



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Optimalizace procesu soustružení tepelně upravených povrchů - vliv faktorů: rychlost obrábění a životnost nástroje

Optimization of machining process for surface with heat treatment - impact of factors: cutting speed and tool life time

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství
Vedoucí práce: Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D.

Bc. Matej Kachnič

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kachnič** Jméno: **Matej** Osobní číslo: **437114**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace procesu soustružení tepelně upravených povrchů - vliv faktorů: rychlost obrábění a životnost nástroje

Název diplomové práce anglicky:

Optimization of machining process for surface with heat treatment - impact of factors: cutting speed and tool life time

Pokyny pro vypracování:

1. Možnosti technologie soustružení pro tepelně upravené povrchy
2. Hlavní faktory optimalizace řezných podmínek
3. Výpočet životnosti nástroje pro vybranou řeznou rychlost při dodržení výrobního času
4. Návrhy na zlepšení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

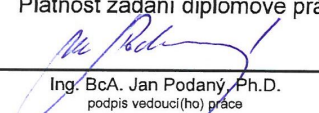
Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

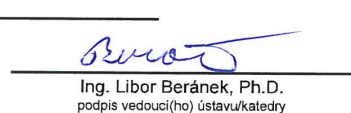
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


Datum zadání diplomové práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **19.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

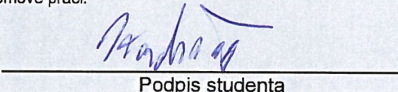

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

16. 4. 2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá metodikou optimalizácie rezných podmienok pre vybranú tepelne upravenú súčasť vyrábanú v konkrétnom výrobnom podniku. Cieľom práce je optimalizovať proces obrábania s požiadavkami na skrátenie výrobného času s ohľadom na dodržanie predpísanej drsnosti obrobeného povrchu. V úvodných kapitolách práce je spomenutá technológia sústruženia, tepelné spracovanie materiálov a vplyv tepelne spracovaného povrchu na proces obrábania. Hlavná časť práce je venovaná optimalizácii rezných podmienok pre zadanú súčasť. V závere sú navrhnuté optimalizované podmienky overené formou experimentu, pričom spomenuté sú aj ďalšie návrhy na zlepšenie procesu.

Kľúčové slová

Optimalizácia obrábacieho procesu, obrábanie tepelne upravených povrchov, sústruženie, životnosť nástroja

Abstract

This diploma thesis is focused on the optimization of machining process for a given heat-treated component in real manufacturing company. The thesis aims to optimize the machining process with the requirements to reduce production time concerning the specified roughness of the machined surface. In the introductory chapters, there is mentioned turning technology, heat treatment of materials and the influence of heat-treated surface on the machining process. The main part is devoted to optimization of cutting conditions for a given part. The conclusion is devoted to verification and evaluation of optimized conditions in the form of the experiment. Other possible suggestions for improving the process are also mentioned.

Keywords

Optimization of the machining process, machining of heat-treated surfaces, turning, tool life

Vyhlasenie

Vyhlasujem, že som svoju diplomovú prácu vypracoval samostatne. Ďalej vyhlasujem, že som všetky použité zdroje správne a úplne citoval a uvádzam ich v priloženom zozname použitej literatúry.

V Prahe dňa.....

podpis:.....

Podakovanie

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. BcA. Janovi Podanému, Ph.D. za odborný dohľad, trpezlivosť a cenné rady pri písaní tejto práce.

Ďalej by som chcel poďakovať odbornému konzultantovi Ing. Petrovi Hamplovi, Ph.D. za ochotu a pomoc pri konzultáciách a spolupráci so spoločnosťou KYB Manufacturing Czech s.r.o. Taktiež ďakujem technologovi úseku výroby piestnych tyčí, pánovi Jakubovi Blažkovi za pomoc pri meraní.

Obsah

ZOZNAM SKRATIEK	9
ZOZNAM OBRÁZKOV.....	11
ZOZNAM TABULIEK	13
ZOZNAM GRAFOV	13
ÚVOD.....	14
1 ZÁKLADNÉ METÓDY OBRÁBANIA	15
2 SÚSTRUŽENIE	16
2.1 REZNÉ PARAMETRE.....	17
2.2 SÚSTRUHY	17
2.3 NÁSTROJE	20
2.3.1 Rezné materiály	22
2.4 UPÍNANIE NÁSTROJU A OBROBKU	26
2.6 OPOTREBENIE A TRVANLIVOSŤ NÁSTROJA.....	28
3 TEPELNÉ SPRACOVANIE	33
3.1 ŽIHANIE	34
3.2 KALENIE	37
3.3 POPÚŠŤANIE	41
3.4 KOMBINOVANÉ POSTUPY TEPELNÉHO SPRACOVANIA	42
4 SÚSTRUŽENIE TEPELNE SPRACOVANÉHO POVRCHU	43
4.1 KALENÉ MATERIÁLY	43
4.2 NÁSTROJE PRE SÚSTRUŽENIE KALENÝCH SÚČASTÍ.....	44
5 OPTIMALIZÁCIA OBRÁBACIEHO PROCESU	45
5.1 OPTIMALIZÁCIA OBRÁBACIEHO NÁSTROJA	45
5.1.1 Nástrojové materiály	45
5.1.2 Geometria reznej hrany nástroja	46
5.1.3 Optimálna veľkosť opotrebenia	50
5.2 OPTIMALIZÁCIA REZNÝCH PODMIENOK	53
5.2.1 Kritérium optimálnosti z hľadiska minimálnych výrobných nákladov.....	55
5.2.2 Kritérium optimálnosti z hľadiska produktivity	55
5.2.3 Kritérium optimálnosti z hľadiska odberu materiálu	56
5.3 OBMEDZUJÚCE PODMIENKY	57
5.3.1 Výkon stroja	58

5.3.2 Maximálny prípustný krútiaci moment	59
5.3.3 Požadovaná drsnosť obrobenej plochy	60
5.3.4 Vhodné utváranie triesky	61
5.3.5 Maximálne a minimálne otáčky stroja	62
5.3.6 Maximálny a minimálny posuv	63
5.3.7 Komplexný Taylorov vzťah	63
5.4 OBLASŤ PRÍPUSTNÝCH RIEŠENÍ	64
5.5 SPÔSOB OPTIMALIZÁCIE REZNÝCH PODMIENOK	65
6 PREDSTAVENIE SPOLOČNOSTI KYB MANUFACTURING CZECH S.R.O.	66
7 OBRÁBANÁ SÚČASŤ – PIEST TLMIČA.....	67
7.1 MATERIÁL TLMIČA.....	68
7.1.1 Meranie tvrdosti	69
7.2 STROJ	70
7.3 NÁSTROJ	73
8 OPTIMALIZÁCIA REZNÝCH PODMIENOK	75
8.1 OBLASŤ OPTIMALIZÁCIE	75
8.2 VÝPOČET OPTIMALIZOVANÝCH HODNÔT	76
8.2.1 Optimálna trvanlivosť/životnosť	76
8.2.2 Optimálna rezná rýchlosť.....	76
8.2.3 Posuv pre optimálne rezné podmienky	77
8.3 POROVNANIE SÚČASNÝCH A OPTIMÁLNYCH REZNÝCH PODMIENOK	77
8.4 OBLASŤ PRÍPUSTNÝCH RIEŠENÍ	78
8.5 KONTROLA OBLASTI PRÍPUSTNÝCH RIEŠENÍ	79
8.5.1 Optimalizácia rezných podmienok podľa oblasti prípustných riešení	81
8.5.2 Overenie času výroby	82
9 OVERENIE VOĽBY REZNÝCH PODMIENOK	84
9.1 POPIS EXPERIMENTU.....	84
9.2 VYHODNOTENIE TVARU TRIESKY	84
9.3 MERANIE DRSNOSTI OBROBENEJ PLOCHY	87
9.4 VÝPOČET ŽIVOTNOSTI NÁSTROJA	88
9.5 POROVNANIE PRACOVNÝCH PODMIENOK	89
9.6 POROVNANIE VÝROBNÝCH ČASOV.....	89
10 NÁVRHY NA ZLEPŠENIE PROCESU	90
11 ZÁVER	93
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY.....	95

Zoznam skratiek

a_p	hĺbka rezu [mm]
C_{Fc}, C_{Ff}, C_{Fp}	materiálové konštanty [-]
CNC	počítačom riadený NC stroj
C_v	konštantá (z komplexného Taylorovho vzťahu) [-]
D	priemer obrábanej plochy [mm]
d	priemer obrobenej plochy [mm]
f	posuv [mm/ot]
F	celková rezná sila [N]
F_c	rezná sila [N]
F_f	posuvová sila [N]
F_p	pasívna sila [N]
$f_{Ra\ max}$	maximálny posuv splňujúci kritérium drsnosti [mm/ot]
$f_{s\ max}$	maximálny dosiahnuteľný posuv na stroji [mm/ot]
$f_{s\ min}$	minimálny dosiahnuteľný posuv na stroji [mm/ot]
F_u	upínacia sila pôsobiaca na jednu čeľusť [N]
$f_{u\ max}$	maximálna prípustná hodnota posuvu [mm/ot]
$f_{u\ min}$	minimálna prípustná hodnota posuvu [mm/ot]
F_{uo}	upínacia sila pôsobiaca na čeľusť [N]
HB	tvrdosť podľa Brinella
HRA	tvrdosť podľa Rockwella (celkové zaťaženie 600 N)
HRC	tvrdosť podľa Rockwella (celkové zaťaženie 1500 N)
HV	tvrdosť podľa Vickersa
k_c	merná rezná sila [N/mm ²]
k_{Fc}	empirická konštantá [-]
k_n	výrobcom udávaná konštantá [-]
k_r	koeficient rezania [-]
KT	hĺbka žliabku [mm]
L	dĺžka dráhy automatického chodu nástroja [mm]

LN	maximálna prípustná nepresnosť obrobenej plochy [mm]
m	empirická konštanta [-]
M_k	krútiaci moment vo vretene [Nm]
$M_{k\max}$	maximálny prípustný krútiaci moment [Nm]
n	otáčky obrobku [ot/min]
N	výrobné náklady na operačný úsek [Kč]
N_{nv}	náklady na nástroje a ich výmenu [kč]
NO	nástrojová oceľ
n_{opt}	optimálne otáčky stroja [ot/min]
N_s	náklady na strojnú prácu [kč]
$n_{s\max}$	maximálne dosiahnuteľné otáčky na stroji [ot/min]
$n_{s\min}$	minimálne otáčky dosiahnuteľné na stroji [ot/min]
N_v	náklady na vedľajšiu prácu [kč]
P_c	rezný výkon [W]
P_e	výkon elektromotoru stroja [W]
P_m	celkový výkon obrábacieho stroja [W]
Ra	stredná aritmetická úchylka profilu [μm]
$R_{a\max}$	maximálna prípustná stredná aritmetická úchylka profilu [μm]
r_ϵ	polomer špičky nástroja [mm]
ŘK	rezná keramika
S_b	súčiniteľ využitia reznej doštičky [-]
SK	spekaný karbid
T	trvanlivosť nástroja [min]
t_{AS}	strojný čas [min]
$t_{AS\text{ celk}}$	celkový strojný čas [min]
$t_{AS\text{ rez}}$	strojný čas v reze [min]
$T_{opt\ N}$	optimálna trvanlivosť z hľadiska minimálnych výrobných nákladov [min]
$T_{opt\ P}$	optimálna trvanlivosť z hľadiska maximálnej produktivity [min]
$T_{p\acute{o}v}$	pôvodná trvanlivosť reznej hrany nástroja [min]
t_u	čas operačného úseku [min]
t_{vn}	čas na výmenu nástroja [min]

U	odber materiálu [cm ³ /min]
VB	opotrebenie na chrbte [-]
V _c	rezná rýchlosť [m/min]
V _{c opt}	optimálna rezná rýchlosť [m/min]
V _{c pôv}	pôvodná rezná rýchlosť [m/min]
V _f	posuvová rýchlosť [m/min]
VR	radiálne opotrebenie nástroja [mm]
VR _{max}	maximálne prípustné radiálne opotrebenie reznej hrany nástroja [mm]
VR _{opt}	optimálna veľkosť radiálneho opotrebenia nástroja [mm]
X _{FC} , Y _{FC} , Y _{Fp}	exponenty vplyvu a _p [-]
γ _v	konštanta komplexného Taylorovho vzťahu [-]
Z _b	počet rezných hrán na doštičke [-]
Z	životnosť nástroja [min]
η	mechanická účinnosť stroja [-]
K _r	uhol nastavenia [°]
K _{r'}	vedľajší uhol nastavenia [°]

Zoznam obrázkov

Obr. 1 : Základné práce na sústruhu.....	16
Obr. 2 : Univerzálny hrotový sústruh.....	18
Obr. 3 : Čelný a revolverový sústruh	19
Obr. 4 : Tvarové sústružnícke nože a) prizmatický, b) kotúčový, c) tangenciálny	21
Obr. 5 : Rôzne systémy upínania vymeniteľných rezných doštičiek.....	21
Obr. 6 : Oblasť použitia rezných materiálov	23
Obr. 7 : Hodnoty vybraných vlastností rezných materiálov.....	25
Obr. 8 : Základné upínacie elementy pre upnutie obrobnku.....	27
Obr. 9 : Plastická deformácia a krehký lom	29
Obr. 10 : Formy opotrebenia nástroja na rýchloreznej oceli (RO), spekanom karbide (SK) a reznej keramike (ŘK).....	30

Obr. 11 : Obecný cyklus tepelného spracovania	33
Obr. 12 : Žihacie teploty v diagrame Fe-Fe ₃ C.....	34
Obr. 13 : Postupy žihania na mätko	35
Obr. 14 : Pásmo kaliacich teplôt v diagrame Fe-Fe ₃ C	37
Obr. 15 : Druhy kalenia.....	39
Obr. 16 : Obrábanie povrchovo kalenej súčasti.....	44
Obr. 17 : Hlavné formy opotrebenia a ich vyhodnocovanie.....	47
Obr. 18 : Vplyv umiestnenia nástroja na zmenu pracovných uhlov	47
Obr. 19 : Trend šírky VB opotrebovanej plochy na uhle chrbta.....	48
Obr. 20 : Trend šírky VB opotrebovanej plochy na uhle rezu	49
Obr. 21 : Závislosť šírky VB opotrebovanej plochy na uhle nastavenia	49
Obr.22 : Plochy opotrebenia na chrbte u rôznych doštičiek a rôznych hĺbok rezu	51
Obr. 23 : Radiálne opotrebenie nástroja	52
Obr. 24 : Určenie optimálnej veľkosti opotrebenia VB a KT z hľadiska drsnosti obrobenej plochy Ra	53
Obr. 25 : Závislosť výrobných nákladov N a ich zložiek	54
Obr. 26 : Oblasť vhodného utvárania triesky.....	62
Obr. 27 : Príklad oblasti prípustných riešení.....	64
Obr. 28 : Výrobný areál spoločnosti KYB Manufacturing Czech s.r.o. v priemyselnej zóne v Pardubiciach, Starých Číviciach	66
Obr. 29 : Výrez z výkresu súčasti – dutá piestna tyč.....	67
Obr. 30 : Indukčné kalenie piestnych tyčí vo firme KMCZ	69
Obr. 31 : CNC sústruh firmy Danobat vo výrobnej hale spoločnosti KMCZ	71
Obr. 32 : Pohľad do vnútra dvojvretenového CNC sústruhu	71
Obr. 33 : Schéma stroja	72
Obr. 34 : Sústružnícky nôž C4 - MTJNL - 27050 - 16	73
Obr. 35 : Vymeniteľná rezná doštička TNMX 16 04 04 - WF 4315	74
Obr. 36 : Tvary triesok	85
Obr. 37 : Pásková trieska a zmotaná trieska.....	86
Obr. 38 : Meranie drsnosti obrobenej plochy	88
Obr. 39 : Rezná doštička firmy Tunagaloj so špeciálnym utváračom triesky typu HP	91

Obr. 40 : Rezná doštička s hrotom z kubického nitridu bóru so špeciálnou technológiou spájkovania	92
---	----

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 : Mechanické vlastnosti ocelí v zušľachtenom stave.....	44
Tabuľka 2 : Zloženie ocele EN 1035-2	68
Tabuľka 3 : Zloženie ocele 19MnB4	69
Tabuľka 4 : Meranie tvrdosti na nezakalenej tyči	70
Tabuľka 5 : Meranie tvrdosti na zakalenej tyči	70
Tabuľka 6 : Parametre stroja	73
Tabuľka 7 : Parametre sústružníckeho noža C4 - MTJNL - 27050 - 16	74
Tabuľka 8 : Parametre vymeniteľnej reznej doštičky TNMX 16 04 04 - WF 4315.....	74
Tabuľka 9 : Súčasné hodnoty z výroby.....	75
Tabuľka 10 : Porovnanie súčasných a optimálnych rezných podmienok	78
Tabuľka 11 : Hodnoty určujúce oblasť prípustných riešení	79
Tabuľka 12 : Optimálne rezné podmienky.....	80
Tabuľka 13 : Maximálne prípustné a optimálne hodnoty posuvov	81
Tabuľka 14 : Maximálne prípustné a optimálne hodnoty otáčok.....	81
Tabuľka 15 : Porovnanie optimálnych a optimalizovaných rezných podmienok.....	82
Tabuľka 16 : Vizualné hodnotenie tvaru triesky	86
Tabuľka 17 : Dosahované drsnosti pre jednotlivé hodnoty posuvov	87
Tabuľka 18 : Porovnanie súčasných a navrhovaných pracovných podmienok.....	89
Tabuľka 19 : Porovnanie výrobných časov	89

Zoznam grafov

Graf 1 : Oblasť prípustných riešení	79
Graf 2 : Kontrola optimálnych rezných podmienok v oblasti prípustných hodnôt.....	80

Úvod

Táto diplomová práca sa zaoberá optimalizáciou sústruženia tepelne upravených povrchov vo firme KYB Manufacturing Czech s.r.o..

Cieľom práce je návrh optimalizácie procesu obrábania danej súčiastky pre vybranú reznú rýchlosť s ohľadom na skrátenie výrobného času.

V úvode práce sa zameriam na problematiku obrábania, pričom venovať sa budem predovšetkým sústruženiu. Následne budú rozobrané rôzne tepelné spracovania a ich vplyv na obrobitelnosť. Postupne v krátkosti zhrniem, aký dopad má určité tepelné spracovania na proces sústruženia. Ďalej v krátkosti popíšem postup výroby piestnych tyčí, kde sa zameriam na proces sústruženia a spomenuté bude aj tepelné spracovanie aplikované na súčasti. Ďalšou časťou práce bude popis metodiky optimalizácie obrábacieho procesu, pričom sa zameriam na životnosť nástroja, dodržanie požadovaného výrobného času a optimalizáciu jednotlivých rezných podmienok. V záverečnej kapitole venujúcej sa optimalizácii budú poznamenané obmedzujúce podmienky vstupujúce do procesu optimalizácie.

Výsledkom diplomovej práce bude návrh optimalizácie rezných parametrov pri skrátení výrobného času a ďalšie návrhy na zlepšenie procesu. Optimalizácia rezných podmienok bude realizovaná podľa kritéria maximálnej produktivity. Rezné podmienky by mali byť navrhnuté tak, aby došlo k zníženiu strojného času a zároveň tak, aby boli dodržaná drsnosť obrobenej plochy tak ,ako je predpísaná na výkrese. V závere práce navrhнем optimalizované rezné podmienky overené formou experimentu a zhodnotím úspora času. V kapitole venujúcej sa návrhom na zlepšenie potom zhrniem ďalšie možnosti, ako doceliť úsporu výrobného času v procese sústruženia piestnych tyčí. Táto práca by mala slúžiť ako návod pre ďalšie možné procesy optimalizácie procesu obrábania v danom podniku.

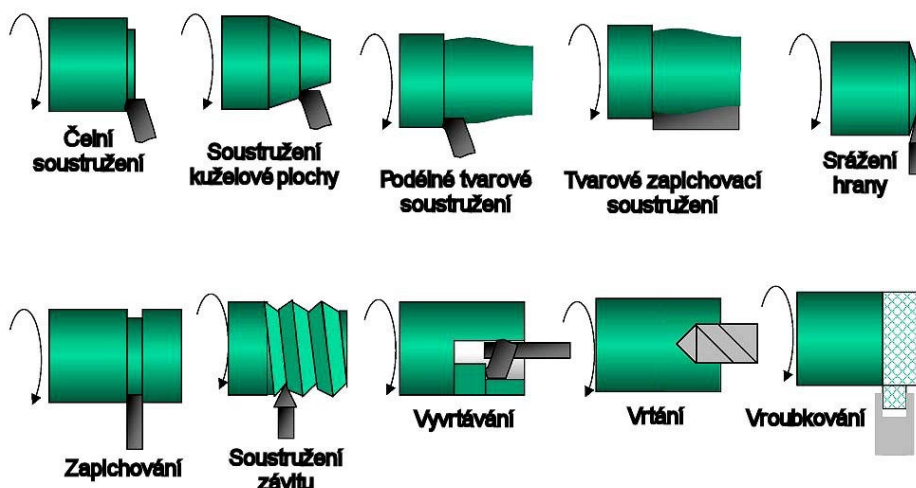
1 Základné metódy obrábania

Jednotlivé metódy obrábania možno rozdeliť podľa rôznych hľadísk. Či už podľa charakteru práce (ručné a strojné), alebo podľa charakteristických znakov. Podľa nich sa delia procesy nasledovne:

- a) metódy obrábania pomocou nástrojov s definovanou geometriou – sem patrí sústruženie, frézovanie, vrtanie, vyvrtávanie, preťahovanie, atď. ,
- b) metódy obrábania pomocou nástrojov s nedefinovanou geometriou – patria sem dokončovacie metódy ako napríklad brúsenie, honovanie, lapovanie,
- c) nekonvenčné metódy obrábania – obrábanie ultrazvukov, elektrónovým či vodným paprskom,
- d) úpravy obrobených plôch – valčekovanie, hladenie, leštenie [1].

2 Sústruženie

Vo všeobecnosti sa na strojárskych súčiastiach často vyskytujú rotačné plochy a aj preto sa v súčasnosti 30 až 40 % operácií obrábania realizuje na sústruhoch. Jedná sa o metódu obrábania používanú na výrobu súčastí rotačných tvarov. Sústruženie predstavuje najjednoduchší spôsob obrábania, ktorý je zároveň aj najvyužívanejšou metódou obrábania v strojárstve. Touto technológiou možno obrábať valcové plochy, či už vnútorné alebo vonkajšie. Ďalej možno spracovávať kuželové, rovinné čelné plochy a zápichy. Ako je možné vidieť na obrázku 1, sústružením možno taktiež vrtať, vyvrtávať, vystružovať, hladiť, leštiť, válečkovať, atď [1].



Obr. 1 : Základné práce na sústruhu [1]

Hlavný pohyb je rotačný a koná ho obrobok. Vedľajší (posuvný) pohyb je priamočiary a koná ho nástroj. Ak smer pohybu noža realizujúci sa v základnej rovine, je rovnobežný s osou obrobku, výsledkom je valcová plocha. V prípade že smer noža je kolmý na os obrobku, dostaneme rovinnú plochu. Ďalej môže nastať prípad, že hrot noža opisuje určitú krivku, vtedy vznikne priestorová rotačná plocha. Rezný pohyb sa realizuje po skrutkoviaci v prípade sústruženia valcovej plochy a po Archimedovej špirále v prípade čelnej plochy [1,2].

2.1 Rezné parametre

Hlavný pohyb je definovaný vzťahom:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [m \cdot min^{-1}] \quad (2.1)$$

Kde: v_c [m.min⁻¹] - rezná rýchlosť,
D [mm] - priemer obrobku,
n [ot/min] - otáčky obrobku [2].

Vedľajší pohyb voči obrobku vykonáva sústružnícky nôž. Je definovaný vzťahom:

$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} [m \cdot min^{-1}] \quad (2.2)$$

Kde: v_f [m.min⁻¹] - posuvná rýchlosť,
f [mm/ot] - posuv na otáčku,
n [ot/min] - otáčky obrobku [2].

Hĺbka rezu (šírka záberu) je definovaná takto:

$$a_p = \frac{1}{2} \cdot (D - d) \quad (2.3)$$

Kde: a_p [mm] - šírka záberu,
D [mm] - priemer obrábanej plochy,
d [mm] - priemer obrobennej plochy [1].

2.2 Sústruhy

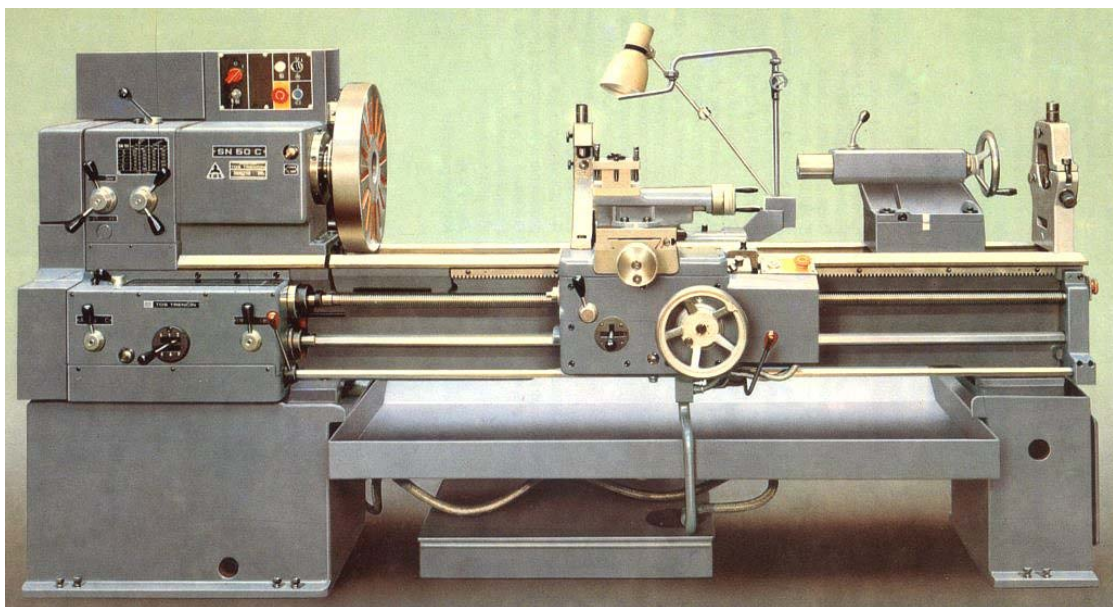
Sústružnícke stroje patria do najväčšej skupiny obrábacích strojov. Na trhu je veľké množstvo druhov, typov a rôznych veľkostí sústruhov. Vo všeobecnosti možno tieto stroje kategorizovať na:

- hrotové sústruhy,

- čelné sústruhy,
- zvislé sústruhy,
- revolverové sústruhy,
- poloautomaty,
- automaty,
- špeciálne sústruhy [2].

Hrotové sústruhy

Súčiastky sa na hrotových sústruhoch obrábajú medzi hrotmi. Tieto sústruhy majú široké použitie. Súčasťou je vodiaca skrutka, vďaka ktorej je možné sústružiť závit. Výhodou je tiež pomerne veľký rozsah otáčok a posuvov. Ich využitie je predovšetkým v kusovej a malosériovej výrobe. Vretenník je upevnený v hornej časti. Na konci vretena je kužeľová dutina pre upínací hrot, presne brúsená valcová plocha na stredenie upínacej hlavice a závit na jej zaskrutkovanie. Elektromotor zabezpečuje otáčavý pohyb vretena. Vreteno je duté, vďaka čomu je možné vsunutie tyčového materiálu. Koník podopiera voľný koniec dlhých súčiastok. Suport má v sústruhu za úlohu upnutie a pohyb nástroja v pozdĺžnom a priečnom smere, pričom zachytáva reznú silu pôsobiacu na nástroj. Požadovaný posuv sa dosiahne prevodovkou posuvov [2]. Príklad hrotového sústruhu je znázornený na obrázku 2.



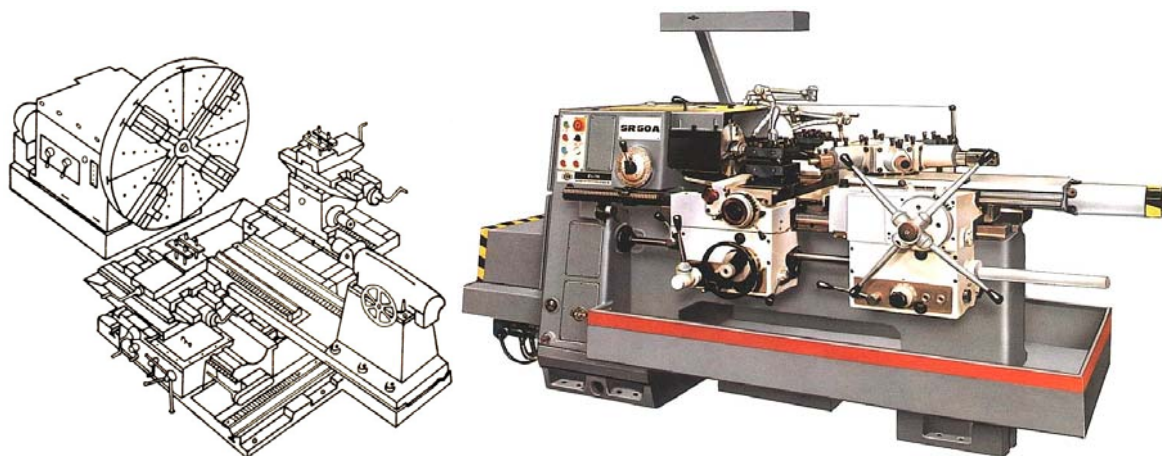
Obr. 2 : Univerzálny hrotový sústruh [1]

Čelné sústruhy

Tento typ sústruhov sa v prevádzkach vyskytuje zriedkavo. Vo väčšine prípadov sú tieto stroje nahradzované zvislými sústruhmi. Na vreteníku je upevnené skľučovadlo s obrobkom. Na stojane sú jeden až dva priečniky s nožovou hlavicou. Nástroje sú schopné pohybovať sa zvislo a vodorovne. Tieto sústruhy sa používajú zväčša pre obrábanie doskovitých súčastí veľkých priemerov [1,2].

Revolverové sústruhy

Výhoda revolverových sústruhov (obrázok 3) spočíva predovšetkým v tom, že pri jednom upnutí obrobku je možné viacerými nástrojmi obrobiť väčšie množstvo plôch. Nástroje sú upevnené na revolverovej hlave. Hlava je otočná okolo horizontálnej alebo vertikálnej osi. Celá revolverová hlava je vymeniteľná. Nástroje sú nastavované na prvý obrobok a následne je možné obrábať celú sériu za sebou nasledujúcich obrobkov. Revolverové sústruhy sú určené pre výrobu súčastí v menších alebo stredných sériách. Je možné na nich sústružiť pozdĺžne aj priečne, v ose obrobku vŕtať, vyvrtávať, vystružovať prípadne rezať závit [1,2].



Obr. 3 : Čelný a revolverový sústruh [1]

Poloautomaty a automaty

Sústružnícke automaty pracujú v automatickom cykle, avšak na opakovanie, upnutie a odopnutie obrobku je nutný zásah obsluhy. Podľa pracovného režimu sú tieto stroje

rozdeľované na hrotové, kopírovacie, skľučovadlové, revolverové, zvislé, jednovretenové a viacvretenové poloautomaty.

Automaty sú stroje so samočinným opakovaním pracovného cyklu. Využitie nájdú predovšetkým vo veľkosériovej a hromadnej výrobe. U poloautomatických sústruhov sa aplikuje tvrdá alebo pružná automatizácia pracovného cyklu [1,2].

Číslicovo riadené sústruhy

Takzvané CNC stroje vykonávajú obrobenie súčiastky v automatickom pracovnom cykle na základe programu, vloženého do NC riadiaceho systému. V súčasnosti sa využívajú CNC sústružnícke centrá, na ktorých je možné okrem bežných sústružníckych operácií vykonávať aj rôzne ďalšie, doplnkové operácie, ako napríklad frézovanie, vŕtanie a mnohé ďalšie. Dochádza teda ku komplexnému opracovaniu rotačnej súčiastky [1,2].

2.3 Nástroje

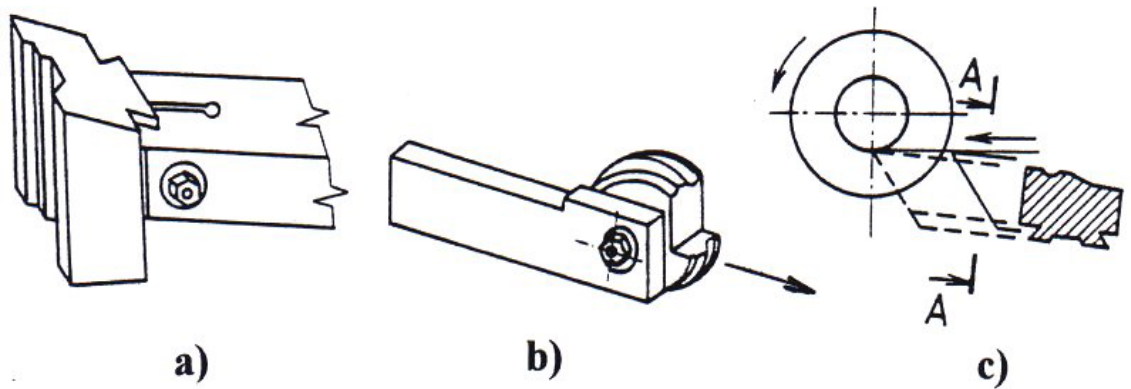
Sústružnícke nože sú nástroje s jednou reznou hranou. Rozdeliť ich možno z technologického hľadiska na radiálne, prizmatické, kotúčové a tangenciálne. Toto rozdelenie je na obrázku 4.

Najčastejšie využívané sú nože radiálne. Tie sa ďalej delia podľa konštrukcie, smeru posuvného pohybu, spôsobu obrábania, tvaru telesa noža a samozrejme použitého nástrojového materiálu [1].

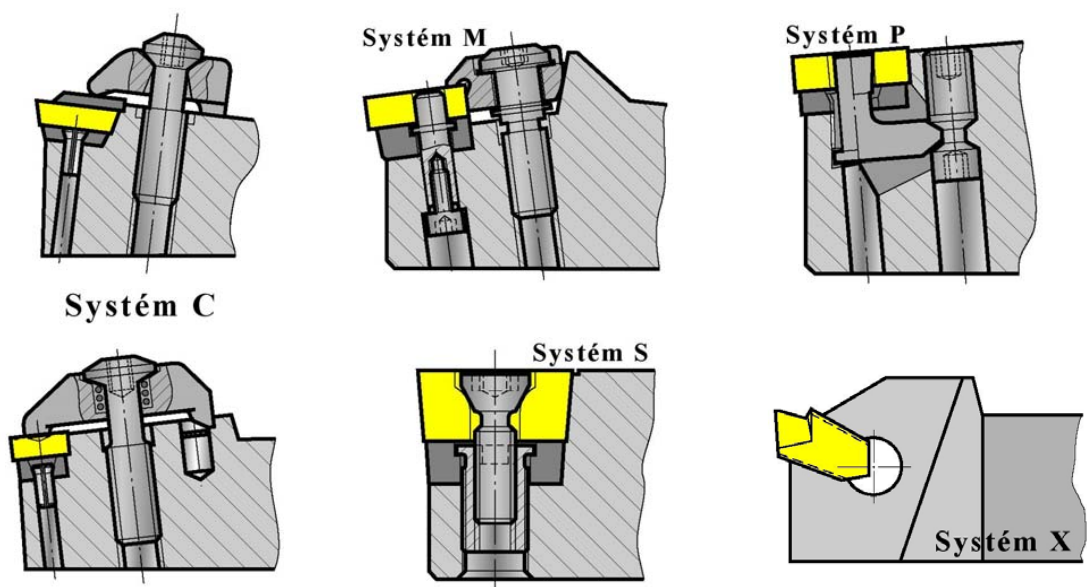
Z hľadiska konštrukcie sú tieto nože rozdelené na:

- celistvé,
- so spájkovanými reznými doštičkami,
- s vymeniteľnými reznými doštičkami (VRD)

Pri celistvých nožoch je teleso aj rezná časť z nástrojového materiálu. V druhej skupine nástrojov je rezná doštička z rezného materiálu spájkovaná tvrdou spájkou na teleso noža z konštrukčnej ocele. V súčasnosti najrozšírenejšie sú sústružnícke nože s vymeniteľnou reznou doštičkou. Rezná doštička z rezného materiálu je mechanicky upnutá v nožovom držiaku [1]. Na obrázku 5 sú znázornené systémy upínania rezných doštičiek.



Obr. 4 : Tvarové sústružnícke nože a) prizmatický, b) kotúčový, c) tangenciálny [1]



Obr. 5 : Rôzne systémy upínania vymeniteľných rezných doštičiek [1]

Nože možno ďalej deliť podľa smeru posuvného pohybu na pravé a ľavé. Podľa spôsobu obrábania ich možno rozdeliť na nože pre obrábanie vonkajších, respektíve vnútorných plôch [1].

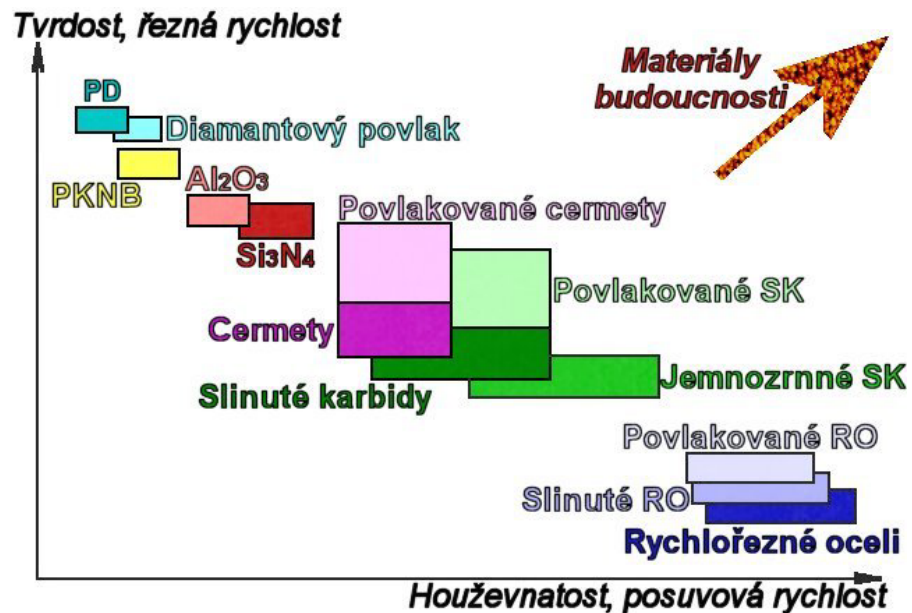
Vymeniteľné rezné doštičky radiálnych nožov sú vyrábané z vysokopevných a tvrdých materiálov. Jedná sa o spekané karbidy (SK), reznú keramiku, cermity, polykryštalický kubický nitrid bóru, prípadne ďalšie. Čo sa tvaru doštičiek týka, čelá sú buď hladké, alebo sú na nich vytvorené takzvané utváratele triesok. Väčšina v súčasnosti používaných doštičiek má viac rezných hrán, čo znamená, že po otupení jednej reznej hrany možno doštičku pootočiť pre využitie ďalšie reznej hrany a ďalej používať. Výmena doštičiek je jednoduchá a rýchla [1].

2.3.1 Rezné materiály

V súčasnosti je na trhu pomerne široký sortiment materiálov pre rezné nástroje. Od nástrojových ocelí až po syntetický diamant. Veľká ponuka je dôsledkom celosvetového dlhoročného a intenzívneho výskumu, a vývoja v danej oblasti, pričom má úzku súvislosť s rozvojom konštrukčných materiálov pre obrábanie či s vývojom nových CNC obrábacích strojov [1].

Správna voľba nástrojového materiálu je dôležitým základom, ktorý vplýva či už na ekonomiku obrábacieho procesu, optimalizáciu a produktivitu. Predovšetkým strojný čas a čas potrebný na výmenu otupeného nástroja predstavujú významné faktory produktivity. Z obrázku 6 vyplýva, že žiadny, doteraz dostupný materiál, nie je schopný úplne zabezpečiť komplexné požiadavky obrábania. Tie najmodernejšie nástrojové materiály na trhu už ale pokrývajú relatívne širokú oblasť aplikácie. Nástrojový materiál s ideálnou rezavosťou vyžaduje:

- vysokú tvrdosť a pevnosť pri pracovných teplotách zaisťujúci potrebnú odolnosť proti opotrebeniu reznej hrany nástroja,
- vysokú húževnatosť, ktorá eliminuje krehké porušenie reznej hrany,
- chemickú odolnosť, zaručujúcu odolnosť proti difúzii a oxidácii,
- odolnosť proti teplotnému rázu [4,8].



Obr. 6 : Oblasť použitia rezných materiálov [1]

Rýchlořezné oceli

Rýchlořezné oceli v porovnaní s ostatnými reznými materiálmi majú veľmi dobrú húževnatosť a odolnosť proti adhéznemu opotrebeniu. Medzi najväčšie nevýhody patrí strata pevnostných charakteristík už pri teplote približne 600 °C. Limitujúca pre nich je nízka pracovná rýchlosť pod 50 m.min⁻¹ a teda je tento rezný materiál aplikovaný zväčša na starších a menej tuhých strojoch. Podľa chemického hľadiska sa delia na oceli s prevažujúcim obsahom volfrámu, s prevažujúcim obsahom molybdénu a oceli komplexne legované prvkami volfrámu + molybdénu a vanádu [4].

Spekané karbidy

Spekané karbidy (SK) sú dvoj alebo viacfázový materiál, ktorý je tvorený karbidovými časticami s vysokou tvrdosťou v kovovej väzbe. Pripravované sú technológiou práškovej metalurgie. Základnými karbidmi pre výrobu obrábacích nástrojov je karbid wolframu WC a kubické karbidy TiC, TaC a NbC v kobaltovom spojive. Spekané karbidy sa delia podľa svojho zloženia na 3 skupiny:

- skupina P: WC + TiC + Co,
- skupina M: WC + TiC + TaC/NbC + Co,
- skupina K: WC + Co [4].

V porovnaní s rýchloreznými ocelami sú spekané karbidy predovšetkým tvrdšie a oteruvzdornejšie, tiež majú väčšiu pevnosť v ťahu, avšak sú menej húževnaté. Disponujú vyššou tuhosťou a preto sú využívané ako konštrukčný materiál pre štíhle vyvrtávacie tyče [4].

Cermety

Cermet je tvrdý rezný materiál, obsahujúci tvrdé častice TiC, TiN a TiCN, prípadne ďalšie v kovovom (Ni, Mo, Co) spojive. Vyrobené sú, podobne ako spekané karbidy, technológiou práškovej metalurgie. Názov CERamic/METal znamená označenie keramických častíc v kovovom spojive. Cermety disponujú vysokou odolnosťou proti opotrebeniu čela a chrbtu reznej hrany, vysokou pevnosťou za tepla a chemickou stabilitou. Sú vhodné pre jemné obrábanie a dokončovanie ocelí [4].

Keramika

Keramika predstavuje skupinu rezných materiálov s odlišným chemickým zložením a mikroštruktúrou. Tieto materiály sa delia na oxidickú, zmesnú a neoxidickú keramiku v závislosti na zložení. Oxidická keramika vyniká odolnosťou proti teplotnému rázu, vysokou odolnosťou proti opotrebeniu a chemickou stálosťou, avšak je málo húževnatá. Zmesná keramika je obohatená tvrdými časticami a pevnými vláknami, vďaka čomu sa práve húževnatosť zvyšuje. Neoxidická keramika nie je vhodná pre obrábanie ocelí vzhľadom na nízku chemickú stálosť. Má vynikajúcu pevnosť za tepla a je húževnatejšia ako kysličníková keramika [4].

Polykryštalický kubický nitrid bóru (KNB)

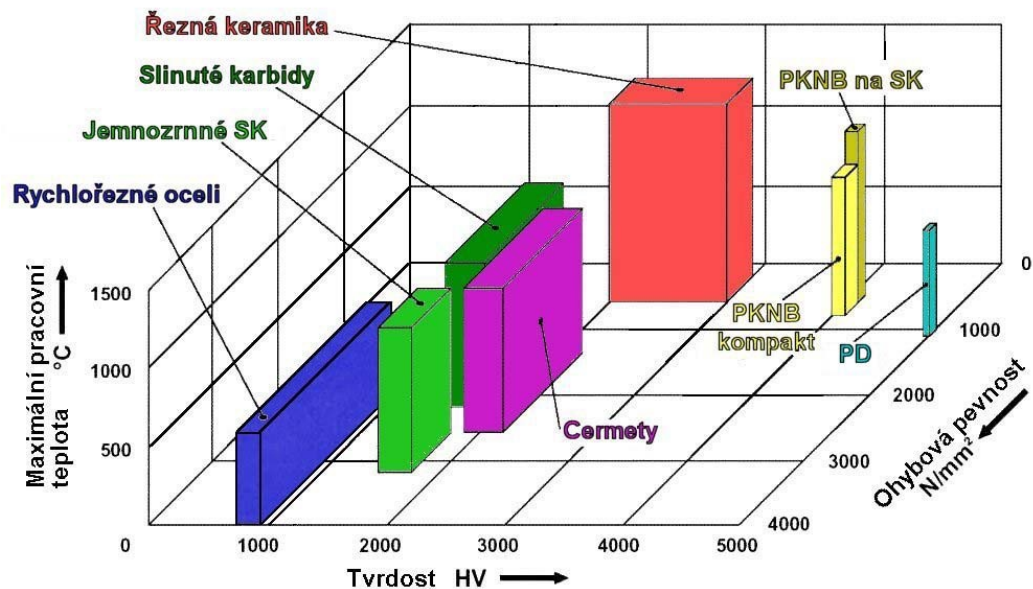
Jedná sa o synteticky vyrobený materiál, ktorý v prírode neexistuje. Patrí medzi tie najtvrdšie nástrojové materiály spolu s diamantom. Má vysokú pevnosť za tepla, vynikajúcu odolnosť proti opotrebeniu a taktiež chemickú stabilitu k železným kovom. Polykryštalický KNB má sčasti spoločné oblasti aplikácii s reznou keramikou, je však tvrdší a oteruvzdornejší. Používa sa na sústruženie, vyvrtávanie a frézovanie. Rezné doštičky s vysokým podielom KNB sú výhodne použité pri obrábaní superliatin, spekaných karbidov a tvrdých liatinových valcov. Použitie reznej doštičky s menším podielom KNB

a keramickou väzbou je vhodné pre obrábanie kalených ocelí a tvrdých liatin s tvrdosťou nad 48 HRC [4].

Diamanty

Diamant je najtvrdší prírodný materiál. Okrem samozrejme vysokej tvrdosti disponuje výbornou odolnosťou proti abrazívnemu opotrebeniu, dobrou tepelnou vodivosťou a nízkym koeficientom trenia. Medzi nevýhody patrí krehkosť, afinita k železným kovom a Ni zliatinám, a tiež nižšia pracovná teplota len na úrovni približne 700 °C. Vzhľadom k veľmi malému výskytu prírodného diamantu a vysokej cene sa tento materiál používa len pri veľmi presnom obrábaní s vysokými požiadavkami na kvalitu povrchu [4].

Na obrázku nižšie sú znázornené jednotlivé rezné materiály v závislosti na svojich vlastnostiach a taktiež maximálnej pracovnej teplote.



Obr. 7 : Hodnoty vybraných vlastností rezných materiálů [1]

Modifikácia vlastností povrchu nástrojov

Modifikácia vlastností rezných doštičiek kvalitatívne významne posúva rezné nástroje k ideálnym rezným charakteristikám. Úprava povrchu reznej doštičky alebo nástroja zaisťuje potrebnú húževnatosť a pevnosť, pričom na povrchu sa dosahuje vysokej tvrdosti,

oteruvzdornosti a chemickej stálosti. Povlakom sa rozumie vrstva materiálu, ktorá zväčšuje rozmer nástroja. Najväčší technicko-ekonomický prínos je dosahovaný u povlakovaných rezných doštičiek a nástrojov zo spekaných karbidov, nasledujú rýchlorezné oceli, a v malej miere sú povlakované aj cermety a keramika. Pre povlakovanie v plynnej fázy sa používajú dve základné technológie:

- chemické povlakovanie (CVD),
- fyzikálne povlakovanie (PVD) [4].

Najrozšírenejším procesom je CVD povlakovanie. Je založený na reakcii plynných chemických zlúčenín nad povrchom a následnej depozícii produktov reakcie na povrchu vymeniteľnej reznej doštičky. Druhý v poradí je proces fyzikálneho povlakovania. Odparený, odprášený alebo ionizovaný materiál reaguje s vhodným plynom vo vákuovej komore a produkty dopadajú na upravovaný nástroj. PVD povlakovanie je vo všeobecnosti vhodné pre nástroje z rýchloreznej ocele, nástrojov zo spekaných karbidov a doštičiek z ostrou reznou hranou [4].

2.4 Upínanie nástroja a obrobku

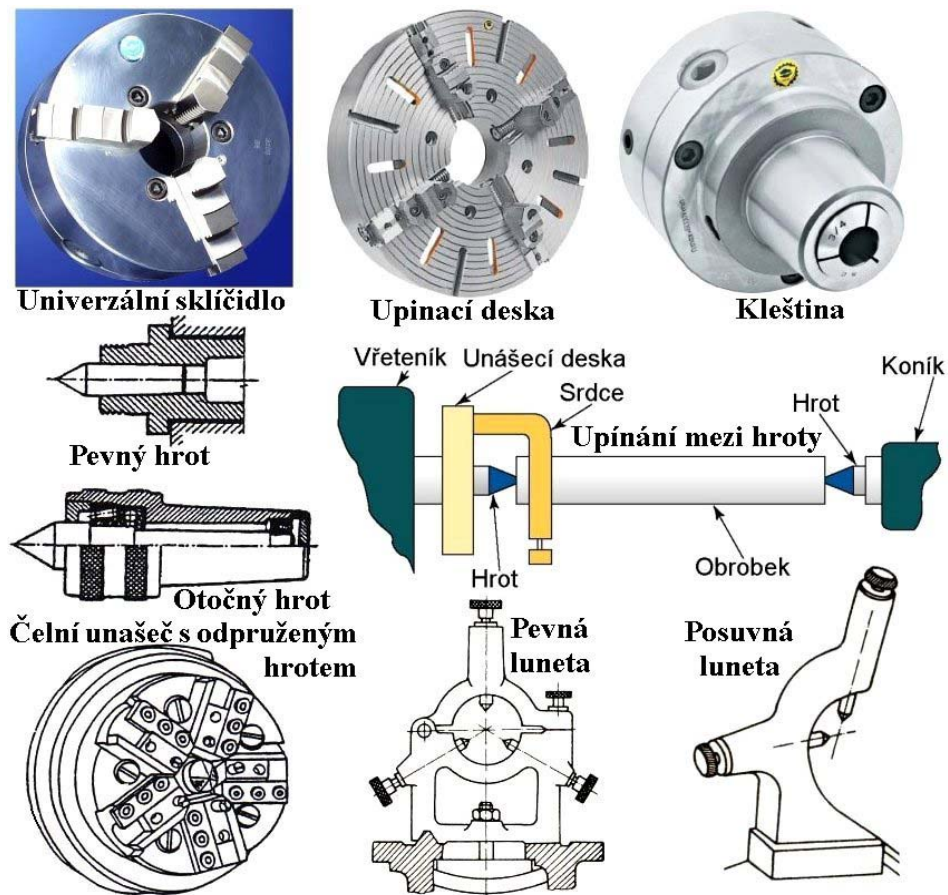
Upínanie nástroja

Sústružnícke nože sa vo väčšine prípadov na sústruhoch upínajú v nožových hlavách, kde možno súčasne upnúť štyri nože. Možno ich ľahko nastaviť do pracovnej polohy pootočením hlavy okolo svorníka, ktorý prechádza jej stredom a ktorý hlavu upevňuje. U revolverových a NC sústruhoch možno logicky nástroje upínať v revolverových hlavách. Na upínanie nástrojov v CNC poloautomatických a automatických sústruhoch, a v obrábacích centrách sa používajú špeciálne držiaky. Tie sú riešené tak, že nastavovanie nástroja je vykonávané mimo stroj v nastavovacom prístroji. Prednastavený nástroj je následne vkladán do zásobníku nástrojov a odtiaľ sa v automatickom cykle aplikuje pre daný obrábací proces [1,2].

Upínanie obrobku

Upínanie obrobku musí byť ako spoľahlivé, tak aj musí vykazovať dostatočnú tuhosť, a taktiež musí zaistiť jednoznačnú polohu obrobku vzhľadom k funkčným častiam

obrábacieho stroja. Ako možno vidieť na obrázku 8, pre upnutie obrobku sa používa veľké množstvo upínacích elementov, pričom spôsob upnutia obrobku závisí predovšetkým na jeho tvare a hmotnosti, požadovanej presnosti sústruženia a na druhu sústruhu. Upínanie môže byť napríklad medzi trne, do skľučovadla, na upínacie platne, do klieštín, prípadne ďalších špeciálnych prípravkov.



Obr. 8 : Základné upínacie elementy pre upnutie obrobku [1]

Vo vretene stroja je použitý pevný hrot a v koníku zase hrot otočný. Krútiaci moment vretena je na obrobok prenášaný unášacou doskou a srdcom, ktoré je pripevnené skrutkou na začiatku obrobku. Pre uľahčenie upínania obrobku sa u sústružníckych poloautomatov a automatov používajú odpružené hroty. Upínanie medzi hroty sa používa pri vyšších požiadavkách na presnosť obrábania. Obrobky s väčšími hmotnosťami a veľkým pomerom dĺžky k priemeru sa zase upínajú v skľučovadle nasadenom na konci pracovného vretena a druhým koncom sa opierajú o hrot koníka.

Pre obrábanie na poloautomatoch a automatoch sa používajú pre upnutie obrobku samosvorné skľučovadlá. Tie obrobok automaticky zovrú, akonáhle sa začínajú otáčať. Najpoužívanejším zariadením na upínanie je univerzálne skľučovadlo. Upínacie čeľuste môžu byť tri, poprípade štyri. Sústredného pohybu upínacích čeľustí sa dosahuje buď ručne, alebo pneumatically, hydraulicky či elektricky, a to hlavne u automatizovaných sústruhov.

Ťažké a krátke obrobky nepravidelných tvarov je možné upínať napríklad na univerzálnych upínacích doskách. Tyčový materiál s menšími rozmermi priemerov sa upína do presných upínacích puzdiel, takzvaných klieštin. Tie sú rozrezané niekoľkými pozdĺžnymi drážkami, a vťahovaním do kužeľovej dutiny puzdra je materiál upínaný. Dlhé a štíhle obrobky sa podopierajú lunetami. Je to predovšetkým z toho dôvodu, že pri veľkých dĺžkach obrobku je veľké riziko prehnutia vplyvom pôsobenia reznej sily. Luneta je upevnená na lôžko približne v strede dĺžky obrobku a pomocou opierok ho udržiava v strednej polohe. Na väčších sústruhoch možno používať aj viac luniet [1,2].

2.6 Opatrebenie a trvanlivosť nástroja

Opatrebenie reznej hrany nástroja

Pri obrábaní dochádza k opotrebovaniu, respektíve otupeniu funkčných plôch nástroja. Dochádza k tomu v dôsledku rezného procesu k relatívnemu pohybu nástroj – obrobok a nástroj – trieska, a taktiež ku kontaktu nástroja s obrobkom a odchádzajúcou trieskou. Rezná hrana je vystavená vysokým teplotám na stykových plochách, ktoré môžu dosiahnuť až teplotu tavenia obrábaného materiálu. Na stykových plochách reznej hrany pôsobia vysoké tlaky, ktoré napomáhajú tomu, že v blízkosti ostria sa vytvára v celkovom stave napätosti určitý podiel všestranného tlaku, ktorý spôsobuje zmenu mechanických vlastností rezného materiálu. Mechanické vlastnosti nástroja ako napríklad tvrdosť významným spôsobom ovplyvňujú opotrebenie reznej hrany [1,3].

Príčiny opotrebenia možno rozdeliť na:

- 1) oter,
 - a) abrazívny,
 - b) adhézny,
 - c) difúzny,
 - d) chemický,

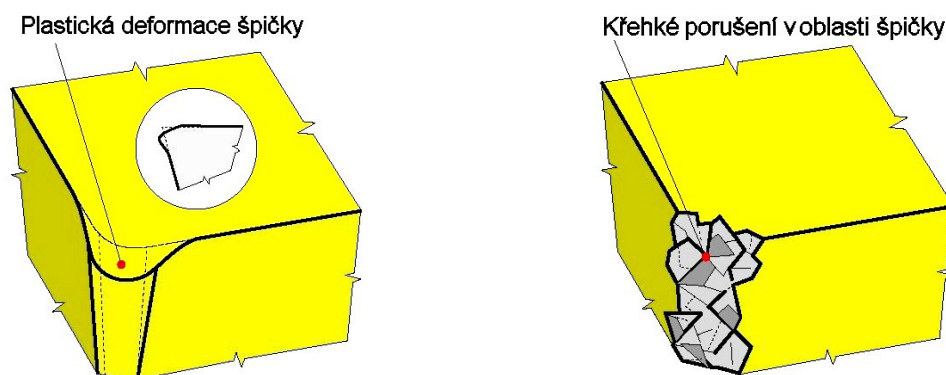
- 2) plastická deformácia,
- 3) krehký lom [3].

Abrazívny oter, teda brúsny oter je spôsobený vplyvom tvrdých mikročastíc obrábaného materiálu a mikročastíc uvoľnených z nástroja. Adhézny oter je v jednoduchosti vznik a následné okamžité porušovanie mikrozvarových spojov na stýkajúcich sa vrcholcoch nerovnosti čela a triesky, a je spôsobená vysokými teplotami a tlakmi a chemickou príbuznosťou. Difúzny oter predstavuje migráciu atómov z obrábaného materiálu do nástroja a opačne, a z toho vyplývajúci vznik nežiadúcich chemických zlúčenín na povrchu nástroja. Posledným typom oteru je chemický. Dôsledkom chemického oteru je vznik chemických zlúčenín na povrchu nástroja a to v dôsledku prítomnosti kyslíku v prostredí [1].

Plastická deformácia je spôsobená kombináciou vysokého tepelného a mechanického zaťaženia. Najhorším dôsledkom plastickej deformácie je takzvané lavínové opotrebenie [1].

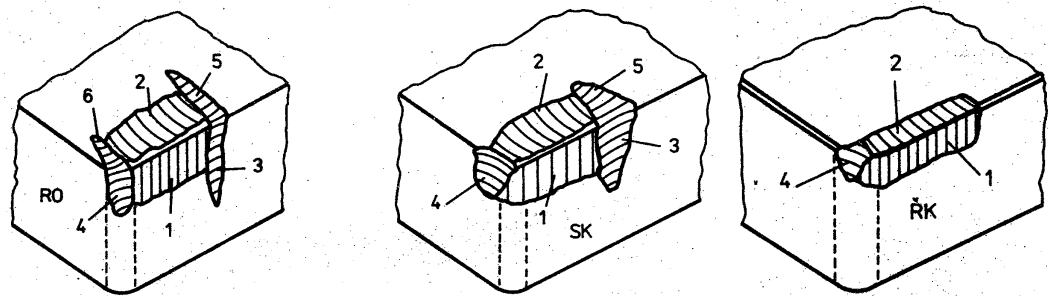
Krehký lom nastáva pri veľmi veľkom mechanickom zaťažení, napríklad prerušovaného rezu a výsledkom je úplne znehodnotenie nástroja [1].

Plastická deformácia špičky nástroja a taktiež krehké porušenie je znázornené na obrázku 9.



Obr. 9 : Plastická deformácia a krehký lom [1]

Formy opotrebenia reznej hrany nástroja sú závislé ako na charaktere práce, tak aj na reznom materiáli. Na nasledujúcom obrázku sú uvedené základne formy opotrebenia nástroja [3].



Obr. 10 : Formy opotrebenia nástroja na rýchloreznej oceli (RO), spekanom karbide (SK) a reznej keramike (ŘK) [3]

- 1 – plocha opotrebenia na chrbte,
- 2 – žliabok na čele,
- 3 – ryha na chrbte,
- 4 – ryha na vedľajšom chrbte,
- 5, 6 – ryhy na čele [3].

Najčastejšiu formou opotrebenia reznej hrany nástroja je plocha na chrbte. Meraná je jej šírka a označuje sa VB. Tento typ opotrebenia môže byť spôsobený napríklad povrchovou kôrou obrobku (okuje, spevnená povrchová vrstva po predošlej technológii). Zväčšenie šírky opotrebenia pod špičkou indikuje príliš malý polomer špičky, a z toho vyplývajúci zlý odvod tepla [3].

Druhou častou vyskytujúcou sa formou opotrebenia reznej hrany je žliabok vytvárajúci sa na čele. Meranými parametrami sú v tomto prípade jeho hĺbka, šírka, a vzdialenosť jeho okraja od ostria. So zväčšujúcou hĺbkou žliabku sa znižuje vzdialenosť okraju žliabku k ostriu, a môže dochádzať k vylozeniu reznej hrany. Tvorba žliabku je spôsobená existenciou tepelného poľa, kedy maximálna teplota je v určitej vzdialenosti od ostria. Vzhľadom na to, že takéto tepelné pole sa vytvára pri vyšších rezných rýchlostiach a posuvoch, možno konštatovať, že táto forma opotrebenia sa vytvára predovšetkým pri vyšších rezných podmienkach [3].

Trvanlivosť nástroja

Trvanlivosť reznej hrany nástroja T možno v stručnosti definovať ako čas, po ktorý nová rezná hrana pracuje až do dosiahnutia kritéria otupenia. Kritériom otupenia, respektíve kritériom výmeny je myslené tak veľké otupenie, pri ktorom je daný nástroj vymieňaný [3].

Súčet trvanlivosť realizovateľných na danom nástroji, prípadne vymeniteľnej reznej doštičke sa nazýva životnosť Z nástroja [3].

Trvanlivosť nástroja závisí predovšetkým na metóde obrábania, vlastnostiach obrábaného a nástrojového materiálu a rezných podmienkach. Najväčší vplyv na trvanlivosť nástroja má rezná rýchlosť, a na základe závislosti týchto dvoch veličín je aj odvodený takzvaný Taylorov vzťah a užíva sa v tvare:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \text{ [min]} \quad (2.4)$$

Kde: C_T [-] - konštanta,
 v_c [m.min⁻¹] - rezná rýchlosť,
 m [-] - exponent [1].

Vzhľadom k vysokej a nepraktickej hodnote konštanty C_T sa tento vzťah častejšie udáva v tvare:

$$v_c = \frac{C_v}{T^{1/m}} \text{ [min]} \quad (2.5)$$

Kde: C_v [-] - konštanta ($C_v = C_T^{1/m}$) [1].

Postup stanovenia závislosti trvanlivosti na rezných rýchlosti vychádza z definície trvanlivosti. Daný materiál je obrábaný určitým nástrojom pri minimálne štyroch rôznych rýchlostiach pričom ostatné rezné parametre ako šírka záberu ostria, posuv na otáčku zostávajú konštantné. Sledovaný je časový nárast opotrebenia nástroja, napríklad VB, ktorý sa vynáša do časovej závislosti.

V praxi je najčastejšie využívaný tzv. komplexný Taylorov vzťah:

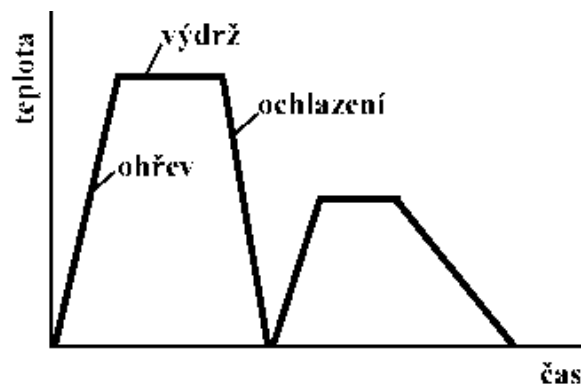
$$v_c = \frac{c_v}{T^{\frac{1}{m}} \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} [m. min^{-1}] \quad (2.6)$$

Kde:	$v_c [m. min^{-1}]$	- rezná rýchlosť,
	$C_v [-]$	- konštanta,
	$x_v [-]$	- exponent, vyjadrujúci vplyv hĺbky rezu,
	$y_v [-]$	- exponent, vyjadrujúci vplyv posuvu na otáčku [1].

Výhodou komplexného Taylorovho vzťahu je menší počet obmedzujúcich podmienok. Avšak, pre stanovenie je potrebný oveľa väčší rozsah skúšok v porovnaní so skúškami nutnými pre určenie predošlých uvedených vzťahov (2.4), (2.5) [1].

3 Tepelné spracovanie

Pojem tepelné spracovanie kovov vo všeobecnosti možno predstaviť ako technologické postupy, charakterizované prenosom tepla medzi materiálom v tuhom stave a okolitým prostredím v tepelných cykloch, a to za účelom zlepšenia vlastností výrobku. Ako možno vidieť na obrázku 11, jednotlivé cykly pozostávajú z ohrevu na požadovanú teplotu, výdrže na danej teplote a následného ochladenia. Parametre cyklu, ako napríklad rýchlosť ohrevu či ochladenia, teplota a čas, závisia ako na účele spracovania, tak aj na materiáli výrobku, jeho tvare a rozmeroch [5].



Obr. 11 : Obecný cyklus tepelného spracovania [7]

Tepelné spracovanie možno rozdeliť na:

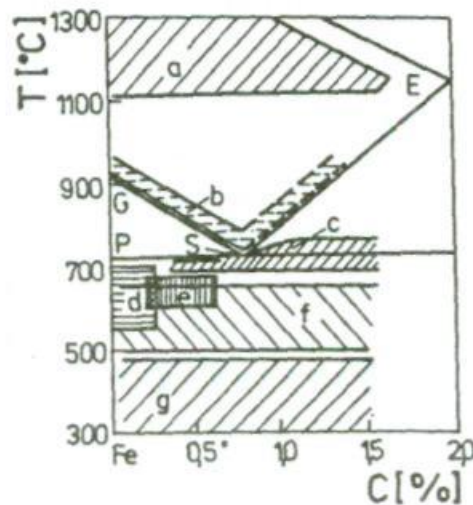
- postupy, ktoré v porovnaní s počiatočným stavom dosahujú rovnovážnejšej štruktúry, nazývajú sa žihanie,
- postupy smerujúce k nerovnovážnej štruktúre, nazývajú sa kalenie [5].

3.1 Žihanie

Cieľom žihanie je:

- znížiť zvyškové napätie,
- odstránenie následkov predošlého mechanického spracovania,
- zlepšenie technologických vlastností,
- zmenšenie chemickej a štruktúrnej heterogenity [5].

Rozhodujúcimi technologickými parametrami pri žíhaní sú teplota a doba výdrže na teplote, pričom doba ochladzovania je obvykle veľmi pomalá. Teploty žihania jednotlivých postupov vyplývajú z rovnovážneho diagramu Fe-Fe₃C (obrázok 12) [5].



Obr. 12 : Žihacie teploty v diagrame Fe-Fe₃C [5]

Pre žihanie: a) homogenizačné, b) normalizačné, c) na mäkko, d) rekryštalizačné, e) protivločkové, f) k zníženiu zostatkového napätia, g) k odstráneniu krehkosti po morení [5].

Žihanie možno vo všeobecnosti rozdeliť podľa teploty na:

- žihanie bez prekryštalizácie,
- žihanie s prekryštalizáciou.

Žihanie na zníženie pnutia

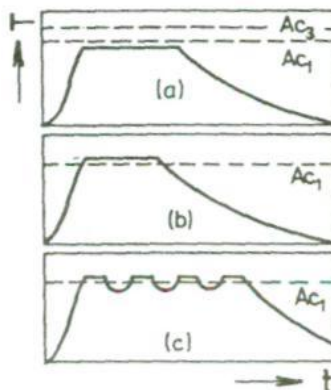
Účelom je zníženie pnutia, teda vnútorných napätí v materiály pri tuhnutí odliatku, po tvárení materiálu a tiež v povrchových vrstvách po obrábaní. Teplota žihania dosahuje teplotu 450 až 650 °C. Pri takýchto teplotách je medza klzu tak nízka, že zostatkové napätia môžu byť vyrovnané lokálnou plastickou deformáciou. Nutná je 2 až 10 hodinová výdrž na teplote s pomalým ochladzovaním. Doba výdrže závisí na veľkosti, tvare či materiály súčasti [5].

Žihanie rekryštalizačné

Jedná sa o ohrev na teploty 550 až 700 °C s výdržou 1 až 5 hodín. Je to spravidla medzioperačné žihanie pri tvárení nízko uhlíkovej oceli za studena, kedy sa odstraňuje vzniknuté spevnenie a teda sa regenerujú tvárne vlastnosti [5].

Žihanie na mätko

Zlepšuje sa tvárnosť sa studena a u oceli s vyšším obsah uhlíka aj obrobitelnosť. Taktiež možno žíhaním pripraviť vhodnú štruktúru pre následné kalenie. Doba žihania je rôzna podľa jednotlivých druhov ocelí, pohybuje sa od 4 hodín (uhlíkové oceli) po 16 hodín (vysokolegované oceli). Nasleduje pozvoľné ochladzovanie v peci. Na obrázku 13 sú schematicky znázornené základné spôsoby žihania [5].



Obr. 13 : Postupy žihania na mätko [5]

a) podeutektoidna ocel, b) nadeutektoidna ocel, c) vysokolegovaná nástrojová ocel'

Žíhanie protivločkové

Tento spôsob kalenia sa používa pri oceliach s nadkritickým obsahom vodíka, kedy dochádza k náchylnosti tvorby vnútorných trhlín – vločiek. Zabrániť tomu je možné dlhodobým ohrevom pri teplotách 650 až 750 °C. Ochladenie je vhodné minimálne do teploty 500 °C veľmi pomalé [5].

Žíhanie pre odstránenie krehkosti po morení

Po morení u ocelových súčastí dochádza k difúzii vodíku do kovu a následnej vodíkovej krehkosti. Žíhanie prebieha pri teplote 300 až 500 °C po dobu 1 až 4 hodín [5].

Žíhanie normalizačné

Patrí medzi často používané postupy tepelného spracovania. Zaisťuje jemnozrnnú a rovnomernú štruktúru po odlievaní alebo tvárení. Používa sa hlavne u podeutektoidných ocelí, kedy pri teplote 30 až 50 °C nad A_{C3} a výdrži 1 až 4 hodín vzniká jemná a rovnomerná austenitická štruktúra s priaznivými mechanickými vlastnosťami [5].

Žíhanie homogenizačné

Homogenizačné žíhanie znižuje nehomogenitu chemického zloženia hrubostenných odliatkov, v ktorých došlo k výraznej dendritickej segregácii. Žíhanie prebieha pri teplote 1100 až 1200 °C. Výdrž na teplote závisí na veľkosti a hrúbke odliatku. Väčšinou to však vedie k výraznému zhrubnutiu zrna, takže je následne potrebné aj normalizačné žíhanie [5].

Žíhanie rozpúšťacie

Rozpúšťané sú karbidy, nitridy a ďalšie intermetalické fázy. To zvyšuje homogenitu austenitu a jeho nasýtenie legujúcimi prvkami. Prebieha pri teplotách 1050 až 1150 °C, a nasleduje rýchle ochladenie [5].

Žíhanie izotermické

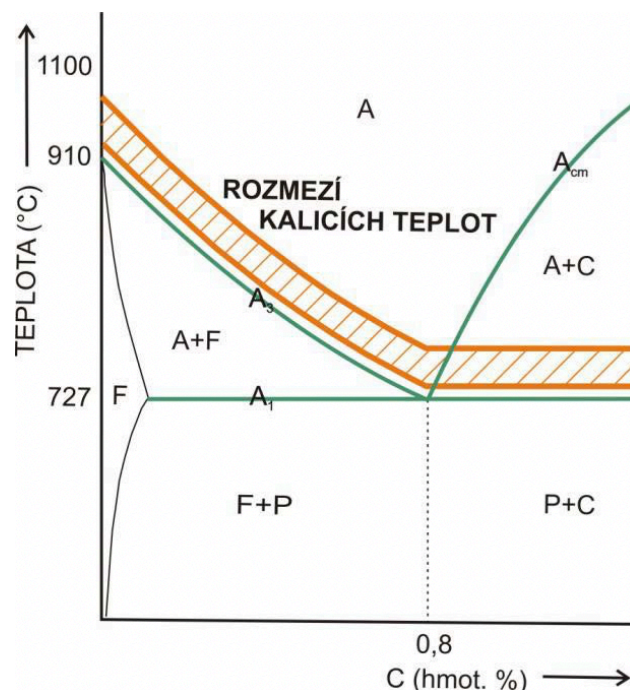
Jedná sa o 3 druhy žíhaní: normalizačného, na mätko a na zníženie vnútorných napätí. Tie sú spojené do jednej operácie, vďaka čomu možno získať homogénnu

jemnozrnnú štruktúru so zlepšenou obrobitelnosťou. Tento typ žihanie je obzvlášť vhodný pre stredne legované ocele, pre ktoré nie je úplne vhodné žihanie na mätko [5].

3.2 Kalenie

Cieľom kalenia je predovšetkým zvýšenie tvrdosti, pevnosti a odolnosti proti opotrebeniu. Spomenuté vlastnosti ponúkajú čiastočné alebo úplne nerovnovážne štruktúry. Tie možno získať ochladením austenitu nadkritickou rýchlosťou. Podľa prevládajúcej fázy vo výslednej štruktúre sa rozlišuje kalenie martenzitické alebo bainitické [5].

Rozhodujúcim parametrom procesu kalenia je teplota, pri ktorej je oceľ pred ochladením austenitizovaná. Správna kaliciaca teplota u podutektoidných ocelí je približne 30 až 50 °C nad A_{C1} , kde zaisťuje homogénnu štruktúru austenitu pred rozpadom. U nadeutektoidných ocelí je postačujúci ohrev 20 °C na A_{C1} , kde počiatočnú štruktúru tvorí heterogénna zmes austenitu a nerozpustených karbidov, ktoré po zakalení prispievajú k zvýšeniu odolnosti proti opotrebeniu. Rozpätie kaliciacich teplôt možno vidieť na obrázku 14. Veľmi dôležité je dodržanie správnej kaliciacej teploty, pretože v inom prípade to môže viesť k vzniku nežiadúcich fáz v konečnej štruktúre alebo k zhrubnutia zŕn, čo môže ďalej viesť k vzniku kaliacich trhlín [5].



Obr. 14 : Pásmo kaliciacich teplôt v diagrame Fe-Fe₃C [6]

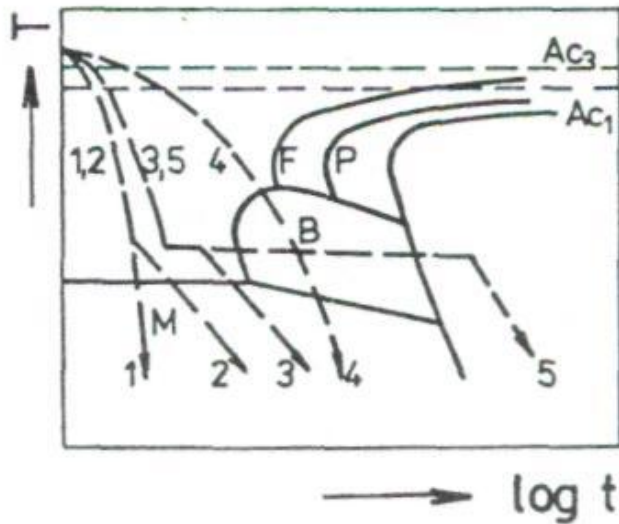
Ochladzovacia rýchlosť pri kalení musí byť taká, aby zaistila vytvorenie požadovanej buď martenzitickej alebo bainitickej štruktúry, zároveň ale aby nespôsobovala trhliny alebo vysoké zostatkové napätie. Preto je vyžadované kaliace prostredie s takou intenzitou chladenia, aby rýchlosť ochladzovania výrobku, vzhľadom k počiatku difúzneho rozpadu austenitu, bola nadkritická a optimálna. Okrem intenzity ochladzovania sú kaliace média hodnotené taktiež podľa fyziologickej nezávadnosti, ekologickej neškodnosti, ľahkej omývateľnosti či odolnosti proti tepelnému zaťaženiu, oxidácii a starnutiu. Najčastejšie používané chladiace média sú vzduch, olej, voda alebo vodný roztok solí a alkálií. V súčasnosti sa používajú aj moderná kaliace prostredia na báze polymérov, pri ktorých je intenzita ochladzovania na úrovni medzi olejom a vodou. Výsledok procesu kalenia samozrejme závisí aj charakteristikách kaleného výrobku ako napríklad druh ocele, tvar alebo hmotnosť výrobku [5].

Kaliteľnosť, zakaliteľnosť a prekaliteľnosť

Kaliteľnosť je schopnosť ocele dosiahnuť ochladením z autenzizačnej teploty nerovnovážneho stavu. Zakaliteľnosť predstavuje maximálnu tvrdosť po kalení, závisí na obsahu uhlíku rozpusteného v austenite. Výsledná tvrdosť je ešte ovplyvnená aj výškou kaliacej teploty, obzvlášť u nadeutektoidných ocelí. Prekaliteľnosť je informácia, udávajúca možnosť zakalenia súčasti do určitej hĺbky, respektíve v celom priereze. Za zakalený sa považuje taký materiál, ktorého štruktúra je tvorená minimálne 50 % martenzitu. Prekaliteľnosť je závislá predovšetkým na zložení ocele a je podmienená tvarom diagramov IRA, ARA a rýchlosti ochladzovania. Dôležitá je aj veľkosť zŕn austenitu, keďže rozpad austenitu začína na hraniciach zŕn. Prekaliteľnosť sa zisťuje buď výpočtom alebo praktickými skúškami. Najčastejšie sa stanovuje Jominiho čelnou skúškou. Pri tejto skúške sa definovaným spôsobom ochladzuje štandardné valcové teleso, ktoré je ohriate na kaliacu teplotu. Následne sa meria tvrdosť po jeho dĺžke od čela a výsledkom je krivka prekaliteľnosti ako závislosť tvrdosti na vzdialenosti od čela telesa [5].

Existuje veľký počet kaliacich postupov, ktoré sú schématicky znázornené na obrázku 15. Vďaka nim je možné dosiahnuť optimálnu rovnomernú štruktúru s minimalizáciou deformácii pri kalení. Oba spôsoby kalenia, teda martenzitické aj

bainitické, používajú ako plynulé nepretržité ochladzovanie až na teplotu ochladzovacieho prostredia, tak aj rôzne modifikácie pretržitého chladenia [5].



Obr. 15 : Druhy kalenia [5]

1) základné, 2) lomené, 3) termálne, 4) nepretržité bainitické, 5) izotermické [5]

Základné kalenie

Jedná sa o najjednoduchší spôsob kalenia. Teplota klesá pod M_s , kde začne transformácia austenitu na martenzit. Základné kalenie nie je vhodné pre tvarovo zložitejšie výrobky, keďže vznikajú veľké zostatkové napätia [5].

Lomené kalenie

Toto kalenie začína ochladzovaním nadkritickou rýchlosťou k potlačeniu perlitickej premeny a pokračuje ochladením v miernejšom prostredí. Vďaka tomu sa znižuje rozdiel teplôt na povrchu a v strede výrobku, a znižuje sa tepelné napätie [5].

Termálne kalenie

Vďaka termálnemu kaleniu možno vyrovnať teploty v celom objeme kaleného predmetu, znížiť tepelné napätia a zmenšiť deformáciu vďaka zotrvaní nad teplotou M_s . Ochladenie prebieha spravidla na vzduchu a postup je vhodný predovšetkým pre tenkostenné výrobky zložitých tvarov a z ocelí, ktoré majú bainitickú oblasť posunutú dostatočne vpravo [5].

Kalenie zrn zmrazovaním

Vyžaduje sa dochladenie v zmrazovacích kúpeľoch, vďaka ktorému sa zabráni stabilizácii zostatkového austenitu u ocelí s nízkymi teplotami M_s a M_f . Tento typ kalenia sa aplikuje na výrobky pracujúce pri záporných teplotách alebo na meracie nástroje, kde je vyžadovaná tvarová stálosť [5].

Nepretržité bainitické chladenie

Výslednou štruktúrou tohto typu kalenia je zmes bainitu, martenzitu a zostatkového austenitu. Používa sa u ocelí s bainitickou oblasťou významne posunutou doľava [5].

Izotermické kalenie

Je podobné kaleniu termálnemu. Rozdiel je v tom, že zotrvanie trvá v oblasti bainitickej premeny až do ukončenia izotermického rozpadu austenitu. Tepelné aj štrukturálne napätia sú minimálne a teda nie je nebezpečenstvo deformácie a vzniku trhlin [5].

Povrchové kalenie

V súčasnosti sa objemové tepelné spracovanie postupne obmedzuje v prospech povrchového tepelného spracovania. Povrchové kalenie prináša radu výhod, keďže sa zvyšuje tvrdosť povrchu súčasti pri zachovaní húževnatejšieho jadra. Tým sa zlepšuje odolnosť proti dynamickému namáhaniu i proti opotrebeniu. Jedná sa o zvláštny technologický postup martenzitického kalenia, pričom zakalený je len povrch súčasti. Povrchové kalenie pozostáva z rýchleho ohrevu povrchovej vrstvy súčasti na úroveň kaliacej teploty a následného rýchleho ochladenia. Na povrchovej vrstve sa premení austenit na martenzit [5,7].

Podľa zdroja tepla rozlišujeme:

- povrchové kalenie plameňom,
- povrchové kalenie indukčné,
- povrchové kalenie laserom [5].

Pri kalení plameňom je zdrojom tepla plameň horáku, v ktorom je spaľovaný plyn s kyslíkom. Ohrev je rýchly a výdrž na kaliacej teplote je veľmi krátka. Vďaka tomu nedochádza k rastu austenitického zrna. Po zakalení sa na povrchovej vrstve nachádza v štruktúre martenzit. V malej vzdialenosti pod povrchom sa nachádza martenzitická štruktúra so zbytkami feritu. V jadre zostáva pôvodná, feriticko-perlitická štruktúra [7].

Technologický postup indukčného kalenia je nasledujúci. Diel, ktorý je treba zakaliť je vkladajú do induktoru, ktorým prechádza elektrický prúd s vysokou frekvenciou. V povrchu súčasti sa indukujú vírivé prúdy rovnakej frekvencie ale opačného smeru, než budiace prúdy. Následne je ohriata vrstva zakalená vodnou sprchou alebo v kúpeli [7].

V poslednej dobe sa významne uplatňujú aj iné zdroje, ktoré rozširujú možnosti aplikácie. Medzi takéto patrí aj elektrónový zväzok, či paprsok laseru s vysokou intenzitou ohrevu. Aplikáciou laserového paprsku k martenzitickému spevneniu na povrchu sa jedná o povrchové kalenie laserom [5].

3.3 Popúšťanie

Jedná sa o spôsob tepelného spracovania ocelí, ktorý nasleduje hneď po kalení. Zakalená oceľ je ohriata na teplotu neprevyšujúcu A_{C1} . Tu dochádza k rozpadu martenzitu a k premene zostatkového. Štruktúrne zmeny a teda aj zmeny mechanických vlastností závisia predovšetkým na výške popúšťanej teploty. Na základe technologického hľadiska existuje:

- popúšťanie pri nízkych teplotách,
- popúšťanie pri vysokých teplotách [5].

Pri popúšťaní pri nízkych teplotách (do 350 °C) sa znižuje zostatkové napätie po kalení a znižuje sa obsah zostatkového austenitu, a stabilizujú sa rozmery. Pri popúšťaní pri

vyšších teplotách (nad 450 °C) zase dochádza k úplnému rozpadu martenzitu. To sa prejavuje značným poklesom tvrdosti a pevnosti, tiež rastom plasticity a húževnatosti [5,7].

3.4 Kombinované postupy tepelného spracovania

Medzi kombinované spôsoby tepelného spracovania patrí zušľachťovanie a vytvrdzovania. Zušľachťovanie je najdôležitejším spôsobom spracovania konštrukčných ocelí. Pozostáva z martenzitického kalenia a popúšťania pri vysokej teplote. Výslednou štruktúrou je sorbit, ktorý je charakterizovaný výhodnou kombináciou pevnostných a tvárných vlastností.

Pri vytvrdzovaní je postup nasledovný: rozpúšťacie žíhanie, intenzívne ochladenie k dosiahnutiu presýteného tuhého roztoku, a starnutie pri zvýšení teplote. Takto tepelne spracované sú predovšetkým žiarupevné austenitické oceli, zliatiny a hlavne vysokolegované martenzitické oceli s nízkym obsahom uhlíku typu maraging [5].

4 Sústruženie tepelne spracovaného povrchu

Z hľadiska obrobiteľnosť sa tepelne spracované materiály, respektíve kalené oceli radia medzi ťažkoobrobiteľné materiály. Požiadavky na znižovanie výrobných nákladov pri dosiahnutí vysokej produktivity priniesli významný posuv v sústružení kalených súčastí. V súčasnosti sú klasické metódy brúsenia nahradzované buď frézovaním alebo častejšie sústružením až po konečnom tepelnom spracovaní. Rezné materiály umožňujú produktívne obrábať zakalené materiály až do tvrdostí 63 HRC [2].

4.1 Kalené materiály

Nelegované ocele

Nelegované ušľachtilé oceli dosahujú vyššiu metalurgickú čistotu. Požadovaných spracovateľských vlastností sa dosahuje presným stanovením chemického zloženia. Tieto oceli sú určené buď k cementovaniu alebo k povrchovému kaleniu. Na povrchové kalenia sa používajú oceli so stredným obsahom uhlíka (0,4 až 0,6%), ktorých martenzit je v povrchovej vrstve už dostatočne tvrdý, avšak neprekalené jadro je ešte primerane húževnaté. Nelegované oceli majú malú prekaliteľnosť, čo je pre povrchové kalenie výhodné. Zvýšiť prekaliteľnosť je možné malou prísadou bóru [5].

Legované oceli

Oceli určené k zušľachtovaniu a k povrchovému kaleniu patriace do skupiny legovaných ocelí charakterizuje predovšetkým ich prekaliteľnosť, ktorá rastie s obsahom legujúcich prvkov, pričom ich súčet nepresahuje 7 %. Obsah uhlíka sa obvykle pohybuje v rozmedzí 0,3 až 0,5 %. Legované oceli sú vo väčšine prípadov kalené do oleja a po popúšťaní dosahujú veľkú pevnosť až do 1300 MPa a taktiež vysokú húževnatosť. V tabuľke 1 možno vidieť jednotlivé mechanické vlastnosti ocelí v zušľachtenom stave.

Tabuľka 1 : Mechanické vlastnosti ocelí v zušľachtenom stave [5]

označeni	oceli podle	max. d (t)	Re	Rm	A	Z	KV
CSN	CSN EN	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[J]
12040	C35E	100(60)	380	600 až 750	19	45	35
12060	C55E	100(60)	490	750 až 900	14	35	-
14140	37Cr4	100(60)	630	850 až 1000	13	40	35
15130	25CrMo4	160(100)	600	800 až 950	14	55	50
15260	51CrV4	250(160)	800	1000 až 1200	10	45	30
16343	34CrNiMo6	250(160)	900	1100 až 1300	10	45	45
-	36NiCrMo16	250(160)	1050	1250 až 1450	9	40	30

4.2 Nástroje pre sústruženie kalených súčastí

Najčastejšie používané nástrojové materiály na obrábanie kalených súčastí sú rezná keramika alebo materiály z kubického nitridu bóru. Najnovšie nástrojové triedy umožňujú napríklad aj vykonávanie stredne ťažkých až ťažkých prerušovaných rezov u indukčne kalených oceľových súčiastok, kde možno obrábať s hĺbkou rezu až 2 mm [1,9].

Jeden z najväčších výrobcov obrábacích nástrojov, firma Sandvik Coromant, ponúka široké portfólio nástrojov určených na sústruženie kalených súčastí. Nástroje sú optimalizované pre obrábanie oceľových materiálov s tvrdosťou 58 až 62 HRC. Nástroje sú opatrené novým typom PVD povlaku, ktorý im dodáva zvýšenú odolnosť proti oteru a krehkému lomu. Doporučené rezné rýchlosti sa pohybujú v rozmedzí 100 až 200 m/min, pričom rýchlosť posuvu je v rozmedzí 0,05 až 0,45 mm/ot. Rezné doštičky, vďaka ktorým možno dosiahnuť takýchto hodnôt, obsahujú veľké percento kubického nitridu bóru [9].



Obr. 16 : Obrábanie povrchovo kalenej súčasti [9]

5 Optimalizácia obrábacieho procesu

Vo svete je stále rastúca konkurencia, ktorá vytvára tlak na strojárské podniky, a to predovšetkým tak, aby boli výrobky produkované s minimálnymi cenami, teda s minimálnymi výrobnými nákladmi. To v podstate znamená, že pri výrobe by sa mali uprednostňovať dané výrobné prostriedky s optimálnymi pracovnými podmienkami. Pracovnými podmienkami možno rozumieť všetky faktory, ktoré určujú daný obrábací proces. Ide napríklad o materiál a geometriu nástroja, stav reznej hrany, rezné podmienky, dobu obrábania určitou reznou hranou či použité rezné prostredie [8].

V prípade, že pri výrobe nie sú požívané optimálne pracovné podmienky, respektíve nie sú využívané všetky technicko-ekonomické rezervy, dochádza k ekonomickým problémom. Ak sa v podniku vyskytuje podobný stav, ktorý trvá dlhšiu dobu, tento podnik nemôže počítať s perspektívnym uplatnením na trhu [8].

5.1 Optimalizácia obrábacieho nástroja

Optimalizácia obrábacieho nástroja je prvým optimalizačným krokom vlastného technologického procesu. Medzi základné parametre tohto kroku patrí zvolený rezný materiál, geometria reznej hrany, aj jej kvalita a vhodná veľkosť opotrebenia. Ďalšími významnými činiteľmi sú charakteristika obrábaného materiálu, charakteristika obrobní (jeho tvar, rozmery, presnosť a kvalita povrchu) a samozrejme charakteristika obrábacieho stroja vrátane upínacích systémov nástroja a obrobní.

5.1.1 Nástrojové materiály

Správna voľba rezného materiálu je jedným z najdôležitejších krokov pri optimalizácii. Ako som už spomenul v podkapitole 2.3.1, žiadny z doposiaľ dostupných rezných materiálov nie je schopný úplne zabezpečiť komplexné požiadavky obrábania. Avšak najmodernejšie varianty pokrývajú relatívne širokú oblasť aplikácie.

Ideálny nástrojový materiál by mal disponovať vysokou tvrdosťou a pevnosťou, húževnatosťou, chemickou stálosťou a odolnosťou proti teplotnému rázu. Podiel a význam spomenutých charakteristík nie je možné jednoznačne stanoviť, vzhľadom k širokému

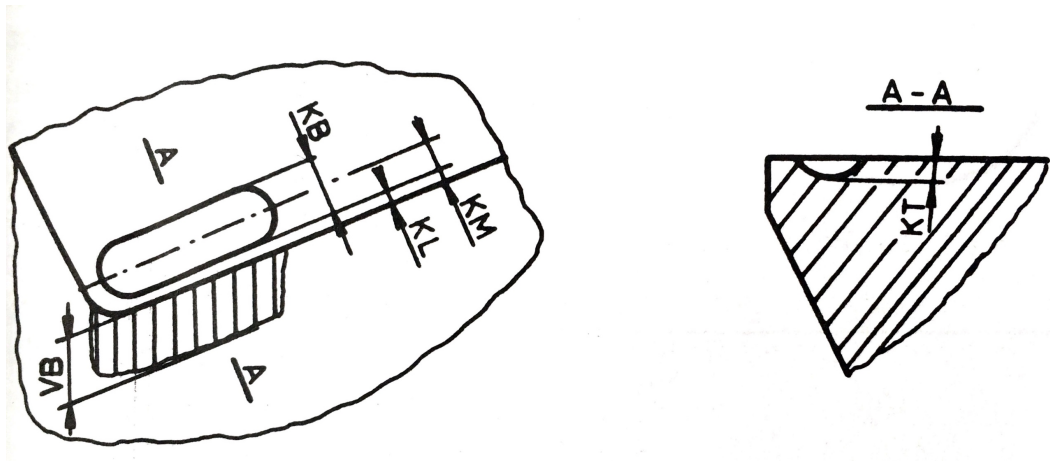
spektru rezných materiálov. Maximálna tvrdosť, ktorá je hrubou mierou odolnosti proti popúšťaniu a odolnosti proti opotrebeniu, a maximálna húževnatosť, nie sú totožné, a tým pádom vyžadujú voľbu vhodného kompromisu medzi danými hodnotami vlastností alebo rôznymi nástrojovými materiálmi. Limitujúca úloha pevnostných vlastností, nutných zachovať aj na úkor rezavosti, sa prejavuje hlavne u exponovaných monolitných nástrojov. Táto skutočnosť podporuje rýchly rozvoj konštrukcie nástrojov skladných, ktoré sú v dnešnej dobe takmer samozrejmosťou. Ďalším hlavným smerom vo zvyšovaní rezavosti, a teda tiež trvanlivosti reznej hrany nástroja je vytváranie aktívnej vrstvy alebo povlaku na funkčných vymeniteľných elementoch a tiež aj na celých nástrojoch. Práve modifikácia vlastností vymeniteľných rezných doštičiek a aktívnych častí obrábacích nástrojov predstavuje značný posuv k ideálnym rezným charakteristikám. Úpravou povrchu možno zabezpečiť reznú hranu alebo nástroj s potrebnou húževnatosťou a pevnosťou, na ktorom je aplikovaný tvrdý, oteruzvzdorný a tiež chemicky stály povlak [8].

Konkrétnym rezným materiálom, ako aj technológii povlakovania som sa venoval podrobnejšie v podkapitole 2.3.1.

5.1.2 Geometria reznej hrany nástroja

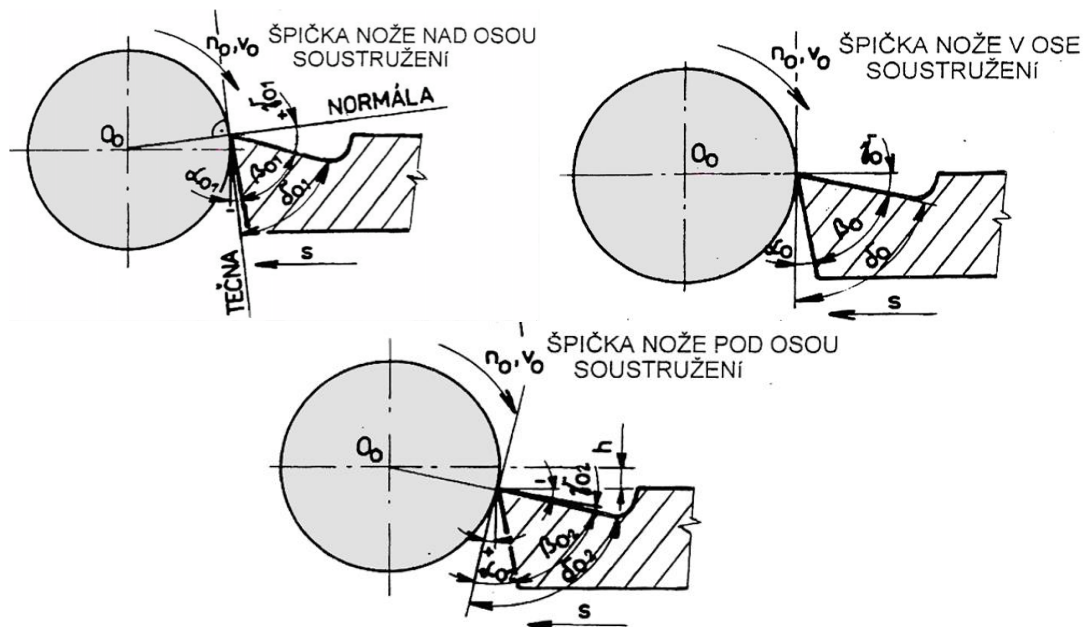
Optimálna geometria reznej hrany obrábacieho nástroja zohľadňuje vplyv jednotlivých faktorov obrábacieho procesu na intenzitu opotrebenia reznej hrany. Nástroj je opotrebovávaný rôznymi formami. Formy opotrebenia obrábacích nástrojov z rýchloreznej oceli, spekaného karbidu a reznej keramiky sú v podstate rovnaké. Tieto formy opotrebenia som detailnejšie popísal v podkapitole 2.6 [8].

Hlavnými formami opotrebenia reznej hrany je opotrebenie na chrbte, a v niektorých prípadoch žliabok na čele nástroja. Obvykle jedna z týchto foriem opotrebenia prevažuje nad ostatnými. Z tohto dôvodu možno jednu z týchto foriem opotrebenia považovať za rozhodujúcu pre daný prípad opotrebenia. Vo výnimočných prípadoch, kedy sa obe formy opotrebenia vyvíjajú približne rovnako, nie je podstatné, ktorá z foriem opotrebenia je rozhodujúca. Jednotlivé formy opotrebenia sú znázornené na obrázku 17 [8].



Obr. 17 : Hlavné formy opotrebenia a ich vyhodnocovanie [8]

Uhol chrbta, rezu, nastavenia a uhol špičky sú hlavnými reznými uhlami. Tieto uhly sú merané v rovine kolmej k hlavnému ostriu a k ložnej ploche noža. Tieto uhly majú vo výsledku výrazný vplyv na kvalitu obrobenej plochy, pričom pri ich voľbe sa zohľadňuje predovšetkým druh obrábaného materiálu [4].

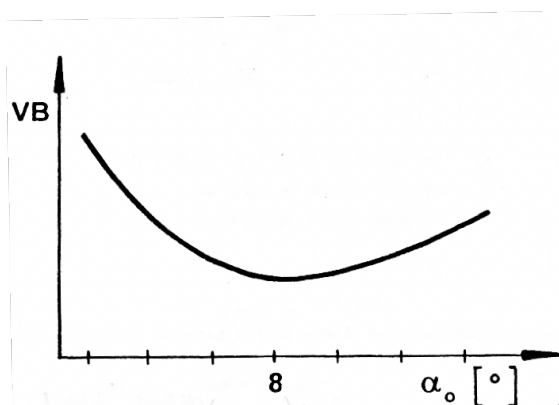


Obr. 18 : Vplyv umiestnenia nástroja na zmenu pracovných uhlov [12]

Na obrázku 18 sú znázornené jednotlivé prípady umiestnenia nástroja a ich vplyv na zmenu pracovných uhlov, ktoré sú detailnejšie popísané nižšie.

Uhol chrbta α_0

Vplyv uhlu chrbta nástroja nie je úplne jednoznačný. V oblasti malých uhlov dochádza k veľkému treniu medzi chrbtom nástroja a plochou rezu. Vplyvom trenia logicky dochádza k veľkému vývinu tepla, čo má za následok zvyšovanie intenzity opotrebenia. Pri zväčšovaní uhlu chrbta sa množstvo vzniknutého tepla znižuje a intenzita opotrebenia klesá (obrázok 19). Avšak pri zväčšovaní pracovného uhlu nad hodnoty 8° sa začína zhoršovať odvod tepla zoslabujúcou sa reznou hranou a intenzita opotrebenia rastie [8].



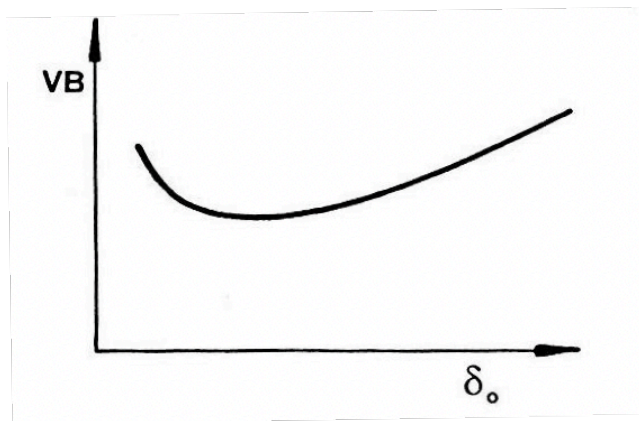
Obr. 19 : Trend šírky VB opotrebovanej plochy na uhle chrbta [8]

U krehkých materiálov môže zoslabenie reznej hrany nástroja spôsobovať aj vylamovanie menších častíc, prípadne môže dôjsť až k celkovej deštrukcii reznej hrany nástroja. Z výsledného pôsobenia týchto faktorov vyplýva optimálna veľkosť uhla chrbta v rozmedzí od 7° do 9° [8].

Uhol rezu δ_0

Podobne ako vplyv uhlu chrbta, ani vplyv na uhol rezu nie je jednoznačný. V oblasti malých, respektíve záporných uhlov čela γ_0 (teda veľkých uhlov rezu δ_0) dochádza k vysokému tepelnému a mechanickému zaťaženiu reznej hrany. Zhoršuje sa odvod tepla so zoslabujúcou sa reznou hranou a opotrebenie rastie, čo možno pozorovať aj na obrázku 19.

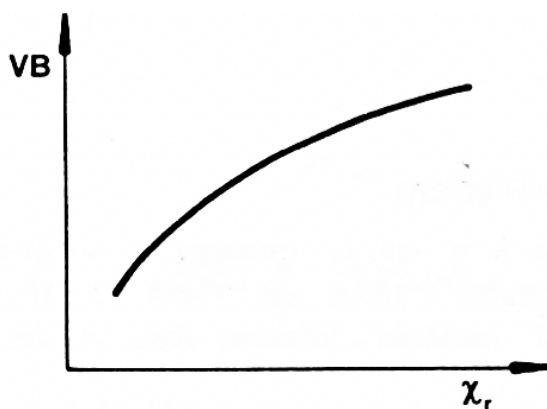
Uhol rezu by mal byť určovaný na základe rezného materiálu a prevažujúceho druhu namáhania. Nikdy by nemal byť použitý menší uhol, než taký, u ktorého ešte nedochádza k vylamovaniu reznej hrany v dôsledku zníženia jeho pevnosti [8].



Obr. 20 : Trend šírky VB opotrebovanej plochy na uhle rezu [8]

Uhol nastavenia

Uhol nastavenia ovplyvňuje intenzitu opotrebenia hlavne svojím vplyvom na teplotu rezania. So zväčšovaním uhlu nastavenia teplota rastie. Rezný proces, vývin tepla, respektíve aj jeho odvod do reznej hrany nástroja, je koncentrovaný na menšiu časť reznej hrany. Z hľadiska intenzity opotrebenia by mal byť uhol nastavenia čo najmenší (obrázok 21). So zmenšovaním uhlu však rastie náchylnosť na vznik samobudeného kmitania. Z tohto dôvodu by mal byť uhol nastavenia volený čo najmenší, avšak taký, pri ktorom ešte kmitanie nevzniká. Relatívne stabilný uhol nastavenia je okolo 60° vzhľadom na obrábací proces [8].



Obr. 21 : Závislosť šírky VB opotrebovanej plochy na uhle nastavenia [8]

Polomer špičky

Polomer špičky nástroja má na intenzitu opotrebenia opačný vplyv než uhol nastavenia. Ovplyvňuje predovšetkým drsnosť obrobenej plochy, pričom so zväčšujúcou sa veľkosťou polomeru špičky drsnosť obrobenej plochy klesá. Avšak, súčasne s tým rastie náchylnosť na vznik samobudeného kmitania.

So znižovaním polomeru špičky sa zhoršuje odvod tepla do nástroja a rastie nebezpečenstvo plastickej deformácie reznej hrany. Z pohľadu intenzity opotrebenia nástroja je najvýhodnejšie použiť polomer špičky čo najmenší, ale taký, u ktorého nedochádza k plastickej deformácii reznej hrany a nárastu opotrebenia pod špičkou [8].

5.1.3 Optimálna veľkosť opotrebenia

Optimalizácia veľkosti opotrebenia pre výmenu nástroja je ďalšou z oblastí ekonomických rezerv. Určuje sa z požiadavky na maximálnu životnosť nástroja Z .

Životnosť nástroja je definovaná ako súčet trvanlivostí reznej hrany, ktoré je možné na danom nástroji, prípadne vymeniteľnej reznej doštičke realizovať. U vymeniteľných rezných doštičiek je životnosť definovaná vzťahom:

$$Z = z_b \cdot T \cdot s_b \text{ [min]} \quad (5.1)$$

Kde: Z - je životnosť nástroja [min]

z_b - je počet rezných hrán na doštičke,

T - je trvanlivosť nástroja [min],

s_b - je súčiniteľ využitia reznej doštičky (rezných hrán na doštičke) [8].

Kritérium určujúcim výmenu reznej hrany je jej opotrebenie. Toto opotrebenie by malo byť pri výmene nástroja optimálne, v inom prípade dochádza k rastu výrobných nákladov.

Ako rozhodujúci fakt sa pri výmene nástroja uvažuje plochu opotrebenia na chrbte alebo hĺbku žliabku na čele. Iné formy opotrebenia možno odvodiť z týchto parametrov. Optimálna veľkosť opotrebenia závisí na spôsobe práce, teda či sa jedná o hrubovanie alebo obrábanie na čisto [8].

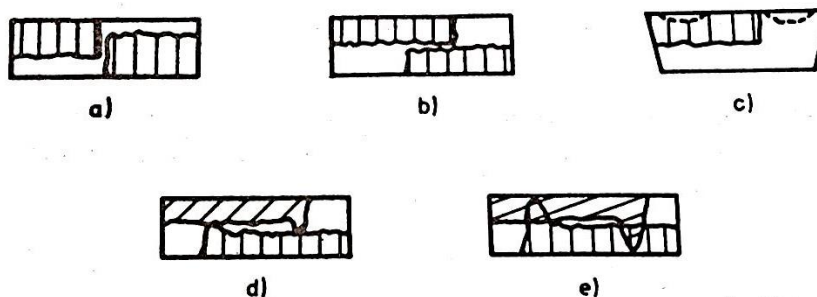
Hrubovanie vymeniteľnou reznou doštičkou

Pri hrubovaní nie je rozhodujúca presnosť ani kvalita obrobeného povrchu. Z tohto dôvodu je kladená požiadavka na maximálnu životnosť nástroja, respektíve dosiahnutie maximálnej možnej veľkosti opotrebenia.

Pokiaľ má doštička rezné hrany na oboch stranách, hĺbka rezu je malá a plocha opotrebenia nezasahuje cez polovicu šírky doštičky, možno pre opotrebenie chrbta teoreticky využiť celú hrúbku doštičky (viď obrázok 22) (prípád a).

Pre prípad, že hĺbka rezu je väčšia a plocha opotrebenia zasahuje cez polovicu doštičky, možno využiť maximálne polovicu šírky doštičky (prípád b).

Opotrebenie chrbta spoločne s vytvorením žliabku na čele je znázornené v prípade c. Optimálnu veľkosť opotrebenia ovplyvňuje okrem iného aj ryha v úrovni obrábaného povrchu. Zásah tejto ryhy do protiláhlej plochy opotrebenia však automaticky neznamená chybu či nedostatok (prípád d, e) [8].



Obr. 22 : Plochy opotrebenia na chrbte u rôznych doštičiek a rôznych hĺbok rezu [8]

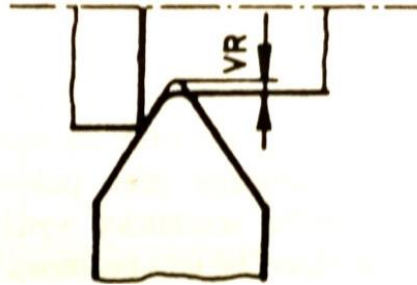
Obrábanie na čisto vymeniteľnou reznou doštičkou

Pri obrábaní na čisto nie je rozhodujúca hĺbka rezu. Faktormi pre stanovenie optimálneho opotrebenia sú presnosť a drsnosť obrobenej plochy.

Čo sa týka presnosti obrobenej plochy, rozhodujúcou formou opotrebenia je radiálne opotrebenie reznej hrany VR (obrázok 23). Opotrebenia VR a VB sú vo vzájomnom vzťahu, pričom je možné ich prepočítať z geometrických pomerov. V prípade, že sa neuvažuje deformácia obrábacej sústavy a tepelná dilatácia nástroja, optimálnu veľkosť opotrebenia možno vyjadriť vzťahom:

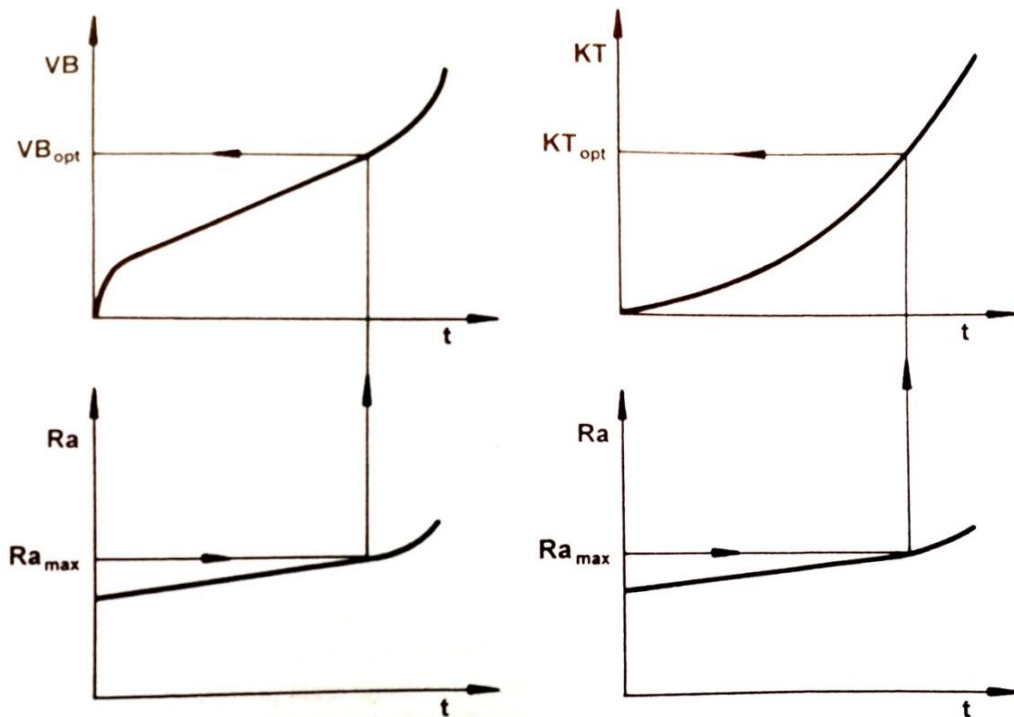
$$VR_{opt} = L_N \cdot VR_{max} [mm] \quad (5.2)$$

Kde: VR_{opt} – je optimálna veľkosť VR v mm,
 L_N – je maximálna prípustná nepresnosť obrobenej plochy v mm,
 VR_{max} – je maximálne prípustné radiálne opotrebenie reznej hrany nástroja v mm [8].



Obr. 23 : Radiálne opotrebenie nástroja [8]

Z pohľadu drsnosti obrobenej plochy je rozhodujúca taká veľkosť opotrebenia, ktorá ešte zaručuje dosiahnutie požadovanej drsnosti. So zväčšujúcim sa opotrebením spravidla rastie aj drsnosť obrobenej plochy. Maximálna prípustná veľkosť opotrebenia sa zároveň javí ako opotrebenie optimálne. Na obrázku 24 je znázornená optimálna veľkosť opotrebenia [8].



Obr. 24 : Určenie optimálnej veľkosti opotrebenia VB a KT z hľadiska drsnosti obrobenej plochy Ra [8]

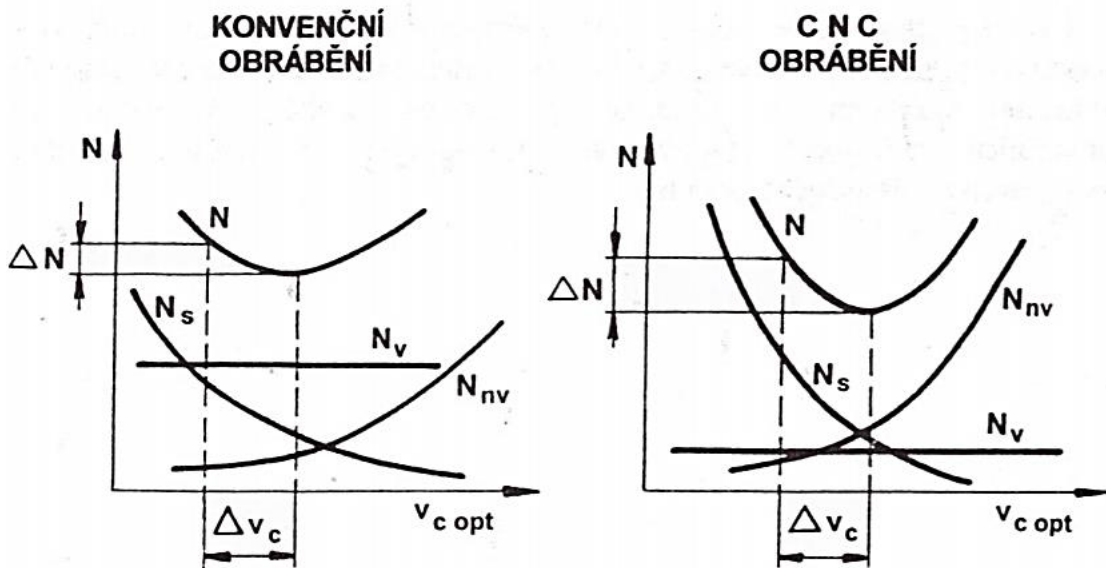
5.2 Optimalizácia rezných podmienok

Pri návrhu výroby je nutné brať do úvahy viacero faktorov. V súčasnosti sa kladie dôraz predovšetkým na vývoj technológií a materiálov, ekonomiku a tiež ekológiu. Čo sa ekológie týka, čoraz častejšie sa zavádzajú technológie priaznivejšie životnému prostrediu. Ekológia sa výrazným spôsobom podieľa aj na ekonómii výroby. Jedná sa napríklad o obrábanie bez rezných kvapalín, alebo o značnú redukciu týchto prostriedkov. Prípadne sa jedná o použitie alternatívnych technológií alebo použitie kvapalín ekologického typu. Počet faktorov, ktoré vstupujú do optimalizácie obrábacieho procesu rastie, čím rastie aj náročnosť danej optimalizácie [8].

Pre jednotlivé operačné úseky a pre nástroje určené pre daný úsek, sa optimalizujú rezné podmienky a trvanlivosť nástroja podľa jedného z optimalizačných kritérií, pričom najčastejšie uvažovaným je kritérium podľa minimálnych výrobných nákladov.

Podstatné je vychádzať z určitého optimalizačného kritéria a optimalizáciu premenných zrealizovať v rámci určitého súboru obmedzujúcich podmienok (parametre

stroja, nástroja). Princípom takejto optimalizácie je nájdenie optima kritériálnej funkcie v rámci súboru obmedzení pre daný prípad obrábania [8].



Obr. 25 : Závislosť výrobných nákladov N a ich zložiek [8]

(N_s – náklady na strojný čas, N_{nv} – náklady na nástroje a ich výmenu, N_v – náklady na vedľajšiu prácu) na reznej rýchlosti

Najvýznamnejší vplyv z hľadiska optimalizácie má rezná rýchlosť, keďže najviac ovplyvňuje trvanlivosť, respektíve životnosť nástroja. Dopad reznej rýchlosti na výrobné náklady sa významne líši u konvenčných strojov s nižšou cenou v porovnaní s modernými CNC obrábacími centrami. Ako možno vidieť na obrázku 25, sklon kriviek je pri CNC obrábaní znateľne strmší, čo znamená, že rovnaká zmena rýchlosti obrábania spôsobí značne väčšie rozdiely vo výrobných nákladoch. Na základe tejto skutočnosti možno tvrdiť, že význam optimalizácie rezných podmienok, konkrétne reznej rýchlosti, je v prípade CNC obrábacích centier omnoho dôležitejší ako v prípade konvenčných strojov [8,10].

Obrábací proces možno posudzovať podľa rôznych kritérií. Medzi tie najdôležitejšie patrí:

- kritérium minimálnych výrobných nákladov,
- kritérium maximálnej produktivity,
- kritérium zisku,
- kritérium odberu materiálu [8].

Vo väčšine prípadov je zásadne používané kritérium minimálnych výrobných nákladov. Avšak v niektorých prípadoch, kedy je napríklad podnik viazaný na termín dodania, prípadne obmedzený kapacitou výrobného zariadenia, sa používa kritérium maximálnej produktivity.

Podstatou optimalizácie rezných podmienok je stanovenie optimálnych hodnôt hĺbky rezu, posuvu a reznej rýchlosti, a tiež optimálnej trvanlivosti [8].

V nasledujúcich kapitolách som popísal jednotlivé kritéria optimálnosti, pričom pre moju diplomovú prácu som zvolil kritérium maximálnej produktivity, a to z dôvodu, že úlohou mojej diplomovej práce je zamerať sa na dodržanie výrobného času a celkové výrobné náklady nezohľadňujem.

5.2.1 Kritérium optimálnosti z hľadiska minimálnych výrobných nákladov

Ako bolo už spomenuté, toto kritérium je najčastejšie používané k výpočtu optimalizovaných rezných podmienok. Toto kritérium by malo byť aplikované, pokiaľ nie sú opodstatnené dôvody na to, aby bolo použité iné kritérium. Napríklad pri požadovanej maximálnej výrobnosti by bolo zvolené kritérium maximálnej produktivity.

Kritérium minimálnych výrobných nákladov je možné vyjadriť takto (5.3). V tomto prípade sa neuvažujú nákladové položky, ktoré nie sú závislé na rezných podmienkach.

$$N = N_s + N_n + N_{vn} = \min \quad (5.3)$$

- Kde:
- N - sú výrobné náklady na operačný úsek [KČ],
 - N_s - sú náklady na strojnú prácu na operačný úsek [KČ],
 - N_n - sú náklady na nástroje na operačný úsek [KČ],
 - N_{vn} - sú náklady na výmenu nástroja alebo VRD na operačný úsek [KČ] [8].

5.2.2 Kritérium optimálnosti z hľadiska produktivity

Ďalším kritériom optimálnosti je maximálna produktivita. Toto kritérium bolo preferované v minulosti. Vo všeobecnosti to znamená vyrábať maximálny možný počet kusov za určitý čas. Avšak jedná sa o kritérium, ktoré žiadnym spôsobom neberie do úvahy výrobné náklady. Z toho dôvodu je toto kritérium akceptovateľné iba vo výnimočných

prípadoch, napríklad pokiaľ je podnik viazaný určitým časovým termínom zo strany odberateľa a hrozí finančné postihnutie. Toto kritérium je z ekonomického hľadiska dlhodobo neudržateľné.

Podobné situácie je však možné riešiť aj inou cestou, napríklad prácou v nadštandardnej pracovnej dobe alebo kooperáciou [8].

Kritérium optimálnosti z hľadiska maximálnej produktivity je vyjadrené takto:

$$t_u = t_{AS} + t_{vn} \cdot z_v = \text{minimálny [min]} \quad (5.4)$$

Kde: t_u – je čas operačného úseku [min],
 t_{AS} – je strojný čas na daný operačný úsek [min],
 t_{vn} – je čas výmeny nástroja [min],
 z_v – je počet výmen nástroja [8].

Po doplnení za t_{AS} a z_v do už sformulovaného kritéria maximálnej produktivity sa získa rovnica:

$$t_u = \frac{L}{n \cdot f} + \frac{L \cdot k_r \cdot t_{vn}}{n \cdot f \cdot T} = \text{minimálny [min]} \quad (5.5)$$

Kde: k_r – je pomer medzi časom, kedy je nástroj v reze a kedy je v automatickom chode

Na základe tohto kritéria možno vyjadriť optimálnu trvanlivosť nástroja. Po úprave sa možno dostať k rovnici:

$$T_{opt P} = t_{vn} \cdot k_r \cdot (m - 1) \text{ [min]} \quad (5.6)$$

Kde: m – je empirická konštanta (pre spekaný karbid SK = 2,5 [-]) [8].

5.2.3 Kritérium optimálnosti z hľadiska odberu materiálu

Toto kritérium zvykne byť zamenené za kritérium maximálnej produktivity, avšak jedná sa o odlišné kritérium.

Za určitých podmienok je možné určiť optimálnu trvanlivosť reznej hrany nástroja podľa optimalizačného kritéria nezávisle na rezných podmienkach. V prípade, že optimalizácia rezných podmienok vychádza z optimálnej trvanlivosti reznej hrany stanovenej z hľadiska maximálnej produktivity, je kritérium maximálneho odberu zhodné s kritériom maximálnej produktivity. Podobne to platí aj pre kritérium minimálnych výrobných nákladov.

Matematicky možno toto kritérium vyjadriť nasledovne:

$$U = a_p \cdot f \cdot v_c = \max [mm/min] \quad (5.7)$$

Kde: U – je odber materiálu [cm^3/min],
 a_p – je hĺbka rezu [mm],
 f – je posuv na otáčku [mm/ot],
 v_c – je rezná rýchlosť [mm/min] [8].

Z dôvodu, že pri optimalizácii rezných podmienok sa vychádza z dopredu danej hĺbky rezu, kritérium maximálneho odberu materiálu možno vyjadriť v nasledujúcom tvare:

$$U = n \cdot f = \max [mm/min] \quad (5.8)$$

5.3 Obmedzujúce podmienky

Obrábací proces je obmedzený určitým súborom obmedzení, respektíve obmedzujúcimi podmienkami. Tieto podmienky možno vyjadriť matematicky ako nerovnice. Avšak, výnimkou je komplexný Taylorov vzťah, ktorý je vyjadrený rovnicou.

Obmedzujúce podmienky sú dané jednak obrábacím strojom, konkrétne napríklad jeho výkonom, medzným krútiacim momentom či rozsahom otáčok, ďalej nástrojom a taktiež materiálom obrobku, rezným prostredím, požadovanými kvalitatívnymi parametrami [8].

V nasledujúcich kapitolách zhrniem všetky významné obmedzenia, ktoré sú podľa môjho názoru najpodstatnejšie z pohľadu pokračovania mojej práce.

5.3.1 Výkon stroja

Toto obmedzenie je jedným z rozhodujúcich pre hrubovanie, keďže vtedy je stroj zaťažovaný z pohľadu výkonu najviac. Toto obmedzenie určuje hodnoty výkonu stroja, ktoré sú hraničné z pohľadu preťaženia [8].

Matematicky možno toto obmedzenie formulovať nasledovne:

$$P_c \leq P_e \cdot \eta \quad (5.9)$$

Kde: P_c – je rezný výkon [W],

P_e – je výkon elektromotora stroja [W],

η – je mechanická účinnosť stroja [-].

Rezný výkon je vyjadrený ako funkcia reznej sily F_c :

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60} \quad (5.10)$$

Kde: F_c – je rezná sila [N]

Reznú silu pre sústruženie možno vyjadriť ako funkciu rezných podmienok s použitím empirických konštánt.

$$F_c = k_{FC} \cdot a_p^{x_{FC}} \cdot f^{y_{FC}} \cdot v_c^{z_{FC}} [N] \quad (5.11)$$

Kde: - k_{FC} , x_{FC} , z_{FC} sú empirické konštanty [-].

Po doplnení vyššie spomenutých rovníc, možno po úprave vyjadriť obmedzujúcu podmienku v nasledujúcom tvare:

$$a_p^{x_{FC}} \cdot f^{y_{FC}} \cdot n \leq \frac{10^3 \cdot 60 \cdot P_e \cdot \eta}{k_{FC} \cdot \pi \cdot D} \quad (5.12)$$

Z dôvodu, že závislosť reznej sily na reznej rýchlosti je relatívne malá, a tiež že pre určitý materiál prichádza do úvahy len obmedzený rozsah rezných rýchlostí, vzťah sa uvažuje bez vplyvu reznej rýchlosti.

Je nutné spomenúť, že s nástupom moderných obrábacích centier s rôznymi výkonovými charakteristikami, sú výkonové charakteristiky čoraz zložitejšie matematicky formulovateľné pričom tieto charakteristiky sú ako v lineárnom, tak aj v nelineárnom tvare [8].

5.3.2 Maximálny prípustný krútiaci moment

Obmedzenie maximálnym krútiacim momentom je dôležité spomenúť predovšetkým v prípade sústruženia. Toto obmedzenie v podstate vyjadruje to, že vyvolané rezné sily nesmú prekročiť určitú hranicu, pri ktorej by došlo k uvoľneniu obrobku. Obmedzenie možno formulovať nasledujúcim vzťahom:

$$M_k \leq M_{k \max} \quad (5.13)$$

Kde: M_k – je krútiaci moment na vretene [Nm],

$M_{k \max}$ – je maximálna prípustná veľkosť krútiaceho momentu [Nm].

Obmedzenie konštantným krútiacim momentom

Konštantnú hodnotu krútiaceho momentu možno uvažovať napríklad u sklúčidiel s nízkymi otáčkami, čelných unášačov alebo klieštin. Po doplnení okrajových podmienok a rovnice pre výpočet reznej sily do vzťahu 5.13 možno obmedzujúcu podmienku vyjadriť v tvare:

$$a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \leq \frac{2 \cdot 10^3 \cdot M_{k \max}}{k_{Fc} \cdot D} \quad (5.14)$$

Obmedzenie nelineárnym priebehom krútiaceho momentu

Pri vyšších otáčkach u sklúčidiel dochádza k roztváraniu čelustí a znižovaniu upínacích síl. Spôsobené to je vplyvom odstredivých síl. Na čelusti možno uvažovať závislosť upínacej sily F_u na otáčkach n v nasledujúcom tvare:

$$F_u = F_{u0} - k_n \cdot n^2 [N] \quad (5.15)$$

Kde: F_u – je upínacia sila pôsobiaca na čelusť [N],
 F_{u0} – je upínacia sila pôsobiaca na čelusť pre $n = 0$ [N],
 k_n – je konštanta [-] [8].

5.3.3 Požadovaná drsnosť obrobenej plochy

Jedná sa o dôležitú obmedzujúca podmienku, predovšetkým pri dokončovacích operáciách, keďže po obrobení musí povrch vykazovať drsnosť predpísanú na výkrese. Obmedzenie z hľadiska drsnosti obrobenej plochy je definované nasledovne:

$$R_a \leq R_{a \max} \quad (5.16)$$

Kde: R_a – je aritmetická úchylka obrobenej plochy [μm],
 $R_{a \max}$ – je maximálna prípustná aritmetická úchylka obrobenej plochy [μm].

Vo všeobecnosti platí:

$$R_a = g(f, v_c, r_\epsilon, k_r, k'_r, \dots) \quad (5.17)$$

Kde: – je polomer špičky nástroja [mm],
– je uhol nastavenia [$^\circ$],
– je vedľajší uhol nastavenia [$^\circ$] [8].

V určitých prípadoch sa uvažuje obmedzujúca podmienka v nasledujúcom tvare:

$$f \leq f_{Ra \max} \quad (5.18)$$

Kde: $f_{Ra \max}$ – je maximálna hodnota posuvu, ktorá ešte vyhovuje v uvažovanom rozsahu možných pracovných podmienok [mm/ot]

Posuv je možné vyjadriť empirickým vzťahom platným pre sústruženie ocelí spekaným karbidom:

$$f = 0,1366 \cdot r_{\varepsilon}^{0,4869} \cdot R_{a \max}^{0,5131} \quad (5.19)$$

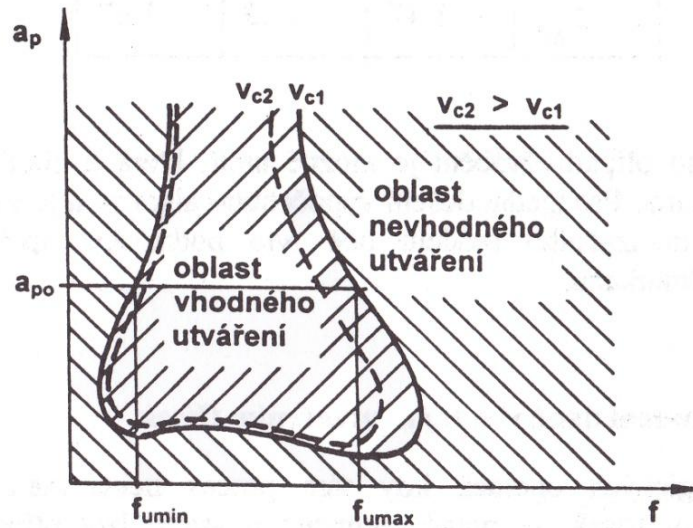
5.3.4 Vhodné utváranie triesky

Obmedzenie dané vhodným utváraním triesky je opodstatnené predovšetkým vtedy, keď sám proces alebo materiál obrobku nezaistuje delenie triesok, a to hlavne u strojov bez priameho dohľadu ako napríklad CNC stroje. Je nutné zabezpečiť obrábanie v určitom rozsahu rezných podmienok, pri ktorých dochádza k vhodnému utváraniu triesky, a to vhodnou geometriou nástroja. Požiadavky na tvorbu triesky sú nasledujúce:

- trieska sa nesmie nevhodným utváraním dostávať naspäť pod reznú hranu, aby nedochádzalo k deštrukcii reznej hrany a k havárii,
- trieska nesmie zahltiť obrábací priestor a znemožniť ďalšie obrábanie [8].

Hranice medzi oblasťami vhodného a nevhodného obrábania sa menia s reznou rýchlosťou, pričom pri jej zvyšovaní sa oblasť vhodného utvárania znižuje. V praxi je možno tvrdiť, že pre určitý rezný a obrábaný materiál existuje iba jedna hranica so zreteľom na to, že určitý rezný materiál sa používa v určitom rozsahu rezných rýchlostí.

Oblasti vhodného utvárania triesok sú zisťované experimentálne. Typický príklad takejto oblasti je znázornený na obrázku 26.



Obr. 26 : Oblasť vhodného utvárania triesky [8]

Optimalizáciu rezných podmienok je vhodné zrealizovať pre dopredu určenú hĺbku rezu. Obmedzujúcu podmienku je možné vyjadriť nasledovne:

$$f \leq f_{u \max} \quad (5.20)$$

$$f \geq f_{u \min} \quad (5.21)$$

Kde: $f_{u \max}$ – je maximálna prípustná veľkosť posuvu [mm/ot],
 $f_{u \min}$ – je minimálna prípustná veľkosť posuvu [mm/ot] [8].

Problematike vhodného utvárania triesok sa venujú taktiež výrobcovia nástrojov. Vytvárajú veľké množstvo tzv. utváračov triesok, ktoré slúžia na to, aby sa trieska vytvárala vhodným spôsobom. Utvárače triesok sú konštrukčné úpravy čela nástroja, ktoré spôsobujú intenzívne stáčanie triesky do špirály a jej lámanie nárazom na výstupky [4].

5.3.5 Maximálne a minimálne otáčky stroja

Otáčky na obrábacom stroji možno nastaviť v určitom rozsahu, a to v podobe maximálnych a minimálnych možných. Toto obmedzenie je formulované nasledovne:

$$n \leq n_{s \max} \quad (5.22)$$

$$n \geq n_{s \min} \quad (5.23)$$

Kde: $n_{s \max}$ – sú maximálne možné otáčky na stroji [ot/min],
 $n_{s \min}$ – sú minimálne možné otáčky na stroji [ot/min] [8].

5.3.6 Maximálny a minimálny posuv

Podobne ako u predošlého obmedzenia, aj v prípade posuvov platí, že ich je možné nastaviť na stroji v určitom rozsahu. V prípade uvažovania posuvov daných v mm na otáčku platí nasledujúce obmedzenie:

$$f \leq f_{s \max} \quad (5.24)$$

$$f \geq f_{s \min} \quad (5.25)$$

Kde: $f_{s \max}$ – je maximálny možný posuv na stroji [mm/ot],
 $f_{s \min}$ – je minimálny možný posuv na stroji [mm/ot] [8].

5.3.7 Komplexný Taylorov vzťah

Obmedzenie komplexným Taylorovým vzťahom má medzi ostatnými obmedzujúcimi podmienkami významné postavenie. A to hlavne pre to, že sa jedná o rovnicu obsahujúcu trvanlivosť reznej hrany nástroja.

S ohľadom na to, že obrobiteľnosť, rezavosť ani pôsobenie rezného prostredia nie je možné formulovať pomocou základných veličín, vyjadruje sa ich vzájomná väzba tzv. komplexným Taylorovým vzťahom. Túto obmedzujúcu podmienku je možné začleniť do kritéria optimálnosti [8].

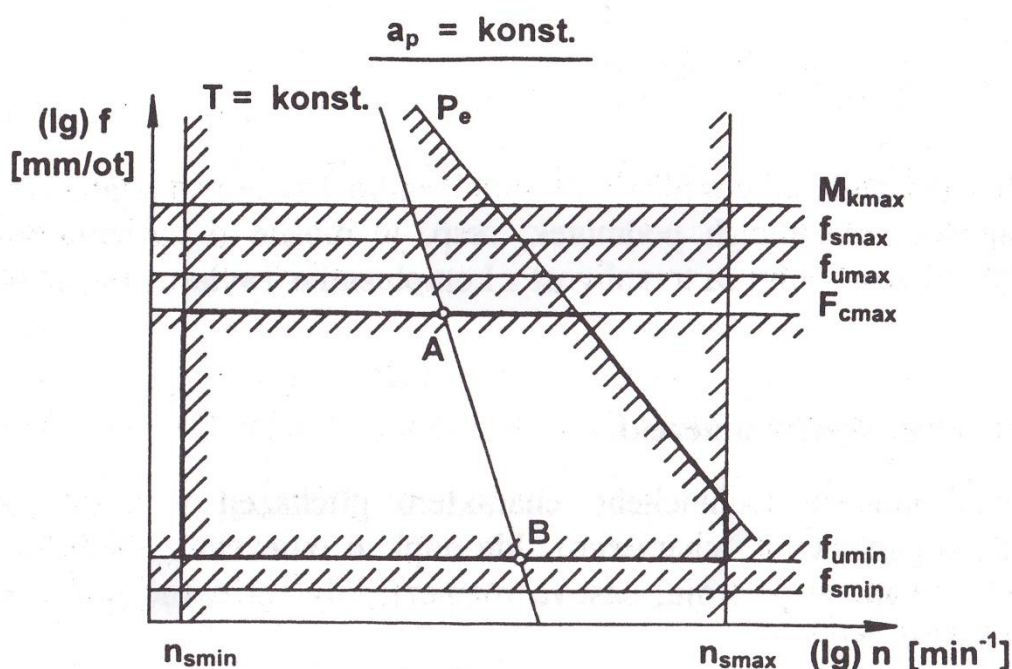
Komplexný Taylorov vzťah je detailne popísaný v podkapitole 2.6.

5.4 Oblasť prípustných riešení

Oblasť prípustných riešení predstavuje spoločnú oblasť všetkých uvažovaných obmedzujúcich podmienok. Vzhľadom na to, že optimalizačné algoritmy vychádzajú z určitej hĺbky rezu, diagram v súradnicovom systéme $(\lg)f - (\lg)n$ poskytuje predstavu oblasti príslušných riešení pre danú hĺbku rezu.

Na obrázku 27 je znázornený príklad oblasti prípustných riešení. Časť diagramu, ktorá je orámovaná hrubou čiarou, predstavuje oblasť prípustných riešení, respektíve oblasť možných kombinácií n - f , ktoré možno v danej optimalizačnej úlohe realizovať. Je nutné však vychádzať z predpokladu, že nie je uvažované obmedzenie z hľadiska komplexného Taylorovho vzťahu.

Aby bolo možné uvažovať komplexný Taylorov vzťah, je nutné vychádzať z konštantnej trvanlivosti reznej hrany nástroja, pričom by malo ísť o optimálnu trvanlivosť. Za tohto predpokladu, kedy je trvanlivosť daná, komplexný Taylorov vzťah je vyjadrený ako priamka. V prípade obrázku 27, je oblasť prípustných riešení úsečka A-B [8].



Obr. 27 : Príklad oblasti prípustných riešení [8]

Tvary oblasti prípustných riešení sa môžu značne medzi sebou líšiť v závislosti na určitých obmedzujúcich podmienkach pre dané optimalizačné úlohy [8].

5.5 Spôsob optimalizácie rezných podmienok

Postupný spôsob stanovenia rezných podmienok vychádza z optimálnej trvanlivosti nástroja. Trvanlivosť nástroja je však možné určiť len za určitých okolností, pričom v praxi je určovaná veľmi často nesprávne. Tento spôsob optimalizácie nevedie vždy k optimálnemu riešeniu. Spôsob optimalizácie možno formulovať nasledujúcimi krokmi:

- a) Na základe daného kritéria optimálnosti sa určí optimálna trvanlivosť reznej hrany nástroja, a to bez rešpektovania obmedzujúcich podmienok.
- b) Následne sa určí optimálna hĺbka rezu. Pri obrábaní na čisto je odoberaný celý prídavok naraz, zatiaľ čo pri hrubovaní je na zvážení, či bude hĺbka rezu rovná celému prídavku, jeho polovici alebo tretine. To závisí napríklad od dostatočnej rezervy vo výkone, otáčkach stroja, a ďalších obmedzujúcich faktorov.
- c) Ďalším krokom je určenie optimálnej veľkosti posuvu. Stanovenie posuvu sa realizuje pre stanovenú hĺbku rezu ako maximálna prípustná hodnota na základe obmedzujúcich podmienok, ktoré nie sú funkciou otáčok. Minimálna hodnota týchto posuvov je optimálna veľkosť posuvu.
- d) Z komplexného Taylorovho vzťahu sa určí pre hodnoty trvanlivosti nástroja, hĺbky rezu a posuvu rezná rýchlosť.

6 Predstavenie spoločnosti KYB Manufacturing Czech s.r.o.

Pri tvorbe diplomovej práce som spolupracoval so spoločnosťou KYB Manufacturing Czech s.r.o. , ktorá sídli v priemyselnej zóne v Pardubiciach. Jedná sa o výrobný závod japonskej spoločnosti KYB, ktorá sa považuje za jedného z najväčších výrobcov tlmičov do automobilov na svete. Pre predstavu, každý druhý automobil v Japonsku a každý piaty na svete používa tlmiče vyrobené spoločnosťou KYB.

Česká pobočka bola založená v roku 2003, pričom výroba tlmičov bola zahájená koncom roku 2006. Dôvodom vzniku pobočky v Českej republike bolo pokrytie automobilového trhu v Európe, pričom zákazníkmi sú napríklad kolínska automobilka TPCA, maďarské pobočky automobiliek Suzuki, Renault v Slovinsku či napríklad Nissan v Anglicku.

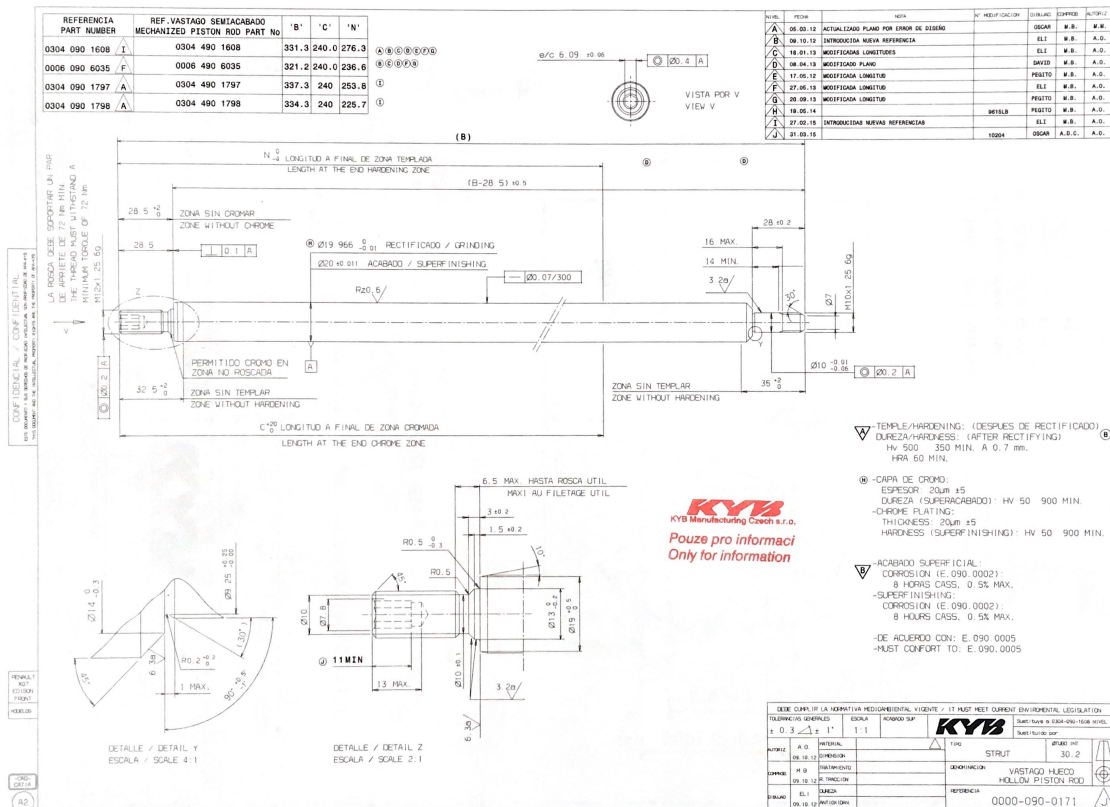
Česká pobočka v súčasnosti zamestnáva viac než 600 ľudí a súčasťou portfólia je aj výroba náhradných dielov pre trh v celej Európe [13,14].



Obr. 28 : Výrobný areál spoločnosti KYB Manufacturing Czech s.r.o. v priemyselnej zóne v Pardubiciach, Starých Čiviciach [14]

7 Obrábaná súčasť – piest tlmiča

Súčasť určená k optimalizácii je dutá piestna tyč. Súčasť pozostáva z dutej tyče, na ktorú sú z oboch strán trecím zvaráním privarené piny. Dutá tyč a piny pochádzajú z dvoch rôznych materiálov. Piestne tyče sú najprv povrchovo kalené a následne sú obrábané na dvojtom CNC sústruhu. Po obrobení musí súčasť spĺňať požiadavky predpísané na výkrese (obrázok 29).



Obr. 29 : Výrez z výkresu súčasti – dutá piestna tyč

Obrábané prvky sú tieto:

- hrubovanie pravej strany tyče
- dokončovanie pravej strany tyče na priemer 10
- hrubovanie ľavej strany tyče
- dokončovanie ľavej strany tyče na priemer 12

Celý proces sústruženia jednej tyče pozostáva z dvoch hrubovacích a dvoch dokončovacích operácií. Po hrubovacej operácii nasleduje okamžité operácia dokončovacia.

Na prvom stanovišti je obrábaná práve časť piestnej tyče. Následne je tyč prechytaná a obrábaná je druhá strana.

V diplomovej práci budem riešiť optimalizáciu obrobenie pravej strany piestnej tyče, konkrétne dokončovaciu operáciu, kde je nutné dodržať predpísanú drsnosť obrobenej plochy Ra 3,2 µm.

V ďalšom postupe práce budem práve túto sústružnícku operáciu brať ako zástupcu pre optimalizáciu obrábacieho procesu.

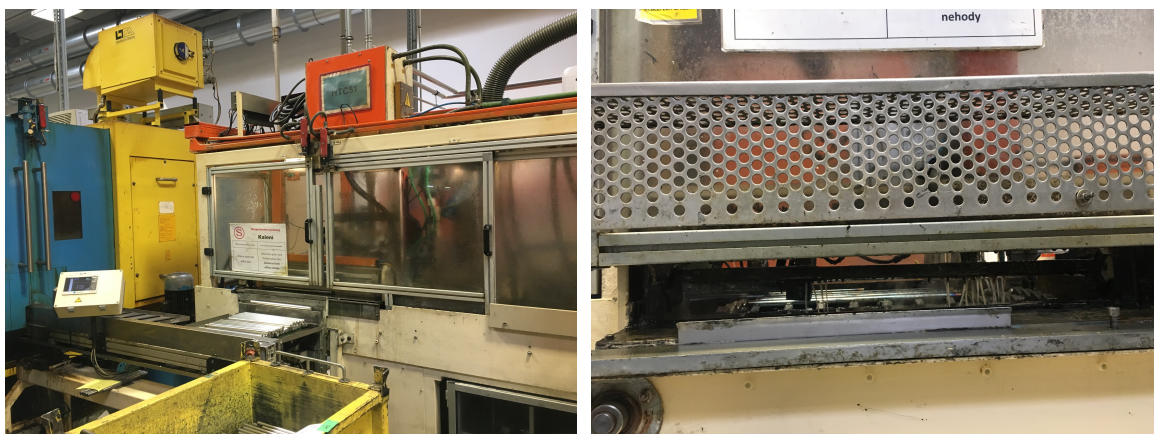
7.1 Materiál tlmiča

Materiál dutej tyče je oceľ EN 1035-2. jedná sa o zvarovanú oceľovú trubku, za studena ťahanú určenú na presné použitie. Akostná norma materiálu je E355. Minimálna medza pevnosti je 700 MPa [15]. Presné zloženie ocele je popísané v tabuľke 2.

Tabuľka 2 : Zloženie ocele EN 1035-2

Prvok	C	Mn	Si	S	P	Al	Cr
%	0,22	1,20	MAX.	MAX.	MAX.	MAX.	MAX.
	0,26	1,60	0,1	0,04	0,04	0,08	0,2

Tyč je zakalená technológiou indukčného kalenia. Tvrdosť predpísaná na výkrese je na úrovni minimálne HV 350, respektíve minimálne HRA 60. Na výkrese je presne vyznačená oblasť kalenia, respektíve oblasti, kde kalenie neprebíha. Kalenie prebieha len na časti oceľovej trubky a piny po stranách zakalené nie sú. Sú však už od dodávateľa dodávané ako zušľachtované.



Obr. 30 : Indukčné kalenie piestnych tyčí vo firme KMCZ

Piny, ktoré sú po stranách navarené sú z ocele 19MnB4. Jedná sa o uhlíkovú oceľ s prísadami mangánu, bóru a chrómu s triedou pevnosti 8.8 . Oceľ je kalená a popúšťaná. Zloženie tejto ocele je nasledujúce:

Tabuľka 3 : Zloženie ocele 19MnB4

Prvok	C	Mn	Si	S	P	Cr	Cu	B
%	0,17	0,80	MAX.	MAX.	MAX.	MAX.	MAX.	0,0008
	0,24	1,20	0,4	0,035	0,035	0,30	0,25	0,005

Samotná sústružnícka operácia odoberá práve druhý spomenutý materiál.

7.1.1 Meranie tvrdosti

Aby bolo preukázané, že tyče majú po indukčnom kalení skutočne takú tvrdosť, aká je predpísaná na výkrese, urobil som meranie tvrdosti. Skúška bola vykonaná na tvrdomere v laboratóriách Ústavu materiálového inžinierstva Fakulty strojní ČVUT na Karlovom námestí. Konkrétne na tvrdomere pre tvrdosť podľa Rockwella (EMCOTEST M4C, ČR).

Je nutné spomenúť, že dané meranie bolo mierne skomplikované, a to tým, že pri meraní nebolo možné úplne tyč vystrediť vzhľadom na indentor. Spôsobené to bolo predovšetkým faktom, že tyč je kruhového priemeru a pre presné vystredenie je nutné špeciálne zariadenie na uchytenie dielu a vystredenie ho vzhľadom na tvrdomer. Tento fakt mohol spôsobiť určitú variabilitu meraní.

Nezakalená tyč

Tabuľka 4 : Meranie tvrdosti na nezakalenej tyči

Č. merania	1	2	3	4	5	6	7	8	Priemer
Tvrdosť HRA	54,38	53,92	57,33	55,23	55,43	56,16	55,42	58,22	55,76

Zakalená tyč

Ako už bolo spomenuté, po zakalení by mala tyč vykazovať tvrdosť minimálne HRA 60. Meranie som zopakoval na niekoľkých miestach po obvode tyče.

Tabuľka 5 : Meranie tvrdosti na zakalenej tyči

Č. merania	1	2	3	4	5	6	7	8	Priemer
Tvrdosť HRA	65,4	64,38	59,85	63,38	67,43	68,78	68,35	64,78	65,29

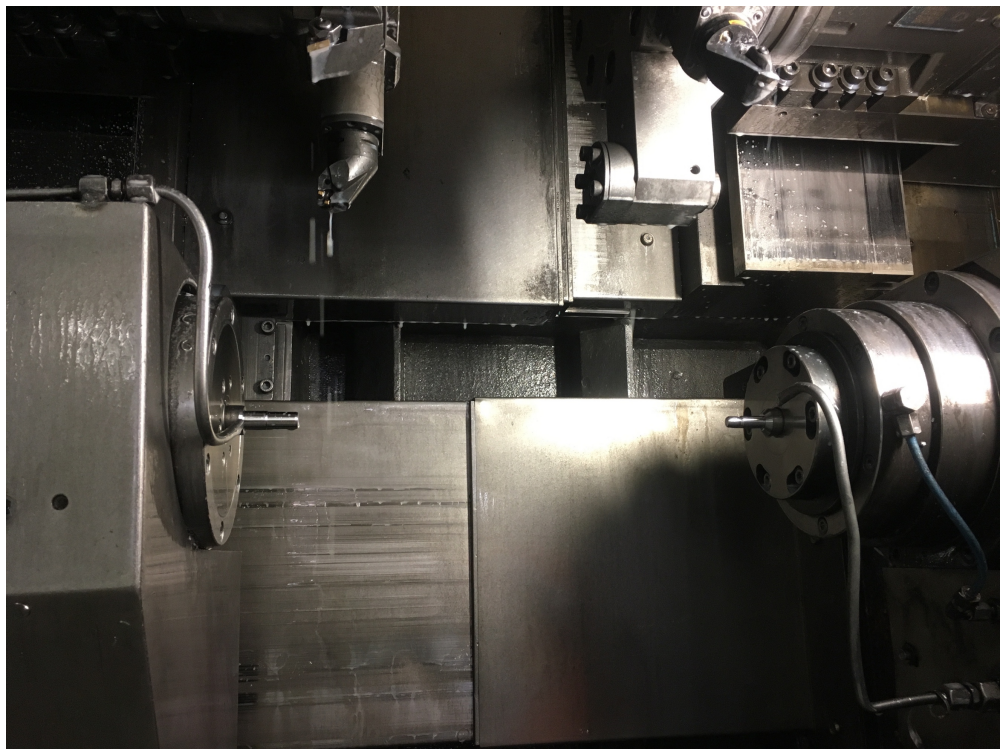
Na základe meraní je možné potvrdiť, že skutočná tvrdosť materiálu spĺňa predpísanú hodnotu na výkrese.

7.2 Stroj

Obrábanie piestnych tyčí je vykonávané na dvojtom CNC obrábacom sústruhu spoločnosti Danobat. Jedná sa o dvojvretenový sústruh. Stroj disponuje revolverovou hlavou s dvanástimi pozíciami pre nástroj. Na obrázku 31 je sústruh, na ktorom bola optimalizácia realizovaná. Na ďalšom obrázku je potom pohľad do vnútra stroja.

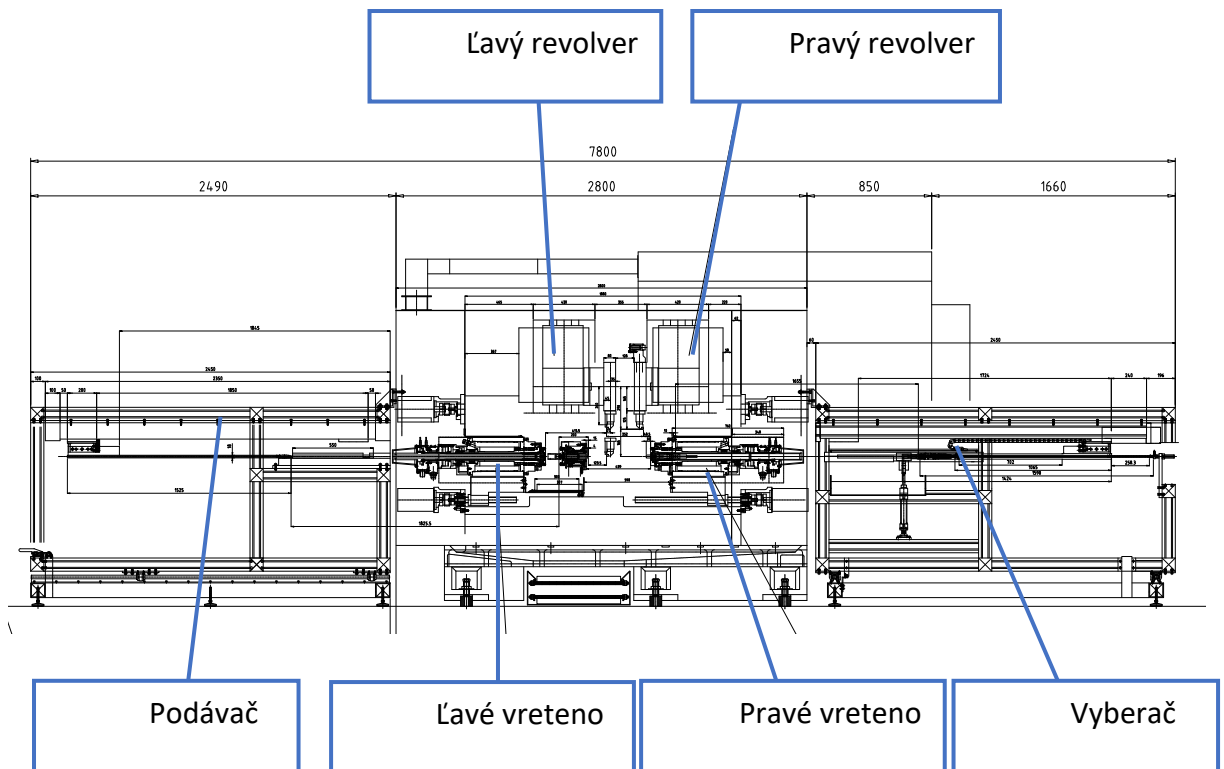


Obr. 31 : CNC sústruh firmy Danobat vo výrobnjej hale spoločnosti KMCZ



Obr. 32 : Pohľad do vnútra dvojjvretenového CNC sústruhu

Na nasledujúcom obrázku je znázornená schéma stroja s rozmiestnením základných prvkov stroja a tiež rozmiestnenie manipulátorov, nakladača a vykladača dielov.



Obr. 33 : Schéma stroja

Sústruh je z rady KAYABA, pričom spoločnosť sa pri tomto type strojov zamerala na kompletne obrábanie automobilových tlmičov. Stroje sú schopné obrábať širokú škálu tlmičov od dutých až po plné. Stroj zvláda obrábať súbežne dva tlmiče, pričom zvláda ako hrubovacie, tak aj dokončovacie operácie. Vzhľadom na to, že pri obrábaní tohto typu výrobkov sú kladené prísne rozmerové tolerancie, stroj disponuje vysokou tuhosťou. Stroj ďalej disponuje podávačom a vyberačom komponentov, ktoré sú navrhnuté spoločnosťou Danobat špeciálne pre tento druh výrobkov. Nakladač disponuje optickým kontrolným systémom na kontrolu polohy. Ďalšie parametre stroja sú zhrnuté v tabuľke 6 [16].

Tabuľka 6 : Parametre stroja

Parameter	Jednotka	Hodnota
Maximálny priemer pre obrábanie	mm	330
Výkon stroja	kW	12
Maximálne otáčky	ot/min	5000
Počet pozícií revolvera		12
Systém držiakov		CAPTO C4

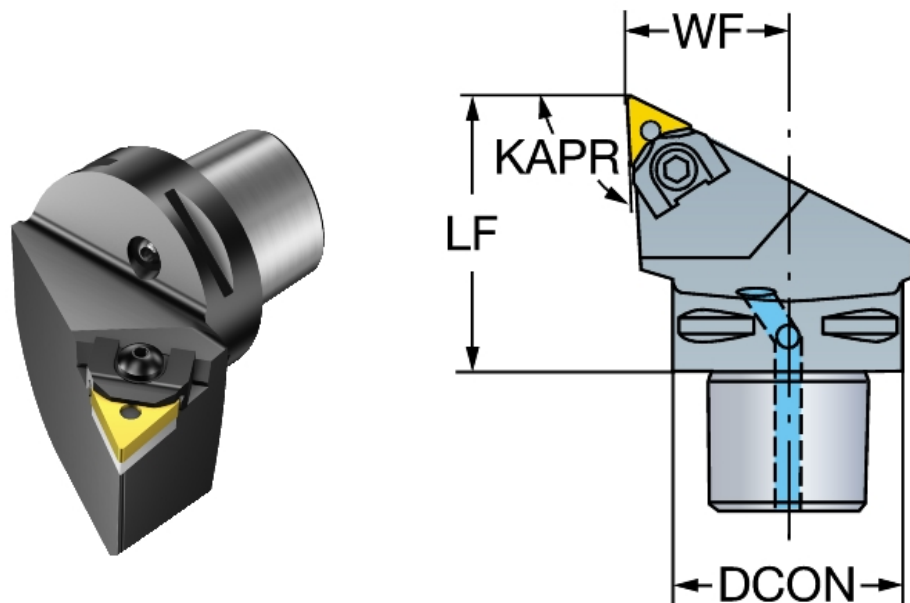
7.3 Nástroj

Nástrojom danej sústružníckej operácie je sústružnícky nôž s vymeniteľnou reznou doštičkou od spoločnosti Sandvik Coromant. Použité sú dva typy reznej doštičky, jeden na hrubovanie a jeden typ na dokončovaciu operáciu.

Podrobnejšie sa budem venovať vymeniteľnej reznej doštičke na dokončovaciu sústružnícku operáciu vzhľadom na to, že práve tá je predmetom optimalizácie.

Sústružnícky nôž

Jedná sa o sústružnícky nôž typu C4 - MTJNL - 27050 - 16. V tabuľke 7 sú uvedené základné parametre noža.



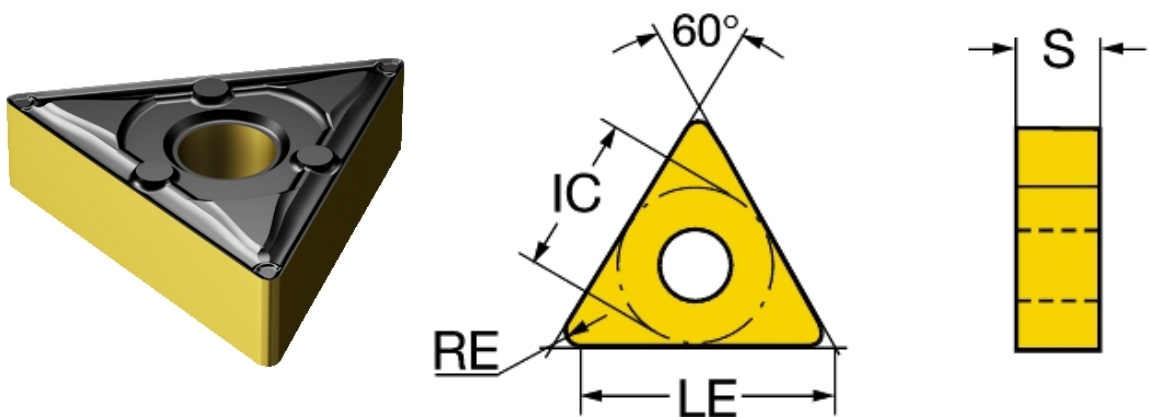
Obr. 34 : Sústružnícky nôž C4 - MTJNL - 27050 - 16 [17]

Tabuľka 7 : Parametre sústružníckeho noža C4 - MTJNL - 27050 - 16 [17]

KAPR [°]	Orientácia	WF [mm]	DCON [mm]	LF [mm]	Moment [Nm]
93	L	27	40	50	3,5

Vymeniteľná rezná doštička

Podobne ako telo noža, tak aj vymeniteľná rezná doštička je od firmy Sandvik Coromant. Jedná sa o reznú doštičku zo spekaného karbidu typu TNMX 16 04 04 - WF 4315. Táto rezná doštička je obojstranná a má 3 rezné hrany, možno ju teda šesť krát preupnúť. Doštička je povlakovaná technológiou CVD. Podstatné parametre tejto doštičky sú v tabuľke 8.



Obr. 35 : Vymeniteľná rezná doštička TNMX 16 04 04 - WF 4315 [18]

Tabuľka 8 : Parametre vymeniteľnej reznej doštičky TNMX 16 04 04 - WF 4315 [18]

IC [mm]	LE [mm]	Orientácia	S [mm]	RE [°]	a_p [mm]	f [mm]	v_c [m/min]
9,5	16	N	4,8	0,4	0,8	0,2	490

8 Optimalizácia rezných podmienok

V nasledujúcej kapitole sa budem venovať výpočtu optimálnych hodnôt, od optimálnej trvanlivosti po optimálne rezné podmienky. Výpočet optimálnych hodnôt bude podľa kritéria optimálnosti z hľadiska maximálnej produktivity.

8.1 Oblasť optimalizácie

Ako už bolo spomenuté, pre určenie optimálnych rezných podmienok bola vybraná dokončovacia operácia obrábania pravej strany piestnej tyče. Jednotlivé veličiny potrebné k výpočtu sú uvedené v tabuľke 9.

Tabuľka 9 : Súčasné hodnoty z výroby

Strojný čas v reze [min]	0,04
Strojný čas celkový [min]	0,06
Čas na výmenu nástroja [min]	2
Počet kusov na trvanlivosť nástroja [ks]	960

Koeficient rezania

Koeficient rezania vyjadruje pomer časov, kedy je rezná hrana nástroja opotrebovávaná (v reze) a kedy je mimo záber. Tento koeficient je vyjadrený nasledovne:

$$k_r = \frac{t_{AS\ rez}}{t_{AS\ celk}} = \frac{0,04}{0,06} = 0,67 [-] \quad (8.1)$$

Kde: $t_{AS\ rez}$ - je strojný čas v reze [min],

$t_{AS\ celk}$ - je celkový strojný čas [min].

Celkový strojný čas a čas, kedy je rezná hrana nástroja opotrebovávaná som určil na základe NC kódu danej sústružníckej operácie.

Trvanlivosť nástroja

Súčasná trvanlivosť nástroja je uvažovaná na 960 kusov. Vzhľadom na to, že je známy aj strojný čas na jeden kus, možno súčasnú trvanlivosť nástroja vypočítať.

$$T = k_s \cdot t_{AS\ celk} = 960 \cdot 0,06 = 57,6 \text{ min} \quad (8.2)$$

8.2 Výpočet optimalizovaných hodnôt

8.2.1 Optimálna trvanlivosť/životnosť

Optimálna trvanlivosť nástroja z hľadiska maximálnej produkcie možno vyjadriť podľa už skôr spomenutého vzťahu (5.6). Po dosadení vypočítaných hodnôt vychádza optimálna trvanlivosť takto:

$$T_{opt P} = 2 \cdot 0,67 \cdot 1,5 = 2,01 \text{ min} \quad (8.3)$$

8.2.2 Optimálna rezná rýchlosť

Optimálnu reznú rýchlosť možno získať zo vzťahu rovnosti pôvodnej trvanlivosti a reznej rýchlosti, a optimálnej trvanlivosti a reznej rýchlosti [8].

$$T_{pôv} \cdot v_{c\ pôv}^m = T_{opt P} \cdot v_{c\ opt}^m \quad (8.4)$$

$$v_{c\ opt} = \sqrt{\frac{T_{pôv} \cdot v_{c\ pôv}^m}{T_{opt P}}} \quad (8.5)$$

Kde: $v_{c\ pôv}$ - je pôvodná (súčasná) rezná rýchlosť [m/min],
 $v_{c\ opt}$ - optimálna rezná rýchlosť [m/min],
 $T_{pôv}$ - pôvodná (súčasná) trvanlivosť reznej hrany nástroja [min].

Ešte pred výpočtom optimálnej reznej rýchlosti je nutné zistiť aktuálnu reznú rýchlosť. Tú možno vypočítať na základe otáčok a obrábaného priemeru. Aktuálne otáčky stroja sú na hodnote $n = 5000$ ot/min, a obrábaný priemer je $D = 10,8$ mm.

$$v_{c\ p\hat{o}v} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 10,8 \cdot 5000}{1000} = 169,64 \text{ m/min} \quad (8.6)$$

Optimálna rezná rýchlosť podľa maximálnej produktivity je nasledujúca:

$$v_{c\ opt} = \sqrt[2,5]{\frac{57,6 \cdot 169,64^{2,5}}{2,01}} = 649,3 \text{ m/min} \quad (8.7)$$

Následne je nutné spočítať otáčky odpovedajúce danej reznej rýchlosti:

$$n_{opt} = \frac{v_{c\ opt} \cdot 10^3}{\pi \cdot D} = \frac{649,3 \cdot 10^3}{\pi \cdot 10,8} = 19\ 140 \text{ ot/min} \quad (8.8)$$

8.2.3 Posuv pre optimálne rezné podmienky

Vzhľadom na to, že predmetom optimalizácie je dokončovacia operácia, po ktorej musí obrobený povrch vykazovať drsnosť predpísanú na výkrese, pre výpočet posuvu volím empirický vzťah (5.19) vzhľadom na zlepšenie drsnosti obrobeného povrchu $Ra\ 3,2\ \mu\text{m}$. Polomer reznej hrany vymeniteľnej doštičky je $r_\epsilon = 0,4$ mm. Výpočet posuvu je nasledujúci:

$$\begin{aligned} f &= 0,1366 \cdot r_\epsilon^{0,4869} \cdot Ra_{max}^{0,5131} = 0,1366 \cdot 0,4^{0,4869} \cdot 3,2^{0,5131} = \\ &= 0,16 \text{ mm/ot} \end{aligned} \quad (8.9)$$

8.3 Porovnanie súčasných a optimálnych rezných podmienok

V nasledujúcej podkapitole medzi sebou porovnáam súčasné a optimálne rezné podmienky. Treba však zdôrazniť, že optimálne rezné podmienky sú bez uvažovania obmedzujúcich podmienok. Nasledujúca tabuľka 10 slúži na to, aby bolo zreteľné, koľko

strojného času možno ušetriť, pokiaľ nie sú rezné podmienky obmedzené napríklad maximálnymi otáčkami stroja. Všetky hodnoty sú počítané pre hĺbku rezu $a_p = 0,2$ mm.

Tabuľka 10 : Porovnanie súčasných a optimálnych rezných podmienok

	Súčasný	Optimálne
Trvanlivosť [min]	54,72	2,01
Rezná rýchlosť [m/min]	169,64	649,3
Otáčky [ot/min]	5000	19 140
Posuv [mm/ot]	0,2	0,16
Strojný čas [min]	0,06	0,013

8.4 Oblasť prípustných riešení

Ešte pred tým, než sa zdefiniuje oblasť prípustných riešení, je nutné určiť obmedzujúce podmienky, ktoré oblasť prípustných riešení ohraničia.

Volím nasledujúce obmedzujúce podmienky:

- obmedzenie dané maximálnymi otáčkami stroja,
- obmedzenie dané požadovanou drsnosťou obrobenej plochy.

Obmedzenie vychádzajúce z maximálneho posuvu stroja nebude uvažované z dôvodu, že obmedzenie dané požadovanou drsnosťou obrobenej plochy hodnotu posuvu obmedzí podstatne viac ako hodnota maximálneho posuvu stroja.

V grafe 1 je znázornená oblasť prípustných riešení pri uvažovaní spomenutých obmedzujúcich podmienok.



Graf 1 : Oblasť prípustných riešení

V oblasti prípustných riešení som nevyznačil minimálne hodnoty posuvu a otáčok vzhľadom k predpokladu, že optimálne hodnoty sa budú pohybovať na hranici maximálnych otáčok, respektíve maximálneho posuvu. Hodnoty určujúce oblasť prípustných riešení boli nasledujúce:

Tabuľka 11 : Hodnoty určujúce oblasť prípustných riešení

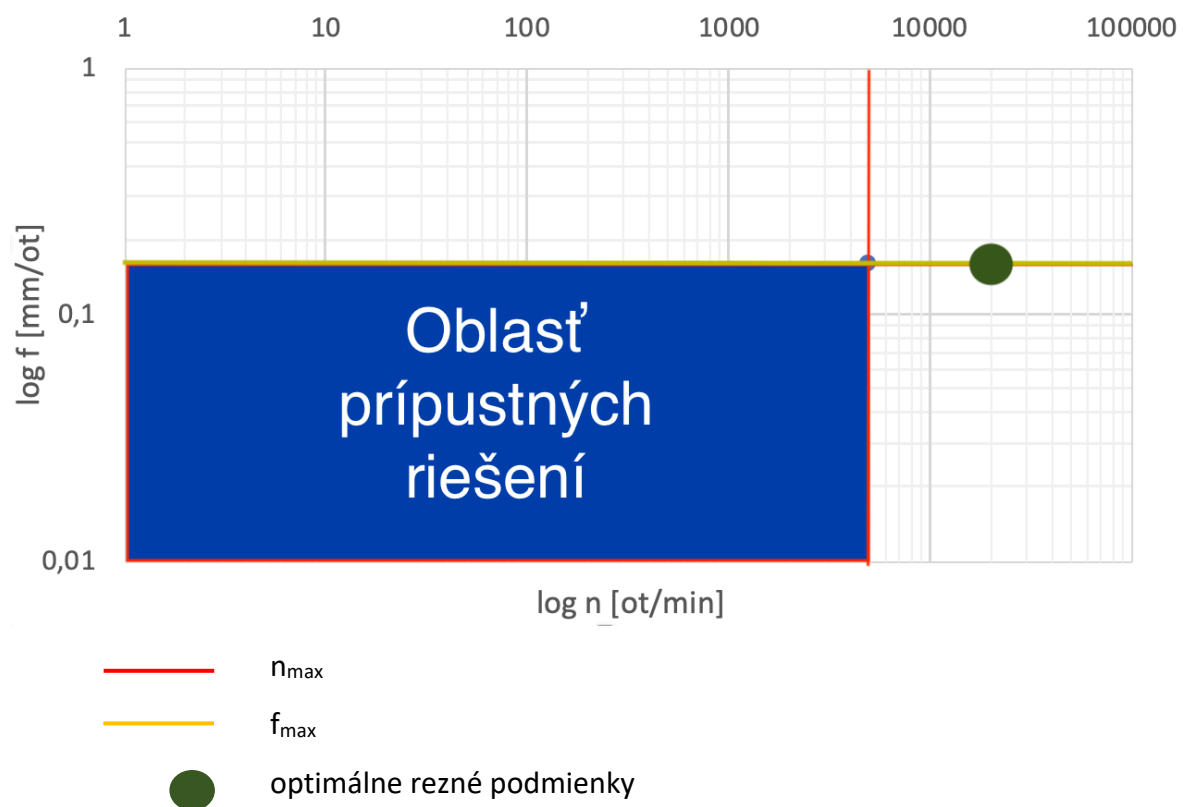
f_{\max} [mm/ot]	0,16
n_{\max} [ot/min]	5000

8.5 Kontrola oblasti prípustných riešení

Grafickým znázornením možno overiť, či optimálne rezné podmienky ležia v oblasti prípustných riešení. V prípade, že to tak nie je, je nutné tieto hodnoty znížiť na hodnoty odpovedajúce maximálnym prípustným pracovným podmienkam.

V mojom prípade sú týmito obmedzujúcimi podmienkami maximálny prípustný posuv z hľadiska dosiahnutia predpísanej drsnosti obrobenej plochy a taktiež maximálne otáčky stroja.

V grafe znázorňujúcom oblasť prípustných riešení sú vynesené hodnoty posuvu a otáčok, čím vzniká bod, ktorý napovedá o tom, či sa dané pracovné podmienky nachádzajú alebo nenachádzajú v oblasti prípustných riešení. Graf 2 teda slúži na kontrolu optimálnych podmienok v oblasti prípustných riešení, pričom v tabuľke 12 sú vypísané optimálne rezné podmienky vstupujúce do tohto grafu.



Graf 2 : Kontrola optimálnych rezných podmienok v oblasti prípustných hodnôt

Tabuľka 12 : Optimálne rezné podmienky

f_{max} [mm/ot]	0,16
n_{max} [ot/min]	19 140

Na základe grafu možno povedať, že optimálne otáčky výrazne prekročili tie, ktoré sú maximálne dosiahnuteľné strojom. Čo sa posuvu týka, ten je na hranici obmedzenia z hľadiska dodržania drsnosti obrobenej plochy a tým pádom ho možno považovať za vyhovujúci. V nasledujúcich tabuľkách 13 a 14 sú optimálne hodnoty porovnané s maximálnymi prípustnými.

Tabuľka 13 : Maximálne prípustné a optimálne hodnoty posuvov

f_{\max} [mm/ot]	\geq	f_{opt} [mm/ot]	
0,16	\geq	0,16	Vyhovuje

Tabuľka 14 : Maximálne prípustné a optimálne hodnoty otáčok

n_{\max} [mm/ot]	\geq	n_{opt} [mm/ot]	
5000	\geq	19 140	Nevyhovuje

Vzhľadom k tomu, že maximálne dosiahnuteľné otáčky na stroji sú 5000 ot/min, som nutný znížiť ich na túto hodnotu. S ohľadom na to, že v danej operácii nedochádza k odoberaniu veľkého objemu materiálu, nevzniká výraznejšie zaťaženie stroja a teda otáčky je možné zvoliť maximálne prípustné.

8.5.1 Optimalizácia rezných podmienok podľa oblasti prípustných riešení

Keďže došlo k zníženiu otáčok na maximálnu prípustnú hodnotu, je nutné pre túto optimalizovanú hodnotu prepočítať reznú rýchlosť a taktiež trvanlivosť reznej hrany nástroja.

$$v_{c*} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} = \frac{\pi \cdot 10,8 \cdot 5000}{10^3} = 169,64 \text{ m/min} \quad (8.10)$$

$$T_{\text{opt}*} = \frac{T_{\text{opt}P} \cdot v_{c\text{opt}}^m}{v_{c*}^m} = \frac{2,01 \cdot 649,3^{2,5}}{169,64^{2,5}} = 57,6 \text{ min} \quad (8.11)$$

Po výpočte optimalizovaných podmienok podľa oblasti prípustných riešení, je zjavné, že došlo k výraznému zníženiu reznej rýchlosti a tiež k zvýšeniu trvanlivosti reznej hrany nástroja na hodnoty viac než 57 minút.

Prepočítaná rezná rýchlosť a aj trvanlivosť sa zhodujú s hodnotami, ktoré sú v súčasnosti nastavené na stroji vo firme KMCZ. Z tohto pohľadu by sa dalo tvrdiť, že rezné podmienky, ktoré sú v súčasnosti nastavené na stroji, sú plne optimalizované z hľadiska maximálnej produktivity.

8.5.2 Overenie času výroby

Pri zadaní práce bola kladená požiadavka na skrátenie strojného času danej operácie. Po výpočte optimalizovaných hodnôt je nutné prepočítať hodnotu strojného času. V tabuľke 15 sú porovnané optimálne hodnoty s hodnotami, ktoré boli optimalizované pre oblasť prípustných riešení.

Tabuľka 15 : Porovnanie optimálnych a optimalizovaných rezných podmienok

Rezné podmienky	Optimálne	Optimalizované (podľa OPR)
Posuv [mm/ot]	0,16	0,16
Otáčky [ot/min]	19 140	5 000
Rezná rýchlosť [m/min]	649,3	169,64
Trvanlivosť [min]	2,01	57,6
Strojný čas [min]	0,013	0,07

Ako možno vidieť, po prepočte rezných podmienok sa strojný čas zvýšil z približne 0,8 sekundy na hodnotu vyše 4 sekúnd. Príčinou sú predovšetkým maximálne prípustné otáčky stroja, ktoré neumožňujú navýšenie reznej rýchlosti.

Ďalším obmedzujúcim faktorom je hodnota posuvu, ktorá bola určená s ohľadom na dodržanie požadovanej drsnosti obrobenej plochy. Optimalizovaná hodnota posuvu $f=0,16\text{mm/ot}$ znamená dokonca pokles posuvu oproti súčasnému stavu. Vzhľadom na to, že sa jedná o empirický vzťah určujúci hodnotu tejto veličiny, nemusí táto hodnota znamenať definitívnu hranicu, nad ktorou už nemožno navyšovať posuv vzhľadom na dodržanie drsnosti. Tento spôsob výpočtu berie do úvahy drsnosť obrobenej plochy a polomer rohu nástroja, avšak nepočíta s rôznou geometriou vymeniteľnej reznej doštičky, prípadne druhom obrábaného materiálu.

Podľa výrobcu danej vymeniteľnej reznej doštičky, na dosiahnutie požadovanej drsnosti obrobenej plochy, je optimálna hodnota posuvu na úrovni približne $f = 0,2\text{ mm}$, čo je určité navýšenie oproti optimalizovanej hodnote vyplývajúcej z výpočtov.

Z tohto dôvodu navrhujem zvýšiť posuv nad optimalizovanú hodnotu so zámerom o zníženie strojného času na danú operáciu.

9 Overenie voľby rezných podmienok

Z vypočítaných a optimalizovaných rezných podmienok vyplýva, že pri súčasnom strojnom vybavení nie je možné pri dodržaní požiadavky na skrátenie výrobného taktu vždy dodržať požadovanú drsnosť obrobenej plochy. Predovšetkým fakt, že drsnosť obrobenej plochy vstupuje do empirického vzťahu určujúceho optimálnu hodnotu posuvu, je vysoko obmedzujúci na akékoľvek skrátenie strojného času.

Obmedzujúce sú taktiež maximálne otáčky stroja, ktoré sú na úrovni 5000 ot/min. Keďže sú otáčky priamo úmerné reznej rýchlosti, nie je možné dosiahnuť vyššiu reznú rýchlosť než je súčasná.

Na základe týchto skutočností navrhujem zvýšenie posuvu nad optimalizovanú hodnotu. V navýšení posuvu vidím možnosti na skrátenie strojného času. Keďže príliš vysoké navýšenie posuvu spravidla znamená aj zvýšenie drsnosti obrobenej plochy a taktiež sa môže negatívne podieľať na tvorbe triesky, predmetom nasledujúceho experimentu bude práve monitorovanie týchto dvoch skutočností pri rôznych hodnotách posuvu.

9.1 Popis experimentu

Experiment bude spočívať v hodnotení drsnosti obrobenej plochy a taktiež bude pozorovaná trieska tvoriaca sa pri daných rezných podmienkach.

Otáčky stroja zostanú na hodnote 5000 ot/min keďže zníženie otáčok by malo za následok zníženie reznej rýchlosti a tým pádom navýšenie strojného času. Hĺbka rezu a_p bude na hodnote 0,4 mm. Vzhľadom na to, že trieska je odoberaná v jednom reze, zmena hĺbky rezu na nižšie hodnoty by znamenala niekoľkonásobné navýšenie strojného času pre danú sústružnícku operáciu.

Hodnota posuvu bude menená od 0,15 mm až po hodnoty 0,35 mm s navýšovaním o 0,05 mm. Podľa výrobcu vymeniteľnej reznej doštičky je optimálna hodnota posuvu pre danú drsnosť obrobenej plochy na úrovni $f = 0,204$, čo sa zhoduje s hodnotou posuvu aktuálne používanou na sústruženie piestnych tyčí.

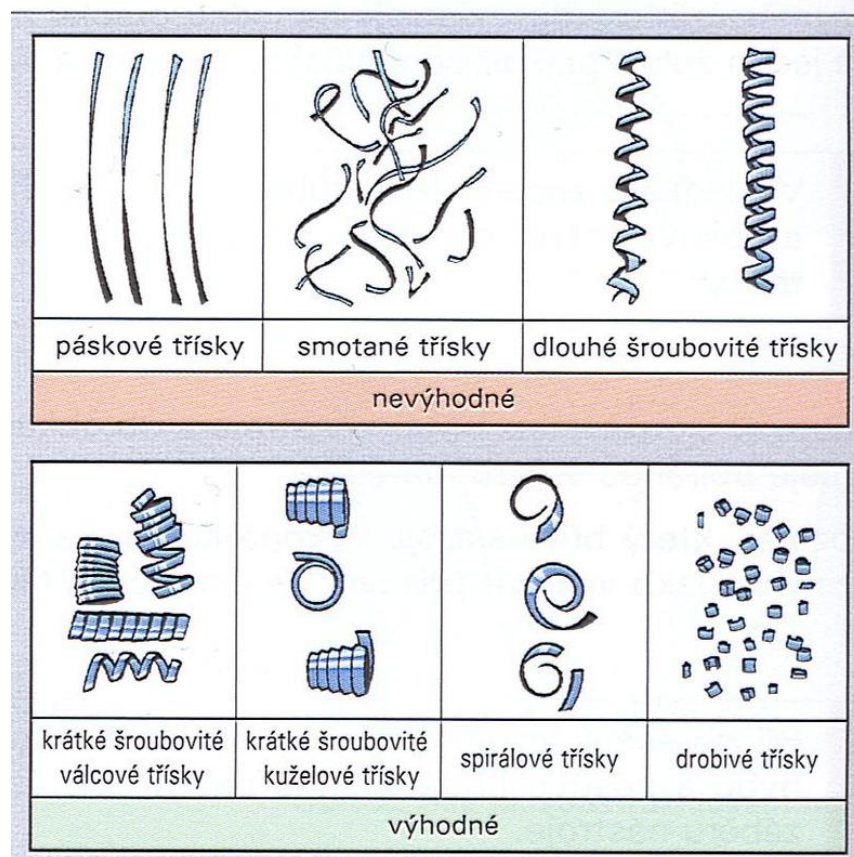
9.2 Vyhodnotenie tvaru triesky

Vyhodnocovanie tvaru triesky je podstatné z niekoľkých dôvodov. Predovšetkým pri obrábaní na automatických strojoch v sériovej výrobe je dôležité, aby vzniknutá trieska bola

ľahko odstrániteľná a tým pádom aby nespôsobovala prípadné kolízie obrábacieho procesu.

Trieska je taktiež dôležitým faktorom efektívneho využitia nástroja a dosiahnutia predpísanej kvality obrobku, pričom plynulá trieska môže napríklad zhoršovať štruktúru obrobeného povrchu. Z týchto dôvodov je vhodné dosiahnuť delenie triesky na jednotlivé elementy [1].

Trieska môže byť buď drobná, článkovitá alebo plynulá. Jednotlivé tvary triesok sú na obrázku 36.



Obr. 36 : Tvary triesok [19]

Tvory triesok sú rozdelené nasledovne:

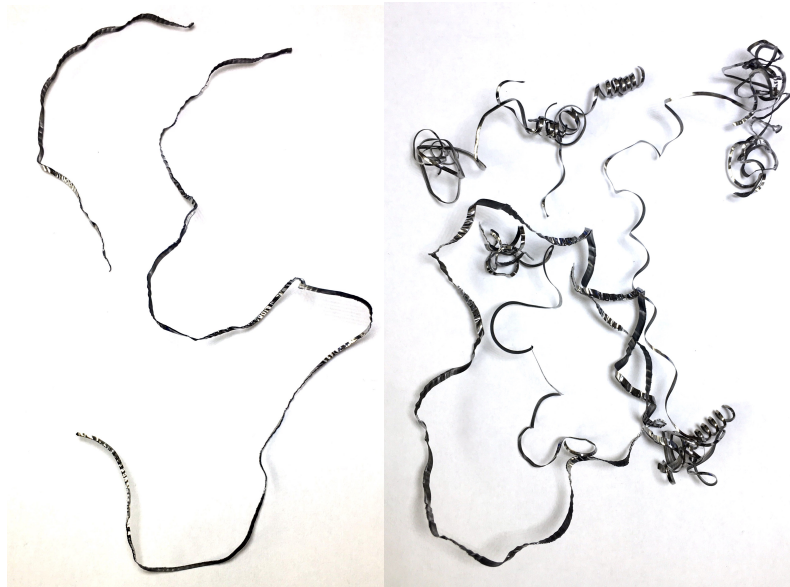
Výhodné triesky:

- krátke skrutkovité valcové triesky (KSVT)
- krátke skrutkovité kuželové triesky (KSKT)
- špirálové triesky (ŠT)

- drobivé triesky (DT)

Nevýhodné triesky

- páskové triesky (PT)
- zmotané triesky (ZT)
- dlhé skrutkovité triesky (DST)



Obr. 37 : Pásková trieska a zmotaná trieska

Na obrázku 37 možno vidieť príklad najčastejšie sa tvoriacej triesky.

V tabuľke 16 som zohľadnil tvar triesky s meniacimi sa hodnotami posuvu. Otáčky stroja boli pre každú operáciu na úrovni 5000 ot/min a hĺbka rezu $a_p = 0,4$ mm.

Tabuľka 16 : Vizuálne hodnotenie tvaru triesky

Č. vzorky	f [mm/ot]	Tvar triesky
1	0,15	ŠT, ZT
2	0,2	ŠT, ZT
3	0,25	KSVT, PT
4	0,3	KSKT, ZT, PT
5	0,35	KSKT, ZT, PT

Na základe vyhodnotenie tvaru triesok možno tvrdiť, že prakticky vo všetkých prípadoch sa tvorila nevýhodná pásková alebo zmotaná trieska. Pri vyšších rýchlostiach som pozoroval aj tvorbu kratšej, skrutkovitej triesky.

Po dohovore s technológom som sa dozvedel, že trieska, ktorá sa tvorí pri súčasnej výrobe, je vždy plynulejšia. Avšak pri testoch nedochádzalo k žiadnemu namotávaní triesky na obrobok. Tento negatívny fakt by mohol byť spôsobený napríklad skutočnosťou, že sa jedná o obrábanie húževnatého materiálu.

9.3 Meranie drsnosti obrobenej plochy

Výsledná drsnosť obrobenej plochy je kľúčovým faktorom, keďže výsledná drsnosť nesmie byť vyššia ako je tá, ktorá je predpísaná na výkrese, teda $R_a 3,2 \mu\text{m}$.

Drsnosť bola vyhodnotená na Ústave technológii obrábění, projektování a metrológie, na Fakulte strojní ČVUT v Praze. Konkrétne sa jednalo o prenosný drsnometer spoločnosti Mahr, Marsurf PS. V tabuľke 17 sú namerané drsnosti pre jednotlivé hodnoty posuvov od 0,15 až po 0,35 mm/ot.

Tabuľka 17 : Dosahované drsnosti pre jednotlivé hodnoty posuvov

Č. vzorky	f [mm/ot]	Drsnosť R_a [μm]					
		1. meranie	2. meranie	3. meranie	4. meranie	5. meranie	Priemer
1	0,15	0,557	0,595	0,5	0,548	0,62	0,564
2	0,2	0,88	1,083	1,029	1,14	1,087	1,044
3	0,25	0,981	0,939	0,953	0,939	1,083	0,979
4	0,3	1,509	1,44	1,587	1,464	1,419	1,484
5	0,35	2,934	3,296	3,316	3,27	3,267	3,217

Na základe nameraných a spriemerovaných hodnôt drsností možno konštatovať, že až do hranice posuvu $f = 0.3 \text{ mm/ot}$, je drsnosť obrobenej plochy na vyhovujúcej hranici $R_a 1,484 \mu\text{m}$. Až pri posuve $f = 0,35 \text{ mm/ot}$ presiahla drsnosť obrobenej plochy predpísanú hodnotu. Práve najvyššia hodnota posuvu sa javí ako hraničná pre dosiahnutie predpísanej drsnosti, avšak už nevyhovujúca.

Zaujímavosťou je meranie 3. vzorky, kde meranie drsnosti vykazuje nižšie hodnoty ako pri meraní 2. vzorky. Vzhľadom na navýšenie posuvu by som predpokladal zvyšovanie hodnoty drsnosti tak, ako je tomu pri ostatných vzorkách.

V súčasnosti používaná hodnota posuvu $f = 0,2$ mm/ot je z hľadiska drsnosti obrobenej plochy až príliš prísna, keďže hodnota predpísaná na výkrese je $Ra\ 3,2\ \mu\text{m}$ v porovnaní s nameranou hodnotou $Ra\ 1,044\ \mu\text{m}$.

Na základe spomenutých aspektov navrhujem navýšiť hodnotu posuvu na hranicu $0,3$ mm/ot, čím dôjde k skráteniu strojného času pri rovnakej reznej rýchlosti a zároveň bude dodržaná predpísaná drsnosť obrobenej plochy.



Obr. 38 : Meranie drsnosti obrobenej plochy

9.4 Výpočet životnosti nástroja

Pre optimalizované rezné podmienky teraz možno určiť celkovú životnosť nástroja, teda vymeniteľnej reznej doštičky. Životnosť je v podstate súčet trvanlivostí, ktoré možno realizovať na danom nástroji. Životnosť pre vymeniteľnú reznú doštičku, ktorá sa už nepreostroje bola podrobnejšie popísaná v podkapitole 5.1.3.

Súčiniteľ využitia reznej doštičky sa volí v rozsahu $0,95$ až $0,7$ v závislosti na podmienkach obrábania. Vzhľadom na to, že sa jedná o obrábanie tepelne upraveného materiálu, volím súčiniteľ $0,7$.

Celková životnosť vymeniteľnej reznej doštičky pre optimalizované rezné podmienky je nasledovná:

$$Z = 6 \cdot 57,6 \cdot 0,7 = 241,9 \text{ min} \quad (9.1)$$

Pri trvanlivosti $T = 57,6$ min a reznej doštičke so šiestimi reznými hranami je výsledná životnosť nástroja približne 242 minút. Pri týchto podmienkach je dosahovaná rezná rýchlosť $v_c = 169,64$ m/min.

9.5 Porovnanie pracovných podmienok

V tabuľke 18 sú porovnané súčasné a navrhované pracovné podmienky. Ako možno vidieť, otáčky a rezná rýchlosť sú nezmenené. Ako už bolo spomenuté, navýšenie otáčok nie je možné, keďže stroj už pracuje na maximálnych prípustných otáčkach. Nezmenená ostáva aj trvanlivosť reznej hrany nástroja. Zmenená, respektíve navýšená je hodnota posuvu, a to na hodnotu $f = 0,3$ mm/ot.

Tabuľka 18 : Porovnanie súčasných a navrhovaných pracovných podmienok

Pracovné podmienky	Súčasný	Navrhovaný
Posuv [mm/ot]	0,2	0,3
Otáčky [ot/min]	5 000	5 000
Rezná rýchlosť [m/min]	169,6	169,6
Trvanlivosť [min]	57,6	57,6

9.6 Porovnanie výrobných časov

Zmenou hodnoty posuvu je možné skrátiť strojný čas, a to aj napriek tomu, že rezná rýchlosť zostane nezmenená podobne ako trvanlivosť nástroja.

Tabuľka 19 : Porovnanie výrobných časov

	súčasný	navrhovaný
t_{AS}	3,6	2,8
Celková úspora času na ks [s]		0,8
Celková úspora času na ks [%]		22,2

Ako možno vidieť v tabuľke 19, pri použití navrhovaných pracovných podmienok dochádza k skráteniu strojného času o 0,8 sekundy, čo zároveň predstavuje úsporu času na výrobu jedného kusu približne o 22 %.

10 Návrhy na zlepšenie procesu

Ako najviac obmedzujúcim faktorom pri danej optimalizácii sa javí stroj. Konkrétne jeho maximálne prípustné otáčky, ktoré sú na hranici 5000 ot/min a tak je možné dosiahnuť podstatne nižšiu reznú rýchlosť než je optimálna hodnota z pohľadu maximálnej produkcie. Z toho dôvodu vidím ako jednu z možností na skrátenie taktu linky nákup strojného vybavenia, vďaka ktorému by bolo možné zvýšiť otáčky a tým pádom aj reznú rýchlosť. Avšak bolo by nutné zvoliť iného výrobcu strojov, keďže firma Danobat vyrába len jeden typ stroja zameraného na obrábanie tlmičov automobilov.

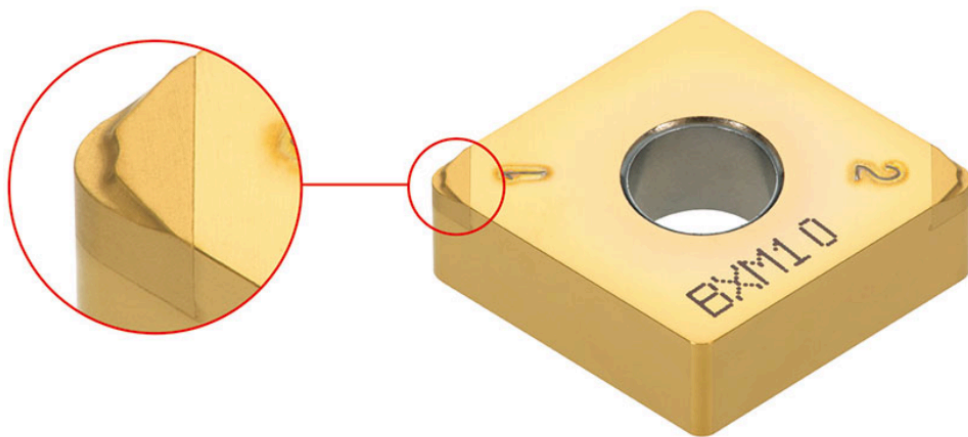
Ďalším krokom na zlepšení procesu sústruženia danej súčasti je voľba iného nástroja. Trh v súčasnosti ponúka široký výber vymeniteľných rezných doštičiek s rôznymi geometriami, utváračmi a lámačmi triesok. Voľba vhodnejšej reznej doštičky by mohla zlepšiť tvorbu triesky, ktorá v súčasnej výrobe nie je ideálna a zároveň by bolo možné aj zlepšiť kvalitu obrobenej plochy. Medzi najväčších výrobcov nástrojov patrí:

- Sandvik Coromant
- Seco Tools
- Pramet Tools
- Iscar

Vymeniteľná rezná doštička, ktorá je v súčasnosti používanú na danú sústružnícku operáciu, od spoločnosti Sandvik Coromant, obsahuje lámač triesok typu WF a taktiež je prítomný hladiaci segment. Podľa výrobcu doštičky, pre dosiahnutie najlepšej kvality povrchu, je ideálna rezná rýchlosť na úrovni 487 m/min. Vzhľadom na nemožnosť dosiahnutia takto vysokej reznej rýchlosti kvôli obmedzeniu stroja, nie je možné obrobiť súčasť s lepšou kvalitou povrchu. Čo sa týka utvárania a lámania triesky, výrobca ponúka viac než 50 rôznych typov lámačov triesok, takže vhodné by bolo vyskúšať na danú sústružnícku operáciu aj jeden z iných typov doštičiek, respektíve lámačov triesok [18].

Ďalšou možnosťou na zlepšenie procesu by mohla byť aj voľba nástroja od konkurenčného výrobcu. Medzi najinovatívnejšie nástroje určené na obrábanie kalených

ocelí patria aj rezné doštičky od spoločnosti Tungaloy. Portfólio rezných doštičiek typu T-CBN ponúka inovatívne riešenie v podobe oddelenia lámača triesky od reznej hrany, vďaka čomu je predĺžená životnosť nástroja. Vďaka lámaču triesok typu HP je taktiež zaistená vynikajúca kvalita povrchu a dobre útváranie triesky. Tento typ nástroja je znázornený na obrázku 39.



Obr. 39 : Rezná doštička firmy Tungaloy so špeciálnym utváračom triesky typu HP [20]

Pre sústruženie kalených ocelí bol špeciálne vyvinutý ďalší nástroj tejto firmy, ktorý nesie označenie WavyJoint. Jedná sa o reznú doštičku s hrotom z kubického nitridu bóru (CBN) so špeciálnou technológiou spájkovania, vďaka čomu je eliminované odtrhnutie či vznikanie trhlín na reznej hrane nástroja. Na obrázku 40 je táto technológia spájkovania porovnaná s konvenčne používanou. [20].



Obr. 40 : Rezná doštička s hrotom z kubického nitridu bóru so špeciálnou technológiou spájkovania [20]

Vďaka vyššie spomenutým nástrojom by bolo možné zaistiť produktívnejšie obrábanie piestnych tyčí, ktoré sú tepelne upravené. Treba však spomenúť, že cena reznej doštičky z kubického nitridu bóru je niekoľkonásobne vyššia oproti doštičkám zo spekaného karbidu, a tak prípadnú investíciu do takýchto nástrojov je nutné zvážiť vzhľadom na celkové náklady výroby.

11 Záver

Úlohou tejto diplomovej práce bolo optimalizovať proces sústruženia vo firme KYB Manufacturing Czech s.r.o. na súčasti, ktorá bola tepelne spracovaná. Optimalizácia bola uskutočnená na dutej piestnej tyči s ohľadom na výrobný čas a dodržanie predpísanej drsnosti obrobeného povrchu.

Úvodné kapitoly boli venované problematike procesu sústruženia a tepelnému spracovaniu ocelí. Taktiež bol spomenutý vplyv tepelne spracovaných ocelí na proces sústruženia.

Hlavná časť práce je venovaná optimalizácii obrábacieho procesu. Postupne je rozobraná problematika optimalizácie obrábacieho nástroja a optimalizácia rezných podmienok, kde sú popísané jednotlivé kritéria optimálnosti. Spomenuté sú taktiež jednotlivé obmedzujúce podmienky a s nimi súvisiaca oblasť prípustných riešení.

Ďalej som sa už v práci venoval optimalizácii rezných podmienok pre konkrétnu vyrábanú súčasť, ktorou je dutá piestna tyč tmiča automobilu. Okrem súčasti bol detailnejšie popísaný aj jej samotný postup výroby, nástroj a stroj, ktorý je použitý pri výrobe. Optimalizácia bola vykonaná podľa kritéria optimálnosti z hľadiska maximálnej produkcie. Zo zadaných vstupných údajov bola postupne vypočítaná optimalizovaná trvanlivosť reznej hrany nástroja a rezná rýchlosť. Po zistení optimálnych rezných podmienok nasledovala kontrola oblasti prípustných riešení a následná úprava rezných podmienok.

V závere práce je popísaný experiment, ktorý mal za úlohu overiť voľbu rezných podmienok. Pre jednotlivé voľby rezných podmienok bola pozorovaná tvoriaca sa trieska a drsnosť obrobenej plochy. Pre voľbu rezných podmienok je zhodnotená časová úspora na danú operáciu oproti súčasnému stavu z výroby. Spomenuté sú aj ďalšie návrhy na zlepšenie procesu výroby danej súčasti.

Z výsledkov vychádzajúcich z optimalizácie rezných podmienok vyplýva, že rezná rýchlosť by mala byť navýšená zo 169 m/min až na 649 m/min, pričom trvanlivosť reznej hrany nástroja klesla na hodnotu približne 2 minúty oproti súčasným viac než 57 minútam. Avšak po kontrole oblasti prípustných riešení bolo nutné reznú rýchlosť znížiť, keďže optimálne otáčky dosahovali hodnotu viac než 19 000 ot/min, čo je oproti maximálnym prípustným z hľadiska stroja viac než trojnásobok. Optimálna hodnota posuvu so zreteľom

na dodržanie predpísanej drsnosti obrobenej plochy bola na úrovni 0,16 mm/ot. Pri použití takto optimalizovaných rezných podmienok by nastal dokonca nárast strojného času oproti súčasnému stavu.

Aby bola splnená požiadavka na skrátenie strojného času, navrhnutá bola zmena hodnoty posuvu. Ako bolo spomenuté v práci, pri výpočte optimálnej hodnoty posuvu bol použitý empirický vzťah, ktorý napríklad nezohľadňuje aký materiál je obrábaný, alebo aký typ utvárača triesky má daná rezná doštička. Práve navýšením posuvu by bolo možné skrátiť strojný čas, čo bolo aj predmetom experimentu. Oproti optimálnemu posuvu 0,16 mm/ot a súčasnému používanému 0,2 mm/ot bolo experimentom dokázané, že pre obrobenie plochy s dodržaním predpísanej drsnosti, možno s danou reznou doštičkou obrábať s posuvom až 0,3 mm/ot pri zachovaní pôvodnej reznej rýchlosti v_c a hĺbky rezu a_p . Vďaka tomu je možné dosiahnuť skrátenie strojného času na jeden kus približne o 22 %. Pri navýšení posuvu aj pre druhú dokončovaciu operáciu by bolo možné dosiahnuť ďalšieho skrátenie času pri sústružení piestnej tyče čo by znamenalo aj značné skrátenie výrobného taktu linky.

Zoznam použitej literatúry

- [1] HUMÁR, Anton. *Technologie 1: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ - 1.ČASŤ*.
- [2] VASILKO, Karol, Michal HAVRILA, Jozef NOVÁK-MARCINČIN, Jan MÁDL a Jozef ZAJAC. *TOP trendy v obrábání: Ill.část- Technológia obrábania*.
- [3] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: ČVUT, 1989. 156 s.
- [4] KVASNIČKA, Ivo, Vladimír SLAVÍK a Lubomír ŠTAJNOCHR. *Obráběcí nástroje*. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01755-9.
- [5] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Strojírenské materiály*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02798-8.
- [6] VÁŇOVÁ, P., *Základy tepelného zpracování*. Studijní opory. VŠB-TUO Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství [online]. [cit. 18.5.2019] 128 s. Dostupné z www: http://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/636-Vanova_ZTZ.pdf
- [7] MOLÍKOVÁ, E., *Nauka o materiálu – Distanční výuka* [online] 2010. [cit. 20.5.2019]. Dostupné z www: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/nomd/Index.html>
- [8] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01864-6
- [9] *Nástroje pro soustružení kalených součástí*. *Techmagazín*. 2018.
- [10] MÁDL, Jan. *Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění*. Praha: ČVUT, 1988.
- [11] *Řezné podmínky při obrábění: podklady pro výuku předmětu Technologie III - Obrábění* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_rp.pdf
- [12] *Geometrie břitu nástroje - Coptel: Teorie soustružení* [online]. [cit. 2019-06-19]. Dostupné z: coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=39456&revision=-1&instance=
- [13] KYB Manufacturing Czech s.r.o. [online]. [cit. 2019-06-19]. Dostupné z: <http://www.kmcz.cz/o-nas.html>
- [14] KYB Manufacturing Czech s.r.o.: *Seznámení s KMCZ* [online]. [cit. 2019-06-19]. Dostupné z: <http://www.kmcz.cz/filedownloads-70-15daacf0fd25>
- [15] *TECHNICKÉ NORMY: ČSN EN 10305-2 (420093)* [online]. [cit. 2019-06-19]. Dostupné z: http://www.technicke-normy-csn.cz/420093-csn-en-10305-2_4_86530.html

- [16] *KAYABA: Complete solution for machining automotive shock absorbers* [online]. [cit. 2019-06-19]. Dostupné z: <https://www.danobatgroup.com/en/kayaba>
- [17] *C4-MTJNL-27050-16: Řezná jednotka T-Max®P pro soustružení* [online]. [cit. 2019-06-19]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=C4-MTJNL-27050-16>
- [18] *TNMX 16 04 04-WF 4315: Soustružnické břitové destičky T-Max®P* [online]. [cit. 2019-06-19]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=TNMX%2016%2004%2004-WF%20%20%20%204315>
- [19] *Tvar třísky a geometrie nástroje* [online]. [cit. 2019-06-19]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1816>
- [20] *TurnLine: T-CBN SERIES* [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <https://www.tungaloy.com/product/t-cbn-series/>