar S, oboustranné, předlisovaný utvařeč; 2 - SK, tvar W, oboustranná, předlisovaný utvařeč; 3 - SK, zapichovací, předlisovaný utvařeč; 4 - SK, závitové; 5 - SK, upichovací, předlisovaný utvařeč; 6 - monolitní PKNB, tvar R; 7 - roubík PD, tvar C, jednostranná; 8 - roubík PD, tvar T, jednostranná, utvařeč; 9 - roubíky PD, tvar S, oboustranná; 10 - monolitní PKNB, tvar S, jednostranná, vybroušený utvařeč	46
Obr. 9: VBD s TiAlN povlakem	47
Obr. 10: VBD s Duratomic povlakem	48
Obr. 11: Ukázka zlepšení parametru Ra pomocí Wiper utvařeče	49
Obr. 12: Oblasti plastických deformací při obrábění	53
Obr. 13: Průběh tlaku ve styčné ploše mezi třískou a nástrojem	54
Obr. 14: Druhy třísek	55

Obr. 15: Základní tvary třísek.....	56
Obr. 16: Předlisovaný utvařec třísky na vyměnitelné břitové destičce.....	57
Obr. 17: Stavitelný lamač třísek	57
Obr. 18: Porovnání rezných materiálů z hlediska tvrdosti a houževnatosti.....	59
Obr. 19: Opotřebení břitu obráběcích materiálů z rychlořezné oceli, slinutého karbidu a keramiky	61
Obr. 20: Opotřebení na hřbetu nástroje	62
Obr. 21: Opotřebení ve formě žlábků	62
Obr. 22: Závislost šířky VB opotřebené plochy na úhlu hřbetu	63
Obr. 23: Vliv umístění nástroje na změnu pracovních úhlů při obrábění.....	64
Obr. 24: Závislost šířky VB opotřebení plochy na úhlu řezu	64
Obr. 25: Závislost šířky VB opotřebení plochy na úhlu nastavení.....	65
Obr. 26: Plochy opotřebení na hřbetu u různých destiček a různých hloubek řezu	67
Obr. 27: Radiální opotřebení nástroje.....	68
Obr. 28: Optimální velikost opotřebení VB z hlediska drsnosti obrobené plochy Ra	71
Obr. 29: Optimální velikost opotřebení KT z hlediska drsnosti obrobené plochy Ra ...	71
Obr. 30: Výrobní náklady na jednotku v závislosti na řezné rychlosti, pro konvenční a CNC obráběcí stroj	70
Obr. 31: Oblast vhodného utváření třísek.....	83
Obr. 32: Příklad oblasti přípustných řešení	86
Obr. 33: Výrobní závod KYB Manufacturing Czech s.r.o. v Pardubicích.....	88
Obr. 34: Výřez z výkresu vybrané součásti	89
Obr. 35: Tyčové polotovary pro výrobu plášťů tlumičů.....	90
Obr. 36: Dvojitý CNC obráběcí soustruh	91
Obr. 37: Pohled do ústrojí dvojitého CNC soustruhu.....	92
Obr. 38: Schéma stroje.....	92
Obr. 39: Dvojitý CNC soustruh	94
Obr. 40: Soustružnické nože dvojitého CNC soustruhu	94
Obr. 41: Soustružnický nůž A25R – PWLNR08.....	96
Obr. 42. Vyměnitelná břitová destička WNMG080404-FF2,TP2501.....	97
Obr. 43: Typy použitých utvařeců VBD.....	110
Obr. 44: Příklad výhodného a nevýhodného tvaru třísek a tvar třísky vznikající při obrábění současnou VBD	112
Obr. 45: Vyměnitelná břitová destička WNMG080404W-MF2, TP2501	117

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled vlivu jednotlivých prvků na obrobitelnost oceli.....	34
Tabulka 2: Přibližné hodnoty součinitele VBD	67
Tabulka 3: Hodnoty koeficientu k_{vs}	73
Tabulka 4: Přibližné hodnoty empirických konstant	75
Tabulka 5: Chemické složení oceli pro výrobu pláště tlumiče	90
Tabulka 6: Parametry dvojitého CNC soustruhu	95
Tabulka 7: Parametry soustružnického nože A25R – PWLNR08.....	96
Tabulka 8: Parametry vyměnitelné břitové destičky WNMG080404-FF2,TP2501	97
Tabulka 9: Pořizovací cena tělesa nástroje a břitové destičky.....	97
Tabulka 10: Hodnoty potřebné pro výpočet hodinových nákladů na provoz stroje	99
Tabulka 11: Koeficienty pro výpočet nákladů na nástroj vztažených na jednu trvanlivost ...	101
Tabulka 12: Hodnoty potřebné k výpočtu nákladů na nástroj	101
Tabulka 13: Porovnání stávajících a optimální řezných podmínek	105
Tabulka 14: Porovnání stávajících a optimálních výrobních nákladů	105
Tabulka 15: Hodnoty k určení oblasti přípustných řešení	106
Tabulka 16: Hodnota optimálních řezných parametrů	107
Tabulka 17: Kontrola optimálních a přípustných řezných podmínek.....	108
Tabulka 18: Porovnání optimálních a optimalizovaných pracovních podmínek	109
Tabulka 19: Přehled testovaných VBD	110
Tabulka 20: Vizuální hodnocení tvaru třísek.....	113
Tabulka 21: Dosahované drsnosti pro jednotlivé typy destiček	114
Tabulka 22: Parametry testovaných VBD v běžném provozu.....	116
Tabulka 23: Parametry vyměnitelné břitové destičky WNMG080404W-MF2, TP2501.....	117
Tabulka 24: Porovnání současných a navrhovaných pracovních podmínek	118
Tabulka 25: Porovnání stávajících optimálních výrobních časů	118
Tabulka 26: Porovnání stávajících a navrhovaných výrobních nákladů na jeden kus	119
Tabulka 27: Porovnání výrobních množství	120

Seznam grafů

Graf 1: Oblast přípustných řešení	106
Graf 2: Kontrola optimálních řezných podmínek vzhledem k oblasti přípustných řešení	107

1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací bez kapalinového obrábění a současným stavem výroby pláště tlumiče ve firmě KYB Manufacturing Czech s.r.o.. Cílem této práce je návrh optimalizace obráběcího procesu dané součásti při zachování, případném snížení taktu výrobní linky s požadavkem na snížení dosahované drsnosti obrobené plochy, s ohledem na zachování případné snížení výrobních nákladů.

V úvodu této práce bude rozebrána problematika bez kapalinového obrábění, v následující části se zaměřím na obrobiteľnosť konstrukčních ocelí na faktory ovlivňující obrobiteľnosť a na vliv chemických prvků a tepelného zpracování na obrobiteľnosť. Dále bude v krátkosti popsána technologie obrábění pláště tlumiče, tedy soustružení a nové trendy v oblasti vyměnitelných břitových destiček. Vzhledem k důležitosti tvorby vhodného tvaru třísky na automatickém CNC stroji, na kterém je plášť tlumiče vyráběn, bude popsán mechanismus tvorby třísky, její druhy a její tvary. Dalším krokem bude popis metodiky optimalizace obráběcího procesu, kde budou popsány nástrojové materiály, geometrie nástroje, optimální opotřebení a optimalizace řezných podmínek. V závěru této kapitoly budou uvedeny vybrané omezující podmínky.

Výsledkem této diplomové práce by měl být návrh optimálních řezných podmínek podle kritéria minimálních výrobních nákladů s ohledem na dodržení taktu výrobní linky. Řezné podmínky by měly být navrženy tak, aby došlo ke snížení drsnosti obrobené plochy na požadovanou hodnotu. Pokud toho nebude možné docílit úpravou řezných podmínek, bude nutné provést optimalizaci obráběcího nástroje, konkrétně vyměnitelné břitové destičky. V závěru práce bude provedeno ověření těchto optimalizačních návrhů a krátké ekonomické zhodnocení optimální varianty. Dále by tato práce měla sloužit jako návod pro další optimalizační procesy v oblasti obrábění pro daný podnik.

2 Bez kapalinové obrábění

Pod výrazem bez kapalinové obrábění si můžeme představit vyloučení používání procesních kapalin z řezného procesu zejména při soustružení, frézování a v určitém rozsahu i při vrtání. Též tento způsob obrábění můžeme nazývat suché obrábění, v západoevropských státech označovaný jako dry machining. [1] [2]

Bez kapalinové obrábění je cestou ke zlepšení ekologie i ekonomie výroby. Hlavním přínosem je snížení nákladů na pořízení procesních kapalin, jejich následnou filtraci, recyklaci a v neposlední řadě jejich likvidaci. Dalo by se tedy říci, že se jedná o ekologicky čisté řešení, které je nakloněno stále se zvyšujícím legislativním požadavkům na hospodárnost a ekologičnost výroby. [2] [3] [13]

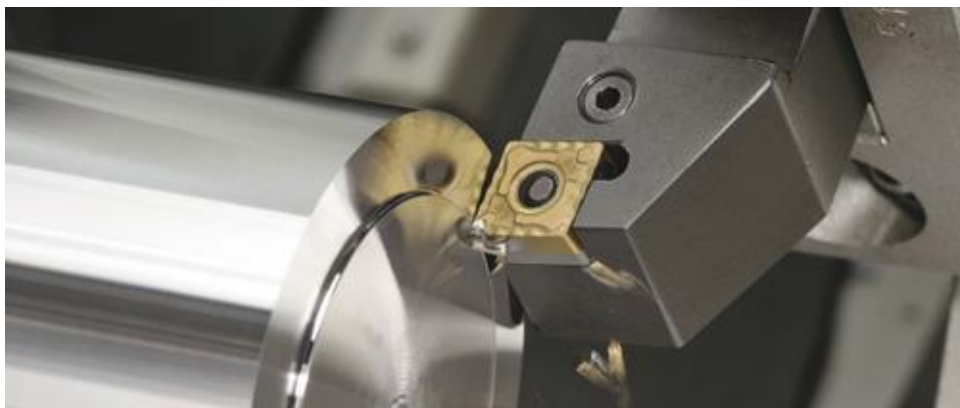
Podle dostupných údajů se například jen v Německu za jeden rok ve strojírenské výrobě spotřebuje přes 75 tisíc tun různých druhů procesních kapalin. Je ovšem samozřejmé, že ne každé obrábění lze uskutečnit bez používání procesní kapaliny. Podle odhadů se dá předpokládat, že nepoužíváním řezné kapaliny mohou klesnout náklady vynaložené na obrábění přibližně o 10 až 15 %. Evropský průmysl si pomalu začíná uvědomovat výhody metody suchého obrábění, která se zatím využívá při obrábění přibližně 12 % hromadně vyráběných dílů. V USA je rozvoj v tomto směru poněkud pomalejší, ale i tam je o metodu suchého obrábění velký zájem. [1]

2.1 Výhody bez kapalinového obrábění

Suché obrábění je vhodné pouze za určitých podmínek, a to co se týče jak způsobu obrábění, tak materiálu nástrojů i materiálu obráběné součásti. Bez kapalinové obrábění je možné použít pouze tam, kde absence procesní kapaliny nepříznivě neovlivní výsledné vlastnosti výrobku, nástroje a především negativně neovlivní výrobní čas součásti. V některých případech je obrábění bez použití procesních kapalin velmi žádoucí, například jedná-li se o takzvané tvrdé obrábění HM (Hard Machining) nebo při obrábění vyššími řeznými rychlostmi též známé pod zkratkou HSC (High Speed Cutting). Při těchto způsobech obrábíme materiály s vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení, které umožňují použití řezné keramiky s řeznou rychlostí až 1000 m.min⁻¹. V případě použití řezné keramiky je žádoucí použití bez kapalinového obrábění především pro její vysokou citlivost na tepelné šoky. Významným argumentem, který podporuje používání suchého obrábění je to, že v okamžiku, kdy je

nástroj zasažen proudem procesní kapaliny, dochází k výraznému teplotnímu šoku obráběcího nástroje, případně břitové destičky. Tento efekt je zvláště patrný při frézování, kdy nástroj po celou dobu řezného procesu rotuje a pravidelně vstupuje a vystupuje z pracovního záběru, takže dochází k extrémním výkyvům teplot, které nástroj poškozují více než samotná vysoká teplota. [3] [12]

Možnosti uplatnění obrábění zasucha, a tím i specifikace požadavků na proces, jsou závislé také na konkrétní kombinaci obráběného materiálu a způsobu obrábění. Při obrábění oceli je velmi významný vliv vysoké teploty při řezání, naproti tomu obrábění šedé litiny a hliníku s vysokým obsahem křemíku je mnohem důležitější vliv abrazivního otěru břitu. U měkčích slitin hliníku způsobuje jejich obecně vysoký sklon k adhezi časté nalepování třísek jak na břit, tak i na obrobek. Je tedy pochopitelné, že v závislosti na způsobu obrábění a druhu obráběného materiálu, je dosahováno různých trvanlivostí břitu s použitím procesní kapaliny a bez jejího použití. U většiny materiálů se při frézování za sucha dosahuje vyšší trvanlivosti břitu než při obrábění s procesními kapalinami, a to především díky eliminaci tepelných rázů obráběcího nástroje. Toto tvrzení neplatí v případě frézování slitin hliníku, kdy může docházet k výraznému snížení trvanlivosti břitu vlivem velmi vysoké adheze obráběného materiálu na břit nástroje. V případě soustružení a vrtání bez kapalinovým způsobem se zpravidla dosahuje nižší trvanlivosti břitu než při použití procesních kapalin. Důvodem snížení trvanlivosti břitu jsou vyšší teploty řezného procesu při nepřerušovaném řezu. Zatížení tepelnými šoky se pochopitelně při plynulém řezu téměř nevyskytuje, protože břit opakovaně nevybíhá ze záběru. Procesní kapalina tak pouze snižuje teplotní pole nástroje, ale samotný břit prudce neochlazuje. [4] Na obrázku níže můžeme vidět ukázkou podélného bez kapalinového soustružení (Obr. 1)



Obr. 1: Podélné bez kapalinové soustružení [5]

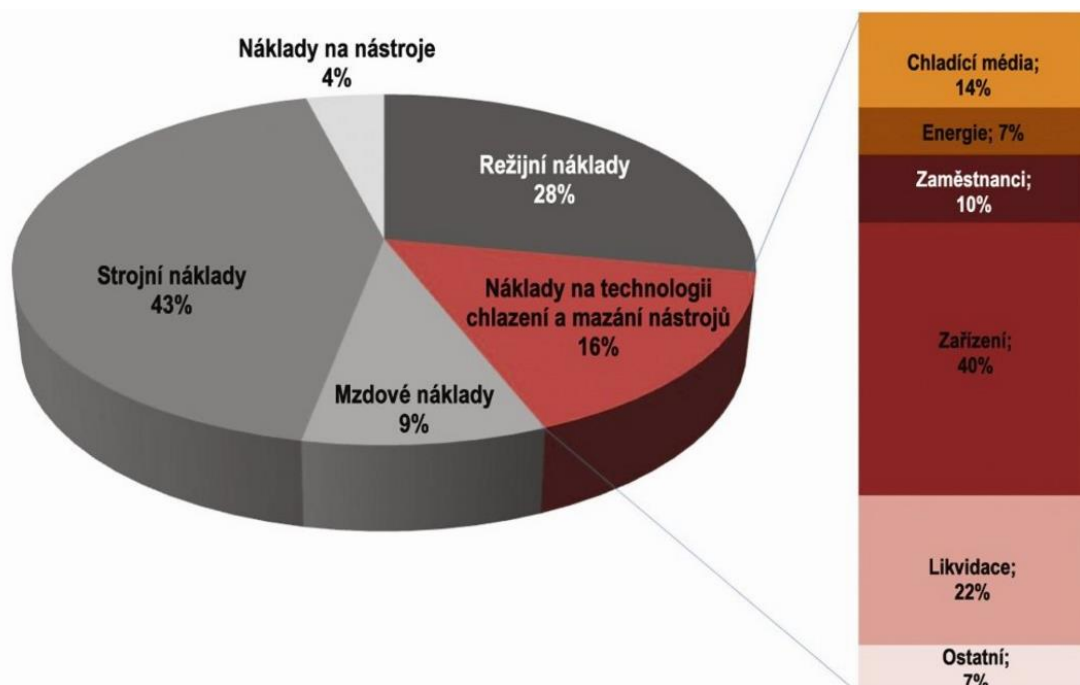
Při zavedení metody bez kapalinového obrábění je možné dosáhnout velkých úspor v podobě snížení výrobních i provozních nákladů. Jako první odpadnou náklady potřebné na nákup procesních kapalin, jejich recyklaci a následnou likvidaci po ukončení jejich používání. V další řadě odpadají investice spojené se zařízením pro manipulaci, čištění a také skladování procesních kapalin. Manipulace, skladování, čištění a likvidace procesních kapalin můžeme označit jako velmi náročný a složitý proces spojený s velkými riziky, a to především úniku kapaliny a její následné ekologické likvidaci. [1] [13]

Přechodem na metodu bez kapalinového obrábění lze získat čistější a zdraví prospěšnější dílny s nižšími provozními náklady a úsporou skladovacích prostor. V případě eliminace procesních kapalin nedochází k rozprašování rezné kapaliny, a tedy ke vzniku mastného povlaku na pracovišti, tím pádem se zkvalitňuje pracovní i životní prostředí a zvyšuje se bezpečnost práce. Odpadá nutnost čištění a odmašťování obrobků před následujícími operacemi, čímž se zkracuje vedlejší výrobní čas a také se zmenšuje riziko vzniku alergických reakcí u pracovníků obsluhujících obráběcí stroje. [1] [27]

2.2 Negativa a náklady na aplikaci spojené s použitím procesních kapalin

Procesní kapaliny se začaly používat v době, kdy docházelo ke zvyšování technologických požadavků na vyráběné součásti, a daným požadavkům přestaly odpovídat vlastnosti rezných materiálů. Použitím procesních kapalin došlo k eliminaci nežádoucích faktorů jako například kvalita a přesnost obráběného povrchu, trvanlivost bříty, odstraňování třísky, efektivnější odvádění tepla a dalších faktorů. Negativem tohoto řešení bylo a stále je zvýšení požadavků na technologické vybavení, a tím i zvýšení nákladů na celkovou výrobu. V horizontu posledních let k těmto negativům přibyla i negativa z oblasti ekologie a dopadu na zdraví, která se stávají stále aktuálnější nejen z legislativních důvodů ale především z hlediska nákladů spojených s likvidací případných ekologických havárií a zdravotních odškodnění. Dalším neméně důležitým omezujícím faktorem v používání procesních kapalin jsou rozšiřující se zákonné předpisy o manipulaci s chemickými látkami. Není divu, že v současné době je trendem v oblasti obrábění snižování nebo úplná eliminace procesních kapalin. Rozvoj nových technologií tento trend podporuje, především vývoj nových druhů rezných materiálů, které umožňují bez kapalinové obrábění. [4]

K objasnění problematiky používání procesních kapalin za současných ekonomických a výrobních podmínek byla provedena řada studií. Například velmi vyspělá země, kterou je Německo, spotřebuje řádově desítky tisíc tun procesních kapalin a koncentrátů za stovky milionů euro. Z těchto koncentrátů se připravují další stovky tisíc tun procesních emulzí. Není těžké si představit jaká ekologická nebezpečí a jaké další nepřímé náklady pro výrobu jsou za tímto faktem skryty. Prováděné statistiky ukázaly, že jen málo firem si vede přesné záznamy o nákladech spojených s používáním procesních médií (investice, náklady na pořízení a likvidaci kapalin, odpisy a údržba zařízení, energie, doprava, personální výdaje, zdravotní výdaje, výdaje na ekologické havárie a další). Z dostupných informací bylo zjištěno, že náklady na aplikaci procesních kapalin na transferových obráběcích linkách se často pohybují mezi 7 a dokonce až 17 % (Obr. 2) výrobních nákladů vztažených na jeden obrobek. To je podstatně více, než se dříve předpokládalo, a více než činí průměrné náklady např. na řezné nástroje, tj. 2 až 4 %. V běžných provozech však náklady na procesní kapaliny obvykle nepřekračují 5 %. Rovněž nelze zanedbat ani další zvýšení nákladů spojené se zpracováním třísek obsahujících zbytky procesních kapalin a s čištěním hotových obrobků od nich. [6]



Obr. 2: Přehled nákladů ve strojní výrobě [10]

Uvedené skutečnosti signalizují nárůst negativních stránek používání umělých procesních prostředí, a tím potřebu jejich vyloučení. Rovněž z hlediska přímých i

nepřímých nákladů na obrábění se ukazuje, že aplikace obrábění za sucha je již za současných podmínek v řadě případů výhodnější než obrábění s používáním umělých procesních prostředí. [6]

2.3 Podmínky pro aplikaci bez kapalinového obrábění

Pro aplikaci bez kapalinového obrábění pro určitý výrobní úsek je třeba vždy důkladně prozkoumat všechny možné důsledky vyplývající z tohoto rozhodnutí. Je třeba uvědomit si, jaká pozitiva přináší použití procesní kapaliny do řezného procesu a že bude nutné tyto pozitivní vlastnosti, při obrábění za sucha, nahradit variantou vhodnou pro tento druh obrábění. [4] Velmi často se bude jednat o volbu nástroje vhodného pro bez kapalinové obrábění.

V současné době například již většina výrobců obráběcích nástrojů nabízí řadu břitových destiček ze slinitých karbidů, určených speciálně k používání při obrábění metodou bez kapalinového obrábění. Příkladem jsou destičky s větší tloušťkou povlaku z oxidu hlinitého Al_2O_3 . Vývoj v oblasti řezných materiálů pro suché obrábění je velmi dynamický. Vznikají nové řezné materiály vhodné pro obrábění metodou DM. Jsou to například cermety, řezná keramika, kubický nitrid boru a umělé polykrystalické diamanty. [4]

Bylo také přijato rozhodnutí, že v budoucnosti budou strategické řezné materiály vyvíjeny vždy v provedení pro obrábění s řeznou kapalinou i pro obrábění za sucha, tedy metodou DM. Volbou vhodného druhu řezného materiálu a jeho aplikací pak bude možno optimalizovat různé oblasti použití metody DM a dosáhnout značných úspor nákladů na obrábění, a tím i celkových výrobních nákladů. [4]

2.4 Minimalizace množství vznikajícího tepla

Pokud se rozhodneme vyloučit procesní kapalinu z řezného procesu, musíme počítat s problémy, které toto rozhodnutí může přinést. Při bez kapalinovém obrábění nedochází k intenzivnímu odvádění tepla z nástroje ale především z obrobku. Tento fakt je velmi významný především u dokončovacích operací, při nichž se snažíme zabránit tepelným deformacím obrobku tak, aby byly dodrženy přísné tolerance rozměru a tvaru. Jedná se o velmi významný faktor a vyžaduje proto zvláštní opatření. [4] [6]

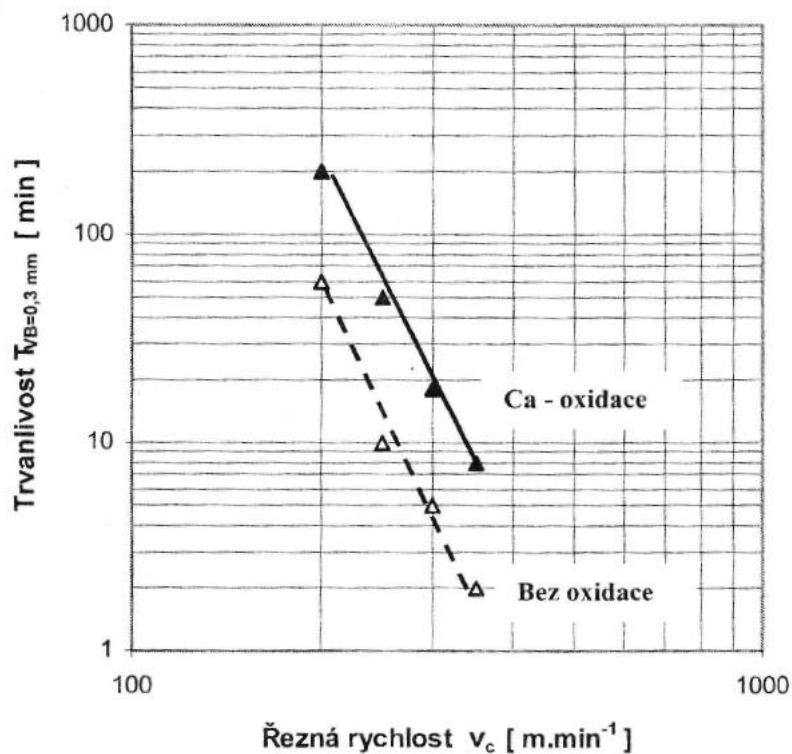
Z tohoto důvodu je velmi důležité navržení řezného procesu tak, aby bylo minimalizováno množství vzniklého tepla a především aby se minimalizoval přenos tepla do obrobku. Obecně vzato se celkové množství tepla, a tím i teplota řezání sníží zmenšením množství měrné energie (J/mm^3) vynaložené na řezný proces. Na základě poznatků z teorie obrábění se toho dosáhne např. zmenšením deformačních a třecích sil. Jestliže známe tyto skutečnosti, má smysl se zabývat geometrií nástroje, která má značný vliv na tření mezi nástrojem a obrobkem, velikost řezného odporu, deformační síly a odvod tepla z místa řezu. Například úhel čela γ má značný vliv na velikost řezného odporu, čím větší je tento úhel, tím snadněji vniká břit do obrobku, řezný odpor se snižuje a zmenšuje se objem a intenzita plastické deformace, a tím i významný zdroj tepla. Pokud je tento úhel příliš velký dochází k zeslabení břitu, zhoršení odvodu tepla nástrojem a nebezpečí vylomení břitu dále se také zhoršuje drsnost povrchu vlivem vytrhávání materiálu břitem nástroje. Dalším úhlem, který má značný vliv na vznik tepla, je úhel hřbetu α . Jestliže zvětšujeme tento úhel, dochází k významnému snížení třecích sil, a tím i snížení tepla vzniklého třením, bohužel na úkor pevnosti a tedy trvanlivosti břitu. Úhel břitu β má vliv na velikost řezného odporu a na množství odváděného tepla z místa řezu do těla nástroje. [6] [7]

Další možností je ovlivnit rozdělení toků odváděného tepla z místa řezu. Při soustružení například snížíme zahřívání obrobku zvýšením posuvu a hloubky řezu, tedy průřezem odebírané vrstvy. Podobně tento princip funguje i při frézování, kdy je vhodné zvýšit hodnotu posuvu na zub, a použití především sousledného frézování omezující tření hřbetu o plochu řezu. Pokud nám dovolí tepelná odolnost řezných nástrojů a výkon stroje, můžeme zvýšit řeznou rychlost. Se zvýšením řezné rychlosti klesá měrný řezný odpor, zvyšuje se objem tepla odvedený třískou, a tudíž se snižuje množství tepla přecházejícího do obrobku. Zvýšení řezné rychlosti rovněž způsobí nárůst deformační rychlosti, a tím snížení plasticity obráběného materiálu v oblastech vzniku třísky. Tím se opět zmenší objem plastických deformací. To platí obecně pro všechny způsoby obrábění. [6]

Při absenci chlazení nástroje procesní kapalinou musíme uvažovat užití takových řezných materiálů, které odolávají vyšším teplotám řezání a v průběhu řezného procesu neztrácejí svojí otěruvzdornost a trvanlivost. [6] Jedná se zejména o moderní povlakované slinuté karbidy s velmi odolnou povrchovou vrstvou jak vůči otěru, tak vůči vysokým teplotám, nebo také řezná keramika, která odolává vysokým teplotám, ale

není vhodná především pro přerušované řezy, případně použití nových druhů polykrystalických velmi tvrdých řezných materiálů.

Zajímavou možností, jak docílit pozitivních předpokladů pro nasazení bez kapalinového obrábění, je výběr vhodného nebo vhodně metalurgicky zpracovaného polotovaru, který zajistí lepší obrobiteľnost. Jednou ze známých metod zlepšení obrobiteľnosti je používání například vhodných dezoxidačních přísad již při metalurgické výrobě oceli. Oceli dezoxidované kalciumsiliem (SiCa). Ten způsobí, že tvrdé vměstky oxidu hliníku se změni na tvárnější hlinitan vápenatý, který se při teplotě řezání taví a působí jako mazadlo a ochranný film na břitě. Trvanlivost břítě se tím může zvýšit až o 400 % (Obr. 3). [4] [11]



Obr. 3: T - v_c závislost při soustružení normální a dezoxidované oceli [11]

Snížení množství vznikajícího tepla, a tím i tepelného zatížení obrobku se však může dosáhnout i dalšími opatřeními z oblastí mimo vlastní řezný proces. Nejčastěji je to používáním polotovarů tvarově podobnějších hotovému obrobku. Takto se nejenom sníží tepelné zatížení obrobku ale také množství odpadu v podobě třísek. Jako polotovary se používají přesné výkovky, odlitky nebo také polotovary vyrobené aditivní

technologií - metody Rapid Prototyping. Takováto technologie snižování množství vznikajícího tepla se nazývá "Near-Net-Shape-Technology". [6]

2.5 Problematika odvodu a ochlazování třísek

Použijeme-li metodu bez kapalinového obrábění, může se stát, že v případě velkého množství odebíraného materiálu bude docházet k hromadění třísek v pracovním prostoru, které nebudou odváděny procesní kapalinou. Tento jev je nejčastější u vrtání, výroby závitů, brusných nástrojů ale i u fréz. Může tak docházet k zahlcování nebo zacpání prostoru pro odvod třísek. Nežádoucím efektem je, že dochází k poškození obrobené plochy ale také břitu nástroje, který již obrobenou a zpevněnou třísku znovu řeže. Řešením tohoto problému je použití odsávání třísek z místa řezu. Další, avšak méně efektivní, metodou je odfukování třísek stlačeným vzduchem. Tato možnost není příliš vhodná, protože kovový prach vznikající při obrábění, je vířen v pracovním prostoru stroje a může docházet k poničení vodících ploch, ložisek, šroubů, apod. Lepšímu odstraňování třísek přispívá i změna polohy nástroje vůči obrobku, tedy obrábění zespodu obrobku nebo lépe při vodorovné poloze vřetena frézky či vrtačky. U strojů určených pro suché obrábění je velmi důležité, aby byly vhodně konstruované s ohledem na odstraňování třísek, zejména konstrukce upínacích přípravků, loží, suportů a dalších. Jestliže nemůžeme zajistit bezproblémový odvod třísek z obrobku, musíme počítat s tím, že vysoká teplota třísek může tepelně ovlivnit obrobek nebo části stroje, které s nimi přijdou do styku a jsou vystaveny jejich tepelnému účinku, který je třeba případně nutno regulovat teplotní rozměrovou kompenzací v řízení číslicového stroje. [4] [6]

Zmínka o ochlazování třísek v předchozím odstavci, které jsou vlastně odpadem již při jejich vzniku, by se neměla brát na lehkou váhu v případě výroby přesných součástí. Ochlazování extrémně teplých třísek, které se mohou shromažďovat například v dutině obrobku, upínacího přípravku nebo obráběcího stroje, má svůj význam hlavně z hlediska zachování přesnosti obrábění. Při obrábění za sucha je tříska přímo ochlazována pouze okolním vzduchem (přirozeným procesním prostředím), ale toto ochlazení je velmi malé a je třeba se na tento fakt zaměřit a důsledně třísky z výše uvedených oblastí odstraňovat. Koukneme-li se na tuto skutečnost z jiného pohledu například, že vyšší teplota řezání zlepšuje plasticitu odřezávaného materiálu třísky, a tím její snadnější deformaci a zmenšení řezných sil. Zvýšená plastická deformace

způsobuje při nepřerušovaném řezu, jako je například soustružení, změnu tvaru třísky na méně vhodný stužkový smotaný tvar. Tato skutečnost se obvykle řeší použitím speciálních utvařečů třísek tak, aby nedocházelo při bez kapalinovém obrábění k problémům s nedělenou třískou. [4] [8]

2.6 Metoda kvazi-suchého obrábění (MQL)

V případě, že není možné použít bez kapalinové obrábění, například při obrábění hliníku a jeho slitin z důvodu vysoké adheze materiálu obrobku (třísky) na břit, a tím způsobení výrazně nižší trvanlivosti břitu, tak se často používá takzvané kvazi-suché obrábění [2] neboli metoda minimálního množství přimazávání MQL (Minimum Quantity Lubrication). Principem metody je redukce procesní kapaliny na poměrně výrazně snížené množství kapaliny pro mazání kontaktních ploch třísky a nástroje, což především vede ke snížení třecí síly. [9]

Po použití metody MQL zůstávají nástroje, obrobky i třísky prakticky suché bez nánosu procesní kapaliny, proto nejsou nutné další technologické postupy pro odstranění procesních kapalin z třísek nebo z obrobku. Proto může být metoda MQL také považována za suché obrábění, jelikož náklady na likvidaci procesní kapaliny jsou zanedbatelné. Při použití moderních řezných nástrojů s kombinací metody MQL dochází k výraznému zlepšení lubrikačních vlastností. Velmi tenká a homogenní vrstva média vytvořená na břitu nástroje nebo na povrchu obrobku vytváří tepelně izolační bariéru, která snižuje přestup tepla z obrobku do nástroje, a tím zvyšuje jeho odolnost a trvanlivost. Poznatky o metodě MQL jsou dostatečně známé při konvenčním obrábění, avšak poznatky v oblasti HSC s podporou MQL jsou limitovány především teplotní stabilitou chladicího media, především bodem vzplanutí. MQL média se obecně dělí na mastné alkoholy a syntetické estery. Z charakteru těchto médií lze vydedukovat, že pro použití v oblasti tvrdého HSC obrábění jsou vhodnější syntetické estery. [9]

Při použití metody MQL je zvláště důležitá volba způsobu přívodu média do místa řezu. Existuje několik základních způsobů přívodu MQL média do místa řezu, například kontinuální přívod v průběhu obrábění pomocí trysek v podobě směsi oleje se vzduchem, přívod vnitřkem nástroje přímo do místa řezu, nebo nanesení média před obráběním na povrch obrobku, např. štětečkem. Tyto způsoby aplikace se samozřejmě mohou lišit v závislosti na rozsahu a automatizaci výroby. [9]

3 Obrobitelnost konstrukčních ocelí

3.1 Obrobitelnost

Obrobitelnost je v technologii obrábění kovů široce rozšířený výraz. Je to systémová vlastnost, která vyjadřuje, jak efektivní může být obrábění při nízkých nákladech a za daných technologických podmínek. [14] Obrobitelnost určitého materiálu není snadné definovat absolutní hodnotou dané veličiny, protože obrobitelnost je komplexní ukazatel mechanických a fyzikálních vlastností a chemického složení materiálu na průběh ekonomických i kvalitativních výsledků obráběcího procesu. Obrobitelnost však také ovlivňuje například způsob obrábění, zvolené rezné podmínky (posuv, rezná rychlost, hloubka řezu, rezné prostření) a také geometrie břitu rezného nástroje. Obrobitelnost ocelí se dále může lišit v závislosti na obsahu slitinových prvků, způsobu tepelného zpracování a způsobu výroby (kovaná, válcovaná, tažená, odlévaná). [15]

Pod pojem obrobitelnost materiálu se rozumí souhrn vlastností obráběného materiálu z hlediska jeho vhodnosti pro výrobu součástí konkrétním způsobem obrábění. Myslí se tím jak snadné, případně obtížné je obrábět součást při použití rezných nástrojů. Například uhlíková ocel střední jakosti je v porovnání s žárovevnou slitinou snáze obrobitelná, při obrábění šedé litiny vzniká méně problémů než při obrábění tvárné perliticko-feritické litiny odlévané do kokil, zatímco ocel se sklony k „nalepování“ s nízkým obsahem uhlíku je náročnější na obrábění než různé druhy legované oceli. Pojem obrobitelnost však není jednoznačně definovaný z důvodu různorodosti operací obrábění, kontinuálního vývoje a zlepšování rezných nástrojů. [26]

V širším smyslu je obrobitelnost funkční veličinou vztahu nástroj / obrobek, pro kterou jsou důležitá následující kritéria: [26]

- Trvanlivost břitu
- Utváření třísky
- Stav povrchové vrstvy
- Výkon obrábění
- Řezná síla / příkon
- Sklon k vytváření nárůstku

Aby bylo možné zhodnotit obrobiteľnosť materiálu, teda jeho schopnosť byť obrában, je obvykle nutné rozobrať tri hlavné faktory. [16]

- Posouzení materiálu obrobku z metalurgického hlediska a z pohledu mechanických vlastností.
- Posouzení zvolené geometrie břitu na úrovni makroskopické i mikroskopické.
- Posouzení nástrojového materiálu (třídy) a oprávněnosti jeho volby, např. povlakovaný slinitý karbid, řezná keramika, CBN, nebo PCD, a další. [16]

3.2 Faktory ovlivňující obrobiteľnosť ocelí

Z mechanických vlastností ovlivňuje obrobiteľnosť oceli nejvíce jejich pevnost. Vliv tvrdosti na obrobiteľnosť oceli není v celém jejím rozsahu jednotvárný. Oceli s tvrdostí menší než 160 HB jsou špatně obrobitelné kvůli své vyšší houževnatosti. Do tvrdosti kolem 220 HB není stupeň obrobiteľnosti přímo úměrný tvrdosti, neboť zde větší roli hrají jiné faktory například chemické složení, mikrostruktura nebo houževnatost. K užší souvztažnosti mezi obrobiteľností a tvrdostí dochází teprve při tvrdosti vyšší než 230 až 250 HB, kdy se obrobiteľnosť úměrně zvyšuje s rostoucí tvrdostí, protože faktory ovlivňující obrobiteľnosť (chemické složení, mikrostruktura, houževnatost) klesají s rostoucí tvrdostí. [21]

3.3 Vliv jednotlivých prvků na obrobiteľnosť oceli

Některé prvky se do oceli dostávají při metalurgickém procesu (C, Mn, Si, F, N, H, O, a v malém množství také Sn, Pb, Ar, Cu), jiné prvky se do oceli přidávají účelně pro zlepšení jejich mechanických vlastností, těmto prvkům se říká legující prvky (Cr, Ni, W, Mo, Co, Al, Ti), vliv těchto prvků na obrobiteľnosť je různý podle toho, jsou-li v základní hmotě feritu rozpuštěné úplně nebo částečně, a nebo vytvářejí tvrdé složky – karbidy. Některé tyto prvky jsou ve feritu nerozpustné a tvoří takzvané vměstky. V případě, že jsou tyto vměstky měkké, obrobiteľnosť zlepšují, pokud jsou tvrdé, tak ji zhoršují. [21]

Uhlík C

Uhlík se základní hmotou feritu tvoří sloučeninu – karbid Fe_3C (cementit), který při pomalém ochlazování vytváří s feritem eutektoidní směs zvanou perlit, při rychlém ochlazování vytváří martenzit. Perlit zvyšuje pevnost a snižuje houževnatost, v oceli se vyskytuje ve formě globulární nebo lamelární. U ocelí nízkouhlíkových s obsahem $\text{C} < 0,45 \%$ je z hlediska obrobiteľnosti výhodnější struktura lamelárního perlitu, protože snižuje jejich houževnatost a zlepšuje kvalitu obroběné plochy. U středně a vysokouhlíkových ocelí s $\text{C} > 0,6 \%$ je výhodnější struktura tvořená globulárnám perlitem, zejména pro hrubovací operace. [21]

Velmi jemná struktura perlitu se nazývá sorbit a zvyšuje tvrdost oceli, a zhoršuje proto její obrobiteľnost. V případě martenzitické struktury je obrobiteľnost značně zhoršena vlivem velké tvrdosti martenzitu. Negativně na obrobiteľnost také působí austenitická struktura, především kvůli své vysoké houževnatosti a vysoké zpevňovací schopnosti. [21]

Optimální obsah uhlíku z hlediska obrobiteľnosti je 0,3 až 0,35 % v případě, že je v oceli přítomen mangan, tak se optimální hodnota snižuje až na 0,15 %. U ocelí slitinových, které mají obsah 0,6 až 1,2 % C je vliv manganu na obrobiteľnost již malý, protože u nich převyšuje vliv slitinových prvků. [21]

Mangan Mn

Mangan patří mezi austenitotvorné prvky, zvyšuje pevnost i tvrdost oceli, tudíž se s jeho rostoucím obsahem zhoršuje obrobiteľnost. V menším množství (u martenzitických ocelí 1,2 až 1,3 % Mn) se u nízkouhlíkových ocelí jejich obrobiteľnost zlepšuje, protože se snižuje jejich houževnatost. [17] [21]

Křemík Si

Křemík patří do skupiny silně feritotvorných prvků. Rozpustnost křemíku v α -železe je vysoká. Také zvyšuje pevnost a tím i tvrdost oceli, tudíž její obrobiteľnost zhoršuje. Do 0,2 až 0,3 % Si u nízkouhlíkových ocelí obrobiteľnost zlepšuje, u slitinových ocelí nemá do 2 % na obrobiteľnost podstatný vliv. Křemík zhoršuje obrobiteľnost také svými dezoxidačními vlastnostmi. V oceli vytváří s kyslíkem tvrdé vměstky SiO_2 , které značně zhoršují obrobiteľnost. [17] [21]

Síra S

Síra má velmi příznivý vliv na obrobiteľnosť. Již velmi malé odchylky v koncentraci, například již mezi 0,01 % a 0,03 %, mohou mít zásadní vliv na obrobiteľnosť. Tohoto efektu se využívá u automatových ocelí. Síra tvoří měkké inkluze sulfidu manganu MnS, které vytvářejí tenkou lubrikační vrstvu mezi třískou a ostřím břitové destičky. Při obsahu 0,08 až 0,3 % síra výrazně zlepšuje obrobiteľnosť, protože snižuje houževnatost oceli, snižuje intenzitu otěru a příznivě působí na vznik krátké třísky. [18] [21]

Fosfor P

Fosfor do obsahu 0,25 % obrobiteľnosť oceli zlepšuje především u nízkouhlíkových ocelí. Běžné oceli mají obsah fosforu okolo 0,05 %, s výjimkou ocelí vyráběných v Bessemerově konvertoru, které mají obsah fosforu až 0,12 %, a proto jsou dobře obrobiteľné. Pokud je přítomen ve feritu tak snižuje houževnatost oceli, a tudíž zvyšuje opotřebení otěrem. [18] [21]

Olovo Pb

Olovo je v železe nerozpustné, je v základní hmotě feritu dispergováno v malých částechkách a obrobiteľnosť oceli výrazně zlepšuje. Snižuje intenzitu opotřebování břitu díky své nízké teplotě tavení a současně příznivě působí na vytváření krátké třísky. Vliv olova je výrazný především u nízkouhlíkových ocelí než u ocelí s vysokým obsahem uhlíku. Na rozdíl od síry olovo nezhoršuje mechanické vlastnosti. [18] [21]

Chrom Cr

Chrom patří do skupiny feritotvorných prvků. Do obsahu 0,5 % je jeho vliv na obrobiteľnosť zanedbatelný. V ocelích se část chromu rozpustí v základní kovové matici, část tvoří s uhlíkem karbidy. Při nízkém obsahu chromu se tvoří směsný karbid (Fe, Cr) 3C, označovaný jako KC nebo M3C. S rostoucím obsahem chromu se postupně objevuje (Fe, Cr) 7 C3 (karbid K2), později (Fe, Cr) 23C6 (karbid K1). Tyto karbidy mají vysokou tvrdost, z nich nejvyšší tvrdost má karbid K2. Vliv tvrdosti těchto karbidů značně zhoršuje obrobiteľnosť při vysokém obsahu chromu. [17] [21]

Nikl Ni

Nikl patří mezi austenitotvorné prvky. Nevytváří samostatný karbid, takže je úplně rozpuštěn v základní matici. Nikl zvyšuje pevnost a tvrdost feritu, v němž je rozpuštěn, více než chrom, ale méně než mangan a křemík. Velmi špatnou obrobiteľnosť majú chromniklové oceli, zejména nerezavějící s austenitickou strukturou. Obrobiteľnosť oceli se značně zhoršuje při obsahu niklu nad 8 %. [17] [21]

Wolfram W

Wolfram patří mezi feritotvorné prvky, je také silně karbidotvorný. Rozpouští se ve feritu a také s ním vytváří podvojně karbidy. U nízkolegovaných ocelí zjemňuje wolfram lamely perlitu, takže zvyšuje pevnost. Obrobiteľnosť oceli se v celém rozsahu s rostoucím obsahem wolframu zhoršuje. Zvyšuje odolnost proti opotřebení oceli, tím pádem dochází ke zvýšení otěrového opotřebení nástroje. [17] [19]

Molybden Mo

Molybden patří mezi feritotvorné prvky. Část molybdenu se rozpouští ve feritu, čímž jeho tvrdost zvyšuje a část tvoří podvojně karbidy. Patří mezi středně silné karbidotvorné prvky. Až do 0,4 % obrobiteľnosť výrazně nezhoršuje, při vyšším obsahu dochází k výraznému zhoršení obrobiteľnosti. [17] [21]

Vanad V

Vanad patří mezi silně feritotvorné prvky. Vanad tvoří s uhlíkem velmi stabilní karbid VC, případně se však může částečně rozpouštět v cementitu a zvyšuje jeho pevnost. Karbidy vanadu mají vysokou tvrdost, pohybující se okolo 2500 HV, které mají za následek značné zvyšování intenzity otupování bříty. S rostoucím obsahem vanadu se proto obrobiteľnosť oceli zhoršuje. Obrobiteľnosť chrom-vanadových ocelí je však lepší než chrom-niklových. [17] [21]

Niob Nb

Niob je silně karbidotvorný prvek, tvoří s uhlíkem karbid NbC. Zvyšuje pevnost oceli za tepla, a tudíž nepříznivě působí na obrobiteľnosť. Zvyšuje opotřebení otěrem. Používá se, jako očukující přísada pro zjemnění zrna tím pádem činí ocel houževnatější a obtížněji obrobiteľnou. [17] [18] [19]

Kobalt Co

Kobalt nevytváří karbidy, je úplně rozpustný ve feritu, jehož pevnost značně zvyšuje. Na obrobiteľnosť má v celém rozsahu negativní vliv. [21]

Poměrný vliv jednotlivých prvků na obrobiteľnosť oceli je přehledně sepsán pro různé tepelné a technologické zpracování oceli v tabulce 1 níže. [21]

Tabulka 1: Přehled vlivu jednotlivých prvků na obrobitelnost oceli [21]

C	C	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Si
0,1 až 0,3 %	0,3 až 0,8 %	0,25 až 2 %	0,15-- %	2,-- %	1,1-- %	5,-- %	0,75-- %	0,25-- %	2,-- %
válcované, kované nebo normalizované oceli									
+U2	- 2U	- 6U	+ 6M	+ 10U	- 2U	- 10U	- 5U	0	- 2U
žíhané oceli na maximum perlitu									
+2U	+ 3S	- 2U	+ 6U	+ 10U	- 2U	- 10U	- 4U	- 1U	- 2H
kalené a popuštěné oceli do 300 HB									
0	0	- 2H	+ 4U	+ 8U	0	- 10U	- 4U	0	- 2U
kalené a popuštěné oceli do 400 HB									
0	0	- 4H	+ 2U	- 3U	0	- 10U	- 4U	0	- 2U

Číslo označuje poměrnou intenzitu vlivu prvku na obrobitelnost, + v kladném, - v záporném smyslu; U – vliv prvku

na obrobitelnost je úměrný jeho množství v oceli; M – malé množství prvku v oceli je nejvýhodnější; H – doporučený je velký obsah prvku, blízký horní hranici; S – střední obsah prvku je nejvýhodnější

3.4 Další faktory ovlivňující obrobiteľnosť

Obrobiteľnosť oceli môže byť ovplyvnená kladne alebo záporne vměstky. Z metalurgických pochodů zůstávají v oceli struktury z různých oxidů. Oxidy železa, manganu a síry obrobiteľnosť nezhoršujú, ke zhoršení obrobiteľnosti dochází v případě, že se ve struktuře vyskytují oxidy hliníku a křemíku. Po dezoxidačním procesu zůstávají v oceli rozptýleny mikročástičky dezoxidačních prvků. Při použití FeSi+Al vznikají velmi tvrdé vměstky oxidu křemíku a hliníku, které obrobiteľnosť značně zhoršují. Při dezoxidaci CaSi, Ca-Mn-Si nebo Ca-Si-Al jsou vměstky tvořené převážně oxidy vápníku, které výrazně snižují intenzitu otupování břitu a zvyšují tím obrobiteľnosť. Další skupinou vměstků jsou prvky nerozpustné ve feritu, přidávané do oceli v tekutém stavu pro dosažení krátké, lámavé třísky. Nejčastěji se jedná o síru, olovo případně telur nebo selen. [21]

Obrobiteľnosť oceli je také možné zlepšit tepelným zpracováním: [21]

- a) Žihání naměkko – zahřátí oceli na 535 až 685 °C po kování, mezi hrubováním a obráběním na čisto, odstraní se tím také vnitřní pnutí, ale výrazně se prodlužuje doba výroby a také dochází ke značnému zdražení.
- b) Normalizační žihání – zahřátí oceli na 815 až 925 °C a pomalé ochlazování v peci. Tím docílíme zlepšení obrobiteľnosti u ocelí do 0,4 % C. Používá se po kování a válcování. U vysokouhlíkových ocelí však normalizačním žiháním docílíme zhoršením obrobiteľnosti, protože dojde ke zvýšení tvrdosti.
- c) Sferoidizační žihání – docílí se zrnitý (globulární, sferoidizovaný) perlit, je měkčí a tvárnější než výchozí lamelární perlit. Provádí se ve vakuu ohřevem nad teplotu A_{c1} . U ocelí s obsahem C > 0,45 % se snižuje tvrdost a zlepšuje obrobiteľnosť. [20]
- d) Cyklové žihání – jedná se o tepelné zpracování s kontrolovanou teplotou a dobou ochlazování, tímto postupem se získá lamelární perlit, který u nízkouhlíkových ocelí zlepšuje drsnost obroběné plochy.
- e) Kalení s rychlým ochlazením – od vody nebo do oleje a popouštění pod kritickou teplotou se zvýší tvrdost na 200 až 300 HB, tím se docílí jemná sferoidní struktura. Toto tepelné zpracování je vhodné pro dokončovací operace například při výrobě ozubení. Získá se velmi dobrá kvalita obroběné plochy.

3.5 Obrobitelnost konstrukčních ocelí

U konstrukčních ocelí je hlavní složkou železo. Obsah uhlíku v oceli je v množství od 0,05 až do 0,8 % a je velmi často používaným materiálem obráběných součástí. Konstrukční ocel nelegovaná je složena ze železa, uhlíku a doprovodných prvků kde je jejich množství závislé na výrobním procesu a použitých surovinách. Na druhou stranu ocel legovaná obsahuje legující prvky, které se do oceli přidávají úmyslně, za účelem upravení některých vlastností. Změnou obsahu prvků, případně různými tepelnými zpracováními můžeme vyrobit neobyčejně velký počet ocelí s rozdílnými vlastnostmi. [57] [58]

3.5.1 Obrobitelnost nelegovaných konstrukčních ocelí

Klasifikace nelegovaných konstrukčních ocelí se řídí dle obsahu uhlíku. Rozdělení může být následující: [58]

- ocel zvláště nízkouhlíková - C = 0,05 až 0,1 %,
- ocel nízkouhlíková - C = 0,1 až 0,25 %,
- ocel se středním obsahem uhlíku - C = 0,25 až 0,55 %,
- ocel s vysokým obsahem uhlíku - C = 0,55 až 0,8 %.

Konstrukční oceli obvyklých kvalit jsou nejčastěji nízkouhlíkové, jako například stavební ocel, tvarová tyčová ocel, ocel pro důlní kolejnice a konstrukční prvky. Konstrukční oceli středně uhlíkové se používají k výrobě částí strojů a tlakových nádob převážně zpracované technologií tvářením. Slouží však také jako konstrukční oceli, které jsou obráběny reznými nástroji. Tyto oceli jsou velmi často cementovány a kaleny nebo jsou v určitých místech ještě indukčně povrchově kaleny po prvním tepelném zpracování. Oceli s vysokým obsahem uhlíku jsou převážně korozivzdorné oceli, které jsou vysoce legované chromem (6 až 26 % Cr). [58] [59]

Pokud se zaměříme na obrobitelnost konstrukčních ocelí s nízkým obsahem uhlíku, které nedosahují příliš vysoké tvrdosti ale vyšší tvárnosti, jsou tyto vlastnosti ve vztahu k obrobitelnosti často negativním faktorem, které se projevují nedělenou třískou a tvorbou nárůstku na břitů nástroje a také zkrácením trvanlivosti břítu rezného nástroje a zhoršením kvality obrobenej plochy. Vyšší obsah uhlíku v oceli zlepšuje obrobitelnost. Dochází k mírnému zvýšení tvrdosti a ke snížení tvárnosti, což má pozitivní vliv na obrobitelnost. Obrobitelnost nelegovaných konstrukčních ocelí pozitivně ovlivňuje

přidání přísad, které zlepšují utváření třísky případně tvorbu nárůstku. Dále je možné obrobiteľnost zlepšit upravením řezných podmínek případně úpravou geometrie břitu nástroje. Tyto oceli obsahují také velice často mangan, který však nelze považovat za legující prvek v případě, že jeho obsah nepřekročí 2 %. Při obsahu okolo 1,5 % Mn snižuje houževnatost oceli a má příznivý vliv na její obrobiteľnost. [58] [8]

3.5.2 Obrobiteľnost legovaných konstrukčních ocelí

Pokud je obsah legujících prvků nižší než 5 % můžeme říci, že se jedná o ocel nízkolegovanou. V případě, že je podíl legujících prvků vyšší, než 5 % jedná se o ocel vysoce legovanou. Tyto vysoce legované oceli mají obvykle vyšší stabilitu a tvrdost než uhlíkové oceli obvyklých kvalit, a tím pádem kladou vyšší nároky na obrábění, protože zvýšený podíl legujících prvků zvyšuje nejčastěji tvrdost a pevnost materiálu, a tím zvyšuje opotřebení břitu a zhoršuje obrobiteľnost. [58]

Podíl legujících prvků v ocelích bývá poměrně nízký, velmi často kvůli vysoké ceně těchto prvků, často činí méně než jedno procento. Legující prvky se do oceli přidávají, protože mají trvalý vliv na strukturu oceli, na eutektoidní bod, na přeměnu struktury tak i na tvrdost, pevnost, odolnost proti opotřebení a antikorozi vlastnosti. Velmi často se u konstrukčních legovaných ocelí vyskytuje nikl (Ni), chrom (Cr) a molybden (Mo), které patří k typickým přísadám těchto ocelí. Dalšími prvky pak mohou být wolfram (W), vanad (V) a kobalt (Co). Tyto prvky mají spíše negativní vliv na obrobiteľnost. Některé prvky vlastnosti obráběných materiálů zlepšují, Jedná se například o olovo (Pb), křemík (Si), bismut (Bi), mangan (Mn) atd. Další možností jak zlepšit obrobiteľnost legovaných konstrukčních ocelí je vhodné tepelné zpracování. [58]

Některé druhy vysoce legovaných konstrukčních ocelí je třeba před obráběním žíhat, a to z důvodu, aby bylo možné dosáhnout uspokojivých výsledků při obrábění nástroji ze slinutých karbidů. Vhodným řezným materiálem pro obrábění kalených ocelí je kubický nitrid boru, který může být díky dosahovaným parametrům obroběné plochy, alternativou k některým dokončovacím operacím např. broušení. Vanad, chrom, wolfram a molybden tedy kovy s vysokou pevností, jsou-li použity jako legující prvky, vytvářejí v oceli velmi tvrdé karbidy [58] a zvyšují tím abrazivní opotřebení břitu nástroje při obrábění.

Legované konstrukční oceli zahrnují velkou skupinu materiálů výrobků, které se dále zpracovávají. Uvážíme-li různorodost vlastností, struktur i tepelných zpracování je

zřejmé, že i obrobitelnost těchto materiálů bude velmi rozdílná. [58] K dosažení kvalitně obrobeného výrobku je nutné správně volit nástroj, řezné podmínky a mít dostatečnou znalost materiálu k dosažení optimálního procesu obrábění.

3.5.3 Obrobitelnost automatových ocelí

Automatové oceli jsou zvláštní podskupinou konstrukčních ocelí, které jsou typické lepší obrobitelností díky legujícím prvkům. Automatovou ocelí je označován materiál, který při jeho obrábění vytváří krátkou třísku, dále pak zajišťuje nízké otupování nástroje a čistý povrch obrobku. Takové vlastnosti obrobitelnosti propůjčují automatovým ocelím přísady: olovo, síra, fosfor a další. Ne příliš časté jsou přísady selenu respektive antimonu, bismutu či teluru. Podle chemického složení a oboru použití jsou na trhu k dispozici různé automatové oceli (například: bez tepelného zpracování, cementační a zušlechtěné). Kromě toho se automatové oceli vyskytují i ve skupině nitridačních ocelí (např. 14 340, 15 340) nebo také ve skupině korozivzdorných ocelí (např. 17 023, 17 242), u všech těchto ocelí je zvýšený obsah síry. [25]

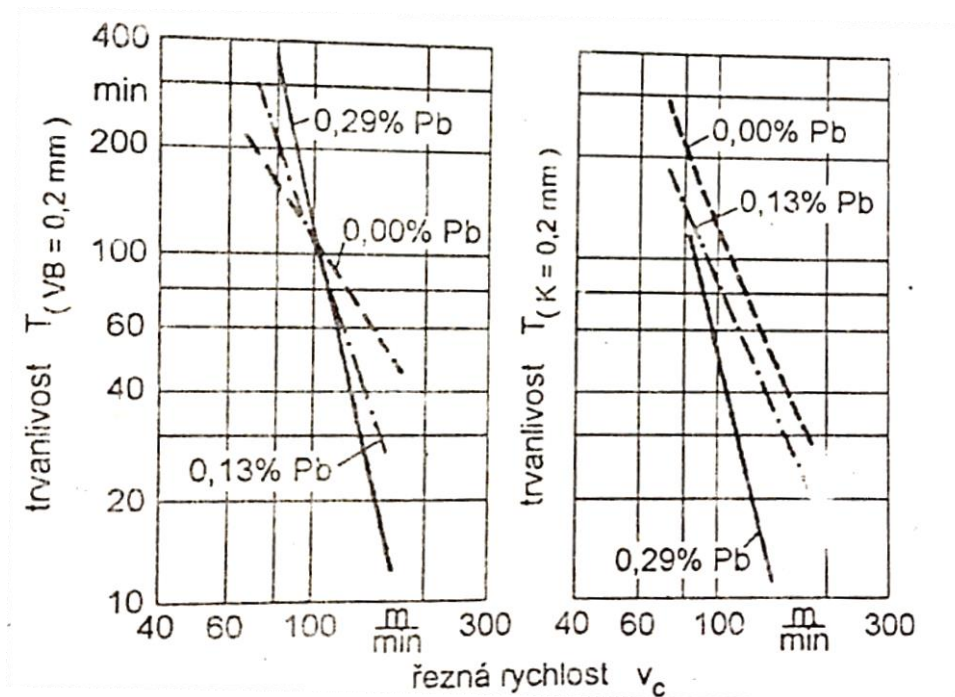
Při výrobě oceli podporuje fosfor svým relativně nízkým koeficientem difuze v oceli tvorbu vměstků. Tato nežádoucí strukturní složka se dá jen částečně odstranit následným tepelným zpracováním. Difuzním žíháním za vyšších teplot je možné kompenzovat jen makrovměstky (krystalky, rozdíly v koncentraci). Při dlouhých výdržích na žíhacích teplotách můžeme docílit odstranění blokové segregace, avšak bude docházet ke zhrubnutí zrna. Uklidnění oceli před jejím litím pomáhá snížit vměstky v odlitku. Fosfor podporuje vylučování uhlíku i dusíku, které vyvolá zkřehnutí feritu. Precipitace roste se stoupající teplotou, tudíž popouštěcí křehkost silně stoupá a vrubová houževnatost se snižuje již od 100 °C. Za těchto podmínek způsobuje fosfor zhoršení pevnosti, takže automatové oceli při střední teplotě 200 °C až 400 °C jsou ve střížné rovině křehké. Toto zjištění je pozitivní pro obrábění, neboť se při úběru tvoří krátká lámavá tříška. Delším pozitivním efektem je snížení nebezpečí vzniku „lepené“ třísky v kontaktním pásmu, a tím se zlepšuje kvalita obrobené plochy. Automatové oceli obsahují přibližně do 0,1 % fosforu. [25]

Síra je jen málo rozpustná v Fe, ale tvoří v oceli rozdílně stabilní sirníky. Sirník (FeS) je v oceli nežádoucí. Má relativně nízký bod tavení (asi 1389 °C), vylučuje se po hranicích zrn a je příčinou lomu oceli za červeného žáru. Přidáním odpovídajícího množství Mn do oceli vzniká MnS, protože síra má větší afinitu k manganu, který je

vhodnou a žádoucí složkou automatové oceli. Bod tavení MnS je 1620 °C. MnS má negativní vliv na tvářenání a na pevnost ale pozitivně působí na obrobiteľnosť. Důvodem je, že se snižuje vnitřní tření ve střižné rovině obrobku a tření v kontaktním pásmu třísky a nástroje. Výsledky výzkumů poukazují na to, že vměstky MnS jsou výchozím bodem kluzu (při stříhu) ve střižné oblasti. Síra snižuje i otupování nástroje a proto je z hlediska obrobiteľnosti automatových ocelí výhodnější přísadou než fosfor. [25]

Olovo se v železe α nerozpouští a ve struktuře má tvar submikroskopických vycezenin. Olovo ovlivňuje negativně pevnost a houževnatost oceli a to zvláště v intervalu teplot 250 °C až 400 °C. Teplota tání olova je relativně nízká (asi 326 °C). Při obrábění oceli legované olovem se může vytvářet tenký film na kontaktní ploše mezi nástrojem a obrobkem. Tím může docházet ke snížení náchylnosti k lepení třísky a docílí se tím i lepší lámavosti třísky. Olovo v oceli snižuje až o 50 % měrný řezný odpor a podporuje vytváření krátké lámavé třísky. [25]

Přidáním olova (asi 0,25 %) do automatové oceli může prodloužit trvanlivost nástroje přibližně o 50 % až 70 %. Působení olova na otupování nástroje je rovněž závislé na volbě řezných podmínek jak můžeme vidět na obrázku níže (Obr. 4), kde jsou porovnány poměry otupení nástroje při obrábění automatových ocelí legované olovem a bez olova. [25]



Obr. 4: Vliv olova na trvanlivost při soustružení automatové oceli [25]

Z průběhu přímek je patrné, že zvýšení přísady olova od 0 % na 0,29 % při řezných rychlostech do 100 m/min vykazuje snížení otupování na hřbetě. Řezná rychlost nad 100 m/min mění poměry otupování na hřbetě v opačném směru. Otupování nástroje vymíláním na čele se u automatových ocelí stejného složení chová nezávisle na řezných rychlostech. Při řezné rychlosti nad 100 m/min nebo při velkých posuvech je olověný film neúčinný a otupování postupuje intenzivněji (všechny přímky se téměř překrývají). Automatové oceli jsou obvykle legovány olovem v intervalu $0,15 \% < \text{Pb} < 0,3 \%$. Příznivé působení olova na obrobiteľnosť dovoluje obrábět tyto oceli na soustružnických automatech. [25]

Podobný účinek jako olovo mají také telur, bizmut a antimon, které pomáhají zlepšovat lámavost třísky a mazání v kontaktním pásmu a také snižují otupování nástroje. [25]

3.5.4 Obrobiteľnosť automatových ocelí legovaných bismutem

Světovým trendem ve výrobě automatových ocelí je vyrábět oceli se zvýšenou obrobiteľnosťí, legované zejména bismutem (Bi), telurem (Te) a v poslední době také cínem (Sn). V případě legování těmito prvky je zaručena zvýšená obrobiteľnosť, která se projevuje snížením opotřebení břitu nástroje při zvýšených řezných rychlostech. [60]

V současnosti je nejrozšířenější výroba automatových ocelí legovaných olovem. Olovo je však považováno za možný lidský karcinogen, a proto jeho použití vyžaduje velmi přísné bezpečnostní a hygienické opatření především u součástí, které přicházejí do styku s pitnou vodou. Proto je snaha nahradit oceli legované olovem a nahradit je oceli legované prvky s podobnými vlastnostmi. [60]

Vhodný prvek, který nahrazuje olovo je bizmut. Stejně jako olovo je i bizmut těžký kov. Bizmut se v periodické soustavě prvků nachází hned vedle olova, svými fyzikálními a chemickými se velmi podobá olovu. Stejně jako olovo je v tuhém stavu oceli nerozpustný a tvoří obal MnS vměstků, zamezuje řádkování a protahování sulfidů, což má pozitivní vliv na obrábění i tváření. Na rozdíl od olova je však bizmut netoxický a ekologicky neutrální. [60]

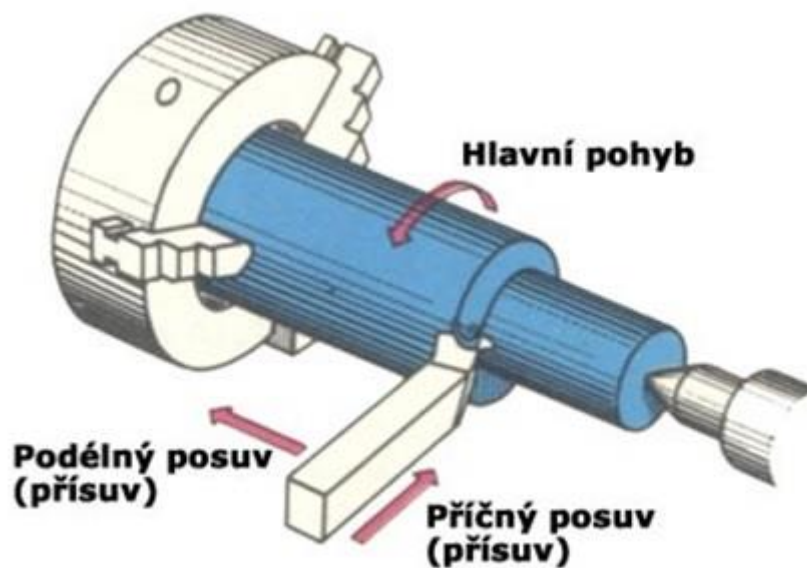
Na Fakultě strojní Českého vysokého učení technického v Praze byl prováděn výzkum obrobiteľnosti automatových ocelí legovaných sírou a legovaných bismutem. Výsledky výzkumu prokázaly, že v oblasti použitelných řezných podmínek došlo

k výraznému zlepšení obrábělnosti. Při zachování stávající trvanlivosti nástroje je možné zvýšit řeznou rychlost o 40 %, což je srovnatelné s automatovými oceli legovanými olovem. [60]

4 Technologie výroby pláště tlumiče

4.1 Soustružení

Soustružení je jeden z nejrozšířenějších způsobů třískového obrábění, které v dnešní době představuje až třetinu ze všech obráběcích operací. Soustružení se provádí za pomoci jednobřítých nástrojů. Nejčastěji se obrábějí válcové plochy a to jak vnitřní, tak vnější, dále lze obrábět vnější i vnitřní kuželové plochy a obecné tvarové plochy. Hlavní pohyb rotační koná nejčastěji obrobek, vedlejší pohyb ve směru osy obrobku (posuv) a ve směru kolmém na osu obrobku (přísuv) koná nástroj (Obr. 5). [42]



Obr. 5: Kinematika soustružení [44]

Soustružení můžeme rozdělit na čtyři hlavní způsoby: podélné soustružení, čelní soustružení, soustružení tvarů a kopírovací soustružení. Dalšími způsoby může být: obrábění osazení, přechodů mezi průměry a srážení hran. Výsledkem podélného posuvu je válcová plocha, výsledkem příčného posuvu je čelní rovinná plocha. Koná-li nástroj oba posuvy současně, vzniká obecná rotační plocha. V případě, že nástroj koná přísuv, tak tímto pohybem, který probíhá před obráběním, se nastavuje požadovaná hloubka

řezu. Řídicí systémy používané na dnešních soustruzích jsou na tak vysoké úrovni, že dokáží zajistit všechny druhy soustružnických operací. [42] [43]

4.2 Volba řezných podmínek při soustružení

Při volbě řezných podmínek pro soustružení vycházíme jako první z přídávku, který je třeba odebrat, tedy jaká bude hloubka řezu a_p . Ta je omezena délkou ostří břitu nástroje a neměla by přesáhnout 2/3 délky břitu. Pokud je to možné měl by být přídavek odebrán v jedné operaci. V dalším kroku stanovíme velikost posuvu na otáčku f . Hodnota posuvu má významný vliv na kvalitu obrobku, a proto by jeho volba měla vycházet z požadavků výkresové dokumentace, především při dokončování na čisto by tato hodnota měla být optimální. Můžeme říci, že kvalita povrchu je nepřímo úměrná posuvu nástroje, tedy čím je menší posuv, tím je kvalitnější obrobek. Výsledná kvalita obrobku je také omezena geometrií nástroje, tuhostí a možnostmi stroje. Velikost posuvu a počet otáček nám určuje posuvovou rychlost v_f . Poslední hodnotou je řezná rychlost v_c . Její hodnoty se pohybují v rozmezí 10 až 600 (i více) [m/min]. A to v závislosti především na materiálu obráběcího nástroje a na druhu obráběného materiálu. Pro různé materiály se používají různé řezné rychlosti. [23] Optimální řezná rychlost by měla vycházet z optimální trvanlivosti nástroje. Pokud obrábíme vyššími řeznými rychlostmi, vzniká v místě řezu více tepla a je tedy vhodnější použít vhodné povlaky, které snižují součinitel tření a odolávají vyšším řezným rychlostem. Hodnoty výše uvedených veličin můžeme vyjádřit dle následujících základních vztahů:

Řezná rychlost

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} \text{ [m/min]} \quad (4.1)$$

Kde: v_c - řezná rychlost [m/min]

D - průměr obráběné plochy [mm]

n - otáčky obrobku [ot/min]

Posuvová rychlost

$$v_f = \frac{f \cdot n}{10^3} \text{ [m/min]} \quad (4.2)$$

Kde: v_f - posuvová rychlost [m/min]

f - posuv na otáčku [mm]

Hloubka řezu (šířka záběru)

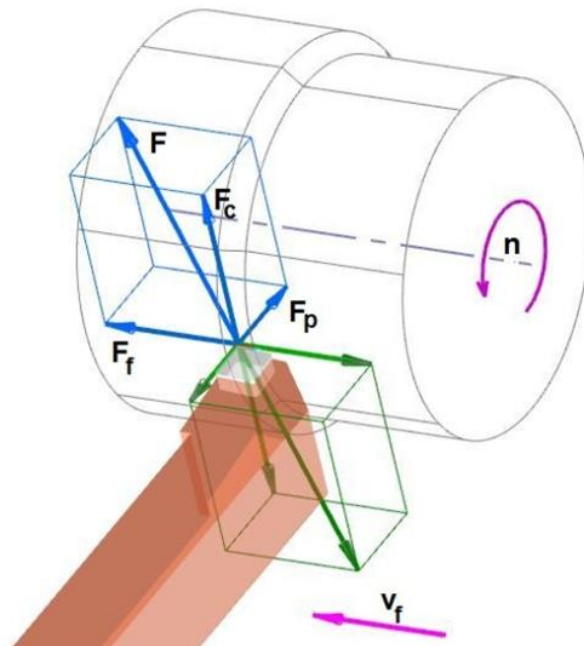
$$a_p = \frac{1}{2} \cdot (D - d) \text{ [mm]} \quad (4.3)$$

Kde: a_p - hloubka řezu (šířka záběru) [mm]

d - průměr obrobenej plochy [mm]

4.3 Řezné síly

Celková řezná síla F je složena z: řezné síly F_C , z posuvové síly F_f a z pasivní síly F_p (Obr. 6). Výpočet těchto jednotlivých složek řezné síly pro podélné soustružení válcové plochy stanoví podle vztahů [34]:



Obr. 6: Řezné síly při podélném soustružení [45]

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} [N] \quad (4.4)$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} [N] \quad (4.5)$$

$$F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} [N] \quad (4.6)$$

Kde: $C_{F_c}, C_{F_f}, C_{F_p}$ - materiálové konstanty [-]

$x_{F_c}, x_{F_f}, x_{F_p}$ - exponenty vlivu a_p [-]

$y_{F_c}, y_{F_f}, y_{F_p}$ - exponenty vlivu f [-]

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} [N] \quad (4.7)$$

Měrná řezná síla k_c vyjadřuje řeznou sílu, vztaženou na jednotku plochy řezu. Je definována jako poměr řezné síly F_c a plochy jmenovitého průřezu třísky A_D . [34] Tuto definici lze vyjádřit vztahem:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} [N/mm^2] \quad (4.8)$$

Jmenovitý průřez třísky A_D vyjádříme vztahem:

$$A_D = a_p \cdot f [mm^2] \quad (4.9)$$

Celkový výkon obráběcího stroje, potřebný pro pokrytí řezného výkonu a pasivních oporů stroje se vypočítá podle vztahu:

$$P_m = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta} [kW] \quad (4.10)$$

Kde: η - mechanická účinnost stroje [-]

4.4 Nástroje – soustružnické nože

Soustružnické nože jsou jednobřité nástroje jednoduchých tvarů, které nemají příliš vysokou cenu v porovnání například s protahovacími trny, a jsou jednoduché z hlediska údržby. [45] Nástroje pro třískové obrábění (soustružnické nože), můžeme rozdělit podle několika hledisek. Mezi základní rozdělení patří [42]:

- podle materiálu nože (z nástrojové a rychlořezné oceli, s břitovými destičkami ze slinutých karbidů, atd.),
- podle druhu obráběcího stroje (soustružnické, revolverové), podle charakteru obrábění (ubírací, zapichovací, upichovací, atd.),
- podle polohy hlavního ostří (pravé, levé, souměrné).

4.4.1 Soustružnické nože s VBD

Dříve byly běžně používány monolitní (celistvé) nástroje pro práci na konvenčních strojích, které byly vyrobeny z jednoho druhu nástrojového materiálu, nejčastěji nástrojové nebo rychlořezné oceli. S nástupem číslicově řízených strojů byly monolitní nástroje vytlačeny moderními nástrojovými držáky, do kterých se upínají vyměnitelné břitové destičky (VBD). Způsob obrábění s VBD je stejný jako u monolitních nástrojů s tím rozdílem, že u nástrojů s VBD se při opotřebení břitu mění pouze břitová destička. Není nutné tak opotřeбенý nástroj vyřadit či nechávat přeastřit. Při obrábění VBD je možné si zvolit vhodný materiál břitové destičky s ohledem na obráběný materiál. Výběr možných VBD je velice široký a jejich rozvoj je velice dynamický, dalo by se říci, že řezné materiály předběhly vývoj obráběcích strojů. [47]



Obr. 7: Ukázka soustružnických nožů s VBD [48]

4.4.2 Vyměnitelné břitové destičky

Vyměnitelné břitové destičky soustružnických nožů jsou vyráběny ze slinutých karbidů (SK), řezné keramiky, cermetů, polykrystalického kubického nitridu boru (PKNB) a polykrystalického diamantu (PD). VBD mohou být jednostranné, kde je břit (břity) pouze na jedné straně nebo oboustranné, kde jsou břity z obou stran. Čelní plochy destiček mohou být hladké, nebo na nich mohou být předlisované, případně vybroušené, utvařeče třísek. V dnešní době jsou téměř všechny používané vyměnitelné destičky vícebřité, proto když se břit otupí, stačí destičku pootočit a použít břit neopotřeбенý, pro další použití břitu (např. čtvercová jednostranná destička má 4 využitelné břity). Výměna destiček je snadná, rychlá a opakovatelná, tudíž není polohu břitu obvykle třeba seřizovat. Uložení břitových destiček v nožových držácích je tak, aby řezné odpory směřovaly do stěn držáku, aby bylo zamezeno zatěžování upínacího mechanismu. Sortiment břitových destiček je velice rozmanitý nabízí široký výběr tvarů, využití a geometrie destiček, které jsou normalizovány (Obr. 8). [34] [47]



Obr. 8: 1 - SK, tvar S, oboustranné, předlisovaný utvařeč; 2 - SK, tvar W, oboustranná, předlisovaný utvařeč; 3 - SK, zapichovací, předlisovaný utvařeč; 4 - SK, závitové; 5 - SK, upichovací, předlisovaný utvařeč; 6 - monolitní PKNB, tvar R; 7 - roubík PD, tvar C, jednostranná; 8 - roubík PD, tvar T, jednostranná, utvařeč; 9 - roubíky PD, tvar S, oboustranná; 10 - monolitní PKNB, tvar S, jednostranná, vybroušený utvařeč [34]

4.4.3 Povlaky vhodné pro bez kapalinové obrábění

Povlak TiAlN

Je v dnešní době jedním z nejpoužívanějších povlaků v moderním, vysoce výkonném obrábění a díky své vysoké tepelné a chemické odolnosti vhodný i pro suché obrábění. Povlaky TiAlN jsou odolné vůči oxidaci a v porovnání s povlakem TiN umožňují zvýšení produktivity až o 20 – 35 %. Tvrdost povlaku je přibližně 3000 HV a maximální pracovní teplota až 800 °C. [49] Některé vrstvy TiAlN jsou obohaceny o další prvky, jako je Cr, Y, Hf apod. Tyto přísady v malém množství pozitivně ovlivňují strukturu vrstev, a tím přispívají ke zvýšení jejich užitných vlastností. Vývoj těchto systémů je motivován především vysokými ekologickými a ekonomickými přínosy, v oblasti produktivních řezných aplikací, kde je vysoký výkon tepla, jako je například suché nebo vysokorychlostní obrábění. [50]



Obr. 9: VBD s TiAlN povlakem [51]

Povlak CrAlN

Alternativou k vrstvám TiAlN jsou nedávno zveřejněné vrstvy na bázi CrAlN bez přítomnosti Ti. Od této vrstvy se očekává vysoká chemická stabilita při vysokých teplotách a zvýšená adheze k substrátu. Maximální teploty použití, kdy dochází k masivní oxidaci vrstev CrAlN, se podle měření pohybují kolem 700 až 800 °C. V případě vytvoření oxidační ochranné bariéry Al-Cr-O se maximální pracovní teploty mohou pohybovat výše. Tvrdost nových vrstev Cr-Al-N je srovnatelná s povlakem TiAlN tedy přibližně 3000 HV. Proto lze předpokládat, že budou vhodně doplňovat vrstvy na bázi TiAlN v některých aplikacích s vysokými nároky na tepelnou stabilitu a chemickou odolnost. [50]

Povlak Duratomic

Duratomic (Durable + Atomic) povlak je připraven technologií na bázi speciálního uspořádání atomů hliníku a kyslíku, který zajišťuje zvýšenou pevnost a odolnost proti abrazi. I když je oxid v některém směru orientace atomů křehčí, naopak v jiném směru orientace atomové struktury je tvrdší a houževnatější, což je zde vhodně využito pro řezání. Řízená struktura oxidu hlinitého zajišťuje vyšší kvalitu povrchu povlaku, což se projeví snížením tření a tepelného zatížení při řezání. Plošky na zrnech uvedeného povlaku zabraňují tvoření nárůstků na břitu a zlepšují kvalitu obrobeného povrchu. Povlak pozitivně ovlivňuje opotřebení, zvyšuje trvanlivost nástroje, který je možné využít i pro obrábění korozivzdorných ocelí. Zlepšené teplotní poměry v místě řezání se projeví menším opotřebením čela i deformací břitu a zvýšenou trvanlivostí. Výrobce doporučuje Duratomic za první volbu pro soustružení ocelí, včetně korozivzdorných. [67]



Obr. 10: VBD s Duratomic povlakem [66]

4.4.4 VBD vhodné pro zlepšení drsnosti povrchu

Vzhledem k tomu, že v případě obrábění trubky pláště tlumiče je požadováno dodržení předepsané drsnosti povrchu při dodržení výrobního taktu, zařazují do práce tuto podkapitolu. V této podkapitole uvedu vyměnitelné břitové destičky, které zvyšují kvalitu povrchu při zachování stejného posuvu, případně i jeho zvýšení.

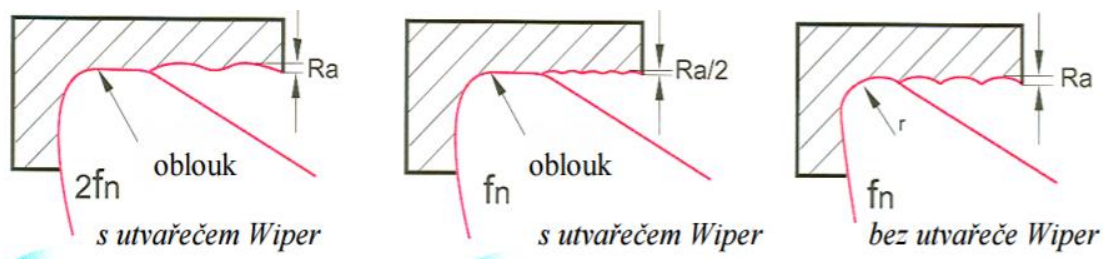
Při třískovém obrábění, ostatně jako i v dalších oborech, jsou produktivita a kvalita rozhodujícími faktory ovlivňujícími úspěch výrobce na trhu. Zvýšit produktivitu při zachování kvality obrobené plochy nebo možnost při stejné produktivitě zvýšit

kvalitu obrobené plochy, to umožňují vyměnitelné břitové destičky s hladicí geometrií často označovanou jako WIPER utvařeč. [75]

WIPER utvařeč

Jedná se o hladicí segment s nulovým nebo menším vedlejším úhlem nastavení ostří oproti standardním vyměnitelným břitovým destičkám. Tento hladicí segment je tedy specifický svou geometrií na špičce břitu, která se používá pro zlepšení schopnosti odvodu třísky a dosažení lepší drsnosti obrobené plochy. Touto geometrií se dosáhne snížení výšky stopy, kterou po sobě špička nástroje zanechává (Obr. 11). [52] Dvě základní výhody těchto destiček jsou: [75]

- možnost dosažení dvakrát lepší drsnosti obrobeného povrchu oproti standardní geometrii, což otevírá cestu k odstranění dokončovacích operací a sloučení s hrubováním. Zůstává zachována požadovaná drsnost a zkracuje se čas potřebný pro obrábění, dochází tedy k úspoře výrobních nákladů;
- další předností je možnost zvýšení posuvu na dvojnásobek při zachování dosažené drsnosti povrchu. Vyšší posuv znamená vyšší produktivitu a opět úspory výrobních nákladů.



Obr. 11: Ukázka zlepšení parametru Ra pomocí Wiper utvařeče [52]

Hladicí geometrie břitu je doplněna utvařečem třísky zajišťující bezproblémový odvod třísky a vysokou stabilitu obrábění. Vyměnitelné břitové destičky s hladicí geometrií jsou značeny standardním ISO kódem, který je u pozice 7 označující poloměr špičky doplněn písmenem W (WIPER). Příkladem značení může být často používaná destička CNMG 120408W-M. [75]

4.5 Soustruhy

Soustruhy jsou obráběcí stroje, na kterých se metodou soustružení obrábí výrobek (obrobek) do potřebného rotačně souměrného tvaru. Pro tento druh obrábění je důležitá vyšší rychlost otáčení obráběné součásti. Obrobek je při práci upevněn v rotační části stroje. [28]

Rozdělení podle použití a konstrukčního řešení na:

- univerzální hrotové soustruhy
- čelní soustruhy
- svislé soustruhy (karusely)
- revolverové soustruhy
- soustružnické automaty
- speciální jednoúčelové soustruhy
- NC a CNC soustruhy

Univerzální hrotové soustruhy

Jsou určeny k obrábění válcových ploch obrobků upnutých v hrotech, ve sklíčidle, na trnech, upínací desce. Univerzální hrotové soustruhy jsou vybaveny vodicím šroubem, který umožňuje řezání závitů nožem. Mají velký rozsah otáček a posuvů, což charakterizuje jejich univerzálnost. Velikost hrotových soustruhů je dána oběžným průměrem D_o nad ložem a největší vzdáleností hrotů L_o . Podle velikosti oběžného průměru jsou: [54]

- malé - D_o do 250 mm,
- střední - D_o do 900 mm,
- velké - D_o nad 900 mm.

Čelní soustruhy

Čelní soustruh se používá zpravidla v kusové výrobě, při obrábění velkých přírubových součástí. Obrobek se upíná na lící desku. Lože a suport soustruhu tvoří samostatnou jednotku. Nevýhodou je obtížné vyrovnávání součástí při obrábění. [53] [54]

Svislé soustruhy (karusely)

Svislý soustruh – karusel - je vhodný pro těžké a velké obrobky, kde průměr je větší než výška obrobku. Jejich velikost je charakterizována největším oběžným průměrem, který je od 800 do 20 000 mm. Suport stroje je umístěn na stojanu, pro větší průměry bývají stojany dva. Konstrukce umožňuje obrábět několika nástroji najednou. [53] [46]

Revolverové soustruhy

Charakteristikou je revolverová hlava pro upnutí většího počtu nástrojů (6 až 16), která se uplatní u součástí, kde výrobní postup umožňuje provést více pracovních úkonů na jedno upnutí. Mohou mít revolverovou hlavu svislou nebo vodorovnou. [53]

Soustružnické automaty

Soustružnické automaty se uplatňují v sériové a hromadné výrobě. Pracují plně v automatickém cyklu, tj. včetně podávání a upínání polotovarů. Výchozím materiálem jsou zpravidla tyče. Automatizace vkládání a vyjímání polotovarů (přířezů, výkovek, odlítků aj.) se musí zajistit přídatným zařízením. Podle počtu pracovních vřeten se dělí na: jednovřetenové a několikavřetenové. [54]

Speciální jednoúčelové soustruhy

Jsou to soustruhy, na kterých je prováděna pouze jedna operace. Výrobní čas této operace je výrazně nižší než v případě univerzálního stroje. Jsou určeny především pro hromadnou výrobu součástí. Mají omezený rozsah posuvů i otáček a velmi často mají vyšší výkon než běžné soustruhy. Podávání i upínání polotovaru bývá zautomatizováno. Mezi speciální soustruhy patří kopírovací, podtáčecí, na klikové hřídele, na válcovací stolice, na řezání závitů atd.

NC a CNC soustruhy

NC a CNC stroje jsou dnes nejpoužívanějšími soustruhy pro sériovou i hromadnou výrobu. Mají obvyklou konstrukci předešlých soustruhů, jsou ale navíc vybaveny řídicí jednotkou, která ovládá jak pohyby nástroje, tak i výměnu nástrojů, rychloposuvy, chlazení a jiné operace. Umožňují rychlý přechod na výrobu jiného typu obrobku (výměnou programu a předem seřízenými nástroji). [53] [54]

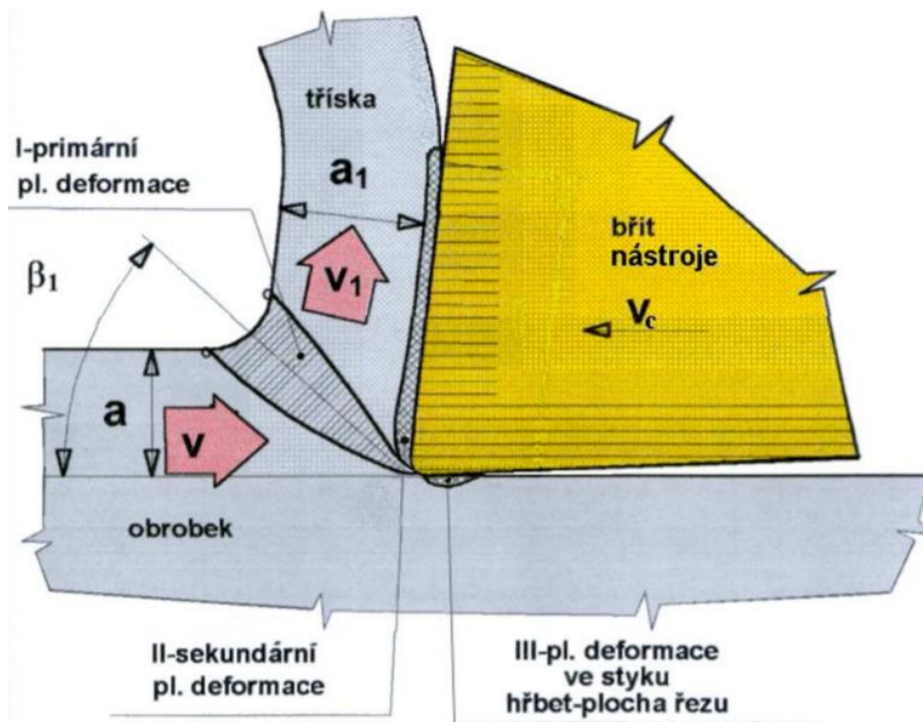
5 Mechanismus tvorby třísky při obrábění

Zabývat se problematikou mechanismů tvorby třísek a jejich tvarů je zvláště důležité při obrábění na automatických obráběcích strojích ve velkosériové či hromadné výrobě, především proto, že u těchto typů výroby je třeba, aby vznikala taková tříska, která je snadno odstranitelná a nezpůsobuje potencionální kolize v obráběcím procesu. V ideálním případě je tedy obrábění, proces kontrolovaného odchodu třísky požadovaného tvaru, v případě nutnosti lámání třísky. V neposlední řadě je důležité, aby tříska byla odváděna z rezného prostoru z důvodu tepla vzniklého při obrábění. Zejména při bez kapalinovém obrábění vyššími reznými rychlostmi je odvod třísek velmi důležitý. [58] [68]

5.1 Tvorba třísky při obrábění

Při procesu obrábění dochází k oddělování částí materiálu z obrobku. Při tomto procesu je přebytečný materiál odebrán nástrojem ve formě třísky. Třískou je tedy deformovaná odřezávaná vrstva materiálu z obrobku. [8] Při obrábění vniká nástroj ve tvaru klínu do obráběného materiálu, kde vznikají nejprve pružné deformace, zároveň narůstá síla potřebná pro vnikání nástroje do té doby, než způsobené napětí v materiálu dosáhne v určitém směru hodnoty větší než pevnost materiálu v kluzu (smyku), v tomto směru pak dojde k vzájemnému posunutí materiálu a oddělení elementu materiálu, vznikají plastické deformace. Přitom ale síla potřebná ke vnikání nástroje klesne, nástroj postupuje dál a celý děj se znovu opakuje. [69]

V případě krystalických látek, jako jsou kovy, můžeme v průběhu oddělování třísky pozorovat tři oblasti. Jedná se o oblast primární plastické deformace, oblast sekundární plastické deformace a oblast terciální plastické deformace. [70]



Obr. 12: Oblasti plastických deformací při obrábění [69]

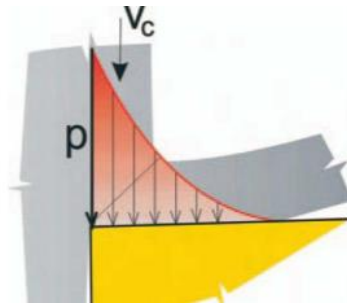
Oblast primární plastické deformace je tvořena postupným vnikáním břitu nože do obráběného materiálu. Přitom vznikají nejdříve pružné a potom i plastické deformace částic oddělovaného materiálu. Oblast plastické deformace je znázorněna na obrázku výše (Obr. 12). [70]

V důsledku vzniklého napětí v této oblasti dochází ke kluzovému posuvu objemu materiálu a tvorbě tzv. elementů třísky. Tento proces nazýváme první fází tvorby třísky. Právě oblast primární plastické deformace se nejvíce podílí na tvorbě třísky. [70]

Druhou fází vzniku třísky je potom vlastní smyk dílů třísky. Třetí fáze je pak druhotný proces, při kterém částice třísky mění tvar (z původního kosodélníkového tvaru na lichoběžníkový). Vlivem třetí fáze se třísky stácejí do spirály. [70]

Tříška vytvořená primární plastickou deformací odchází po čele nástroje. V důsledku intenzivního tření třísky o čelo nástroje dochází k silné plastické deformaci tenké vrstvy třísky, takzvané sekundární plastické deformaci. [71]

Ve styčných plochách třísky s čelem nástroje působí vysoké tlaky, které mají vliv na specifický charakter tohoto tření. Tyto tlaky dosahují maximálních hodnot v blízkosti ostří, ve směru pohybu třísky se zmenšují a na konci kontaktní plochy dosahují nulové hodnoty, jak je znázorněno na obrázku níže (Obr. 13). [71]



Obr. 13: Průběh tlaku ve styčné ploše mezi třískou a nástrojem [71]

Vlivem vysokých tlaků a stykem kovových ploch vznikají adhezní síly a ty způsobují vznik mikroskopických adhezních svarů, které jsou díky dalšímu pohybu obou ploch plynule odtrhávány. V sekundární oblasti je podstatně vyšší stupeň plastické deformace než v oblasti primární plastické deformace, kde je plasticky deformován celý objem odřezávané vrstvy, kdežto v sekundární oblasti je deformována jen velmi tenká vrstva, která zásadním způsobem ovlivňuje teplotu povrchových vrstev čela nástroje, což významně ovlivňuje opotřebení břitu. [71]

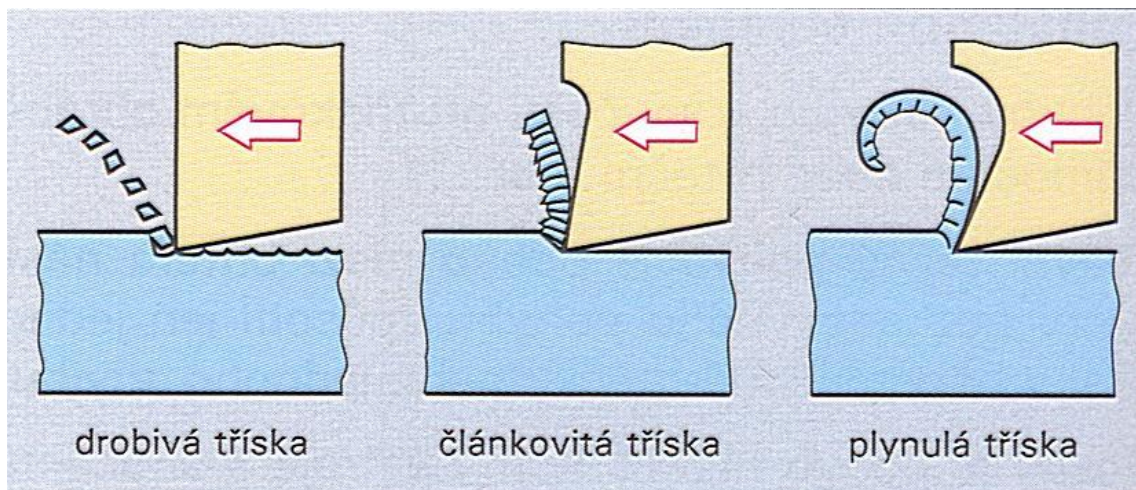
V důsledku poloměru břitu nástroje je část materiálu stlačována pod ostří břitu, důsledkem tohoto efektu je plastická deformace tenké povrchové vrstvy. Tato deformace ovlivňuje teplotu povrchových vrstev hřbetu nástroje i povrchu obrobku. Dále také ovlivňuje zbytková napětí povrchové vrstvy, která mohou být tlaková (zpevnění) nebo tlaková (trhliny). [69] [71]

5.2 Druhy třísek

Při obrábění je třeba zajistit, aby se třísky vlivem své nevhodné geometrie nedostávaly zpět pod břit, což by mohlo způsobit destrukci břitu, nebo havárii v obráběcí soustavě (stroj-obrobek-nástroj), viz obrázek 5. Třísky rovněž nesmí zahltnout obráběcí prostor a znemožnit tak další obrábění (například znemožnit automatickou výměnu nástrojů a podobně). [24]

Na proces vzniku třísky má vliv mnoho faktorů: [72]

- druh materiálu,
- druh řezného nástroje,
- geometrie řezného nástroje,
- řezné podmínky,
- řezné prostředí.



Obr. 14: Druhy třísek [72]

Drobivá tříška – vzniká při obrábění křehkých materiálů nebo při velké hloubce řezu, nízké řezné rychlosti a malých úhlech čela. Vlivem vytrhávání materiálu z obrobku vzniká drsný povrch obrobené plochy. [72]

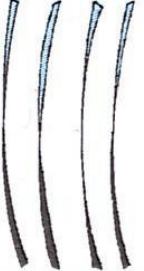
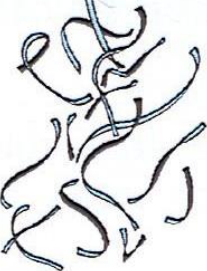
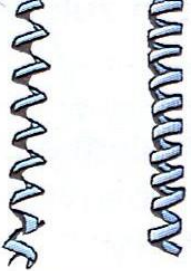




Článkovitá tříška – vzniká u houževnatějších materiálů (např. ocel střední pevnosti) nebo při středních úhlech čela a nízkých řezných rychlostech. Tyto třísky tvoří většinou krátké šroubovice. [72]

Plynulá tříška – vzniká u houževnatých materiálů, vysoké řezné rychlosti při velkých úhlech čela. Z hlediska kvality povrchu obrobené plochy je tato tříška nejvhodnější. Ale z hlediska obsluhy (namotávání na obrobek, vznik úrazu, nesnadné odstraňování třísky apod.) jsou nejméně vhodné. Z tohoto důvodu je vhodné třísku lámat. K tomu slouží lamače a utvařeče třísek. [72]

5.3 Tvary třísek

Na proces vzniku třísky a jejich výsledný tvar má vliv mnoho faktorů: [72]

- druh materiálu,
- druh řezného nástroje,
- geometrie řezného nástroje,
- řezné podmínky,
- řezné prostředí.

			
páskové třísky	smotané třísky	dlouhé šroubovitě třísky	
nevýhodné			
			
krátké šroubovitě válnové třísky	krátké šroubovitě kuželové třísky	spirálové třísky	drobnivé třísky
výhodné			

Obr. 15: Základní tvary třísek [72]

Tvarování a lámání třísek má značný význam pro bezpečnost a plynulost práce u automatizovaných obráběcích strojů, zejména pak u bezobslužných obráběcích strojů a pracovišť. [8]

5.3.1 Lamače a utvařeče

Pokud chceme dosáhnout vhodného tvaru a s tím souvisejícího objemu třísek, je třeba vhodně zvolit řezné parametry a geometrii nástroje s ohledem na obráběný a řezný materiál, tak abychom dosáhli optimálního utváření třísek. Ke zlepšení tvaru a snadnějšímu dělení třísek můžeme použít různé lamače či utvařeče třísek. [8]

Utvařeče třísek

Utvařeče třísek jsou nejčastěji vybrušované či předlisované nebo mechanicky připevněné na nástroji. Běžně se můžeme setkat s utvařeči žlábkovými s vytvořeným žlábkem či stupínkem na čele monolitních nožů nebo pájených destiček. Další skupinou jsou žlábkové různé průřezu podél ostří kolem celého obvodu z jedné nebo obou stran vyměnitelné břitové destičky (Obr. 16). Poslední skupinu jsou tzv. sekundární

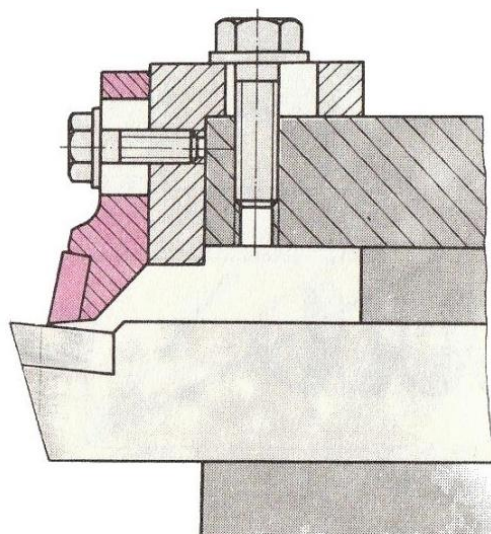
utvařeče. To jsou žlábkové utvařeče třísek se sekundárním utvařečem menších rozměrů vytvořeným v rohu destičky. [8]



Obr. 16: Předlisovaný utvařeč třísky na vyměnitelné břitové destičce [73]

Lamače třísek

Lamače třísek mají tvar destičky a bývají mechanicky upnuty ve vzdálenosti 1,5 – 6 mm od ostří a skloněny pod úhlem 40 – 50° k čelu břitu. Zmenšují poloměr svinutí třísky a způsobují lámání odcházející třísky na menší kusy. [8]



Obr. 17: Stavitelný lamač třísek [74]

6 Metodika optimalizace obrábění konstrukčních ocelí

Parametry řezného procesu jako jsou drsnost povrchu nebo přesnost rozměrů, ovlivňuje především volba řezných podmínek, geometrie a materiál nástroje, charakteristikou obráběcího stroje (tuhost, výkon) nebo také materiálem obrobku. Při volbě strategie obrábění je třeba uvažovat pamatovat na vhodnost použití. Například při hrubování je prioritní co největší hloubka třísky, tedy co největší úběr materiálu za co nejkratší čas. Ideální by bylo obrábět hloubku celého přídatku na jednu hloubku třísky, ale parametry stroje nebo nástroje to však ve většině případů nedovolují. Při hrubování není dosahováno kvalitního povrchu, ale vzhledem k následnému dokončení není tento parametr podstatný. Důležité je, aby velikost přídatku nebo zbytkového materiálu byla optimální pro dosažení kvalitního povrchu obráběním na čisto. [22] [23]

Při obrábění na čisto jde především o dodržení požadavků výkresové dokumentace, jako jsou drsnost povrchu nebo přesnost rozměrů. V případě obrábění na čisto by neměl nastat problém s krouticím momentem stroje, ale mohl by se vyskytnout problém s omezením maximálních otáček stroje. [23] Zejména při obrábění na čisto jsou kladeny vysoké nároky na řezné podmínky z důvodu dodržení kvality povrchu. [23] Vysoká řezná rychlost způsobuje větší vznik tepla. Je nutné s tímto faktem počítat a zvolit vhodný způsob obrábění, řezný materiál, řezné prostředí a řezné podmínky tak, aby bylo vzniklé teplo co nejnižší a odvod co nejefektivnější.

6.1 Optimalizace obráběcího nástroje

Optimalizace obráběcího nástroje je prvním krokem optimalizace vlastního technologického procesu. Správná volba materiálu řezného nástroje, geometrie břitu, kvality, velikosti i opotřebení je velmi důležitá a má velký vliv na celý řezný proces. Mezi další významné faktory ovlivňující řezný materiál patří:[24]

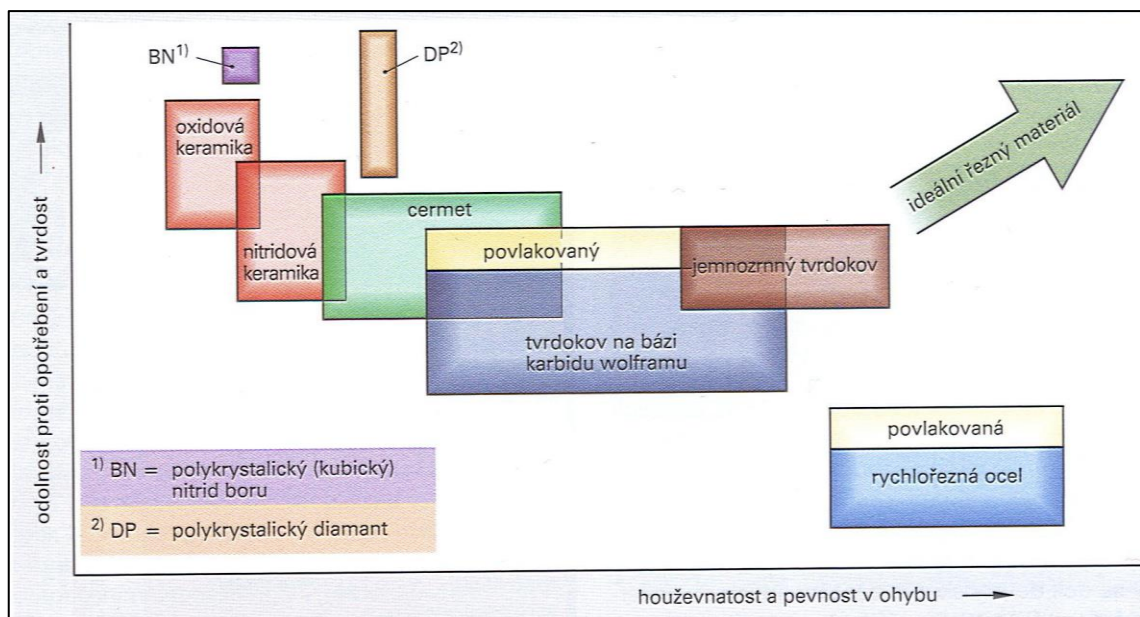
- charakteristiky obráběného materiálu,
- charakteristiky obrobku, především jeho tvar, rozměry, přesnost a kvalita povrchů,
- charakteristika obráběcího stroje (otáčky, výkon) včetně upínacích systémů nástroje a obrobku.

6.1.1 Nástrojové materiály

Vyměnitelné břitové destičky, případně celé nástroje jsou vyráběny z nástrojových materiálů, na které jsou kladeny vysoké požadavky. Zejména na jejich tvrdost, pevnost, houževnatost, odolnost proti ořezu nebo trvanlivost. Tyto vlastnosti musí být zachovány i při vysokých teplotách a po dlouhou dobu obrábění. Základní vlastností řezných materiálů je tzv. řezivost, která je kvalifikována pomocí řezné rychlosti, při které nedojde ke změně tvrdosti nástroje po dobu obrábění.

Základní rozdělení nástrojových materiálů (Obr. 18): [23]

- nástrojové oceli (NO)
- slinuté karbidy (SK)
- řezná keramika (ŘK)
- cermety
- kubický nitrid bóru (CNB)
- diamanty



Obr. 18: Porovnání řezných materiálů z hlediska tvrdosti a houževnatosti [31]

Nástrojové oceli (NO)

Oceli třídy 19 se základně dělí na legované a nelegované. Pro obrábění pevných a tvrdých materiálů a nástrojových materiálů jsou využívány rychlořezné nástrojové oceli. Za účelem získání ještě lepších vlastností jsou nástrojové oceli tepelně zpracovávány. [23]

Slinuté karbidy (SK)

Slinuté karbidy jsou vyráběny práškovou metalurgií. Jedná se o směsi karbidů a kovového pojiva. Poměr těchto složek dále ovlivňuje konečné vlastnosti materiálu. Nástroje o základní velikosti jsou vyráběny jako soustava VBD ze slinutého karbidu a tělo nástroje (držák) z konstrukční nebo nástrojové oceli. V případě malých rozměrů lze využít karbid pro výrobu celého nástroje. Pro zvýšení řezných vlastností jsou nástroje opatřeny jednou nebo více vrstvami povlaku. [23]

Řezná keramika (ŘK)

Primární výhodou řezné keramiky oproti ostatním materiálům je její vysoká tvrdost za tepla, ale naopak vykazuje vysokou křehkost a nízkou tepelnou vodivost. Stejně jako u slinutých karbidů je řezná keramika používána ve formě VBD. Nejčastěji využívané jsou keramiky na bázi oxidu hlinitého a nitridu křemíku. [23]

Cermety

Stejně jako slinuté karbidy jsou cermety vyráběny pomocí práškové metalurgie. Směs materiálu tvoří tvrdé keramické části a kovové pojivo. [23] Cermety mají velmi dobrou odolnost proti opotřebení čela i hřbetu břitu, chemickou stabilitou a vysokou stálost za tepla. V porovnání se slinutými karbidy mají cermety nižší houževnatost a menší tepelnou odolnost proti teplotním rázům. [24]

Kubický nitrid bóru (CBN)

Kubický nitrid boru je synteticky vyráběný materiál, který se v přírodní formě nevyskytuje. Vyznačuje se mimořádně vysokou tvrdostí a vysokou pevností za tepla, s výbornou odolností proti opotřebení za tepla a chemickou stabilitou k železným kovům. Vyznačuje se také velmi dobrou houževnatostí a odolností proti tepelným rázům. V dnešní době jsou nejčastější dva typy: keramické kompozity s obsahem CBN 40-65 % anebo třídy s vysokým obsahem CBN 85-100 %. Použití je zejména při obrábění ocelí s tvrdostí nad 45 HRC. Nad hodnotou 55 HRC je CBN jediným nástrojovým materiálem, kterým můžeme nahradit tradičně používané metody broušení, a to především díky dosahování vysoké kvality obrobeného povrchu ($R_a = 0,3$ až $0,4 \mu\text{m}$). [24] [29]

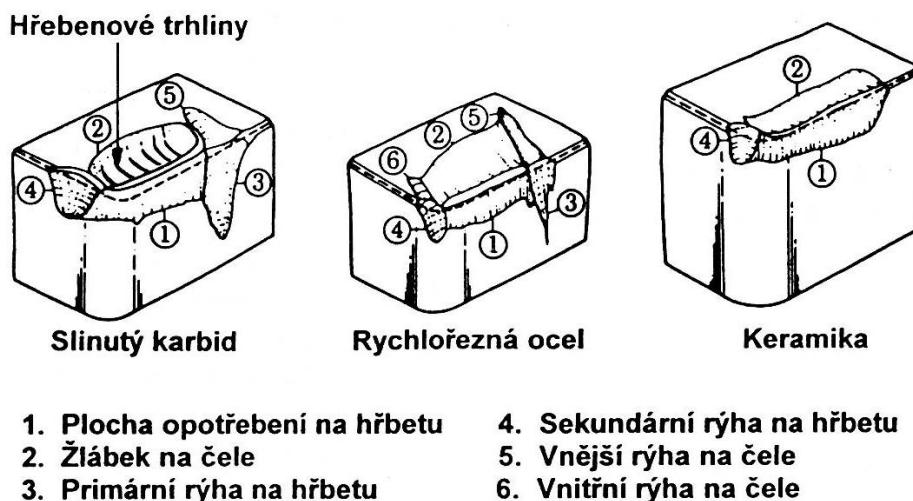
Diamanty

Diamant je nejtvrdší přírodní látkou s teplotou tavení vyšší než 4000 °C. Má výbornou odolnost proti abrazivnímu opotřebení nízký koeficient tření a nejlepší známou tepelnou vodivost. Nevýhodou je křehkost, nízká pracovní teplota okolo 700 °C a vysoká afinita k železným kovům a Ni slitinám. Na řezné nástroje se nejčastěji používá polykrystalický diamant, který má vyšší tvrdost a lepší houževnatost než diamant monokrystalický. [24] [30]

6.1.2 Geometrie břitu nástroje

Optimální geometrie břitu obráběcího nástroje zohledňuje vliv jednotlivých faktorů obráběcího procesu na intenzitu opotřebení břitu. [24]

K opotřebení obráběcích nástrojů dochází různými formami. U nejčastěji používaných řezných materiálů jako jsou rychlořezné oceli, slinuté karbidy a řezná keramika jsou základní formy opotřebení přibližně stejné. U některých řezných materiálů bývají některé formy opotřebení potlačeny na úkor jiných, jak můžeme vidět na schématu níže (Obr. 19). [24]



Obr. 19: Opotřebení břitu obráběcích materiálů z rychlořezné oceli, slinutého karbidu a keramiky [24]

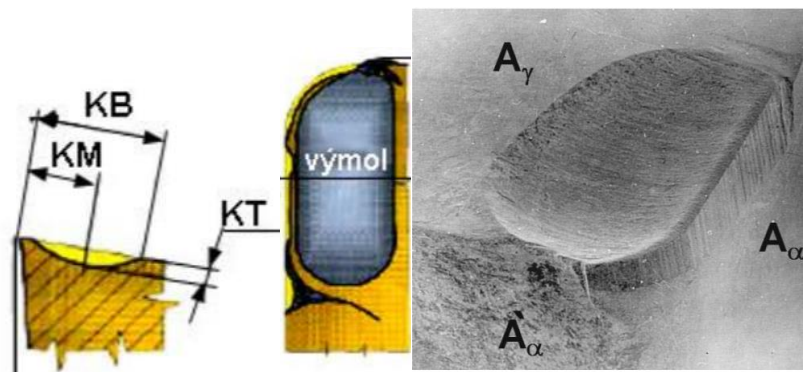
Jednou z nejčastějších forem opotřebení je opotřebení břitu (Obr. 20). Řadí se mezi abrazivní formy opotřebení a projevuje se na hřbetní ploše břitu. V případě příliš

velkého zvětšení opotřebení hřbetu dochází ke zhoršení kvality obrobené plochy a zvýšení tření mezi břitem a obrobkem. [32]



Obr. 20: Opotřebení na hřbetu nástroje [36] [37]

Druhou velmi častou formou opotřebení je opotřebení ve tvaru žlábků (Obr. 21). V tomto případě se jedná o kombinaci abrazivního a difuzního opotřebení na čele břitu. Mimořádně velké opotřebení v podobě žlábků může změnit geometrii břitu a ovlivnit tak tvar třísky, změnit směr působení síly řezání a zeslabit břit. [32]



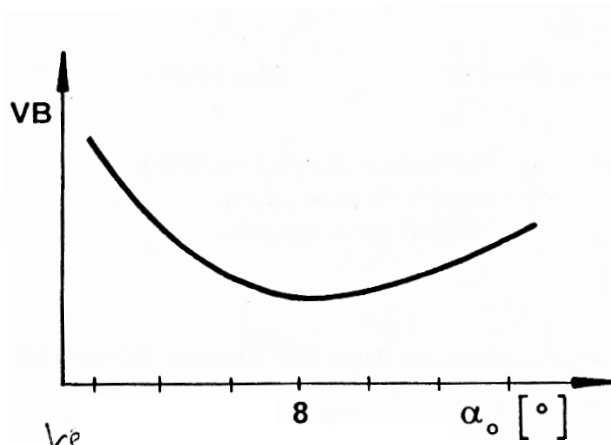
Obr. 21: Opotřebení ve formě žlábků [36] [37]

Tyto dvě formy opotřebení se vyskytují prakticky vždy, při obrábění však velmi často jedna z těchto forem opotřebení výrazně převažuje nad ostatními. Z tohoto důvodu je možné uvažovat jednu z obou forem opotřebení za rozhodující pro daný případ obrábění. V případě kdy není možno jednoznačně určit, která forma převažuje nad tou druhou, je nedůležité kterou z těchto forem budeme uvažovat jako rozhodující. Jen ve výjimečných případech se uvažují jiné formy opotřebení. [24]

Hlavními řeznými úhly jsou úhel břitu, hřbetu, čela a úhel řezu. Všechny tyto úhly se měří v rovině, která je kolmá k hlavnímu ostří a k ložné ploše nože. Velikost řezných úhlů nože má velký vliv na kvalitu obrobené plochy a na výkon nože. Při jejich volbě se přihlíží zejména k druhu obráběného materiálu.

Úhel hřbetu α_0

Z grafu níže (Obr. 22) můžeme vidět, že vliv úhlu hřbetu na opotřebení nástroje není jednoznačný. V oblasti malých úhlů dochází k velkému tření mezi hřbetem nástroje a obráběnou plochou obrobku. Tento jev má za následek zvyšování tření, které vede k zvyšování teploty v místě řezu a k intenzivnějšímu opotřebení. Pokud se úhel hřbetu zvětšuje, tak se vzniklé teplo i intenzita opotřebení snižuje. Pokud však zvýšíme úhel hřbetu nad hodnotu přibližně 8° , tak dojde k zeslabení břitu, což má za následek zhoršený odvod tepla tělem nástroje a intenzita opotřebení se opět zvyšuje. [24] [34]



Obr. 22: Závislost šířky VB opotřeбенé plochy na úhlu hřbetu [24]

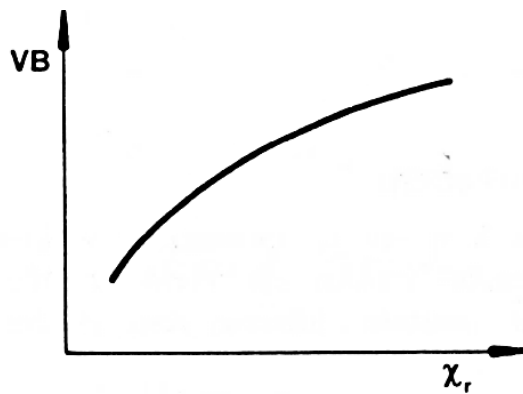
Pokud dojde k příliš velkému zeslabení břitu, může docházet zejména u křehkých nástrojových materiálů k vylamování drobných částic, případně i k destrukci celého břitu, především při přerušovaném řezu. Tyto popsání skutečnosti negativně ovlivňují trvanlivost břitu. Z výsledného působení těchto faktorů plyne optimální velikost úhlu hřbetu, která je přibližně 8° . V rozmezí úhlů $7 - 9^\circ$ je intenzita opotřebení prakticky stejná. [24] [34]

Optimální velikost úhlu hřbetu by měla být uvažovaná v pracovní rovině nástroje. Ta se může lišit od nástrojové roviny například v případě vyosení nože při řezném procesu, jak můžeme vidět a obrázku níže (Obr. 23). [33]

Při volbě úhlu řezu by se měl především uvažovat použitý rezný materiál a převažující druh namáhání. Nikdy by neměl být použitý menší úhel, než ten, u kterého ještě nedochází k vylamování břitu v důsledku snížení jeho pevnosti. [24]

Úhel nastavení χ_r

Úhel nastavení má vliv na tvar třísky a její tloušťku, na velikost radiální složky rezné síly, a tím na průhyb obrobku. Tento úhel však především ovlivňuje intenzitu opotřebení při obrábění, především svým vlivem na teplotu řezání. Ta se zmenšuje s rostoucím úhlem nastavení, je to způsobeno tím, že vzniklé teplo je koncentrováno na menším břitu. [24] [34]



Obr. 25: Závislost šířky VB opotřebení plochy na úhlu nastavení [24]

Z hlediska intenzity opotřebení by měl být používán úhel nastavení co nejmenší. Pokud se tento úhel zmenšuje tak se však zvyšuje náchylnost na vznik samobuzeného kmitání, které může být způsobeno působením radiální složky rezné síly. Platí tedy zásada použití, co nejmenšího úhlu nastavení, ale takového, při kterém ještě nevzniká samobuzené kmitání. Relativně stabilní v obráběcím procesu se jeví úhel nastavení 60°. [24]

Poloměr špičky r_ϵ

Poloměr špičky má zásadní vliv na drsnost obrobené plochy a také na vznik samobuzeného kmitání. Pokud se velikost poloměru špičky zvětšuje, tak drsnost obrobené plochy klesá a je možné použít vyšší posuvové rychlosti. Negativním jevem je ale vznik samobuzeného kmitání. Při zmenšování poloměru špičky dochází ke zhoršení odvodu tepla do těla nástroje a stoupá nebezpečí vzniku plastické deformace břitu. V případě příliš malého poloměru špičky může docházet, vlivem zhoršeného odvodu

tepla, k plastické deformaci břitu, která se projevuje zvětšením šířky plochy opotřebení na hřbetu přímo pod špičkou nebo ke křehkému lomu celé špičky. [24] [34]

Z hlediska intenzity opotřebení nástroje a současně z hlediska možného vzniku samobuzeného kmitání by měl být použit poloměr špičky co nejmenší, ale ještě takový, u kterého nedochází k plastické deformaci břitu a nárůstu opotřebení pod špičkou. [24]

Hodnoty úhlů břitu by měly být navrhovány se zřetelem na: [35]

- fyzikální podstatu řezného procesu vzhledem k dané operaci a metodě obrábění,
- druh a materiál obrobku, zejména z pohledu obrobitelnosti,
- požadované mechanické vlastnosti obrobku,
- požadovanou strukturu povrchu,
- požadované vlastnosti obrobené vrstvy,
- řezné parametry,
- silové i tepelné namáhání a zatížení,
- fyzikální stav a materiál břitu (řezivost).

Navrhnout ideální geometrii nástroje nelze. Volba je vždy jistým kompromisem mezi požadavky na snadné a energeticky výhodné obrábění a požadavky na dostatečnou tuhost, trvanlivost a výkon nástroje. [35]

6.1.3 Optimální velikost opotřebení

Optimální velikosti opotřebení je třeba se věnovat především, protože se velikost opotřebení nutného pro výměnu nástroje odráží v ekonomickém pohledu na obráběcí proces. Optimální velikost opotřebení vychází z požadavku na maximální životnost nástroje, respektive břitové destičky. V této práci budu uvažovat optimální velikost opotřebení pouze pro VBD. [24]

Životností břitu se rozumí součet všech trvanlivostí od prvního použití nástroje do jeho vyřazení z užívání. Pro vyměnitelné břitové destičky, je dána životnost vztahem: [24]

$$Z = z_b \cdot T \cdot s_b \quad (6.1)$$

Kde: z_b – je počet břitů na destičce,

T – trvanlivost nástroje v min,

s_b – součinitel využití břitových destiček (břitů na destičce).

Tabulka 2: Přibližné hodnoty součinitele VBD [24]

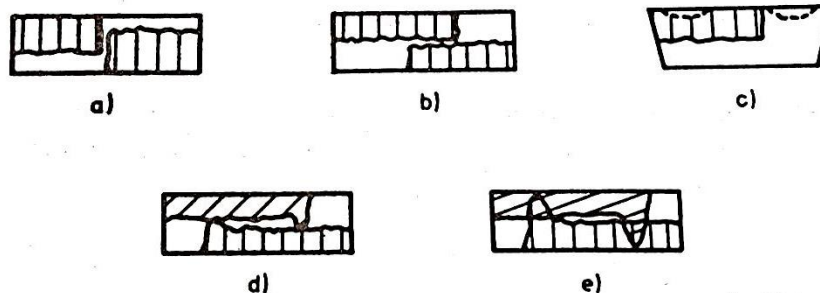
Podmínky obrábění	s_b
Lehké	0,95
Střední	0,90
Těžké	0,80
Velmi těžké	0,70

Rozhodujícím faktorem pro výměnu břitu nástroje je jeho opotřebení. Při výměně nástroje bychom, se měli co nejvíce přiblížit hodnotě optima opotřebení. V případě nedodržení optima dochází k růstu výrobních nákladů. [24]

Pro výměnu nástroje je rozhodující plocha opotřebení na hřbetu břitu nebo hloubka žlábků na čele. Ostatní formy opotřebení je možné odvodit z těchto parametrů. Optimální velikost opotřebení závisí na způsobu práce (hrubování, obrábění na čisto). [24]

Nepřerušené hrubování VBD

U hrubovací operace není rozhodující přesnost ani kvalita povrchu, proto je požadavek pro maximální životnost, maximální možné opotřebení břitu. Teoreticky je možno uvažovat několik možností vzniku opotřebené plochy na hřbetu břitu (Obr. 26). [24]



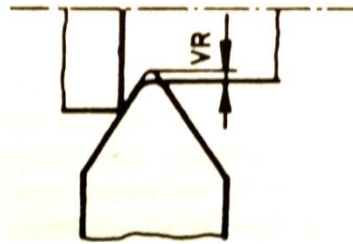
Obr. 26: Plochy opotřebení na hřbetu u různých destiček a různých hloubek řezu [24]

V případě a) můžeme vidět, že plocha opotřebení nepřesahuje přes polovinu břitu, proto je možné využít celou tloušťku břitu. V případě b) opotřebení přesahuje polovinu břitu a proto je možné využít jen polovinu tloušťky břitu. Opotřebení hřbetu společně s vytvořením žlábků na čele můžeme vidět na příkladu c). V případě d, e) můžeme vidět rýhu v úrovni obráběného povrchu, která zasahuje do protilehlé plochy opotřebení. Toto opotřebení nepůsobí vždy negativně. [24]

Obrábění na čisto VBD

V tomto případě není rozhodující hloubka řezu, ale rozhodujícími faktory jsou především přesnost a drsnost obrobenej plochy z hlediska optimálního opotřebení. [24]

Klíčovým faktorem pro přesnost obrobenej plochy je radiální opotřebení břitu VR, které můžeme vidět níže (Obr. 27). Opotřebení VB a VR jsou ve vzájemném vztahu a je možné je vzájemně přepočítat. Optimální velikost opotřebení VR je možné vyjádřit vztahem (6.2), v případě, že neuvažujeme změny rozměrů nástroje vlivem tepelné dilatace a deformaci obráběcí soustavy. [24]



Obr. 27: Radiální opotřebení nástroje [24]

$$VR_{opt} = L_N + VR_{max} , \quad (6.2)$$

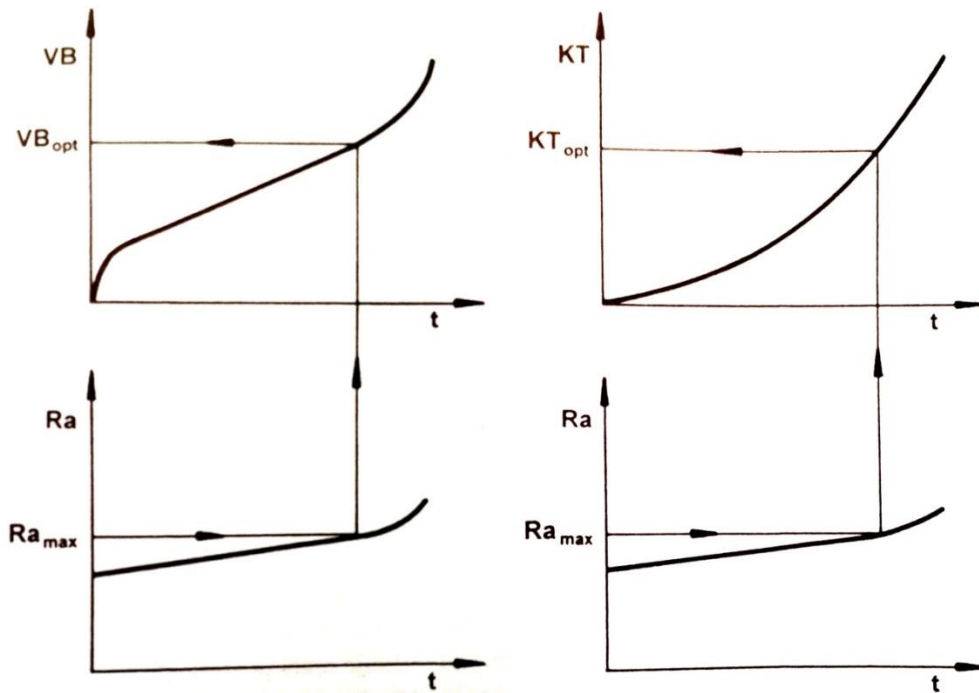
Kde: VR_{opt} – optimální velikost VR v mm

L_N – maximálně přípustná nepřesnost obrobenej plochy v mm

VR_{max} – maximální přípustné radiální opotřebení břitu nástroje v mm

Optimální velikost opotřebení ve vztahu k drsnosti obrobenej plochy je takové opotřebení, při kterém je zaručeno dosažení požadované drsnosti obrobenej plochy, protože se zvětšujícím se opotřebením zpravidla roste i drsnost. V grafech níže

(Obr. 28, 29) je znázorněna optimální velikost opotřebení pro opotřebení na hřbetu na čele bříty. [24]



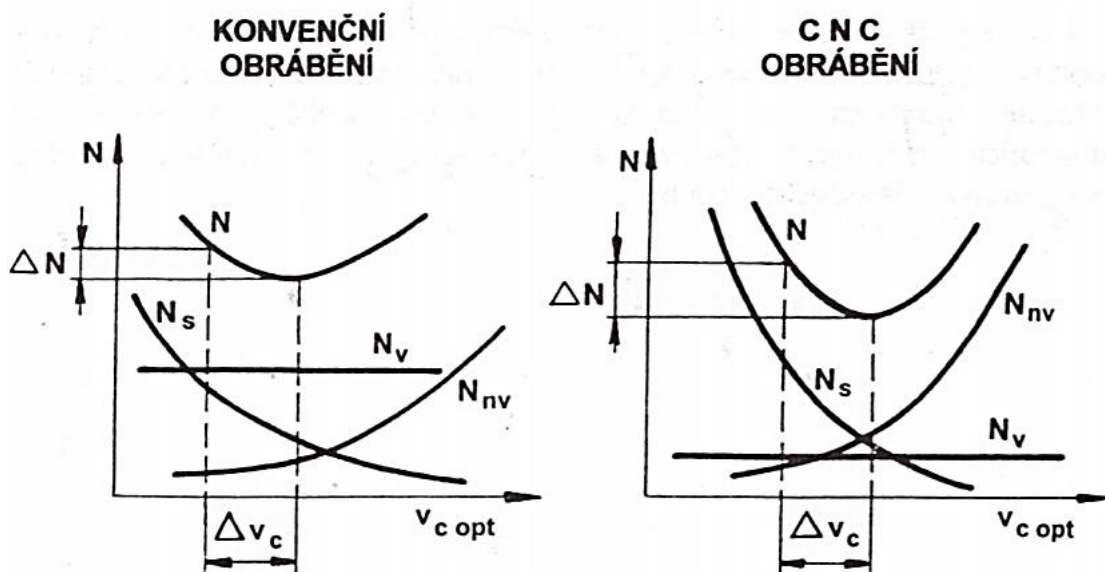
Obr. 28: Optimální velikost opotřebení VB **Obr. 29: Optimální velikost opotřebení KT z**
z hlediska drsnosti obrobené plochy Ra [24] **hlediska drsnosti obrobené plochy Ra [24]**

Ze závislosti velikosti opotřebení VB na čase obrábění lze odečíst tři fáze: první fázi můžeme popsat jako zrychlené záběhové opotřebení, které je způsobené vysokým měrným tlakem na vrcholcích mikronerovností povrchu hřbetu a určitou defektností povrchové vrstvy v důsledku výrobních procesů břitů (např. při slinování SK). Ve druhé fázi dochází k lineárnímu nárůstu opotřebení, tzn. intenzita opotřebení je konstantní. Třetí fáze je specifická nadměrným opotřebením a je obvykle spojována s limitní teplotou řezání a výraznou ztrátou tvrdosti bříty nástroje. [39]

6.2 Optimalizace řezných podmínek

V současné době jsou kladeny stále vyšší nároky na obráběcí proces, jak z hlediska technického, tak i z ekonomického. Jelikož je velmi často obrábění dokončovací operací, tvoří náklady na obrábění značnou část z celkových nákladů. Proto je velmi důležité, aby podnik z hlediska konkurenceschopnosti věnoval svou pozornost mimo jiné i ekonomické stránce obráběcího procesu. Nejvýznamnější vliv z hlediska optimalizace má na výrobní náklady řezná rychlost, protože řezná rychlost

nejvíce ovlivňuje trvanlivost respektive životnost nástroje, a tím pádem i ekonomickou stránku obrábění. Dopad řezné rychlosti na výrobní náklady se liší u konvenčních strojů s nízkou cenou, tak i u moderních obráběcích center, které mají vysoké pořizovací náklady (Obr. 30). Z porovnání závislostí výrobních nákladů na konvenčních a CNC obráběcích strojích můžeme vidět, že pro CNC stroje je sklon křivek mnohem strmější a tudíž stejná diference řezné rychlosti vyvolává větší změnu v diferenci výrobních nákladů. Můžeme tedy říci, že pro CNC obráběcí centra je význam optimální řezné rychlosti na výrobní náklady mnohem významnější než v případě konvenčních strojů. [40]



Obr. 30: Výrobní náklady na jednotku v závislosti na řezné rychlosti, pro konvenční a CNC obráběcí stroj [38]

V mnohých případech strojírenské výroby nejsou náklady spojené s obráběcím procesem vůbec známy, nebo jim není věnována dostatečná pozornost. Řezné podmínky jsou voleny na základě doporučených hodnot daných výrobcem. Tyto hodnoty se velmi často liší od optimálních řezných podmínek a způsobují tak značné rezervy ve výrobních nákladech. Tyto nevyužité rezervy spojené s nedostatečným využitím stroje a strojního zařízení vedou k značnému zvýšení výrobních nákladů. Pokud jsou v podniku použity řezné podmínky doporučené výrobcem, představuje to velký problém, protože tyto řezné podmínky jsou mnohdy velmi vzdálené optimálním řezným podmínkám. Pro každý podnik, stroj a nástroj existují právě jedny optimální řezné podmínky, dle různých hledisek: [24] [39]

- minimálních výrobních nákladů,
- maximální produktivity,
- maximálního zisku,
- maximálního úběru materiálu.

Nejvýznamnějším faktorem z hlediska strojírenské výroby jsou výrobní náklady, proto v další části práce podrobněji rozeberu kritérium optimálnosti z hlediska minimálních výrobních nákladů. Kritérium optimálnosti maximálního zisku je formulováno stejně jako kritérium minimálních nákladů, proto ho v následujícím přehledu nebudu uvádět. Kritéria optimálnosti z hlediska produktivity a úběru materiálu nebudou popsány tak podrobně jako kritérium minimálních výrobních nákladů.

6.2.1 Kritérium optimálnosti z hlediska minimálních výrobních nákladů

Jak již název podkapitoly napovídá, bude zde věnována pozornost především nákladům, protože náklady jsou rozhodujícím faktorem z hlediska konkurenceschopnosti podniku. Optimalizaci budu uvažovat pro jeden nástroj. Složitější typy optimalizace vycházejí také z jedno-nástrojové optimalizace. Pokud není žádný závažný důvod pro použití jiného kritéria např. kritéria maximální produktivity, je kritérium minimálních výrobních nákladů nejčastěji používané. [40]

Cílem optimalizace by mělo být nalezení optimálních řezných podmínek, jako jsou hloubka řezu, posuv a řezná rychlost a také zjištění optimální trvanlivosti nástroje. A to za pomoci určitého optimalizačního kritéria a sestavení a aplikací okrajových podmínek. [24]

Kritérium optimálnosti z hlediska nákladů je možné vyjádřit způsobem, který můžeme vidět níže (6.3). Neuvažují se v něm náklady, které nejsou závislé na řezných podmínkách. [24]

$$N = N_s + N_n + N_{vn} = \min , \quad (6.3)$$

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 či VBD vztažené na jeden operační úsek [Kč]

Náklady na strojní práci na operační úsek

Náklady na strojní práci je možné vyjádřit podle dvou vzorců. V prvním případě jsou režijní náklady vyjádřeny jako přírážka k přímým mzdám, v případě druhém jsou vyjádřeny pomocí hodinových režijních paušálů. Pokud jsou režijní náklady vyjádřeny v podobě přírážky k přímým mzdám, je vztah následující: [24]

$$N_s = t_{As} \left[k_C \cdot \frac{M_o}{60} \left(1 + \frac{RNS_{PL}}{100} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] = t_{As} \cdot N_{sm} \quad (6.4)$$

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

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

M_o - mzda operátora včetně sociálního a zdravotního pojištění [Kč/hod]

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

k_C - přírážka směnového času (obvykle 1,11 až 1,15)

t_{As} - strojní čas [min]

Náklady na strojní práci na operační úsek vztažený na jednu minutu vyjádříme vztahem (6.5):

$$N_{sm} = \left[k_C \cdot \frac{M_o}{60} \left(1 + \frac{RNS_{PL}}{100} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] \quad (6.5)$$

Hodinové náklady na provoz stroje jsou vyjádřeny vztahem (6.6). Do těchto nákladů je zahrnut odpis stroje vztažený na hodinu provozu, koeficient oprav a částka, která je vynaložena na elektrickou energii za hodinu provozu stroje. Odpis je vypočten ze vztahu (6.7). Jedná se o zjednodušený výpočet, který nám pro výpočet odpisů postačuje. Koeficient oprav a údržby je dán vztahem (6.8). [24] [41]

$$N_{sh} = O_s \cdot k_{us} + C_E \quad (6.6)$$

$$O_s = \frac{C_s}{Z_s \cdot CFS_{EFPL} \cdot SM \cdot k_{vs}} \quad (6.7)$$

$$k_{us} = \frac{C_s + U}{C_s} \quad (6.8)$$

- Kde: O_s - odpis stroje [Kč/hod]
- C_s - cena stroje [Kč]
- C_E - náklady na elektrickou energii spotřebovanou strojem [Kč/hod]
- Z_s - životnost stroje [rok]
- SM - směnnost [-]
- CFS_{EFPL} - časový fond stroje [hod/rok a směnu]
- k_{us} - koeficient oprav a údržby stroje [-]
- k_{vs} - koeficient časového využití stroje [-]
- U - předpokládaná částka na opravy a údržbu stroje [Kč]

Koeficient časového využití stroje stanovuje podíl času, kdy je stroj v provozu vztážený k danému počtu směn k jejich celkovému počtu. Toto využití stanovujeme buď z dlouhodobého průměru, nebo z předpokládaného vytížení stroje. Přibližné hodnoty koeficientu jsou uvedeny v tabulce 3. [24]

Tabulka 3: Hodnoty koeficientu k_{vs}

Druh výroby	k_{vs}
Hromadná a velkosériová výroba	0,80
Programově řízené stroje	0,65 až 0,75
Konvenční malosériová výroba	0,50 až 0,65

V druhém případě, tedy pokud výrobní režii vyjádříme jako hodinový režijní paušál společných nákladů, bude vztah vypadat následovně: [24]

$$N_s = t_{As} \left[k_c \cdot \frac{M_o}{60} \left(1 + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] = t_{As} \cdot N_{sm} \quad (6.9)$$

Kde: HRP_{SP} - hodinový režijní paušál společných nákladů (střediskový)
[Kč/hod, Kč/Nh]

Náklady na nástroj vztažené na operační úsek

Náklady na nástroje, které se vztahují k určitému operačnímu úseku, se vypočítají pomocí vztahu (6.10).

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} \quad (6.10)$$

Kde: N_{nT} - náklady na nástroj vztažené na jednu trvanlivost bříty [Kč]

z_v - počet výměn nástroje na daný operační úsek [-]

Počet výměn nástroje na daný operační úsek lze vyjádřit následujícím způsobem:

$$z_v = \frac{t_{As} \cdot k_r}{T} \quad (6.11)$$

Kde: T - trvanlivost nástroje [min]

k_r - koeficient řezání (poměr časů kdy je břit opotřebováván a kdy koná neřezný pohyb) [-]

Náklady na provoz nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami, které se nepřeostrňují, je následující:

$$N_{nT} = \frac{C_d \cdot z_d}{z_b \cdot S_b} + (1 + k_{ut}) \frac{C_{nt}}{z_u} \quad (6.12)$$

Kde: C_d - cena břitové destičky [Kč]

C_{tn} - cena tělesa nástroje [Kč]

- z_d - počet břitových destiček na nástroji [-]
- z_b - počet břitů na destičce [-]
- z_u - počet předpokládaných upnutí destiček za dobu životnosti tělesa nástroje [-]
- s_b - součinitel využití břitových destiček [-]
- k_{ut} - koeficient údržby tělesa nástroje [-]

V tabulce 4 jsou uvedeny přibližné hodnoty empirických konstant. Konstanty jsou rozděleny do čtyř skupin podle pracovních podmínek obrábění. Součinitel využití břitových destiček je závislý na způsobu, jakým je s břitem zacházeno, např. zničení břitu destičky křehkým lomem nebo znehodnocení nového břitu odcházející třískou. Předpokládaný počet upnutí ovlivňuje především nechtěné zničení tělesa nástroje a koeficient údržby tělesa nástroje zahrnuje především náhradní díly nástroje. [24]

Tabulka 4: Přibližné hodnoty empirických konstant

Podmínky obrábění	z_u	s_b	k_{ut}
Lehké	400 až 600	0,95	0,05
Střední	200 až 400	0,90	0,25
Těžké	200	0,80	0,4
Velmi těžké	100	0,70	0,6

Náklady na výměnu nástroje

Tato složka nákladů je závislá především na době trvání výměny nástroje. V případě moderních CNC obráběcích strojů nezabere výměna nástroje více než pár sekund, zatímco u konvenčních strojů může tato výměna trvat i desítky minut. Proto je třeba tuto hodnotu objektivně určit.

Náklady na výměnu nástroje v případě režijních nákladů můžeme vyjádřit vztahem:

$$\begin{aligned}
 N_{vn} &= t_{vn} \left[k_c \cdot \frac{M_o}{60} \left(1 + \frac{RNS_{PL}}{100} \right) + \frac{O_s}{60} \right] \cdot z_v \\
 &= t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v
 \end{aligned}
 \tag{6.13}$$

Kde: N_{vnm} - náklady na výměnu nástroje minutové [Kč/min]

t_{vn} - čas na výměnu nástroje [min]

V případě užití metody hodinových režijních paušálů je vztah následující:

$$\begin{aligned} N_{vn} &= t_{vn} \left[k_C \cdot \frac{M_o}{60} \left(1 + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{O_s}{60} \right] \cdot z_v \\ &= t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v \end{aligned} \quad (6.14)$$

Pokud do původní rovnice pro kritérium minimálních nákladů (6.3) dosadíme výše uvedené vztahy a strojní čas vyjádříme vztahem (6.16), dostaneme rovnici kritéria optimálnosti z hlediska minimálních výrobních nákladů ve tvaru:

$$N = \frac{L}{n \cdot f} N_{ns} + \frac{L \cdot k_r}{n \cdot f \cdot T} (N_{nT} + t_{vn} \cdot N_{vnm}) = \min \quad (6.15)$$

$$t_{As} = \frac{L}{n \cdot f} \quad (6.16)$$

Kde: L - délka dráhy automatického chodu nástroje [mm]

n - otáčky za minutu [ot/min]

f - posuv na otáčku [mm/ot]

Pokud vyjdeme z nákladové funkce (6.14), můžeme odvodit optimální trvanlivost z hlediska minimálních nákladů. Vztah, který nám po úpravě vyjde je následující:

$$T_{optN} = \frac{t_{vn} \cdot N_{vnm} + N_{nT}}{N_{sm}} \cdot k_r (m - 1) \quad (6.17)$$

Kde: m - empirická konstanta (přibližné hodnoty pro RO = 4, SK = 2,5,

ŘK = 1,7) [-]

6.2.2 Kritérium optimálnosti z hlediska produktivity

Ve výjimečných případech je možné uvažovat, místo kritéria minimálních nákladů, kritérium maximální produktivity. Toto kritérium optimálnosti můžeme chápat, že se snažíme vyrábět maximální možné množství výrobků avšak bez ohledu na výrobní náklady. Z dlouhodobého hlediska je toto kritérium ekonomicky neudržitelné. [40]

Situaci s nedostatečnou produktivitou může podnik řešit i jinými, ekonomicky přijatelnějšími způsoby. Jednou z možností je práce nad rámec pracovní doby (přesčasy) nebo zvýšení výrobní kapacity podniku, např. nákupem dalších výrobních strojů, případně využití kooperace s externím dodavatelem. [40]

Vyjádření kritéria optimálnosti z hlediska maximální produktivity je následující:

$$t_u = t_{As} + t_{vn} \cdot z_v = \min \quad (6.18)$$

Kde: t_u - čas operačního úseku [min]

Z této formulace je zřejmé, že potřebný čas na obrobění jednoho operačního úseku by měl být co nejkratší.

Pokud do vzorce dosadíme za t_{As} a z_v ze vztahů (6.15), (6.10), po úpravě dostaneme následující tvar kritéria maximální produktivity:

$$t_u = \frac{L}{n \cdot f} + \frac{L \cdot k_r \cdot t_{vn}}{n \cdot f \cdot T} = \min \quad (6.19)$$

Pokud chceme získat optimální trvanlivost břitu z hlediska maximální produktivity, vyjdeme z rovnice (6.18) a po úpravě dostaneme vztah:

$$T_{optP} = t_{vn} \cdot k_r (m - 1) \quad (6.20)$$

6.2.3 Kritérium optimálnosti z hlediska úběru materiálu

V mnohých případech bývá kritérium maximálního úběru zaměňováno s kritériem maximální produktivity zmíněného výše. Obě kritéria jsou ale od sebe odlišná. [24]

Matematicky lze kritérium maximálního úběru materiálu vyjádřit vztahem (6.20). Při porovnání vztahu (6.20), která vyjadřuje kritérium maximálního úběru materiálu se vztahem (6.14), který vyjadřuje kritérium z hlediska maximální produktivity, je patrné, že tato dvě kritéria jsou odlišná. V případě, že by kritérium maximálního úběru nebylo omezeno okrajovými podmínkami, je zřejmé, že by produkce byla prakticky nulová, především díky vysoké řezné rychlosti by došlo k okamžitému zničení břitu při nájedzu nástroje do místa řezu. [24]

$$U = a_p \cdot f \cdot v_c = \max \quad (6.21)$$

Kde: U - úběr materiálu [cm/min^3]

v_c - řezná rychlost [m/min]

a_p - hloubka řezu [mm]

Pokud řeznou rychlost vyjádříme jako funkci otáček (6.22) dostaneme upravený vztah ve tvaru (6.23):

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} \quad (6.22)$$

$$U = 10^{-3} \cdot D \cdot \pi \cdot a_p \cdot f \cdot n = \max \quad (6.23)$$

V případě, že optimalizaci budeme provádět s již předem určenou hloubkou řezu, můžeme vztah (6.22) zapsat ve tvaru:

$$n \cdot f = \max \quad (6.24)$$

6.3 Omezující podmínky

Každý obráběcí proces je vždy omezen specifickým souborem omezení, která jsou specifická pro daný systém. Tato omezení je možné matematicky formulovat. Omezení jsou dána obráběcím strojem především jeho výkonem, krouticím momentem, rozsahem otáček nebo posuvem. Další omezující podmínka může být dána nástrojem,

(materiál, geometrie apod.) obráběným materiálem, požadavky na kvalitu, řezné prostředí nebo výrobní takt. [24] [40]

V další části práce se zaměřím na ty omezující podmínky, které jsou dle mého názoru nejdůležitější, a u kterých předpokládám, že je použiji v další části práce.

6.3.1 Omezení dané výkonem obráběcího stroje

Toto omezení je důležité především při hrubování, kdy je dosahování největšího zatěžování stroje z hlediska výkonu. Omezení je závislé především na výkonové charakteristice obráběcího centra. Omezení nám určuje hodnotu výkonu stroje tak, aby nedošlo k jeho přetížení. [24]

Tato omezující podmínka je linearizovatelná a lze ji vyjádřit takto:

$$P_c \leq P_e \cdot \eta \quad (6.25)$$

Kde: P_c - řezný výkon [W]

P_e - výkon elektromotoru stroje [W]

η - mechanická účinnost stroje [-]

Řezný výkon lze vyjádřit jako funkci řezné síly F_c :

$$60 \cdot P_c \leq F_c \cdot v_c \quad (6.26)$$

Kde: F_c - řezná síla [N]

Řeznou sílu vyjádříme jako funkci řezných podmínek a vyjádříme ji empirickým vztahem ve tvaru (6.26). Tento empirický vztah je platný pro soustružení, vyvrtávání, hoblování a obrážení. Jiné vztahy např. pro frézování nebo vrtání nebudu uvádět, protože předpokládám, že je v této práci nepoužiji.

$$F_c = k_{FC} \cdot a_p^{x_{FC}} \cdot f^{y_{FC}} \cdot v_c^{z_{FC}} \quad (6.27)$$

Kde: $k_{FC}, x_{FC}, y_{FC}, z_{FC}$ - empirické konstanty [-]

Pokud dosadíme rovnice (6.26), (6.25) do vztahu (6.24) a za řeznou rychlost dosadíme rovnici (6.21) dostaneme vztah z hlediska konstantního výkonu ve tvaru:

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \cdot n^{z_{Fc}} \leq \frac{60 \cdot P_e \cdot \eta}{k_{Fc}} \cdot \left(\frac{10^3}{\pi \cdot D} \right)^{z_{Fc}+1} \quad (6.28)$$

Pokud budeme uvažovat vliv řezné rychlosti na řeznou sílu nulový (závislost řezné síly na řezné rychlosti je relativně malá, blíží se nule), dostaneme po úpravě vztahu (6.28) následující vztah: [24]

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \cdot n \leq \frac{10^3 \cdot 60 \cdot P_e \cdot \eta}{k_{Fc} \cdot \pi \cdot D} \quad (6.29)$$

S nástupem moderních obráběcích strojů se na trhu objevují stroje se stále složitějšími výkonovými charakteristikami, které je obtížné matematicky formulovat, a často mohou být v nelineárním tvaru.

6.3.2 Omezení dané maximálně přípustným krouticím momentem

Tato omezující podmínka je podstatná především při soustružení, kdy je důležité, aby krouticí moment vyvolaný řeznou nebyl větší než upínací moment sklíčidla či kleštiny. Tuto omezující podmínku je možné formulovat ve tvaru:

$$M_k \leq M_{k \max} \quad (6.30)$$

Kde: M_{ke} - maximální přípustná velikost krouticího momentu [Nm]

M_k - krouticí moment ve vřetenu [Nm]

Omezení konstantním krouticím momentem

Pro soustružení vyjádříme vztah:

$$10^3 \cdot M_k = \frac{F_c \cdot D}{2} \quad (6.31)$$

Pod dosazení okrajové podmínky (6.29) a rovnice pro výpočet řezné síly (6.27) do vztahu (6.30), úpravou dostaneme podmínku ve tvaru:

$$a_p^{x_{Fc}} f^{y_{Fc}} \leq \frac{2 \cdot 10^3 \cdot M_{k \max}}{k_{Fc} \cdot D} \quad (6.32)$$

Omezení nelineárním průběhem krouticího momentu

Při vysokých otáčkách dochází u sklíčidel k rozevírání čelistí vlivem odstředivých sil, a tím pádem ke zmenšování upínací síly. Tento efekt není zcela potlačen ani u speciálních upínacích přípravků. Upínací sílu na jedné čelisti F_u závislou na otáčkách n lze vyjádřit ve tvaru: [24]

$$F_u = F_{u0} - k_n \cdot n^2 \quad (6.33)$$

Kde: F_u - upínací síla působící na jednu čelist [N]

F_{u0} - upínací síla působící na čelist pro $n = 0$ [N]

k_n - konstanta udávaná výrobcem [-]

6.3.3 Omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy

Obrábění vnitřního průměru pláště tlumiče je realizováno v jedné operaci na čisto, tudíž je požadavek na drsnost povrchu velmi významný. Proto budu tuto omezující podmínku aplikovat při optimalizaci. Omezení z hlediska drsnosti obrobené plochy je možné definovat následovně:

$$R_a \leq R_{a \max} \quad (6.34)$$

Kde: R_a - aritmetická úchylka obrobené plochy [μm]

$R_{a \max}$ - maximálně přípustná aritmetická úchylka obrobené plochy [μm]

Obecně lze tento vztah vyjádřit:

$$R_a = g(f, v_c, r_\varepsilon, \kappa_r, \kappa_r', \dots) \quad (6.35)$$

Kde: r_ε - poloměr špičky nástroje [mm]

κ_r - úhel nastavení [°]

κ_r' - vedlejší úhel nastavení [°]

Omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy můžeme také vyjádřit jako hodnotu posuvu a to následujícím způsobem:

$$f \leq f_{Ra \max} \quad (6.36)$$

Kde: $f_{Ra \max}$ - maximální hodnota posuvu, která ještě vyhovuje v uvažovaném rozsahu možných pracovních podmínek [mm/ot]

Hodnotu posuvu lze vyjádřit empirickým vztahem (6.37), který je platný pro soustružení ocelí slinutými karbidy.

$$f = 0,1366 \cdot r_\varepsilon^{0,4869} \cdot R_{a \max}^{0,5131} \quad (6.37)$$

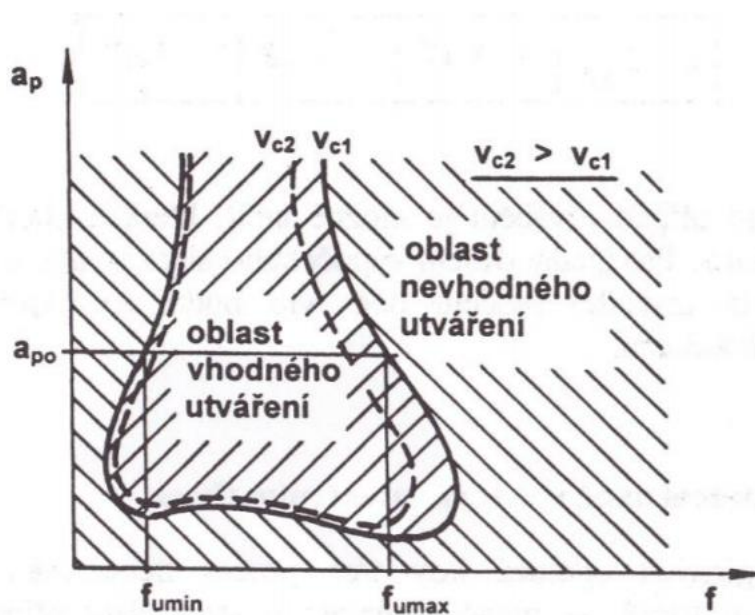
6.3.4 Omezení dané vhodným utvářením třísek

Toto omezení je důležité především tehdy, kdy není při řezném procesu zajištěno vhodné dělení třísky dané samotným procesem nebo obráběným materiálem, a u NC strojů, kde není zajištěn přímý dohled obsluhy pro zabezpečení obrábění ve vhodném rozsahu řezných podmínek. Vhodně utvářené třísky, vhodná geometrie nástroje a vhodné řezné podmínky zabezpečují, aby nedošlo k poškození jak obrobené součásti, tak obráběcího nástroje. [24]

Požadavky na vhodné utváření třísky plynou z následujících požadavků:

- Při nevhodném utváření se nesmí tříška dostávat pod břit. Mohlo by to vést k destrukci břitu a tady havárii obráběcího procesu. [24]
- Třísky nesmí zahltnout obráběcí prostor a znemožnit tak další operace např. výměnu nástroje. [24]

S rostoucí poptávkou roste i rozmanitost obráběcích i obráběných materiálů a ne vždy je snadné zjistit vhodnou oblast utváření třísek. Pro zjištění této oblasti se používají experimenty, při kterých se zjišťuje závislost na hloubce řezu a posuvu v rozsahu určitých řezných rychlostí pro daný obráběcí nástroj a obráběný materiál. Oblasti vhodného utváření třísek mapují i výrobci řezných nástrojů potažmo vyměnitelných břitových destiček. Oblasti vhodného utváření třísek pak můžeme najít prakticky v každém katalogu nástrojů. Příklad oblasti vhodného utváření třísek je zachycen na obrázku níže (Obr. 31). Na tomto obrázku si můžeme všimnout, že se zvětšující se řeznou rychlostí se oblast vhodného utváření zmenšuje. Vzhledem k rozpětí řezných rychlostí pro daný materiál je tento jev zanedbatelný. [24] [40]



Obr. 31: Oblast vhodného utváření třísek

Problém utváření třísek se snaží řešit i výrobci obráběcích nástrojů a to neustálým vývojem nových utvařečů třísek, kdy v dnešní době můžeme registrovat nepřeberné množství z hlediska tvarů, velikostí apod.

Největší problém s utvářením třísek nastává především při soustružení, protože je břit v neustálém záběru na rozdíl třeba od frézování, při kterém je břit v záběru pouze v určité oblasti, a tím pádem nemůže vzniknout nedělená problematická tříska. [40]

Pokud budeme optimalizaci realizovat pro předem stanovenou hloubku řezu, můžeme omezující podmínku vyjádřit následovně:

$$f \leq f_{u \max} \quad (6.38)$$

$$f \leq f_{u \min} \quad (6.39)$$

Kde: $f_{u \max}$ - maximálně přípustná hodnota posuvu [mm/ot]

$f_{u \min}$ - minimálně přípustná hodnota posuvu [mm/ot]

6.3.5 Omezení dané maximálními a minimálními otáčkami z hlediska stroje

Každý obráběcí stroj má ze své podstaty limity v podobě maximálních a minimálních otáček, které není možné překročit. Formálně tak tuto omezující podmínku formulují:

$$n \leq n_{s \max} \quad (6.40)$$

$$n \geq n_{s \min} \quad (6.41)$$

Kde: $n_{s \max}$ - maximální otáčky dosažitelné na stroji [ot/min]

$n_{s \min}$ - minimální otáčky dosažitelné na stroji [ot/min]

6.3.6 Omezení dané maximálním a minimálním posuvem z hlediska stroje

Stejně jako v případě omezení otáček tak i v případě posuvu jsou stroje omezeny rozsahem možných maximálních a minimálních posuvů. Nastavení posuvů se může lišit dle typu stroje, buď je posuv zadáván v milimetrech na otáčku, nebo v milimetrech za minutu. Pro tuto diplomovou práci budu uvažovat posuv v milimetrech na otáčku. Tuto podmínku lze vyjádřit následovně:

$$f \leq f_{s \max} \quad (6.42)$$

$$f \geq f_{s \min} \quad (6.43)$$

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

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

6.3.7 Omezení dané komplexním Taylorovým vztahem

Omezující podmínka je výjimečná oproti ostatním a to tím, že je v Taylorově komplexním vztahu zahrnuta trvanlivost břitu, to má významný vliv na matematické řešení optimalizace řezných podmínek. Jelikož není dosud možné obrobiteľnost, řezivost a řezné prostředí formulovat podle základních veličin, vyjadřujeme jejich vzájemnou vazbu komplexním Taylorovým vztahem. Tento vztah je pro soustružení vyjádřit ve tvaru: [24]

$$v_c = \frac{c_v}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot T^{\frac{1}{m}}} \quad (6.44)$$

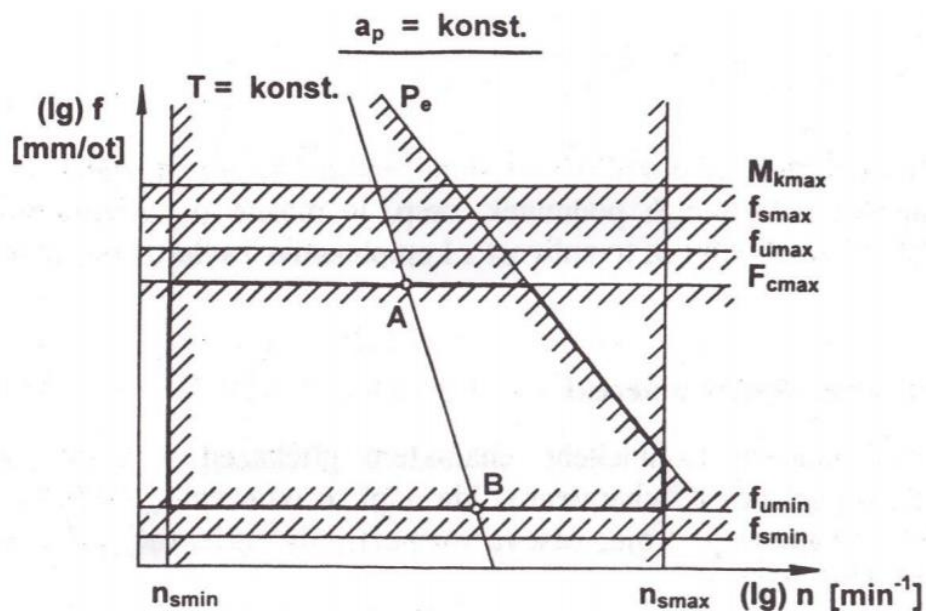
Kde: c_v, x_v, y_v, m - empirické konstanty [-]

6.4 Oblast přípustných řešení

Oblast možných přípustných řešení je sloučená oblast všech omezujících podmínek, které se pro danou optimalizační úlohu vyskytují. Jelikož optimalizaci provádíme pro předem stanovenou hloubku řezu, je i diagram pro optimalizační

podmínky v souřadnicích $(\ln)f - (\ln)n$ konstantní pro tuto předem stanovenou hloubku řezu. Každá optimalizační podmínka může mít různý tvar, např. lineární či mocninný. [24] [40]

Na obrázku 32 můžeme vidět příklad možného tvaru oblasti přípustných řešení, která je orámována silnou čarou. Takovýto způsob vyjádření oblasti přípustných řešení je možný pouze v případě, že neuvažujeme omezení z hlediska komplexního Taylorova vztahu. Aby bylo možné Taylorův vztah zobrazit v diagramu, je nutné vycházet z konstantní trvanlivosti břitu nástroje, která by měla být také optimální. [24]



Obr. 32: Příklad oblasti přípustných řešení [24]

V případě, že bude trvanlivost konstantní, tak Taylorův komplexní vztah bude mít tvar přímky. Na obrázku 32 je tato přímka v oblasti přípustných řešení znázorněna úsečkou A – B.

Oblasti přípustných řešení se od sebe mohou značně lišit a mohou mít různé tvary v závislosti na jednotlivých omezujících podmínkách, které určují výsledný tvar oblasti přípustných řešení.

6.5 Postupný způsob optimalizace řezných podmínek

Postupný způsob optimalizace řezných podmínek je významný zejména pro svoji jednoduchost a použitelnost za určitých podmínek. Je však třeba zmínit i to, že ne vždy tento způsob optimalizace vede k optimálnímu řešení. Postupný způsob optimalizace řezných podmínek lze vyjádřit v následujících krocích: [24]

- 1) Dle vybraného kritéria optimálnosti určíme optimální trvanlivost břitu nástroje bez respektování okrajových podmínek.
- 2) Určíme optimální hloubku řezu. V případě obrábění na čisto je velikost přídatku rovna hloubce řezu. Pokud hrubujeme, je třeba se kvalifikovaně rozhodnout, zda bude celý přídatek na hrubování odebrán najednou (pokud jsou dostatečné rezervy ve výkonu, otáčkách, krouticím momentu a dalších) nebo bude hloubka řezu rozdělena na polovinu přídatku, třetinu, atd.
- 3) Určíme optimální velikost posuvu. Pro stanovenou hloubku řezu určíme maximálně přípustnou velikost posuvu při respektování omezujících podmínek, které nejsou funkcí otáček. Minimální hodnota posuvu daná omezujícími podmínkami je optimální hodnotou posuvu.
- 4) Po určení výše uvedených parametrů (trvanlivost břitu nástroje, hloubka řezu, posuv) se určí řezná rychlost z komplexního Taylorova vztahu (6.45).

$$v_c = \frac{C_v}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot T^{\frac{1}{m}}} \quad (6.45)$$

7 Představení společnosti KYB Manufacturing Czech s.r.o.

Tato diplomová práce byla vytvořena ve spolupráci se společností KYB Manufacturing Czech s.r.o. sídlící v průmyslové zóně v Pardubicích, Starých Čivčích. V současné době zaměstnává přibližně 650 lidí. Jedná se o výrobní závod japonské společnosti KYB, která se řadí mezi největší výrobce tlumičů automobilů na světě. Každý druhý automobil v Japonsku a každý pátý automobil na světě používá tlumiče vyrobené v KYB. [61]

Historie společnosti KYB započala 19. listopadu 1919 v Japonsku jako Výzkumné centrum Kayaba, založené panem Shirem Kayabou. Založením továrny na hydraulické tlumiče vznikla v roce 1935 společnost Kayaba Manufacturing Co., Ltd., a díky stabilnímu rozvoji byla společnost roku 1959 zapsána na Tokijské burze. Centrála společnosti se nachází v japonském Tokiu. [62]

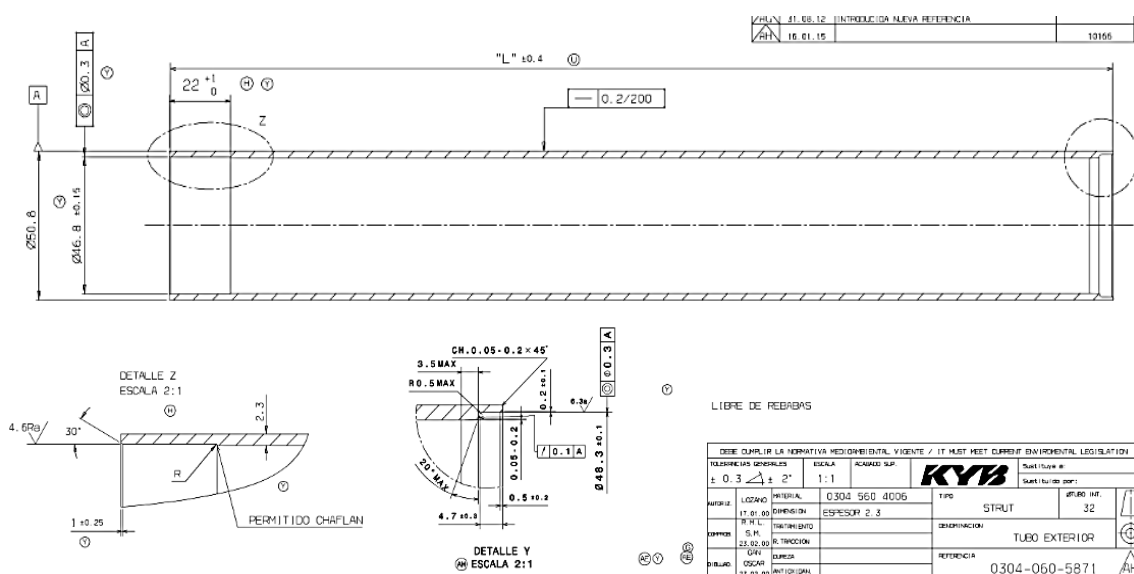
Česká pobočka KMCZ byla založena v srpnu 2003 a samotná výroba byla zahájena v prosinci roku 2006. Důvodem bylo pokrytí čtyř hlavních automobilových trhů a zrychlení reakce na potřeby zákazníků. Mezi hlavní zákazníky KMCZ patří kolínská automobilka TPCA, Toyota ve Francii a Anglii, maďarská pobočka Suzuki, Nissan v Anglii, v Rusku a Španělsku, Renault ve Slovinsku a Francii a Daimler ve Francii. Součástí portfolia je i výroba náhradních dílů pro celou Evropu, Jižní Ameriku, Střední východ a Rusko. Ty jsou distribuovány skrze sesterskou společnost KGE. [61]



Obr. 33: Výrobní závod KYB Manufacturing Czech s.r.o. v Pardubicích

8 Součást vybraná pro optimalizaci - plášť tlumiče

Vybraná součást určená k optimalizaci bez kapalinového obrábění je trubka pláště tlumiče (Obr. 34). Ten slouží ke krytí pístnice a těsnění, které zabraňuje přístupu nečistot a brání úniku oleje. Tato součást je vyráběna z nenormalizovaného materiálu, který je svými mechanickými vlastnostmi i chemickým složením podobný materiálu ČSN 11 523. Ten je dodáván v šestimetrových trubkách, které se následně dělí na požadovanou délku. Trubky se správnou délkou jsou umístěny do podavače dvojitého CNC stroje, na kterém je plášť tlumiče kompletně obroběn. Po obrobení by měla součást splňovat požadavky dané výkresem. Kompletní výkres je uveden v příloze 1.



Obr. 34: Výřez z výkresu vybrané součásti

V diplomové práci budu řešit optimalizaci pouze levé strany pláště tlumiče dle požadavků firmy. Na levé části je požadována drsnost povrchu Ra 4,6 μm , právě tento požadavek je obtížné dodržet při respektování taktu výrobní linky.

Obráběné prvky:

- zarovnání čela
- obrábění zkosení
- obrábění vnitřního průměru
- obrábění vnitřního rádiusu

Z těchto prvků je nejvýznamnější obrábění vnitřního průměru, jelikož jeho obrábění je časově nejnáročnější a činí nejvíce problémů způsobených především

nedodržením požadované drsnosti povrchu. Z tohoto důvodu budu obrábění vnitřního průměru pláště trubky uvažovat jako zástupce pro následující optimalizaci obráběcího procesu.

8.1 Materiál pláště tlumiče č. 0304-560-4006

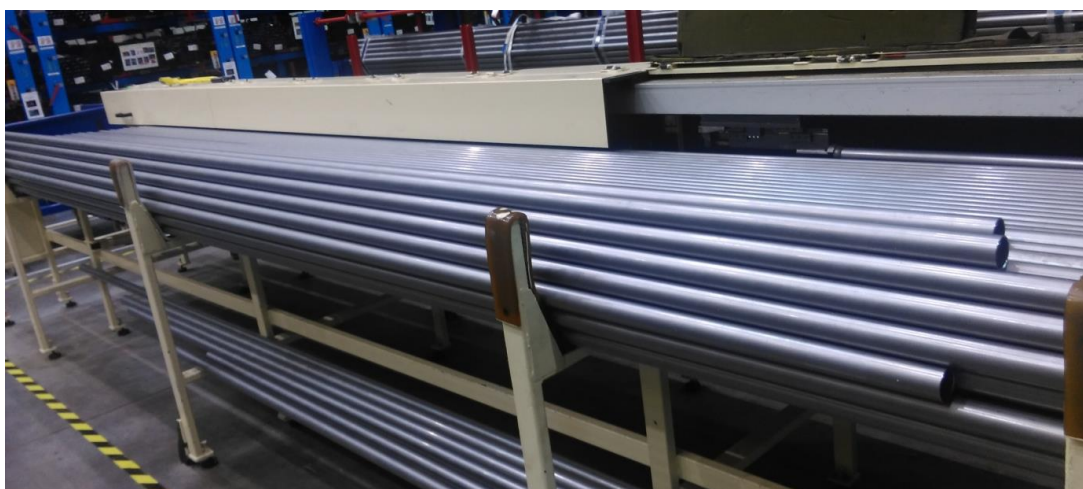
Tento materiál je dodáván dle specifikací firmy. Nejedná se tedy o normalizovanou konstrukční ocel. Svým chemickým složením (Tabulka 5) i mechanickými vlastnostmi je velmi podobná oceli ČSN 11 523 (EN S35530, DIN St52-3). Je však požadována nižší maximální povolená hodnota fosforu a síry než je u konstrukčních ocelí obvyklé. Kompletní materiálový list dané oceli je uveden v příloze 2.

Tabulka 5: Chemické složení oceli pro výrobu pláště tlumiče

Materiál č. 0304-560-4006					
C	Mn	Si	P	S	Nb
0,220	1,500	0,300	0,025	0,035	0,030
0,150	1,000	0,175	MAX.	MAX.	0,015

Mechanické vlastnosti udávané výrobcem pro dodávaný trubkový polotovar Ø50,8 x Ø 46,2 x 6000 jsou:

Mechanické vlastnosti oceli		
Mez kluzu [MPa]	Re	510 MIN.
Tažnost [%]	A	10 MIN.



Obr. 35: Tyčové polotovary pro výrobu plášťů tlumičů

Charakteristika:

Jedná se o konstrukční jemnozrnnou ocel legovanou niobem. Díky většímu podílu manganu disponuje větší mezí kluzu než oceli bez legujících přísad. Přítomnost niobu zajišťuje tvorbu karbidů NbC a omezuje mezikrystalickou korozi. Jedná se o ocel zaručeně svařitelnou bez přehřevu s vysokou vrubovou houževnatostí. [55]

Použití:

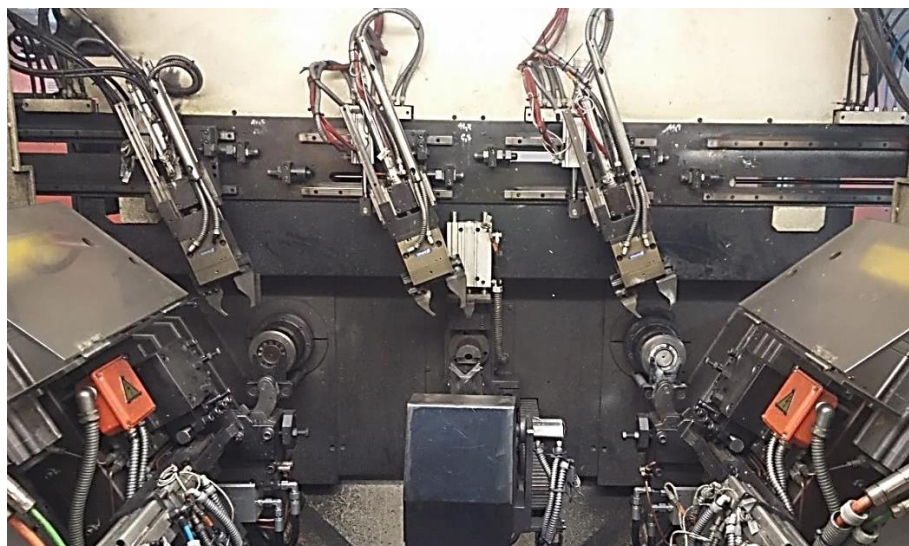
Tato ocel je určena především pro výrobu pláště tlumiče ve firmě KYB Manufacturing CZ. Svým chemickým složením a mechanickými vlastnostmi můžeme říci, že trubky z této oceli jsou vhodné pro součásti automobilů, motocyklů a jízdních kol. Tato ocel je dále vhodná zejména pro svařované konstrukce, namáhané staticky i dynamicky (mosty, spirální skříně vodních turbín, svařované případně nýtované trupy říčních a námořních plavidel). Její použitelnost je možná v různých teplotách prostředí (snížené, běžné i zvýšené teploty). [56]

8.2 Stroj – dvojitý CNC soustruh

Obrábění pláště tlumiče je prováděno na speciálním jednoúčelovém dvojitým CNC obráběcím soustruhu od španělské firmy LAU-NIK MÁQUINAS ESPECIALES S.L., který byl vyroben na zakázku tak, aby splňoval požadavky firmy.

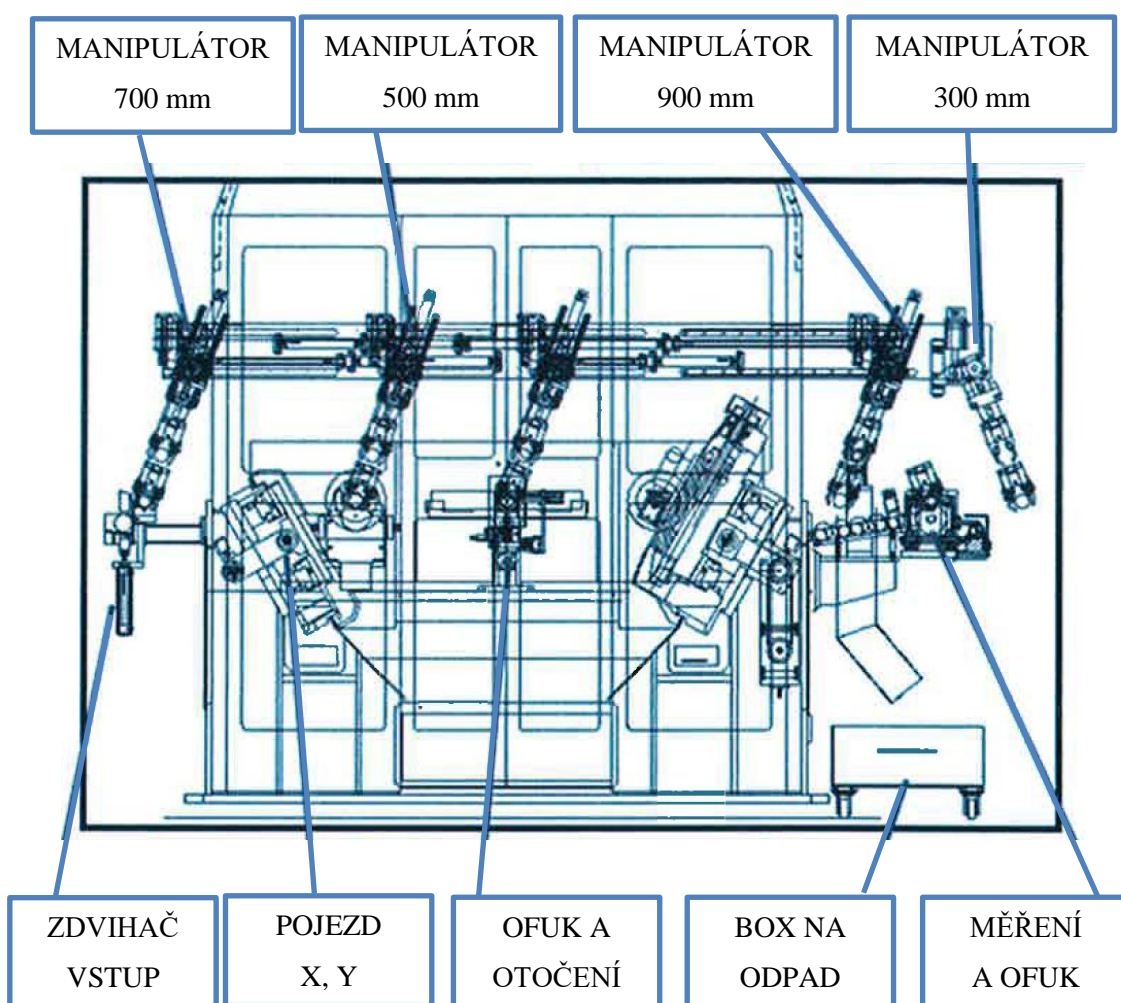


Obr. 36: Dvojitý CNC obráběcí soustruh [63]



Obr. 37: Pohled do ústrojí dvojitého CNC soustruhu

Na obrázku (Obr. 38) níže můžeme vidět rozmístění manipulátorů a základních prvků stroje.



Obr. 38: Schéma stroje [63]

Tento jednoúčelový stroj slouží k obrábění čelních ploch a vnitřních průměrů do malých hloubek. Pracuje v plně automatickém režimu v taktu výrobní linky s možností plynulého regulování otáček i posuvů.

Na první (vstupní) pozici uchopí manipulátor trubku z nakládacího stanoviště a přendá ji do prvního obráběcího stanoviště. Na prvním obráběcím stanovišti dochází k obrobení čela trubky, zkosení a vnitřního průměru. Toto stanoviště je osazeno pojezdy nesoucí soustružnické nože obrábějící plášť tlumiče v souřadnicích X, Y, Z. Pojez je poháněn pomocí servopohonu a vřetene.

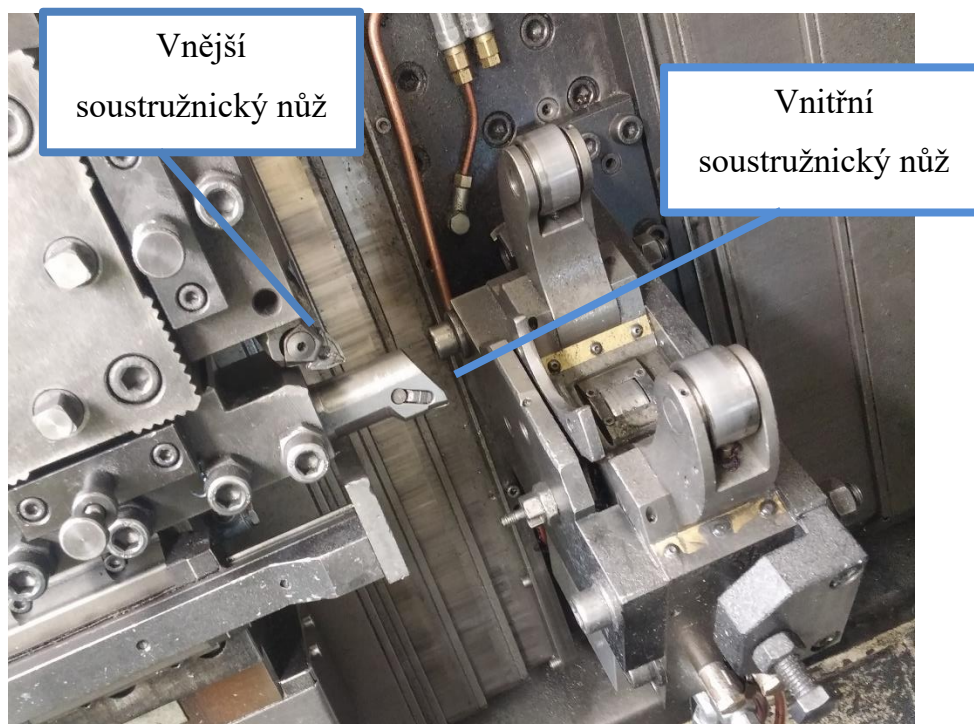
Trubka je vložena pomocí dvou tandemových válců do upínací hlavice a vystředěna podpurnými drážkami, které polotovar ustaví vzhledem k ose vřetena. Před zahájením soustružení se zasunou tandemové válce, aby umožnily lepší přístup soustružnickým nožům. Jeden nůž obrábí čelní plochu včetně vnitřního zkosení a vnitřní válcové plochy i vnitřního rádiusu. Druhý nůž obrábí pouze vnější zkosení. Po obrobení se uvolní upínací hlavice a vyhazovač uvolní polotovar, manipulátor vyjme trubku a přemístí ji na stanoviště, kde dojde k očištění vnitřku součásti a k jejímu otočení o 180°. Po otočení je trubka přemístěna do druhého obráběcího stanoviště, kde je trubka obrobena z druhé strany.

Stejně jako na prvním obráběcím stanovišti tak i na tomto je součást obráběna párem nožů. Po obrobení i druhé strany manipulátor přemístí trubku na stanoviště ofuku a měření. Na tomto stanovišti je znovu ofouknut vnitřek součásti a následně přemístěn na kontrolní stanoviště, kde je kontrolována délka pláště tlumiče. Pokud je součást vyhovující, je manipulátorem přemístěna do myčky mezi shodné výrobky, kde dochází k jejich odmaštění. V případě, že součást nevyhovuje požadovaným rozměrům, je přemístěna mezi neshodné výrobky a vyřazena z výrobního řetězce.

Tento dvojitý CNC soustruh slouží k obrábění typově podobných výrobků podobných délek i průměrů. Obrobky se liší maximálně v obráběném vnitřním průměru délce, či hloubce obrábění. Sled operací či dráhy obrábění se téměř nemění.



Obr. 39: Dvojitý CNC soustruh



Obr. 40: Soustružnické nože dvojitého CNC soustruhu

Tabulka 6: Parametry dvojitého CNC soustruhu [63]

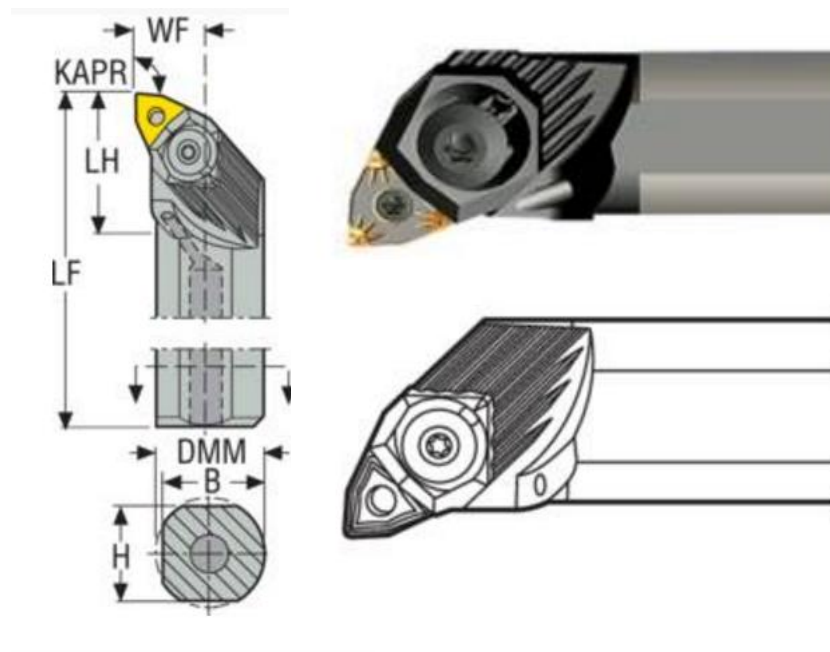
Parametry	Jednotka	Hodnota
Výkon stroje	kW	37
Maximální otáčky vřetene 1	ot/min	2200
Maximální otáčky vřetene 2	ot/min	2100
Maximální obrábění průměr	mm	60
Minimální obrábění průměr	mm	40
Maximální délka trubky	mm	500
Minimální délka trubky	mm	200
Maximální tloušťka trubky	mm	4
Minimální tloušťka trubky	mm	1
Maximální hmotnost trubky	kg	3
Tlak lunet	bar	20
Tlak čelistí	bar	20
Pneumatický pracovní tlak	bar	5
Hydraulický pracovní tlak	bar	40
Hmotnost stroje	kg	6740
Doba cyklu (obrábění + manipulace)	s	9,8

8.3 Nástroj – soustružnický nůž

K obrábění obou konců pláště tlumiče na obou obráběcích stanovištích je použit jeden typ soustružnického nože s jedním typem vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu.

Tělo soustružnického nože

Tělo soustružnického nože je od firmy SECO, typ: A25R – PWLNR08 (Obr. 41). Jedná se o pravý přímý ubírací nůž. Základní parametry tohoto těla soustružnického nože jsou uvedeny v tabulce níže (Tabulka 7).



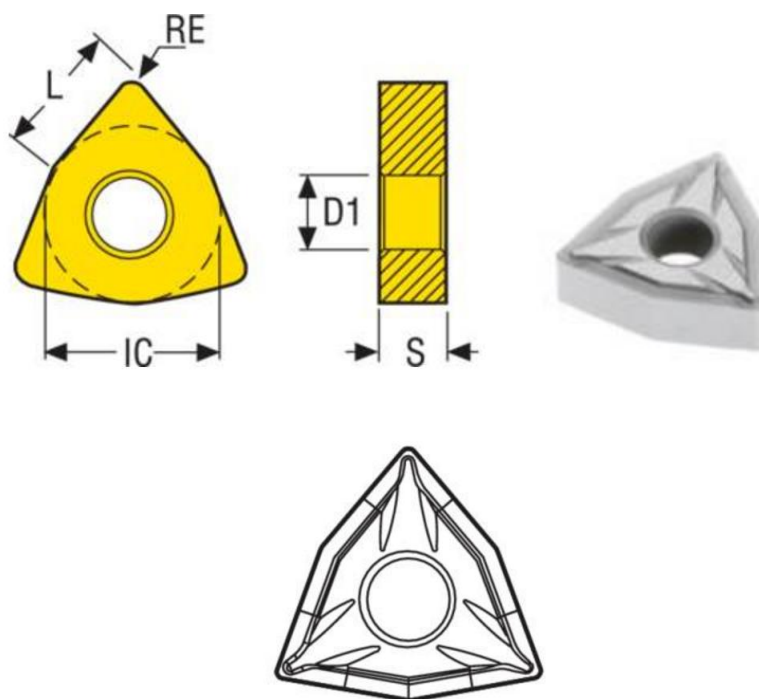
Obr. 41: Soustružnický nůž A25R – PWLNR08 [64]

Tabulka 7: Parametry soustružnického nože A25R – PWLNR08 [64]

b [mm]	DMM [mm]	KAP _R [°]	H [mm]	LF [mm]	LH [mm]	D _{min} [mm]	Ga [°]	Gr [°]
24,0	25,0	95,0	23,0	200,0	30,0	32,0	-5,0	11,0

Vyměnitelná břitová destička

K obrábění pláště tlumiče je použita vyměnitelná břitová destička ze slinutého karbidu od firmy SECO typ: WNMG080404-FF2,TP2501 (Obr. 42). Jedná se o oboustrannou tříbřitou destičku, je tedy možné destičku šestkrát přeupnout. Tato břitová destička je určena k vnějšímu i vnitřnímu soustružení. Je povlakovaná metodou CVD povlakem Duratomic, který byl popsán v kapitole (4.4.3). Její základní parametry jsou v tabulce pod obrázkem (Tabulka 8).



Obr. 42. Vyměnitelná břitová destička WNMG080404-FF2,TP2501 [65]

Tabulka 8: Parametry vyměnitelné břitové destičky WNMG080404-FF2,TP2501 [65]

L [mm]	IC [mm]	S [mm]	RE [mm]	f [mm/ot]	a_p [mm]	v_c [m/min]
8,7	12,7	4,8	0,40	0,2	0,95	480,0

V následující tabulce 9 jsou uvedeny ceny těla soustružnické nože i vyměnitelné břitové destičky.

Tabulka 9: Pořizovací cena tělesa nástroje a břitové destičky

Cena těla nástroje	4 200 Kč
Cena břitové destičky	161 Kč

9 Optimalizace řezných podmínek

V této kapitole bude vypočtena optimální trvanlivost a optimální řezné podmínky dle kritéria optimálnosti z hlediska minimálních výrobních nákladů. K vypočtení optimální trvanlivosti je třeba nejprve určit náklady na operační úsek. Výpočet těchto nákladů, které jsou součástí kritéria optimálnosti z hlediska minimálních výrobních nákladů, je uveden v podkapitole 6.2.1.

9.1 Výpočet nákladů na jeden operační úsek

Jako jeden operační úsek bude uvažováno jedno ze dvou obráběcích stanovišť u dvojitého CNC soustruhu. Proto budou hodnoty uvedené v této kapitole vztažené pouze na jedno obráběcí stanoviště.

9.1.1 Náklady na strojní práci na operační úsek

Pro určení nákladů na strojní práci je třeba určit následující hodnoty:

Mzdu operátora včetně sociálního a zdravotního pojištění jsem určil dle vnitropodnikových informací a činí 200 Kč/hod. Jelikož je tato hodnota uvažována k obsluze celého CNC soustruhu, podělím ji dvěma, abych dostal mzdu na jedno obráběcí stanoviště.

$$M_o = 100 \text{ [Kč/hod]}$$

Přirážka směnového času je konstanta, která udává časovou rezervu na úkony, které probíhají během celé směny. [24] Po konzultaci s technologem obrábění vnějších trubek jsem volil konstantu následovně:

$$k_c = 1,15 \text{ [-]}$$

Plánované režijní náklady střediska jsou přímo k obráběcímu CNC stroji. Hodnotu jsem určil po dohodě s pracovníkem technologie obrábění takto:

$$RNS_{PL} = 300 \text{ [%]}$$

Vzhledem k tomu, že výroba pláště tlumiče je hromadná, volím koeficient využití stroje dle tabulky 3, následovně:

$$k_{vS} = 0,80 \text{ [-]}$$

Požizovací cena stroje byla 13,5 milionu korun. Tuto částku opět podělím dvěma, abych dostal hodnotu stroje pro jedno obráběcí stanoviště.

$$C_s = 6\,750\,000 \text{ [Kč]}$$

Ostatní hodnoty potřebné pro výpočet hodinových nákladů na provoz stroje jsem dostal k dispozici od pracovníka technologie obrábění. Hodnoty jsou zachyceny v následující tabulce 10.

Tabulka 10: Hodnoty potřebné pro výpočet hodinových nákladů na provoz stroje

C_e [Kč/hod]	Z_s [rok]	CFS_{EFPL} [hod/SM]	SM [-]	U [Kč]
6	10	2 400	2	125 000

Po dosazení nejprve do vzorce (6.8) poté do (6.7) a nakonec do (6.6) získám hodinové náklady na provoz stroje.

Koeficient údržby stroje

$$k_{us} = \frac{6\,750\,000 + 125\,000}{6\,750\,000} = 1,019 \text{ [-]} \quad (9.1)$$

Odpisy stroje

$$O_s = \frac{6\,750\,000}{10 \cdot 2\,400 \cdot 2 \cdot 0,8} = 175,8 \text{ [Kč/hod]} \quad (9.2)$$

Hodinové náklady na provoz stroje

$$N_{sh} = 175,8 \cdot 1,019 + 6 = 185,04 \text{ [Kč/hod]} \quad (9.3)$$

Náklady na strojní práci minutové

Vypočtené a výše určené hodnoty nakonec dosadíme do rovnice (6.5) a získáme tak minutové náklady na strojní práci na jeden operační úsek.

$$\begin{aligned} N_{sm} &= \left[1,15 \cdot \frac{100}{60} \left(1 + \frac{300}{100} \right) + \frac{185,03}{60} \right] \\ &= 10,75 \text{ [Kč/min]} \end{aligned} \quad (9.4)$$

Náklady na strojní práci na operační úsek

Pokud známe náklady na strojní práci minutové, můžeme vypočítat náklady na strojní práci na jeden operační úsek dle vztahu (6.4).

$$N_s = 0,1175 \cdot 10,75 = 2,37 \text{ [Kč]} \quad (9.5)$$

9.1.2 Náklady na nástroj vztažené na operační úsek

Koeficient řezání

Koeficient řezání vyjadřuje poměr časů, kdy je břit nástroje v záběru (opotrebováván) a kdy je mimo záběr. Tento koeficient lze vyjádřit následovně:

$$k_r = \frac{t_{As \text{ řez}}}{t_{As \text{ celk}}} = \frac{0,0563}{0,1175} = 0,479 \text{ [-]} \quad (9.6)$$

Kde: $t_{As \text{ řez}}$ - strojní čas v řezu kdy je břit opotrebováván [min]

$t_{As \text{ celk}}$ - celkový strojní čas [min]

Pro určení celkového strojního času a času, kdy je břit v záběru, mi posloužil poskytnutý NC kód, ze kterého bylo možné tyto hodnoty zjistit.

Trvanlivost nástroje

Po vypočtení koeficientu řezání je možno určit počet výměn nástroje na daný operační úsek (6.11). Trvanlivost nástroje je uvažovaná pro 1800 kusů (ks), pokud známe strojní čas na jeden kus, můžeme určit trvanlivost takto:

$$T = ks \cdot t_{As \text{ celk}} = 1800 \cdot 0,1175 = 211,5 \text{ [min]} \quad (9.7)$$

Počet výměn nástroje

$$z_v = \frac{0,1175 \cdot 0,479}{211,5} = 2,67 \cdot 10^{-4} \text{ [-]} \quad (9.8)$$

Náklady na nástroj vztažené na jednu trvanlivost břítu

Konstanty určené pro výpočet nákladů na nástroj vztažených na jednu trvanlivost jsou uvedeny v tabulce 11. Hodnotu z_u počtu předpokládaných upnutí za dobu životnosti tělesa jsem po konzultaci s odborným konzultantem snížil na 50 z důvodu častých destrukcí těles nástroje.

Tabulka 11: Koeficienty pro výpočet nákladů na nástroj vztažených na jednu trvanlivost

z_u	s_b	k_{ut}
50	0,7	0,6

Ceny tělesa nástroje a vyměnitelných břitových destiček jsou uvedeny v tabulce 12 níže včetně počtů destiček a břitů na destičce.

Tabulka 12: Hodnoty potřebné k výpočtu nákladů na nástroj

C_d [Kč]	C_{tn} [Kč]	z_d	z_b
161	4200	1	6

Nyní známe všechny hodnoty potřebné pro výpočet nákladů na nástroj vztažených na jednu trvanlivost. Pokud tyto hodnoty dosadíme do vzorce (6.12) dostaneme tento výsledek:

$$N_{nT} = \frac{161 \cdot 1}{6 \cdot 0,7} + (1 + 0,6) \frac{4200}{50} = 172,73 \text{ [Kč]} \quad (9.9)$$

Náklady na nástroje

Náklady na nástroje vypočteme podle rovnice (6.10).

$$N_n = 2,67 \cdot 10^{-4} \cdot 172,73 = 0,046 \text{ [Kč]} \quad (9.10)$$

9.1.3 Náklady na výměnu nástroje

Náklady na výměnu nástroje minutové

Nyní můžeme vypočítat náklady na výměnu nástroje ze vzorce (6.13).

$$N_{vnm} = \left[1,15 \cdot \frac{100}{60} \left(1 + \frac{300}{100} \right) + \frac{185,03}{60} \right] \cdot 2,67 \cdot 10^{-4} \quad (9.11)$$

$$= 10,6 \text{ [Kč/min]}$$

Náklady na výměnu nástroje

V tomto vztahu (6.13) je jedinou neznámou čas výměny nástroje t_{vn} . Ten jsem určil po konzultaci s technologem úseku obrábění. Výměna nástroje na speciálním CNC soustruhu je poměrně náročná. Výměna jedné břitové destičky na jednom obráběcím stanovišti trvá 2 minuty.

$$t_{vn} = 2 \text{ [min]}$$

$$N_{vn} = 2 \cdot 10,6 \cdot 2,67 \cdot 10^{-4} = 0,0056 \text{ [Kč]} \quad (9.12)$$

9.1.4 Výpočet výrobních nákladů pro stávající řezné podmínky

Celkové výrobní náklady pro stávající řezné podmínky stanovíme sečtením jednotlivých nákladů, které byly vypočteny výše dle vztahu (6.3).

$$N = N_s + N_n + N_{vn} = 2,37 + 0,046 + 0,0056 = 2,421 \text{ [Kč]} \quad (9.13)$$

Současné celkové výrobní náklady na jeden operační úsek, kterým je jedno obráběcí stanoviště, činí **2,42 Kč**

9.2 Výpočet optimálních hodnot

9.2.1 Optimální trvanlivost

Optimální trvanlivost z hlediska minimálních nákladů vyjádříme podle výše uvedeného vztahu (6.17). Po dosažení vypočtených hodnot získáme následující optimální trvanlivost.

$$T_{optN} = \frac{2 \cdot 10,6 + 172,73}{10,75} \cdot 0,479 \cdot (2,5 - 1) = 12,96 \text{ [min]} \quad (9.14)$$

9.2.2 Optimální řezná rychlost

Výpočet optimální řezné rychlosti vychází z rovnosti původní trvanlivosti a řezné rychlosti a optimální trvanlivosti a řezné rychlosti. A to především protože řezná rychlost má ze všech řezných podmínek nejvýznamnější vliv na trvanlivost nástroje. [24]

$$T_{p\u016f\u017e} \cdot v_{c_{p\u016f\u017e}}^m = T_{optN} \cdot v_{c_{opt}}^m \quad (9.15)$$

$$v_{c_{opt}} = \sqrt[m]{\frac{T_{p\u016f\u017e} \cdot v_{c_{p\u016f\u017e}}^m}{T_{optN}}} \quad (9.16)$$

- Kde: $v_{c_{p\u016f\u017e}}$ - původní (stávající) řezná rychlost [m/min]
 $v_{c_{opt}}$ - optimální řezná rychlost [m/min]
 $T_{p\u016f\u017e}$ - původní (stávající) trvanlivost bříty nástroje [min]

Pro výpočet optimální řezné rychlosti je třeba nejdříve vypočítat stávající řeznou rychlost. Můžeme ji vypočítat, pokud známe současné otáčky a obráběný průměr. Hodnota stávajících otáčky je konstantní $n = 1\,800$ ot/min, obráběný průměr je $D = 46,8$ mm.

$$\begin{aligned} v_{c_{p\u016f\u017e}} &= \frac{\pi \cdot D \cdot n_{p\u016f\u017e}}{1\,000} = \frac{\pi \cdot 46,8 \cdot 1\,800}{1\,000} \\ &= 264,65 \text{ [m/min]} \end{aligned} \quad (9.17)$$

Nyní můžeme dle vztahu (9.14) vypočítat optimální řeznou rychlost z hlediska minimálních výrobních nákladů.

$$v_{c_{opt}} = \sqrt[2,5]{\frac{211,5 \cdot 264,65}{12,96}} = 808,6 \text{ [m/min]} \quad (9.18)$$

Ted' když známe optimální řeznou rychlost, je nutné určit otáčky, které této optimální řezné rychlosti odpovídají.

$$n_{opt} = \frac{v_{c_{opt}} \cdot 10^3}{\pi \cdot D} = \frac{808,6 \cdot 10^3}{\pi \cdot 46,8} = 5\,500 \text{ [ot/min]} \quad (9.19)$$

9.2.3 Určení posuvu pro optimální řezné podmínky

Posuv volím s ohledem na požadavek zlepšení drsnosti obrobeného povrchu. Dle výkresu je požadovaná drsnost Ra 4,6 μm. K určení posuvu použiji empirický vztah (6.37) z podkapitoly (6.3.3), omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy. V tomto empirickém vztahu je nejvýznamnější parametr poloměr břitu r_ϵ . Dle informací od výrobce břitových destiček je udávaný poloměr ostří břitu 0,4 mm.

$$\begin{aligned} f &= 0,1366 \cdot r_\epsilon^{0,4869} \cdot R_{a \max}^{0,5131} = \\ &= 0,1366 \cdot 0,4^{0,4869} \cdot 4,6^{0,5131} = 0,19 \text{ [mm/ot]} \end{aligned} \quad (9.20)$$

9.3 Porovnání stávajícího a optimálního stavu obrábění

V této podkapitole provedu porovnání mezi stávajícími a optimálními řeznými podmínkami bez uvažování omezujících podmínek, aby bylo patrné jakého strojního času, a jakých úspor výrobních nákladů je možné dosáhnout, pokud nejsou optimální řezné podmínky omezeny například nízkými otáčkami nebo nízkým výkonem stroje.

9.3.1 Porovnání stávajících a optimálních pracovních podmínek

Z uvedené tabulky 13 můžeme vidět, že optimální trvanlivost z hlediska minimálních výrobních nákladů se výrazně liší od současného stavu. Řezné podmínky se také výrazně liší, jsou přibližně o trojnásobek nižší než vypočtené optimální podmínky. Důležité je upozornit na různé hodnoty posuvu, optimální posuv na otáčku byl vypočten tak, aby obrobený povrch splňoval požadovanou drsnost povrchu. I přes výrazné snížení posuvu došlo ke snížení strojního času téměř na polovinu. Je nutno zmínit to, že tyto pracovní podmínky není možné vždy splnit ať už z hlediska dostatečného výkonu, krouticího momentu či otáček. Proto se v následující kapitole budu věnovat omezujícím podmínkám a oblasti přípustných řešení.

Hodnoty uvedené v tabulce 13 jsou počítány pro hodnotu hloubky řezu $a_p = 0,3$ mm.

Tabulka 13: Porovnání stávajících a optimální řezných podmínek

	Jednotka	Stávající	Optimální
Trvanlivost	min	211,5	12,96
Posuv	mm/ot	0,35	0,19
Řezná rychlost	m/min	265	808,6
Otáčky	ot/min	1800	5500
Strojní čas	min (s)	0,117 (7,05)	0,058 (3,49)

9.3.2 Porovnání stávajících a optimálních výrobních nákladů

V tabulce 14 jsou uvedeny jednotlivé výrobní náklady vztahované na jeden vyráběný kus. V případě optimálních pracovních podmínek se výrazně sníží náklady na strojní práci především díky snížení strojního času. Náklady na nástroj i na výměnu nástroje přibližně desetinásobně vzrostou, následkem výrazného zvýšení řezné rychlosti, které má za následek snížení trvanlivosti břitu. Celkové výrobní náklady jsou při optimálních pracovních podmínkách nižší o 34 %.

Tabulka 14: Porovnání stávajících a optimálních výrobních nákladů

	Jednotka	Stávající	Optimální
Náklady na strojní práci na jeden operační úsek	Kč	2,370	1,173
Náklady na nástroj na jeden operační úsek	Kč	0,046	0,371
Náklady na výměnu nástroje na jeden operační úsek	Kč	0,0056	0,0455
Celkové náklady na kus na jednom operačním úseku	Kč	2,421	1,590
Úspora	%	34,32	

9.4 Definice oblasti přípustných řešení

K vytvoření oblasti přípustných řešení je třeba nejprve určit omezující podmínky, které budou oblast přípustných řešení ohraničovat. Jako omezující volím následující podmínky:

- omezení dané maximálními otáčkami z hlediska stroje,
- omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy.

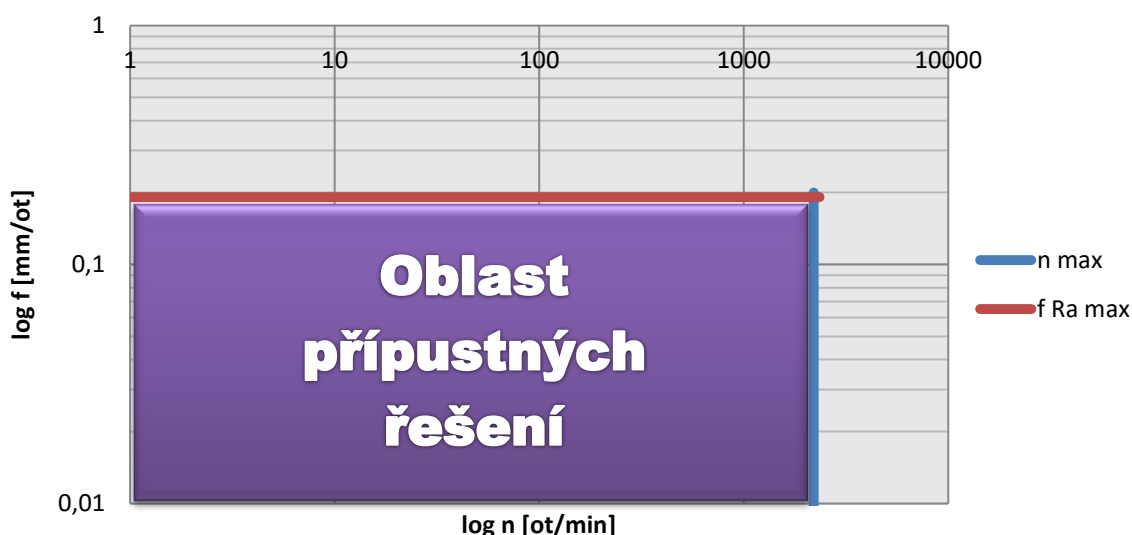
Omezení dané maximálním posuvem stroje nebudu uvažovat, neboť lze předpokládat, že omezení dané požadovanou drsností obrobené plochy, které je funkcí posuvu, hodnotu posuvu omezí více než hodnota samotného maximálního posuvu stroje.

Pokud budeme tedy uvažovat tyto dvě omezující podmínky, bude oblast přípustných řešení pro dvojité CNC soustruh vypadat následovně (Graf 1):

Tabulka 15: Hodnoty k určení oblasti přípustných řešení

	Jednotka	Hodnota
$f_{Rm\ max}$	[mm/ot]	0,19
n_{max}	[ot/min]	2200

Graf 1: Oblast přípustných řešení



Jak je z grafu patrné, oblast přípustných řešení není ohraničená hodnotami minimálního posuvu a minimálních otáček, a to především proto, že je velmi pravděpodobné, že optimální hodnoty budou v oblasti maximálních posuvů a otáček případně až za touto hranicí. Omezení z hlediska maximálního výkonu také nemohlo být v grafu uvedeno, protože neznáme výkonovou charakteristiku dvojitého CNC soustruhu. Dá se ale předpokládat, že vzhledem k nízkým otáčkám výkon stroje překročen nebude.

9.5 Kontrola oblasti přípustných řešení

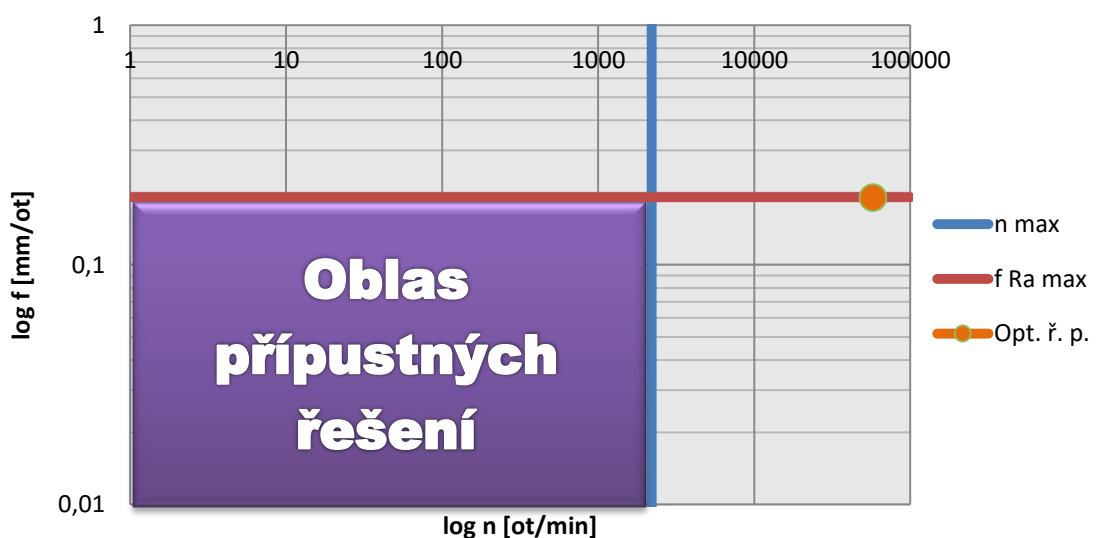
V této kapitole porovnám vypočtené optimální hodnoty v podkapitole 9.2 s oblastí přípustných řešení z kapitoly 9.4. Je tedy nutné zjistit, zda optimální pracovní podmínky leží v oblasti přípustných řešení a pokud tomu tak není, je třeba tuto hodnotu snížit tak, aby hodnota odpovídala maximálním přípustným hodnotám. Tento krok je nezbytný především kvůli existenci omezení, která charakterizují obráběcí proces. V tomto případě je to limitní posuv z hlediska dosažení požadované drsnosti obrobeneé plochy a limitní otáčky stroje.

Kontrolu je možné provést např. grafickým vyhodnocením pomocí grafu tak, že do grafu znázorňující oblast přípustných řešení (Graf 1) vynesu hodnotu posuvu a otáček pro daný operační úsek a tím dostaneme bod. Z grafu bude patrné, zda daný bod leží v oblasti přípustných řešení nebo mimo ni.

Tabulka 16: Hodnota optimálních řezných parametrů

	Jednotka	Hodnota
$f_{Rm \max}$	[mm/ot]	0,19
n_{\max}	[ot/min]	5500

Graf 2: Kontrola optimálních řezných podmínek vzhledem k oblasti přípustných řešení



Z grafu je patrné, že vypočtené optimální otáčky výrazně převyšují otáčky, které je možné dosáhnout na stroji. Z tohoto důvodu je třeba otáčky snížit na takovou hodnotu, kterou je možné na stroji dosáhnout.

Dále je patrné, že posuv je na hranici omezení velikosti posuvu z hlediska dodržení drsnosti obrobené plochy a dá se považovat za vyhovující.

Tabulka 17: Kontrola optimálních a přípustných řezných podmínek

$f_{Rm\ max}$ [mm/ot]		f_{opt} [mm/ot]	
0,19	≤	0,19	VYHOVUJE
n_{max} [ot/min]		n_{opt} [ot/min]	
2200	≤	5500	NEVYHOVUJE

Vzhledem k omezeným otáčkám stroje je třeba optimální otáčky 5500 ot/min snížit na maximální možné otáčky z pohledu stroje a to na 2200 ot/min. S ohledem na charakter operace by nemělo docházet k příliš velkému zatížení stroje, neboť je odebíraná poměrně malá hloubka třísky 0,3 mm.

9.5.1 Optimalizování pracovních hodnot dle oblasti přípustných řešení

Po zjištění nedostatečných otáček z pohledu stroje došlo ke snížení otáček na maximální přípustnou hranici 2200 ot/min, která vyhovuje omezujícím podmínkám. Pro tuto optimalizovanou hodnotu otáček je třeba přepočítat řeznou rychlost a s ní související trvanlivost břítu nástroje. Změna těchto hodnot povede i ke změně nákladů, které budou přepočteny také.

$$v_{c\ opt2} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} = \frac{\pi \cdot 46,8 \cdot 2200}{10^3} = 323,5 \text{ [m/min]} \quad (9.21)$$

$$T_{opt2} = \frac{T_{opt1} \cdot v_{v\ opt1}^m}{v_{c\ opt2}^m} = \frac{12,96 \cdot 808,6^{2,5}}{323,5^{2,5}} = 128 \text{ [min]} \quad (9.22)$$

Z výpočtu optimalizovaných pracovních parametrů je patrné, že došlo k více než polovičnímu snížení řezné rychlosti. Snížením řezné rychlosti se zvýšila trvanlivost břítu nástroje více než desetinásobně.

9.6 Ověření dodržení času výroby

Pro ověření dodržení taktu linky je důležité přepočíst strojní čas pro nové optimalizované pracovní parametry.

Aby byl zachován čas výroby jedné součásti, je nutné, aby hodnota strojního času nepřesáhla 7,05 s. Jiná než tato, případně nižší hodnota, je neakceptovatelná jak z pohledu snížení produktivity vyráběných plášťů tlumiče, tak z pohledu nákladů na jeden kus.

Tabulka 18: Porovnání optimálních a optimalizovaných pracovních podmínek

	Jednotka	Optimální	Optimalizované
Trvanlivost	min	12,96	128
Posuv	mm/ot	0,19	0,19
Řezná rychlost	m/min	808,6	323,5
Otáčky	ot/min	5500	2200
Strojní čas	min (s)	0,058 (3,5)	0,145 (8,7)

Z porovnání optimálních a optimalizovaných pracovních parametrů (Tabulka 18) vidíme, že optimalizovaný strojní čas výrazně převyšuje hodnotu času výroby více než o 1,5 sekundy. Tyto řezné parametry jsou tedy neakceptovatelné.

Při stávajících parametrech stroje, není možné dosáhnout výrobního času 7,05 s, při zachování optimálního posuvu z hlediska dodržení drsnosti obrobene plochy.

Se zvýšením strojního času dojde také ke zvýšení výrobních nákladů, které jsou se strojním časem úzce spjaty, konkrétně náklady na strojní práci.

9.7 Návrh optimální vyměnitelné břitové destičky

Z výše vypočtených a následně optimalizovaných řezných podmínek je zřejmé, že při současných výrobních podmínkách a strojním vybavení (stroj, nástroj), není možné při dodržení výrobního taktu linky vždy dosáhnout požadované drsnosti obrobene plochy.

Z tohoto důvodu navrhuji změnu vyměnitelných břitových destiček za destičky s rozdílnou geometrií vedlejšího nastavení ostří s tzv. hladícím segmentem (WIPER utvařeč), které byly popsány v podkapitole (4.4.4).

9.7.1 Popis VBD určených k testování

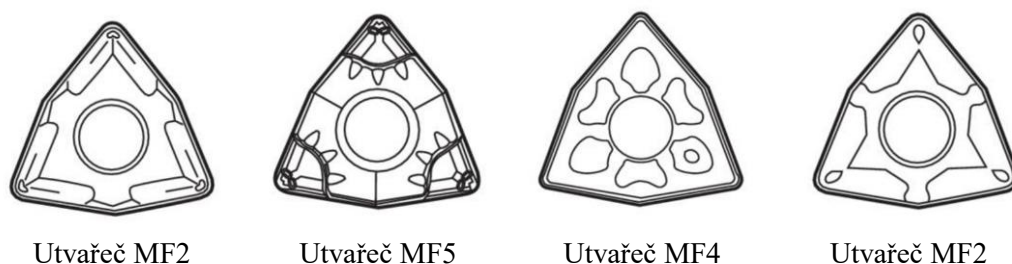
K otestování jsem dostal k dispozici šest typů vyměnitelných břitových destiček od firmy SECO s povlakem Duratomic. Jednalo se o následující VBD značené podle ISO – systému značení VBD (uvedený v příloze 3):

Tabulka 19: Přehled testovaných VBD

Pořadí	ISO kód
1	WNMG080408W-MF4, TM4000
2	WNMG080404W-MF2, TP2501
3	WNMG080408W-MF5, TP2501
4	WNMG080408W-M3, TP2501
5	WNMG080408W-MF2, TP2501
6	WNMG080404-MF2, TP2501

Všechny VBD jsou tvaru W (trojúhelníkové), s nulovým úhlem hřbetu, vyrobené ve stejné toleranci, ve stejném provedení s břity na obou stranách destičky a se stejnou délkou řezné hrany i se shodnou tloušťkou destičky.

VBD č. 2 a 6 mají poloměr špičky 0,4 mm na rozdíl od ostatních destiček, které mají poloměr špičky 0,8 mm. Všechny břitové destičky kromě destičky č. 6 mají hladicí segment (WIPER utvařeč) značený písmenkem W na osmé pozici ISO kódu. Znaky za pomlčkou označují typ utvařečů. Všechny čtyři typy utvařečů na VBD jsou uvedeny na obrázku níže (Obr. 43).



Obr. 43: Typy použitých utvařečů VBD

Koncové značení VBD udává třídu materiálu, ze kterého je destička vyrobena. Všechny VBD, kromě destičky č. 1, jsou ze třídy materiálu TP2501. Ta je určená jak pro hrubování tak pro dokončování, opatřena Duratomic povlakem, srovnatelná s vlastnostmi materiálu ISO P25. [76] Třída materiálu TM4000 destičky č. 1 je tvořena

houževnatým karbidovým substrátem a dvojitým CVD povlakem na bázi titanu a Duratomic určená k eliminaci tvorby nárůstku. [77]

10 Ověření volby vyměnitelných břitových destiček

K ověření vhodnosti vyměnitelných břitových destiček z hlediska dodržení předepsané drsnosti při zachování případného snížení taktu výroby stroje, jsme provedli experiment. Pro všechny typy poskytnutých destiček, včetně destičky, která je používána nyní, jsme určili dvě hodnoty posuvů a dvě hodnoty otáček a při těchto řezných podmínkách obrobili plášť tlumiče. Řezné podmínky byly voleny tak, aby bylo možné jejich vzájemnou kombinací zachovat, případně snížit takt stroje. V průběhu obrábění byla zkoumána a odebírána vzniklá tříska, jejíž tvar a způsob vzniku bude dále vyhodnocen. Pro jednotlivé břitové destičky a řezné podmínky byla vyhodnocena dosahovaná drsnost obrobené plochy. Po vyhodnocení dosahovaných parametrů bude určena nejvhodnější břitová destička jak z pohledu drsnosti, tak z pohledu utváření třísky.

10.1 Popis experimentu

Pro každou ze šesti typů testovaných břitových destiček plus v současné době používanou destičku budeme měnit hodnotu otáček stroje na 1800 ot/min a 2200 ot/min. Těmto otáčkám odpovídá hodnota řezné rychlosti 265 m/min a 323,5 m/min. Hodnota posuvu bude měněna na hodnoty 0,29 ot/min a 0,35 ot/min, Posuv 0,29 ot/min při otáčkách 2200 ot/min je doporučen pro dosažení drsnosti $R_a = 4,6 \mu\text{m}$, při běžné geometrii vyměnitelné břitové destičky.

Testování probíhalo na jiném typu pláště tlumiče, u kterého je větší hloubka třísky než u tlumiče uvedeného na výkrese. V tomto případě je tedy hloubka řezu, tedy odebíraná tříska 2,7 mm na vnitřním průměru tlumiče.

Pro tyto řezné podmínky bude provedeno vizuální hodnocení tvaru třísky, která bude graficky znázorněna a dále bude určena dosahovaná drsnost obrobené plochy.

10.2 Vyhodnocení tvaru třísky – vizuální zkouška

Pro vyhodnocení tvaru třísky použijí tabulku tvarů třísek z podkapitoly (5.3) (Obr. 15). Tvar třísky je velice důležitý u automatických linek s nepřímým dohledem. Je důležité, aby tříska odcházela z místa řezu a neulpívala na soustružnických nožích. Jednotlivé tvary třísek jsou rozděleny na:

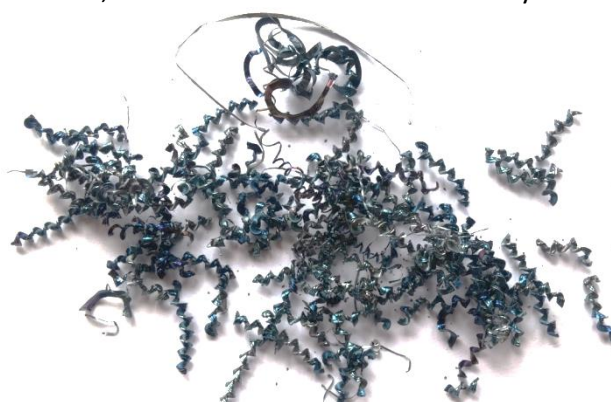
- Výhodné
 - krátké šroubovitě válcové třísky (KŠV)
 - krátké šroubovitě kuželové třísky (KŠK)
 - spirálové třísky (SP)
 - drobné třísky (DR)
- Nevýhodné
 - páskové třísky (PS)
 - smotané třísky (SM)
 - dlouhé šroubovitě třísky (DŠ)



Výhodná tříska, vzorek č. 6



Nevýhodná tříska, vzorek č. 11



Tříska vzniklá při obrábění současnou VBD č. 27

Obr. 44: Příklad výhodného a nevýhodného tvaru třísek a tvar třísky vznikající při obrábění současnou VBD

Tabulka 20: Vizuální hodnocení tvaru třísek

č. destičky	č. vzorku	Typ destičky	f [mm/ot]	n [ot/min]	Tvar třísky	
1	1	WNMG080408W-MF4, TM4000	0,29	1800	PS,	SM
	2		0,35	1800	SM,	DŠ
	3		0,35	2200	PS,	SM
	4		0,29	2200	SM,	DŠ
2	5	WNMG080404W-MF2, TP2501	0,29	1800	KŠV,	SP
	6		0,35	1800	KŠV,	SP
	7		0,35	2200	KŠK,	
	8		0,29	2200	KŠV,	DR
3	9	WNMG080408W-MF5, TP2501	0,29	1800	PS,	SM
	10		0,35	1800	PS,	DŠ
	11		0,35	2200	PS	
	12		0,29	2200	PS	
4	13	WNMG080408W-M3, TP2501	0,29	1800	PS,	SM
	14		0,35	1800	SM	
	15		0,35	2200	DŠ	
	16		0,29	2200	SM,	DŠ
5	17	WNMG080408W-MF2, TP2501	0,29	1800	DŠ	
	18		0,35	1800	DŠ,	KŠK
	19		0,35	2200	DŠ,	KŠK
	20		0,29	2200	DŠ,	KŠK
6	21	WNMG080404-MF2, TP2501	0,29	1800	SP,	DR
	22		0,35	1800	SP,	DR
	23		0,35	2200	SP,	DR
	24		0,29	2200	SP,	DR
7	25	Série WNMG080404-FF2,TP2501	0,29	1800	KŠV,	DŠ
	26		0,35	1800	KŠV	
	27		0,35	2200	KŠV	
	28		0,29	2200	SP	

Z vyhodnocených tvarů třísek je patrné, že jen dvě břitové destičky tvoří výhodné tvary třísek konkrétně destičky č. 2 a 6 (WNMG080404W-MF2, TP2501, WNMG080404-MF2, TP2501). Po konzultaci s vedoucím technologie obrábění plášťů tlumičů, jsme jako uspokojivou zvolili i destičku č. 5 (WNMG080408W-MF2, TP2501), vzhledem k tomu, že tříska byla málo objemná, neulpívala na nástroji a odcházela dovnitř trubky, kde jsou třísky následně vyfouknuty. Destičky č. 2 a 6 mají poloměr špičky 0,4 mm, který je vhodný pro menší hloubky řezu, snižuje riziko vzniku vibrací, ale má nižší pevnost řezné hrany. Destička č. 5 má poloměr špičky 0,8 mm,

který je vhodnější pro vyšší posuvy a zvyšuje spolehlivost bříty. Všechny vyhovující břitové destičky mají utvařec MF2, který je uveden na obrázku výše (Obr. 43).

10.3 Vyhodnocení drsnosti obrobeného povrchu

U obrobených vzorků byla vyhodnocena drsnost obrobené plochy na vnitřním průměru pláště trubky. Drsnost byla vyhodnocena v metrologické laboratoři společnosti KMCZ v Pardubicích. Dosažené průměrné drsnosti jsou uvedeny v tabulce 21 níže.

Tabulka 21: Dosažované drsnosti pro jednotlivé typy destiček

č. VBD	č. vzorku	Typ destičky	Tvar třísky		Drsnost Ra [μm]		
					1. měření	2. měření	Průměr
1	1	WNMG080408W-MF4, TM4000	PS,	SM	0,64	0,61	0,63
	2		SM,	DŠ	0,71	0,67	0,69
	3		PS,	SM	0,79	0,59	0,69
	4		SM,	DŠ	1,58	0,82	1,20
2	5	WNMG080404W-MF2, TP2501	KŠV,	SP	0,87	0,87	0,87
	6		KŠV,	SP	1,19	1,06	1,13
	7		KŠK,		1,08	0,85	0,97
	8		KŠV,	DR	0,97	0,85	0,91
3	9	WNMG080408W-MF5, TP2501	PS,	SM	1,06	1,16	1,11
	10		PS,	DŠ	0,67	0,80	0,73
	11		PS,		0,61	0,63	0,62
	12		PS,		0,57	0,63	0,60
4	13	WNMG080408W-M3, TP2501	PS,	SM	0,53	0,37	0,45
	14		SM,		0,44	0,50	0,47
	15		DŠ,		1,46	1,08	1,27
	16		SM,	DŠ	0,70	0,68	0,69
5	17	WNMG080408W-MF2, TP2501	DŠ,		0,59	0,67	0,63
	18		DŠ,	KŠK	0,77	0,84	0,80
	19		DŠ,	KŠK	0,73	0,72	0,72
	20		DŠ,	KŠK	0,73	0,66	0,69
6	21	WNMG080404-MF2, TP2501	SP,	DR	3,72	3,73	3,73
	22		SP,	DR	4,49	4,46	4,48
	23		SP,	DR	4,66	4,60	4,63
	24		SP,	DR	3,15	2,68	2,91
7	25	Série WNMG080404-FF2,TP2501	KŠV,	DŠ	3,28	3,58	3,43
	26		KŠV,		3,75	3,73	3,74
	27		KŠV,		3,71	3,54	3,62
	28		SP,		3,75	3,64	3,69

Jako vyhovující hodnota je uvažována drsnost $R_a = 3,2 \mu\text{m}$ a lepší. A to z důvodu, že u některých typů plášťů je požadována drsnost obrobené plochy právě $R_a = 3,2 \mu\text{m}$.

Z naměřených hodnot můžeme vidět, že VBD s WIPER utvařečem dosahují výrazně nižší drsnosti obrobené plochy, v některých případech je dokonce drsnost lepší o $4 \mu\text{m}$. Je tedy zřejmé, že použití WIPER utvařeče pomohlo odstranit problémy s příliš vysokou drsností. Jelikož dosahované výsledky drsností jsou natolik pozitivní, dalo by se uvažovat o zvýšení posuvu při zachování 1800 ot/min , které by vedlo ke zkrácení strojního času.

Dále můžeme vidět, že ne všechny břitové destičky, které tvořily vhodný tvar třísky, dosahují požadované maximální drsnosti $3,2 \mu\text{m}$. Destička č. 6 nesplňuje drsnost, a to především proto, že jako jediná z testovaných destiček nemá WIPER utvařeč a poloměr špičky $0,4 \text{ mm}$. Z tohoto důvodu nesplňuje drsnost $3,2 \mu\text{m}$ ani v současném sériovém provozu používaná destička č. 7, která je v tabulce 21 uvedena pro porovnání jakých hodnot drsností je možné dosáhnout se současnou břitovou destičkou.

Výběr vhodných VBD se tedy zúžil pouze na dva typy břitových destiček, které vyhovují jak požadavku vhodného utváření třísek, tak dosažení maximální drsnosti obrobeného povrchu $R_a = 3,2 \mu\text{m}$. Tyto dva typy VBD budou ještě testovány v provozu, zda jejich vyhovující vlastnosti obstojí i při sériové výrobě. Jedná se o destičky č. 2 a 5 (WNMG080408W-MF2, TP2501, WNMG080404W-MF2, TP2501)

10.4 Ověření vybraných VBD v běžném provozu

Pro ověření předpokládaných příznivých vlastností vyměnitelných břitových destiček, jako jsou vhodná tvorba třísky a kvalitní obrobený povrch, jsme VBD č. 2 a 5 (WNMG080408W-MF2, TP2501, WNMG080404W-MF2, TP2501) podrobili testování při běžné sériové výrobě, abychom zjistili, jak se v průběhu řezného procesu a pod velkým zatížením budou vybrané VBD chovat.

Při testování destiček v provozu byly zvoleny následující řezné podmínky:

- posuv $f = 0,5 \text{ mm/ot}$,
- otáčky $n = 1800 \text{ ot/min}$.

Při hloubce třísky $a_p = 2,7 \text{ mm}$ odebírané na vnitřním průměru trubky.

Zvolený posuv je záměrně vyšší o 0,15 mm/ot z důvodu snížení současného strojního času, a tím i celkového taktu linky. Toto zvýšení posuvu by nemělo překročit požadovanou drsnost 3,2 μm , jelikož při posuvu 0,35 mm/ot byla dosahovaná drsnost obrobeného povrchu výrazně nižší než povolená hodnota.

Po konzultaci s vedoucím technologie obrábění plášťů tlumičů jsme otáčky ponechali na původní hodnotě 1800 ot/min. Jednak z důvodu zachování řezné rychlosti, která má významný vliv na trvanlivost břitu nástroje, jelikož u strojů, u kterých není stálá obsluha, je náročné sledovat opotřebení jednotlivých nástrojů. A druhým důvodem jsou parametry stroje konkrétně maximální otáčky. Kdyby stroj pracoval v maximálních otáčkách v běžném provozu, dalo by se předpokládat výrazné zvýšení nákladů spojených s údržbou stroje.

10.4.1 Dosahované parametry vybraných VBD v běžném provozu

V tabulce 22 jsou uvedeny dosažené parametry v běžném sériovém provozu pro oba typy břitových destiček. V průběhu testování trvanlivosti byly odebrány tři vzorky plášťů tlumičů pro každou VBD. U těchto vzorků byla následně vyhodnocena dosažená drsnost obrobené plochy. Trvanlivost byla sledována a zapisována v průběhu jedné směny.

Tabulka 22: Parametry testovaných VBD v běžném provozu

č. VBD	č. vzorku	Typ destičky	Tvar třísky		Drsnost Ra [μm]			Průměrná trvanlivost [min]
					1. měření	2. měření	Průměr	
2	1	WNMG080404W-MF2, TP2501	KŠV,	SP	1,89	1,93	1,91	205
	2		KŠV,	KŠK	1,92	2,03	1,98	
	3		KŠV,		2,11	1,96	2,04	
5	4	WNMG080408W-MF2, TP2501	DŠ,	SM	1,59	1,61	1,60	219
	5		DŠ,	KŠV	1,64	1,57	1,61	
	6		DŠ,	PS	1,59	1,65	1,62	

V průběhu testování byl zjištěn problém s břitovou destičkou č. 5, jelikož v průběhu obrábění nevznikala přijatelná tříska tak jako při původním testování. S největší pravděpodobností to bylo způsobeno zvýšením posuvové rychlosti. Tříska se tvořila dlouhá šroubovitá, smotaná až pásková, především při soustružení čela pláště trubky. Tato tříska se velmi často zachytávala na nástroji případně na jeho držáku, a to je v případě tohoto automatického stroje bez přímé obsluhy nepřijatelné. Z tohoto

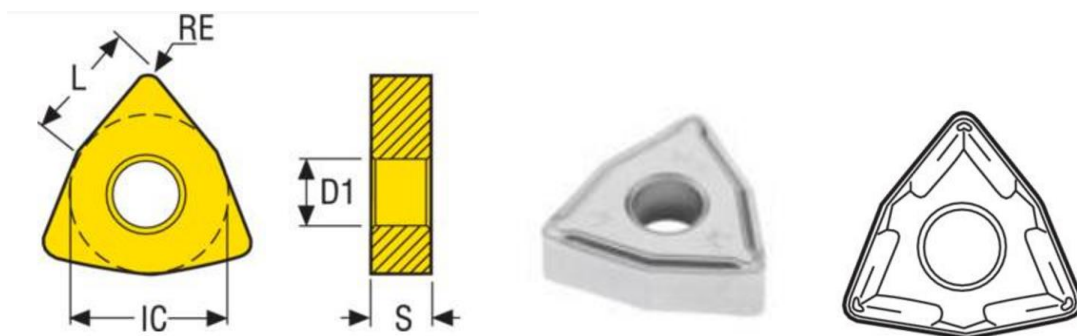
důvodu je nejvhodnější volbou břitová destička č. 2 (WNMG080404W-MF2, TP2501), která v průběhu testování tvořila vhodnou krátkou šroubovitou až spirálovou třísku.

Požadavky na dodržení maximální drsnosti $R_a = 3,2 \mu\text{m}$ byly splněny pro oba typy destiček. Destička č. 5 vykazuje lepší drsnost obrobené plochy, a to je dáno především větším poloměrem ostří oproti břitové destičce č. 2, která požadovanou drsnost také bez potíží splňuje. Z naměřených hodnot drsností je viditelný růst drsnosti v průběhu obrábění, kdy mírně stoupá hodnota drsnosti s největší pravděpodobností vlivem opotřebení vyměnitelné břitové destičky.

Vyšší průměrné trvanlivosti břítu dosahuje břitová destička č. 5, přibližně o 15 minut než destička č. 2 a o 7 minut než původní břitová destička. Tento výsledek se dal předpokládat vzhledem k většímu poloměru špičky. Dle mého názoru destička č. 2 dosahuje uspokojivé trvanlivosti. Zda je tato trvanlivost ekonomicky akceptovatelná vzhledem ke zkrácení výrobního času, bude porovnáno v technicko-ekonomickém zhodnocení.

10.4.2 Volba vhodné VBD pro sériovou výrobu

Na základě výše uvedených faktů je jedinou břitovou destičkou splňující požadavky tvorby vhodných tvarů třísek i dodržení požadované drsnosti v průběhu běžného provozu, destička č. 2 (WNMG080404W-MF2, TP2501). Tuto břitovou destičku bych tedy doporučil k nahrazení současné břitové destičky. Parametry destičky jsou uvedeny v tabulce 23.



Obr. 45: Vyměnitelná břitová destička WNMG080404W-MF2, TP2501 [78]

Tabulka 23: Parametry vyměnitelné břitové destičky WNMG080404W-MF2, TP2501 [78]

L [mm]	IC [mm]	S [mm]	RE [mm]	f [mm/ot]	a_p [mm]	v_c [m/min]
8,7	12,7	4,8	0,40	0,26	1,4	430

11 Technicko-ekonomické zhodnocení

11.1 Porovnání pracovních podmínek

V následující tabulce 24 můžeme vidět porovnání především trvanlivostí a posuvů, jelikož tyto dvě pracovní podmínky se liší oproti současné a navrhované variantě. Trvanlivost je přibližně o 6 minut nižší než současná hodnota. Díky vhodnější geometrii břitové destičky je možné použít o 0,15 mm/ot vyšší hodnotu posuvu při výrazně lepší kvalitě obrobeného povrchu.

Tabulka 24: Porovnání současných a navrhovaných pracovních podmínek

	Jednotka	Současné	Navrhované
Trvanlivost	min	211,5	205
Posuv	mm/ot	0,35	0,5
Řezná rychlost	m/min	265	265
Otáčky	ot/min	1800	1800

11.2 Porovnání výrobních časů

Změnou vyměnitelné břitové destičky můžeme docílit nižší dosahované drsnosti, jak je patrné z tabulky 25 současně při vyšší hodnotě posuvové rychlosti, což má za následek zkrácení celkového strojního času. Dále také tvorbu vyhovující třísky bez nutnosti přerušovaného řezu. Ten byl používán ke zlepšení tvorby třísky, aby se eliminovaly dlouhé nedělené šroubovitě třísky. Tato úprava programu měla za následek prodloužení strojního času o $4 \times 0,09$ s ($4x$ - zastavení 0,05 s + $8x$ - zpomalení rozjezd v systému 0,02 s) celkem tedy o 0,36 sekundy. Celkový strojní čas byl tedy 7,41 s místo požadovaného 7,05 s.

Porovnání současného času a času, kterého je možné dosáhnout v případě použití navrhované břitové destičky, je uvedeno v následující tabulce:

Tabulka 25: Porovnání stávajících optimálních výrobních časů

Stávající			Navrhované		
t_{AS} [s]	t_{AV} [s]	t_{CT} [s]	t_{AS} [s]	t_{AV} [s]	t_{CT} [s]
7,41	3,39	10,8	6,11	3,39	9,5
Celková úspora času na jeden ks [s]				1,3	
Celková úspora času na jeden ks [%]				12	

Kde: t_{AS} - jednotkový strojní čas [s]

t_{AV} - vedlejší jednotkový strojní čas [s]

t_{CT} - takt linky (CT - Cycle Time) [s]

Z tabulky 25 můžeme vidět, že odstranění přerušovaného řezu a použití navrhované břitové destičky snížilo CT o 1,3 sekundy což je přibližně o 12 % z původního času.

11.3 Porovnání výrobních nákladů

Vzhledem ke zvýšení posuvu dojde ke snížení strojního času a ten má výrazný vliv na velikost výrobních nákladů. Snížení trvanlivosti také bude mít vliv na náklady především na náklady na nástroje. Porovnání výrobních nákladů je uvedeno v tabulce 26.

Tabulka 26: Porovnání stávajících a navrhovaných výrobních nákladů na jeden kus

	Jednotka	Původní	Navrhované
Náklady na strojní práci na jeden operační úsek	Kč	2,370	2,017
Náklady na nástroj na jeden operační úsek	Kč	0,030	0,040
Náklady na výměnu nástroje na jeden operační úsek	Kč	0,005	0,005
Celkové náklady na kus na jednom operačním úseku	Kč	2,405	2,062
Úspora	%	14,3	

Vlivem snížení strojního času došlo i ke snížení nákladů na strojní práci. Mírné zvýšení nákladů na nástroj je odrazem snížení trvanlivosti břitu nástroje. Náklady na výměnu nástroje se nezměnily. V případě změny břitové destičky by se dala předpokládat úspora výrobních nákladů o 14,3 %.

11.4 Porovnání výrobního množství

Snížením strojního času je možné zvýšit CT, což má také pozitivní vliv ne přímo na náklady, ale následně na vyšší výnosy dané větším množstvím vyrobených plášťů tlumičů za stejnou časovou jednotku. O kolik více tlumičů, by bylo možné vyrobit,

ukazuje následující tabulka 27. Pro výpočet budu uvažovat nepřetržitý dvousměnný provoz, jaký je v daném podniku, časový fond jedné směny je 572 minuty.

Tabulka 27: Porovnání výrobních množství

	Stávající [ks]	Navrhované [ks]	Nárůst [ks]	Nárůst [%]
Směna	3178	3613	435	12 %
Den	6 356	7 225	870	
Týden	44 489	50 577	6 088	
Měsíc	190 667	216 758	26 091	
Rok	2 288 000	2 601 095	313 095	

V případě navrhovaného snížení výrobního času by v ideálním případě mohlo dojít o nárůst výrobního množství až 12 %, což je až 313 095 kusů za rok. Při výrobním množství 2 601 095 ks/rok by byla úspora na výrobních nákladech 917 656 Kč.

12 Závěr

Tato diplomová práce byla vypracována dle požadavků firmy KYB Manufacturing Czech s.r.o., které zahrnovaly optimalizaci bez kapalinového obrábění pláště tlumiče s ohledem na výrobní čas linky a dodržení předepsané drsnosti obrobeného povrchu.

Úvodní kapitola byla zaměřena na problematiku bez kapalinového obrábění, na jeho výhody a podmínky aplikace. Dále byla zmíněna obrobitelnost se zaměřením na konstrukční a automatové oceli včetně moderních automatových ocelí legovaných bismutem, vliv jednotlivých chemických prvků a tepelných zpracování na obrobitelnost. Výrobní technologie pláště tlumiče je soustružení, z tohoto důvodu byla tato technologie stručně popsána v kapitole 4. Tato kapitola je také věnována volbě řezných podmínek, základním výpočtům řezných parametrů a řezných sil při soustružení. Kapitulu uzavírají soustružnické nože s vyměnitelnými břitovými destičkami, povlaky vhodné pro suché obrábění a inovované břitové destičky s hladicí geometrií. Vzhledem k potřebě vyhodnocování tvaru třísek při ověřování návrhu vhodné břitové destičky byla zařazena i kapitola věnující se mechanismu tvorby třísky, druhům třísek a klasifikaci jejich tvarů.

Hlavní část byla věnována metodice optimalizace obrábění konstrukčních ocelí, jejichž součástí je optimalizace obráběcího nástroje, která zahrnuje volbu vhodného nástrojového materiálu, geometrii nástroje a velikost optimálního opotřebení. Dále pak optimalizaci řezných podmínek dle tří hlavních kritérií optimálnosti. Kritérií minimálních výrobních nákladů, maximální produktivity a maximálního úběru materiálu. Kapitulu uzavírá výčet omezujících podmínek, definice oblasti přípustných řešení a popis postupného způsobu optimalizace řezných podmínek.

V další části práce byla popsána součást určená k optimalizaci, tedy plášť tlumiče, jeho základní charakteristiky, materiál a požadavky dané výkresem. Následoval popis funkce a základních parametrů dvojitého CNC soustruhu, jakožto výrobního zařízení pro obrábění trubkového polotovaru. Společně s vybranou součástí a strojem bylo popsáno tělo soustružnického nože i používaná břitová destička.

Při optimalizaci řezných podmínek je velmi důležité mít vstupní údaje, které objektivně zachycují realitu v podniku, nebo se jim co nejvíce přibližují. Bez těchto směrodatných dat může vést jakýkoliv postup výpočtu k nesmyslným hodnotám a nelze dosáhnout korektních výsledků. Proto byly hodnoty vstupující do výpočtu optimálních řezných podmínek určovány ve spolupráci s vedoucím technologie obrábění plášťů tlumičů, aby se co nejvíce blížily skutečnosti. Dle charakteru výroby a požadavků podniku byly optimální řezné podmínky vypočteny dle optimalizačního kritéria minimálních výrobních nákladů.

Optimální řezné podmínky dle kritéria minimálních výrobních nákladů vyšly velmi odlišné než ty, které se v současné době používají. Optimální trvanlivost vyšla 12,96 min, tedy nižší téměř o 199 minut. Optimální otáčky vyšly přibližně 5500 ot/min což je o 3700 ot/min vyšší hodnota než se v současnosti používá. V současné době se současným strojním vybavením jsou tyto hodnoty řezných podmínek nerealizovatelné, proto bylo nutné optimální řezné podmínky omezit omezujícími podmínkami. První z omezujících podmínek byla hodnota maximálních otáček 2200 ot/min. Druhou omezující podmínkou byla hodnota maximálního posuvu 0,19 mm/ot s ohledem na požadavek dodržení předepsané drsnosti obrobenej plochy. Pro tyto hodnoty jsem určil oblast přípustných řešení, ve kterém se mohou nacházet optimální řezné podmínky. Po přepočtu optimálních hodnot tak, aby se nacházely v oblasti přípustných řešení, vyšly optimalizované otáčky 2200 ot/min a posuv 0,19 mm/ot. Po výpočtu strojního času pro

tyto optimalizované řezné podmínky bylo zjištěno, že nesplňují podmínky dodržení taktu výrobní linky. Bylo tedy zjištěno, že za těchto otáček a posuvu, který by zaručoval požadovanou drsnost obrobeného povrchu, není možné splnit takt výrobní linky při zachování současné břitové destičky.

Jedinou možností jak splnit požadavek taktu výrobní linky a požadované drsnosti povrchu při omezených otáčkách stroje byla změna břitové destičky. K dispozici jsem dostal 6 břitových destiček se speciálním hladicím segmentem tzv. Wiper utvařečem, který výrazně zlepšuje drsnost povrchu při zachování stejného posuvu. U těchto šesti břitových destiček byla vyhodnocována dosažená drsnost a tvar třísky vzhledem k tomu, že obrábění probíhá na automatickém CNC soustruhu, na kterém není stálá obsluha. Dle vyhodnocených drsností obstály všechny destičky s hladicím segmentem, avšak přijatelný tvar třísky tvořily pouze dvě břitové destičky. Tyto dvě vybrané destičky byly podrobeny testování v běžném velkosériovém provozu při zvýšené hodnotě posuvové rychlosti tak, aby došlo ke zkrácení výrobního taktu. I v průběhu velkosériové výroby byl vyhodnocován tvar vzniklé třísky. V průběhu testování se jako jedinou vhodnou destičkou jak z hlediska tvaru třísek, tak z hlediska dosahované drsnosti obrobené plochy, ukázala destička WNMG080404W-MF2, TP2501 od firmy SECO.

V závěru této diplomové práce je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení vybrané destičky. Bylo zjištěno, že i v případě zvýšení posuvu na hodnotu 0,5 mm/ot při otáčkách 1800m/min je dosahováno průměrné drsnosti $Ra = 2 \mu m$. Při zvýšené hodnotě posuvu je dosaženo zkrácení taktu linky z původního času 10,3 sekundy na 9,5 sekundy tedy o 1,3 sekundy na jeden kus. Snížením strojního času vlivem zvýšeného posuvu dojde i ke snížení výrobních nákladů na jeden kus přibližně o 14 % a nárůst produkce o 12 %. Při výrobním množství 2 601 095 ks/rok by byla úspora na výrobních nákladech 917 656 Kč. V případě optimalizace i jiných operačních úseků by výsledná úspora mohla být výraznější.

Seznam použité literatury

- [1] ROČEK, Vladimír. Suché obrábění snižuje výrobní náklady. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2003, 2003(4), 44 [cit. 2017-02-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/suche-obrabeni-snizuje-vyrobní-naklady.html>
- [2] Progresivní metody v obrábění: studijní opora [online]. OSTRAVA, 2011 [cit. 2017-02-20]. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/Progresivni_metody_v_obrabeni_FINAL.pdf
- [3] MOLNÁR, ALEXANDER. *PROCESNÍ KAPALINY PRO OBRÁBĚNÍ A ZPŮSOBY JEJICH PŘÍVODU* [online]. BRNO, 2008 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5490
- [4] Obrábění zasucha - ano, či ne? *MM průmyslové spektrum* [online]. 2001 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-zasucha-ano-ci-ne.html>
- [5] *Инструменты для точения деталей малых размеров* [online]. 2001 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://www.omp-vn.ru/news/342-instrumenty-dlya-tocheniya-detaley-malyh-razmerov.html>
- [6] NOVÁČEK, Pavel. *MODERNÍ CHLADÍCÍ KAPALINY PRO OBRÁBĚNÍ* [online]. BRNO, 2012 [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30292477.pdf>
- [7] *Základy obrábění* [online]. [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/obrabeni.htm>
- [8] *Vznik třísky a její druhy* [online]. [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1190>
- [9] ZDENĚK, Janda, Řehoř JAN a Fišer FRANTIŠEK. *Příspěvek k posouzení vlivu nanášení MQL media na průběh řezných sil při tvrdém HSC frézování* [online]. , 5 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/16424/Janda.pdf?sequence=1>

- [10] ŠIMŮNEK, Jiří. *Úspora času a nákladů s technologií MQL* [online]. [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/uspora-casu-a-nakladu-s-technologie-mql.html>
- [11] BILÍK, Oldřich, Vladimír GABRIEL, František HOLEŠOVSKÝ, Imrich LUSKOVICS, Jan MÁDL, Jaroslav PROKOP a Josef ŠKARDA. *Ekologie obrábění*. I. Ústín nad Labem: Strojírenská technologie Konvička, 2000. ISBN 80-7044-328-6.
- [12] SMITH, Patricia L. The 10 commandments of dry high-speed machining: Ten tips can help shops get the most out of cutting and drilling with little or no coolant. *American Machinist* [online]. 1998 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://americanmachinist.com/cutting-tools/10-commandments-dry-high-speed-machining>
- [13] *CENTRUM VZDĚLÁVÁNÍ PEDAGOGŮ ODBORNÝCH ŠKOL: VP16 Progresivní výrobní procesy ve firemní praxi - obráběcí stroje a nástroje* [online]. , 32 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: http://int.spsoa-ub.cz/ccv/projekty/vzdelavanipedagogu/dokumenty/skripta/skripta_vp_16.pdf
- [14] Obrobitelnost nerezových ocelí. *KONSTRUKCE - odborný časopis pro stovebnictví a strojírenství* [online]. [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/obrobitelnost-nerezovych-oceli/>
- [15] *Obrobitelnost - Bogner Edelstahl* [online]. [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://www.bogner.cz/files/files/Obrobitelnost.pdf>
- [16] Obrobitelnost – definice. *SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/machinability_definition/pages/default.aspx
- [17] *Vliv legovacích prvků na vlastnosti ocelí* [online]. [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://svanda.webz.cz/vyuka/legury.htm>
- [18] *Obrobitelnost - Bogner Edelstahl* [online]. [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://www.bogner.cz/files/files/Obrobitelnost.pdf>
- [19] *Vliv jednotlivých prvků na vlastnosti ocelí* [online]. 2011 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/vliv-jednotlivych-prvku-na-vlastnosti-oceli/>

- [20] *Sferoidizační žihání* [online]. [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://www.kalirna.cz/cz/sluzby/item/13-sferoidizacni-zihani.html#tab2>
- [21] VIGNER, Miloslav. *Obrábění*. Praha: Nakladatelství techn. lit, 1984.
- [22] *Řezné podmínky při obrábění: podklady pro výuku předmětu Technologie III - Obrábění* [online]. [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_rp.pdf
- [23] CAHA, Tomáš. *VOLBA A OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK PRO PROGRESIVNÍ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE* [online]. Brno, 2015 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/40426/102171_DP_Tom%C3%A1%C5%A1_Caha.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová. VUT v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.
- [24] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01864-6
- [25] MRKVICA, Miloš. *Obrábění: Obrábění nástroji s geometricky definovaným břitem*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1993. ISBN 9788070782132.
- [26] *Příručka obrábění: Kniha pro praktiky*. 1. vyd. Praha: SANDVIK CZ, 1997. ISBN 9789197229944;9197229946
- [27] TOMEK, Jan. *EKOLOGICKÉ FAKTORY PŘI TRÍSKOVÉM OBRÁBĚNÍ* [online]. Brno, 2011 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/1619/BP_Ekologicke_factory_pri_triskovem_obraheni.pdf?sequence=10&isAllowed=y. Bakalářská.
- [28] *Výrobní stroje pro obrábění: Soustruhy* [online]. [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: http://www.gykas.cz/projekt/nove/pracovni_sesity/vyrobni_stroje.pdf
- [29] *Polykrystalický kubický nitrid bóru: SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/polycrystalline_cubic_boron_nitride/pages/default.aspx

- [40] MALEC, Petr. *Optimalizace obráběcího procesu* [online]. Praha, 2015 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63648/F2-DP-2015-Malec-Petr-OPTIMALIZACE_REZNYCH_PODMINEK_PRO_DANOU_SOUCAST.pdf?sequence=-1. Diplomová.
- [41] KUBIŠ, RICHARD. *ANALÝZA MINUTOVÉ SAZBY CNC STROJŮ* [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=66649. Diplomová.
- [42] MAREK, Tomáš. *Možnosti využití vysokorychlostního obrábění při výrobě dílů pro stavbu obráběcích strojů* [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: http://is.mendelu.cz/zp/portal_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti=44328;download_prace=1
- [43] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-337-1.
- [44] *Soustružení: Pracovní pohyby nástroje a obrobku* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1823>
- [45] *Živé ukázky obrábění sledovaly průběh řezných sil* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/2015/05/25/zive-ukazky-obrabeni-sledovaly-prubeh-reznych-sil/>
- [46] *NOVÉ SMĚRY V PROGRESIVNÍM OBRÁBĚNÍ: učební text* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>
- [47] KVASNIČKA, Ivo, Vladimír SLAVÍK a Lubomír ŠTAJNOCHR. *Obráběcí nástroje* [online] [cit. 2017-05-01]. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 9788001017555;8001017559;.
- [48] *MIRCONA - CUTTING TOOLS: General Turning to ISO* [online]. [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://www.mircona.com/turning.php>
- [49] DOLEŽALOVÁ, Petra. *VLASTNOSTI POVLAKŮ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ ZE SLINUTÉHO KARBIDU* [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64126

- [50] *Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření: INOVACE - POVRCHOVÉ ÚPRAVY* [online]. [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: http://www.shm-cz.cz/wp-content/uploads/2013/03/2004_09.pdf
- [51] *Drachenhaut im Test* [online]. [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: http://www.zerspanungstechnik.at/detail/drachenhaut-im-test_106704
- [52] *Main Catalogue Hauptkatalog: Zhuzhou Cemented carbide cutting tool* [online]. [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: http://www.clarkson.cz/img/katalogy/ZCC_CZ_soust.pdf
- [53] *9. Soustružení* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: http://www.sps-vitkovice.cz/texty/texty/STT/STT2-9_soustruzeni_RAJ.pdf
- [54] *4.SOUSTRUŽENÍ* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep17.pdf>
- [55] *Niob* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/41.html>
- [56] KUDELKA, Martin. *ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI KONSTRUKČNÍ OCELI 11 523* [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55045
- [57] SKRBK, Břetislav. *VLASTNOSTI KONSTRUKČNÍCH OCELÍ V SYSTÉMU JAKOSTI PODLE EN A ČSN* [online]. In: . Hradec nad Moravicí, 2003, s. 9 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/mattech/Znaceni_oceli_Skrbek.pdf
- [58] *Průručka obrábění: Kniha pro praktiky*. 1. vyd. Praha: SANDVIK CZ, 1997. ISBN 9789197229944;9197229946;.
- [59] *Rozdělení a označení ocelí: Co je lehčí porozumět hieroglyfům, japonskému písmu, nebo značení ocelí?* [online]. [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://www.isstechn.cz/objekty/Ciselne-znaceni-oceli-dle-Csn.pdf>
- [60] KLAPSIA, Jan. *VÝVOJ V AUTOMATOVÝCH OCELÍCH , ZVYŠOVÁNÍ OBROBITELNOSTI BISMUTEM ; OLOVEM V TŽ, A.S.* [online]. , 5 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: http://metal2014.tanger.cz/files/proceedings/metal_06/papers/215.pdf

- [61] *KYB Manufacturing Czech s.r.o.* [online]. [cit. 2017-06-02]. Dostupné z: <http://www.kmcz.cz/o-nas.html>
- [62] *KYB Manufacturing Czech s.r.o.: Seznámení s KMCZ* [online]. [cit. 2017-06-02]. Dostupné z: <http://www.kmcz.cz/filedownloads-70-15daacf0fd25>
- [63] *Návod k použití: Dvojitý CNC obráběcí stroj.*
- [64] *SECO: A25R-PWLN08* [online]. [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: https://www.secotools.com/#article/p_75065808
- [65] *SECO: WNMG080408-FF2 TP2501* [online]. [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: https://www.secotools.com/#article/p_02956348
- [66] *Konstrukter: Povlak technologií Duratomic odolává vysokým řezným rychlostem* [online]. [cit. 2017-06-21]. Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/2016/10/12/povlak-technologie-duratomic-odolava-vysokym-reznym-rychlostem/>
- [67] *MM Průmyslové spektrum: Nástrojové novinky* [online]. [cit. 2017-06-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastrojove-novinky.html>
- [68] KUBELA, Petr. *ANALÝZA TVORBY TŘÍSKY POMOCÍ DIGITÁLNÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY* [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-06-21]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16031
- [69] *DRUHY A UTVÁŘENÍ TŘÍSEK: Technologie III - OBRÁBĚNÍ* [online]. [cit. 2017-06-21]. Dostupné z: http://educom.tul.cz/educom/inovace/TOB/VY_03_33-druhy%20a%20utv%C3%A1%C5%99en%C3%AD%20t%C5%99%C3%ADsek_MZ_6.pdf
- [70] KARAFIÁTOVÁ, Stanislava a Ivo LANGER. *Technologie soustružení: [učebnice]*. 1. vyd. Havlíčkův Brod: Fragment, 1998. Učebnice pro odborné školy (Fragment). ISBN 80-720-0239-2
- [71] VOSTŘEL, Josef. *TECHNOLOGICKÉ, EKONOMICKÉ A EKOLOGICKÉ ASPEKTY OBRÁBĚNÍ ZA SUCHA* [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-06-21]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/16542/2009_DP_Vostrel_Josef_87445.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová.

- [72] *ELUC: Tvar třísky a geometrie nástroje* [online]. [cit. 2017-06-22]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1816>
- [73] *Grumant: Soustružení* [online]. [cit. 2017-06-22]. Dostupné z: <http://www.grumant.cz/produkty/nastroje-pro-obrabeni/soustruzeni>
- [74] *Teorie obrábění: Pěchování třísky* [online]. [cit. 2017-06-22]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2835
- [75] *MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM: Břítové destičky s hladicí geometrií a VBD s nízkým řezným odporem* [online]. [cit. 2017-06-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/britove-desticky-s-hladici-geometrii-a-vbd-s-nizkym-reznym-odporem.html>
- [76] *MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM: Nové řezné materiály pro soustružení oceli* [online]. [cit. 2017-06-26]. Dostupné z: <http://m.mmspektrum.com/clanek/nove-rezne-materialy-pro-soustruzeni-oceli>
- [77] *T+T Technika a trh: Společnost Seco představuje první třídu závitovacích břítových destiček Duratomic® CVD* [online]. [cit. 2017-06-26]. Dostupné z: <https://www.technikaatrh.cz/obrabeni/spolecnost-seco-predstavuje-prvni-tridu-zavitovacich-britovych-desticek-duratomicr-cvd>
- [78] *SECO: WNMG080404W-MF2 TP2501* [online]. [cit. 2017-06-27]. Dostupné z: https://www.secotools.com/#article/p_02960057

Seznam příloh

Příloha 1 – Výrobní výkres pláště tlumiče

Příloha 2 – Materiálový list

Příloha 3 – ISO – Systém značení vyměnitelných břítových destiček